



ANÁLISE DA DERIVA DE MICROPLÁSTICOS NA LAGOA DE ARARUAMA -  
RJ

Raphael de Oliveira Benevides

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2024

ANÁLISE DA DERIVA DE MICROPLÁSTICOS NA LAGOA DE ARARUAMA -  
RJ

Raphael de Oliveira Benevides

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Aprovada por: Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman

Prof. Afonso Augusto Magalhães de Araujo

Prof. Marcos Nicolas Gallo

Dra. Lidiane dos Santos Lima

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2024

Benevides, Raphael de Oliveira

Análise da deriva de microplásticos na Lagoa de Araruama - RJ / Raphael de Oliveira Benevides. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XVI, 109 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 103-109.

1. microplásticos. 2. Lagoa de Araruama. 3. transporte.  
I. Rosman, Paulo Cesar Colonna. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

*Tudo e sempre dedicado à Alice.*

# Agradecimentos

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha esposa, Danielle Cardinot de Carvalho, por todo o apoio nesta jornada e pela compreensão durante os momentos de ausência ao longo da realização deste trabalho.

Agradeço também aos Comandantes Marcos Tonelli e Victor Daher, bem como à Marinha do Brasil, por acreditarem em mim e me concederem esta oportunidade.

Aos antigos amigos do trabalho, Elson e Washington, pelo incentivo.

Aos amigos que fiz na Costeira durante o curso, Marise, Thiago, Roberta, Bernardo, Victor e Aron, meu sincero agradecimento pela camaradagem e apoio.

Por fim, sou grato ao meu orientador, Paulo Rosman, pelos conhecimentos transmitidos, pela constante disponibilidade e pela paciência ao longo de todo o processo.

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

ANÁLISE DA DERIVA DE MICROPLÁSTICOS NA LAGOA DE ARARUAMA -  
RJ

Raphael de Oliveira Benevides

Dezembro/2024

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho apresenta uma análise sobre o transporte de microplásticos na Lagoa de Araruama, RJ. Em relação à densidade da água no local, considerou-se microplásticos leves, que boiam, neutros, que ficam distribuídos na coluna d'água, e densos que tendem a ir para o fundo, podendo se depositar e serem ressuspensos.

O trabalho foi desenvolvido com suporte de uma modelagem hidrodinâmica 3D utilizando o SisBaHiA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. A partir do modelo hidrodinâmico, foram construídos modelos de transporte lagrangeanos para analisar o transporte de microplásticos na lagoa. Foram feitos modelos considerando o transporte na camada superficial para os microplásticos leves; modelos médios na coluna d'água para os microplásticos neutros; e modelos considerando a camada de fundo para os microplásticos densos. Os resultados hidrodinâmicos mostraram que na parte mais interna da lagoa a principal força motriz do escoamento são os ventos, que sopram predominantemente de nordeste, ao passo que nas proximidades do Canal de Itajuru as marés são mais importantes. O estudo permitiu identificar que os microplásticos leves tendem a ser transportados e acumulados na margem sul da lagoa; os microplásticos neutros tendem a ficar presos em vórtices que ocorrem nas diversas enseadas da lagoa; e os microplásticos densos tendem a se acumular na margem norte, perto de suas fontes. Foi constatado que a lagoa acumula microplásticos em vez de exportá-los para o mar.

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

## ANALYSIS OF MICROPLASTIC DRIFT IN THE ARARUAMA LAGOON - RJ

Raphael de Oliveira Benevides

December/2024

Advisor: Paulo Cesar Colonna Rosman

Department: Ocean Engineering

This study presents an analysis of microplastic transport in Araruama Lagoon, RJ. Microplastics were categorized by density relative to local water: light, which float; neutral, which are distributed throughout the water column; and dense, which tend to sink, possibly depositing and later resuspending.

This work was supported by a 3D hydrodynamic model developed with SisBaHiA – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. Based on the hydrodynamic model, lagrangian transport models were constructed to analyze microplastic transport in the lagoon. Separate models simulated surface transport for light microplastics, mid-water column transport for neutral microplastics, and bottom-layer transport for dense microplastics. Hydrodynamic results showed that in the inner lagoon, the primary driving force of flow is the wind, predominantly from the northeast, while tidal forces are more influential near the Itajuru Channel. Findings indicate that light microplastics tend to be transported and accumulate along the lagoon's southern margin; neutral microplastics become trapped in vortices forming in various coves; and dense microplastics tend to accumulate along the northern margin, near their sources. It was found that the lagoon accumulates microplastics rather than exporting them to the sea.

# Sumário

Lista de figuras .....	x
Lista de tabelas .....	xvi
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação .....	3
1.2 Objetivos.....	4
2 Revisão Bibliográfica .....	5
2.1 Região dos lagos.....	5
2.1.1 Histórico da região.....	5
2.1.2 Cidades envolvidas .....	8
2.1.3 Lagoa de Araruama .....	11
2.2 Microplásticos .....	13
2.2.1 Transporte de microplásticos.....	17
2.2.2 Densidade relativa devido ao corpo d'água hipersalino .....	21
2.3 Sistema de modelagem adotado .....	23
2.3.1 Considerações matemáticas sobre o modelo hidrodinâmico .....	26
2.3.2 Considerações matemáticas sobre o modelo lagrangeano.....	27
3 Metodologia.....	31
3.1 Modelagem digital do terreno .....	32
3.2 Modelo hidrodinâmico .....	34
3.2.1 Marés e ventos .....	35
3.2.2 Escolha do período de análise .....	38
3.3 Calibração do modelo .....	42
3.4 Modelo de transporte lagrangeano .....	45
3.4.1 Fontes de microplásticos .....	48
3.4.2 Estimativa de microplásticos lançados na Lagoa de Araruama .....	50

4	Análises de modelagem hidrodinâmica.....	53
4.1	Análises da variação de níveis na Lagoa de Araruama.....	53
4.2	Análises da circulação hidrodinâmica na Lagoa de Araruama.....	56
5	Análise do transporte e destino de microplásticos.....	65
5.1	Sobre microplásticos na água e absorção no litoral.....	65
5.1.1	Sobre o transporte e destino dos microplásticos leves.....	65
5.1.2	Sobre o transporte e destino dos microplásticos neutros.....	70
5.2	Sobre porcentagem de passagem durante o tempo da simulação.....	74
5.2.1	Sobre o tempo de passagem dos microplásticos leves.....	74
5.2.2	Sobre o tempo de passagem dos microplásticos neutros.....	78
5.2.3	Sobre o tempo de passagem dos microplásticos densos.....	82
5.3	Sobre concentrações de microplásticos.....	86
5.3.1	Sobre concentrações de microplásticos leves.....	87
5.3.2	Sobre concentrações de microplásticos neutros.....	90
5.4	Sobre microplásticos densos e deposição no fundo.....	94
6	Conclusões.....	99
6.1	Conclusões relativas aos microplásticos.....	99
6.2	Conclusões relativas às regiões da Lagoa de Araruama.....	100
6.3	Recomendações.....	101
	Referências Bibliográficas.....	103

# Lista de figuras

Figura 2.1: Evolução do número de habitantes dos municípios da Região dos Lagos, envolvidos na análise, desde 1940 até 2022. ....	10
Figura 2.2: Imagens ilustrativas da região de análise, retiradas do site da Condetur da Costa do Sol.....	10
Figura 2.3: Mecanismos de transporte de microplásticos através de interações biológicas.....	15
Figura 2.4: Velocidades de transporte dos diferentes tipos de microplásticos.....	19
Figura 2.5: Densidade da água em função da salinidade variando de zero a 70 calculada pela fórmula de Eckart, mesma que o SisBaHiA utiliza em seus cálculos. A temperatura de referência utilizada foi de 23 °C. ....	22
Figura 2.6: Tela de abertura do SisBaHiA, que deu suporte as análises realizadas neste trabalho. ....	24
Figura 2.7: Desenho esquemático de um deslocamento composto por uma parte advectiva e outra difusiva. As setas verdes são os possíveis deslocamentos difusivos que não foram sorteados.....	30
Figura 3.1: Região de análise contendo a Lagoa de Araruama e a zona litorânea na saída do canal de Itajuru. ....	31
Figura 3.2: Malha de discretização do domínio em elementos finitos. A área do domínio de modelagem é de 252 km <sup>2</sup> . ....	33
Figura 3.3: Batimetria da região de análise, contendo a Lagoa de Araruama e a região costeira adjacente.....	34
Figura 3.4: Posição das estações utilizadas para extração de informações de ventos, evaporação e marés.....	36
Figura 3.5: Mapa de ventos tradicional de nordeste em 03/02/2023 às 9h mostrando a variação espacial de intensidade ao longo da lagoa. ....	37
Figura 3.6: Curvas de maré durante o verão para um nó na fronteira aberta do modelo (Nó 553).....	37
Figura 3.7: Curvas de maré durante o inverno para um nó na fronteira aberta do modelo (Nó 553).....	38
Figura 3.8: Rosa dos ventos para o ano de 2023 referente a estação Est_Leste.....	39
Figura 3.9: Rosas de ventos para os meses de fevereiro e julho de 2023 referente a estação do ERA5 Est_Leste.....	40

Figura 3.10: Rosas de ventos para o verão, meses de janeiro, fevereiro e março de 2023, referente a estação do ERA5 Est_Leste.....	41
Figura 3.11: Rosas de ventos para o outono, meses de abril, maio e junho de 2023, referente a estação do ERA5 Est_Leste.....	41
Figura 3.12: Rosas de ventos para o inverno, meses de julho, agosto e setembro de 2023, referente a estação do ERA5 Est_Leste.....	41
Figura 3.13: Rosas de ventos para a primavera, meses de outubro, novembro e dezembro de 2023, referente a estação do ERA5 Est_Leste. ....	42
Figura 3.14: Séries temporais de elevação comparando os dados medidos com os resultados do modelo referentes ao marégrafo N1. NR: 0,68 m. ....	44
Figura 3.15: Séries temporais de elevação comparando os dados medidos com os resultados do modelo referentes ao marégrafo N2. NR: 0,68 m. ....	44
Figura 3.16: Séries temporais de elevação comparando os dados medidos com os resultados do modelo referentes ao marégrafo N3. NR: 0,68 m. ....	45
Figura 3.17: Séries temporais de elevação comparando os dados medidos com os resultados do modelo referentes ao marégrafo N5. NR: 0,68 m. ....	45
Figura 3.18: Posição das diferentes ETEs, rios e fontes difusas que desembocam na Lagoa de Araruama que serão usados como fontes de microplásticos.....	50
Figura 4.1: Posição das estações de monitoramento para geração de séries temporais de resultados e dos marégrafos utilizados na calibração. ....	53
Figura 4.2: Séries temporais de elevação em diferentes pontos adentrando a lagoa. NR: 0,68 m. ....	54
Figura 4.3: Lagoa dividida em macrorregiões com a identificação da principal forçante responsável pela circulação hidrodinâmica. ....	54
Figura 4.4: Empilhamento de água causado por ventos de leste/nordeste. Resultados de 10/07/23 às 19h - (846000 s). ....	55
Figura 4.5: Empilhamento de água causado por ventos de sudoeste. Resultados de 29/07/23 às 6h - (2440800 s). ....	56
Figura 4.6: Gráfico comparativo entre a elevação e a velocidade meridional para uma estação de monitoramento no Canal de Itajuru. Resultados para o mês de julho. NR: 0,68 m. ....	57
Figura 4.7: Isolinhas de velocidade no Canal de Itajuru. Resultado para o instante 435 h de julho. ....	58

Figura 4.8: Perfis verticais do módulo de velocidade em uma estação de monitoramento no canal e outra no meio da lagoa. Resultados para o instante 435 h de julho. ....	58
Figura 4.9: Desenho esquemático da circulação de água na lagoa causada pela ação dos ventos, mostrando o arraste na superfície e a corrente de retorno no fundo. ....	59
Figura 4.10: Perfis verticais das componentes "U" e "V" da velocidade em uma estação no meio da lagoa. ....	59
Figura 4.11: Vetores de velocidade na superfície para um vento típico de nordeste. Resultados para 510 h de julho. ....	60
Figura 4.12: Vetores de velocidade no fundo para um vento típico de nordeste. Resultados para 510 h de julho. ....	61
Figura 4.13: Vetores de velocidade 2DH para um vento típico de nordeste. Resultados para 510 h de julho. ....	61
Figura 4.14: Altura significativa de ondas geradas por um vento típico de nordeste em 03/02/23 às 9h. ....	62
Figura 4.15: Tensão no fundo causada por ondas geradas por um vento de nordeste em 03/02/23 às 9h. ....	63
Figura 4.16: Tensão no fundo causada por ondas geradas por um vento de sudoeste em 29/07/23 às 6h. ....	63
Figura 4.17: Porcentagem de ocorrência de tensão no fundo maior que a tensão crítica de mobilidade dos microplásticos densos durante a modelagem de verão. ....	64
Figura 4.18: Porcentagem de ocorrência de tensão no fundo maior que a tensão crítica de mobilidade dos microplásticos densos durante a modelagem de inverno. ....	64
Figura 5.1: Mapa de plumas de microplásticos leves no dia 28/02/23, lançados a partir das ETes, e zonas de absorção no litoral. ....	66
Figura 5.2: Mapa de plumas de microplásticos leves no dia 28/07/23, lançados a partir das ETes, e zonas de absorção no litoral. ....	66
Figura 5.3: Mapa de plumas de microplásticos leves no dia 28/02/23, lançados a partir das Fontes Difusas, e zonas de absorção no litoral. ....	67
Figura 5.4: Mapa de plumas de microplásticos leves no dia 28/07/23, lançados a partir das Fontes Difusas, e zonas de absorção no litoral. ....	68
Figura 5.5: Mapa de plumas de microplásticos leves no dia 28/02/23, lançados a partir dos rios, e zonas de absorção no litoral. ....	69
Figura 5.6: Mapa de plumas de microplásticos leves no dia 28/07/23, lançados a partir dos rios, e zonas de absorção no litoral. ....	69

Figura 5.7: Mapa de plumas de microplásticos neutros no dia 28/02/23, lançados a partir das ETEs, e zonas de absorção no litoral.....	70
Figura 5.8: Mapa de plumas de microplásticos neutros no dia 28/07/23, lançados a partir das ETEs, e zonas de absorção no litoral.....	71
Figura 5.9: Mapa de plumas de microplásticos neutros no dia 28/02/23, lançados a partir das Fontes Difusas, e zonas de absorção no litoral.....	72
Figura 5.10: Mapa de plumas de microplásticos neutros no dia 28/07/23, lançados a partir das Fontes Difusas, e zonas de absorção no litoral.....	72
Figura 5.11: Mapa de plumas de microplásticos neutros no dia 28/02/23, lançados a partir dos rios, e zonas de absorção no litoral.....	73
Figura 5.12: Mapa de plumas de microplásticos neutros no dia 28/07/23, lançados a partir dos rios, e zonas de absorção no litoral.....	73
Figura 5.13: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos leves lançados a partir das ETEs durante o mês de verão. ....	75
Figura 5.14: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos leves lançados a partir das ETEs durante o mês de inverno.....	75
Figura 5.15: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos leves lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de verão. ....	76
Figura 5.16: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos leves lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de inverno....	77
Figura 5.17: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos leves lançados a partir dos rios durante o mês de verão.....	78
Figura 5.18: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos leves lançados a partir dos rios durante o mês de inverno. ....	78
Figura 5.19: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir das ETEs durante o mês de verão. ....	79
Figura 5.20: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir das ETEs durante o mês de inverno.....	80
Figura 5.21: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de verão. ...	81
Figura 5.22: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de inverno. 81	
Figura 5.23: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir dos rios durante o mês de verão.....	82

Figura 5.24: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir dos rios durante o mês de inverno.....	82
Figura 5.25: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos densos lançados a partir das ETEs durante o mês de verão. ....	83
Figura 5.26: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos densos lançados a partir das ETEs durante o mês de inverno.....	83
Figura 5.27: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos densos lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de verão. ...	84
Figura 5.28: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos densos lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de inverno. ....	85
Figura 5.29: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos densos lançados a partir dos rios durante o mês de verão.....	86
Figura 5.30: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos densos lançados a partir dos rios durante o mês de inverno. ....	86
Figura 5.31: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos leves lançados a partir das ETEs durante o mês de verão. ....	87
Figura 5.32: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos leves lançados a partir das ETEs durante o mês de inverno. ....	88
Figura 5.33: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos leves lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de verão. ....	89
Figura 5.34: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos leves lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de inverno. ....	89
Figura 5.35: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos leves lançados a partir dos rios durante o mês de verão. ....	90
Figura 5.36: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos leves lançados a partir dos rios durante o mês de inverno.....	90
Figura 5.37: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir das ETEs durante o mês de verão. ....	91
Figura 5.38: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir das ETEs durante o mês de inverno. ....	91
Figura 5.39: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de verão. ....	92
Figura 5.40: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de inverno. ....	93

Figura 5.41: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir dos rios durante o mês de verão. ....	93
Figura 5.42: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir dos rios durante o mês de inverno.....	94
Figura 5.43: Sedimentação de microplásticos lançados a partir das ETEs ao final da modelagem de verão.....	95
Figura 5.44: Sedimentação de microplásticos lançados a partir das ETEs ao final da modelagem de inverno.....	95
Figura 5.45: Sedimentação de microplásticos lançados a partir das Fontes Difusas ao final da modelagem de verão.....	96
Figura 5.46: Sedimentação de microplásticos lançados a partir das Fontes Difusas ao final da modelagem de inverno. ....	96
Figura 5.47: Sedimentação de microplásticos lançados a partir dos rios ao final da modelagem de verão.....	97
Figura 5.48: Sedimentação de microplásticos lançados a partir dos rios ao final da modelagem de inverno.....	98

# Lista de tabelas

Tabela 2.1: Dados socioeconômicos das cidades componentes da Região dos Lagos que margeiam a Lagoa de Araruama.....	8
Tabela 2.2: Dados de ocupação territorial das cidades componentes da Região dos Lagos que margeiam a Lagoa de Araruama. ....	8
Tabela 2.3: Bacias de drenagem da Lagoa de Araruama com o tamanho de suas respectivas áreas. ....	11
Tabela 3.1: Lista de análises do transporte de microplásticos.....	31
Tabela 3.2: Coordenadas UTM leste e norte das estações de vento e marés. ....	36
Tabela 3.3: Posição dos marégrafos utilizados na calibração do modelo hidrodinâmico referentes a zona 23K em coordenadas UTM, ilustrados na Figura 4.1.....	43
Tabela 3.4: Dados das ETEs que despejam água na Lagoa de Araruama.....	48
Tabela 3.5: Vazões dos rios efluentes da Lagoa de Araruama.....	49
Tabela 3.6: Dados das fontes difusas que despejam água poluída na Lagoa de Araruama. ....	49
Tabela 3.7: Estimativa da quantidade de microplásticos que chegam e que são lançados por cada ETE. ....	51
Tabela 3.8: Estimativa da quantidade de microplásticos lançados na Lagoa de Araruama contendo a participação de cada tipo de fonte e valores totais.....	52

# 1 Introdução

As consequências da poluição por plásticos em ambientes marinhos são complexas, diversificadas e abrangentes. A presença excessiva de resíduos plásticos não apenas representa perigos imediatos para a vida selvagem e marinha, mas também compromete os ecossistemas, desencadeando efeitos em cascata negativos sobre a biodiversidade e a estabilidade ecológica [1].

A indústria de produção de plásticos é uma das que mais crescem globalmente, impulsionada pelas características únicas desse material, como alta versatilidade, durabilidade e baixo custo de fabricação [2]. Como reflexo disso, a produção global anual de plásticos aumentou drasticamente, passando de 1,5 milhão de toneladas em 1950 para impressionantes 390,7 milhões de toneladas em 2021 [3].

Apesar do uso extensivo do plástico, apenas uma pequena fração dos principais polímeros é reciclada devido às dificuldades inerentes ao processo, tornando o descarte de resíduos plásticos um problema global de grandes proporções. Estima-se que entre 60% e 95% de todos os detritos encontrados nos oceanos, desde a superfície até o fundo, sejam compostos por resíduos plásticos [4]. Ademais, projeta-se que, até 2025, o volume de resíduos plásticos alcance cerca de 250 milhões de toneladas [3].

Nos habitats marinhos, o acúmulo progressivo de plástico e as consequências ecológicas e econômicas negativas associadas resultam da crescente demanda por plásticos, da persistência desses materiais no meio ambiente e do manejo inadequado dos resíduos. Uma parcela expressiva do lixo plástico é mal gerida, contribuindo para a contaminação de ecossistemas de água doce e estuarinos [4].

Os ambientes estuarinos desempenham um papel fundamental na dinâmica da poluição por plásticos, conectando fontes terrestres aos depósitos marinhos. No entanto, esses ecossistemas têm recebido menos atenção científica em comparação com os ambientes marinhos abertos [5]. A ineficácia nas estratégias de gestão frequentemente resulta no descarte maciço de resíduos plásticos nesses locais, tanto na forma de macro quanto de microplásticos, causando impactos ecológicos severos [3].

Os microplásticos, em sua maioria, têm origem em descargas domésticas, derivando de polímeros plásticos amplamente utilizados no cotidiano. Esses microplásticos incluem microfibras provenientes da lavagem de roupas em residências e micropartículas presentes em produtos de cuidados pessoais e de limpeza [4]. Estima-se

que aproximadamente 80% dos plásticos e 98% dos microplásticos encontrados nos oceanos tenham origens terrestres [2].

Por serem contaminantes estáveis e onipresentes nos ambientes terrestres e marinhos, os microplásticos representam um problema global. O ambiente marinho, incluindo sedimentos oceânicos, águas profundas, costas e águas superficiais, é o destino mais comum desses resíduos [3].

Os microplásticos, em particular, apresentam um risco significativo para os organismos marinhos, pois podem ser confundidos com alimentos e ingeridos [4]. Uma vez ingeridos, têm o potencial de se acumular na cadeia trófica, dada sua ampla presença e disponibilidade em quase todos os ecossistemas marinhos conhecidos. Além disso, a poluição por microplásticos constitui uma séria ameaça à saúde humana, podendo causar danos à função reprodutiva, comprometer a resposta imunológica e contribuir para problemas de saúde como obesidade e câncer [3].

Atualmente, não há métodos práticos ou eficientes para remover microplásticos do ambiente marinho [3]. Regiões urbanas, marcadas por alta densidade populacional e atividade humana, foram identificadas como pontos críticos de contaminação por microplásticos [5], tornando esse problema ainda mais urgente.

Os estuários têm sido apontados como potenciais pontos de acumulação de microplásticos. Além de sua importância para atividades econômicas, os estuários desempenham um papel essencial na dinâmica de transporte desses resíduos. No entanto, as condições hidrodinâmicas e as propriedades das partículas que controlam o processo de acumulação ainda necessitam de maior investigação [6], [7].

Esses ecossistemas abrigam uma diversidade de espécies e desempenham funções ecológicas cruciais. No entanto, os estuários estão sujeitos a um acúmulo crescente de microplásticos, o que pode comprometer sua biodiversidade e funcionalidade ao longo do tempo [6].

O estudo da presença de microplásticos em ambientes aquáticos tem ganhado destaque nos últimos anos em diversas partes do mundo devido ao seu potencial de causar impactos significativos [4]. Uma simples busca em plataformas de artigos científicos revela estudos sobre o tema realizados em localidades como a China [2], Indonésia [1], África [8] e Europa [5]. Essa tendência global também se reflete em estudos conduzidos no Brasil, com foco especial na região leste do estado do Rio de Janeiro, onde o tema tem atraído crescente atenção da comunidade científica.

Por exemplo, em [9], foram caracterizadas amostras coletadas em 15 praias da cidade do Rio de Janeiro. Já em [10], a caracterização dos microplásticos foi realizada na Lagoa de Maricá e Guarapina, a partir de amostras coletadas nas margens, na água e no fundo das lagoas. Em [11], foi conduzido um estudo de caracterização e quantificação de microplásticos em diversas praias da orla leste do estado do Rio de Janeiro, abrangendo o trecho de Maricá a Arraial do Cabo. Além disso, em [12], um estudo semelhante foi realizado na faixa costeira que vai de Búzios a Macaé.

Grande parte dos estudos sobre microplásticos concentra-se na quantificação e caracterização de amostras, evidenciando uma lacuna de conhecimento em relação ao transporte dessas partículas, ou seja, como elas chegaram às suas posições atuais e quais podem ser suas possíveis origens. Esse tipo de informação é crucial para compreender e monitorar o comportamento dos microplásticos, com vistas à mitigação de seus impactos e à resolução de problemas ambientais [5], [13].

## **1.1 Motivação**

A Lagoa de Araruama possui uma importância significativa nos âmbitos turístico, econômico e ambiental para o estado do Rio de Janeiro e para os habitantes de seu entorno. O descarte excessivo de resíduos plásticos não só ameaça a vida marinha e os ecossistemas locais, como também coloca em risco os meios de subsistência das comunidades que dependem da pesca e dos recursos marinhos para sua sobrevivência e estabilidade econômica [1].

Além disso, a quantidade de resíduos no ambiente marinho está diretamente relacionada à densidade populacional [13], e a região dos lagos tem apresentado um crescimento populacional acelerado nos últimos anos. O ecossistema da lagoa é particularmente vulnerável, pois, devido à sua característica de hipersalinidade, uma menor variedade de peixes e outras espécies marinhas consegue sobreviver nesse ambiente [14].

Até o momento, não foram identificados estudos relacionados à coleta, quantificação e caracterização de microplásticos na Lagoa de Araruama, tampouco trabalhos que investiguem o transporte e o destino dessas partículas. É justamente nesse aspecto do transporte que este estudo busca contribuir, mapeando o caminho percorrido pelos microplásticos na Lagoa de Araruama e, assim, adicionando conhecimento sobre este importante estuário.

O estudo do transporte de microplásticos na lagoa oferece benefícios significativos. Ele permite identificar as áreas onde as partículas tendem a se acumular, bem como as possíveis fontes dos microplásticos presentes em cada região. Essas informações são fundamentais para embasar políticas públicas mais assertivas, direcionando esforços de limpeza de praias e promovendo uma gestão ambiental mais eficiente. Além disso, esse estudo pode auxiliar na avaliação dos impactos ecológicos e sociais associados à poluição por microplásticos, fornecendo dados para a sensibilização da população local e para a implementação de programas educativos. O mapeamento do transporte também pode subsidiar sugestões para estudos adicionais e políticas voltadas à redução do lançamento de microplásticos no ambiente, identificando as principais fontes e propondo estratégias como melhorias nos sistemas de tratamento de efluentes, regulamentações sobre materiais plásticos e incentivos à economia circular. Por fim, o mapeamento do transporte de microplásticos pode subsidiar pesquisas científicas que visem aprofundar o conhecimento sobre o comportamento desses poluentes em sistemas aquáticos.

## **1.2 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o transporte de microplásticos leves, neutros e densos na Lagoa de Araruama. Considerando a densidade da água, microplásticos leves tendem a boiar, neutros a ocupar a coluna d'água e densos a serem transportados pelo fundo com deposição e eventual ressuspensão. Para tal inclui-se o desenvolvimento de um modelo tridimensional da circulação hidrodinâmica na Lagoa de Araruama.

Como objetivos específicos, busca-se identificar as regiões mais prováveis de passagem dos microplásticos, mapear as áreas mais propensas ao acúmulo dessas partículas e determinar as regiões menos expostas. Além disso, visa-se verificar se a lagoa atua predominantemente como acumuladora de microplásticos ou se tem tendência a exportá-los para o mar.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Região dos lagos

A Região dos Lagos, também conhecida como Costa do Sol, é um importante polo turístico do estado do Rio de Janeiro. Localizada a cerca de 150 km da capital, essa região atrai turistas ao longo de todo o ano, devido, entre outras coisas, às suas belezas naturais, à gastronomia e às praias de águas claras e calmas. No entanto, o turismo nem sempre foi o principal atrativo da área. Até por volta de 1950, a economia local era mais dependente da pesca artesanal e da extração de sal [15].

Nessa região, encontra-se a Lagoa de Araruama, que é cercada pelos municípios de Araruama, Iguaba Grande, São Pedro da Aldeia, Cabo Frio e Arraial do Cabo. Devido à elevada importância da lagoa para a Região dos Lagos e até mesmo para o estado do Rio de Janeiro, ela foi escolhida como objeto de estudo deste trabalho.

A seguir, é apresentada a região estudada, com uma descrição de seu desenvolvimento na seção 2.1.1, uma análise socioeconômica das cidades que compõem o ecossistema da lagoa na seção 2.1.2 e uma caracterização do próprio corpo d'água na seção 2.1.3.

#### 2.1.1 Histórico da região

Em [16], é realizado um relato histórico de desenvolvimento da região, que é, em parte, resumido a seguir.

A Região dos Lagos é ocupada desde o século XVI; entretanto, foi a partir do ano de 1940 que ela experimentou grande desenvolvimento. Anteriormente, o acesso era feito pelo mar, na cidade de Cabo Frio, e podia-se chegar às cidades mais internas através da lagoa ou por carroça.

Ainda na década de 40, foi construída a estrada de ferro Maricá, tornando-se então o principal meio de acesso à região. Nesta época, as cidades mais populosas eram as mais próximas a Niterói, que era a antiga capital do estado. As mais populosas eram, nesta ordem, Araruama, Saquarema, São Pedro da Aldeia e Cabo Frio. Os demais municípios foram criados posteriormente.

As atividades econômicas consistiam em agropecuária, pesca, extração de sal e de conchas. O comércio era pequeno, faltavam escolas e não havia ligações de água e nem de luz.

Um marco importante no desenvolvimento da região foi a criação da Companhia Nacional de Álcalis em 1943. Na década de 50, a companhia começou a operar na lagoa através da retirada de conchas para fabricação de barrilha, componente necessário na fabricação de vidros, papéis, fertilizantes, entre outros. A empresa foi instalada em Arraial do Cabo devido as suas condições favoráveis para a construção de um porto na Praia do Forno.

Até os anos 50, Araruama, São Pedro da Aldeia e Cabo Frio eram cidades típicas de interior e não exploravam o potencial turístico da lagoa e do mar, utilizando-os apenas para pesca e para retirada de conchas e sal.

A cidade de Cabo Frio só era desenvolvida na beira do canal de Itajuru. Ela era separada do mar pelas dunas, que possuíam cerca de 20 metros de altura e se estendiam desde o forte São Mateus até Arraial do Cabo, então distrito de Cabo Frio. As areias constituintes das dunas eram muito finas e facilmente transportadas pelo vento, ameaçando, em algumas vezes, as construções existentes.

Na década de 50, entraram em operação a Companhia Nacional de Álcalis e a Companhia Salinas Perynas, instalada em Cabo Frio. Essas empresas criaram uma grande oferta de empregos na região.

A rodovia Amaral Peixoto (RJ 106), que liga Niterói a Campos, construída no final da década de 40, foi pavimentada e facilitou o deslocamento na região. A RJ 140, que liga as cidades de São Pedro da Aldeia e Cabo Frio, foi construída e pavimentada, melhorando o transporte rodoviário e facilitando o início do turismo na Região dos Lagos.

A Prefeitura de Cabo Frio inicia a retirada de areia das dunas para salvaguardar as construções e, também, para realizar aterramentos em zonas de mangues no entorno do canal e da lagoa. Realizados os aterramentos, a própria Prefeitura loteava a área e doava terrenos para quem quisesse construir no local, contribuindo para o desenvolvimento urbano.

A Companhia Urbanizadora de Araruama executou um projeto urbanístico envolvendo o centro urbano e a lagoa, o que tornou Araruama a primeira cidade praiana da Região dos Lagos. As areias retiradas das dunas de Cabo Frio foram utilizadas nessas obras.

Na década de 60, ocorreram eventos significativos. Outra grande empresa salinera entrou em operação, a Companhia Salinas Ponta do Costa, localizada em Cabo Frio. Em 1966, foi criada a Base Aérea Naval de São Pedro da Aldeia, proporcionando a migração de habitantes para a região e impulsionando o desenvolvimento econômico. A Álcalis construiu uma adutora de água a partir da Lagoa de Juturnaíba, construiu o porto de Arraial do Cabo na praia dos Anjos e expandiu o fornecimento de água da adutora da Lagoa de Juturnaíba para abastecer os municípios da Região dos Lagos.

A principal atividade econômica passou a ser o turismo, e os municípios da região foram eletrificados. Cabo Frio acabou se tornando a maior atração. Búzios, antigo distrito de Cabo Frio, era uma simples vila de pescadores que passou a ser conhecido internacionalmente, graças à famosa atriz francesa Brigitte Bardot.

A década de 70 foi marcada pela construção da Ponte Rio-Niterói, da rodovia federal BR-101 e da rodovia estadual Rio Bonito-Araruama. A Ponte Rio-Niterói foi responsável pelo maior incremento de turistas da região. Essas estradas facilitaram ainda mais o acesso à região, diminuindo o tempo de chegada e aumentando a segurança no percurso. A procura por casas e terrenos aumentou, principalmente no município de Cabo Frio. A construção da rodovia Rio Bonito-Araruama acabou deixando o município de Saquarema um pouco isolado.

Diversas pedreiras e areais surgiram na região para suprir a necessidade de materiais para construção civil. Houve um aumento nas atividades agrícolas e pecuárias, e o comércio e os serviços também experimentaram crescimento.

A retirada de areia das dunas de Cabo Frio aumentou para dar vazão aos aterros particulares, à utilização do jato de areia na indústria de reparos navais e à necessidade de materiais de construção. Essas retiradas resultaram na extinção das dunas, abrindo Cabo Frio para o mar e transformando-a em uma cidade praiana. Sua vocação turística aumentou. A região entre Araruama e Cabo Frio foi contemplada com vários loteamentos e condomínios às margens da lagoa.

O fluxo turístico causou a elevação dos preços dos imóveis, sendo os mais procurados aqueles próximos ao mar e à lagoa. Muitas construções foram realizadas, incluindo muitos condomínios devido à maior segurança. Algumas dessas construções ocorreram em aterros sobre o espelho d'água da lagoa, sobre salinas e sobre brejos, muitas vezes causando desvios de cursos de rios ou de canais.

Nas décadas de 80 e 90, ocorreu a consolidação da atividade turística. O número de hotéis e restaurantes aumentou. Também houve desenvolvimento da infraestrutura local, com melhorias no transporte, na saúde e nas escolas.

As obras costeiras mais comuns e que tendem a afetar a dinâmica hídrica foram os espigões, os muros de proteção para aterro da praia e atracadores, que alteram a circulação e o transporte de sedimentos.

### 2.1.2 Cidades envolvidas

As cidades incluídas na análise possuem grande importância econômica e turística para o estado. Arraial do Cabo, por exemplo, é considerada a capital nacional do mergulho, devido às suas águas claras e à rica biodiversidade. Essas características fazem com que as principais atividades da região sejam desenvolvidas na área costeira, como a pesca e o turismo [17].

A Tabela 2.1 e a Tabela 2.2 apresentam dados socioeconômicos e de ocupação do território das cidades envolvidas na modelagem. Os dados foram obtidos no site do IBGE, nas páginas de panorama de cada cidade, com base nas informações do último censo de 2022, disponíveis em [18], [19], [20], [21], [22] e [23]. Os dados do município do Rio de Janeiro são incluídos para efeito de referência e comparação.

*Tabela 2.1: Dados socioeconômicos das cidades componentes da Região dos Lagos que margeiam a Lagoa de Araruama.*

Cidade	Habitantes	Hab./km <sup>2</sup>	PIB per capita (R\$)	IDH
Araruama	129.671	203,16	31.109,37	0,718
Arraial do Cabo	30.986	203,71	87.763,22	0,733
Cabo Frio	222.161	537,34	52.801,54	0,735
São Pedro	104.029	312,88	25.509,14	0,712
Iguaba Grande	27.920	547,70	21.517,50	0,761
Rio de Janeiro	6.211.223	5.174,60	53.078,23	0,799

*Tabela 2.2: Dados de ocupação territorial das cidades componentes da Região dos Lagos que margeiam a Lagoa de Araruama.*

Cidade	Área urbanizada (km <sup>2</sup> )	Área territorial (km <sup>2</sup> )	Percentual urbanizado (%)
--------	------------------------------------	-------------------------------------	---------------------------

Araruama	64,84	638,27	10,15
Arraial do Cabo	9,67	152,10	6,35
Cabo Frio	61,44	413,44	14,86
São Pedro	32,03	332,48	9,63
Iguaba Grande	13,46	50,97	26,40
Rio de Janeiro	640,34	1.200,32	53,34

A Tabela 2.1 mostra que as cidades analisadas não são muito populosas, possuindo bem menos moradores em comparação com a capital e outras cidades da região metropolitana. Cabo Frio é a cidade com o maior número de habitantes, enquanto Arraial do Cabo e Iguaba Grande têm populações menores. A densidade populacional, número de habitantes por quilômetro quadrado, também não é alta, com as maiores concentrações em Cabo Frio e Iguaba Grande atingindo cerca de 10% da densidade observada no Rio de Janeiro.

Em termos de dados financeiros, Arraial do Cabo se destaca positivamente, enquanto Araruama, São Pedro da Aldeia e Iguaba Grande se destacam negativamente. Todas as cidades apresentam um Índice de Desenvolvimento Humano inferior ao da capital, Rio de Janeiro. No entanto, vale ressaltar que essas cidades estão próximas ao limite superior da faixa de desenvolvimento humano médio, que, conforme indicado em [24], varia entre 0,5 e 0,799.

A urbanização da Região dos Lagos intensificou-se a partir da década de 1950, impulsionada pelo turismo e pelo fácil acesso à região [25]. Como mostrado na Tabela 2.2, as cidades envolvidas na modelagem não apresentam um elevado grau de urbanização em relação ao seu território total, nem possuem grandes áreas urbanizadas em termos relativos quando comparadas ao município do Rio de Janeiro.

A Figura 2.1, construída com dados de [16] e [26], ilustra a evolução populacional dos municípios da Região dos Lagos que margeiam a Lagoa de Araruama. Cabo Frio, atualmente o município mais populoso, destaca-se com um aumento vertiginoso da população a partir da década de 1970, após sua abertura para o mar. Antes disso, Araruama era o município mais populoso devido à sua maior proximidade com Niterói, antiga capital do estado. Arraial do Cabo começa a apresentar crescimento populacional significativo após a instalação da Alcalis em 1950, enquanto Iguaba Grande só passa a crescer com o aumento do turismo a partir da década de 1980. Após 1980, todas as cidades da

região demonstram crescimento populacional, impulsionado pela construção da Ponte Rio-Niterói, inaugurada em 1974.

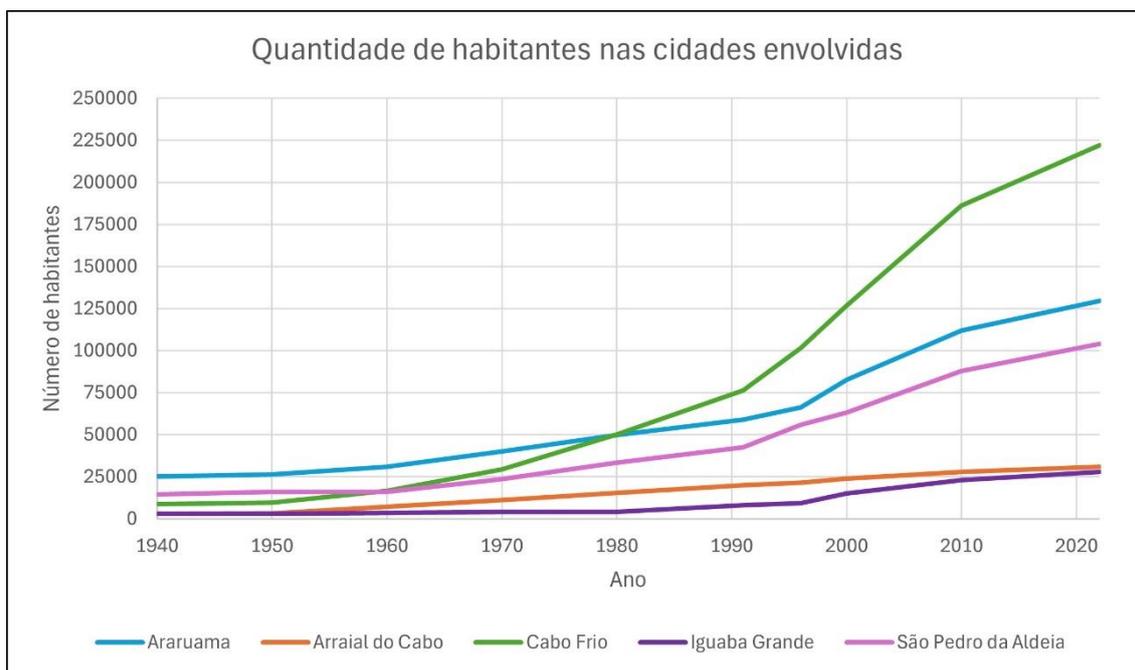


Figura 2.1: Evolução do número de habitantes dos municípios da Região dos Lagos, envolvidos na análise, desde 1940 até 2022.

A Figura 2.2 ilustra a Lagoa de Araruama e as praias da região, destacando seu belo visual, águas claras e ambiente agradável, que atraem visitantes e são responsáveis pelo sucesso da área como um polo turístico no estado. As imagens foram retiradas do site do Conselho de Turismo da Região Costa do Sol, Condetur [27].



Figura 2.2: Imagens ilustrativas da região de análise, retiradas do site da Condetur da Costa do Sol.

### 2.1.3 Lagoa de Araruama

A Lagoa de Araruama é um corpo d'água de grande importância turística e tem experimentado um significativo crescimento populacional em suas margens. O gráfico de crescimento populacional, mostrado na Figura 2.1, indica que a população ao redor da lagoa aumentou de aproximadamente 75 mil pessoas em 1940 para cerca de 650 mil atualmente, um crescimento de oito vezes.

A Lagoa de Araruama é o maior corpo d'água hipersalino do país, com uma área de espelho d'água de aproximadamente 220 km<sup>2</sup>, um perímetro de 190 km e um volume de água de 560 milhões de metros cúbicos. A lagoa é conectada ao mar através do Canal de Itajuru, na cidade de Cabo Frio. A hipersalinidade ocorre devido à reduzida bacia de drenagem e ao balanço hídrico negativo causado pelo clima semiárido. As elevações da Ilha de Cabo Frio e da Serra de Sapeatiba formam um corredor na direção dos ventos de nordeste que são muito intensos e comuns na região, resultando em uma temperatura média na região cerca de 5 °C inferior à das áreas vizinhas, o que contribui para afastar as nuvens de chuva. Os principais rios tributários são o Rio das Moças e o Rio Mataruna, enquanto os demais rios podem secar em determinadas épocas do ano. A Lagoa de Araruama é considerada um sistema sufocado, pois o tempo de renovação de suas águas é alto, levando cerca de 85 dias para que 50 % de suas águas sejam renovadas [15], [16], [28].

A Tabela 2.3 apresenta a área de cada sub-bacia de drenagem da Lagoa de Araruama, totalizando 429,2 km<sup>2</sup>, o que representa menos do que o dobro da área do espelho d'água da lagoa [16].

*Tabela 2.3: Bacias de drenagem da Lagoa de Araruama com o tamanho de suas respectivas áreas.*

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )
Rio Congo	8,0
Rio das Moças	94,0
Área entre bacias: Moças/Mataruna	13,3
Rio Mataruna	46,6
Área entre bacias: Mataruna/Salgado	15,5
Rio Salgado	29,2
Área entre bacias: Salgado/Iguaçaba	5,6

Rio Iguaçaba	8,6
Área entre bacias: Iguaçaba/Ubá	1,2
Rio Ubá	15,0
Área entre bacias: Ubá/Joaquim da Mota	24,0
Área entre bacias: Joaquim da Mota/Canal de Itajuru	39,2
Canal de Itajuru	14,0
Área entre bacias: Canal de Itajuru/Rio Congo	124,0
Total	429,9

Conforme apresentado em [16], a economia da Região dos Lagos sempre esteve intimamente ligada à Lagoa de Araruama, por meio de atividades como pesca, extração de sal e conchas, e turismo. A lagoa fornecia peixes, sal e facilitava o comércio marítimo, realizado principalmente por veleiros. Ao longo de sua exploração econômica, a lagoa foi submetida a diversos aterros, incluindo no canal de ligação com o mar, o que reduziu o prisma de maré e restringiu a navegação.

Devido à hipersalinidade da lagoa, várias indústrias de produção de sal se instalaram em suas margens. O abastecimento das salinas era realizado por meio de canais dentro das propriedades ou diretamente no espelho d'água da lagoa. O contorno da lagoa tem sido alterado ao longo de mais de 100 anos pelas salineiras, através da construção de quadras de sal, marnéis, diques de proteção, aterros e canais artificiais. A variação espacial da salinidade da lagoa fazia com que as salinas de Araruama fossem significativamente mais produtivas do que as localizadas em Cabo Frio.

A atividade de extração de conchas também contribuiu para as diversas alterações às margens da lagoa. Eram posicionadas caieiras, um forno primitivo, no qual as conchas eram queimadas e misturadas com carvão ou turfa. As conchas eram utilizadas no preparo de ração para granjas, fabricação de cal ou fabricação de barrilha.

A atividade turística também contribuiu para as mudanças no corpo d'água, com aterros realizados para a construção de condomínios e obras públicas de infraestrutura urbana.

A Lagoa de Araruama sofreu com os impactos da ocupação de suas margens. O balanço hídrico foi alterado devido ao lançamento de águas doces provenientes de efluentes domésticos e industriais. O transporte de sedimentos foi afetado pela construção de

espigões, trapiches e aterros. Além disso, a influência da maré foi reduzida devido ao estrangulamento do Canal de Itajuru.

A Lagoa de Araruama tem sido impactada por atividades antropogênicas ao longo de sua história. Com o aumento da ocupação humana e das atividades na região nos últimos anos, a poluição tornou-se um tema recorrente. Um exemplo disso é a degradação do estado trófico da lagoa, que passou de oligotrófico para mesotrófico, resultando em extensas mortalidades de peixes [29].

Embora não tenham sido encontrados estudos específicos sobre a quantificação da poluição por microplásticos na Lagoa de Araruama, pesquisas realizadas em áreas próximas trazem indícios relevantes. Por exemplo, um estudo apresentado em [30] identificou que 69% dos resíduos sólidos encontrados na orla de Cabo Frio são compostos por plásticos. Além disso, resíduos plásticos tendem a se acumular em grandes quantidades em praias recreativas [31], uma atividade característica da região.

Microplásticos têm sido detectados em praticamente todos os rios e lagos onde são pesquisados [32]. Ademais, estudos recentes demonstram que ecossistemas aquáticos próximos a centros urbanos apresentam níveis mais elevados de microplásticos e que organismos dessas áreas acumulam quantidades significativas dessas partículas em seus corpos [33].

Assim, a Lagoa de Araruama reúne condições favoráveis para o lançamento e o acúmulo de microplásticos em suas águas. Há evidências crescentes de que a poluição por plásticos pode prejudicar a biota, comprometer ecossistemas de forma ampla e, potencialmente, afetar a saúde humana. Além disso, a poluição gera impactos sociais e econômicos negativos, interferindo na navegação, pesca e turismo [34], atividades fundamentais para a economia local.

Outro aspecto crítico é que, devido à salinidade extremamente alta, a Lagoa de Araruama apresenta um equilíbrio ecológico delicado, onde pequenas perturbações podem impactar significativamente a qualidade da água [29]. Isso reforça a importância de pesquisas sobre o comportamento desse tipo de poluente para garantir a manutenção do equilíbrio ecológico e o desenvolvimento econômico da região.

## **2.2 Microplásticos**

Os microplásticos que entram em sistemas fluviais por descarte direto ou despejo de esgoto eventualmente alcançam o mar. Atividades turísticas na costa, pesca esportiva ou

comercial, e indústrias marinhas também contribuem para a presença dessas partículas, tanto na forma de microplásticos primários quanto de pedaços maiores que se tornam microplásticos secundários [35]. A maioria dos microplásticos tem origem na zona costeira e permanece nela por um período significativo [36].

O termo microplástico é utilizado para descrever as menores partículas de plástico conhecidas. As definições podem variar de acordo com o tamanho, a origem ou as propriedades físicas e químicas. Em [37], é proposto um consenso para a classificação de microplásticos com base em seu tamanho, definindo-os da seguinte maneira: Microplásticos são quaisquer partículas sólidas sintéticas ou de matriz polimérica, com forma regular ou irregular e tamanho variando de 1  $\mu\text{m}$  a 5 mm, originadas de fabricação tanto primária quanto secundária, que são insolúveis em água. Em outras palavras, qualquer partícula de plástico insolúvel com tamanho entre 1  $\mu\text{m}$  e 5 mm é considerado um microplástico.

Os microplásticos podem ser classificados, conforme o método de produção, em primários ou secundários. Os microplásticos primários são fabricados para terem tamanho microscópico, enquanto os secundários resultam de processos de fragmentação e degradação de pedaços maiores [38].

A classificação dos microplásticos com base em suas cores é importante para o estudo de animais que os confundem com presas, pois algumas cores são mais atraentes do que outras durante a caça ou coleta. Por exemplo, as cores mais frequentemente encontradas em animais maiores eram preta, transparente, azul e vermelha, com tamanho entre 1,5 mm e 2 mm. O material mais comum era o etileno-propileno [39].

As partículas microplásticas podem ter diferentes formatos, como esférico, tubular, fibroso ou irregular. Fibras e fragmentos irregulares, variando entre 800 e 1600  $\mu\text{m}$ , são as formas mais frequentemente encontradas em organismos vivos durante pesquisas de campo [40]. Os microplásticos se integram facilmente ao ecossistema devido ao seu tamanho, que é semelhante ao de silte e areias, assim como ao de algumas espécies bentônicas e plânctons [36]. A maioria dos detritos plásticos são flutuantes [41].

Algumas características dos microplásticos influenciam sua disponibilidade para os seres vivos. O tamanho, por exemplo, os torna acessíveis a animais na base da cadeia alimentar e àqueles que utilizam métodos específicos de obtenção de alimento, como os filtradores. A densidade dos microplásticos determina em que altura da coluna de água eles estarão, definindo quais organismos terão acesso a essas partículas. A abundância aumenta a probabilidade de um microplástico ser encontrado, e, por fim, a coloração pode

causar confusão devido à semelhança com presas. Cada espécie apresenta maior ou menor sensibilidade a esses fatores [38].

Não são apenas os plásticos flutuantes que interagem de forma significativa com o ambiente; as partículas mais pesadas, que afundam e se depositam no leito do corpo d'água, também podem causar alterações importantes. A presença de detritos plásticos aumenta a permeabilidade e diminui a capacidade de absorção de calor dos sedimentos [35].

A Figura 2.3, adaptada de [38], ilustra os mecanismos pelos quais os microplásticos podem interagir com os organismos marinhos e se movimentar através da coluna de água. Destaca-se a transferência trófica, já que plânctons que flutuam, peixes que se deslocam ao longo da coluna d'água e crustáceos que habitam o fundo estão sujeitos a confundir essas partículas com presas.

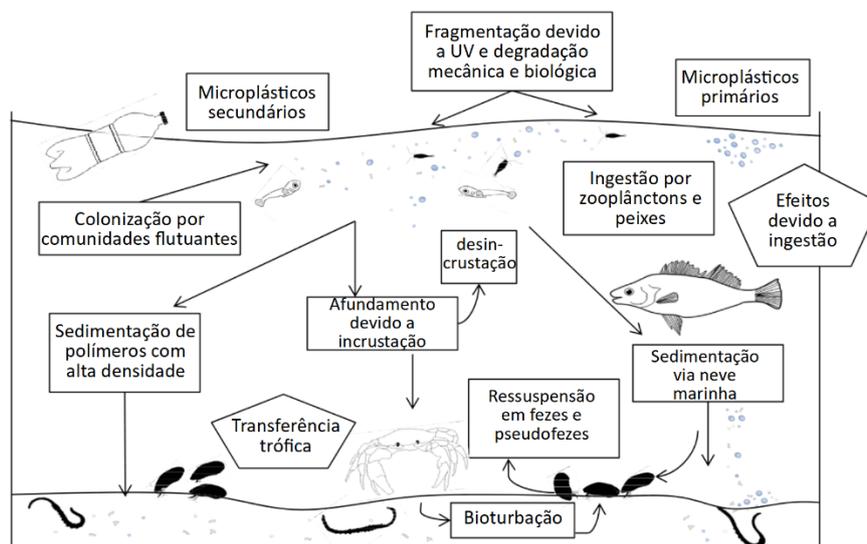


Figura 2.3: Mecanismos de transporte de microplásticos através de interações biológicas.

Os materiais plásticos podem levar centenas a milhares de anos para se decompor e, à medida que mais plástico é liberado nos ecossistemas marinhos anualmente, ele continua se acumulando [42]. O impacto dos microplásticos é ainda mais significativo em comparação com partículas plásticas maiores, devido à sua capacidade de se infiltrar nos tecidos vivos [43].

Os microplásticos provocam diversas consequências no ambiente aquático, como alterações nas comunidades microbianas dos sedimentos marinhos e distúrbios no ciclo do nitrogênio. Esses efeitos podem intensificar fenômenos como a proliferação de algas, resultando em mudanças nas comunidades microbianas, como o plâncton, e na redução

dos níveis de oxigênio [32]. Tais impactos tendem a ser ainda mais prejudiciais à Lagoa de Araruama, pois ambientes hipersalinos exercem forte pressão sobre os organismos, que precisam desenvolver regulações osmóticas de alto custo energético. Conseqüentemente, os organismos adaptados a esses ambientes são altamente sensíveis e possuem baixa resiliência a variações, especialmente a entradas de nutrientes [29].

Os impactos dos microplásticos na saúde podem ser classificados em três categorias: aqueles relacionados à sua natureza física, aqueles decorrentes da liberação de substâncias químicas de suas matrizes e aqueles associados ao seu papel como vetores para transferência de micro-organismos [32].

Os efeitos físicos incluem danos causados pelas propriedades das partículas, como o tipo de polímero, tamanho e forma. Já os efeitos toxicológicos estão ligados às propriedades químicas das partículas, sejam elas originadas de aditivos plásticos adicionados durante a fabricação ou de contaminantes absorvidos da água, como poluentes orgânicos persistentes e metais pesados [44]. Como vetores, os microplásticos também podem funcionar como micro-habitats artificiais, atraindo comunidades de fungos e abrigando infecções oportunistas humanas [45].

Estudos mostram que o consumo de microplásticos por animais aquáticos pode causar uma série de efeitos negativos, incluindo a redução da ação fagocítica celular, maior adsorção de contaminantes pelos tecidos e alterações comportamentais [33].

De forma geral, os moluscos apresentam maior frequência de ingestão de microplásticos em relação a outros organismos, devido à sua atividade como filtradores, processando grandes volumes de água e acumulando elevadas concentrações dessas partículas [44]. Além disso, os microplásticos têm maior impacto nos organismos marinhos durante as fases embrionária, larval e juvenil [31].

A ingestão de microplásticos por peixes pode alterar seus perfis metabólicos, desencadear respostas inflamatórias e interferir no sistema imunológico inato [46]. Além disso, os microplásticos podem causar toxicidade física, como lacerações e inflamações, devido à bioacumulação no intestino e no estômago. A substituição de alimentos por microplásticos pode inibir o crescimento, provocar alterações nos tecidos e reduzir as reservas energéticas dos organismos [47], [45].

Adicionalmente, a exposição a microplásticos pode gerar alterações histológicas e moleculares nas gônadas de peixes, resultando em impactos negativos no sistema reprodutivo desses organismos [45].

Os microplásticos são pequenos o suficiente para serem ingeridos por organismos aquáticos, podendo posteriormente avançar pela cadeia alimentar marinha até atingir o corpo humano. Devido à sua alta razão superfície-volume e elevada mobilidade, os microplásticos apresentam um grande potencial para absorver e dispersar diferentes tipos de contaminantes, matéria orgânica e espécies invasoras [48].

Embora ainda não existam estudos suficientes para compreender completamente a trajetória dos microplásticos no corpo humano e seus impactos na saúde, pesquisas recentes mencionam efeitos adversos, como estresse oxidativo, citotoxicidade, neurotoxicidade, disfunção do sistema imunológico e toxicidade hepática [31], [32].

Os microplásticos podem absorver poluentes orgânicos prejudiciais, metais pesados e toxinas presentes na água salgada, transferindo-os para os produtos marinhos consumidos pelos humanos [46]. Quando ingeridos, há o risco de substâncias nocivas serem liberadas e absorvidas pelo organismo, o que pode levar a problemas de saúde de longo prazo, como disfunções endócrinas, distúrbios do desenvolvimento e aumento do risco de certos tipos de câncer [45]. Como os microplásticos são considerados não degradáveis, possuem o potencial de se bioacumular em órgãos secundários, podendo causar necrose tecidual, fibrose, danos localizados às células e tecidos [46].

A seguir, na seção 2.2.1, é detalhado o processo de transporte de microplásticos em um corpo d'água com superfície livre, como a Lagoa de Araruama. Já na seção 2.2.2, são discutidas as considerações relacionadas à densidade dos microplásticos em comparação com a densidade da água hipersalina da lagoa.

### **2.2.1 Transporte de microplásticos**

Os microplásticos são originados a partir de diversos polímeros e, dependendo de sua composição, densidade e formato, podem flutuar, permanecer em suspensão ou afundar. Dessa forma, eles podem ser encontrados ao longo de toda a coluna d'água [32], [35]. Embora muitas das potenciais consequências ecotoxicológicas dos plásticos já sejam amplamente conhecidas, as pesquisas têm começado apenas recentemente a explorar, em detalhes, as dinâmicas de transporte dos plásticos em ambientes aquáticos [34].

O transporte de microplásticos depende de características físicas, como densidade, tamanho e forma, além de fatores relacionados ao escoamento, como vento, ondas, marés, gradientes termohalinos e sedimentos bentônicos [34], [36].

O transporte de microplásticos em corpos d'água naturais varia de acordo com a densidade das partículas. Os microplásticos menos densos são transportados mais rapidamente e podem percorrer longas distâncias, enquanto os mais densos apresentam um transporte mais lento, semelhante ao transporte de sedimentos.

Os microplásticos flutuantes tendem a se transportar com a velocidade média de uma partícula de fluido. Essas partículas flutuantes são influenciadas pela direção do vento, tendendo a ser transportadas na sua direção. Caso o vento sopra em direção a areia, os microplásticos se acumulam na praia; caso sopra em direção ao mar, as partículas são empurradas de volta ao oceano. Por outro lado, os microplásticos pesados sofrem pouca influência do vento [49].

No caso dos microplásticos mais densos, a velocidade de queda está diretamente relacionada ao seu transporte; quanto maior a velocidade de queda, maior a dificuldade de transporte [6]. Quando os microplásticos afundam, eles podem ricochetear no leito do lago, ser depositados e, posteriormente, ressuspensos [42]. Ao chegar em uma praia, o acúmulo dessas partículas depende de sua forma, da velocidade de queda e do formato da praia [50].

A deposição ocorre principalmente perto da costa e em áreas com maior densidade populacional, uma vez que grande parte do plástico afunda rapidamente após ser lançado no corpo d'água. Isso destaca a importância de estimativas precisas das fontes de entrada, pois o plástico tende a se depositar quase imediatamente. Dessa forma, as previsões de concentração de partículas próximas à costa dependem diretamente da qualidade e precisão dos dados de entrada [42].

Com base no exposto, é razoável assumir que os microplásticos menos densos que a água são transportados flutuando na superfície, sob maior influência dos ventos. Os microplásticos com densidade semelhante à da água, com flutuabilidade neutra, são transportados pela corrente média na coluna d'água. Já os microplásticos mais densos ficam depositadas no fundo e são transportados pelas correntes próximas ao leito durante os processos de ressuspensão e deposição. A Figura 2.4 ilustra as velocidades de transporte para as diferentes posições na coluna de água. Sendo  $U$  a velocidade média na seção transversal que transporta os microplásticos neutros,  $u_L$  a velocidade de transporte dos microplásticos leves e  $u_D$  a velocidade de transporte dos microplásticos densos.

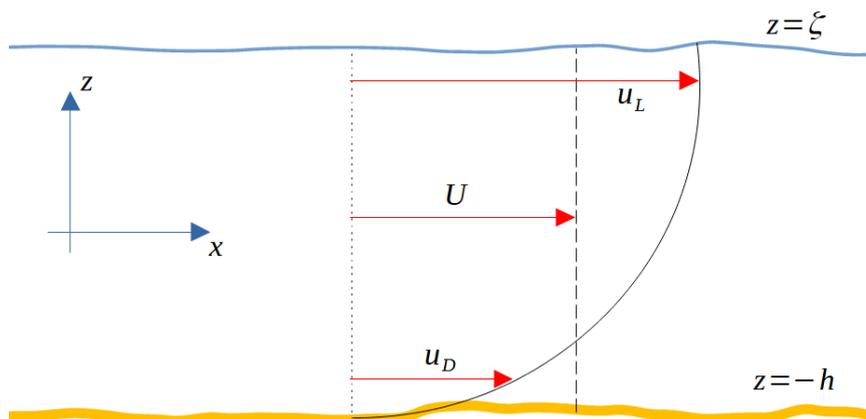


Figura 2.4: Velocidades de transporte dos diferentes tipos de microplásticos.

Avaliar o transporte dos microplásticos leves apenas com base nos resultados da superfície pode resultar em erros de superdimensionamento das distâncias percorridas, uma vez que essas partículas tendem a se misturar em uma camada superficial devido a turbulências e outros efeitos, como a Circulação de Langmuir, causados pela contínua atuação dos ventos. Portanto, a análise do transporte de microplásticos leves pode ser mais precisa ao considerar a velocidade na camada a 20 cm abaixo da superfície [51].

A velocidade média na coluna de água, representada pelo resultado 2DH, é adequada para a análise do transporte dos microplásticos de densidade neutra, pois essas partículas experimentam diferentes velocidades ao longo da coluna d'água à medida que se movimentam verticalmente devido à sua densidade semelhante à da água.

Os microplásticos densos inicialmente se depositam no fundo, onde a velocidade do fluxo é zero. Nesse ambiente, eles possuem uma tensão crítica de mobilidade, que depende de suas características físicas. O escoamento gera uma tensão de arraste, que, em alguns casos, pode superar a tensão crítica de mobilidade. Quando isso ocorre, as partículas se ressuspenham e são transportadas até uma nova deposição, determinada por sua velocidade de queda. Por isso, a velocidade a 20 cm do fundo é um parâmetro adequado para avaliar o transporte desses microplásticos densos [51].

A proliferação de microplásticos em rios, lagos, estuários, águas costeiras e oceanos representa um grande desafio global, configurando uma ameaça ao meio ambiente, aos meios de subsistência e à saúde humana [48]. Os estudos sobre microplásticos concentram-se, em sua maioria, na coleta e análise de amostras de água e sedimentos nas regiões avaliadas. No entanto, essa coleta está associada a diversas incertezas.

Como o plástico não está uniformemente distribuído na água, coletas realizadas por arrasto não fornecem uma distribuição espacial completa [42]. Além disso, muitas

metodologias de amostragem não contemplam toda a coluna d'água [34]. Partículas menores que o tamanho da malha da rede de arrasto também não são coletadas, o que torna sua distribuição desconhecida. Nas áreas costeiras, os dados de amostragem podem ser distorcidos devido aos esforços de limpeza de praias. Amostras de sedimento, por sua vez, apresentam desafios logísticos significativos, especialmente em áreas mais profundas [42]. Essas dificuldades afetam a identificação de zonas de alta acumulação de microplásticos, limitando o desenvolvimento de medidas eficazes de mitigação e políticas que reduzam os riscos e impactos ecológicos, ambientais e sociais. Além disso, impedem avanços na obtenção de uma compreensão robusta e holística da dinâmica dos microplásticos [34].

Diante dessas incertezas, análises baseadas exclusivamente em amostras provavelmente não quantificarão o problema com precisão. Para enfrentar essa limitação, a modelagem de transporte tem sido amplamente empregada em oceanos e lagos ao redor do mundo [42]. Ferramentas preditivas confiáveis desempenham um papel crucial no desenvolvimento de uma compreensão mais aprofundada do comportamento, exposição e risco dos microplásticos em corpos d'água. Além disso, essas ferramentas facilitam a identificação de fontes e pontos críticos de acúmulo, permitindo decisões mais fundamentadas para atividades direcionadas à prevenção e à limpeza [48].

Compreender o destino e o transporte de microplásticos na água é uma área-chave de pesquisa. Modelos computacionais capazes de fornecer previsões confiáveis sobre o movimento e o comportamento de partículas de microplásticos na água são ferramentas valiosas para identificar áreas de acumulação, trajetórias e possíveis fontes, orientando, assim, atividades de limpeza e recuperação. Além disso, modelos preditivos podem promover a conscientização, apoiar a educação e subsidiar decisões e políticas voltadas para a prevenção, mitigação e remediação [48].

Entre essas ferramentas computacionais, os modelos lagrangeanos destacam-se como uma classe de modelos numéricos utilizados para prever o movimento de partículas ou objetos discretos em diferentes meios, como ar ou água. Esses modelos são significativamente mais eficientes do que os métodos convencionais de diferenças finitas em casos de maior dimensão ou quando o grupo de partículas ocupa apenas uma fração do domínio total do modelo [48], como ocorre na deriva de microplásticos.

Os modelos lagrangeanos geralmente apresentam maior estabilidade computacional em comparação com modelos eulerianos explícitos, permitindo o uso de intervalos de tempo maiores sem comprometer a precisão. Além disso, são capazes de simular com

precisão o transporte não difusivo em fluxos com altos números de Peclet, onde a advecção domina. Essa característica é especialmente relevante em casos com gradientes de concentração acentuados [48].

Graças a essas vantagens, modelos lagrangeanos têm sido amplamente empregados para prever o transporte de microplásticos em ambientes aquáticos. Por exemplo, em [48] é apresentada uma estrutura numérica composta por um modelo de rastreamento de partículas lagrangeano tridimensional acoplado a um sistema de modelagem hidrodinâmica baseado em Euler, com o objetivo de prever o destino e o transporte de microplásticos em diferentes ambientes aquáticos. Já em [42], foi modelado o movimento tridimensional da poluição plástica no Lago Erie, localizado entre os EUA e o Canadá, considerando advecção, afundamento impulsionado pela densidade e mistura turbulenta. Nesse estudo, um modelo de transporte lagrangeano foi utilizado para explorar a distribuição de microplásticos na coluna d'água e nos sedimentos.

Apesar desses avanços, muitos esforços de modelagem concentram-se apenas no transporte em águas superficiais, assumem que todas as partículas possuem flutuabilidade neutra ou consideram que, ao atingir o fundo, as partículas são permanentemente depositadas, desconsiderando processos de ressuspensão [42]. Para preencher essas lacunas, é possível avaliar separadamente os microplásticos leves, neutros e densos, assumindo que cada tipo é transportado por uma camada específica de correntes: uma próxima à superfície, outra média na coluna de água e uma última próxima ao fundo.

Os microplásticos, ao longo de seu ciclo de vida, estão sujeitos a fenômenos que ocorrem em diferentes escalas de tempo, como a incrustação e o transporte por biota, que são processos de longo prazo, e o transporte pelo vento, que é um fenômeno de curto prazo. Este trabalho focará exclusivamente nos fenômenos de curto prazo, como o transporte pelas correntes geradas por diferentes forçantes.

### **2.2.2 Densidade relativa devido ao corpo d'água hipersalino**

A Lagoa de Araruama é um corpo d'água hipersalino, o que significa que sua densidade é superior à da água do mar. Assim, materiais plásticos que seriam mais densos que a água do mar podem ser menos densos em relação às águas da lagoa. Em ambientes normais, os microplásticos leves já predominam; na condição de hipersalinidade da lagoa, a proporção de partículas leves é ainda maior. Além disso, partículas com flutuabilidade neutra na lagoa serão densas no mar.

O gráfico da Figura 2.5 mostra a densidade da água em função da salinidade, calculada utilizando a fórmula de Eckart, onde  $S$  representa a salinidade e  $T$  a temperatura:

$$\rho(S, T) = 1000 \frac{1 + A}{B + 0.698A} \quad (2.1)$$

Sendo:

$$A = 5890 + 38T + 0.375T^2 + 3S$$

$$B = 1779.5 + 11.25T - 0.0745T^2 - (3.8 + 0.01T)S$$

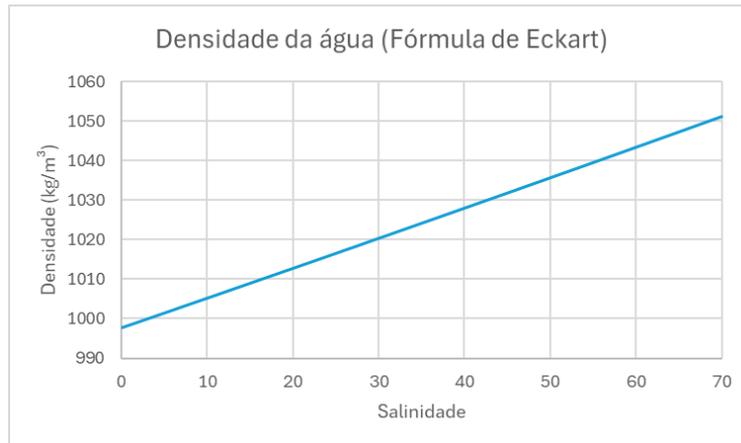


Figura 2.5: Densidade da água em função da salinidade variando de zero a 70 calculada pela fórmula de Eckart, mesma que o SisBaHiA utiliza em seus cálculos. A temperatura de referência utilizada foi de 23 °C.

A Lagoa de Araruama, com salinidade superior a 35 ups, apresenta água com densidade variando entre 1025 kg/m³ e 1050 kg/m³, correspondente a uma salinidade de até 70 ups. Microplásticos com densidade dentro dessa faixa terão flutuabilidade neutra na lagoa.

Outra característica importante é a variação espacial da salinidade ao longo da lagoa. Como resultado, haverá regiões onde uma partícula que antes era flutuante ou neutra poderá se tornar densa, e vice-versa. Essa dinâmica criada pelos gradientes de salinidade, favorece a formação de áreas preferenciais de deposição e suspensão de microplásticos.

A maioria dos lançamentos de microplásticos primários ocorre de forma acidental, com partículas de roupas desprendidas por abrasão durante a lavagem sendo a principal fonte. Outras fontes incluem partículas provenientes de pneus de veículos, materiais de sinalização de rodovias, componentes de cosméticos e revestimentos, como tintas usadas em barcos [52].

Como exemplo de microplásticos leves, pode-se citar o polietileno, amplamente utilizado em sacolas de supermercado, embalagens e frascos, com densidade variando entre 917 e 970 kg/m<sup>3</sup>. O acrilonitrila butadieno estireno, ABS, presente em produtos eletroeletrônicos domésticos, peças de automóveis e brinquedos como o Lego, possui densidade na faixa de 1020 a 1210 kg/m<sup>3</sup>, sendo um possível exemplo de microplástico neutro. Por outro lado, a poliamida, com densidade de 1130 a 1150 kg/m<sup>3</sup>, e o poliéster, com densidade de 1300 a 1400 kg/m<sup>3</sup>, comumente usados em roupas, são exemplos de microplásticos densos [53].

### **2.3 Sistema de modelagem adotado**

Neste trabalho, a análise numérica para o modelo hidrodinâmico e para o transporte de microplásticos fazem parte do SisBaHiA – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental.

Segundo consta na referência técnica do SisBaHiA [54]: "O SisBaHiA é um sistema profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação Coppetec, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do COPPE/UFRJ - Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Novas versões do SisBaHiA® têm sido continuamente desenvolvidas no COPPE/UFRJ desde 1987, com ampliações de escopo e aperfeiçoamentos feitos através de várias teses de mestrado e doutorado, além de projetos de pesquisa ([www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br) ou [www.oceanica.ufrj.br/sisbahia/](http://www.oceanica.ufrj.br/sisbahia/)). O sistema tem sido adotado em dezenas de estudos e projetos contratados à Fundação Coppetec envolvendo modelagem de corpos de água naturais." A Figura 2.6 mostra a tela inicial do sistema de modelagem com o projeto "Lagoa de Araruama & Zona Costeira, RJ" ativado.



Figura 2.6: Tela de abertura do SisBaHiA, que deu suporte as análises realizadas neste trabalho.

O SisBaHiA, em sua versão atual, oferece modos que foram utilizados na realização deste trabalho. A seguir, são detalhados brevemente alguns desses módulos, conforme descrito na referência técnica [54].

Modelagem Digital do Terreno: no módulo Malhas e Domínios de Modelagem há ferramentas para modelagem digital do terreno de interesse. Na tela “Visualizar...” há ferramentas diversas para importar mapas e linhas de contorno de terra e de água de mapas, definir contornos de modelagem, gerar e editar malhas de elementos finitos triangulares e quadrangulares. O SisBaHiA opera com coordenadas geográficas, longitudes e latitudes em graus decimais, ou métricas UTM ou similar, opera também com coordenadas métricas locais. Há várias ferramentas para interpolação de batimetria e dados de rugosidade equivalente do fundo etc.

Modelo Hidrodinâmico: é um modelo de circulação hidrodinâmica 3D ou 2DH otimizado para corpos de água naturais. Resultados podem ser tanto 3D quanto 2DH, dependendo dos dados de entrada. “Otimizado” é usado no sentido de um modelo

planejado para ótima representação de escoamentos em domínios naturais com geometria complexa. Processos de calibração são minimizados devido a fatores como: discretização espacial via elementos finitos quadráticos e transformações, permitindo ótimo mapeamento de corpos de água com linhas de costa e batimetrias complexas, campos de vento e atrito do fundo podendo variar dinamicamente no tempo e no espaço, e modelagem de turbulência multiescala baseada em Simulação de Grandes Vórtices (LES). Pode-se incluir efeitos de gradientes de densidade acoplando modelos de transporte de sal e calor dos Modelos de Qualidade de Água a modelos hidrodinâmicos. Pode-se também incluir evolução morfológica do fundo, com acoplamento de Modelos de Transporte de Sedimentos, de Geração e de Propagação de Ondas. Permite análises determinísticas e estatísticas nos resultados obtidos.

**Modelos de Qualidade de Água e Eutrofização:** trata-se de um conjunto de modelos de transporte Euleriano, para simulação acoplada de até 11 parâmetros de qualidade de água e indicadores de eutrofização: sal, temperatura, OD-DBO, nutrientes compostos de nitrogênio e de fósforo e biomassa. Tais modelos podem ser aplicados para escoamentos 2DH, ou em camadas selecionadas de escoamentos 3D. Permite análises determinísticas e estatísticas nos resultados obtidos. Aqui, foi utilizado apenas o parâmetro de salinidade.

**Modelo de Transporte Lagrangeano - Determinístico:** é um modelo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, para camadas selecionadas de escoamentos 3D ou 2DH. Este modelo é especialmente adequado para simulações de vários tipos de problemas, por exemplo:

- Plumas de emissários ou pontos de lançamento de efluentes ao longo da costa.
- Derrames de óleo, instantâneos ou por período definido.
- Mistura de massas de água, tempos de troca e renovação de massas de água entre diferentes setores de um corpo de água.
- Transporte de detritos flutuantes.
- Determinação de tempos de residência em corpos de água naturais.
- Determinação de tendências de deriva de sedimentos, substâncias dissolvidas ou particuladas flutuantes.
- Determinação de correntes residuais lagrangeanas.

Modelo de Geração de Ondas: é um modelo para geração de ondas por campos de vento variados no espaço e variáveis no tempo. O modelo determina se a geração de ondas será limitada pela pista ou pela duração do vento. O modelo permite calcular, ao longo do tempo, a distribuição espacial no domínio de parâmetros do clima de ondas gerado tais como: alturas significativas e médias quadráticas, períodos de pico, velocidades orbitais e tensões oscilatórias no fundo devido a ondas etc. Permite análises determinísticas e estatísticas nos resultados obtidos.

Outras ferramentas de apoio à modelagem, como: extração de dados do Hycom, extração de dados do FES, cópias de malhas e modelos, conversor de tempo entre dados etc.

Todos os modelos são integrados em uma interface de trabalho amigável, com ajuda contextual em todos os campos. Inúmeros tipos de saídas gráficas, inclusive animações, podem ser geradas, mesmo com modelos ainda rodando. A interface interage diretamente com os programas comerciais Surfer e Grapher, que foram utilizados para a geração de figuras e gráficos durante o pré e pós processamento. Mais informações sobre estes programas podem ser encontradas no site: [www.goldensoftware.com](http://www.goldensoftware.com).

Ao considerar o termo de gradiente de densidade baroclínico, o SisBaHiA não realiza o cálculo de forma tridimensional. Ele calcula o transporte de salinidade com base na média da coluna de água, o que pode ser visto como uma limitação em um modelo hidrodinâmico 3D. No entanto, para a Lagoa de Araruama, que é relativamente rasa e possui ventos de intensidade moderada atuando continuamente, as águas são bem misturadas [29]. Isso faz com que a abordagem 2DH represente de forma adequada a realidade, e a deficiência do modelo não afete de maneira significativa os resultados. Essa limitação seria mais relevante para a análise de estuários com cunha salina e estratificação significativa, mas na Lagoa de Araruama, trata-se mais de uma intrusão salina com a coluna de água bastante homogênea.

### **2.3.1 Considerações matemáticas sobre o modelo hidrodinâmico**

Conforme a referência técnica do SisBaHiA [54], a mecânica do escoamento em regime turbulento para qualquer corpo de água é governada pelas equações de Navier-Stokes, em conjunto com a equação da continuidade, uma equação de estado e uma equação de transporte para cada constituinte da equação de estado. As equações governantes do modelo hidrodinâmico 3D a serem resolvidas pelo modelo são:

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, nas direções x e y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \\ + 2\Phi \text{sen}\theta v \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \\ - 2\Phi \text{sen}\theta u \end{aligned} \quad (2.4)$$

Equação da continuidade integrada na vertical:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^\zeta u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^\zeta v dz = q_P - q_E + q_{Ia} - q_{Ie} \quad (2.5)$$

Os termos à direita na equação da continuidade, integrada na vertical, representam precipitação  $q_P$ , evaporação  $q_E$ , infiltração afluyente  $q_{Ia}$  e efluente  $q_{Ie}$ . No caso específico da Lagoa de Araruama, é essencial considerar a evaporação, pois sem ela não haveria a saída de água necessária para tornar a lagoa hipersalina.

Em escoamentos de grande escala, como as correntes causadas por marés e ventos, em áreas onde o fundo possui uma declividade relativamente suave, a equação da quantidade de movimento na direção vertical pode ser simplificada para a distribuição de pressão hidrostática. Isso é obtido a partir da integração da componente  $z$  da equação da quantidade de movimento ao longo da profundidade.

A equação da continuidade, integrada na vertical, é utilizada para resolver a incógnita da superfície livre  $\zeta$ , que surge ao integrar a componente  $z$  da equação da conservação da quantidade de movimento.

### 2.3.2 Considerações matemáticas sobre o modelo lagrangeano

Este estudo distingue-se pelas seguintes particularidades e características fundamentais:

- Fontes com dimensões muito pequenas em relação ao domínio de modelagem.
- Plumas contaminantes muito pequenas e com fortes gradientes em relação à discretização da malha do modelo.
- Transporte de frentes de partículas com fortes gradientes de concentração.

Todas essas questões podem ser resolvidas com a aplicação de um modelo lagrangeano de transporte de escalares passivos [55]. Um escalar é considerado passivo quando sua presença não interfere na hidrodinâmica local, como é o caso dos microplásticos. Ao contrário de um constituinte ativo, como o sal, que pode alterar o escoamento devido a diferenças de densidade baroclínicas, os microplásticos não afetam o escoamento.

O modelo lagrangeano é um método que acompanha o deslocamento das partículas, diferentemente do modelo euleriano, que monitora um volume de controle. Modelos lagrangeanos de trajetórias de partículas não perdem massa, não apresentam oscilações nem difusões numéricas, e resolvem muito bem gradientes fortes e frentes de concentração. A principal preocupação nesse modelo é escolher um passo de tempo que represente adequadamente o deslocamento das partículas, garantindo que não se perca informação sobre as regiões por onde as partículas passaram.

Na técnica de modelagem lagrangeana, a incógnita básica é a posição das partículas discretas. A massa do escalar lançado na água é discretizada em múltiplas partículas, e suas trajetórias precisam ser determinadas.

Cada partícula representa o centro de massa de uma pequena mancha contaminante com uma distribuição de concentrações específica. A soma das manchas de todas as partículas reproduz a distribuição de concentrações do escalar,  $C(x,y,z,t)$ , que é a incógnita dos modelos convencionais. Assim, com esta técnica, as concentrações são calculadas de forma indireta.

Para se aplicar este modelo, é necessário, primeiramente, calcular o campo de velocidades que realizará o transporte advectivo das partículas analisadas. Em outras palavras, é preciso resolver o modelo hidrodinâmico da região de análise.

Para iniciar o processo, o modelo lança um número finito de partículas em cada intervalo de tempo a partir do interior de uma fonte, sendo que o centro da fonte coincide com o centro da fonte contaminante.

No momento do lançamento, cada partícula é posicionada aleatoriamente dentro da área da fonte. As dimensões dessa fonte devem ser grandes o suficiente para que, em seu interior, se estabeleça uma mancha de efluente passiva em relação às águas do corpo

receptor. Em geral, uma distância equivalente a duas vezes a profundidade ao redor da fonte é suficiente.

A relação entre o número de partículas lançadas e a vazão de contaminantes por unidade de tempo, *Concentração x Vazão da fonte*, permite calcular a massa de cada partícula lançada. Dada uma vazão  $Q_e$  na fonte, com concentração  $C_e$  de um contaminante, é possível calcular a massa equivalente de contaminante de cada partícula lançada pela seguinte expressão:

$$M = \frac{Q_e C_e \Delta t}{N_p} \quad (2.6)$$

Sendo a relação  $N_p/\Delta t$  o número de partículas lançadas por intervalo de tempo, uma das variáveis definidas pelo usuário.

O transporte advectivo da nuvem de partículas, em cada instante de tempo, é definido pela trajetória de cada partícula, calculando-se a posição  $P^{n+1}$  a cada tempo  $(n+1)\Delta t$ . Isso é feito através da expansão em série de Taylor a partir da posição anterior  $P^n$ , no instante de tempo  $n\Delta t$ , como mostrado a seguir:

$$P^{n+1} = P^n + \Delta t \frac{dP^n}{dt} + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{d^2 P^n}{dt^2} + T. A. O \quad (2.7)$$

Onde T.A.O representa os termos de ordens mais altas que são desprezados.

As derivadas temporais da posição  $P$ , que são utilizadas na expansão em série de Taylor, são obtidas a partir do campo de velocidades calculado previamente pelo modelo hidrodinâmico, utilizando as expressões:

$$\frac{dP}{dt} = V(u, v, w) \quad (2.8)$$

$$\frac{d^2 P}{dt^2} = \frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} \quad (2.9)$$

A velocidade  $V(u,v,w)$ , que rege o transporte advectivo das partículas, segue a velocidade das correntes do corpo receptor, variando temporal e espacialmente de acordo com os forçantes locais, que, neste caso, incluem ventos, marés, vazões fluviais e gradiente de salinidade.

A simulação do efeito da difusão turbulenta no espalhamento das partículas é realizada através da introdução de um desvio de velocidade  $v$ , que é somado à velocidade de advecção calculada pelo modelo hidrodinâmico. Em geral, adota-se um desvio de velocidade aleatório, ou seja, o valor do desvio é calculado por sorteio, com uma escala baseada na formulação das difusividades turbulentas.

Utilizando um modelo de tensões turbulentas dissipativas dado por:

$$\frac{\tau_{ij}^T}{\rho_0} = v_{ij} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\Lambda_k^2}{24} \left( \left| \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right| \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \left| \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right| \right) \quad (2.10)$$

A função de desvio pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$v = \frac{\alpha}{V\Delta t} \left( v_{ij} + \frac{\Lambda_k^2}{24} \left| \frac{\partial V}{\partial x_k} \right| \right) \quad (2.11)$$

Onde  $\alpha$  representa uma função aleatória que varia no intervalo  $[-1, 1]$ .

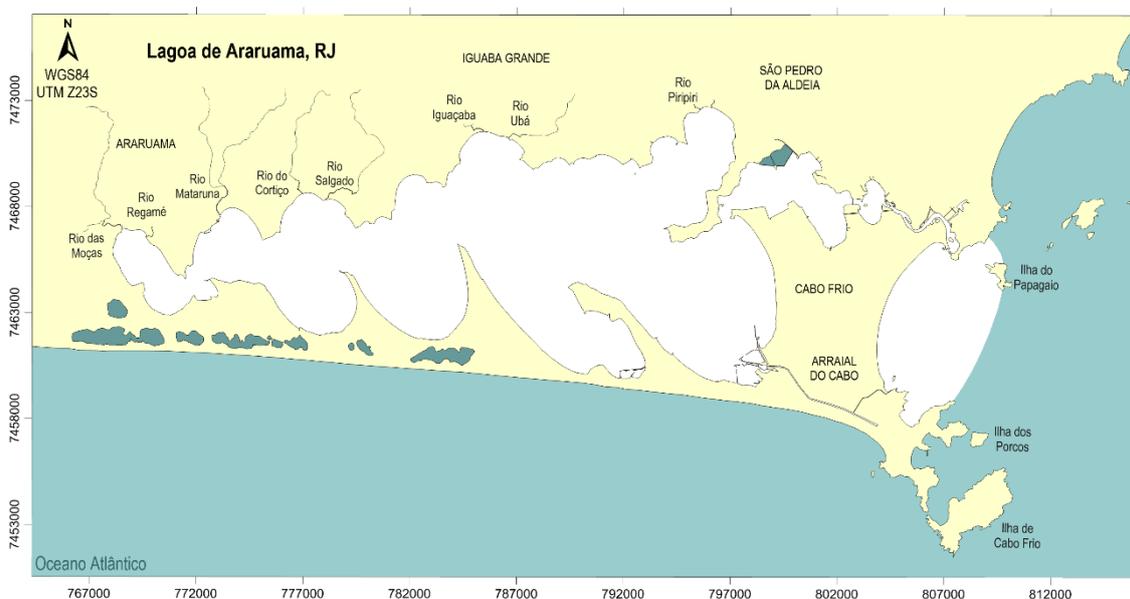
A Figura 2.7 apresenta um desenho esquemático de como o modelo calcula o deslocamento de uma partícula no corpo d'água. Uma partícula parte de uma posição inicial e é deslocada advectivamente até uma posição intermediária. Em seguida, o modelo realiza um sorteio para o deslocamento difusivo, representado pela seta vermelha, entre todas as direções possíveis que não foram sorteadas em verde. Ao somar o deslocamento difusivo ao deslocamento advectivo calculado, obtém-se a posição final da partícula.



Figura 2.7: Desenho esquemático de um deslocamento composto por uma parte advectiva e outra difusiva. As setas verdes são os possíveis deslocamentos difusivos que não foram sorteados.

### 3 Metodologia

A área de análise abrange toda a Lagoa de Araruama e uma parte do litoral na saída do Canal de Itajuru, que inclui as praias do Forte, das Dunas e do Foguete, em Cabo Frio, e a Prainha, em Arraial do Cabo. A zona litorânea é delimitada pela Ilha do Papagaio. A área de estudo está destacada em branco na Figura 3.1.



*Figura 3.1: Região de análise contendo a Lagoa de Araruama e a zona litorânea na saída do canal de Itajuru.*

O transporte de microplásticos foi avaliado usando o modelo de transporte lagrangeano. Para a realização do trabalho, as análises foram divididas por época do ano: verão e inverno; por tipo de fonte: rios, ETEs e fontes difusas; e pela densidade dos microplásticos: leves, neutros e densos. A divisão está detalhada na Tabela 3.1. Esta abordagem permitiu avaliar a influência de cada fonte e tipos de microplásticos individualmente, facilitando a identificação de problemas específicos.

*Tabela 3.1: Lista de análises do transporte de microplásticos.*

Lista de análises			
Período	Análise	Fonte	Microplásticos
Inverno	1	ETEs	Leves
	2	ETEs	Neutros
	3	ETEs	Densos
	4	FDs	Leves
	5	FDs	Neutros
	6	FDs	Densos
	7	Rios	Leves
	8	Rios	Neutros
	9	Rios	Densos
Verão	10	ETEs	Leves
	11	ETEs	Neutros
	12	ETEs	Densos
	13	FDs	Leves
	14	FDs	Neutros
	15	FDs	Densos
	16	Rios	Leves
	17	Rios	Neutros
	18	Rios	Densos

A seguir, na seção 3.1, é descrita a modelagem digital do terreno empregada na análise. Em seguida, a seção 3.2 apresenta o condicionamento do modelo hidrodinâmico, enquanto a seção 3.3 aborda o processo de calibração. Por fim, a seção 3.4 detalha o modelo de transporte lagrangeano utilizado para a análise do transporte de microplásticos.

### 3.1 Modelagem digital do terreno

A morfologia da costa e do corpo d'água exerce uma influência determinante no transporte dos microplásticos [36]. Para a discretização do domínio, foram utilizados contornos de terra e mar retirados do Google Earth. O domínio está localizado nas regiões 23K e 24K, nas coordenadas UTM - Universal Transversa de Mercator. Para efeitos de posicionamento, foi utilizado o quadrante 23K (23S-Sul), e a posição dos elementos pertencentes ao quadrante 24K foi extrapolada em relação às coordenadas X e Y do quadrante 23K.

O domínio de modelagem, contendo a malha de discretização em elementos finitos, é mostrado na Figura 3.2. É importante mencionar que a modelagem 3D é realizada em 11 níveis de profundidade, o que significa que o modelo possui 11 malhas empilhadas. A tabela com os números referentes à malha presente na Figura 3.2 mostra os valores de

apenas um nível. O número total de elementos é de  $2.244 \times 11 = 24.684$ . O número de elementos quadrangulares biquadráticos é de  $2.070 \times 11 = 22.770$ . Já o de elementos triangulares quadráticos é de  $174 \times 11 = 1.914$ . Por fim, o número total de nós considerados é de  $9.980 \times 11 = 109.780$ .

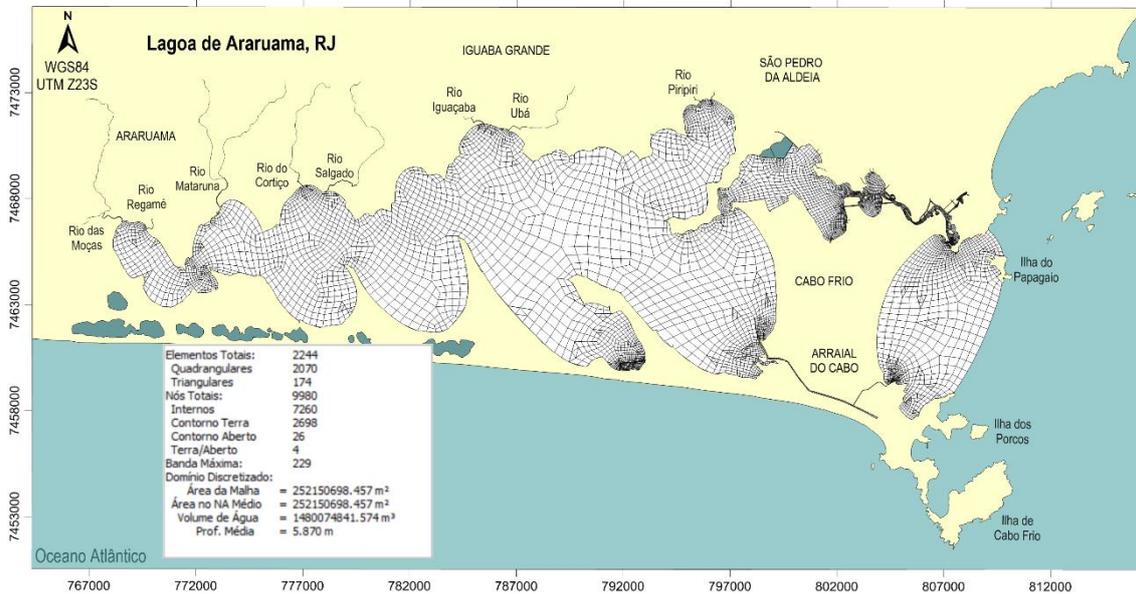


Figura 3.2: Malha de discretização do domínio em elementos finitos. A área do domínio de modelagem é de 252 km<sup>2</sup>.

A batimetria da região é apresentada na Figura 3.3. A batimetria da lagoa baseia-se em levantamentos realizados pela Universidade Federal Fluminense (UFF), pela Secretaria Estadual de Rios e Lagoas (SERLA), entre outros levantamentos mencionados em [56] nos anos de 2005, 2006, 2017 e 2019. A lagoa possui várias áreas rasas, com profundidades de até 5 m em suas margens, e uma região mais profunda em seu centro, que pode alcançar até 15 m. O nível médio do mar considerado é o nível de redução das cartas náuticas 1503 e 1505 da DHN, que é de 0,68 m.

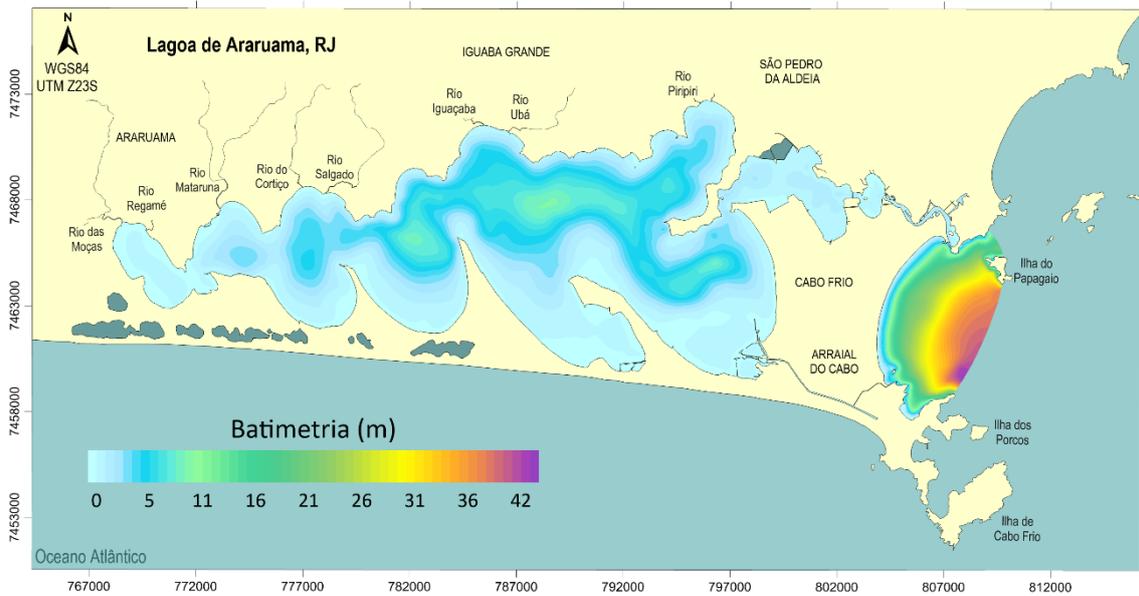


Figura 3.3: Batimetria da região de análise, contendo a Lagoa de Araruama e a região costeira adjacente.

### 3.2 Modelo hidrodinâmico

Para dar suporte a análise do problema proposto, foi desenvolvido um modelo hidrodinâmico tridimensional, considerando-se a necessidade de avaliar toda a coluna d'água, já que as partículas de microplásticos podem estar dispersas em diferentes profundidades.

A modelagem 3D foi realizada utilizando um método analítico-numérico, com a inclusão dos efeitos de Coriolis e do gradiente de densidade. O modelo foi configurado para operar acoplado a um módulo de salinidade e a um modelo de geração de ondas induzidas pelo vento. As forçantes consideradas foram as marés e os ventos, além da evaporação da água. O modelo iniciou com uma condição inicial "fria", onde a elevação nos pontos internos da lagoa foi definida como 0,68 m, enquanto a elevação na fronteira aberta foi estabelecida conforme o nível da maré no instante inicial da simulação. Todos os pontos partiram de velocidade zero nas direções  $x$  e  $y$ .

Além da fronteira aberta, foram configuradas como entradas de água nova na lagoa os rios, as estações de tratamento de efluentes e as fontes difusas. Dois modelos foram desenvolvidos para períodos distintos: um contemplando os 31 dias do mês de julho e outro os 28 dias do mês de fevereiro.

A modelagem foi executada em 11 níveis de profundidade, dividindo a coluna d'água em 10 camadas iguais, de modo a representar com precisão o perfil de velocidade e os fenômenos de circulação hidrodinâmica na lagoa. Adicionalmente, resultados

hidrodinâmicos foram armazenados a 20 cm da superfície livre, para análise da deriva de microplásticos menos densos que a água, e a 20 cm do fundo, para análise de microplásticos mais densos. Os resultados médios na coluna d'água, 2DH, foram automaticamente gerados pelo SisBaHiA.

As forçantes do modelo são detalhadas na seção 3.2.1, enquanto a escolha dos períodos representativos de inverno e verão para análise é justificada na seção 3.2.2.

### **3.2.1 Marés e ventos**

Os dados de maré astronômica foram obtidos a partir do FES2014. As constantes harmônicas foram extraídas de uma estação próxima à fronteira aberta do modelo, utilizando a ferramenta “Extrai Dados do FES” do SisBaHiA. As constantes M2 e S2 foram identificadas como as mais representativas.

Os dados de maré meteorológica foram extraídos do HYCOM a partir de uma estação próxima à fronteira aberta do modelo, utilizando a ferramenta “Extrai Informações do HYCOM” do SisBaHiA.

As informações de vento a 10 m de altitude e evaporação foram extraídas dos dados de reanálise do ERA5 em três posições diferentes ao longo da lagoa, utilizando as ferramentas “Extrai Dados de um arquivo NetCDF do ERA-Interim & ERA5” e “Converte Dados de Vento” do SisBaHiA.

Embora exista uma estação do Instituto Nacional de Meteorologia, INMET, em Arraial do Cabo, optou-se por utilizar os dados de reanálise extraídos do ERA-5. Essa escolha permitiu obter informações de estações localizadas diretamente sobre o espelho d'água da lagoa e em diferentes pontos, capturando a variação espacial do campo de ventos. Os dados de reanálise do ERA-5 são considerados satisfatórios em comparação com os dados do INMET [57].

As posições das três estações do ERA5, da estação de maré astronômica do FES e da estação de maré meteorológica do HYCOM estão mostradas na Figura 3.4. As coordenadas UTM dessas estações estão apresentadas na Tabela 3.2.



Figura 3.4: Posição das estações utilizadas para extração de informações de ventos, evaporação e marés.

Tabela 3.2: Coordenadas UTM leste e norte das estações de vento e marés.

Estação	UTM Leste	UTM Norte
Est_Oeste	772870	7465084
Est_Central	786213	7464837
Est_Leste	798530	7464598
FES	814098	7460257
HYCOM	815837	7457930

A principal força motriz do escoamento na Lagoa de Araruama é o vento, que sopra majoritariamente de nordeste com intensidade geralmente superior a 5 m/s. Devido às grandes dimensões da lagoa, há uma variação espacial significativa no campo de ventos da região analisada. Os ventos apresentam maior intensidade na região leste, próxima ao mar, e diminuem em intensidade conforme se deslocam para o oeste. A Figura 3.5 ilustra um exemplo de mapa de vento tradicional de nordeste, mostrando suas diferentes intensidades.

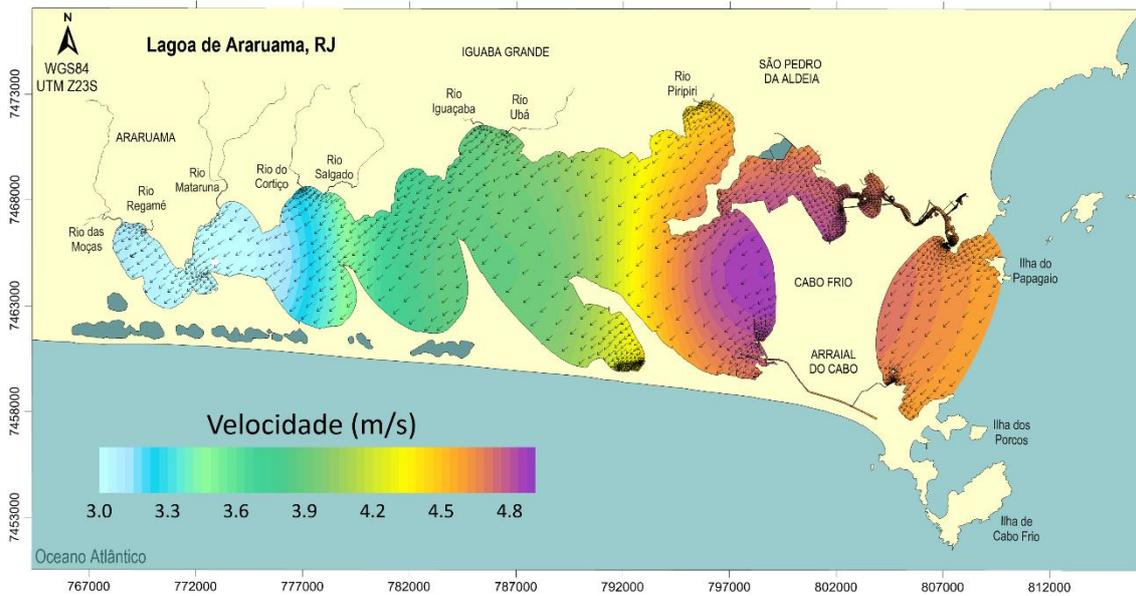


Figura 3.5: Mapa de ventos tradicional de nordeste em 03/02/2023 às 9h mostrando a variação espacial de intensidade ao longo da lagoa.

A Figura 3.6 mostra as curvas de maré total e de maré meteorológica para um nó na fronteira aberta do modelo durante o verão, enquanto a Figura 3.7 ilustra as marés para o período de inverno. É possível observar que a maré meteorológica exerce uma influência maior durante o inverno, com amplitudes mais elevadas, em comparação com o verão. Isso provavelmente se deve à maior ocorrência de tempestades e condições meteorológicas adversas durante o inverno. A região apresenta um regime de maré semidiurna, com duas marés altas e duas baixas por dia.

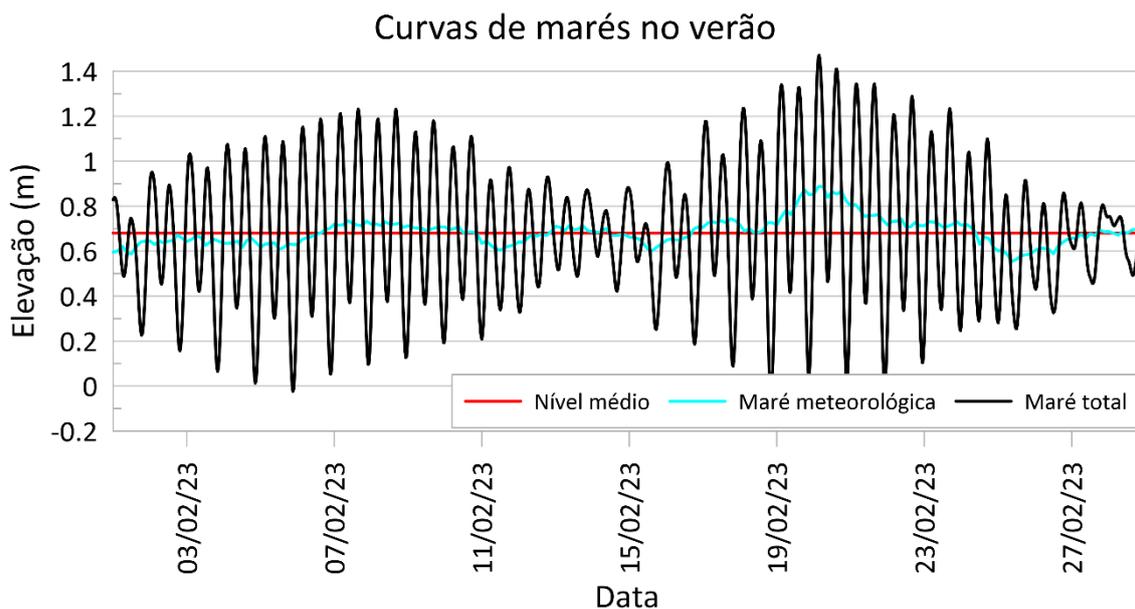


Figura 3.6: Curvas de maré durante o verão para um nó na fronteira aberta do modelo (Nó 553).

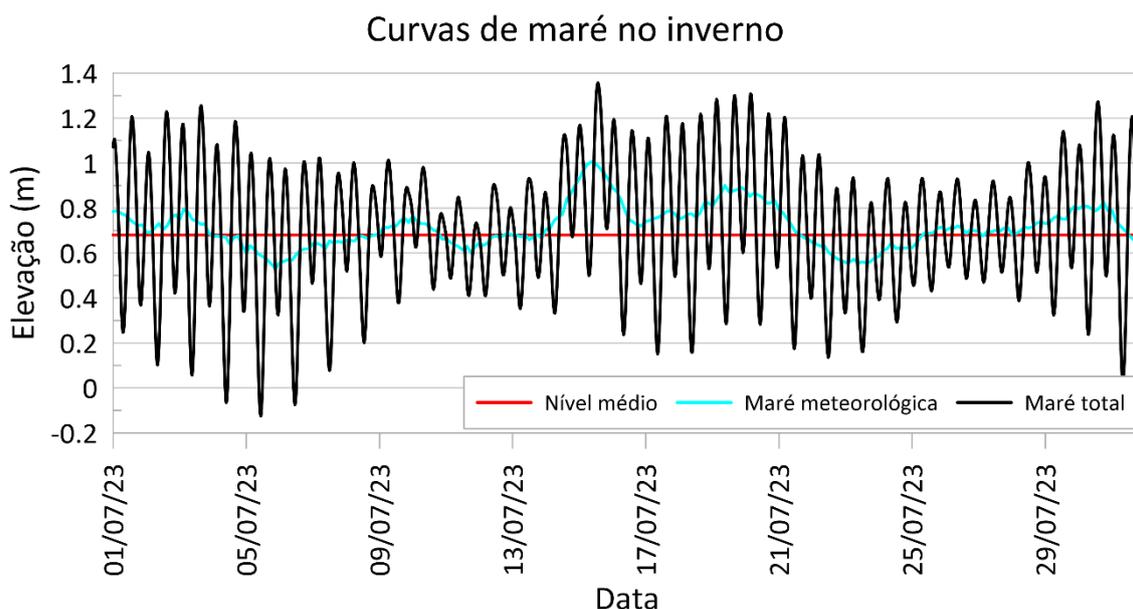


Figura 3.7: Curvas de maré durante o inverno para um nó na fronteira aberta do modelo (Nó 553).

### 3.2.2 Escolha do período de análise

A maioria das partículas de microplásticos é flutuante [41], e o principal fator condicionante do escoamento na região são os ventos. Sendo assim, faz sentido escolher o período de análise com base no regime de ventos. A intenção é realizar uma simulação para o período de verão e outra para o período de inverno, por serem as estações mais icônicas da região, caracterizadas pelo elevado movimento turístico no verão e pela baixa atividade no inverno.

O ano de 2023 foi selecionado para a realização das análises, por ser o ano completo mais recente no início do desenvolvimento deste trabalho, permitindo assim obter a resposta mais atualizada possível sobre o transporte dos microplásticos na lagoa.

A Figura 3.8 apresenta a rosa dos ventos para o ano de 2023, referente à estação de dados do ERA5 Est\_Leste, conforme mostrado na Figura 3.4. Analisando a rosa dos ventos anual, observa-se que, na maior parte do tempo, o vento sopra predominantemente das direções leste/nordeste, com uma menor ocorrência de ventos provenientes da direção sudoeste. Os ventos provenientes do noroeste não ocorrem na região, e os ventos de sudoeste são raros.

Essas duas direções principais são as mais relevantes para a análise da deriva de microplásticos na lagoa. Em ambos os casos, a intensidade do vento é significativa,

permanecendo consistentemente acima de 5 m/s. Em ambas as direções principais, ocorrem ventos superiores a 8 m/s em algumas ocasiões, caracterizando a região como uma área de ventos fortes e constantes.

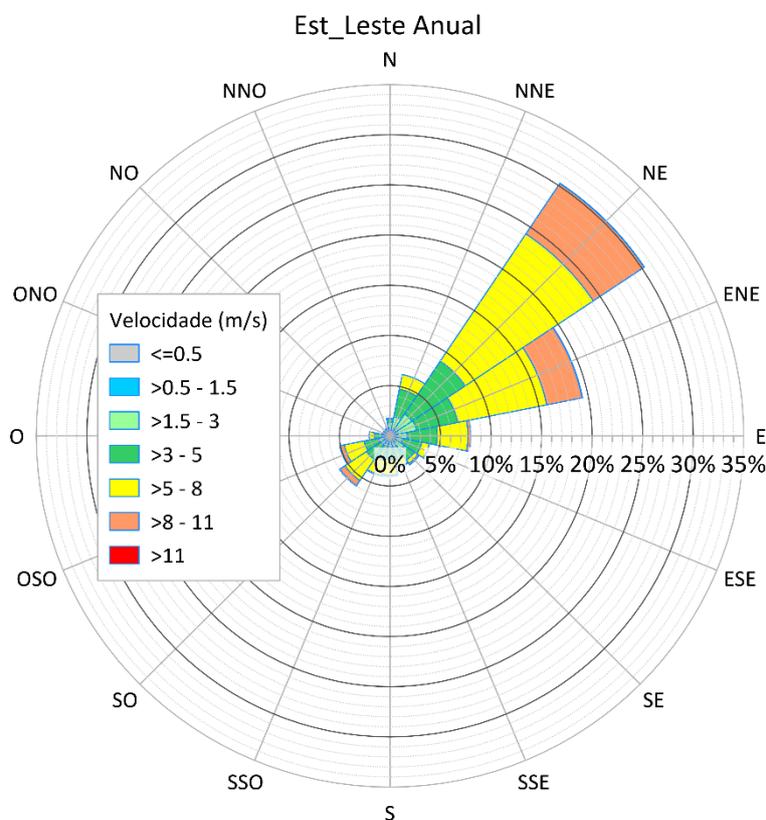


Figura 3.8: Rosa dos ventos para o ano de 2023 referente a estação Est\_Leste.

Os períodos escolhidos para as análises foram os meses de fevereiro e julho. A escolha se deu por representarem, respectivamente, um mês de verão e um mês de inverno. A Figura 3.9 apresenta as rosas dos ventos para esses meses. Em fevereiro, a rosa dos ventos revela ventos provenientes praticamente 100% do tempo do nordeste, característicos da região. Dessa forma, a análise do mês de fevereiro proporciona uma visão do transporte típico de microplásticos, que predomina na maior parte do ano. Em contrapartida, a rosa dos ventos de julho mostra uma maior variabilidade, com ventos tradicionais de nordeste, mas também com uma diversificação maior no regime de ventos. Durante julho, há ventos fortes provenientes do sudoeste, o que permite analisar outras perspectivas do escoamento. Além disso, o mês de julho pode ser considerado um resumo do ano, pois a rosa dos ventos desse mês é muito semelhante à anual, proporcionando uma visão geral do transporte médio de microplásticos ao longo do ano.

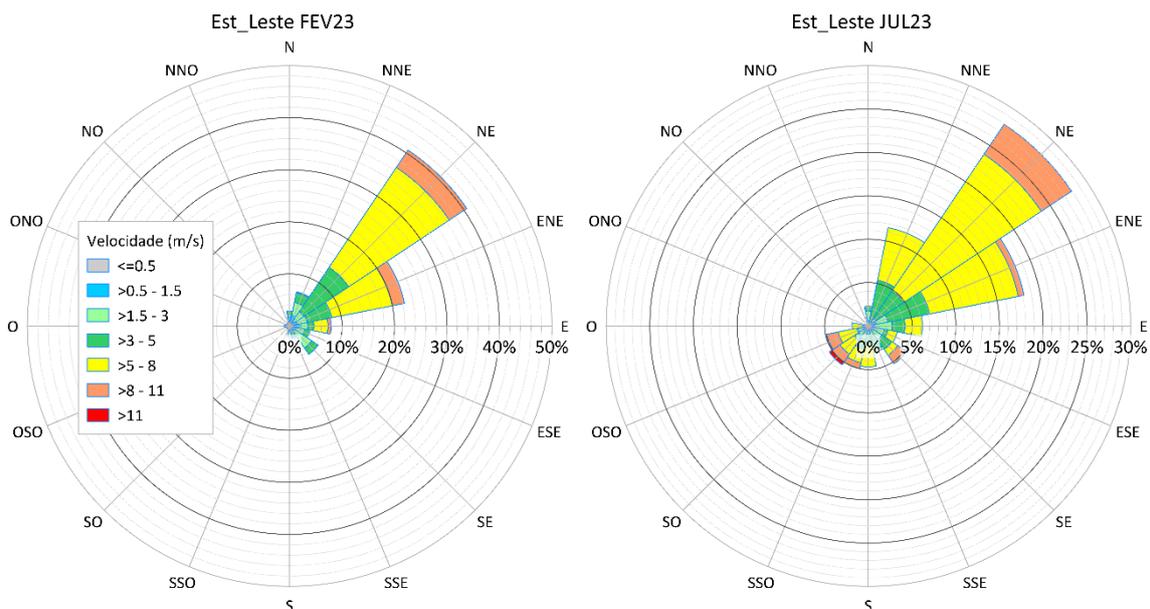


Figura 3.9: Rosas de ventos para os meses de fevereiro e julho de 2023 referente a estação do ERA5 Est\_Leste.

Os meses de janeiro, fevereiro e março, que compreendem o verão, apresentam regimes de ventos muito semelhantes, como mostrado na Figura 3.10. Por essa razão, não haveria diferença significativa em escolher qualquer um deles para a análise. Os meses de outono, abril, maio e junho, exibidos na Figura 3.11, têm ventos com direções e percentuais semelhantes aos de julho, mas com intensidades menores. O inverno, ilustrado na Figura 3.12, abrange julho, agosto e setembro, e é a estação que apresenta a maior variabilidade no regime de ventos, sendo que, para o ano de 2023, o mês de julho oferece a melhor relação entre ventos de nordeste e sudoeste. A primavera, representada na Figura 3.13, nos meses de outubro, novembro e dezembro, já mostra ventos predominantemente de nordeste, e quando ocorrem ventos de sudoeste, eles não têm alta intensidade. Portanto, os meses de fevereiro e julho proporcionam uma amostragem representativa das condições de vento ao longo do ano, e não haveria diferença relevante se a análise do verão fosse realizada em janeiro ou março.

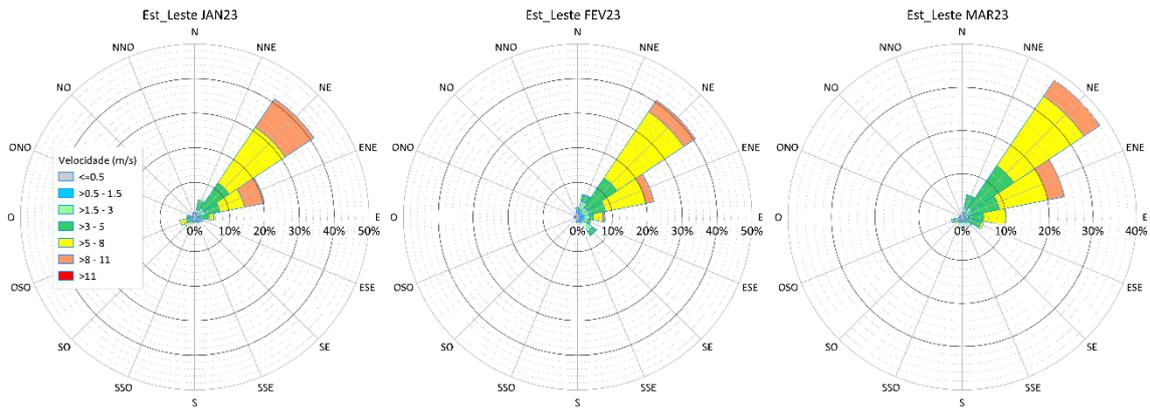


Figura 3.10: Rosas de ventos para o verão, meses de janeiro, fevereiro e março de 2023, referente a estação do ERA5 Est\_Leste.

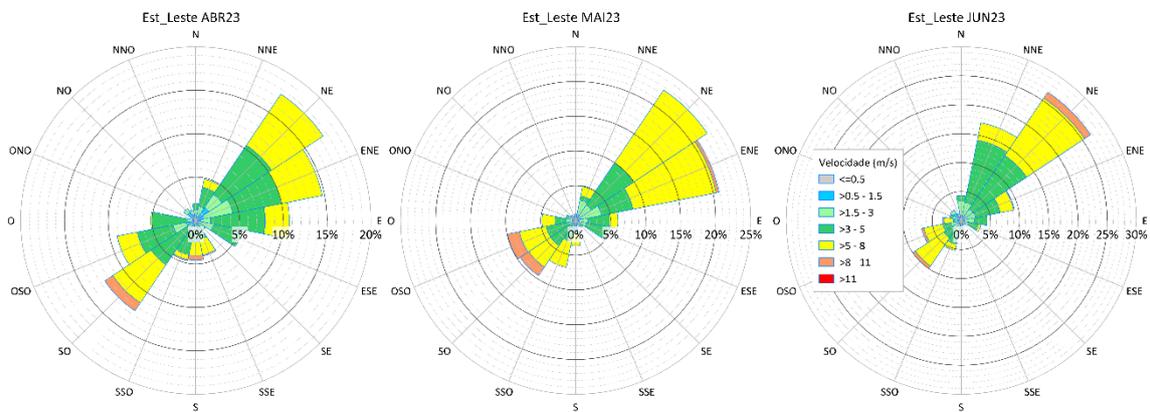


Figura 3.11: Rosas de ventos para o outono, meses de abril, maio e junho de 2023, referente a estação do ERA5 Est\_Leste.

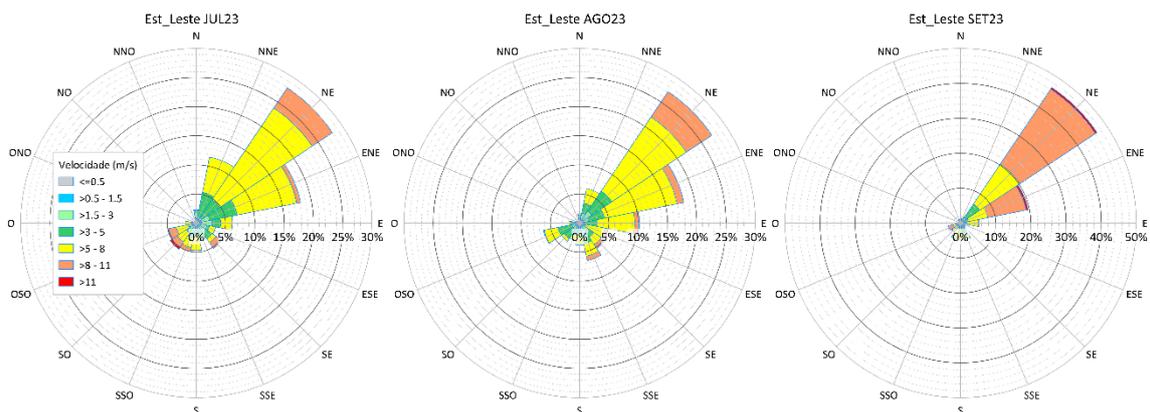


Figura 3.12: Rosas de ventos para o inverno, meses de julho, agosto e setembro de 2023, referente a estação do ERA5 Est\_Leste.

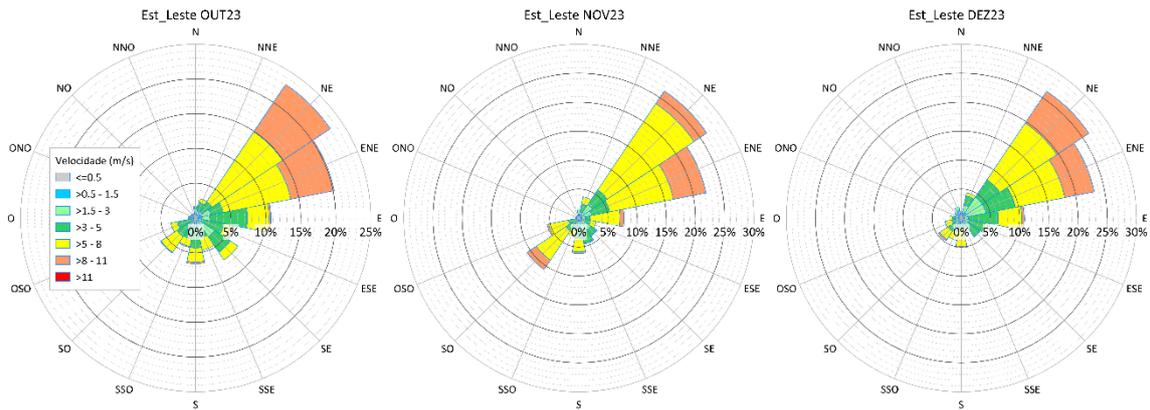


Figura 3.13: Rosas de ventos para a primavera, meses de outubro, novembro e dezembro de 2023, referente a estação do ERA5 Est\_Leste.

### 3.3 Calibração do modelo

Os modelos computacionais devem tentar reproduzir de forma mais fiel possível os fenômenos reais que ocorrem na natureza. Para isso, são necessários métodos de calibração e validação. A referência técnica do SisBaHiA [54], em sua seção 9, aponta alguns passos fundamentais para a correta calibração dos modelos. Entre eles:

- Checagem de se as escalas características dos fenômenos de interesse e as escalas de discretização do modelo são compatíveis. As escalas do modelo devem ser pelo menos oito vezes menores que as escalas reais.
- Checagem se a geometria do domínio de interesse está adequadamente representada.
- Aplicação correta de condições de contorno.

Durante a execução da modelagem, essas três etapas foram seguidas. O passo de tempo do modelo hidrodinâmico foi definido em 10 segundos, e os resultados foram salvos a cada hora para a confecção de mapas e a cada 30 minutos para séries temporais, garantindo uma representação adequada dos fenômenos de circulação hidrodinâmica da lagoa. A geometria do domínio, construída a partir do Google Earth, é a mesma utilizada em [56] e representa com precisão os contornos de terra e mar. As condições de contorno foram aplicadas com base em dados retirados de reanálises do ERA5 e relatórios anteriores.

O modelo hidrodinâmico foi calibrado utilizando dados de elevação. Esses dados foram obtidos a partir de marégrafos instalados em diferentes pontos da lagoa, que

mediram a elevação do nível da água durante o período de 06/02/2019 a 22/02/2019. As coordenadas dos marégrafos utilizados estão detalhadas na Tabela 3.3.

*Tabela 3.3: Posição dos marégrafos utilizados na calibração do modelo hidrodinâmico referentes a zona 23K em coordenadas UTM, ilustrados na Figura 4.1.*

Marégrafo	UTM Leste	UTM Norte
N1	806190	7456400
N2	804960	7467701
N3	801693	7468853
N5	771660	7464983

Os marégrafos N2, N3 e N5 estão localizados dentro da malha, enquanto o marégrafo N1 encontra-se em Arraial do Cabo, fora da malha, e foi comparado com o ponto central da fronteira aberta do modelo.

A Figura 3.14 apresenta a comparação entre os dados medidos pelo marégrafo N1 e os resultados computados pelo modelo na fronteira aberta. Embora as posições não sejam exatamente coincidentes, a distância entre elas é relativamente curta, e ambas as localidades estão em mar aberto, diretamente influenciadas pela maré, permitindo uma comparação adequada.

A Figura 3.15 apresenta a comparação do modelo com os dados do marégrafo N2, localizado no Canal de Itajuru. Nota-se uma diminuição na amplitude da maré.

A Figura 3.16 compara os dados medidos com os computados referentes ao marégrafo N3, localizado na extremidade leste da lagoa. As oscilações de maré ainda estão presentes, mas significativamente atenuadas.

A Figura 3.17 compara os dados medidos com os computados referentes ao marégrafo N5, localizado no extremo oeste da lagoa. A elevação já não aparenta ser influenciada pelas oscilações semidiurnas da maré, sugerindo que essa região é predominantemente dominada pelos ventos.

Os resultados obtidos na modelagem foram considerados satisfatórios e representativos da situação medida. O modelo capturou bem tanto as amplitudes das oscilações quanto os valores dos níveis. Além disso, não foram perceptíveis erros de frequência ou fase.

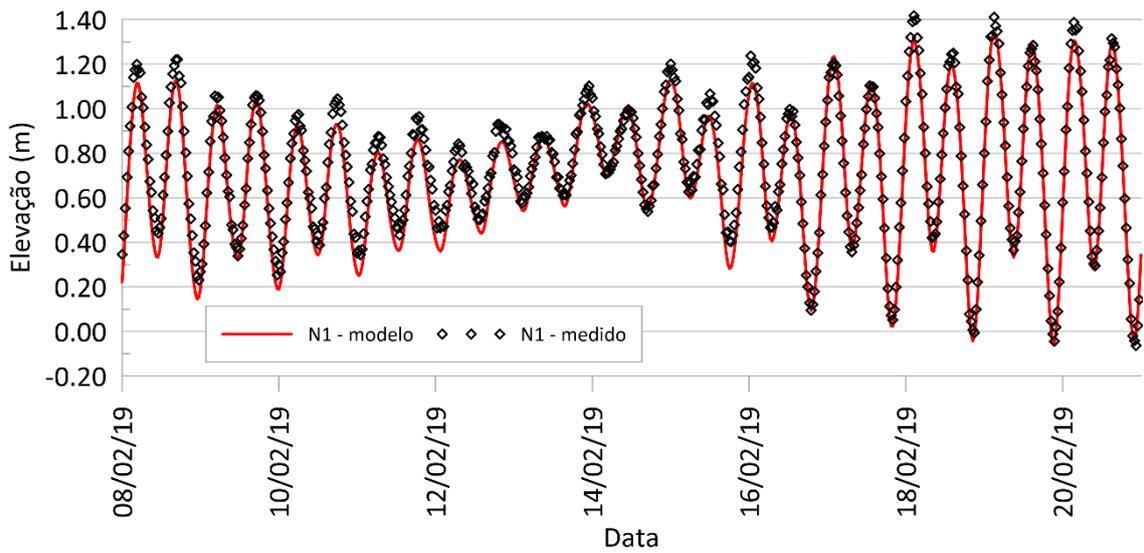


Figura 3.14: Séries temporais de elevação comparando os dados medidos com os resultados do modelo referentes ao marégrafo N1. NR: 0,68 m.

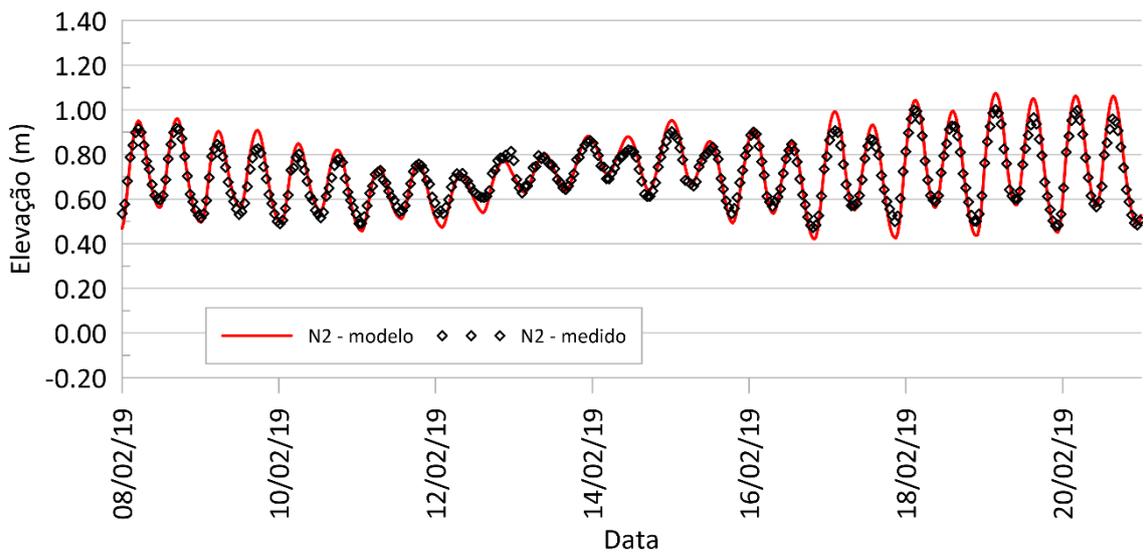


Figura 3.15: Séries temporais de elevação comparando os dados medidos com os resultados do modelo referentes ao marégrafo N2. NR: 0,68 m.

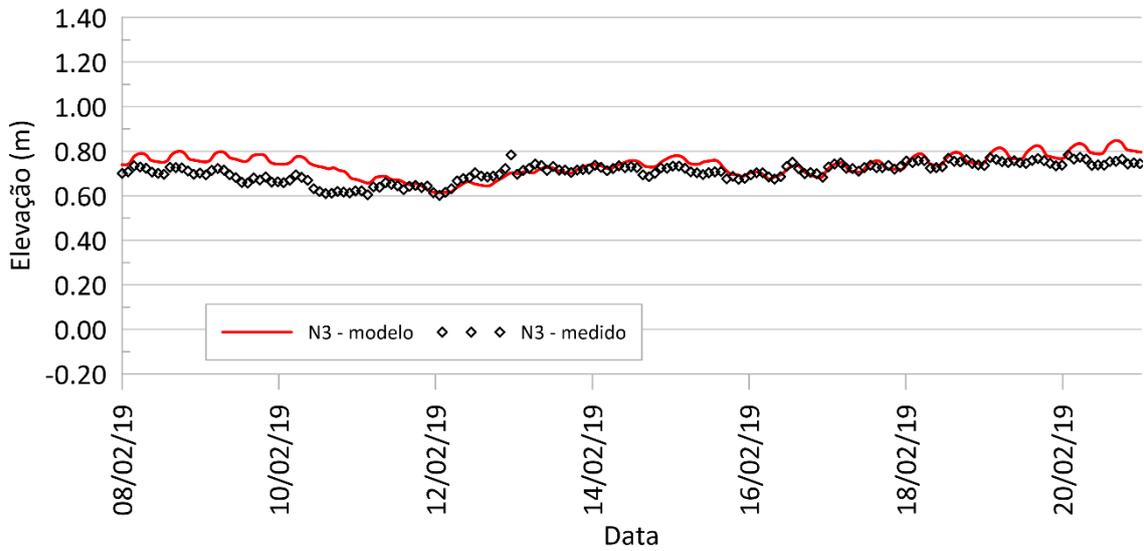


Figura 3.16: Séries temporais de elevação comparando os dados medidos com os resultados do modelo referentes ao marégrafo N3. NR: 0,68 m.

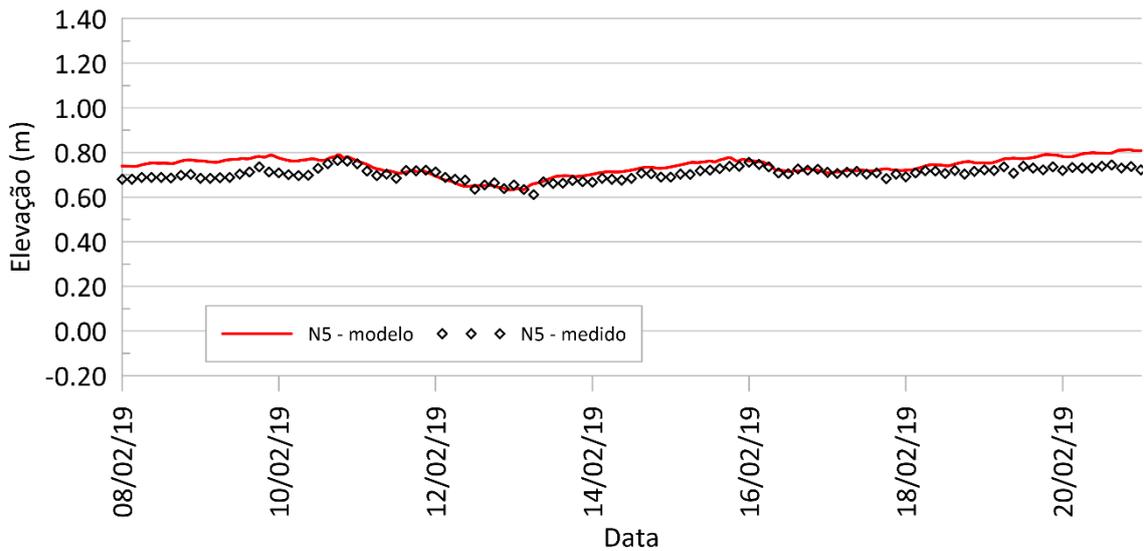


Figura 3.17: Séries temporais de elevação comparando os dados medidos com os resultados do modelo referentes ao marégrafo N5. NR: 0,68 m.

### 3.4 Modelo de transporte lagrangeano

Para essa análise, foi utilizado o recurso de “Fontes” do modelo de transporte lagrangeano do SisBaHiA. Este recurso permite lançar uma quantidade específica de partículas a uma taxa definida pelo usuário.

O SisBaHiA permite a realização de análises determinísticas e probabilísticas. Conforme descrito em sua referência técnica [54], o modelo de transporte lagrangeano determinístico é um modelo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, aplicável a camadas selecionadas de escoamentos 3D ou 2DH.

As análises de deslocamento serão realizadas para três níveis de densidade dos microplásticos: os leves, que sofrem maior influência das correntes superficiais geradas pelo vento; os de flutuabilidade neutra, que são transportados pela corrente média na seção transversal; e os mais densos, que se deslocam mais lentamente junto ao fundo. Para isso, serão selecionadas as camadas a 20 cm da superfície livre, a 20 cm do fundo e a 2DH.

O modelo determinístico foi utilizado para prever o deslocamento dos microplásticos com base na circulação hidrodinâmica local, com os seguintes objetivos:

- Identificar as áreas do litoral onde ocorre a absorção de microplásticos.
- Identificar as áreas da lagoa com passagem de microplásticos.
- Identificar regiões mais propensas ao acúmulo de microplásticos, através do cálculo de concentrações.
- Identificar as regiões do fundo onde ocorre a deposição de microplásticos.

Para alcançar os objetivos propostos, foram realizadas análises envolvendo a localização dos microplásticos na água e sua absorção no litoral, a porcentagem de tempo de passagem pelas diferentes regiões da lagoa durante o período de modelagem, as concentrações de microplásticos na água ao final da simulação e as áreas de deposição de microplásticos densos no fundo.

As modelagens de transporte de microplásticos foram realizadas ao longo de um período de vinte dias, com início no dia 8 de cada mês. O início no dia 8 permitiu que o modelo hidrodinâmico já tivesse atingido condições representativas de elevação e velocidade, uma vez que o modelo iniciou com uma condição inicial "fria". O período de vinte dias foi considerado suficiente para observar os fenômenos de transporte relevantes. Assim, foram analisados períodos equivalentes nos meses de verão e inverno, especificamente fevereiro e julho.

As modelagens foram organizadas com base na densidade relativa dos microplásticos em relação à água, permitindo a avaliação de diferentes comportamentos de transporte e deposição.

Na análise das partículas na água, o sistema de modelagem lança uma quantidade definida de partículas de cada uma das fontes especificadas a cada período determinado. Essa abordagem permite observar o percurso das partículas desde o seu lançamento até o destino, proporcionando um bom rastreamento de seu caminho.

Além disso, é realizada a identificação das áreas do litoral onde ocorre a absorção dos microplásticos presentes na água. Para essa análise, as regiões de praia foram marcadas como áreas de absorção, enquanto nas demais áreas do litoral, as partículas permanecem na água sem serem absorvidas. A absorção de partículas no litoral representa a deposição de microplásticos nas praias no ambiente físico.

Essa análise não foi realizada para microplásticos com densidade maior que a da água, devido ao seu baixo deslocamento.

A análise do tempo de passagem revela a porcentagem do período de modelagem em que uma região registrou a presença de microplásticos. Essa análise permite identificar os caminhos preferenciais dos microplásticos, determinar as regiões por onde foram transportados e destacar as áreas que não registraram sua presença. Foram avaliadas as porcentagens de tempo de passagem para os microplásticos leves, neutros e densos.

A análise das concentrações permite identificar regiões onde os microplásticos tendem a se acumular e quantificar a diluição das partículas lançadas pelas diferentes fontes ao longo da lagoa. A concentração de microplásticos lançados pelas fontes foi definida como 1, tornando a análise paramétrica. A concentração mínima na modelagem foi definida como  $10^{-5}$ , sendo que valores abaixo disso não são considerados.

Não foi realizada análise de concentrações para os microplásticos densos, uma vez que eles tendem a se acumular próximo às suas fontes, sem um transporte significativo.

Os microplásticos densos são transportados quando a tensão de arraste supera sua tensão crítica de mobilidade. Dessa forma, existem áreas de deposição próximas às fontes, onde ocorre o acúmulo de microplásticos, que posteriormente são transportados. A análise da sedimentação de microplásticos mais densos que a água permite observar quais regiões do fundo da lagoa possuem depósitos de microplásticos lançados pelas diferentes fontes.

O estudo dos microplásticos densos considerou valores típicos para parâmetros relevantes de deposição e transporte, como a densidade de  $1140 \text{ kg/m}^3$ , característica de polímeros como a poliamida. Para a velocidade de queda, diversas faixas de valores são reportadas na literatura, variando de  $0,1 \text{ mm/s}$ , conforme [58], até  $14 \text{ mm/s}$ , segundo [13]. Para garantir um cenário mais crítico, foi adotado o valor de  $0,1 \text{ mm/s}$ , que possibilita

maior deslocamento dos microplásticos. Quanto à tensão crítica de mobilidade, os valores podem variar em função da densidade e do tamanho das partículas. Neste estudo, foi considerado o valor calculado com base na equação 173 da referência técnica do SisBaHiA [54], para microplásticos com 2 mm de diâmetro, resultando em 0,075 N/m<sup>2</sup>. Assim, tensões no fundo superiores a esse valor foram consideradas suficientes para transportar os microplásticos densos.

Abaixo, na seção 3.4.1, são descritas as fontes de microplásticos consideradas no estudo. Embora as análises tenham sido realizadas de forma paramétrica, na seção 3.4.2 foi possível estimar a quantidade de microplásticos lançados na lagoa.

### 3.4.1 Fontes de microplásticos

As entradas de água na lagoa foram consideradas como fontes de microplásticos, incluindo estações de tratamento de efluentes, rios e algumas fontes difusas. Estas últimas correspondem a pequenos lançamentos de água poluída, como esgoto sem tratamento, provenientes de manilhas ou valões. Os valores das vazões para cada uma dessas fontes foram obtidos em [56]. Essas fontes são consideradas as mais representativas dos lançamentos de microplásticos na lagoa, dado que os efluentes de estações de tratamento e o escoamento de águas pluviais estão entre as principais origens de microplásticos liberados em habitats marinhos [3], [34].

As estações de tratamento de efluentes são listadas na Tabela 3.4. A ETE Monte Alto está localizada no município de Arraial do Cabo, na parte sul da lagoa. A ETE Ponte dos Leites atende ao município de Araruama. As demais estações correspondem aos municípios indicados pelos seus nomes. Todas são operadas pela concessionária Prolagos, exceto a ETE Ponte dos Leites, que é operada pela Águas de Juturnaíba.

*Tabela 3.4: Dados das ETEs que despejam água na Lagoa de Araruama.*

Estação	UTM Leste	UTM Norte	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
ETE Cabo Frio	802144	7466312	0,400
ETE Arraial	803852	7457717	0,100
ETE Monte Alto	792257	7459931	0,015
ETE Iguaba	784384	7470581	0,075
ETE São Pedro	795518	7472646	0,160
ETE Ponte dos Leites	769734	7466620	0,200

Os dados de vazão dos rios que deságuam na lagoa estão apresentados na Tabela 3.5, e suas posições podem ser visualizadas no mapa base mostrado inicialmente na Figura 3.1. Todos eles estão localizados na parte norte da lagoa. De modo geral, os rios possuem baixas vazões, sendo que os principais, Rio das Moças e Rio Mataruna, correspondem a mais da metade da vazão total de 3,84 m<sup>3</sup>/s.

*Tabela 3.5: Vazões dos rios efluentes da Lagoa de Araruama.*

Rio	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
Rio das Moças	1,58
Rio Regamé	0,13
Rio Mataruna	0,82
Rio do Cortiço	0,21
Rio Salgado	0,46
Rio Iguaçaba	0,20
Rio Ubá	0,33
Rio Piripiri	0,11

Os dados referentes às fontes difusas estão apresentados na Tabela 3.6. Ao todo, foram consideradas 16 fontes difusas, cujas localizações se concentram majoritariamente ao redor do Canal de Itajuru, devido à densa urbanização dessa área. Durante a modelagem para o verão, foi considerada uma vazão 25% maior em relação às vazões de inverno, a fim de retratar o aumento populacional causado pelo turismo [56].

*Tabela 3.6: Dados das fontes difusas que despejam água poluída na Lagoa de Araruama.*

Fonte difusa	UTM Leste	UTM Norte	Vazão inverno (m <sup>3</sup> /s)	Vazão verão (m <sup>3</sup> /s)
FDif 01	807056	7467111	0,010	0,013
FDif 02	805735	7466819	0,005	0,006
FDif 03	805143	7467746	0,011	0,014
FDif 04	804410	7468682	0,008	0,010
FDif 05	803690	7469310	0,030	0,037
FDif 06	803576	7469291	0,004	0,005
FDif 07	803400	7468783	0,005	0,006
FDif 08	803245	7468532	0,001	0,001

FDif 09	803212	7468446	0,015	0,019
FDif 10	803788	7467220	0,086	0,107
FDif 11	802439	7466921	0,214	0,267
FDif 12	802496	7468764	0,001	0,001
FDif 13	802173	7468703	0,012	0,015
FDif 14	801017	7470266	0,050	0,062
FDif 15	794862	7472209	0,015	0,019
FDif 16	772682	7467032	0,001	0,001

As posições das diferentes fontes são ilustradas na Figura 3.18, onde é possível observar sua distribuição ao redor da lagoa. Os rios estão localizados ao longo de toda a parte norte da lagoa, as ETEs estão posicionadas nos municípios que atendem, e as fontes difusas estão concentradas majoritariamente ao redor do Canal de Itajuru. Quase todas as fontes se encontram na parte norte da lagoa, exceto as ETEs Arraial e Monte Alto, que atendem ao município de Arraial do Cabo e estão situadas na parte sul.

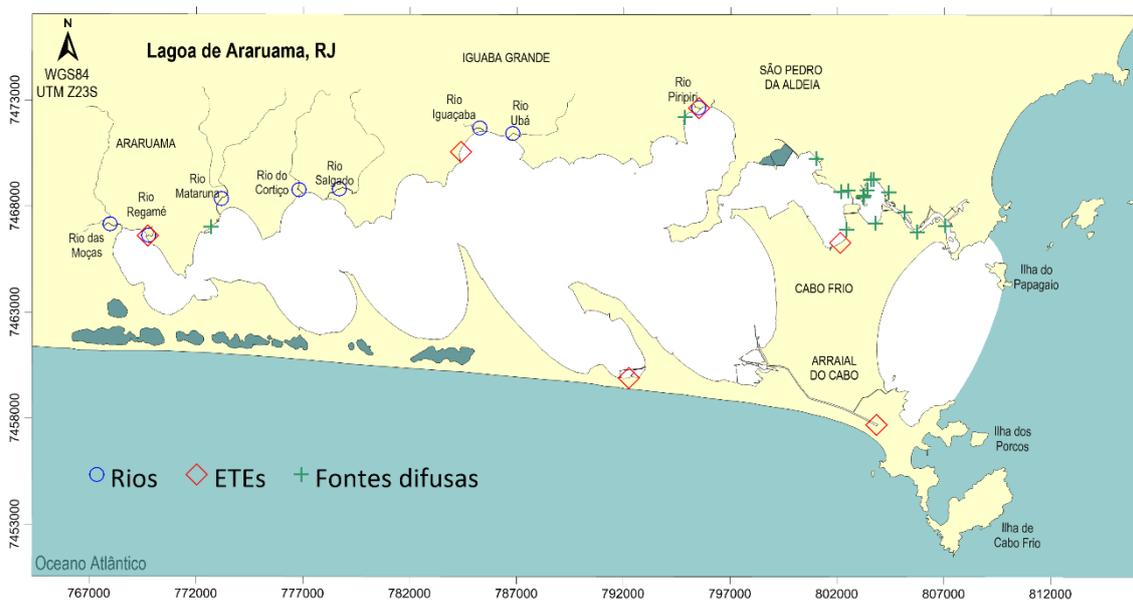


Figura 3.18: Posição das diferentes ETEs, rios e fontes difusas que desembocam na Lagoa de Araruama que serão usados como fontes de microplásticos.

### 3.4.2 Estimativa de microplásticos lançados na Lagoa de Araruama

Em [59], foi medida a quantidade de microplásticos que entra na Estação de Tratamento de Efluentes, ETE, de Deodoro, no Rio de Janeiro, em uma amostra de esgoto bruto. A quantidade encontrada foi de 3,73 kg/h. A ETE em questão possui uma vazão de 400 l/s

(0,4 m<sup>3</sup>/s), o que corresponde a uma concentração de microplásticos de 0,00259 kg/m<sup>3</sup>. Com base nesse número, é possível estimar a quantidade de microplásticos que ingressa na Lagoa de Araruama ao longo do tempo.

Primeiramente, a concentração de microplásticos que chega para tratamento nas ETEs de cada município foi estimada usando uma regra de três simples, baseada no PIB per capita apresentado na Tabela 2.1.

Em seguida, foi avaliado a quantidade de microplásticos que seriam liberadas no ambiente após o tratamento em cada estação. Uma estação de tratamento primário libera entre 2% e 50% dos microplásticos que recebe. Uma estação de tratamento secundário libera entre 0,2% e 14% dos microplásticos. Já uma estação de tratamento terciário libera entre 0,1% e 2% das partículas [60]. Para os cálculos, foram utilizados os pontos médios desses intervalos, ou seja, 25%, 7% e 1%, respectivamente. As informações consolidadas estão apresentadas na Tabela 3.7, enquanto a vazão de cada ETE está mostrada na Tabela 3.4.

*Tabela 3.7: Estimativa da quantidade de microplásticos que chegam e que são lançados por cada ETE.*

Estação	Carga que entra (kg/m <sup>3</sup> )	Tratamento	Carga que sai (kg/m <sup>3</sup> )
ETE Cabo Frio	2,57 E-3	Primário	6,44 E-4
ETE Arraial	4,28 E-3	Secundário	2,99 E-4
ETE Monte Alto	4,28 E-3	Secundário	2,99 E-4
ETE Iguaba	1,05 E-3	Terciário	1,05 E-5
ETE São Pedro	1,24 E-3	Terciário	1,24 E-5
ETE Ponte dos Leites	1,51 E-3	Terciário	1,51 E-5

A carga de microplásticos lançados pelas fontes difusas foi considerada com base na quantidade encontrada no esgoto bruto de Cabo Frio, que é de 0,00257 kg/m<sup>3</sup>. Essas fontes não possuem tratamento e estão, em sua maioria, localizadas na região mais urbanizada da cidade. A vazão total das fontes difusas considerada foi de 0,46 m<sup>3</sup>/s, conforme indicado na Tabela 3.6.

A massa de microplásticos que chegam à lagoa através dos rios foi estimada em 10% da concentração encontrada no esgoto bruto de Cabo Frio, resultando em 2,57 E-4

kg/m<sup>3</sup>. A vazão total de todos os rios que desaguam na lagoa é de 3,84 m<sup>3</sup>/s, conforme indicado na Tabela 3.5.

A quantidade de microplásticos lançados na Lagoa de Araruama foi calculada multiplicando a carga de microplásticos, em kg/m<sup>3</sup>, de cada fonte pela sua vazão, em m<sup>3</sup>/s. Os resultados obtidos estão consolidados na Tabela 3.8.

*Tabela 3.8: Estimativa da quantidade de microplásticos lançados na Lagoa de Araruama contendo a participação de cada tipo de fonte e valores totais.*

Vazões	Quantidades
Vazão das ETEs (kg/s)	2,97 E-4
Vazão das FDs (kg/s)	1,18 E-3
Vazão dos rios (kg/s)	9,89 E-4
Vazão total (kg/s)	2,47 E-3
Vazão horária (kg/h)	8,90 E0
Vazão diária (kg/dia)	2,14 E2
Vazão anual (kg/ano)	7,79 E4

A região possui cerca de 650 mil habitantes, o que faz com que o valor anual de 77.981,24 kg/ano corresponda a um despejo de aproximadamente 120 g/pessoa/ano.

De acordo com estimativas constantes em [52], a quantidade de microplásticos despejada nos oceanos varia de 110 g/pessoa/ano em regiões da África e Oriente Médio até 750 g/pessoa/ano na América do Norte. A média para a América Latina é de 230 g/pessoa/ano, enquanto a média mundial é de 212 g/pessoa/ano.

Por estar dentro das faixas de valores exemplificadas para diferentes regiões do mundo, o valor estimado de 120 g/pessoa/ano para a Lagoa de Araruama parece adequado. Os municípios envolvidos no sistema lagunar contam com estações de tratamento de efluentes, e a vazão fluvial é reduzida devido ao clima da região e à bacia de drenagem limitada. Embora as fontes difusas sejam as mais problemáticas por não possuírem controle, sua contribuição é relativamente baixa. Portanto, é esperado que a quantidade de microplásticos lançados na lagoa seja menor do que a média regional.

## 4 Análises de modelagem hidrodinâmica

Neste capítulo, analisam-se as modelagens hidrodinâmicas para os cenários de verão e inverno na Lagoa de Araruama, realizadas conforme descrito na seção 3.2 e calibradas de acordo com a seção 3.3. A Figura 4.1 apresenta a localização e os nomes das estações de monitoramento, representadas por círculos pretos, que foram utilizadas para gerar séries temporais de resultados, além dos marégrafos N1, N2, N3 e N5, indicados por círculos vermelhos, que foram usados para a calibração do modelo.

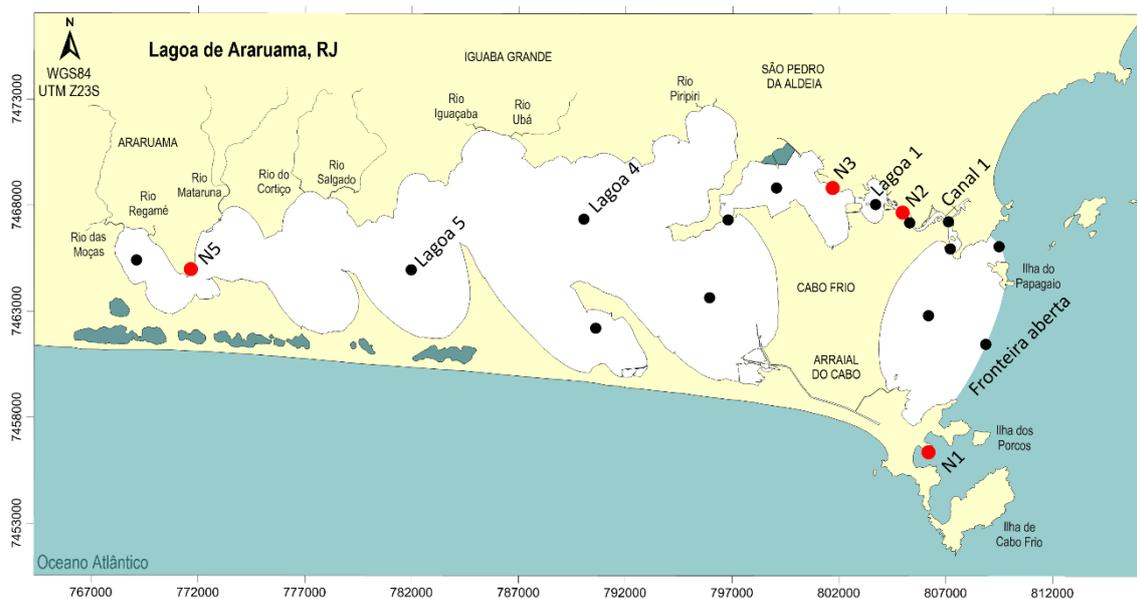


Figura 4.1: Posição das estações de monitoramento para geração de séries temporais de resultados e dos marégrafos utilizados na calibração.

Primeiramente, na seção 4.1, é apresentada a análise das variações de nível, destacando os principais resultados relacionados às elevações. Em seguida, na seção 4.2, é realizada a análise da circulação hidrodinâmica na lagoa, com a exposição dos principais resultados associados às velocidades.

### 4.1 Análises da variação de níveis na Lagoa de Araruama

A Figura 4.2 mostra a série temporal da elevação na fronteira aberta e em diferentes estações ao longo da lagoa. A amplitude da oscilação é atenuada conforme se avança na lagoa, até o ponto em que a variação de nível semidiurna da maré praticamente não é mais perceptível. Nessas regiões, a principal condicionante do escoamento passa a ser a força dos ventos.

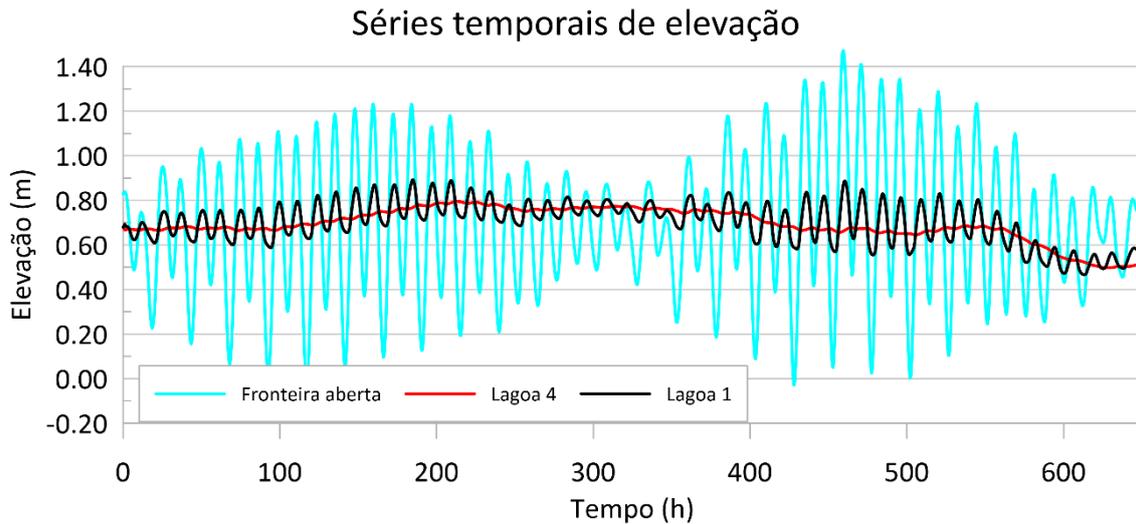


Figura 4.2: Séries temporais de elevação em diferentes pontos adentrando a lagoa. NR: 0,68 m.

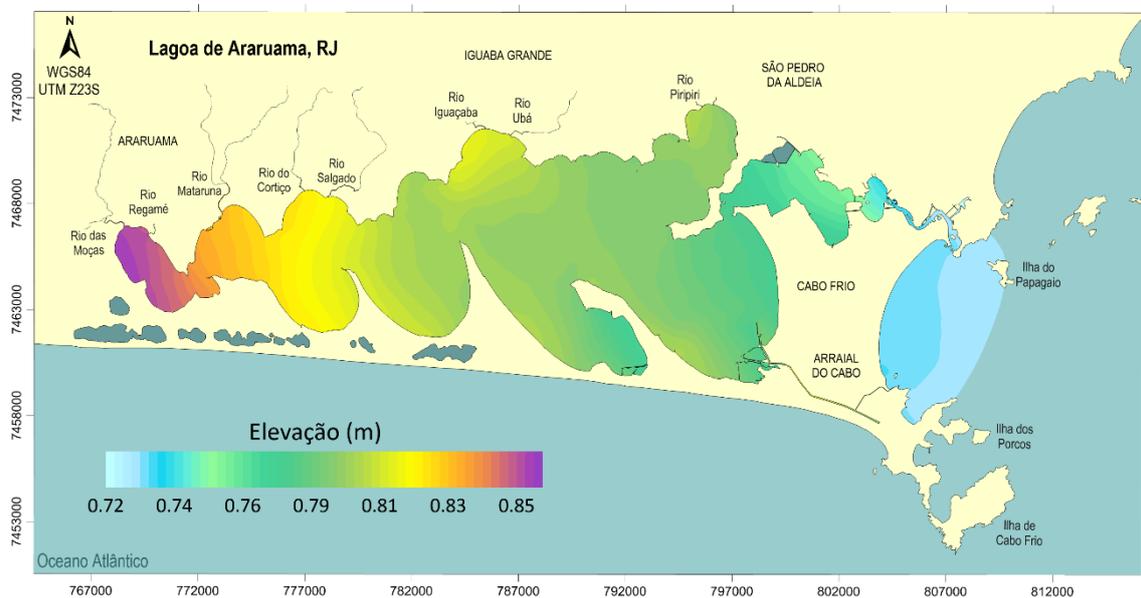
Com base na observação das curvas comparativas dos marégrafos e nos resultados das séries temporais de elevação, é razoável admitir que a lagoa pode ser dividida em três macrorregiões, considerando as principais forçantes do escoamento. A primeira é uma região dominada por marés, a segunda é uma região intermediária onde coexistem as influências da maré e do vento, e a terceira é uma região dominada basicamente pelo vento. A Figura 4.3 ilustra essas macrorregiões, mostrando que a maior parte do espelho d'água da lagoa está sob a ação predominante dos ventos.



Figura 4.3: Lagoa dividida em macrorregiões com a identificação da principal forçante responsável pela circulação hidrodinâmica.

Um dos fenômenos que ocorrem na Lagoa de Araruama devido à ação dos ventos é o empilhamento de água. Quando o vento sopra de nordeste, ele empurra a água, resultando em um acúmulo na parte oeste da lagoa, causando elevação do nível nessa região e rebaixamento na direção oposta. O mesmo acontece com os ventos de sudoeste, que geram acúmulo de água a leste e redução do nível a oeste.

A Figura 4.4 ilustra o empilhamento de água causado por um vento típico de leste/nordeste, mostrando a maior elevação a oeste e isolinhas de elevação bem regulares que indicam a redução do nível conforme se desloca para leste. A Figura 4.5, por sua vez, apresenta o empilhamento causado por um vento de sudoeste, onde é possível observar o nível mais alto a nordeste da lagoa e isolinhas de elevação regulares que mostram a diminuição do nível em direção ao sudoeste.



*Figura 4.4: Empilhamento de água causado por ventos de leste/nordeste. Resultados de 10/07/23 às 19h - (846000 s).*

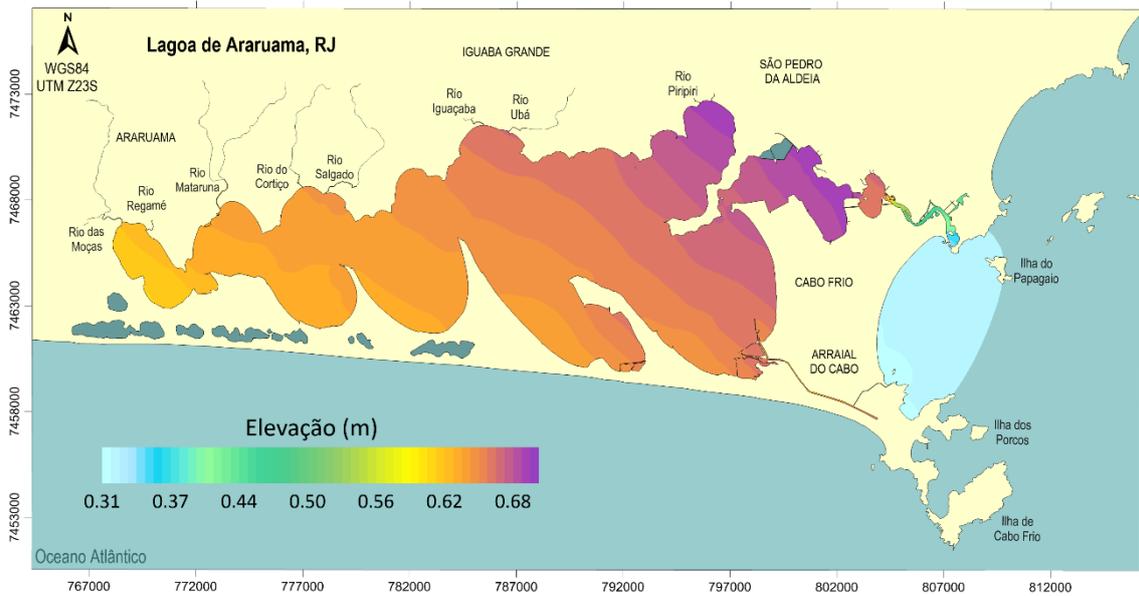
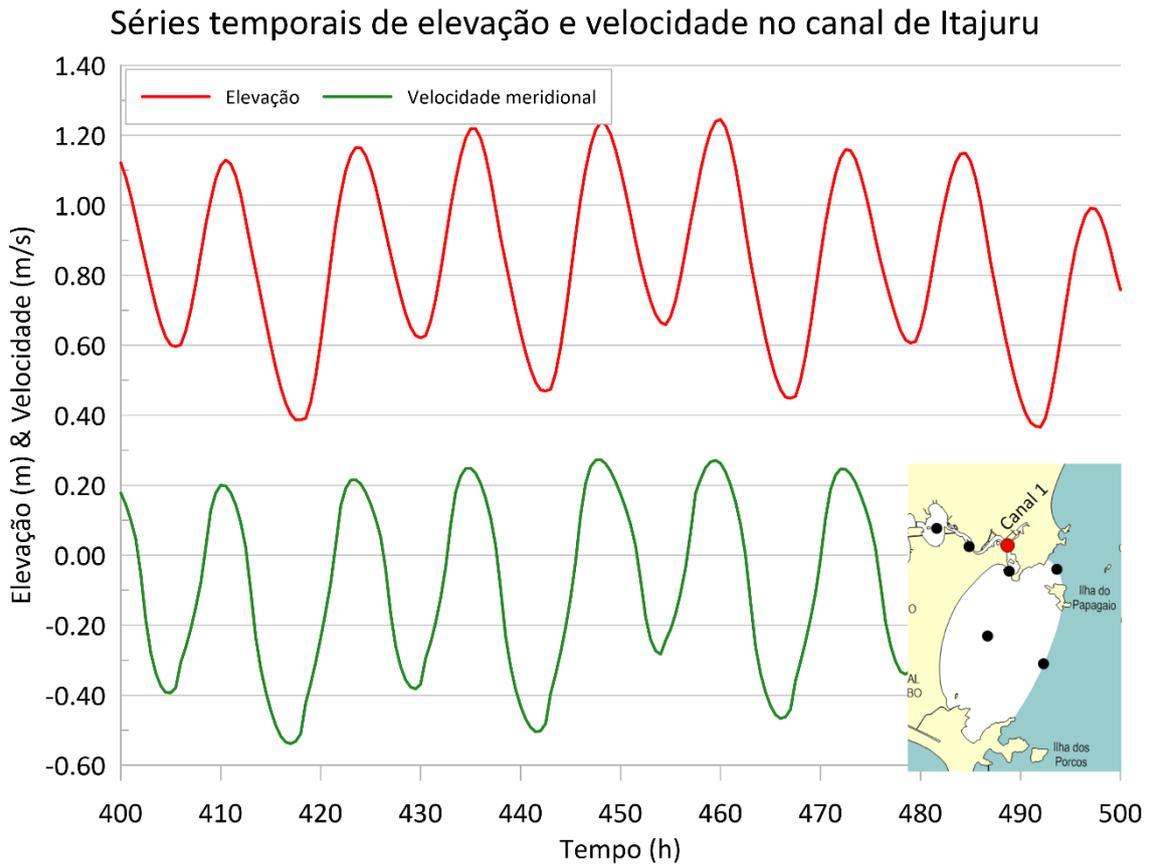


Figura 4.5: Empilhamento de água causado por ventos de sudoeste. Resultados de 29/07/23 às 6h - (2440800 s).

#### 4.2 Análises da circulação hidrodinâmica na Lagoa de Araruama

A Figura 4.6 mostra a comparação entre os valores de elevação e a componente meridional da velocidade em uma estação de monitoramento no Canal de Itajuru durante alguns dias do mês de julho. Primeiramente, observa-se que há duas baixa-mares e duas preamares por dia, confirmando a maré semidiurna da região. Além disso, os picos de elevação coincidem com os picos de velocidade, caracterizando uma maré progressiva.



*Figura 4.6: Gráfico comparativo entre a elevação e a velocidade meridional para uma estação de monitoramento no Canal de Itajuru. Resultados para o mês de julho. NR: 0,68 m.*

As velocidades ao longo da lagoa são geralmente baixas, menores que 0,1 m/s, exceto na região do Canal de Itajuru. A Figura 4.7 mostra as isolinhas de velocidade na região do canal, onde são observados valores relevantes, chegando a 0,7 m/s. Nas demais áreas da lagoa, as velocidades são bastante reduzidas.

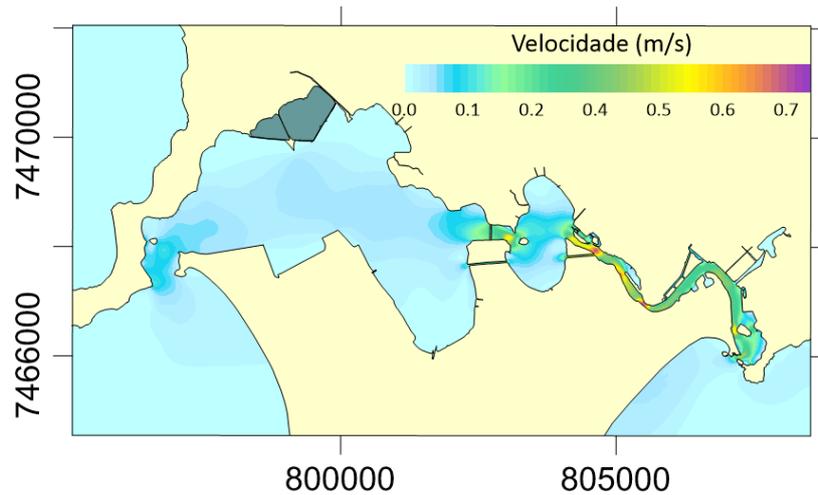


Figura 4.7: Isolinhas de velocidade no Canal de Itajuru. Resultado para o instante 435 h de julho.

A Figura 4.8 mostra os perfis verticais do módulo da velocidade em duas estações de monitoramento: uma no canal e outra no meio da lagoa. O perfil de velocidades no canal exhibe o comportamento típico de um canal com escoamento de superfície livre, onde a velocidade próxima ao fundo é baixa e aumenta progressivamente até a superfície, com os maiores valores próximos à superfície. Por outro lado, o perfil de velocidade no meio da lagoa revela que a velocidade ao longo da coluna de água é praticamente nula, apresentando um aumento apenas próximo à superfície. Isso indica que, nesta área, o vento é o principal responsável pelo deslocamento da água.

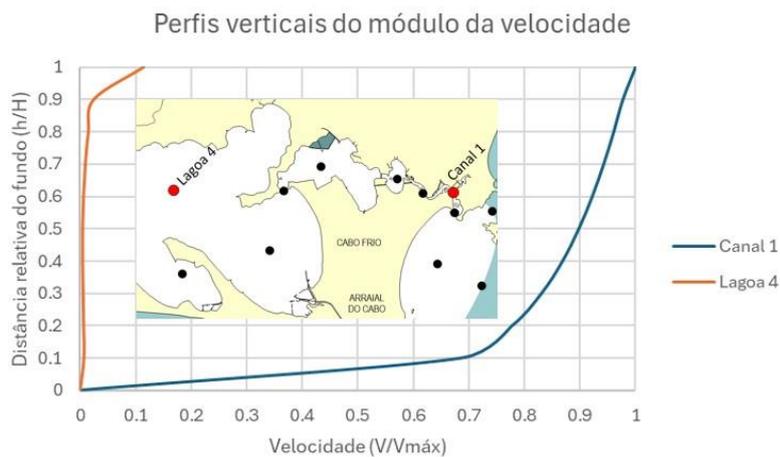


Figura 4.8: Perfis verticais do módulo de velocidade em uma estação de monitoramento no canal e outra no meio da lagoa. Resultados para o instante 435 h de julho.

O vento, sendo o principal indutor do escoamento em grande parte da lagoa, gera um fenômeno de recirculação da água. Na superfície, a água se desloca na direção do

vento devido ao arraste causado por ele, enquanto no fundo, ocorre uma corrente de retorno que se move na direção oposta. Dessa forma, a velocidade superficial está alinhada com a direção do vento, enquanto a velocidade no fundo está na direção contrária. A Figura 4.9 ilustra esse fenômeno de recirculação.

A Figura 4.10 mostra os perfis verticais das componentes de velocidade U e V para uma estação localizada no meio da lagoa. Observa-se que os perfis mantêm valores positivos até certo ponto na coluna de água. À medida que se aproxima da superfície, ocorre uma mudança na direção, com os valores tornando-se negativos. Isso ilustra a variação das direções da velocidade ao longo da coluna de água.

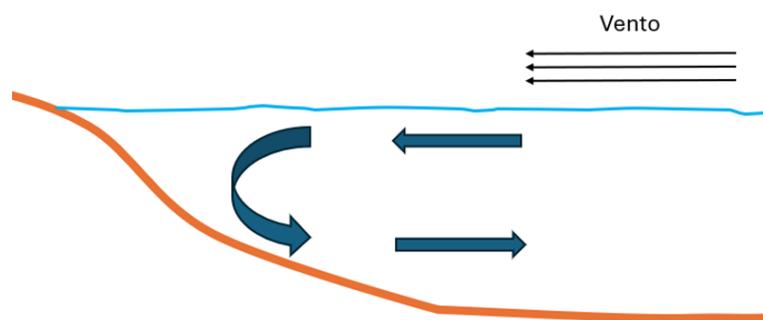


Figura 4.9: Desenho esquemático da circulação de água na lagoa causada pela ação dos ventos, mostrando o arraste na superfície e a corrente de retorno no fundo.

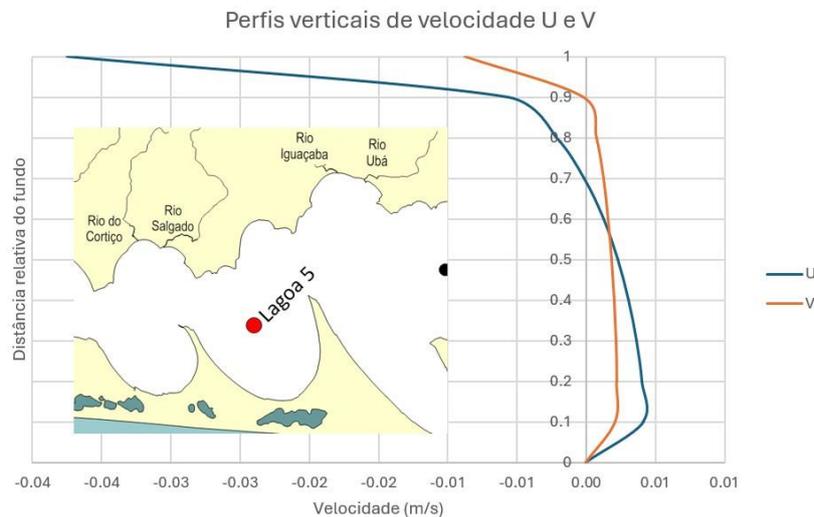


Figura 4.10: Perfis verticais das componentes "U" e "V" da velocidade em uma estação no meio da lagoa.

As figuras a seguir mostram os vetores com a direção da velocidade para diferentes alturas da coluna de água e o resultado 2DH. Os vetores estão todos com o mesmo

tamanho, de modo que representam apenas a direção das velocidades, e não suas magnitudes.

A Figura 4.11 mostra os vetores de velocidade na superfície submetida a um vento típico de nordeste. A direção do escoamento coincide com a direção dos ventos, apontando de nordeste para sudoeste.

A Figura 4.12 mostra os vetores de velocidade no fundo da lagoa submetido ao mesmo vento típico de nordeste. Os vetores possuem direções majoritariamente opostas aos vetores na superfície, apontando na direção sudoeste-nordeste.

A Figura 4.13 mostra os vetores de velocidade para o resultado 2DH sob a influência de um vento típico de nordeste. Nesta visualização, é possível observar a presença de diversos vórtices tanto na parte sul quanto na parte norte da lagoa. Os ventos tendem a arrastar a água da parte rasa, situada nas margens, para a parte mais funda, localizada no centro da lagoa. Com os ventos soprando de nordeste, a região mais rasa está no norte da lagoa forçando o aparecimento de vórtices anticiclônicos, que giram no sentido anti-horário. Na parte sul, onde a água rasa está nas margens, os vórtices giram no sentido horário. Quando os ventos sopram de sudoeste, a configuração se inverte, com os vórtices girando em sentidos opostos em relação ao centro da lagoa.

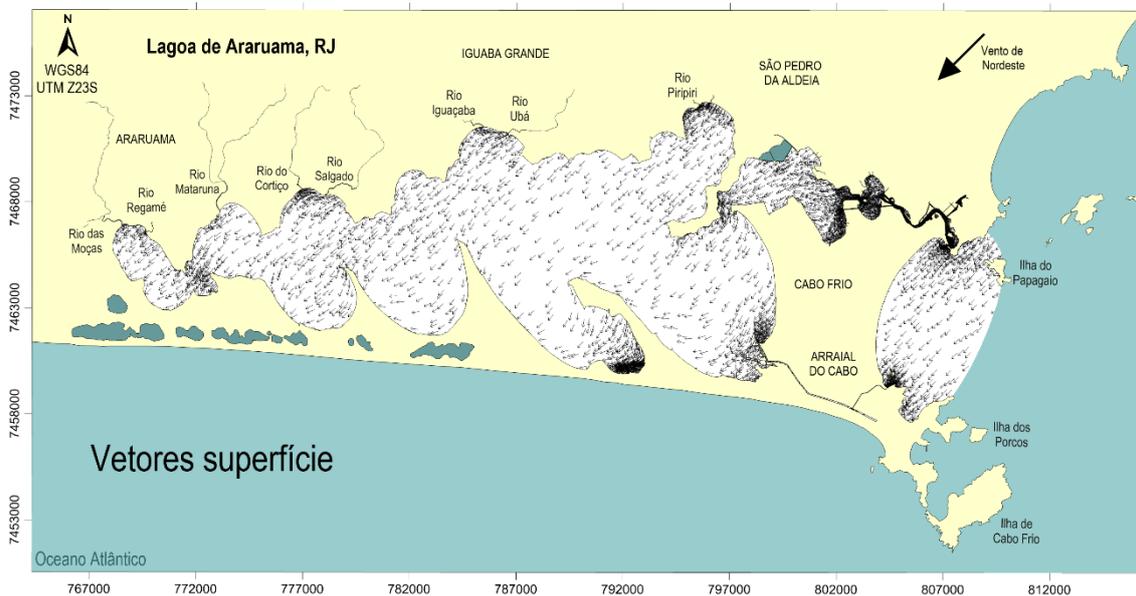


Figura 4.11: Vetores de velocidade na superfície para um vento típico de nordeste. Resultados para 510 h de julho.

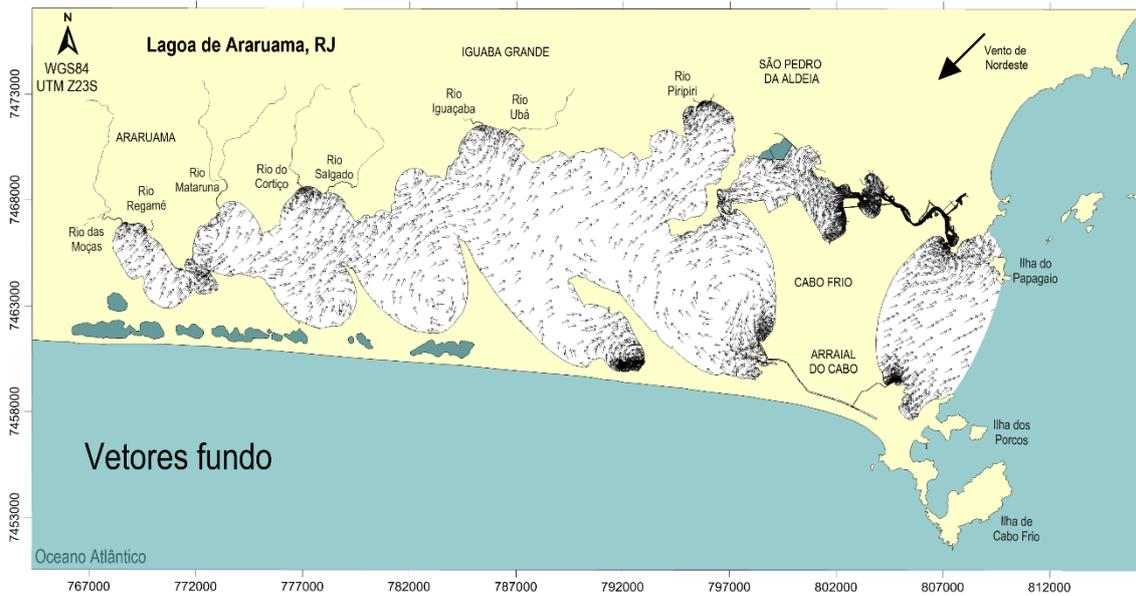


Figura 4.12: Vetores de velocidade no fundo para um vento típico de nordeste. Resultados para 510 h de julho.

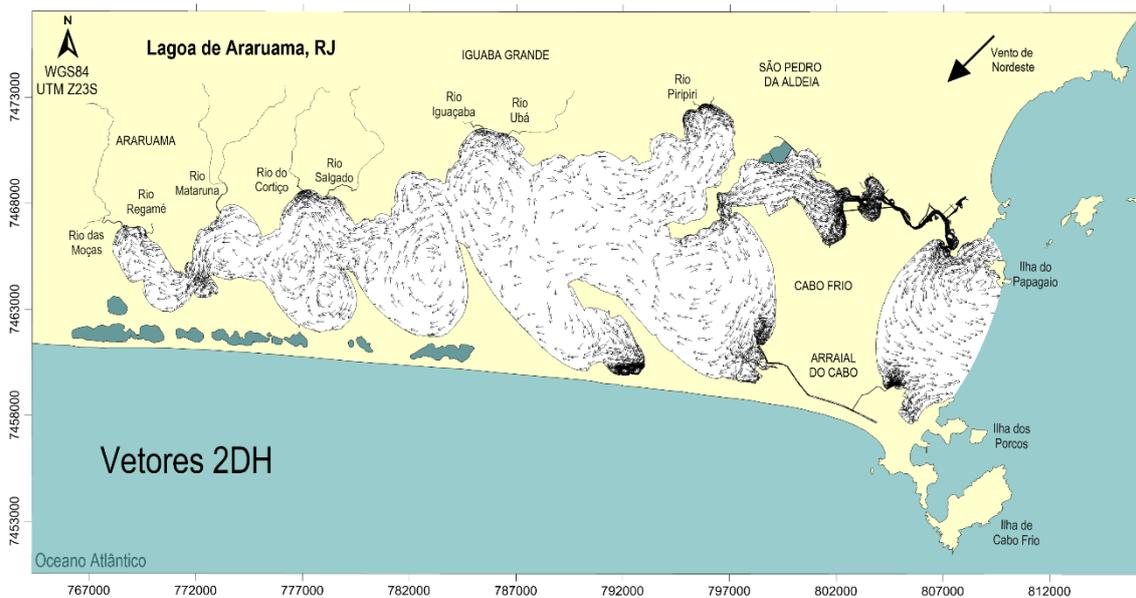


Figura 4.13: Vetores de velocidade 2DH para um vento típico de nordeste. Resultados para 510 h de julho.

Como mostrado anteriormente, a lagoa, de modo geral, não apresenta velocidades elevadas, exceto na região do canal. Isso afeta diretamente o transporte de microplásticos densos, uma vez que a tensão de arraste no fundo é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade.

A Figura 4.14 mostra a altura significativa das ondas geradas pelo vento ao longo da lagoa, representando um instante de ventos típicos de nordeste em 03/02/23 às 9h.

Nota-se que, em locais com maior pista, as ondas geradas apresentam maiores alturas, sempre alinhadas com a direção do vento. Como as ondas se dirigem e quebram na margem sul, espera-se um aumento na tensão de fundo nessa região devido à ação dessas ondas.

A Figura 4.15 mostra as tensões no fundo causadas pelas ondas geradas por um vento típico de nordeste, considerando as alturas significativas de onda no cálculo. Observa-se a concentração dessas tensões na margem sul da lagoa, onde as ondas arrebentam. A Figura 4.16 apresenta as tensões no fundo geradas pelas ondas de vento causadas por um vento de sudoeste, evidenciando que, neste caso, as tensões de fundo ocorrem na margem norte da lagoa. As tensões no interior da lagoa têm magnitudes máximas na ordem de  $2 \text{ N/m}^2$ , enquanto o litoral pode apresentar tensões bem mais elevadas, alcançando até  $11 \text{ N/m}^2$  nos pontos de quebra das ondas mais intensas, como ilustrado na Figura 4.15.

A Figura 4.17 mostra a porcentagem de tempo em que a tensão no fundo é superior ao valor crítico de  $0,075 \text{ N/m}^2$  no mês de verão. A Figura 4.18 apresenta essa mesma informação para o mês de inverno. Não há diferenças significativas entre as duas estações do ano. Observa-se que apenas a região do canal, onde as velocidades são maiores, e as margens, onde as ondas arrebentam, são capazes de realizar o transporte. No canal, a capacidade de transporte ocorre de forma mais constante, em mais de 80% do tempo, enquanto nas margens é mais esporádica, ocorrendo cerca de 30% do tempo. A margem norte apresenta menor capacidade de transporte em comparação com a margem sul, devido a dependência dos ventos de sudoeste, mais frequentes durante o inverno.

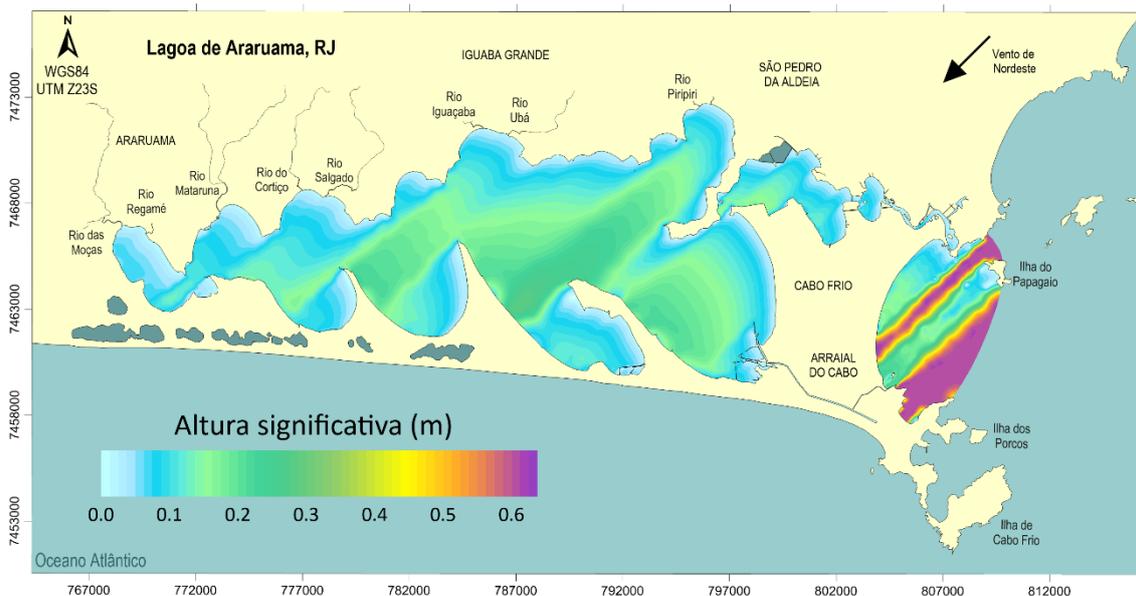


Figura 4.14: Altura significativa de ondas geradas por um vento típico de nordeste em 03/02/23 às 9h.

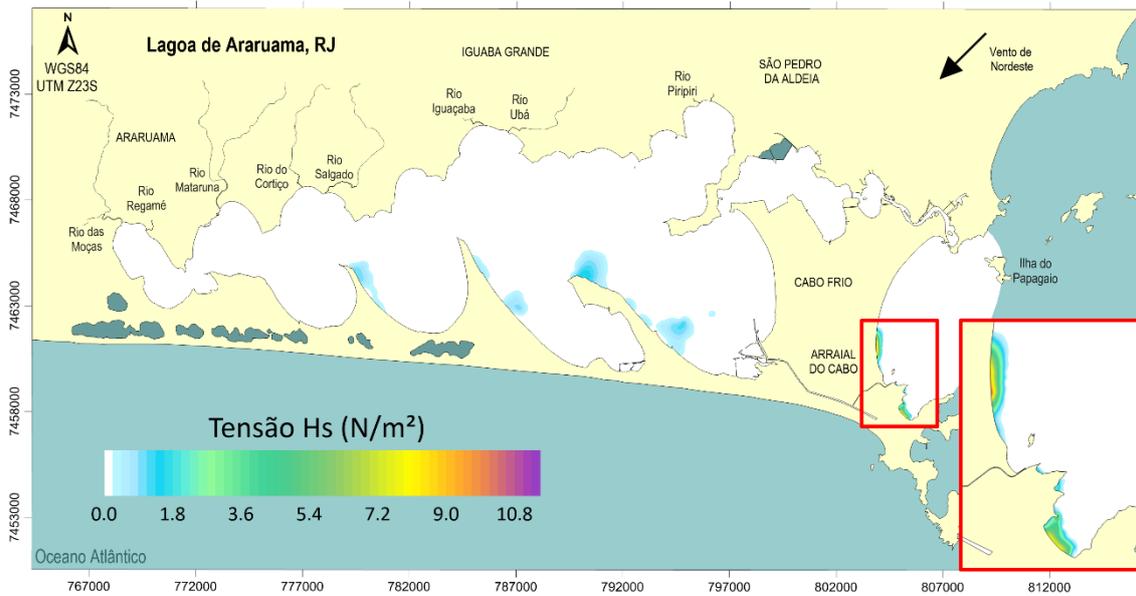


Figura 4.15: Tensão no fundo causada por ondas geradas por um vento de nordeste em 03/02/23 às 9h.

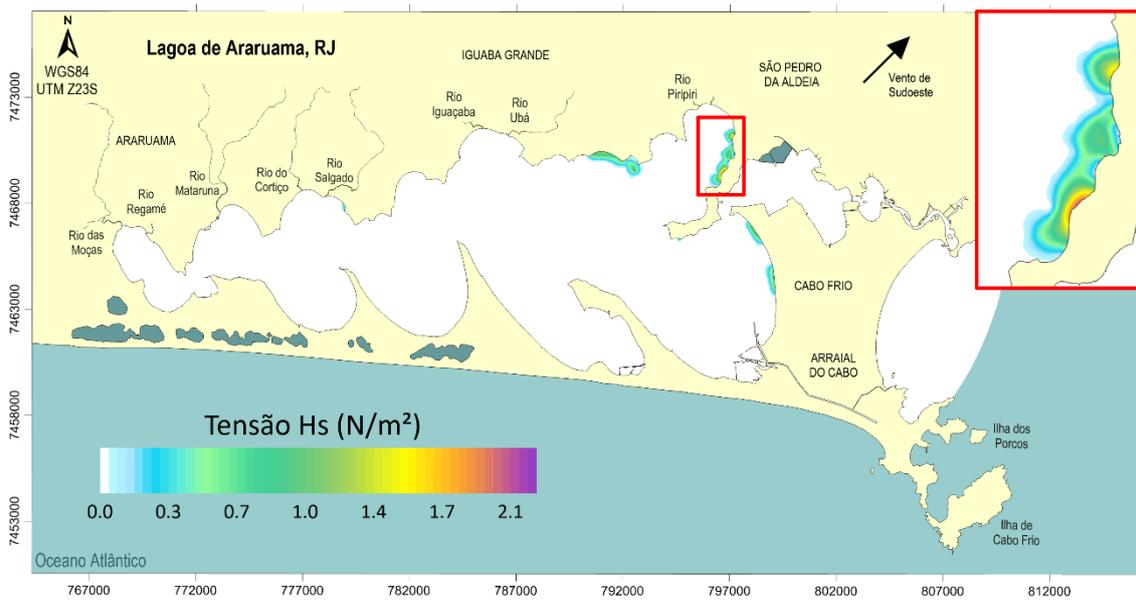


Figura 4.16: Tensão no fundo causada por ondas geradas por um vento de sudoeste em 29/07/23 às 6h.

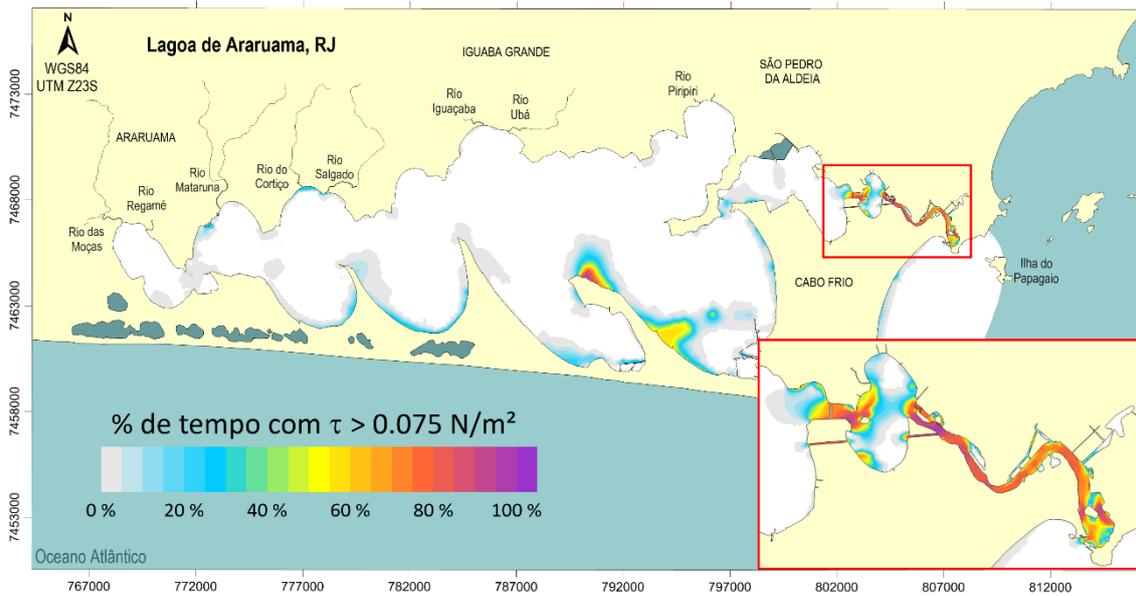


Figura 4.17: Porcentagem de ocorrência de tensão no fundo maior que a tensão crítica de mobilidade dos microplásticos densos durante a modelagem de verão.

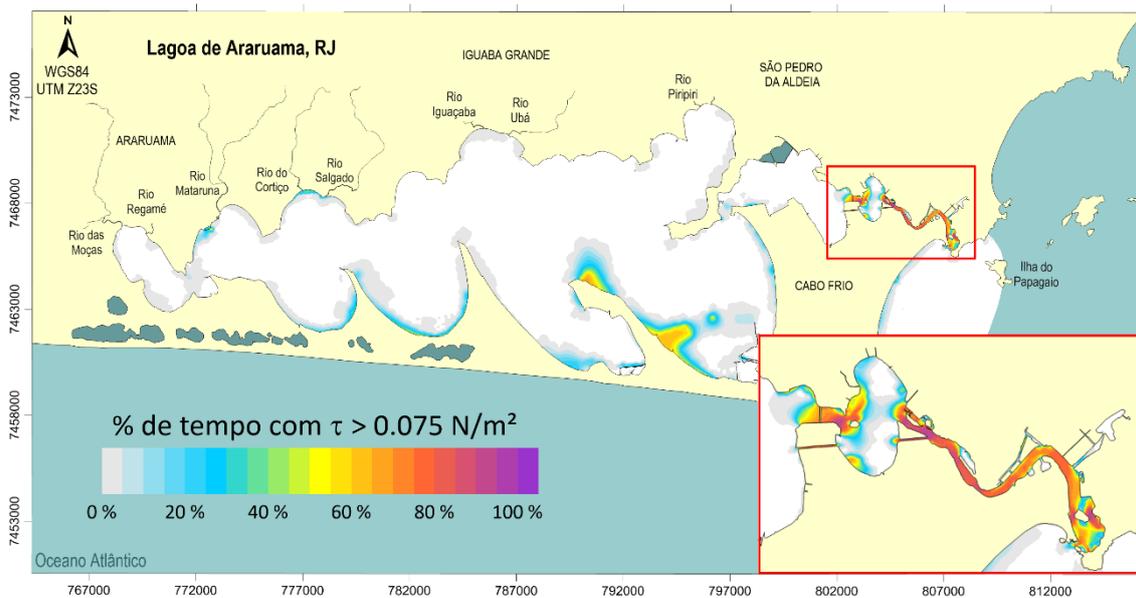


Figura 4.18: Porcentagem de ocorrência de tensão no fundo maior que a tensão crítica de mobilidade dos microplásticos densos durante a modelagem de inverno.

## 5 Análise do transporte e destino de microplásticos

Neste capítulo, foram realizadas análises da localização dos microplásticos na água e de sua absorção no litoral na seção 5.1, da porcentagem de tempo de passagem pelas regiões da lagoa na seção 5.2, das concentrações de microplásticos na água na seção 5.3 e das regiões com deposição de microplásticos densos no fundo na seção 5.4. Os cenários analisados são aqueles listados no início do capítulo 3, desenvolvidos conforme a descrição apresentada na seção 3.4.

### 5.1 Sobre microplásticos na água e absorção no litoral

Nesta seção, são apresentadas as modelagens das partículas lançadas na água, juntamente com a identificação das áreas de absorção no litoral. Primeiramente, são analisados os microplásticos leves na seção 5.1.1, seguidos pelos microplásticos neutros na seção 5.1.2.

#### 5.1.1 Sobre o transporte e destino dos microplásticos leves

A Figura 5.1 mostra os resultados do último instante da simulação, dia 28/02/23 às 0h, dos microplásticos na água lançados por cada estação de tratamento de efluentes. É possível observar um caminho bem definido de transporte dos microplásticos na direção nordeste-sudoeste, que corresponde à direção predominante dos ventos. No mapa, os pontos do litoral onde as partículas foram absorvidas estão destacados em azul.

A Figura 5.2 mostra os resultados do último instante da simulação, dia 28/07/23 às 0h, dos microplásticos na água lançados por cada estação de tratamento de efluentes. Nesta imagem, é possível observar um aumento nas localizações de absorção de microplásticos no litoral, principalmente na parte norte da lagoa, onde estão situadas muitas praias. Além disso, há um menor transporte de microplásticos provenientes da ETE Cabo Frio para dentro da lagoa e um maior espalhamento dos microplásticos provenientes da ETE Monte Alto, na parte sul. A região do Canal de Itajuru e a área litorânea de Cabo Frio, logo após a saída do canal de ligação com o mar, absorvem mais microplásticos nessa época.

O maior espalhamento de microplásticos no inverno e a maior saída deles da lagoa se devem à maior variabilidade do vento. Durante o inverno, a passagem das frentes frias,

que trazem ventos intensos de sudoeste, são mais frequentes e fazem com que os microplásticos sejam transportados para o norte da lagoa, os quais ocasionalmente adentram no canal de maré resultando em sua saída da lagoa.

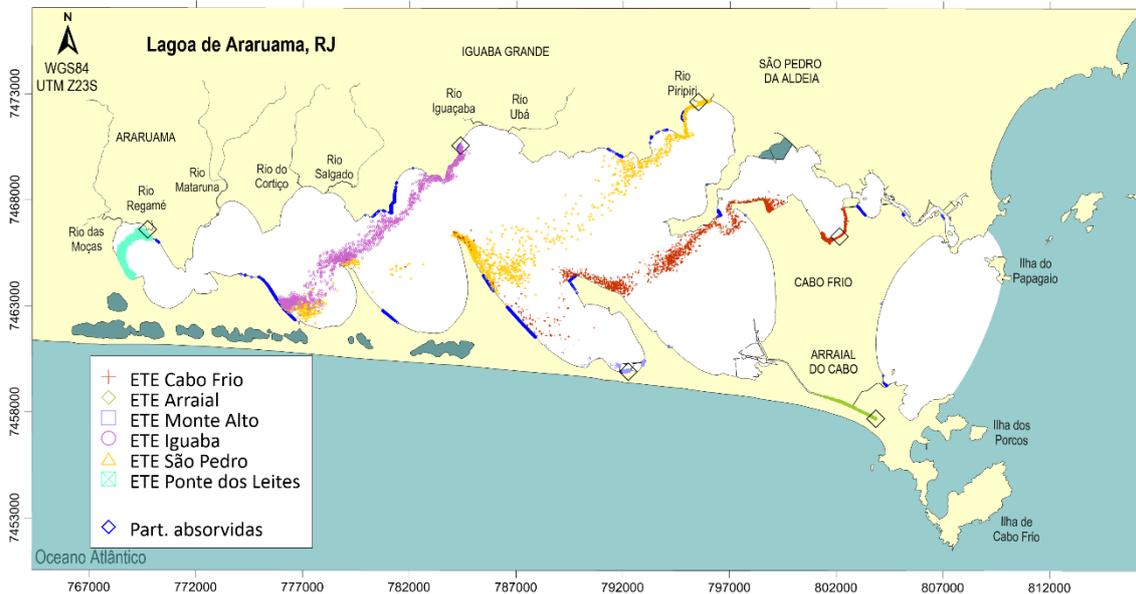


Figura 5.1: Mapa de plumas de microplásticos leves no dia 28/02/23, lançados a partir das ETEs, e zonas de absorção no litoral.

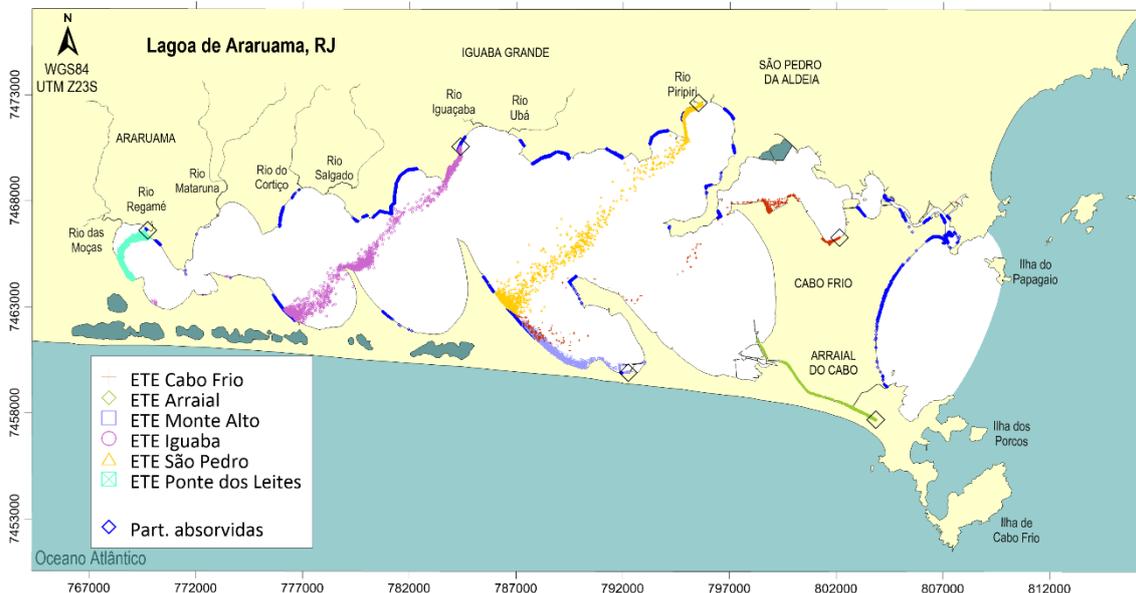


Figura 5.2: Mapa de plumas de microplásticos leves no dia 28/07/23, lançados a partir das ETEs, e zonas de absorção no litoral.

A Figura 5.3 mostra os microplásticos na água lançados pelas fontes difusas durante o verão, enquanto a Figura 5.4 ilustra os microplásticos lançados no inverno. Neste caso, não há uma diferença significativa entre as imagens. As fontes difusas tendem a

poluir a região do Canal de Itajuru e a extremidade leste da lagoa, que é onde estão majoritariamente localizadas. Mesmo estando próximas à saída da lagoa, os microplásticos das fontes difusas têm uma maior tendência a serem empurrados para dentro da lagoa do que para o mar.

Durante o inverno, há uma maior absorção de microplásticos pelas praias ao norte da lagoa, e em ambas as estações é detectada a saída deles da lagoa e a absorção pelas praias do litoral de Cabo Frio. Devido à proximidade com o canal, os microplásticos podem sair da lagoa pela ação da maré, mesmo com a atuação de ventos contrários. As fontes difusas, que lançam água poluída sem controle de qualidade e estão localizadas na região mais urbanizada de Cabo Frio, tendem a ser mais agressivas para a lagoa durante o verão, que é a alta temporada de turismo.

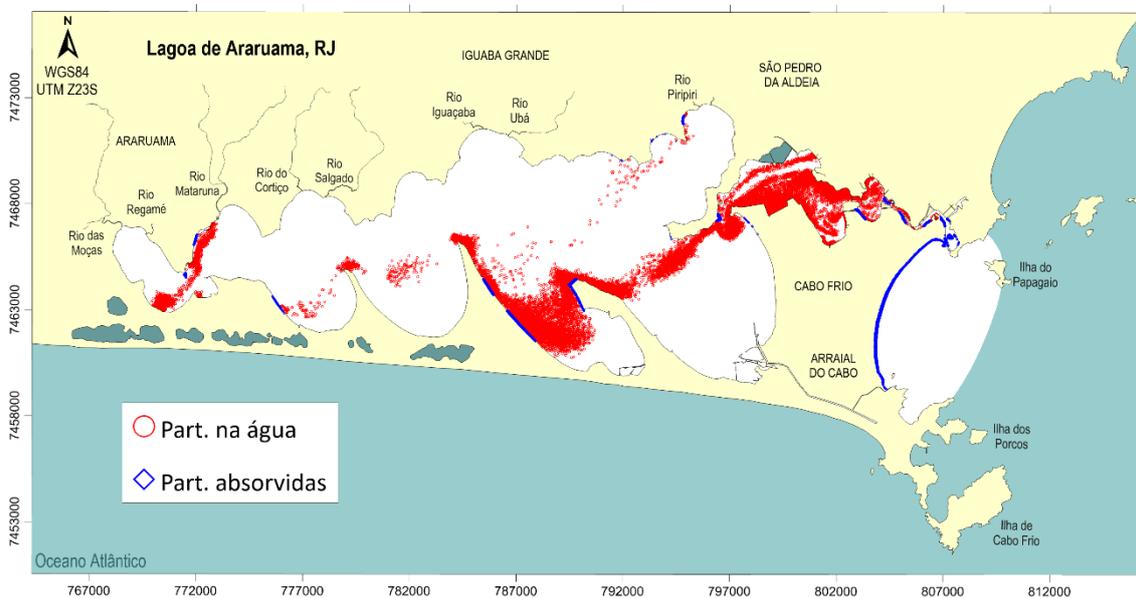
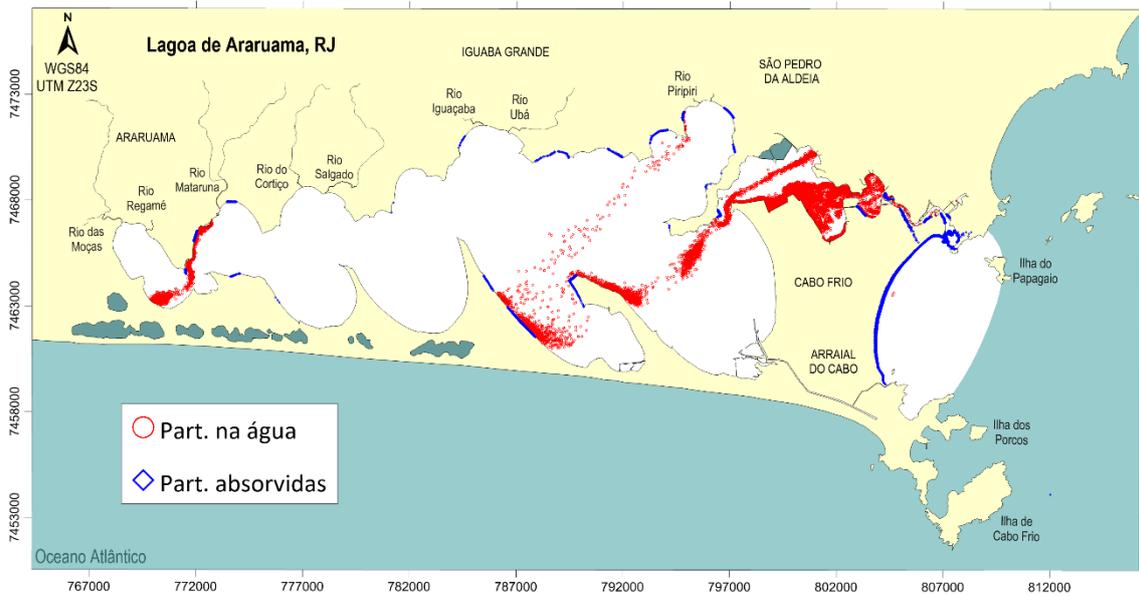


Figura 5.3: Mapa de plumas de microplásticos leves no dia 28/02/23, lançados a partir das Fontes Difusas, e zonas de absorção no litoral.

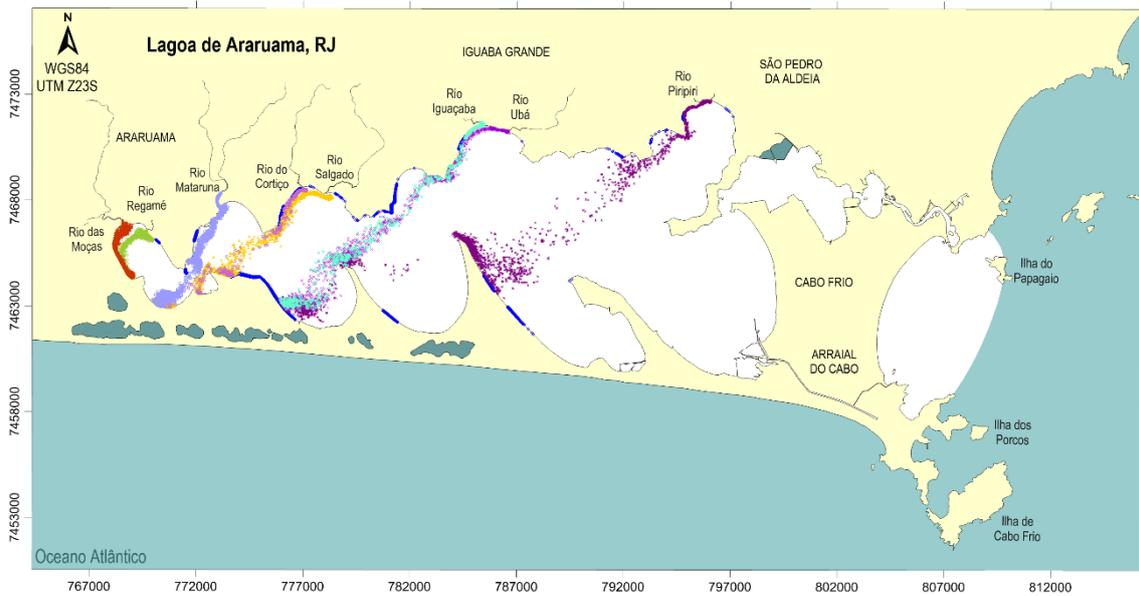


*Figura 5.4: Mapa de plumas de microplásticos leves no dia 28/07/23, lançados a partir das Fontes Difusas, e zonas de absorção no litoral.*

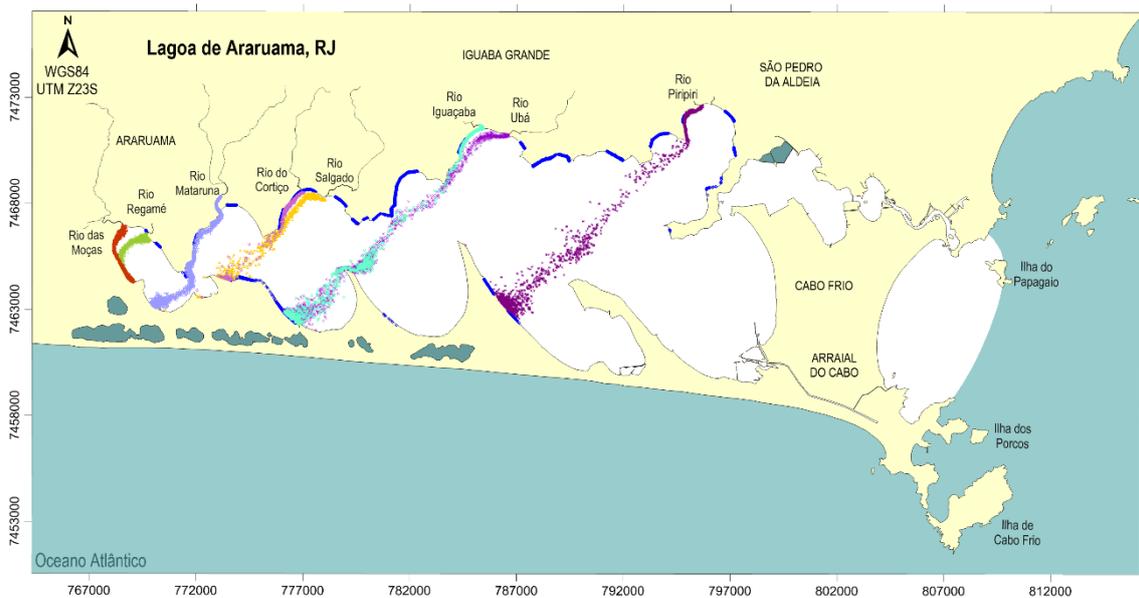
A Figura 5.5 mostra os microplásticos na água lançados pelos rios no último instante da modelagem de verão. A Figura 5.6 exhibe a mesma informação para o mês de inverno.

Essas duas imagens apresentam a menor variação entre as duas situações. O transporte é bem definido na direção nordeste-sudoeste para todos os rios. No verão, há um maior transporte para dentro da lagoa na direção leste-oeste, enquanto no inverno, observa-se uma maior absorção de microplásticos nas praias ao norte da lagoa.

Não há indícios de saída de microplásticos oriundos dos rios da lagoa, provavelmente porque os rios estão localizados relativamente afastados da entrada do canal e devido ao transporte majoritário na direção nordeste-sudoeste.



*Figura 5.5: Mapa de plumas de microplásticos leves no dia 28/02/23, lançados a partir dos rios, e zonas de absorção no litoral.*



*Figura 5.6: Mapa de plumas de microplásticos leves no dia 28/07/23, lançados a partir dos rios, e zonas de absorção no litoral.*

Os microplásticos oriundos dos três tipos de fontes tendem a se transportar na direção nordeste-sudoeste, fazendo com que a parte sul da lagoa seja a mais suscetível à presença de microplásticos leves. O período de inverno gera uma maior variabilidade no transporte, afetando também as praias na parte norte da lagoa.

Os microplásticos provenientes das fontes difusas são os que mais tendem a sair da lagoa, sendo posteriormente empurrados para as praias da orla de Cabo Frio pela ação

dos ventos. Já os microplásticos oriundos dos rios não parecem sair da lagoa devido à distância do canal e ao regime de ventos local.

### 5.1.2 Sobre o transporte e destino dos microplásticos neutros

A Figura 5.7 apresenta o resultado do último instante da modelagem de verão, dia 28/02/23 às 0h, mostrando os microplásticos na água lançados por cada estação de tratamento de efluentes e transportados pela corrente média na coluna d'água. A Figura 5.8 ilustra a mesma informação para o mês de inverno, no dia 28/07/23 às 0h.

É possível observar que os microplásticos formam círculos próximos às suas fontes, indicando que estão presos nos vórtices característicos do resultado 2DH do modelo hidrodinâmico.

Neste caso, não há muita diferença entre os resultados de verão e de inverno, com os microplásticos sendo absorvidas em localidades semelhantes e havendo saída deles da lagoa nos dois meses modelados. A diferença substancial ocorre nos microplásticos provenientes da ETE Cabo Frio, que no verão formam o vórtice dentro da lagoa e, no inverno, fora dela.

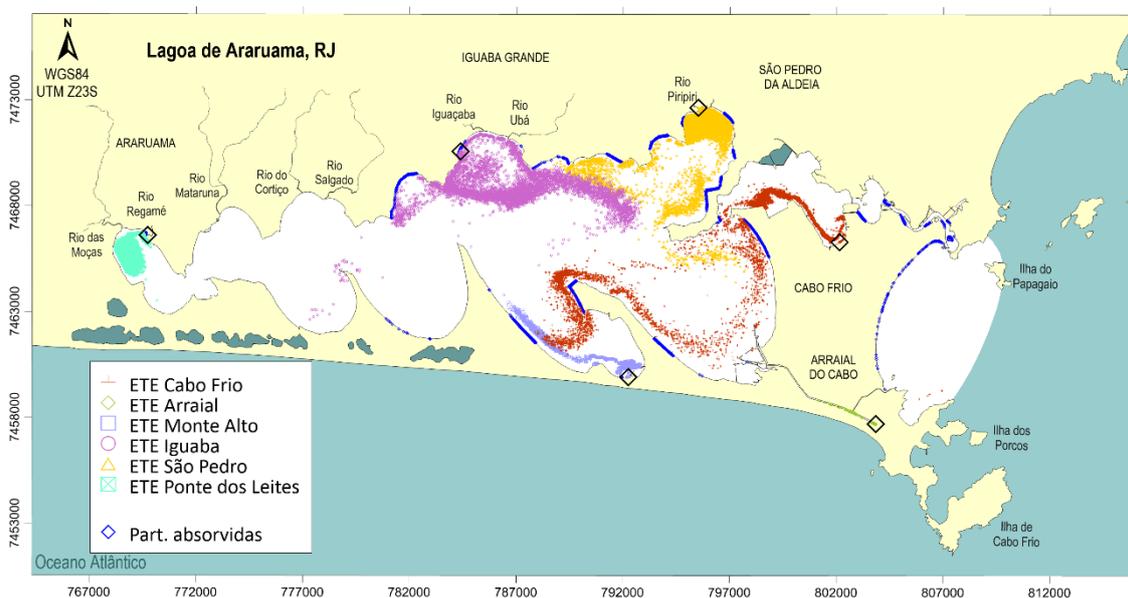
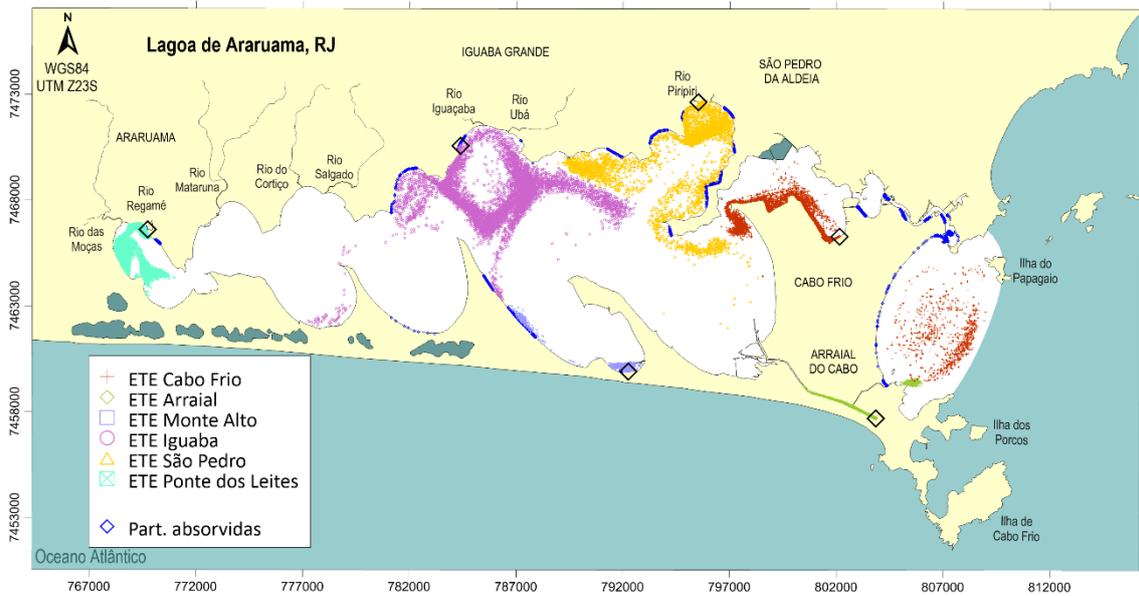


Figura 5.7: Mapa de plumas de microplásticos neutros no dia 28/02/23, lançados a partir das ETEs, e zonas de absorção no litoral.



*Figura 5.8: Mapa de plumas de microplásticos neutros no dia 28/07/23, lançados a partir das ETEs, e zonas de absorção no litoral.*

A Figura 5.9 mostra os microplásticos provenientes das fontes difusas durante o mês de verão, enquanto a Figura 5.10 ilustra o resultado do mês de inverno, ambas representando o último instante da modelagem.

Nesta situação, tanto o canal quanto a extremidade leste da lagoa apresentam microplásticos em quase todo o seu espelho d'água nos dois meses utilizados na modelagem. A principal diferença está na localização do vórtice de microplásticos: no verão, ele se forma na parte interna da lagoa, com poucos microplásticos chegando ao mar; já no inverno, o vórtice se estabelece no mar, na embocadura do canal e em frente à orla de Cabo Frio, deixando poucos microplásticos dentro da lagoa.

Nesta situação, durante o mês de verão, é o único momento em que se detecta a absorção de microplásticos no litoral da Prainha, em Arraial do Cabo.

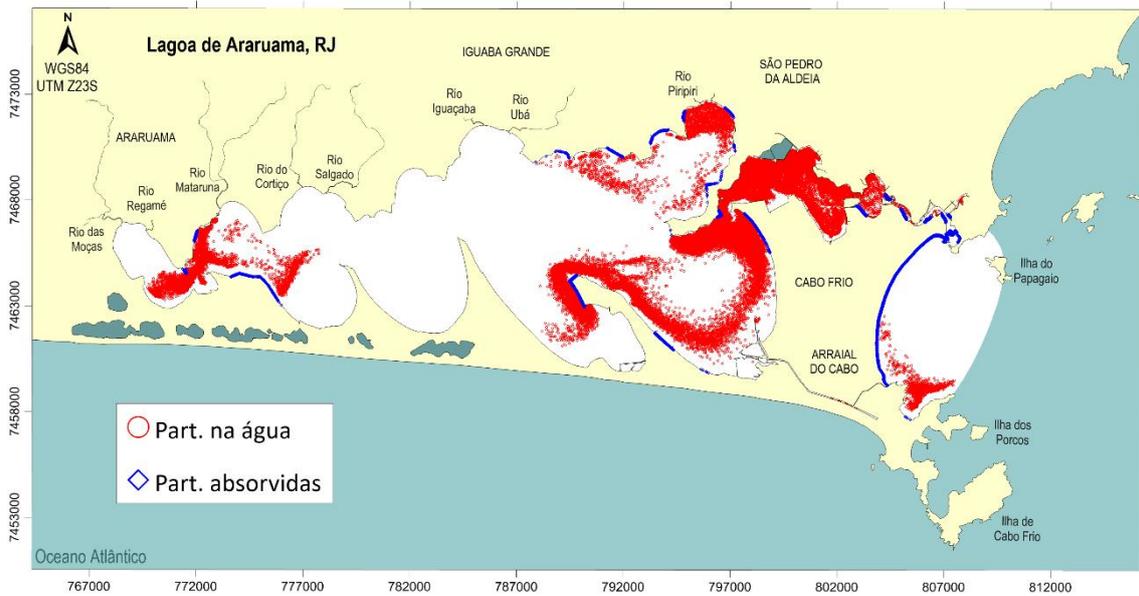


Figura 5.9: Mapa de plumas de microplásticos neutros no dia 28/02/23, lançados a partir das Fontes Difusas, e zonas de absorção no litoral.

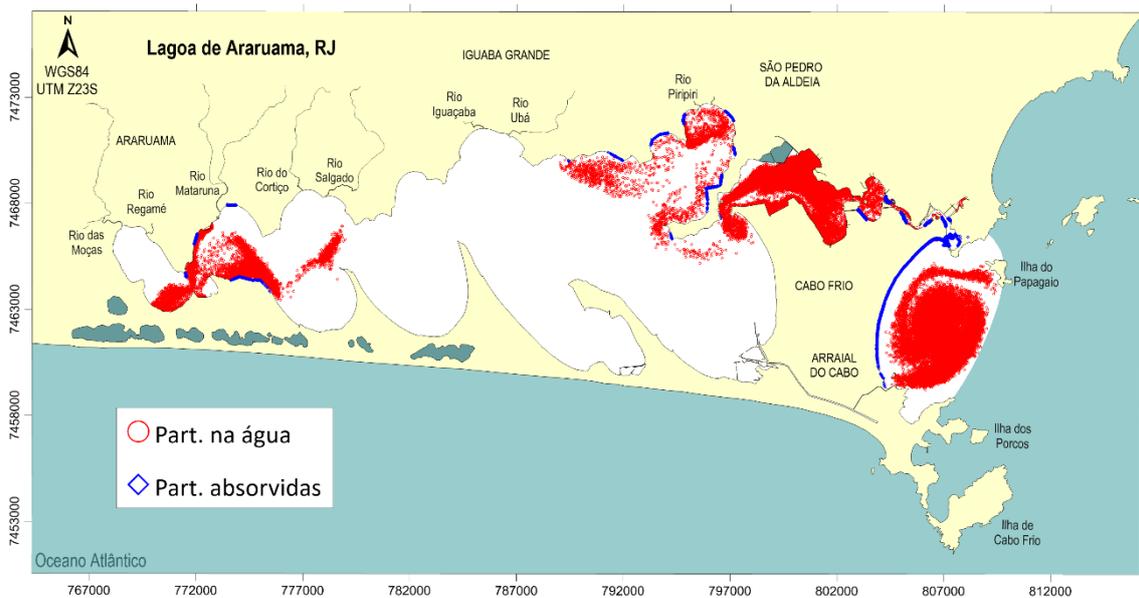


Figura 5.10: Mapa de plumas de microplásticos neutros no dia 28/07/23, lançados a partir das Fontes Difusas, e zonas de absorção no litoral.

A Figura 5.11 ilustra os microplásticos provenientes dos rios no mês de fevereiro, enquanto a Figura 5.12 mostra os resultados para o mês de julho, ambas representando o último instante dos vinte dias de modelagem. A situação dos rios como fontes apresenta a menor variabilidade entre as descritas até agora. No mês de inverno, os microplásticos conseguem se deslocar um pouco mais em direção ao sul da lagoa, mas nada significativo.

Os microplásticos neutros provenientes dos rios não saem da lagoa, assim como observado nos resultados dos leves. No entanto, eles contaminam toda a parte norte e a ala oeste da lagoa, no município de Araruama.

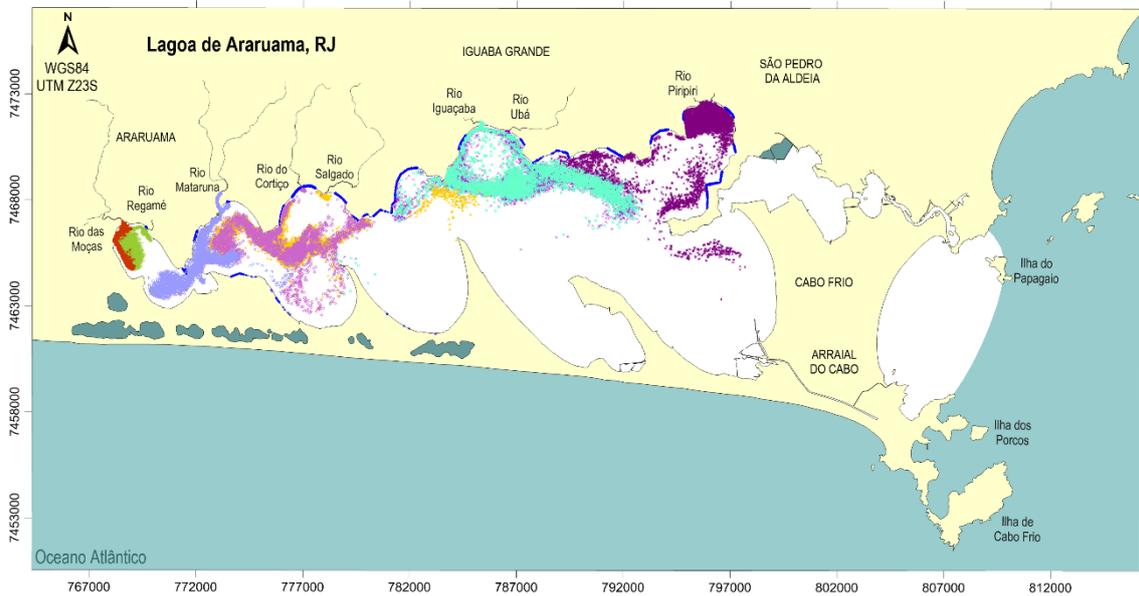


Figura 5.11: Mapa de plumas de microplásticos neutros no dia 28/02/23, lançados a partir dos rios, e zonas de absorção no litoral.

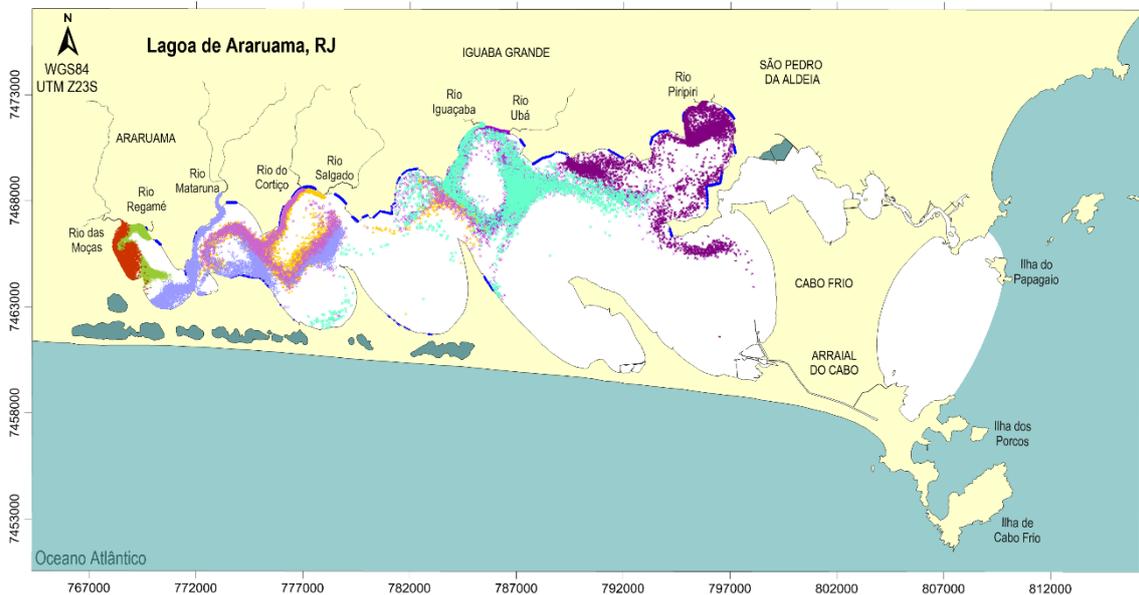


Figura 5.12: Mapa de plumas de microplásticos neutros no dia 28/07/23, lançados a partir dos rios, e zonas de absorção no litoral.

Ao analisar os microplásticos neutros, observa-se uma maior quantidade de partículas na água em comparação com os leves. Nesse caso, não há um transporte constante

e direto de microplásticos para a parte sul, e eles permanecem aprisionados nos vórtices na parte norte da lagoa, próximos às suas respectivas fontes.

As praias da lagoa são menos afetadas pelos microplásticos neutros em comparação com os leves. A ala oeste apresenta grande quantidade de microplásticos oriundos da ETE Ponte dos Leites e dos rios das Moças e Regamé. Tanto nos resultados dos microplásticos leves quanto dos neutros, observa-se uma dificuldade deles deixarem essa região.

As fontes difusas são as que mais apresentam riscos de exportação de microplásticos para o mar, tanto de leves quanto de neutros. Por outro lado, os rios têm uma influência limitada à lagoa e afetam menos o mar, devido à sua localização no interior da lagoa. As estações de tratamento de efluentes que mais apresentam riscos de exportação para o exterior são as de Cabo Frio e Arraial do Cabo, devido à sua proximidade com o mar.

O canal de ligação da ETE Arraial com o mar é longo e estreito, o que dificulta o transporte de microplásticos tanto para dentro da lagoa quanto para o mar. Devido a essas características, o canal tende a acumular altas cargas de microplásticos.

## **5.2 Sobre porcentagem de passagem durante o tempo da simulação**

Nesta seção, são analisadas as regiões de passagem de microplásticos ao longo do período de modelagem. Primeiramente, são avaliados os microplásticos leves na seção 5.2.1, seguidos pelos neutros na seção 5.2.2 e, por fim, pelos densos na seção 5.2.3.

### **5.2.1 Sobre o tempo de passagem dos microplásticos leves**

A Figura 5.13 mostra a porcentagem do tempo de passagem de microplásticos flutuantes lançados a partir das estações de tratamento de efluentes para o mês de verão. É evidente a existência de um caminho preferencial, indicado pela mancha azul que representa cerca de 30% do tempo de modelagem, percorrendo quase uma linha reta pelo meio da lagoa. As regiões próximas às saídas das ETES registram constantemente a presença de microplásticos. Em contraste, as regiões fora do caminho preferencial apresentam passagem de microplásticos por cerca de 10% do tempo de modelagem, abrangendo boa parte da lagoa. Não foi observada a saída de microplásticos da lagoa durante este período.

A Figura 5.14 mostra o tempo de passagem de microplásticos flutuantes provenientes das ETES no mês de inverno. O caminho preferencial ainda é visível, porém é menos

intenso do que no verão. Uma área maior do espelho d'água da lagoa registra a passagem de microplásticos, e observa-se a saída deles da lagoa. No entanto, não foi identificada a saída de microplásticos do domínio de modelagem, com as partículas permanecendo retidas ao litoral de Cabo Frio.

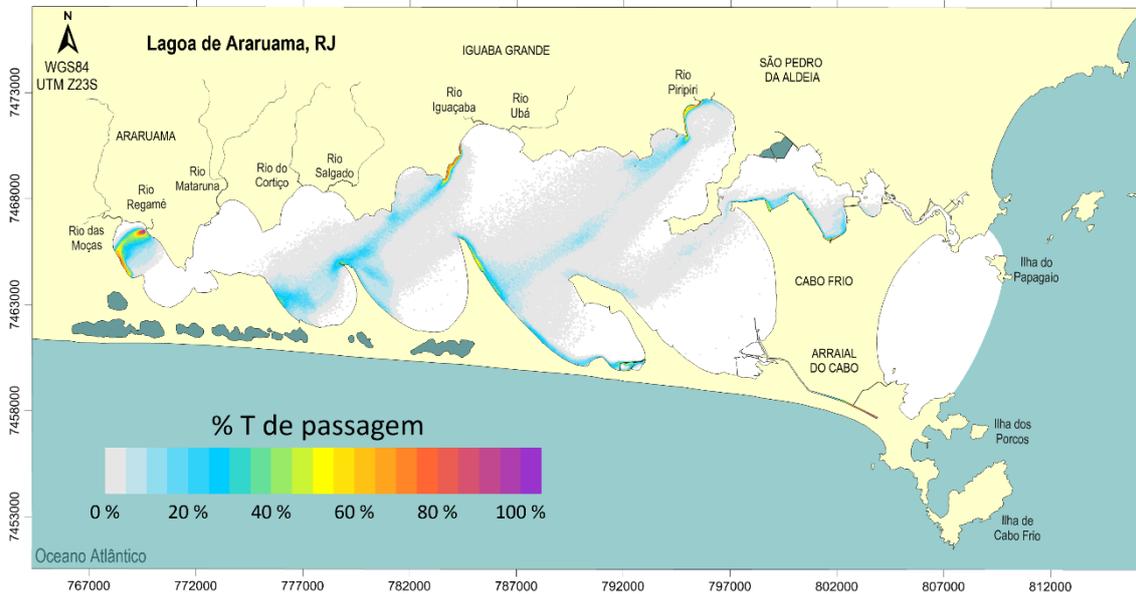


Figura 5.13: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos leves lançados a partir das ETEs durante o mês de verão.

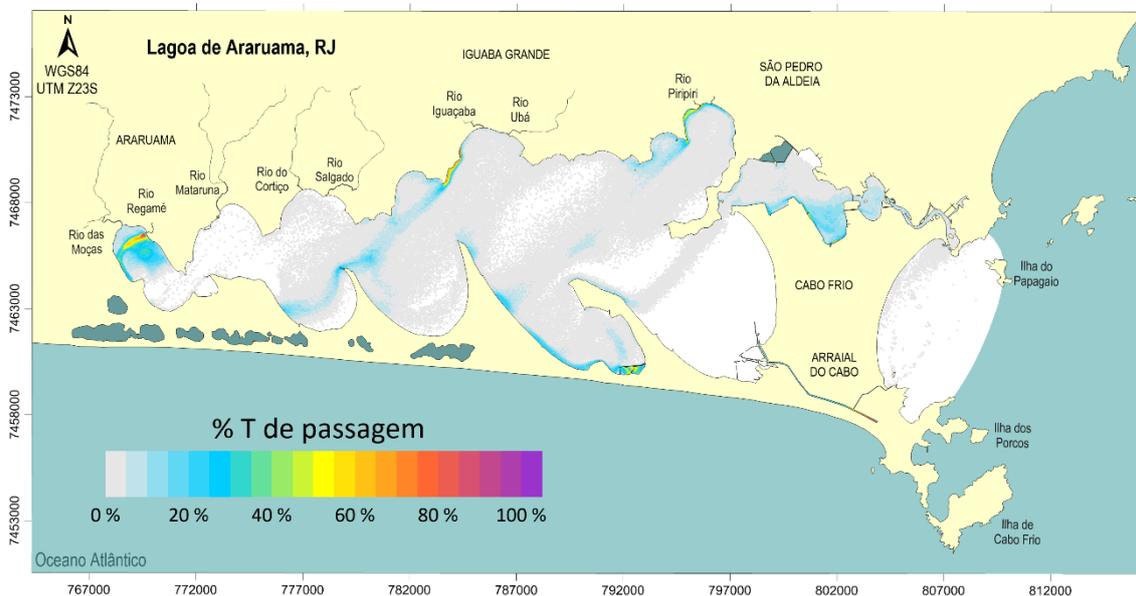


Figura 5.14: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos leves lançados a partir das ETEs durante o mês de inverno.

A Figura 5.15 mostra a porcentagem do tempo de passagem de microplásticos flutuantes lançados a partir das fontes difusas para o mês de verão. A extremidade leste

da lagoa registra alta presença de microplásticos devido à concentração de fontes na região. Observa-se uma alta entrada de microplásticos na lagoa e um caminho preferencial em diagonal até a parte sul. Neste caso, é registrado um período considerável de saída de microplásticos da lagoa, com sua passagem pela orla, mas sem registro de saída através do domínio de modelagem.

A Figura 5.16 mostra a porcentagem do tempo de passagem de microplásticos flutuantes lançados a partir das fontes difusas para o mês de inverno. A extremidade leste da lagoa também apresenta um alto índice de presença de microplásticos, embora com menor intensidade do que no verão. Os microplásticos são identificados dentro da lagoa por um período mais curto, mas uma maior área do litoral mostra passagem deles. Neste caso, é identificada a saída de microplásticos pela fronteira do domínio.

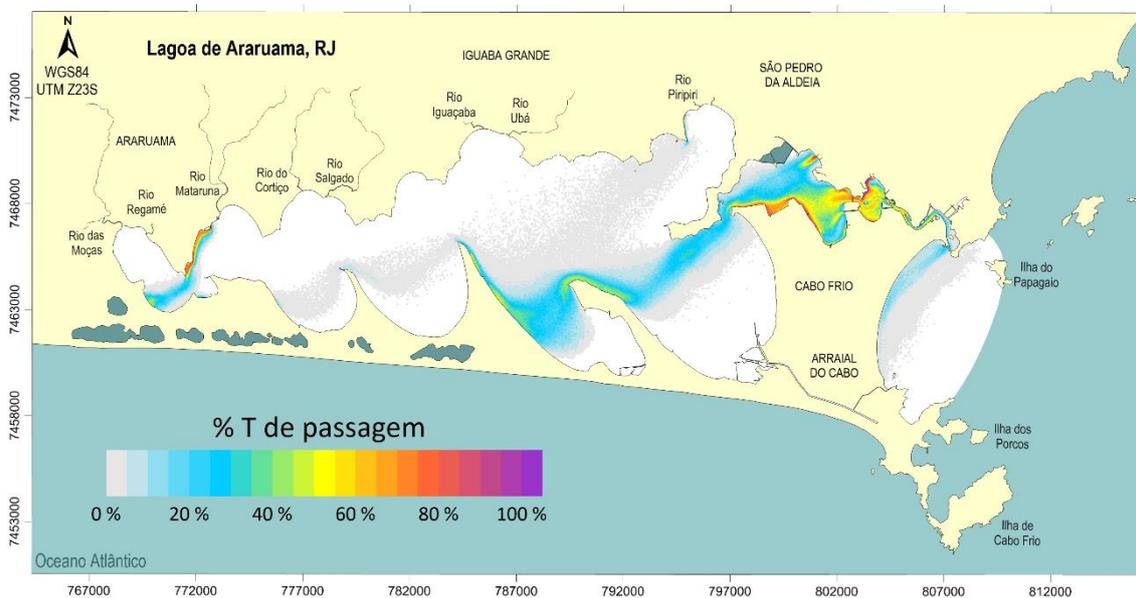


Figura 5.15: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos leves lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de verão.

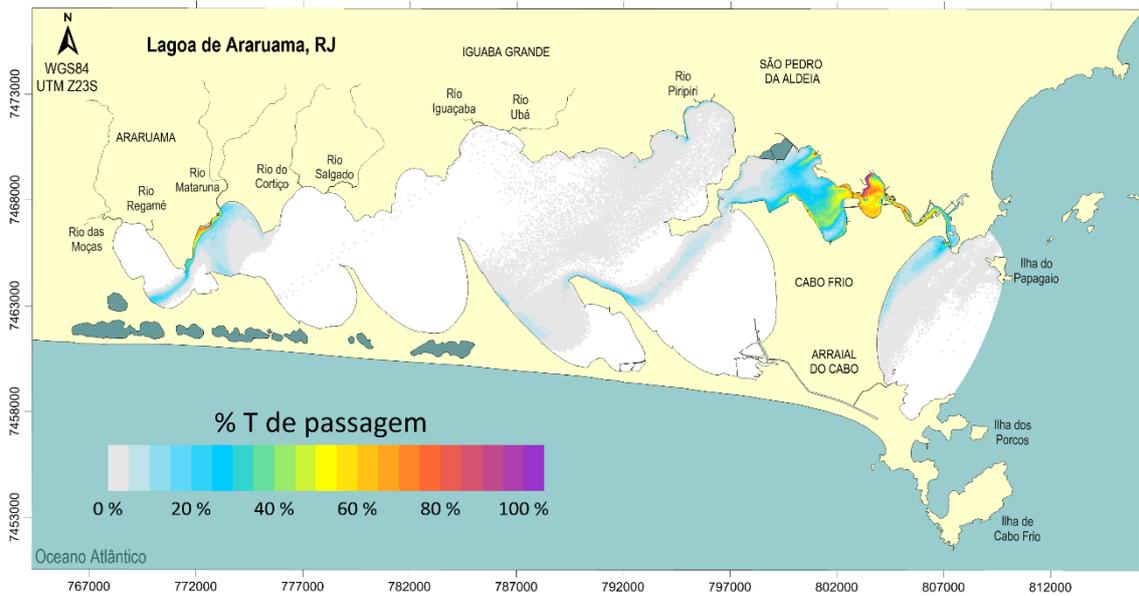


Figura 5.16: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos leves lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de inverno.

A Figura 5.17 mostra a porcentagem do tempo de passagem de microplásticos flutuantes lançados a partir dos rios para o mês de verão. A Figura 5.18 ilustra a mesma informação para o mês de inverno. Este caso apresenta as menores diferenças entre os dois períodos analisados. O caminho preferencial e a presença de microplásticos na parte sul da lagoa são ligeiramente mais evidentes no verão. No inverno, é registrada a passagem de microplásticos por uma área um pouco maior do espelho d'água. Em ambos os casos, não há risco de saída de microplásticos da lagoa.

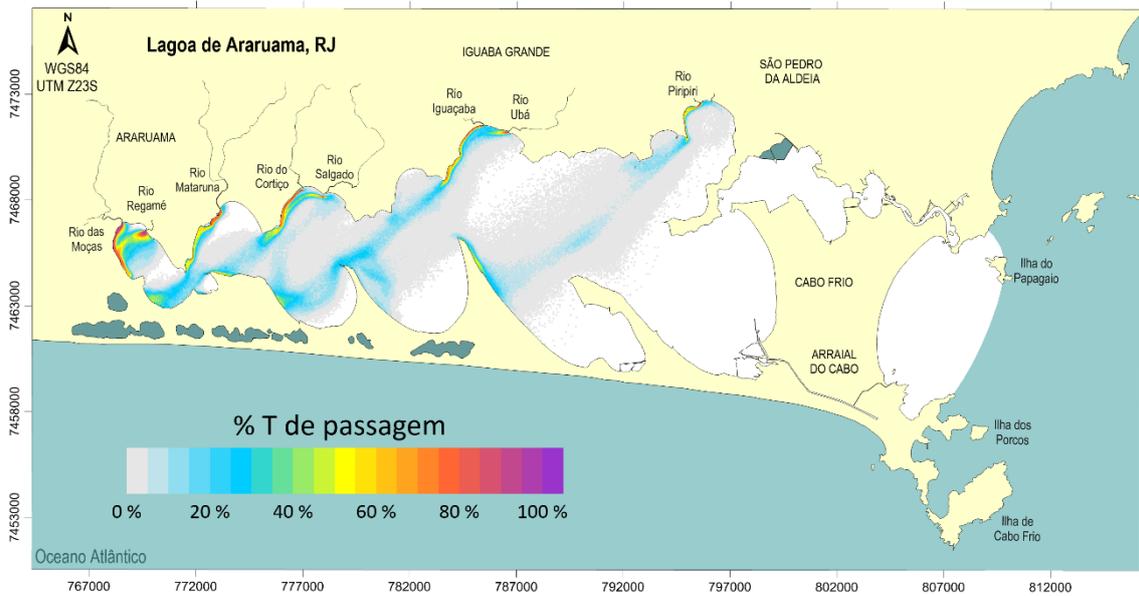


Figura 5.17: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos leves lançados a partir dos rios durante o mês de verão.

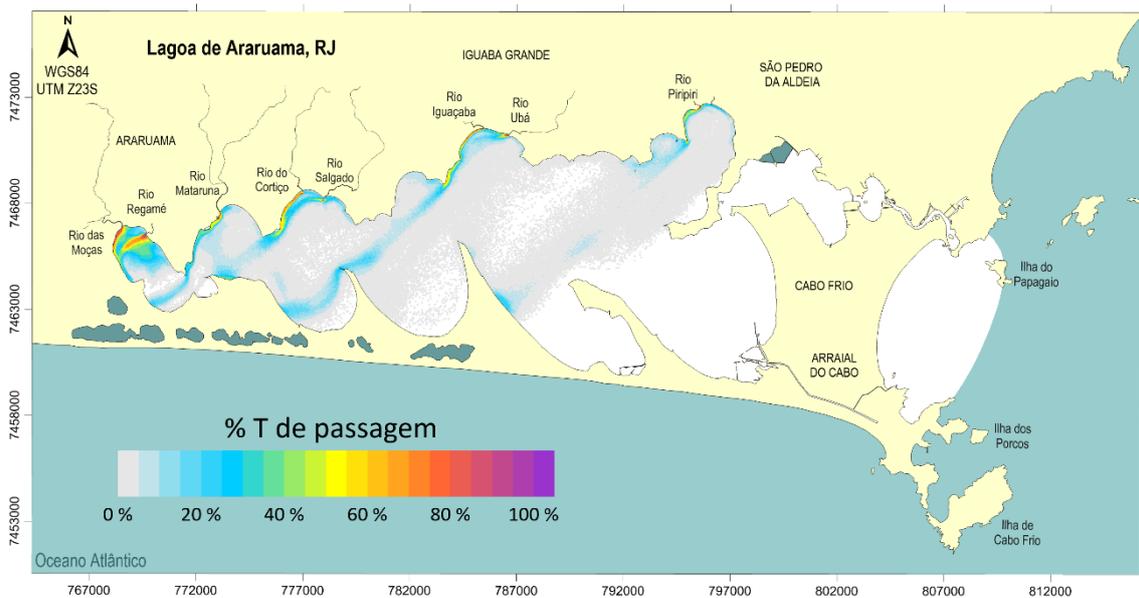


Figura 5.18: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos leves lançados a partir dos rios durante o mês de inverno.

## 5.2.2 Sobre o tempo de passagem dos microplásticos neutros

A Figura 5.19 mostra a porcentagem do tempo de passagem de microplásticos neutros lançados a partir das ETEs para o mês de verão. Observa-se que eles ficam majoritariamente presentes nos vórtices próximos às saídas das ETEs, exceto pela ETE Cabo Frio, cujos microplásticos são predominantemente levados para dentro da lagoa, com uma

menor quantidade direcionada para o litoral. Não é registrado transporte significativo entre a parte norte e a parte sul da lagoa. Há exportação de microplásticos para o litoral, onde tendem a ser empurrados para a areia, e pouca saída do domínio modelado.

A Figura 5.20 mostra a porcentagem do tempo de passagem de microplásticos neutros lançados a partir das ETEs para o mês de inverno. A diferença significativa em relação ao verão é que o litoral apresenta mais regiões e um tempo maior de presença de microplásticos, enquanto menos partículas vão para o interior da lagoa a partir da ETE Cabo Frio. O litoral também exibe um vórtice em frente às praias de Cabo Frio. Nesta situação, há saída de microplásticos pela fronteira aberta do domínio de modelagem. Embora a área litorânea apresente microplásticos em todo seu espelho d'água, não parece haver necessidade de expandi-la devido à baixa saída de microplásticos do domínio e ao tamanho do vórtice.

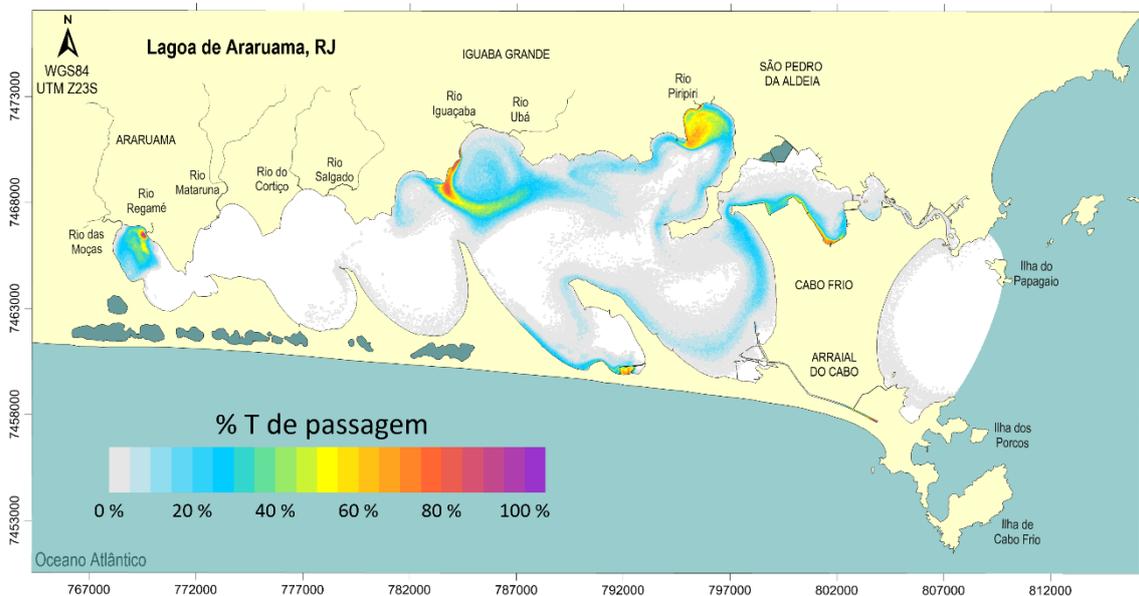


Figura 5.19: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir das ETEs durante o mês de verão.

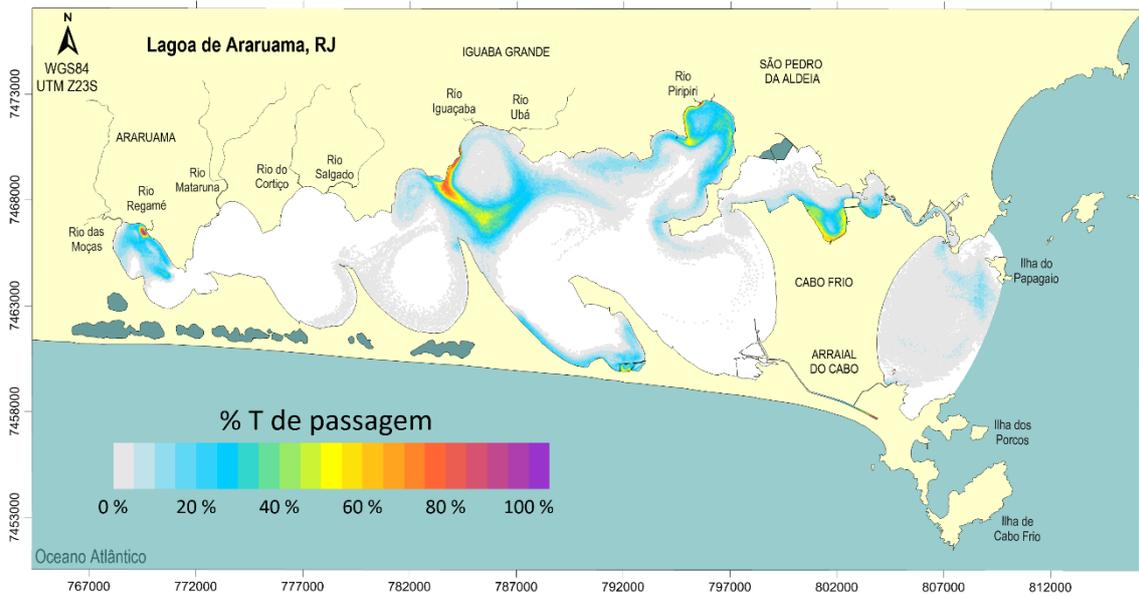


Figura 5.20: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir das ETEs durante o mês de inverno.

A Figura 5.21 mostra a porcentagem do tempo de passagem de microplásticos neutros lançados a partir das fontes difusas para o mês de verão. A área do canal e o início da lagoa registram alta presença de microplásticos. Há presença deles no vórtice localizado no meio da lagoa e uma constante presença no mar próximo às praias.

A Figura 5.22 mostra a porcentagem do tempo de passagem de microplásticos neutros lançados a partir das fontes difusas para o mês de inverno. A área do canal e o início da lagoa registram alta presença de microplásticos, enquanto o meio da lagoa não registra muita presença deles. O litoral possui uma presença significativa de microplásticos em grande parte do período, e é registrada a saída deles do domínio pelo meio da fronteira aberta.

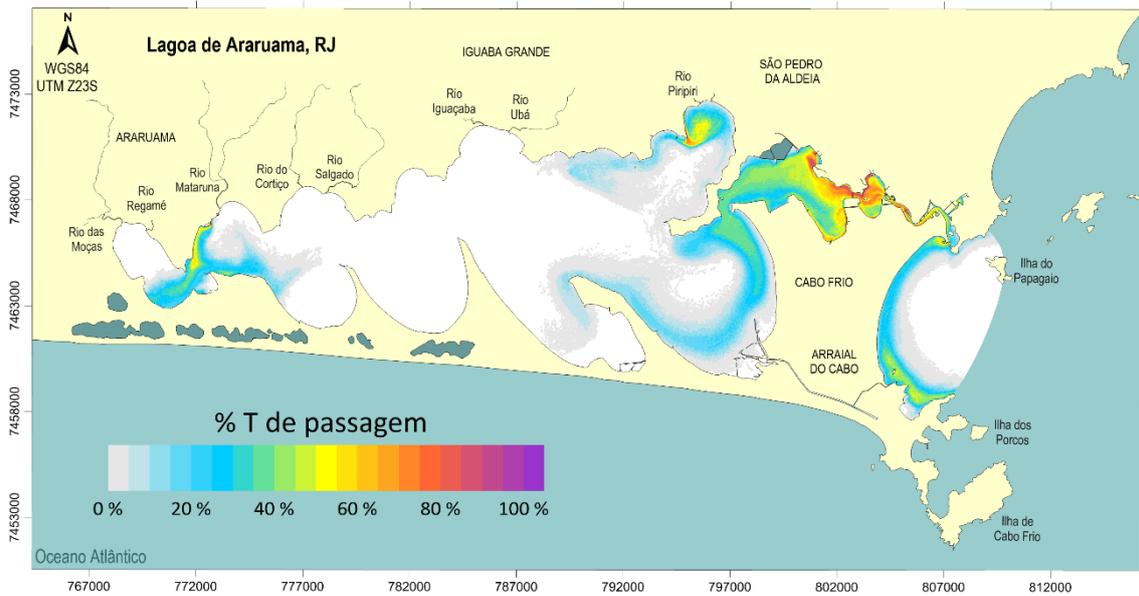


Figura 5.21: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de verão.

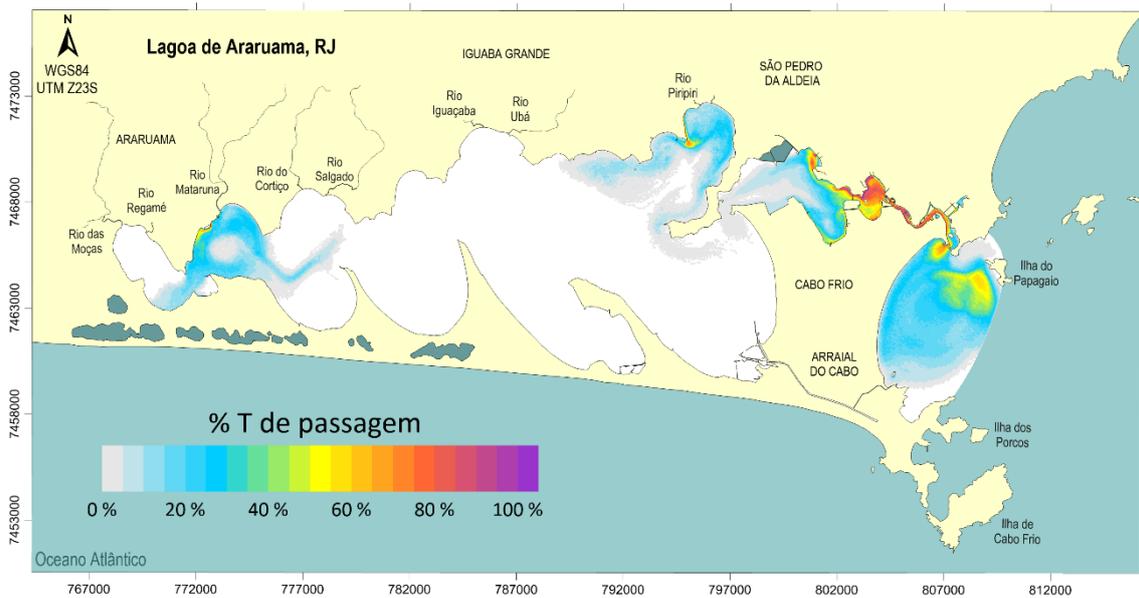


Figura 5.22: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de inverno.

A Figura 5.23 mostra a porcentagem do tempo de passagem de microplásticos neutros lançados a partir dos rios para o mês de verão. A Figura 5.24 mostra a mesma informação para o mês de inverno. Este caso não apresenta variabilidade significativa entre os meses analisados. Os microplásticos permanecem principalmente nos vórtices da

parte norte, próximos às desembocaduras dos rios, e não são detectados na parte sul da lagoa.

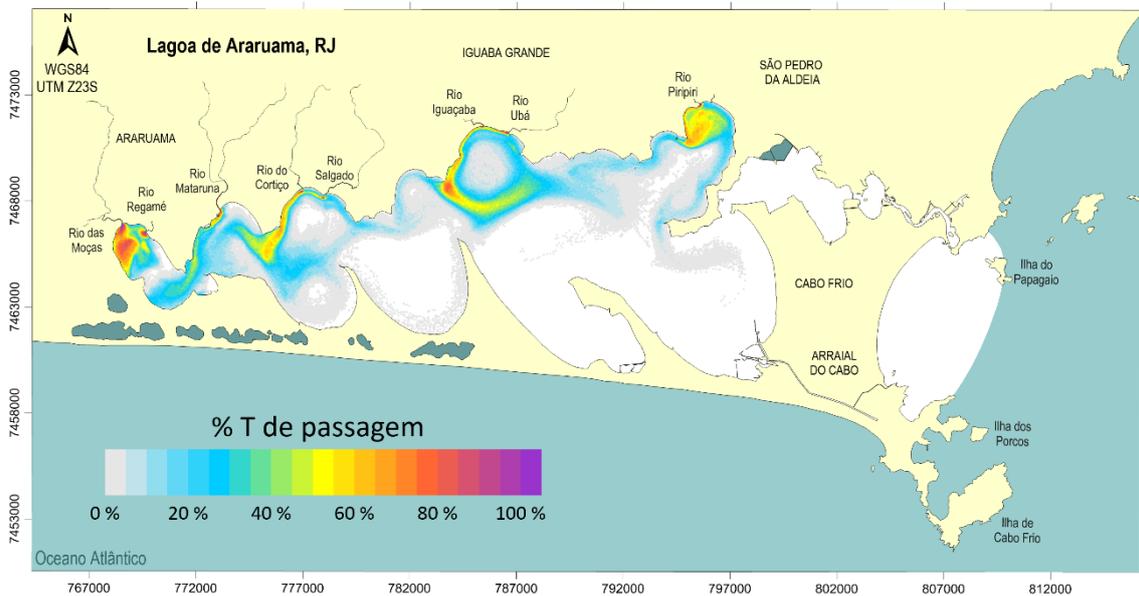


Figura 5.23: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir dos rios durante o mês de verão.

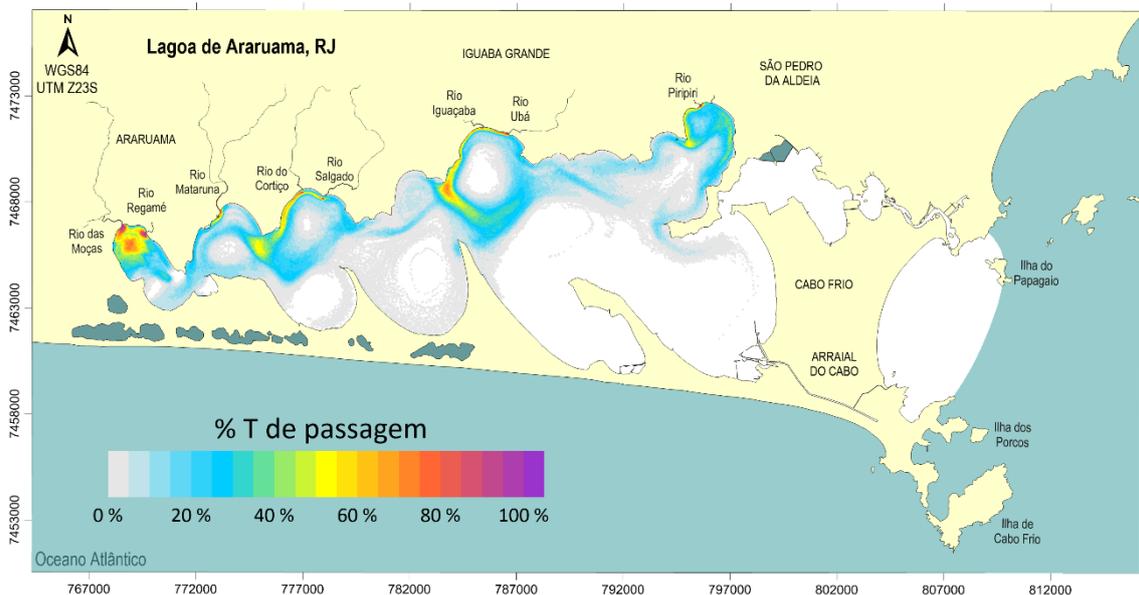


Figura 5.24: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir dos rios durante o mês de inverno.

### 5.2.3 Sobre o tempo de passagem dos microplásticos densos

A Figura 5.25 mostra a porcentagem do tempo de passagem de microplásticos densos lançados a partir das ETEs para o mês de verão. A Figura 5.26 mostra a porcentagem do

tempo de passagem no inverno. Em ambos os meses analisados, não há diferença significativa, e os microplásticos densos não se deslocam para muito longe de suas fontes. A área com microplásticos presentes é ligeiramente maior no inverno do que no verão, devido aos ventos que transportam os microplásticos para o sul, que sopram de sudoeste para nordeste durante o inverno.

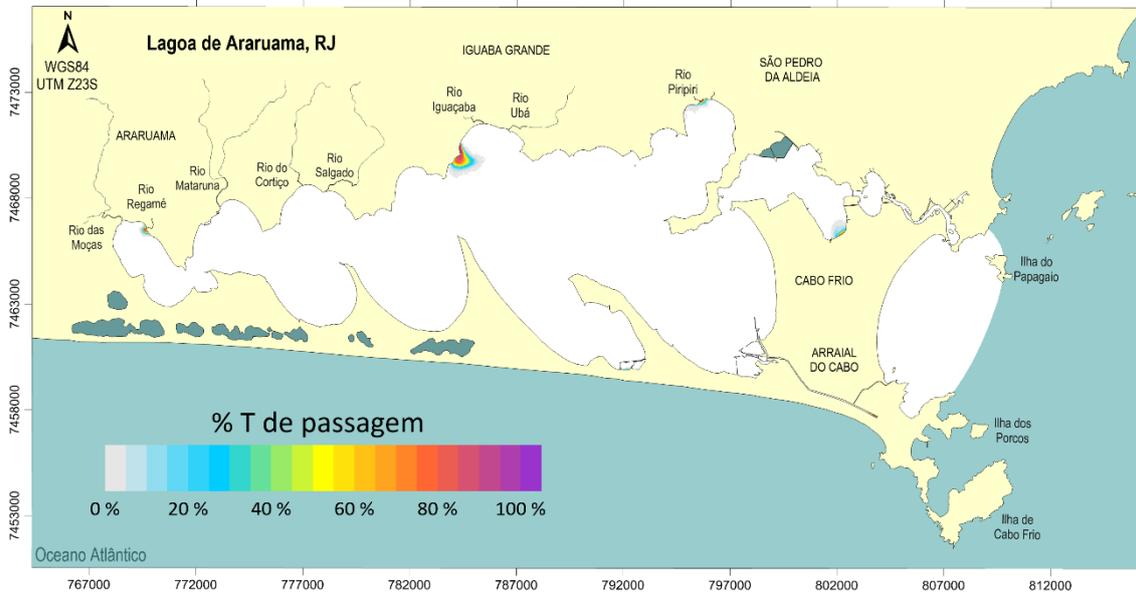


Figura 5.25: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos densos lançados a partir das ETEs durante o mês de verão.

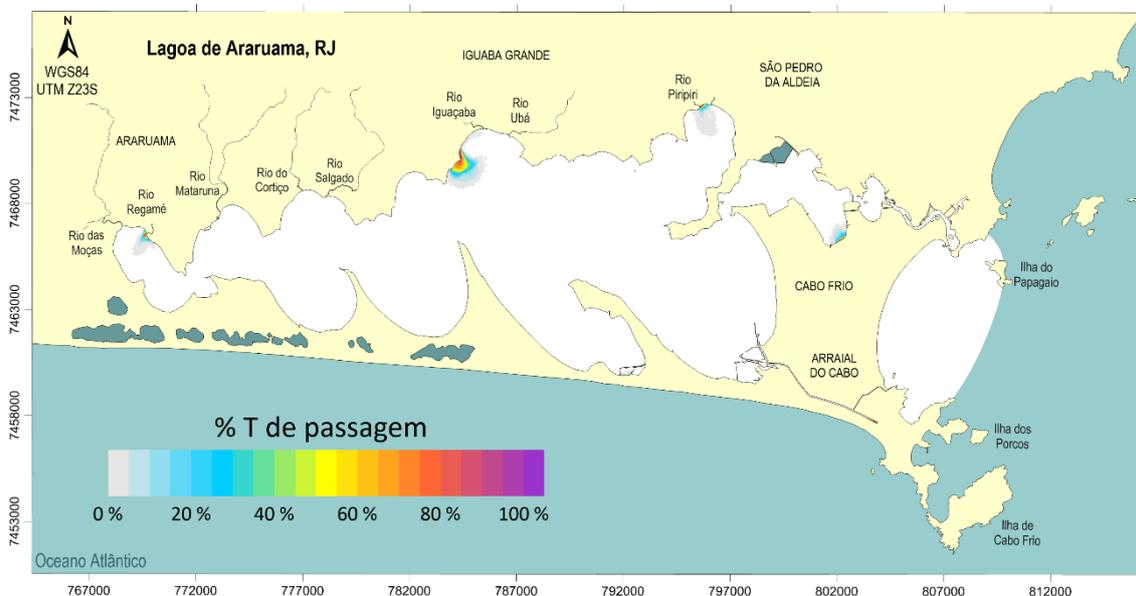


Figura 5.26: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos densos lançados a partir das ETEs durante o mês de inverno.

A Figura 5.27 mostra a porcentagem do tempo de passagem de microplásticos densos lançados a partir das fontes difusas para o mês de verão. A Figura 5.28 apresenta a mesma informação para o mês de inverno. Em ambos os casos, observa-se uma alta presença na região do canal e no início da lagoa, bem como na área litorânea próxima à saída do canal. Durante o inverno, há uma maior presença de microplásticos fora da lagoa. Apenas as fontes difusas parecem ser capazes de exportar microplásticos densos para fora da lagoa. A região do canal, devido às suas maiores velocidades, gera uma maior tensão de arraste e, portanto, tem uma chance maior de transportar microplásticos densos. Assim, é nesta área que se espera o maior transporte de microplásticos presentes no solo.

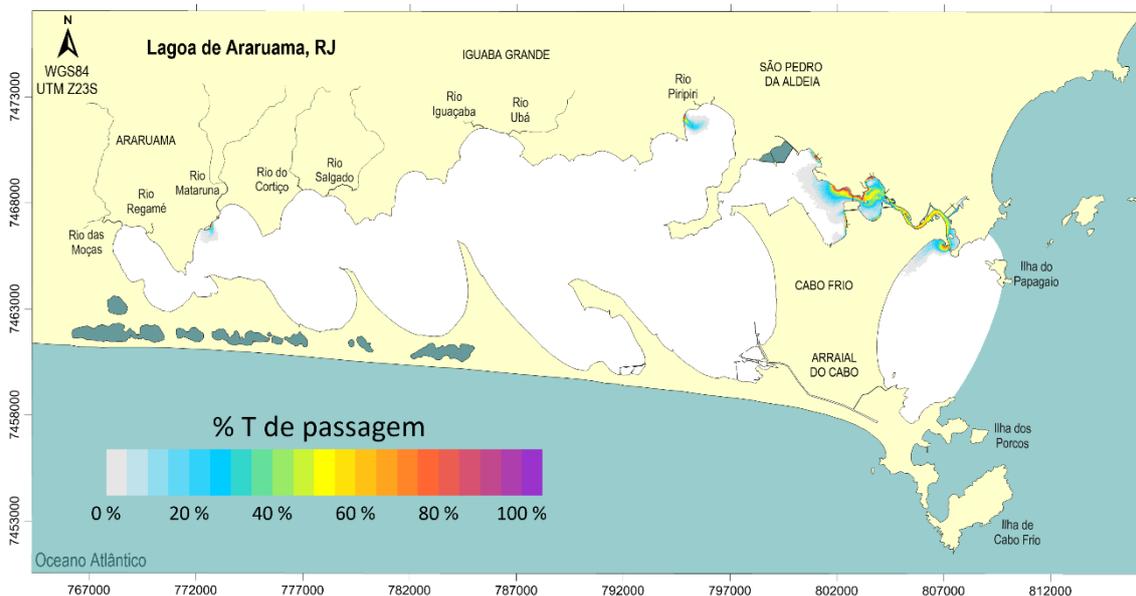
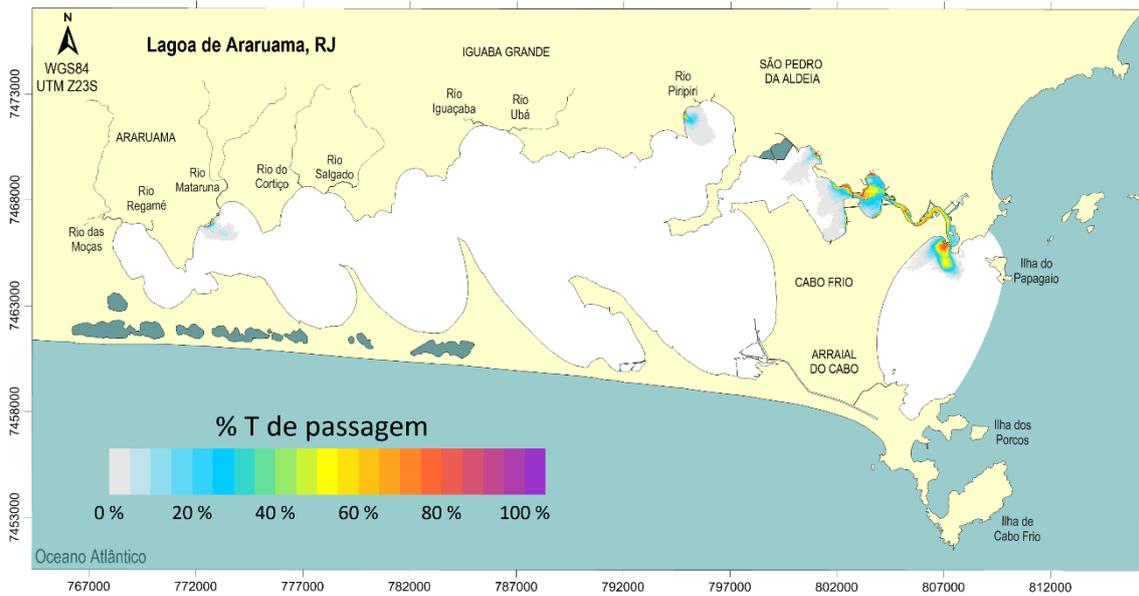


Figura 5.27: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos densos lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de verão.



*Figura 5.28: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos densos lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de inverno.*

A Figura 5.29 mostra a porcentagem do tempo de passagem de microplásticos densos lançados a partir dos rios para o mês de verão, enquanto a Figura 5.30 ilustra a mesma informação para o mês de inverno. A situação dos rios é semelhante à das ETEs, com pouca diferença significativa entre os dois meses analisados; os microplásticos densos não se deslocam para muito longe de suas fontes. A área com microplásticos presentes é ligeiramente maior no inverno devido à maior frequência de ventos de sudoeste, que transportam as partículas para o sul. Os ventos de nordeste tendem a manter os microplásticos presos no norte da lagoa, acumulando-os próximos às suas fontes.

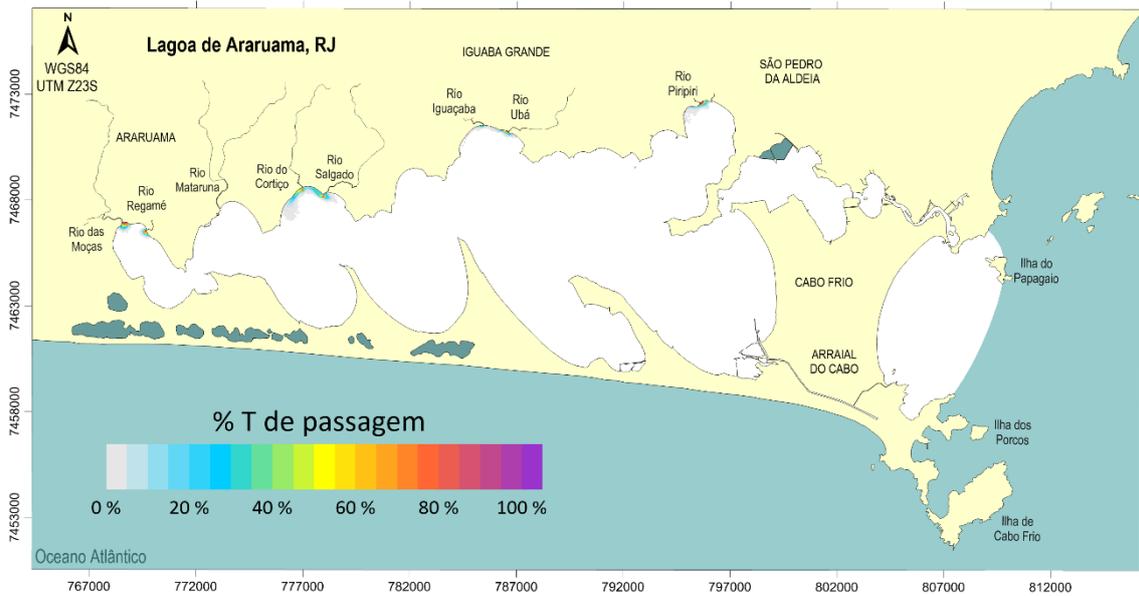


Figura 5.29: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos densos lançados a partir dos rios durante o mês de verão.

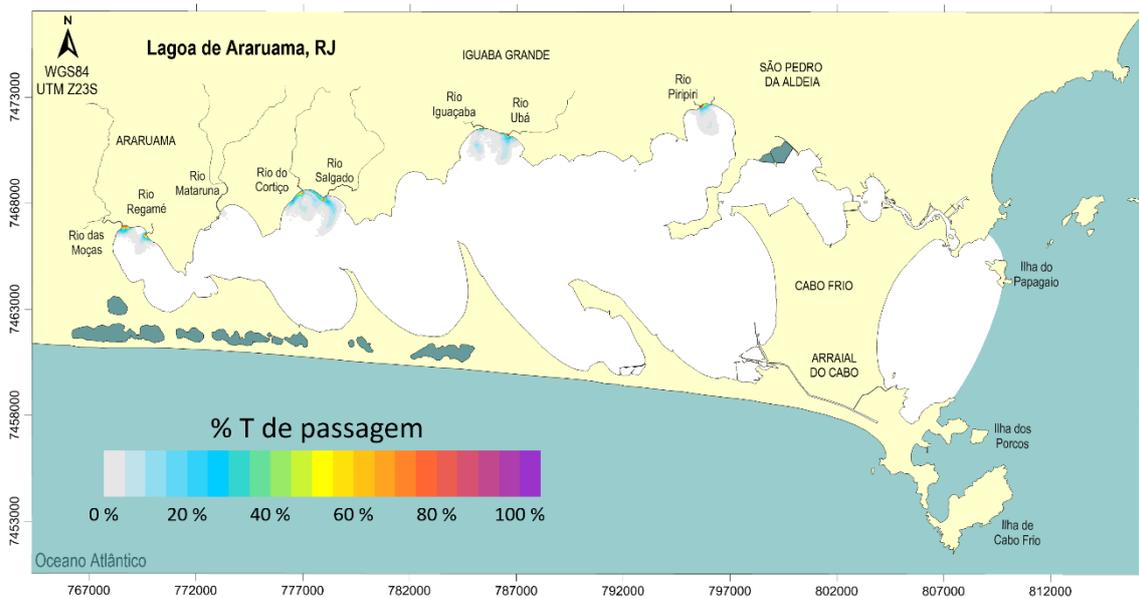


Figura 5.30: Porcentagem de passagem durante o tempo de modelagem de microplásticos densos lançados a partir dos rios durante o mês de inverno.

### 5.3 Sobre concentrações de microplásticos

Nesta seção, são identificadas as regiões com as maiores concentrações de microplásticos. A análise é realizada primeiramente para os microplásticos leves, na seção 5.3.1, e em seguida para os neutros, na seção 5.3.2.

As figuras de resultado estão em escala logarítmica para uma melhor avaliação dos mesmos, com valores variando entre  $10^{-5}$  e 1. Assim, em uma situação hipotética em que uma fonte emita 1500 microplásticos/m<sup>3</sup>, uma área marcada com diluição de 0,01, cor laranja na legenda, apresentaria uma concentração de 15 microplásticos/m<sup>3</sup>.

### 5.3.1 Sobre concentrações de microplásticos leves

A Figura 5.31 mostra a concentração de microplásticos na água lançados a partir das ETEs no último instante da modelagem do mês de verão. De forma geral, a diluição é significativa, com a maior parte do espelho d'água apresentando diluição na ordem de mil vezes. Alguns pontos merecem destaque devido ao acúmulo de microplásticos, como o final da lagoa, que concentra o lançamento da ETE Ponte dos Leites em Araruama, e o início da lagoa na margem do município de Cabo Frio. A parte sul da lagoa, que recebe os microplásticos das ETEs, também apresenta algum nível de acúmulo. Além disso, é possível observar uma concentração detectável de microplásticos fora da lagoa.

A Figura 5.32 apresenta a concentração de microplásticos no último instante do mês de inverno. Os pontos de acúmulo são semelhantes aos observados no verão, embora haja uma menor concentração de microplásticos adentrando a lagoa. Nota-se uma pequena concentração de microplásticos na área da Prainha em Arraial do Cabo. O canal de ligação onde está localizada a ETE Arraial continua altamente contaminado em todos os períodos devido à sua reduzida largura.

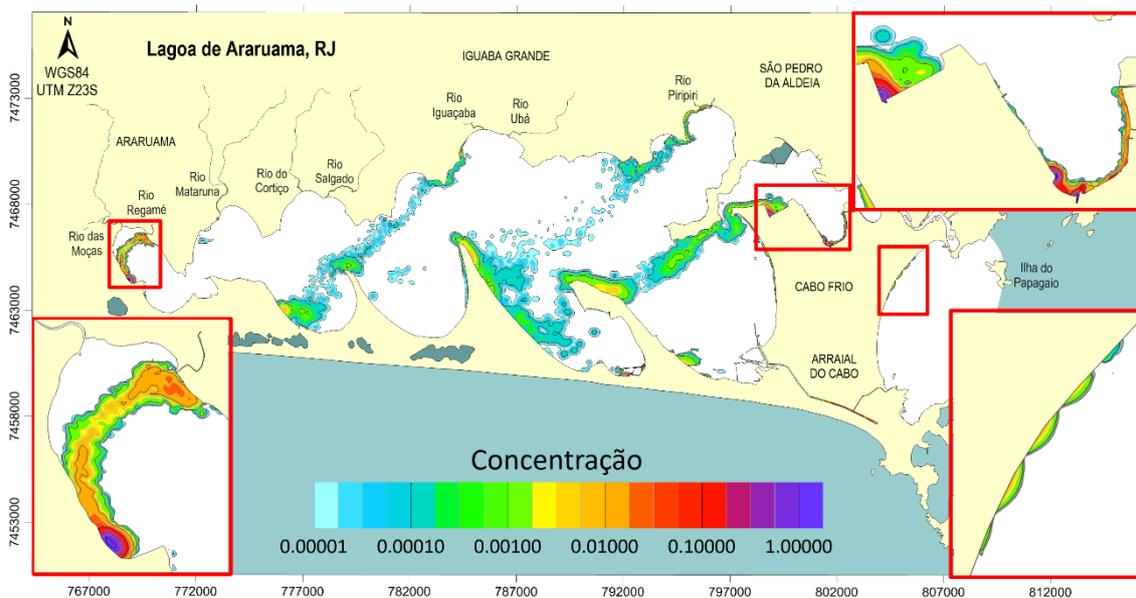
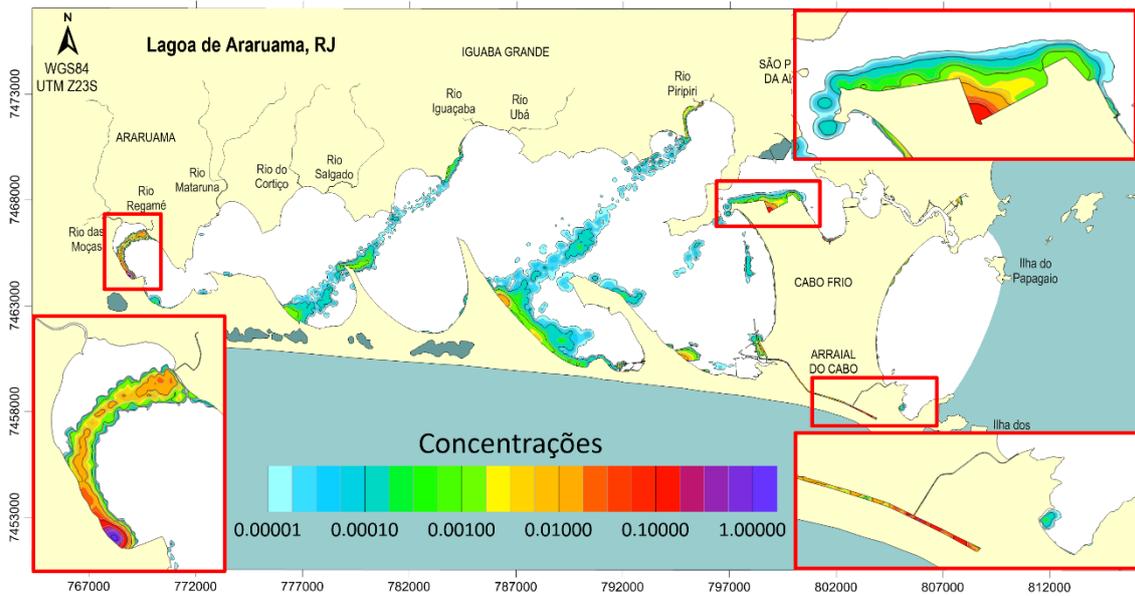


Figura 5.31: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos leves lançados a partir das ETEs durante o mês de verão.



*Figura 5.32: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos leves lançados a partir das ETEs durante o mês de inverno.*

A Figura 5.33 mostra a concentração de microplásticos na água lançados a partir das fontes difusas no último instante da modelagem do mês de verão. O canal e a extremidade leste da lagoa estão altamente contaminados por essas fontes, com a margem de Cabo Frio novamente apresentando acumulação. A parte interna da lagoa exibe diluições da ordem de cem vezes no destino dos microplásticos que adentram a lagoa, com acumulações observadas na parte sul.

A Figura 5.34 mostra a concentração de microplásticos na água lançados a partir das fontes difusas no último instante da modelagem do mês de inverno. As regiões de acúmulo são semelhantes às do verão, com a diferença de que no inverno há menor concentração de microplásticos no interior da lagoa.

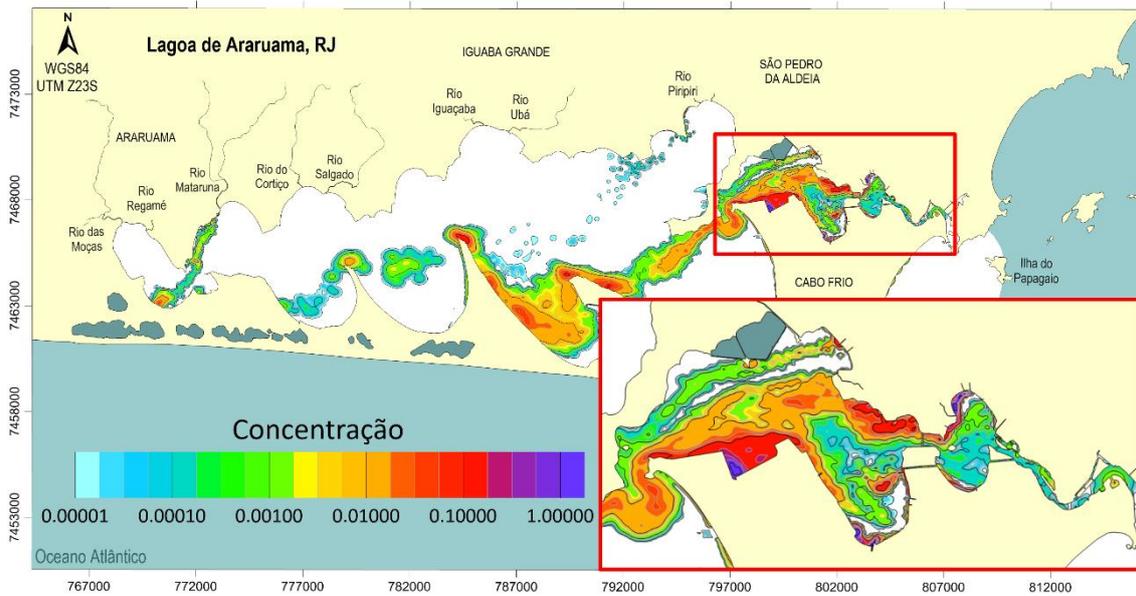


Figura 5.33: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos leves lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de verão.

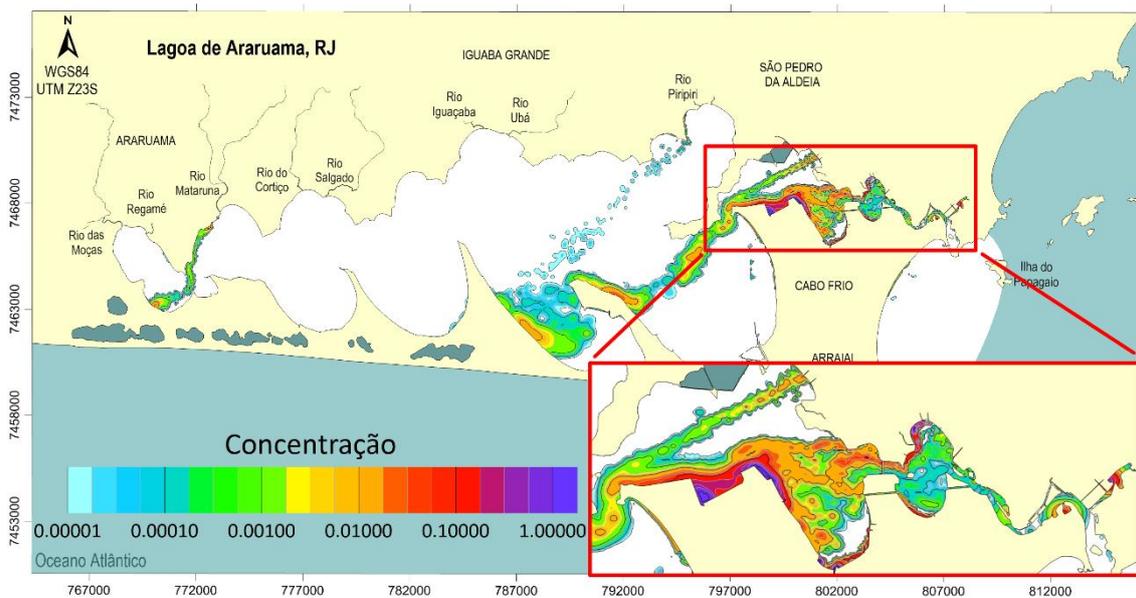


Figura 5.34: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos leves lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de inverno.

A Figura 5.35 mostra a concentração de microplásticos na água lançados a partir dos rios no último instante da modelagem do mês de verão. Observa-se alta concentração de microplásticos próximos às fontes e nas regiões de destino. A área do fim da lagoa, na região de Araruama, apresenta elevada contaminação com pontos de acúmulo e baixa diluição. Os resultados do inverno, apresentados na Figura 5.36, são semelhantes, com padrões de concentração e acúmulo comparáveis aos do verão.

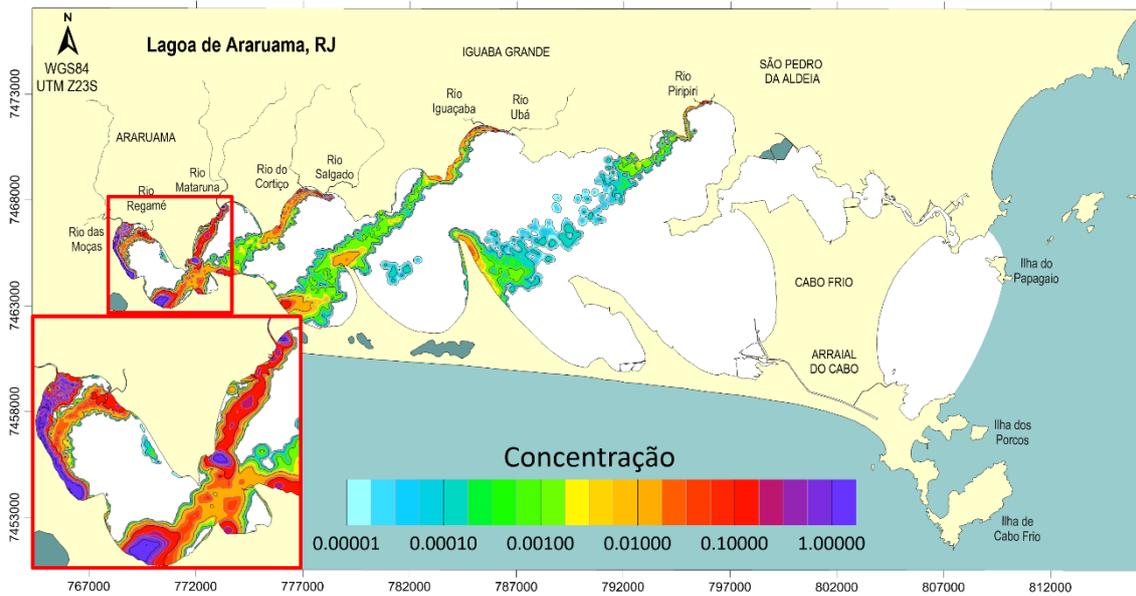


Figura 5.35: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos leves lançados a partir dos rios durante o mês de verão.

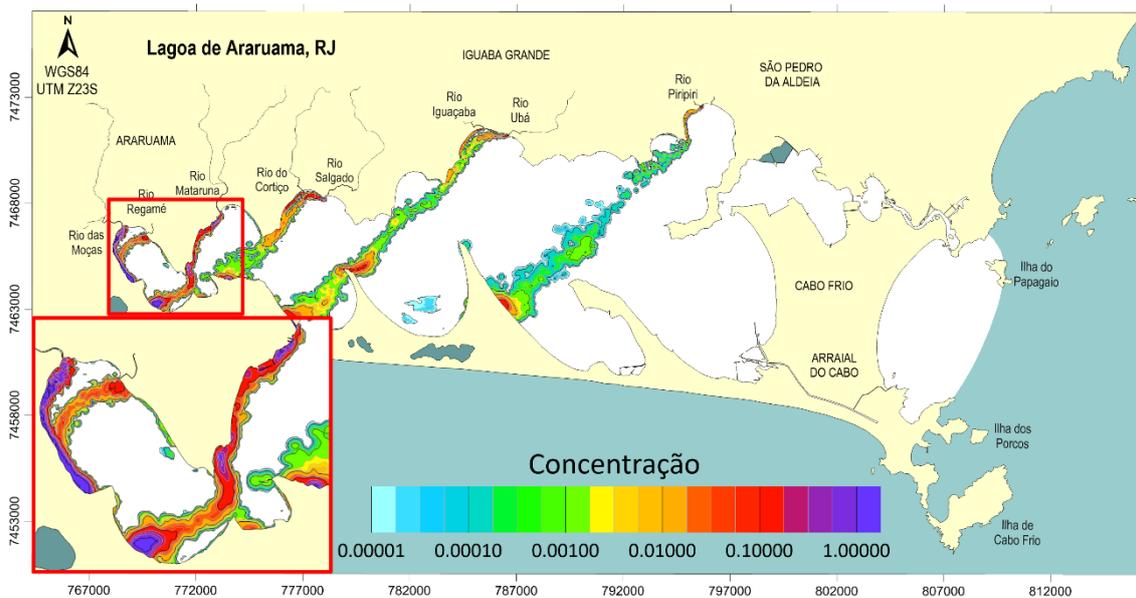


Figura 5.36: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos leves lançados a partir dos rios durante o mês de inverno.

### 5.3.2 Sobre concentrações de microplásticos neutros

A Figura 5.37 mostra a concentração de microplásticos na água lançados a partir das ETES no último instante da modelagem do mês de verão. Observa-se que a concentração é identificada nos vórtices característicos do resultado 2DH. Não há pontos de acúmulo com concentrações elevadas, mas sim giros com maior e menor concentração. A parte final da

lagoa, onde o vórtice é menor, apresenta uma maior concentração de microplásticos, enquanto os vórtices maiores no meio da lagoa têm uma diluição mais acentuada.

A Figura 5.38 mostra a concentração de microplásticos na água lançados a partir das ETEs no último instante da modelagem do mês de inverno. A principal diferença em relação ao verão é a presença de microplásticos no vórtice do mar aberto na saída da lagoa, embora as concentrações sejam bastante baixas, inferiores a  $10^{-4}$ .

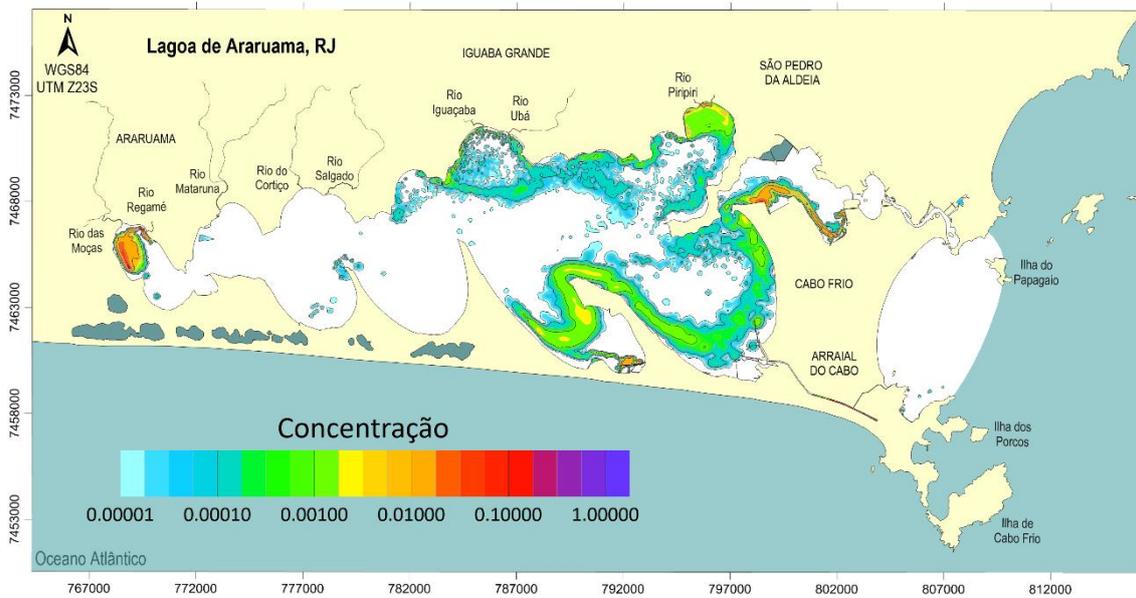


Figura 5.37: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir das ETEs durante o mês de verão.

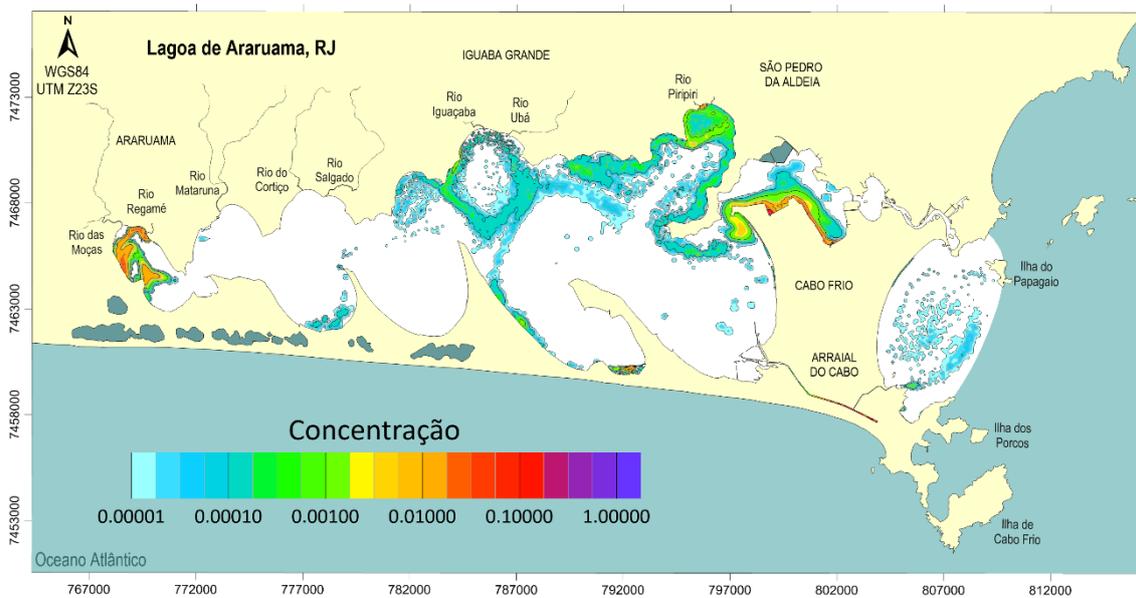
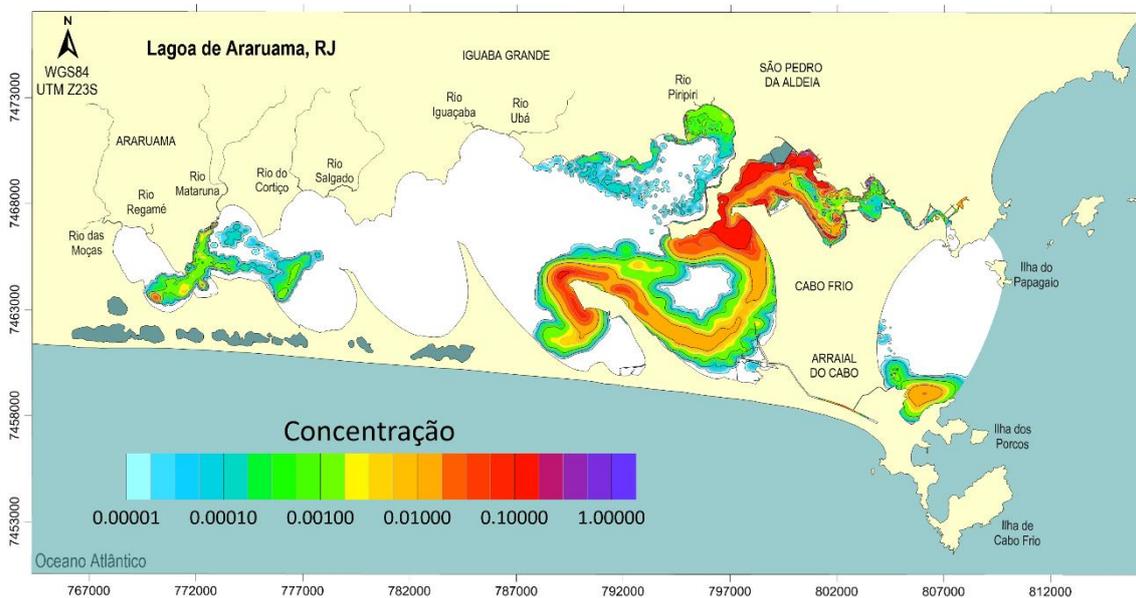


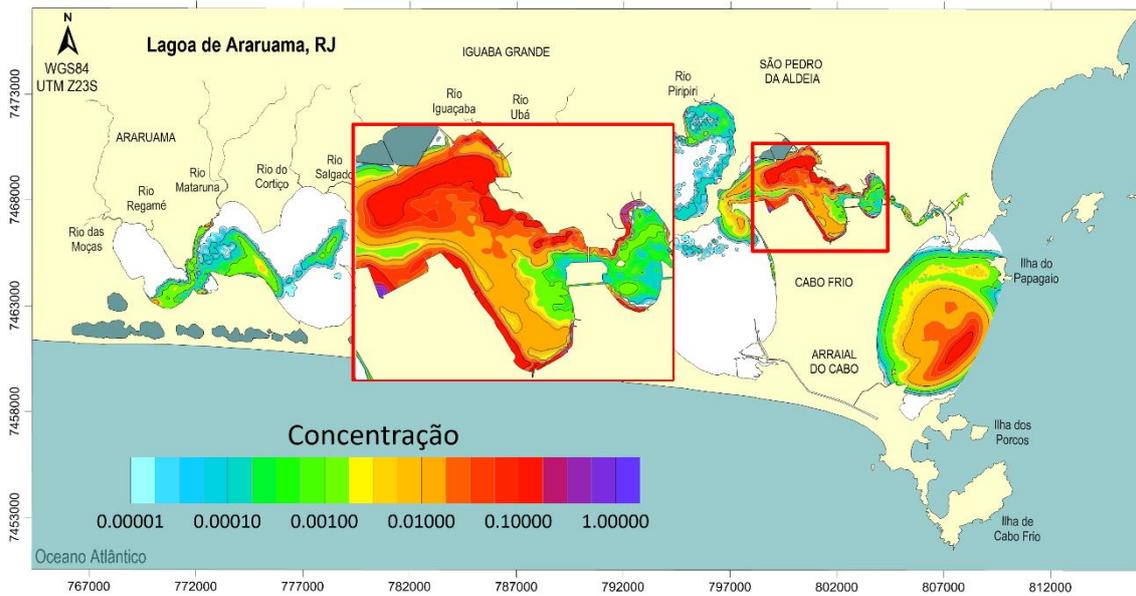
Figura 5.38: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir das ETEs durante o mês de inverno.

A Figura 5.39 mostra a concentração de microplásticos na água lançados a partir das fontes difusas no último instante da modelagem do mês de verão. A extremidade leste da lagoa e o canal não apresentam a formação de vórtices, permitindo que os microplásticos sejam transportados através dessas áreas e possam entrar ou sair da lagoa. A concentração de microplásticos é mais elevada na extremidade leste da lagoa, com um vórtice na região central da lagoa e um pequeno vórtice no litoral à frente da Prainha.

A Figura 5.40 mostra a concentração de microplásticos na água lançados a partir das fontes difusas no último instante da modelagem do mês de inverno. A extremidade leste da lagoa apresenta uma concentração elevada de microplásticos, assim como no verão. O vórtice na região litorânea está totalmente preenchido com microplásticos, apresentando concentrações de até  $10^{-1}$ .

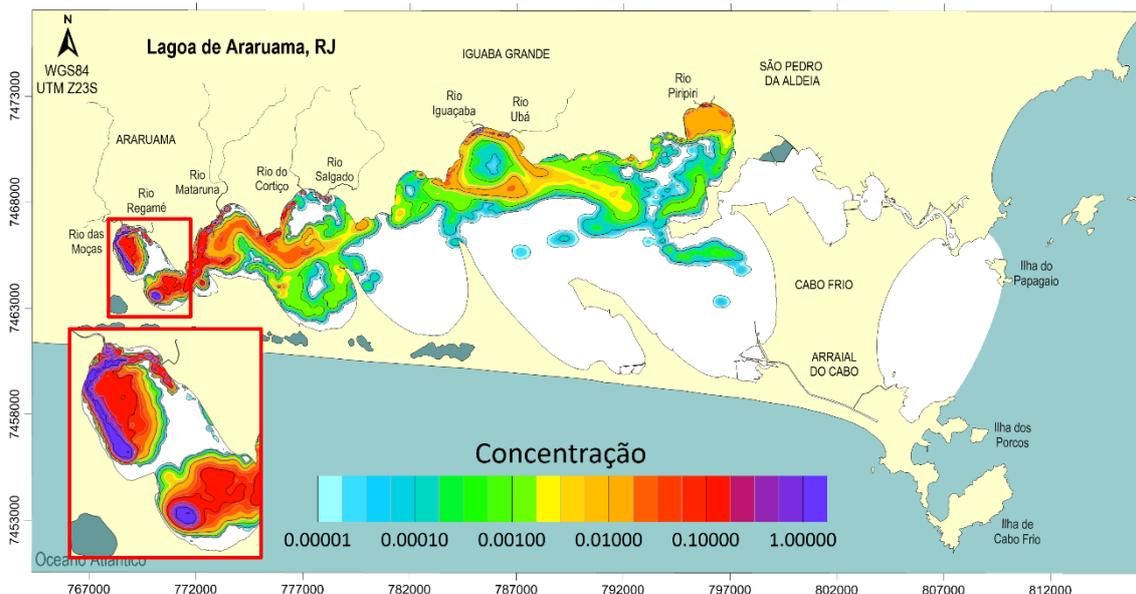


*Figura 5.39: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de verão.*

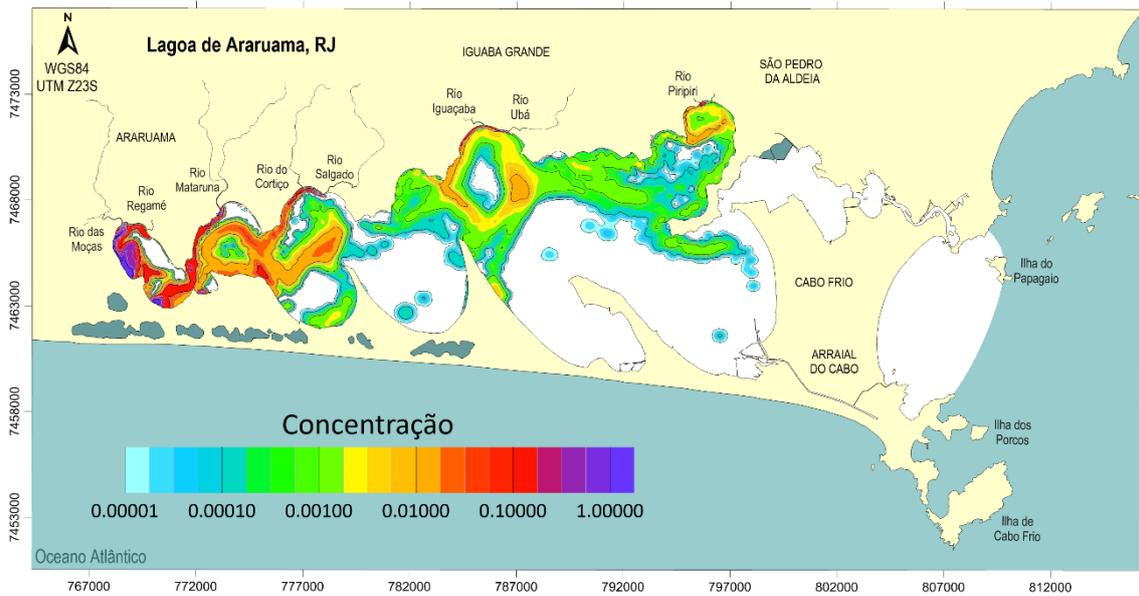


*Figura 5.40: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir das Fontes Difusas durante o mês de inverno.*

A Figura 5.41 mostra a concentração de microplásticos na água lançados a partir dos rios no último instante da modelagem do mês de verão. A Figura 5.42 apresenta a mesma informação para o mês de inverno. Os vórtices que recebem e aprisionam os microplásticos dos rios exibem concentrações consideráveis. Em ambos os períodos, os microplásticos tendem a permanecer na parte norte da lagoa, com a região final da lagoa em Araruama sendo completamente contaminada pelas partículas, contendo áreas de acúmulo.



*Figura 5.41: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir dos rios durante o mês de verão.*



*Figura 5.42: Concentração ao final do período de modelagem de microplásticos neutros lançados a partir dos rios durante o mês de inverno.*

Os resultados para microplásticos neutros não mostram pontos de acúmulo relevantes, mas revelam vórtices contaminados. A concentração de microplásticos varia de acordo com o tamanho dos vórtices, apresentando maior ou menor diluição.

#### **5.4 Sobre microplásticos densos e deposição no fundo**

Nas figuras a seguir, as manchas cinzas, representadas por losangos, indicam as áreas onde ocorreu sedimentação, independentemente da quantidade. As isolinhas quantificam a intensidade de deposição: as áreas em amarelo apresentam uma concentração de microplásticos aproximadamente 100 vezes maior do que as áreas em branco, enquanto as áreas em vermelho indicam até 5000 vezes mais depósito, e assim por diante.

A Figura 5.43 mostra as áreas de deposição de microplásticos lançados pelas ETEs durante o mês de verão. As áreas são relativamente pequenas e situam-se próximas às saídas das fontes. A Figura 5.44 ilustra as áreas de deposição para o mês de inverno. No inverno, as áreas de deposição tendem a ser maiores devido à maior incidência de ventos de sudoeste que transportam os microplásticos para o sul.

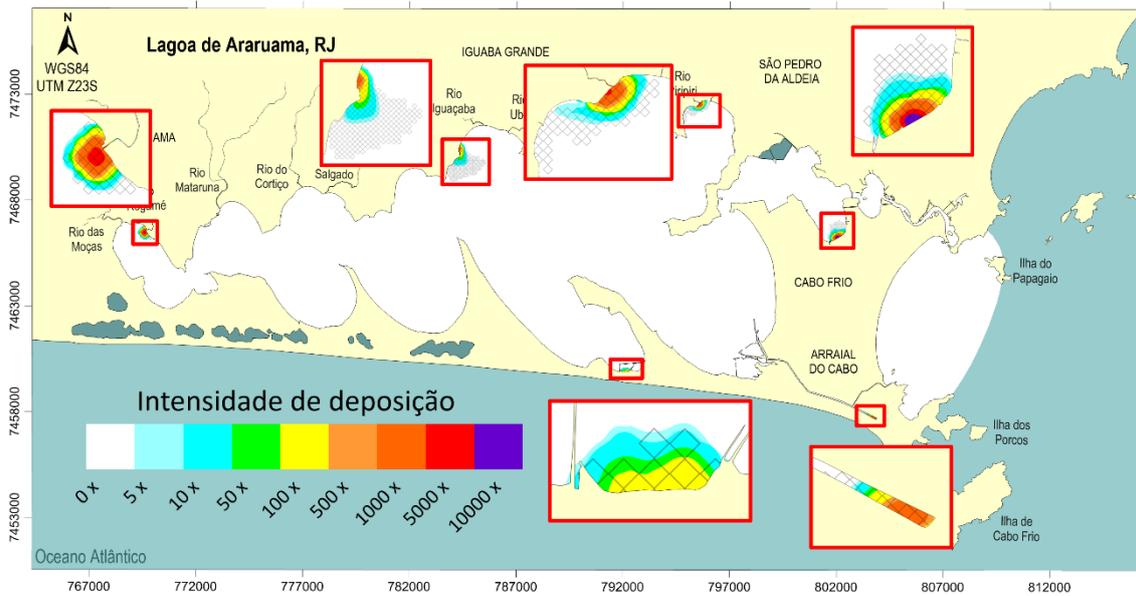


Figura 5.43: Sedimentação de microplásticos lançados a partir das ETEs ao final da modelagem de verão.

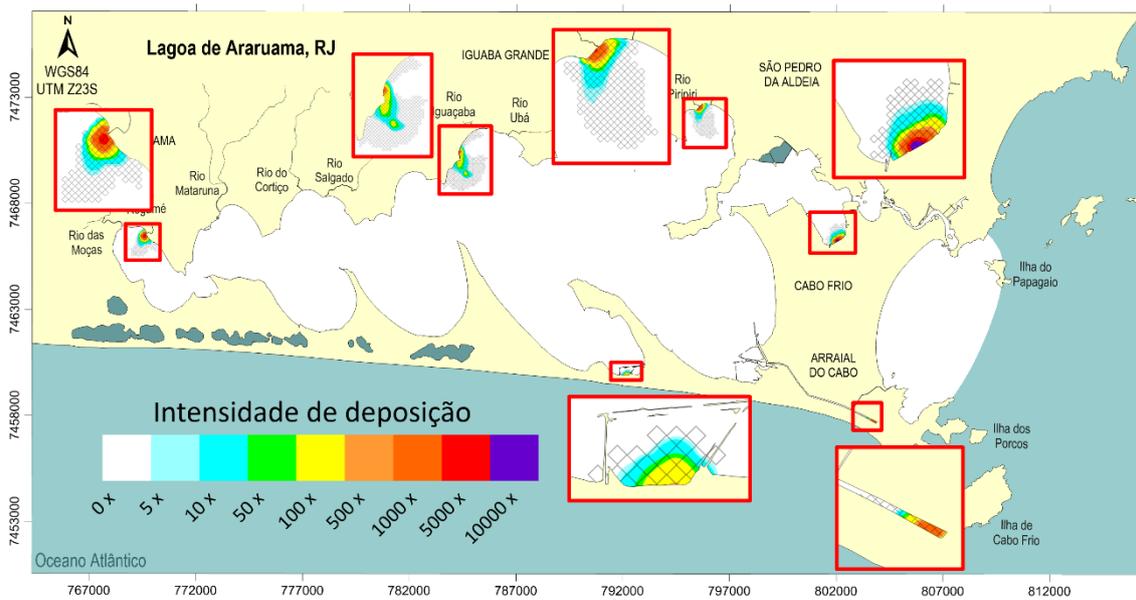


Figura 5.44: Sedimentação de microplásticos lançados a partir das ETEs ao final da modelagem de inverno.

A Figura 5.45 mostra as áreas de deposição de microplásticos lançados pelas fontes difusas durante o mês de verão, enquanto a Figura 5.46 ilustra o mês de inverno. O solo do canal e da extremidade leste da lagoa apresentam deposição de microplásticos. Essa região permite o maior transporte de partículas densas devido às maiores velocidades, causadas tanto pela ação dos ventos quanto pelas marés. Em ambos os meses analisados, há evidências de exportação de microplásticos para fora da lagoa.

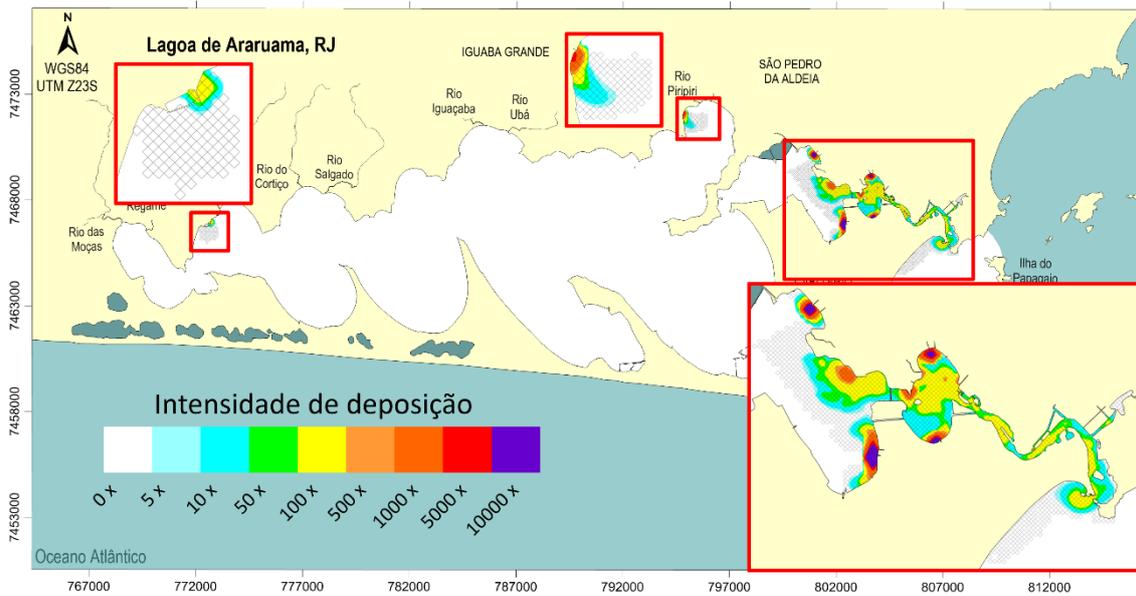


Figura 5.45: Sedimentação de microplásticos lançados a partir das Fontes Difusas ao final da modelagem de verão.

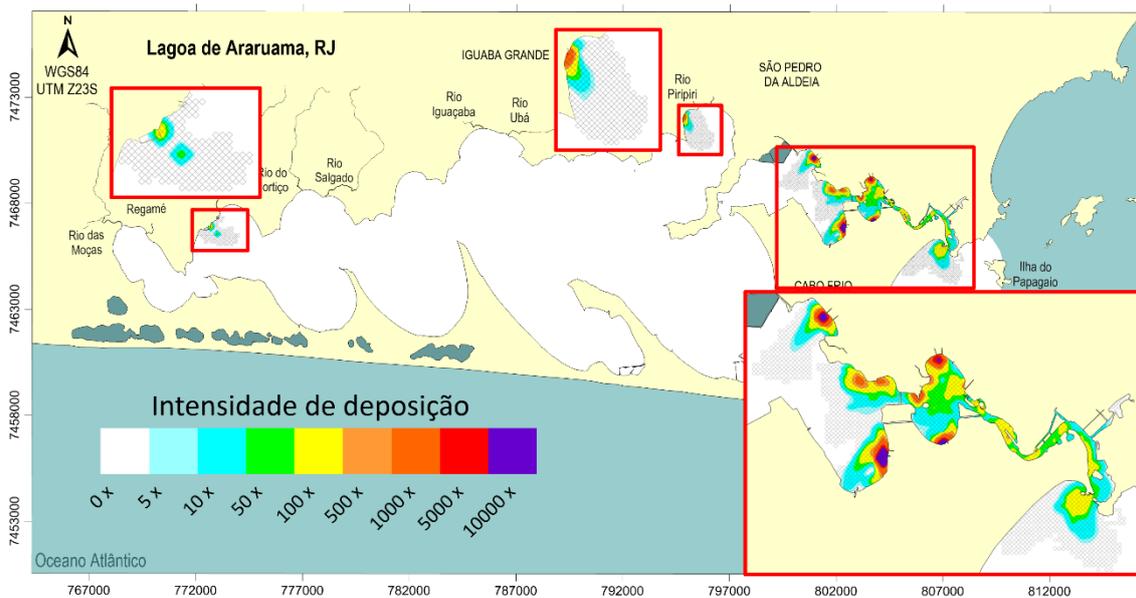


Figura 5.46: Sedimentação de microplásticos lançados a partir das Fontes Difusas ao final da modelagem de inverno.

A Figura 5.47 mostra as áreas de deposição de microplásticos lançados pelos rios durante o mês de verão. As áreas de deposição estão localizadas principalmente ao longo do litoral norte da lagoa, onde os rios desembocam. Os constantes ventos de nordeste transportam os microplásticos para o norte, resultando em seu aprisionamento na margem superior da lagoa.

A Figura 5.48 mostra as áreas de deposição de microplásticos lançados pelos rios durante o mês de inverno. Neste período, é possível observar uma maior extensão das áreas de deposição devido ao transporte dos microplásticos para o sul pelos ventos de sudoeste.

A situação comum na lagoa é a acumulação de microplásticos na margem norte durante a maior parte do tempo. Quando ocorrem ventos de sudoeste, há um transporte desses microplásticos para o sul. Portanto, os microplásticos densos raramente percorrem grandes distâncias e permanecem predominantemente na área norte da lagoa.

Os microplásticos densos são transportados pela tensão no fundo e, conforme mostrado na análise hidrodinâmica, as maiores ocorrências de tensões capazes de transportar esses microplásticos ocorrem na área do canal, que apresenta alta concentração de microplásticos, e na margem sul da lagoa, onde há pouca presença deles. Isso explica o baixo transporte de microplásticos densos, seu maior acúmulo na margem norte, além de seu espalhamento pelo solo do canal e sua saída da lagoa.

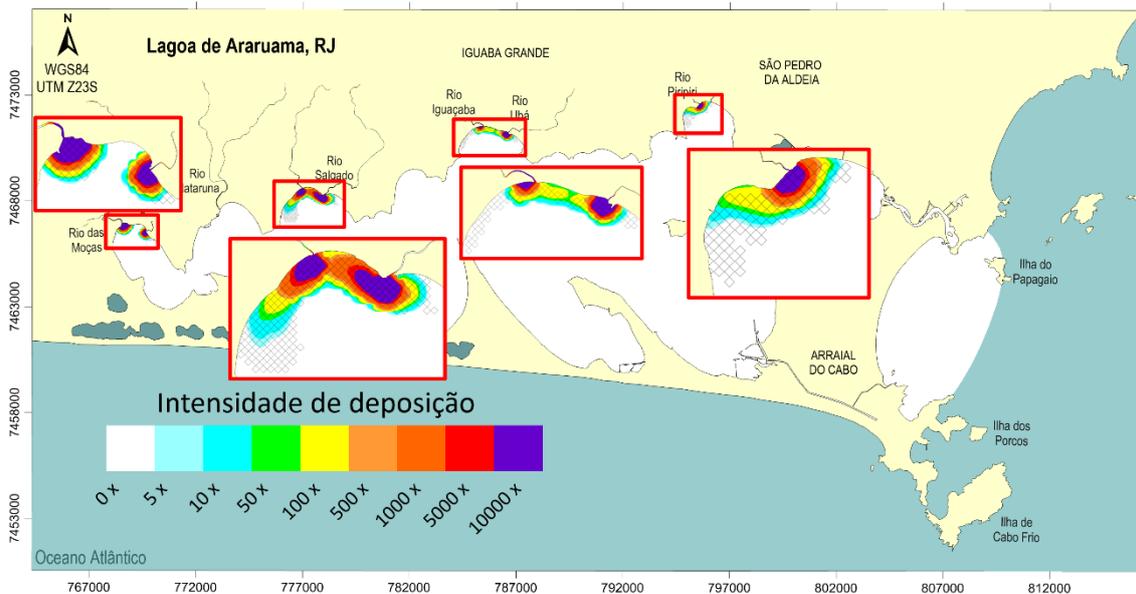


Figura 5.47: Sedimentação de microplásticos lançados a partir dos rios ao final da modelagem de verão.

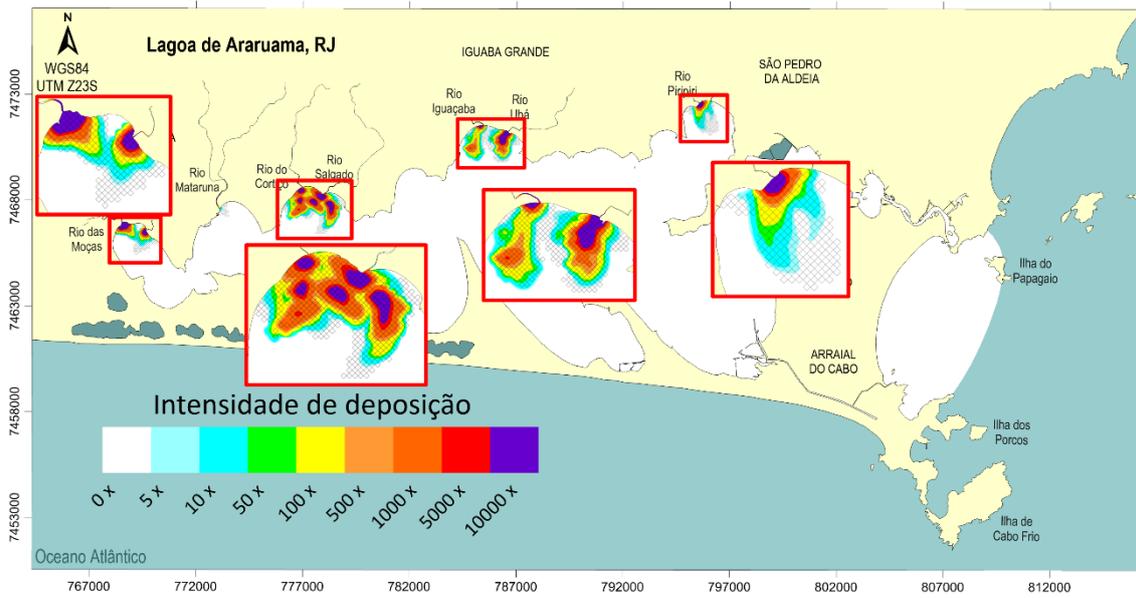


Figura 5.48: Sedimentação de microplásticos lançados a partir dos rios ao final da modelagem de inverno.

## 6 Conclusões

Neste capítulo, são apresentadas conclusões a partir das análises desenvolvidas com auxílio das modelagens de transporte lagrangeano dos microplásticos lançados na Lagoa de Araruama. O trabalho permitiu identificar o transporte de microplásticos na região, mapear as áreas mais afetadas, avaliar se a lagoa acumula ou exporta microplásticos para o mar, e compreender como cada tipo de microplásticos, leve, neutro e denso, afeta diferentes áreas da lagoa.

A separação das análises por tipo de fonte foi uma vantagem significativa, permitindo a avaliação da influência de cada uma de forma independente. Isso possibilitou a identificação da área de influência de cada fonte e a compreensão de como elas afetam diferentes regiões da lagoa.

A separação das análises do transporte de microplásticos com base na densidade relativa em relação à água permitiu avaliar o comportamento tipificado dos microplásticos leves, neutros e densos. Isso elucidou as diferenças entre eles e os tipos de risco que cada um representa.

As conclusões podem ser divididas em duas partes: as específicas da região da Lagoa de Araruama, que são inerentes e particulares a essa área, e as relativas aos microplásticos em si.

### 6.1 Conclusões relativas aos microplásticos

Os microplásticos leves, transportados pelas correntes superficiais e fortemente influenciados pelos ventos, tendem a seguir a direção nordeste-sudoeste, que é a direção principal dos ventos na região. Esses microplásticos se acumulam nas margens ao sul da lagoa. Durante o verão, o transporte é mais bem definido na direção nordeste-sudoeste, enquanto no inverno há uma maior variabilidade no transporte, v. seções 5.1.1 e 5.2.1.

Os microplásticos neutros, transportados pelas correntes médias na coluna d'água, tendem a ficar retidos nos giros que se formam nas enseadas da lagoa. Os microplásticos lançados no canal ou na extremidade leste da lagoa são transportadas para o litoral de Cabo Frio ou para o interior da lagoa, sendo aprisionadas pelos vórtices dessas regiões, v. seções 5.1.2 e 5.2.2.

Os microplásticos densos, transportados pelas correntes de fundo durante os processos de deposição e ressuspensão, tendem a se acumular perto de suas fontes,

principalmente na parte norte da lagoa, na extremidade leste e no canal de Itajuru. Eles são transportados em direção ao sul quando há ventos de sudoeste. No canal, o transporte dos microplásticos é mais constante, com movimentos de vai e vem devido à influência da maré, v. seções 5.2.3 e 5.4.

Os microplásticos leves representam uma ameaça maior para as praias ao redor da lagoa, especialmente na margem sul, e para o litoral na saída do canal. Transportados pelas correntes superficiais de maior velocidade, eles podem percorrer grandes distâncias e eventualmente atingir alguma praia, v. seção 5.3.1. Em questão de quatro dias, partindo da margem norte, já é possível que cheguem na margem sul.

Os microplásticos neutros tendem a afetar mais a água em si, pois ficam aprisionados nos grandes vórtices que se formam nas enseadas da lagoa devido a circulação gerada pelo vento, v. Figura 4.13. Eles não são transportados para outras regiões e se acumulam nos vórtices que os capturam, v. seção 5.3.2. Dessa forma, os microplásticos neutros parecem ser os mais danosos, pois ficam distribuídos na coluna d'água e afetam uma área maior do espelho d'água da lagoa.

Os microplásticos densos são os principais contaminantes do solo devido à sua tendência de afundar e como mostrado nas seções 5.2.3 e 5.4 tendem a depositar nas cercanias das fontes emissoras. A extremidade leste da lagoa, bem como as regiões ao norte e do canal, onde estão localizadas a maioria dos lançamentos de água e esgoto, são as mais afetadas.

## **6.2 Conclusões relativas às regiões da Lagoa de Araruama**

A extremidade oeste da lagoa, no município de Araruama, é uma região que tende a acumular partículas de microplásticos. Essa área recebe o lançamento da ETE Ponte dos Leites e dos rios das Moças, Regamé e Mataruna. Localizada no final da lagoa e distante do canal de Itajuru, a região enfrenta dificuldades na renovação de suas águas. Além disso, os ventos de leste/nordeste, predominantes na região, empurram e aprisionam os microplásticos ali. A área é contaminada pelos três tipos de microplásticos, conforme demonstrado ao longo das seções do capítulo 5.

A extremidade leste da lagoa, na saída do canal de Itajuru, bem como o próprio canal, também são áreas de acumulação de microplásticos. Localizadas na região mais urbanizada de Cabo Frio e São Pedro, essas áreas recebem o despejo da ETE Cabo Frio e das fontes difusas. O principal problema aqui são os microplásticos densos, enquanto

os microplásticos leves e neutros tendem a ser transportados para o interior da lagoa ou para o litoral de Cabo Frio, v capítulo 5.

A circulação hidrodinâmica presente na região define onde cada tipo de microplásticos tende a se acumular. A margem sul da lagoa, que é a menos povoada e urbanizada, recebe e tende a acumular os microplásticos leves. Os microplásticos neutros tendem a se distribuir pela coluna d'água, enquanto o solo da margem norte, da extremidade leste da lagoa e do canal de Itajuru acumula os microplásticos densos, v. capítulo 5.

A Lagoa de Araruama pode ser considerada um corpo d'água acumulador de microplásticos, com pouca exportação de partículas para o mar. Observa-se maior saída de microplásticos no inverno devido à variabilidade dos ventos. As fontes difusas são as maiores responsáveis pela contaminação das praias na saída do canal, enquanto os microplásticos lançados pelos rios parecem não sair da lagoa.

A Lagoa de Araruama é hipersalina devido à significativa evaporação que apresenta. Para compensar essa perda de água, é necessário que mais água entre pelo canal de maré do que saia. Outra forma de compreender esse fenômeno é por meio do balanço de sal: como a salinidade da lagoa é maior do que a do mar, para manter o equilíbrio do sistema, uma menor quantidade de água mais salgada sai, enquanto uma maior quantidade de água menos salgada entra. Com essa dinâmica, onde há maior entrada do que saída de água pelo canal de maré, a lagoa tende a acumular qualquer constituinte lançado em seu interior, tornando-se altamente vulnerável à poluição.

Os microplásticos que saem da lagoa tendem a ser empurrados para a orla de Cabo Frio, nas praias do Forte, das Dunas e do Foguete, devido ao efeito do vento de nordeste. A Prainha, em Arraial do Cabo, apesar de sua proximidade, não recebe um fluxo constante de microplásticos. Além disso, não foi constatada uma saída relevante de microplásticos pela fronteira aberta do modelo. Portanto, não se pode considerar que a lagoa representa uma ameaça significativa de contaminação por microplásticos às demais regiões turísticas próximas, como Arraial do Cabo e Armação dos Búzios.

### **6.3 Recomendações**

Pela bibliografia pesquisada este trabalho é pioneiro na análise do transporte de microplástico na Lagoa de Araruama. Dada a importância do tema recomenda-se continuidade em pesquisas a esse respeito para a qual seguem sugestões:

- Realizar a calibração do modelo utilizando também medições de correntes, aumentando a confiabilidade dos resultados.
- Avaliar a qualidade da calibração de forma quantitativa, para validar e refinar os parâmetros adotados.
- Incluir um período de aquecimento no modelo, de forma a evitar o início com uma condição inicial fria, garantindo maior realismo nos resultados.

A fim de complementar a análise realizada neste trabalho sobre o comportamento dos microplásticos na Lagoa de Araruama, sugere-se ainda:

- Realizar a quantificação da carga de microplásticos emitida pelas diferentes fontes, viabilizando análises quantitativas. Essas coletas poderiam identificar a proporção de microplásticos leves, neutros e densos, permitindo o cálculo preciso da quantidade de microplásticos lançados na lagoa em um determinado período.
- Desenvolver modelagens para investigar o transporte de microplásticos em cenários de eventos climáticos extremos, como chuvas intensas, e compará-los à situação padrão analisada neste trabalho, com o objetivo de identificar comportamentos anômalos.
- Comparar sistemas lagunares com diferentes salinidades para elucidar a influência dessa variável no acúmulo ou exportação de microplásticos. Isso ajudaria a confirmar se estuários hipersalinos tendem, de forma geral, a acumular microplásticos devido ao maior aporte de água pelo canal de maré.

Além dessas propostas diretamente relacionadas à engenharia costeira, outras avaliações poderiam ser realizadas para enriquecer o conhecimento sobre o tema:

- Analisar os impactos da presença de microplásticos sobre a biota local, identificando se as espécies da lagoa são mais ou menos sensíveis a essa forma de poluição.
- Identificar a quantidade limite de microplásticos que a lagoa pode receber sem que isso cause prejuízos à vida marinha e às atividades turísticas. Além disso, seria recomendável implementar um programa de monitoramento para garantir que esse limite não seja ultrapassado.

# Referências Bibliográficas

- [1] A. Ismanto, T. Hadibarata, R. A. Kristanti, D. N. Sugianto, S. Widada, W. Atmodjo, A. Satriadi, M. A. Anindita, A. M. Al-Mohaimed e A. M. Abbasi, “A novel report on the occurrence of microplastics in Pekalongan River Estuary, Java Island, Indonesia,” *Marine Pollution Bulletin*, 3 Outubro 2023.
- [2] H. S. Chau, S. Xu, Y. Ma, Q. Wang, Y. Cao, G. Huang, Y. Ruan, M. Yan, M. Liu, K. Zhang e P. K. Lam, “Microplastic occurrence and ecological risk assessment in the eight outlets of the Pearl River Estuary, a new insight into the riverine microplastic input to the northern South China Sea,” *Marine Pollution Bulletin*, 21 Fevereiro 2023.
- [3] S. Pourebrahimi e M. Pirooz, “Microplastic pollution in the marine environment: A review,” *Journal of Hazardous Materials Advances*, 30 Maio 2023.
- [4] C. Pothiraj, T. A. Gokul, K. R. Kumar, A. Ramasubramanian, A. Palanichamy, K. Venkatachalam, P. Pastorino, D. Barcelò, P. Balaji e C. Faggio, “Vulnerability of microplastics on marine environment: A review,” *Ecological Indicators*, 7 Outubro 2023.
- [5] M. M. Trusler, V. L. Moss-Hayes, S. Cook, B. H. Lomax e C. H. Vane, “Microplastics pollution in sediments of the Thames and Medway estuaries, UK: Organic matter associations and predominance of polyethylene,” *Marine Pollution Bulletin*, 14 Setembro 2024.
- [6] G. Li, Z. Chen, M. Bowen e G. Coco, “Transport and retention of sinking microplastics in a well-mixed estuary,” *Marine Pollution Bulletin*, 2 Maio 2024.
- [7] V. S. de Andrade, *ANÁLISE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL E DE QUALIDADE DE ÁGUA NA BAÍA DE GUANABARA VIA MODELAGEM COMPUTACIONAL*, Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
- [8] J. Johnson, N. Peer, Sershen e A. Rajkaran, “Microplastic abundance in urban vs. peri-urban mangroves: The feasibility of using invertebrates as biomonitors of microplastic pollution in two mangrove dominated estuaries of southern Africa,” *Marine Pollution Bulletin*, 19 Outubro 2023.

- [9] L. A. DA SILVA, *OCORRÊNCIA, DISTRIBUIÇÃO E COMPOSIÇÃO DE MICROPLÁSTICOS NAS PRAIAS DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO*, Gurupi, Tocantins: Universidade Federal do Tocantins, 2023.
- [10] L. F. Corrêa, *Ocorrência e distribuição de microplásticos nos sedimentos de fundo, margens e nas águas superficiais do sistema lagunar Maricá-Guarapina (RJ)*, São Gonçalo, Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2022.
- [11] D. G. de Carvalho, *AVALIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DE MICROPLÁSTICOS EM PRAIAS DO LESTE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, BRASIL*, Niterói, Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2022.
- [12] M. A. F. VICENTE, *CARACTERIZAÇÃO DA PRESENÇA E DISTRIBUIÇÃO DE MICROPLÁSTICOS EM PRAIAS DO LITORAL LESTE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO*, Niterói, Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2018.
- [13] G. V. Buraschi, *CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA E TRANSPORTE DE RESÍDUOS NA BAÍA DE GUANABARA: O CASO DA ENSEADA DO FUNDÃO-RJ*, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2024.
- [14] R. Marinho, “Mais salgada que o mar e 100 vezes maior que a Rodrigo de Freitas: conheça a Lagoa de Araruama – que não é lagoa,” g1, 26 Junho 2022. [Online]. Available: <https://g1.globo.com/rj/regiao-dos-lagos/noticia/2022/06/26/mais-salgada-que-o-mar-e-100-vezes-maior-que-a-rodrigo-de-freitas-conheca-a-lagoa-de-araruama-que-nao-e-lagoa.ghtml>. [Acesso em 20 Dezembro 2024].
- [15] M. F. Souza, B. Kjerfve, B. Knoppers, W. F. L. d. Souza e R. N. Damasceno, “Nutrient budgets and trophic state in a hypersaline coastal lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil,” *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 57, pp. 843-858, Julho 2003.
- [16] A. C. B. Cunha, *Uma Análise do Sistema Lagunar de Araruama - RJ, com Enfoque Hidrodinâmico*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

- [17] M. L. da Silva, R. O. Castro, A. S. Sales e F. V. de Araújo, “Marine debris on beaches of Arraial do Cabo, RJ, Brazil: An important coastal tourist destination,” *Marine Pollution Bulletin*, pp. 153-158, Maio 2018.
- [18] IBGE, “Panorama de Araruama,” [Online]. Available: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/araruama/panorama>. [Acesso em 15 Fevereiro 2024].
- [19] IBGE, “Panorama de Iguaba Grande,” [Online]. Available: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/iguaba-grande/panorama>. [Acesso em 16 Janeiro 2024].
- [20] IBGE, “Panorama de São Pedro da Aldeia,” [Online]. Available: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/sao-pedro-da-aldeia/panorama>. [Acesso em 16 Janeiro 2024].
- [21] IBGE, “Panorama de Cabo Frio,” [Online]. Available: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/cabo-frio/panorama>. [Acesso em 16 Janeiro 2024].
- [22] IBGE, “Panorama de Arraial do Cabo,” [Online]. Available: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/arraial-do-cabo/panorama>. [Acesso em 16 Janeiro 2024].
- [23] IBGE, “Panorama do Rio de Janeiro,” [Online]. Available: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/rio-de-janeiro/panorama>. [Acesso em 16 Janeiro 2024].
- [24] J. L. d. Souza, “O que é? IDH,” [Online]. Available: [https://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?id=2144:catid=28&option=com\\_content](https://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?id=2144:catid=28&option=com_content). [Acesso em 24 Janeiro 2024].
- [25] F. M. Lins-de-Barros, “Integrated coastal vulnerability assessment: A methodology for coastal cities management integrating socioeconomic, physical and environmental dimensions - Case study of Região dos Lagos, Rio de Janeiro, Brazil,” *Ocean & Coastal Management*, pp. 1-11, Novembro 2017.
- [26] IBGE, “Panorama Censo 2022,” [Online]. Available: [https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/?utm\\_source=ibge&utm\\_medium=home&utm\\_campaign=portal](https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/?utm_source=ibge&utm_medium=home&utm_campaign=portal). [Acesso em 2024].

- [27] Condetur, “Conselho de Turismo da Região Costa do Sol,” [Online]. Available: [\url{https://costadosol.rio.br/site/index.php}](https://costadosol.rio.br/site/index.php). [Acesso em 29 Janeiro 2024].
- [28] M. d. C. Vicente, *Avaliação da distribuição espaço-temporal da qualidade da água de um corpo hídrico hipersalino – Laguna de Araruama - RJ*, Niterói, Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2018.
- [29] A. C. B. de Carvalho, M. V. Carvalho, C. L. Trevisan, P. C. C. Rosman e J. C. Wasserman, “Modeling a hypersaline lagoon to evaluate salinity changes due to morphology of an ocean connection,” *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2024.
- [30] W. C. Couto, *ANÁLISE QUALI-QUANTITATIVA DE RESÍDUOS SÓLIDOS E REJEITOS NO LITORAL DE CABO FRIO, RIO DE JANEIRO, BRASIL*, Arraial do Cabo: Instituto Federal Fluminense, 2019.
- [31] A. Snigirova, R. Mihas, S. Khutornoi, A. Vinogradov, Y. Gazyetov, J. Gascooke, S. Snigirov e S. Leterme, “Microplastic and ichthyoplankton in the Ukrainian waters of the Black Sea,” *Regional Studies in Marine Science*, 19 Outubro 2024.
- [32] A. A. Babaei, N. Reshadatian e R. Feizi, “A state of the art-mini review on the sources, contamination, analysis, and consequences of microplastics in water,” *Results in Engineering*, 3 Setembro 2024.
- [33] A. Ashrafy, A. A. Liza, M. N. Islam, M. M. Billah, S. T. Arafat, M. M. Rahman e S. M. Rahman, “Microplastics Pollution: A Brief Review of Its Source and Abundance in Different Aquatic Ecosystems,” *Journal of Hazardous Materials Advances*, 2023.
- [34] F. Mendrik, C. R. Hackney, V. M. Cumming, C. Waller, D. Hak, R. Dorrell, N. N. Hung e D. R. Parsons, “The transport and vertical distribution of microplastics in the Mekong River, SE Asia,” *Journal of Hazardous Materials*, 3 Dezembro 2024.
- [35] M. Cole, P. Lindeque, C. Halsband e T. S. Galloway, “Microplastics as contaminants in the marine environment: A review,” *Marine Pollution Bulletin*, pp. 2588-2597, Agosto 2011.
- [36] H. Zhang, “Transport of microplastics in coastal seas,” *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, pp. 74-86, Dezembro 2017.

- [37] J. Frias e R. Nash, “Microplastics: Finding a consensus on the definition,” *Marine Pollution Bulletin*, pp. 145-147, Janeiro 2019.
- [38] S. L. Wright, R. C. Thompson e T. S. Galloway, “The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review,” *Environmental Pollution*, pp. 483-492, Julho 2013.
- [39] S. E. Nelms, T. S. Galloway, B. J. Godley, D. S. Jarvis e P. K. Lindeque, “Investigating microplastic trophic transfer in marine top predators,” *Environmental Pollution*, pp. 999-1007, Julho 2018.
- [40] L. C. de Sá, M. Oliveira, F. Ribeiro, T. L. Rocha e M. N. Futter, “Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future?,” *Science of the Total Environment*, pp. 1029-1039, Dezembro 2018.
- [41] J. G. Derraik, “The pollution of the marine environment by plastic debris: a review,” *Marine Pollution Bulletin*, pp. 842-852, Outubro 2002.
- [42] J. Daily e M. J. Hoffman, “Modeling the three-dimensional transport and distribution of multiple microplastic polymer types in Lake Erie,” *Marine Pollution Bulletin*, 18 Março 2020.
- [43] S. S. Ali, T. Elsamahy, R. Al-Tohamy e J. Sun, “A critical review of microplastics in aquatic ecosystems: Degradation mechanisms and removing strategies,” *Environmental Science and Ecotechnology*, 2024.
- [44] N. Casagrande, F. Verones, P. Sobral e G. Martinho, “Physical properties of microplastics affecting the aquatic biota: A review,” *Environmental Advances*, 6 Julho 2024.
- [45] E. Moto, M. Hossein, R. Bakari, A. S. Mateso, J. R. Selemeni, S. Nkrumah, A. Ripanda, M. J. Rwiza, E. C. Nyanza e R. L. Machunda, “Ecological consequences of microplastic pollution in sub-Saharan Africa aquatic ecosystems: An implication to environmental health,” *HydroResearch*, pp. 39-54, 2024.
- [46] M. A. Kawsar, F. J. Munny, U. M. Saif, A. Harun-Al-Rashid, M. A. Rahman, S. K. Barman, D. Adikari, M. T. Alam, M. Kunda e D. Pandit, “Unveiling the microplastic crisis: Insights into Bangladesh’s aquatic ecosystems - origins,

- impact, and solutions,” *Journal of Hazardous Materials Advances*, 28 Abril 2024.
- [47] L. Sun, Z. Cheng, M. Wang, C. Wei, H. Liu e Y. Yang, “A multi-levels analysis to evaluate the toxicity of microplastics on aquatic insects: A case study with damselfly larvae (*Ischnura elegans*),” *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 30 Novembro 2024.
- [48] A. Pilechi, A. Mohammadian e E. Murphy, “A numerical framework for modeling fate and transport of microplastics in inland and coastal waters,” *Marine Pollution Bulletin*, 22 Setembro 2022.
- [49] B. E. Larsen, M. A. A. Al-Obaidi, H. G. Guler, S. Carstensen, K. D. Goral, E. D. Christensen, N. B. Kerpen, T. Schlurmann e D. R. Fuhrman, “Experimental investigation on the nearshore transport of buoyant microplastic particles,” *Marine Pollution Bulletin*, Fevereiro 2023.
- [50] H. G. Guler, B. E. Larsen, O. Quintana, K. D. Goral, S. Carstensen, E. D. Christensen, N. B. Kerpen, T. Schlurmann e D. R. Fuhrman, “Experimental study of non-buoyant microplastic transport beneath breaking irregular waves on a live sediment bed,” *Marine Pollution Bulletin*, Agosto 2022.
- [51] P. C. C. Rosman, J. D. Caprace e G. M. Ribeiro, “Modelagem Hidrodinâmica Ambiental do Transporte de Microplástico no Entorno do Monumento Nacional das Ilhas Cagarras, RJ,” Coppetec, Rio de Janeiro, 2023.
- [52] J. Boucher e D. Friot, “Primary Microplastics in the Oceans: A Global Evaluation of Sources,” 2017.
- [53] S. SA, “Density of Plastics: Technical Properties,” [Online]. Available: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-property/density>. [Acesso em 20 Agosto 2024].
- [54] “Referência Técnica do SisBaHiA,” [Online]. Available: <https://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>. [Acesso em 28 Fevereiro 2024].
- [55] P. C. C. Rosman, “Subsídios para Modelagem de Sistemas Estuarinos,” em *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*, Rio de Janeiro, ABRH, 1997.
- [56] P. C. C. Rosman, A. C. Fernandes e A. Uller, “Estudos de Hidrodinâmica Ambiental para Suporte e Planejamento de Intervenções na Lagoa de Araruama - RJ, em Prazos Curto e Médio,” Coppetec, Rio de Janeiro, 2020.

- [57] R. A. H. W. Braga, E. B. Santos e M. F. de Barros, “VALIDAÇÃO DE DADOS DE VENTO DA REANÁLISE ERA5-LAND PARA ESTIMATIVA DE POTENCIAL EÓLICO NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO,” *Revista Brasileira de Energia*, pp. 142-166, 2021.
- [58] F. Yuan, C. Dai, Y. Ying, D. Wang, X. Yang, J. Du e W. Yu, “Prediction of the settlement of submillimeter microplastic fibers in still water,” *Environmental Technology & Innovation*, 9 Dezembro 2024.
- [59] M. C. T. Martins, “AVALIAÇÃO DA PRESENÇA DE MICROPLÁSTICOS EM EFLUENTE GERADO POR ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO (ETE),” Rio de Janeiro, 2017.
- [60] A. A. C. Rosman, *DERIVA DE MICROPLÁSTICOS ORIUNDOS DOS EMISSÁRIOS DE IPANEMA E ICARAÍ NA BAÍA DE GUANABARA E ZONA COSTEIRA ADJACENTE*, Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2019.
- [61] R. Almeida, D. Lauria, A. Ferreira e O. Sracek, “Groundwater radon, radium and uranium concentrations in Região dos Lagos, Rio de Janeiro State, Brazil,” *Journal of Environmental Radioactivity*, pp. 323-334, Janeiro 2004.
- [62] S. A. Kalil, *CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DE POLUIÇÃO POR MICROPLÁSTICOS EM AREIAS DE AMBIENTES COSTEIROS DE SAQUAREMA, RJ*, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2024.