



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto Politécnico

Luana Ximenes Figueira

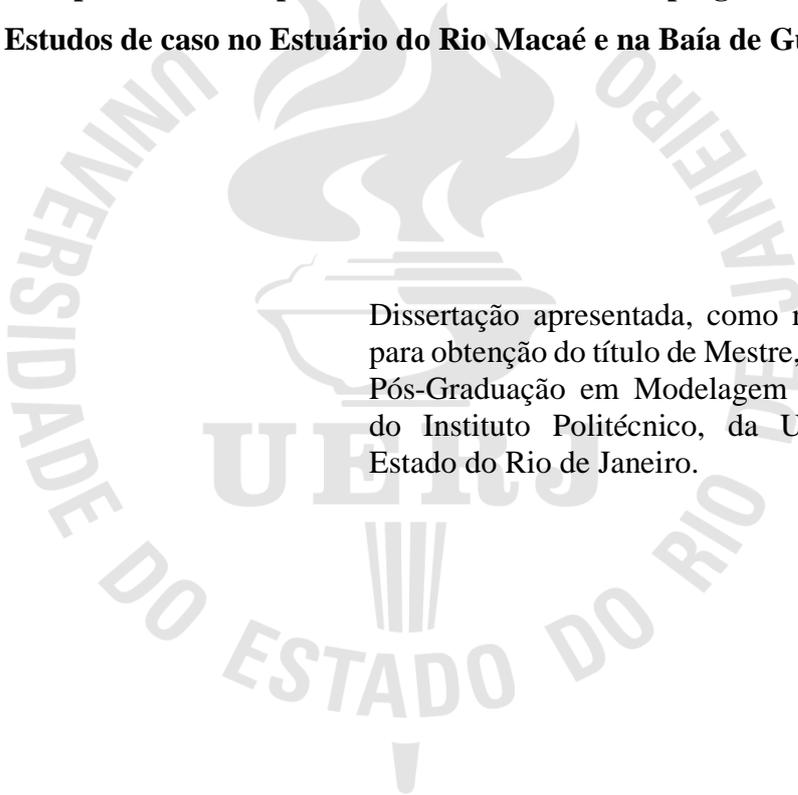
**Simulação do transporte de microplástico em zona costeira empregando a  
Plataforma MOHID:  
Estudos de caso no Estuário do Rio Macaé e na Baía de Guanabara**

Nova Friburgo

2022

Luana Ximenes Figueira

**Simulação do transporte de microplástico em zona costeira empregando a Plataforma  
MOHID: Estudos de caso no Estuário do Rio Macaé e na Baía de Guanabara**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador (es): Prof. Dr. Antônio José da Silva Neto  
Prof. Dr. Jader Lugon Junior

Nova Friburgo

2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/E

F475 Figueira, Luana Ximenes

Simulação do transporte de microplástico em zona costeira empregando a Plataforma MOHID: estudos de caso no Estuário do Rio Macaé e na Baía de Guanabara / Luana Ximenes Figueira. - 2022.

85 f. : il.

Orientador: Antônio José da Silva Neto

Orientador: Jader Lugon Junior

Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) –  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto  
Politécnico.

1. Simulação (Computadores) – Teses. 2. Hidrodinâmica –  
Teses. 3. Refugio de plástico – Teses. I. Silva Neto, Antônio José  
da. II. Lugon Junior, Jader III. Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro. Instituto Politécnico. IV. Título.

519.6

Bibliotecária: Pâmela Lisboa Flegr

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação.

---

Assinatura

---

Data

Luana Ximenes Figueira

**Simulação do transporte de microplástico em zona costeira empregando a Plataforma  
MOHID: Estudos de caso no Estuário do Rio Macaé e na Baía de Guanabara**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 15 de fevereiro de 2022.

Banca examinadora:

ANTONIO JOSE DA SILVA Assinado de forma digital por ANTONIO  
JOSE DA SILVA NETO:64147819753  
NETO:64147819753 Dados: 2022.03.03 11:11:43 -03'00'

Prof. Antônio José da Silva Neto, Ph.D. - Orientador  
Instituto Politécnico - UERJ

Jader Lugon Assinado de forma digital por Jader  
Lugon Junior:87142139749  
Junior:87142139749 Dados: 2022.02.21 15:43:10 -03'00'

Prof. Jader Lugon Junior, D.Sc. - Orientador  
Instituto Federal Fluminense



Assinado por: Ramiro Joaquim  
de Jesus Neves  
Identificação: B104070819  
Data: 2022-02-18 às 12:05:45  
Local: Macaé  
Motivo: Tese Luana Ximenes

Prof. Ramiro Joaquim de Jesus Neves, Ph.D.  
Universidade de Lisboa - Portugal

Manildo Marciao de Assinado de forma digital por Manildo  
Marciao de Oliveira:01073878759  
Oliveira:01073878759 Dados: 2022.02.25 11:04:19 -03'00'

Prof. Manildo Marcião de Oliveira, D.Sc.  
Instituto Federal Fluminense

Alexandre Macedo Fernandes  
07382354741



Documento assinado digitalmente  
ALEXANDRE MACEDO FERNANDES  
Data: 03/03/2022 09:46:02-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Alexandre Macedo Fernandes, Ph.D.  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Pedro Paulo Gomes Watts Rodrigues, Ph.D.  
Instituto Politécnico - UERJ

Nova Friburgo

2022

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais e familiares por todo incentivo e apoio incondicional, e a Deus por me dar força e saúde durante essa trajetória.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus, por ter me dado saúde e forças, guiando a minha caminhada para superar mais uma etapa importante.

Aos meus pais, por terem me incentivado a cada dia.

Aos meus orientadores, Antônio José da Silva Neto e Jader Lugon Junior, pelos ensinamentos, dedicação, atenção e acompanhamento durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos e funcionários do IPRJ, com quem eu sempre pude contar e por terem me proporcionado um ambiente agradável durante o mestrado, em especial a Marselle Verly de Lemos que sempre esteve disposta a ajudar no que fosse necessário.

À agência de fomento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelos recursos financeiros concedidos em formato de bolsa de estudos, durante parte do mestrado.

Todas as vitórias ocultam uma abdicação.

*Simone de Beauvoir*

## RESUMO

FIGUEIRA, Luana Ximenes. **Simulação do transporte de microplástico em zona costeira empregando a Plataforma MOHID**: Estudos de caso no Estuário do Rio Macaé e na Baía de Guanabara. 2022. 85 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Instituto Politécnico, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2022.

A contaminação de microplásticos no meio ambiente tem recebido atenção de pesquisadores, cientistas e ambientalistas. Atualmente existem poucos modelos que simulam a trajetória de detritos plásticos. Esses modelos são usados com o intuito de prever os acessos e as modificações de substâncias flutuantes no oceano ou na atmosfera, sendo alimentados através de parâmetros que são escolhidos de acordo com a localidade trabalhada. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi aplicar o modelo hidrodinâmico, MOHID, com seu módulo Lagrangeano para a simulação do transporte de microplásticos nas regiões do Estuário do Rio Macaé e na região da Baía de Guanabara. A plataforma utilizada na pesquisa tem sido adotada em vários países, para simular processos que ocorrem em estuários, mares e oceanos, partindo de dados experimentais reais obtidos no campo para a calibração dos modelos. Concluiu-se que o módulo de rastreamento de partículas se mostrou uma ferramenta significativa para o estudo da circulação de microplásticos no estuário do rio Macaé e na Baía de Guanabara. Os resultados se mostraram satisfatórios, uma vez que todo o lixo plástico acumulado em ambas regiões estuarinas tiveram maior concentração dentro das baías, com um menor avanço para o mar aberto, justificando o porquê da Baía de Guanabara ter o nível de concentração de microplásticos elevado. Por fim, sugerem-se outras simulações levando em consideração outros fatores, como as forçantes meteorológicas da região de estudo.

Palavras-chave: Modelagem. Hidrodinâmica. Lagrangeano. Transporte. Microplástico. MOHID Water. Estuário do rio Macaé. Baía de Guanabara.

## ABSTRACT

FIGUEIRA, Luana Ximenes. *Simulation of the transportation of microplastics on coastal zones applying the MOHID Platform: Case studies in Macaé River estuary and in Guanabara Bay*. 2022. 85 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Instituto Politécnico, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2022.

A microplastic environment contaminate has received attention from researchers, and environmentalists. Currently, there are few models that simulate the trajectory of plastic debris. These models are used in order to predict the accesses and how they work according to the atmosphere. In this context, the objective of this work was to apply the hydrodynamic model, MOHID, with its Lagrangian module for a simulation of microplastics transport in the Macaé River Estuary and in the Guanabara Bay region. The platform used in the research has been elaborated in several processes that occur in estuaries, seas and oceans obtained, starting from field data for an adjustment of real models. It was concluded that the particle tracking module proved to be a significant tool for the study of the circulation of microplastics in the Macaé River and Guanabara Bay. The results extend to a lower level, since in both proportions they were more plastic, with the advance towards the sea, justifying the reason for the elevated Guanabara Bay. Finally, other simulations are published taking into account other factors, such as meteorological forces in the study region.

Keywords: Modeling. Hydrodynamics. Lagrangian. Transport. Microplastic. MOHID water. Estuary of the Macaé River. Guanabara's Bay.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Microplásticos encontrados na natureza.....	14
Figura 2 -	Descarga de plásticos nos oceanos.....	16
Figura 3 -	Método da revisão sistemática de literatura desta pesquisa.....	19
Figura 4 -	Fluxo adaptado (PRISMA) para o processo de pesquisa.....	22
Figura 5 -	Número de publicações nas bases internacionais por ano.....	25
Figura 6 -	Número de trabalhos classificados de acordo com a área modelada.....	26
Figura 7 -	Mapa de Macaé e seu principal rio.....	28
Figura 8 -	Mapa da disponibilidade hidrográfica no estuário do rio Macaé.....	29
Figura 9 -	Hidrograma das vazões observadas (linha preta) e calculadas (linha vermelha tracejada) no rio Macaé, na altura da UTE Norte Fluminense.....	29
Figura 10 -	Rios que deságuam na Baía de Guanabara.....	31
Figura 11 -	Porcentagem de vazão dos principais cursos d'água da Baía de Guanabara.....	32
Figura 12 -	Domínio Sigma com uma camada.....	35
Figura 13 -	Batimetria, forçantes da maré e as descargas dos rios utilizadas nas simulações dentro do estuário do rio Macaé.....	40
Figura 14 -	Cenários de descarga de microplásticos em Macaé.....	41
Figura 15 -	Batimetria, forçantes da maré e as descargas dos rios utilizadas nas simulações dentro da Baía de Guanabara.....	42
Figura 16 -	Cenários de descarga de microplásticos na Baía de Guanabara.....	43
Figura 17 -	Localização do marégrafo no Terminal Marítimo de Imbetiba, Macaé.....	45
Figura 18 -	Localização do marégrafo no Porto do Rio De Janeiro - Ilha Fiscal, Baía de Guanabara.....	47
Figura 19 -	Resultado do terceiro dia de simulação da hidrodinâmica no domínio do estuário do rio Macaé.....	49
Figura 20 -	Resultado do terceiro dia de simulação da hidrodinâmica dentro do estuário do rio Macaé na época de estiagem e de cheia.....	51
Figura 21 -	Resultado do décimo sexto dia de simulação da hidrodinâmica no Estuário do rio Macaé na época de estiagem e de cheia, (a) horário: 03h e 15h e (b) 09h e 21h.....	53
Figura 22 -	Resultados do Cenário 1 com a vazão de 6 m <sup>3</sup> /s dentro do Estuário do Rio Macaé.....	56
Figura 23 -	Resultados do Cenário 1 com a vazão de 300 m <sup>3</sup> /s dentro do Estuário do Rio Macaé.....	57
Figura 24 -	Comparação do Cenário 1 com a vazão de 6 m <sup>3</sup> /s e de 300 m <sup>3</sup> /s dentro do Estuário do rio Macaé.....	58
Figura 25 -	Resultados do Cenário 2 com a vazão de 6 m <sup>3</sup> /s dentro do Estuário do Rio Macaé.....	59
Figura 26 -	Resultados do Cenário 2 com a vazão de 300 m <sup>3</sup> /s dentro do Estuário do Rio Macaé.....	60

Figura 27 - Comparação do Cenário 2 com a vazão de 6 m <sup>3</sup> /s e de 300 m <sup>3</sup> /s dentro do Estuário do rio Macaé.....	61
Figura 28 - Resultados do Cenário 3 com a vazão de 6 m <sup>3</sup> /s dentro do Estuário do Rio Macaé.....	62
Figura 29 - Resultados do Cenário 3 com a vazão de 300 m <sup>3</sup> /s dentro do Estuário do Rio Macaé.....	64
Figura 30 - Comparação do Cenário 3 com a vazão de 6 m <sup>3</sup> /s e de 300 m <sup>3</sup> /s dentro do Estuário do rio Macaé.....	65
Figura 31 - Resultados do Cenário 4 com a vazão de 6 m <sup>3</sup> /s dentro do Estuário do Rio Macaé.....	66
Figura 32 - Resultados do Cenário 4 com a vazão de 300 m <sup>3</sup> /s dentro do Estuário do Rio Macaé.....	67
Figura 33 - Comparação do Cenário 4 com a vazão de 6 m <sup>3</sup> /s e de 300 m <sup>3</sup> /s dentro do Estuário do rio Macaé.....	68
Figura 34 - Hidrodinâmica do registro das altas velocidades na entrada da Baía de Guanabara.....	70
Figura 35 - Resultados do Ponto A dentro da Baía de Guanabara.....	75
Figura 36 - Resultados do Ponto B dentro da Baía de Guanabara.....	76
Figura 37 - Resultados do Ponto C dentro da Baía de Guanabara.....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Strings de buscas utilizadas nas bases internacionais e no catálogo de teses e dissertações da CAPES .....	21
Tabela 2 - Tipo de microplástico, modelo e localidade de cada artigo.....	26
Tabela 3 - Fluxo mensal médio de alguns rios fluindo para a Baía de Guanabara.....	31
Tabela 4 - Principais módulos do MOHID.....	34
Tabela 5 - Casos de vazões que foram utilizadas na implementação do modelo.....	41
Tabela 6 - Comparação da altura da maré simulada com os valores do marégrafo do estuário do rio Macaé.....	45
Tabela 7 - Comparação da altura da maré simulada com os valores do marégrafo.....	46
Tabela 8 - Registros de altas velocidades na entrada da Baía de Guanabara.....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
D-WAQ PART	Particle-Tracking
FES	Finite Element Solution
FV	TUFLOW Finite Volume
HDPE	Polietileno de Alta Densidade
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
LDPE	Polietileno de Baixa Densidade
LLDPE	Polietileno Linear de Baixa Densidade
MARETEC	Marine and Environmental Technology Research Center
MOHID	Modelo Hidrodinâmico
PA	Poliamida
PE	Polietileno
PET	Polietileno Tereftalato
PP	Polipropileno
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
PS	Poliestireno
UTE	Usina Termelétrica

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
1	<b>REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA</b> .....	19
1.1	<b>Questões de pesquisa</b> .....	19
1.2	<b>Estratégia de pesquisa</b> .....	19
1.3	<b>Seleção de artigos</b> .....	21
1.4	<b>Síntese dos resultados da revisão sistemática</b> .....	22
1.5	<b>Classificação dos resultados da revisão sistemática</b> .....	25
2	<b>ÁREAS PARA ESTUDO DE CASO</b> .....	28
2.1	<b>Estuário do Rio Macaé</b> .....	28
2.2	<b>Baía de Guanabara</b> .....	30
3	<b>METODOLOGIA</b> .....	33
3.1	<b>MOHID</b> .....	33
3.1.1	<u>Model Module</u> .....	35
3.1.2	<u>Geometry Module</u> .....	35
3.1.3	<u>Hydrodynamic Module</u> .....	36
3.1.4	<u>Lagrangian Module</u> .....	37
3.1.5	<u>Discharges Module</u> .....	38
3.1.6	<u>Tide Module</u> .....	38
3.2	<b>Configuração do Modelo</b> .....	39
3.2.1	<u>Modelagem do Estuário do Rio Macaé</u> .....	39
3.2.2	<u>Modelagem da Baía de Guanabara</u> .....	42
3.3	<b>Verificação da Modelagem Hidrodinâmica</b> .....	44
3.3.1	<u>Verificação da hidrodinâmica no Estuário do rio Macaé</u> .....	44
3.3.2	<u>Verificação da hidrodinâmica na Baía de Guanabara</u> .....	46
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	48
4.1	<b>Resultados do estuário do rio Macaé</b> .....	48
4.1.1	<u>Hidrodinâmica do Estuário do rio Macaé</u> .....	48
4.1.2	<u>Cenários simulados no Estuário do rio Macaé</u> .....	55
4.1.2.1	Cenário 1 – Entrada do Estuário.....	55
4.1.2.2	Cenário 2 – Encontro do canal Macaé-Campos com o rio Macaé.....	59
4.1.2.3	Cenário 3 – Rio Macaé.....	62

4.1.2.4	Cenário 4 – Praia do Pecado.....	66
4.2	<b>Resultados da Baía de Guanabara.....</b>	<b>69</b>
4.2.1	<u>Hidrodinâmica da Baía de Guanabara.....</u>	69
4.2.2	<u>Cenários simulados na Baía de Guanabara.....</u>	74
4.2.2.1	Ponto A – Próximo ao Aeroporto Santos Dumont.....	74
4.2.2.2	Ponto B - Próximo à zona portuária e ao canal do mangue.....	76
4.2.2.3	Ponto C - Próximo à Ilha do Fundão.....	77
	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>80</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>82</b>

## INTRODUÇÃO

### Motivação

A poluição plástica em rios, oceanos e baías têm sido apontada como um dos principais problemas ambientais dos últimos anos, com potenciais riscos à saúde humana e ao meio ambiente (SIEGFRIED, 2017). Em contrapartida, a curva de produção mundial de plástico vem crescendo a cada geração. O consumo anual de plástico vem aumentando desordenadamente, já se ultrapassou os 320 milhões de toneladas nos últimos anos. Segundo as Nações Unidas, se a curva atual permanecer, é estimado que em 2050 haverá mais plásticos do que peixes dentro dos oceanos.

Entre a grande variedade de plásticos encontrados na natureza, se destacam o polipropileno (PP) e o polietileno (PE), que somados ao policloreto de vinilo (PVC), o polietileno tereftalato (PET) e o poliestireno (PS) equivalem a 90% de toda a demanda de plástico existente (SILVA, 2016). No Brasil, entre as principais resinas consumidas, o polipropileno (PP) se destaca com 20,3%, uma taxa alta quando comparada a outros tipos (ABIPLAST, 2018).

Sua classificação varia de acordo com o seu diâmetro, sendo assim, poluentes em ascensão que se estabelecem na natureza como fragmentos plásticos, denominados microplásticos, possuem diâmetro menor do que 5 mm como mostrado na Figura 1 (DE-LA-TORRE, 2019). Em 1970, Carpenter e Smith evidenciaram o primeiro estilhaço de plástico no meio ambiente, desde aquele momento foram visíveis vários estudos sobre os efeitos negativos dos microplásticos em todo o universo (LUCIO et al., 2019).

Figura 1 - Microplásticos encontrados na natureza.



Fonte: FUNDO VERDE, 2022 (página da web).

Os microplásticos podem ser primários ou secundários. Os microplásticos primários são aqueles que são fabricados em tamanho menor, ou seja, em tamanho microscópico. Como exemplo temos os microplásticos usados em cosméticos, pellets e os que são gerados através da lavagem de roupas oriundas de tecidos sintéticos. Os microplásticos secundários são transformados dentro do mar partindo de fragmentos maiores devido à fotodegradação, ação das ondas, ação biológica e também proveniente da fragmentação de redes de pesca descartadas no mar (OLIVATTO, 2017).

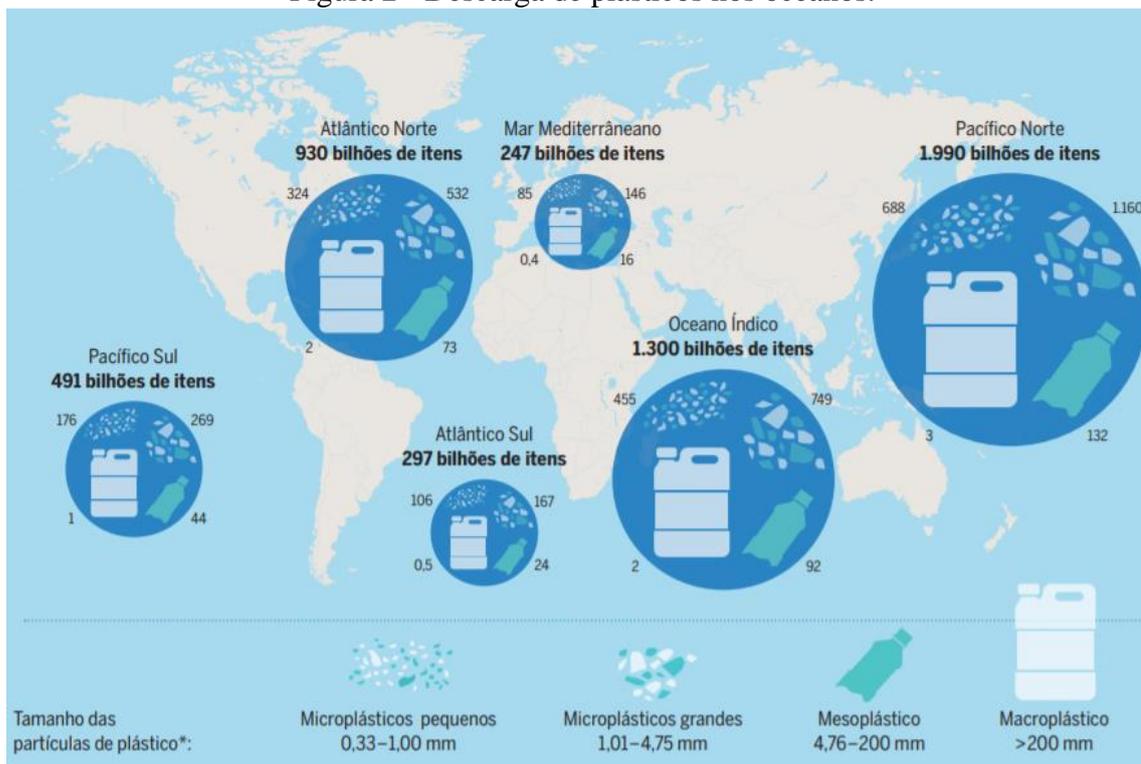
O descarte final desses fragmentos, rotineiramente, ocorre nos rios e oceanos, acarretando poluição e instabilidade a esses ambientes (SILVA, 2016). Além disso, os fragmentos são introduzidos na dieta de uma grande variedade de organismos, gerando desequilíbrio na cadeia alimentar marinha (ROJO-NIETO et al., 2017). Os microplásticos se tornaram um problema da sociedade quando foram identificados na alimentação humana (OLIVATTO, 2018) e com esse problema ficou evidente a necessidade de se compreender o circuito a que os microplásticos estão sujeitos e o modo que adentram a cadeia alimentar.

Os fragmentos de plásticos entram no oceano através do escoamento superficial ou de modo direto nas águas costeiras (DE-LA-TORRE, 2019). Quando depositados nos oceanos, esses fragmentos são direcionados através da velocidade dos ventos, das correntes oceânicas e possíveis turbulências geradas pelo fluxo das embarcações, podendo ser orientados a longas distâncias, atingindo áreas de difícil acesso (OLIVATTO et al., 2018). De modo similar, as características químicas e físicas de sua composição interferem na disposição desses fragmentos nos oceanos (ROJO-NIETO et al., 2017).

Atualmente a maior taxa de detritos plásticos se encontra no mar aberto, somente uma pequena parcela do lixo plástico permanece na superfície do mar. A maior parte desses fragmentos chegam à costa ou afundam. As quantidades de plásticos que entram no mar são cada vez maiores e os microplásticos prevalecem nas estimativas (STIFTUNG, 2020).

O Oceano Pacífico Norte lidera o ranking de descarga desses fragmentos, com uma estimativa de 1.990 bilhões de itens de diferentes tipos de plásticos, enquanto em segundo lugar está o Oceano Índico com a quantidade de 1.300 bilhões. O Atlântico Sul possui a menor quantidade de tipos de polímeros quando comparado aos demais oceanos, representando 6,7 vezes menos que o Pacífico Norte como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Descarga de plásticos nos oceanos.



Fonte: STIFTUNG, 2020, p. 33.

Desta forma, o conhecimento da trajetória dessas partículas microplásticas na costa oceânica se faz cada vez mais indispensável, permitindo a identificação das fontes, o entendimento do transporte, bem como o grau de contaminação ambiental.

Em decorrência desse grande cenário de mares de microplásticos, são apresentados, no atual mercado, alguns modelos computacionais que vêm sendo utilizados para simular a trajetória dos detritos plásticos em rios, baías e oceanos, em que são utilizadas dinâmicas baseadas em processos úteis na quantificação dos fluxos e concentrações ao longo do sistema.

Os modelos de simulação da trajetória são usados para prever os acessos e modificações de vários tipos de microplásticos ou outras substâncias, flutuando no oceano ou na atmosfera (KNUT-FRODE, 2018). Esses modelos são alimentados através de parâmetros previamente selecionados de acordo com o tipo de polímero e a localidade trabalhada.

O MOHID (Modelo Hidrodinâmico), plataforma computacional, é um dos modelos que têm sido utilizado no mercado de softwares para realizar simulações hidrodinâmicas, estando habilitado a representar o transporte de elementos em suspensão (MARETEC, 2012).

Devido à relevância do tema, neste trabalho foi desenvolvido o estudo das correntes das marés a fim de analisar os movimentos das águas oceânicas e simular a trajetória percorrida pelos microplásticos na camada entre o oceano e a atmosfera, explorando os possíveis impactos ambientais nas regiões previamente escolhidas. A plataforma computacional utilizada foi o

MOHID e as regiões da costa sudeste brasileira escolhidas para a simulação foram: o Estuário do rio Macaé e a Baía de Guanabara. A escolha dessas regiões se deram, visto que se tratam de localidades com uma elevada densidade populacional e por possuírem importantes atividades industriais ao seu redor, contribuindo para o acúmulo de lixo plástico em ambientes marinhos. Também foram utilizados dados meteorológicos reais para a validação dos modelos.

## **Objetivos Gerais**

O objetivo desta pesquisa desenvolvida no âmbito do Mestrado em Modelagem Computacional do Instituto Politécnico da UERJ, tem como objetivo geral, do ponto de vista científico e tecnológico, o desenvolvimento e a implementação de métodos matemáticos para a solução de problemas diretos no transporte de contaminantes em meio hídrico, contribuindo para retirada destes fragmentos da cadeia alimentar marinha.

## **Objetivos Específicos**

Visando alcançar o objetivo geral descrito na seção anterior, foram estabelecidos os objetivos específicos listados a seguir:

- Simular a trajetória de microplásticos mais leves do que a água submetidos a uma hidrodinâmica com forçantes de maré em duas regiões de estudo;
- Identificação de regiões de acúmulo de microplásticos nas áreas estudadas;
- Avaliar a influência da descarga na circulação dos microplásticos.

## **Organização dos capítulos**

Como será visto no primeiro capítulo desta dissertação, foi realizada uma pesquisa sistemática dos trabalhos que foram publicados na área de simulação computacional de transporte de microplásticos em baías, rios e oceanos. A partir da pesquisa, foram selecionados trabalhos que fazem aderência ao projeto, podendo-se identificar a produção científica referente aos modelos computacionais disponíveis e utilizados no mercado. Em geral, esses trabalhos dizem respeito à formulação matemática e a solução da modelagem, conhecido como problema direto, apresentando diferentes modelos, técnicas e tipos de microplásticos simulados. As seções foram divididas pelos métodos adotados para a realização da pesquisa.

No capítulo 2 são apresentadas as áreas estudadas, bem como suas peculiaridades, realçando os cenários e localizações de uma forma detalhada a serem utilizados nas simulações.

As seções foram divididas pelas regiões, sendo elas, o Estuário do Rio Macaé e a Baía de Guanabara.

No capítulo 3 é apresentada a plataforma MOHID, software utilizado para a simulação computacional, expondo suas ferramentas e características. A seção 1 deste capítulo foi dividida pelos módulos utilizados nas simulações. A seção 2 refere-se à estrutura utilizada para a modelagem de cada região, ou seja, a configuração utilizada para cada localidade, e por fim, a seção 3 aborda a validação e calibração de cada localidade, explorando os dados reais obtidos em campo que foram utilizados para verificação das marés.

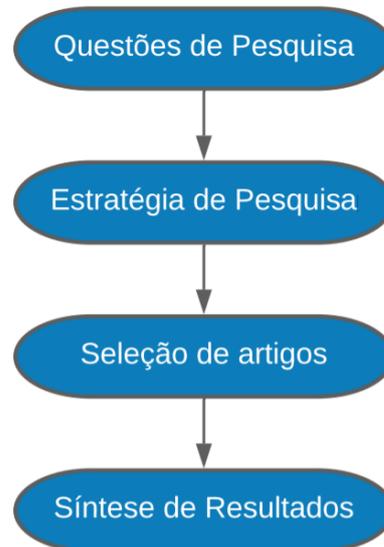
No capítulo 4 são apresentados os resultados referentes a cada área e caso simulado. As seções são divididas pelos resultados pertinentes às regiões. Sendo assim, a primeira seção faz referência ao Estuário do Rio Macaé e a segunda seção à Baía de Guanabara.

Finalmente são apresentadas as conclusões do presente projeto, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

# 1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A revisão sistemática se concentra no tema de busca apresentando as publicações que contribuíram para a compreensão dos fenômenos de interesse. O processo passo a passo para a busca sistemática é apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Método da revisão sistemática de literatura desta pesquisa.



Fonte: O autor, 2021.

A elaboração da pesquisa sistemática visa o alcance de uma contribuição científica no domínio do conhecimento, servindo, desse modo, para fomentar novas abordagens. Dessa forma, são apresentados, detalhadamente, os processos utilizados para a busca na literatura.

## 1.1 Questões de pesquisa

É alcançado o porquê e como deste trabalho, sintetizando e levantando nesta questão de pesquisa: Quais são as técnicas e metodologias utilizadas para a modelagem do transporte de microplástico nos oceanos? Quais os tipos de microplásticos utilizados? Quais os resultados obtidos? Quais os softwares empregados?

## 1.2 Estratégia de pesquisa

A forma de obter uma pesquisa bem elaborada é estabelecer uma estratégia de busca, visando definir onde será pesquisado, como será investigado, quais as palavras chave utilizadas para busca, quais estudos serão considerados e quais serão suas relevâncias.

Os termos de busca são definidos através da sua significância dentro do tema do assunto. Neste presente trabalho, os tesouros “*plastic*”, “*microplastic*”, “*transport*”, “*river*”, “*estuary*”, “*ocean*”, “*coastal*”, “*bay*”, “*sea*”, “*simulation*”, “*model*” e “*modeling*” foram utilizados para busca eletrônica realizada nas bases internacionais de dados Web of Science, ScienceDirect e Scopus. Para o catálogo de teses e dissertações da CAPES foi utilizado o tesouro “microplástico”.

Os recursos utilizados com a finalidade de seleção dos trabalhos dentro das bases internacionais foram artigos publicados nos periódicos em português, inglês ou espanhol. Os artigos levantados compreenderam o período dos últimos 10 anos, de 2011 a 2021, e as buscas foram realizadas nos títulos, resumos e palavras chave dos trabalhos. A busca foi realizada de abril 2021 a janeiro de 2022. Foram utilizados operadores booleanos “AND” e “OR” combinados de diferentes maneiras a fim de unir as classes dos tesouros utilizados. As strings dos termos de busca utilizados nesta revisão sistemática de literatura são apresentadas na Tabela 1.

Para alcançar a busca na base internacional Science Direct, foi necessário que a string 2 fosse dividida em duas strings uma vez que a base só aceita até oito booleanos, de forma que as buscas contemplassem as seguintes strings: ((“*Plastic*” OR “*Microplastic*”) AND (“*Transport*”) AND (“*River*” OR “*Estuary*” OR “*Ocean*”) AND (“*Simulation*” OR “*Model*” OR “*Modeling*”)) ; ((“*Plastic*” OR “*Microplastic*”) AND (“*Transport*”) AND (“*Coastal*” OR “*Bay*” OR “*Sea*”) AND (“*Simulation*” OR “*Model*” OR “*Modeling*”)).

O Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES é um sistema de busca bibliográfica com uma forma de pesquisa simples, não permitindo busca avançada. A coleta dos dados é realizada pela Plataforma Sucupira onde cursos de pós-graduação preenchem formulários prestando contas das atividades realizadas para atender as exigências da CAPES, inserindo textos completos das teses e dissertações dos pesquisadores apoiados pela mesma (<https://catalogodeteses.capes.gov.br/catalogo-teses/#!/>).

Os critérios de busca foram sintetizados como critérios de inclusão e critérios de exclusão, incluindo o título e o resumo para a primeira análise e incluindo o texto completo para a segunda análise. Os critérios de inclusão da primeira análise estão de acordo com: simulações de transporte de microplásticos em meio hídrico. Os critérios de exclusão da primeira análise estão de acordo com: artigos relacionados a outras áreas; não se aplica a modelagem computacional na simulação do transporte. Os critérios de inclusão da segunda análise estão de acordo com: aplicação da modelagem computacional em estuários, baías, rios ou oceanos; especificação da localização da simulação; especificação do tipo de microplástico

utilizado e do software utilizado. Os critérios de exclusão da segunda análise estão de acordo com: artigos relacionados a outras áreas; não se especifica localização da simulação, tipo de microplástico utilizado e software utilizado.

### 1.3 Seleção de artigos

A seleção de artigos relevantes seguiu o processo conforme o fluxo adaptado do PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) apresentado na Figura 4. Os trabalhos duplicados foram excluídos, os demais foram filtrados através da leitura prévia dos títulos e resumos, eliminando os que não atendem aos critérios de inclusão.

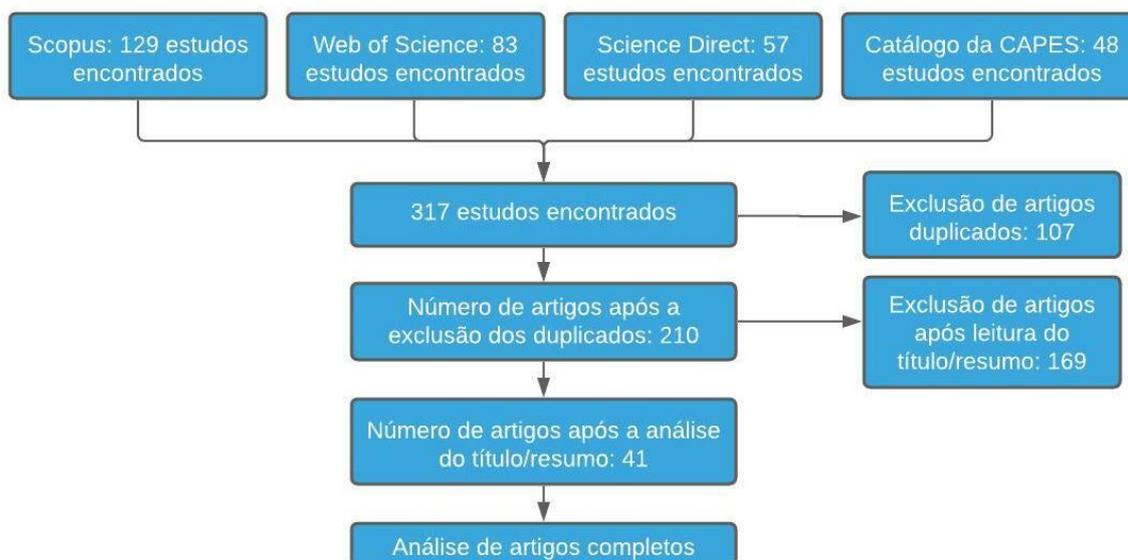
Tabela 1 - Strings de buscas utilizadas nas bases internacionais e no catálogo de teses e dissertações da CAPES

<b>Bases Internacionais</b>		
<b>Procurar</b>	<b>Expressão</b>	<b>Resultados</b>
1	("Microplastic") AND ("Transport")	2.275
2	("Plastic" OR "Microplastic") AND ("Transport") AND ("River" OR "Estuary" OR "Ocean" OR "Coastal" OR "Bay" OR "Sea") AND ("Simulation" OR "Model" OR "Modeling")	1.212
3	("Microplastic") AND ("Transport") AND ("River" OR "Estuary" OR "Ocean" OR "Bay") AND ("Simulation" OR "Model" OR "Modeling")	269
<b>Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES</b>		
<b>Procurar</b>	<b>Expressão</b>	<b>Resultados</b>
1	("Microplástico")	48

Fonte: O autor, 2022.

A pesquisa se iniciou com 317 trabalhos, dos quais 106 trabalhos foram excluídos por se tratarem de artigos duplicados. Após a primeira análise referente ao título e aos resumos, foram excluídos 169 trabalhos que não atenderam aos critérios de inclusão já definidos anteriormente. Foram selecionados 41 artigos para a leitura completa.

Figura 4 - Fluxo adaptado (PRISMA) para o processo de pesquisa



Fonte: O autor, 2022.

Vale a pena destacar que no Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES foram encontrados 48 trabalhos, porém nenhum utilizava modelagem computacional para estimar a trajetória dos microplásticos em rios, oceanos ou baías, por esse motivo eles não foram aceitos na primeira análise.

#### 1.4 Síntese dos resultados da revisão sistemática

Foram selecionados 41 artigos para a leitura completa, onde foram escolhidos somente 8 estudos. Esses estudos responderam às questões de pesquisa, atendendo aos critérios de inclusão, mencionados no item 1.2. Também foi notado que dos artigos previamente selecionados para a leitura completa, alguns foram descartados devido ao fato de não atenderem somente uma das perguntas de pesquisa, considerada como critério de inclusão, justificando o número de artigos selecionados. É apresentada uma breve descrição de cada estudo selecionado, destacando as perguntas de pesquisa previamente escolhidas.

He et al (2021) utilizou o TUFLOW Finite Volume (FV) para a simulação da dispersão e o transporte de microplásticos no rio Brisbane, localizado na Austrália, onde foram colocados pontos de monitoramento. O TUFLOW se trata de um modelo hidrodinâmico numérico tridimensional projetado para resolver equações não lineares de águas rasas em geometrias estruturadas. Os tipos de microplásticos monitorados foram o polietileno (PE), polipropileno (PP), poliamida (PA) e o polietileno tereftalato (PET). Em seu resultado foi confirmado que partículas com densidade menor têm mais mobilidade. Já microplásticos de alta densidade,

como PA e PET são propensos a serem retidos nos sedimentos, especialmente nas áreas adjacentes aos pontos de origem.

Alosairi et al. (2020) utilizou o modelo numérico Delft3D em seu estudo. Segundo o autor, esse modelo resolve equações não lineares em águas rasas com médias profundidades ou integradas a camadas, que são derivadas das equações de fluidos dinâmicos de Navier-Stokes para fluxo de superfície livre incompressível. Esse estudo foi aplicado no nordeste da Arábia, no Golfo Pérsico. O Golfo é um estuário com fluxo limitado de água doce quando comparado a sua escala geográfica, além de ser influenciado pelo rio Shatt Al-Arab. O polietileno linear de baixa densidade (LLDPE), o polietileno de baixa densidade (LDPE), o polietileno de alta densidade (HDPE) e o polipropileno (PP) foram os tipos de microplásticos escolhidos para a simulação. Foram considerados cinco locais de liberação de microplásticos e investigadas duas condições de vento dominantes em diferentes cenários numéricos. Os resultados mostraram que os ventos de norte resultam em uma alta dispersão e transporte marítimo de microplásticos nas zonas costeiras abertas, enquanto em regiões semi fechadas resultam em alto aprisionamento e encalhe verificado por investigação visual.

Besseling et al. (2017) utilizou o modelo NanoDUFLOW para modelagem do destino dos microplásticos. O modelo foi parametrizado para a investigação do comportamento das partículas de plástico em sistemas fluviais, inclusive para partículas de plásticos de tamanho nano, micro e milimetrado. O modelo foi aplicado ao decorrer de 40 km do rio Dommel, na Bélgica e nos países baixos. Foi utilizado um valor médio das densidades de polímeros encontrados no ambiente marinho, representando o poliestireno (PS). Foi apresentado que o tamanho da partícula teve um grande efeito no modelo do destino, na retenção do microplástico e no posicionamento dos pontos de acumulação no sedimento ao longo do rio. Os resultados também mostram, que a hidrodinâmica do rio afeta diretamente nas distribuições de tamanho dos microplásticos, com profundas implicações nas emissões para os sistemas marinhos.

Ballent et al. (2013) utilizou o MOHID Water para sua simulação. O MOHID Water é um software numérico de alta resolução que tem sido utilizado para modelar uma variedade de ambientes marinhos de áreas costeiras e regiões de oceano aberto. Neste estudo foram simulados os padrões de transporte de pelotas pretas HD no Canyon Nazaré, na costa Oeste de Portugal. Os resultados do modelo indicaram que pelotas de plástico não flutuantes provavelmente seriam transportadas para cima e para baixo do canal como uma função das forças das marés.

Schernewski et al. (2020) utilizou as incertezas em conjuntos de reanálises regionais (UERRA) de reconstrução atmosférica de alta resolução para conduzir um modelo de onda de

terceira geração, denominado WAVEWATCH 3, e um modelo hidrodinâmico para o Mar Báltico denominado GETM, modelo geral de transporte estuarino traduzido da sigla em inglês. Ambos os modelos possuem resolução horizontal de 1,852 km. Foram compilados dados de descarga de microplásticos para a região do Mar Báltico, onde foi simulado o transporte, e calculadas as emissões para cada via, além de desenvolvidos cenários de emissão para os seguintes tipos de microplásticos: polietileno (PE), polipropileno (PP) e o poliéster polietileno tereftalato (PET). De acordo com os resultados, o modelo sugere que a linha da costa é onde se verifica a maior acumulação de microplásticos com altas taxas anuais de acumulação costeiras perto de pontos favoráveis de emissão e em sistemas fechados e semifechados.

Genc et al. (2019) realizaram a simulação no modelo HYDROTAM-3D, que se trata de um modelo tridimensional de hidrodinâmica, transporte e qualidade da água. Este simula as correntes costeiras induzidas por vento e ondas, assim como a estratificação de densidade devido a mudanças na temperatura e salinidade da água do mar. A simulação ocorreu na Baía Interna de Fethiye, localizada em sua área costeira desta Baía, utilizando partículas de polietileno (PE) de 3 mm de tamanho. Foi concluído que a acumulação de microplásticos ocorreu nas águas costeiras sudoeste e leste da Baía Interna de Fethiye.

Collins e Hermes (2018) empregaram o modelo Ichthyop, uma ferramenta gratuita de rastreamento de partículas Lagrangiana, baseada em Java, para a simulação do transporte de partículas de detritos usando variáveis de estado ambientais calculadas a partir do uso do modelo ROMS, sistema de modelagem regional oceânica, traduzido da sigla em inglês. O estudo foi realizado em determinada região costeira da África do Sul e para representar toda a variedade de classes de plásticos, foram consideradas partículas de densidade baixa (LD) representando polietileno de baixa e alta densidade, e partículas de alta densidade (HD) representando tereftalato de polietileno e cloreto de polivinila. Foi concluído que as partículas LD e HD são exportadas principalmente para o Atlântico Sul e Sul do Oceano Índico, respectivamente e que as partículas que se estendem ao longo da costa da África do Sul são propícias de acumulação nas proximidades de centros costeiros urbano-industrializados.

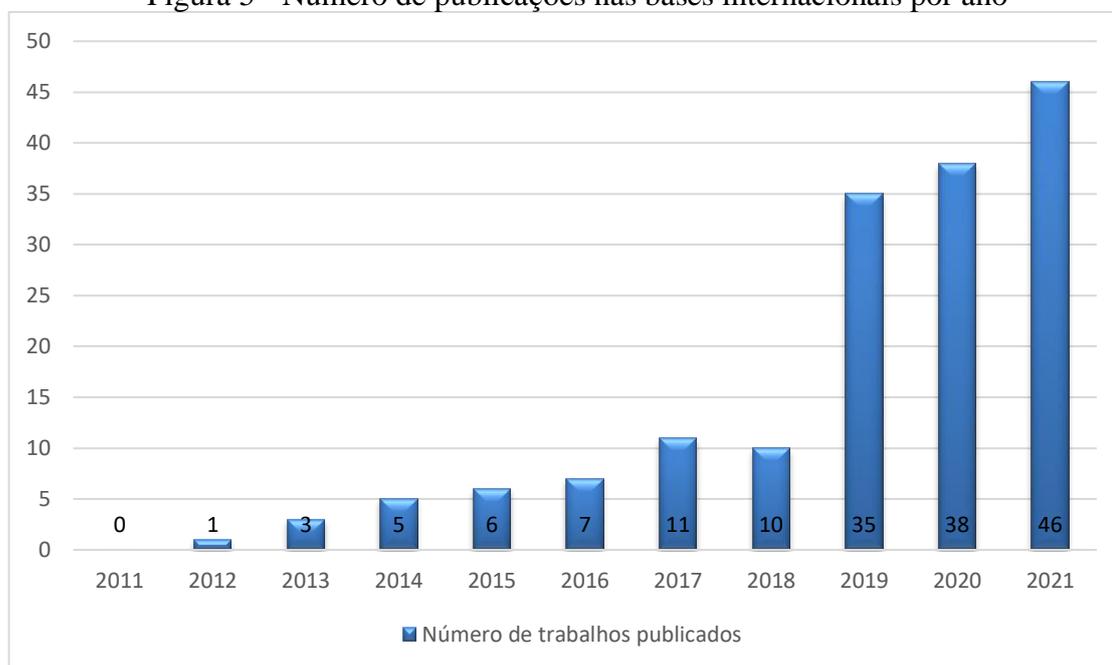
Raimundo et al. (2020) utilizaram o Delft3D acoplando os modelos Flow e particle-tracking (D-WAQ PART) para a simulação e utilizou o polipropileno (PP) e tereftalato de polietileno (PET) com diferentes tamanhos. A área escolhida para o estudo foi a Costa Portuguesa sendo considerados alguns pontos de liberação de poluição microplástica e mesoplástica. As previsões de modelagem mostraram que todos os microplásticos se moveram para o norte seguindo a hidrodinâmica local. Os microplásticos de maior densidade com diâmetros de 5 mm tendem a afundar mais que os de menor densidade com diâmetros de 10

mm (mesoplásticos), que por sua vez tendem a percorrer distâncias maiores. Os principais fatores que influenciaram na distribuição e acumulação de microplásticos na área de estudo foram a hidrodinâmica local e a geomorfologia, além do diâmetro da partícula.

## 1.5 Classificação dos resultados da revisão sistemática

Os resultados apresentados a seguir através da Figura 5 são baseados nas plataformas de buscas internacionais com 162 artigos encontrados, já eliminados os artigos duplicados, identificados no início do trabalho, a fim de fornecer ao leitor uma visão ampla do tema abordado, apesar de terem sido aceitos somente 8 artigos. Esses 162 trabalhos foram classificados de acordo com o ano de publicação.

Figura 5 - Número de publicações nas bases internacionais por ano



Fonte: O autor, 2022.

Foi observado que a preocupação com o tema utilizando as palavras de buscas escolhidas foi evidenciada através do aumento significativo da curva. Em 2019 foram gerados 35 trabalhos, três vezes a mais em comparação ao ano anterior. O número de artigos produzidos em 2019, 2020 e 2021 representam mais de 70% de todos os trabalhos encontrados.

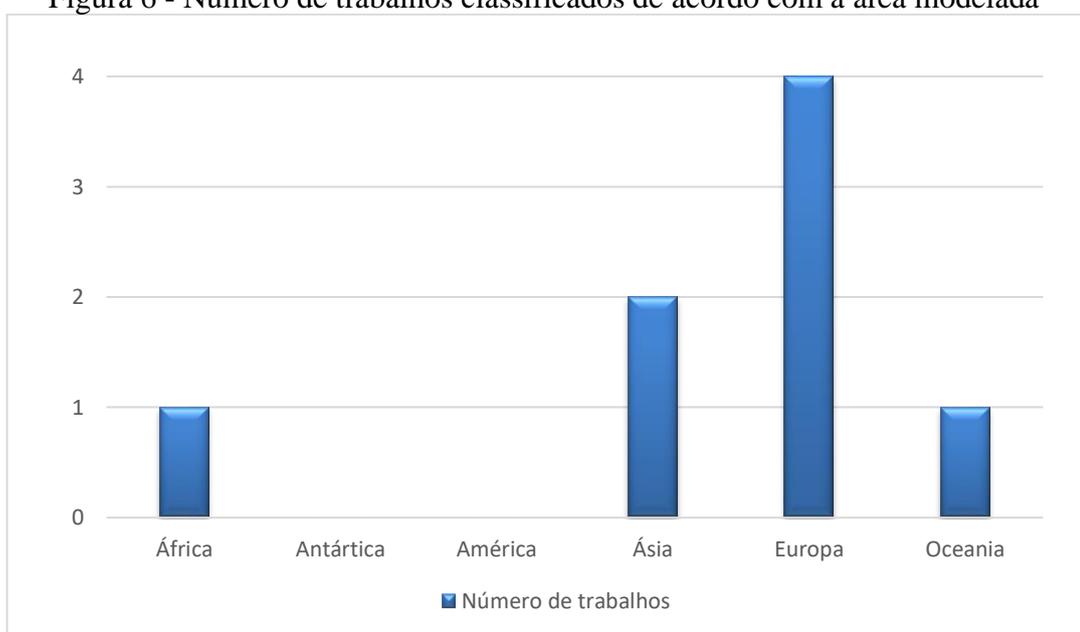
Através dos artigos aceitos foi observado apenas o Delft3D foi utilizado em dois artigos, os demais contavam com softwares diferentes.

A variedade de microplásticos existentes também foi evidenciada, uma vez que alguns trabalhos utilizaram mais de um tipo e outros apresentaram uma média das densidades dos

polímeros representando mais de um tipo de microplástico. A representatividade e variedade de densidades desses polímeros se fez presente e necessária para identificar a trajetória da partícula, uma vez que a densidade desses fragmentos influencia diretamente na sua trajetória.

Através do gráfico ilustrado na Figura 6 podemos identificar as áreas de interesse sobre esse tema, categorizando pelos continentes existentes a partir da localização escolhida para modelagem.

Figura 6 - Número de trabalhos classificados de acordo com a área modelada



Fonte: O autor, 2022.

Foi observado que nos oito (8) artigos aceitos não foram encontrados estudos aplicando a modelagem na Antártica e nem na América, além de prevalecer um maior número de trabalhos encontrados em torno da Europa.

Na Tabela 2 é apresentado um breve resumo dos tipos de microplásticos abordados em cada trabalho, o modelo utilizado para simulação e a área em que foi estudada.

Tabela 2 - Tipo de microplástico, modelo e localidade de cada artigo.

<b>Estudo</b>	<b>Tipo de Microplástico</b>	<b>Modelo</b>	<b>Localização</b>
<b>He et al. (2021)</b>	Polietileno (PE)	TUFLOW Finite Volume (FV)	Rio Brisbane, Austrália
	Polipropileno (PP)		
	Poliamida (PA)		
	Polietileno Tereftalato (PET)		

<b>Alosairi et al. (2020)</b>	Polietileno Linear de baixa densidade (LLDPE)	Delft3D	Estuário do Golfo (ao longo da costa Kuwait)
	Polietileno de baixa densidade (LDPE)		
	Polietileno de alta densidade (HDPE)		
	Polipropileno (PP)		
<b>Besseling et al. (2017)</b>	Poliestireno (PS)	NanoDUFLOW	Rio Dommel, Bélgica
<b>Ballent et al. (2013)</b>	Pelota de alta densidade (HD)	MOHID Water	Canyon de Nazaré
<b>Schernews ki et al. (2020)</b>	Polietileno (PE)	WAVEWATCH 3 / GETM	Mar Báltico
	Polipropileno (PP)		
	Polietileno Tereftalato (PET)		
<b>Genc et al. (2019)</b>	Poliestireno (PS)	HYDROTAM-3D	Baía Interna de Fethiye
<b>Collins C. e Hermes JC (2018)</b>	Polietileno de baixa densidade (PEBD)	Ichthyop	Oceano ao redor da África do Sul
	Polietileno de alta densidade (PEAD)		
	Polietileno Tereftalato (PET)		
	Cloreto de Polvinil (PVC)		
<b>Raimundo et al. (2020)</b>	Polipropileno (PP)	Delft3D	Costa Portuguesa
	Polietileno Tereftalato (PET)		

Fonte: O autor, 2022.

Foi observado que em grande parte das publicações foram utilizados mais de um tipo de polímero na simulação, sendo pelo menos um com baixa densidade e pelo menos outro com alta densidade. Isso pode ser explicado pela capacidade da densidade do microplástico influenciar em sua trajetória quando comparada com a densidade da água.

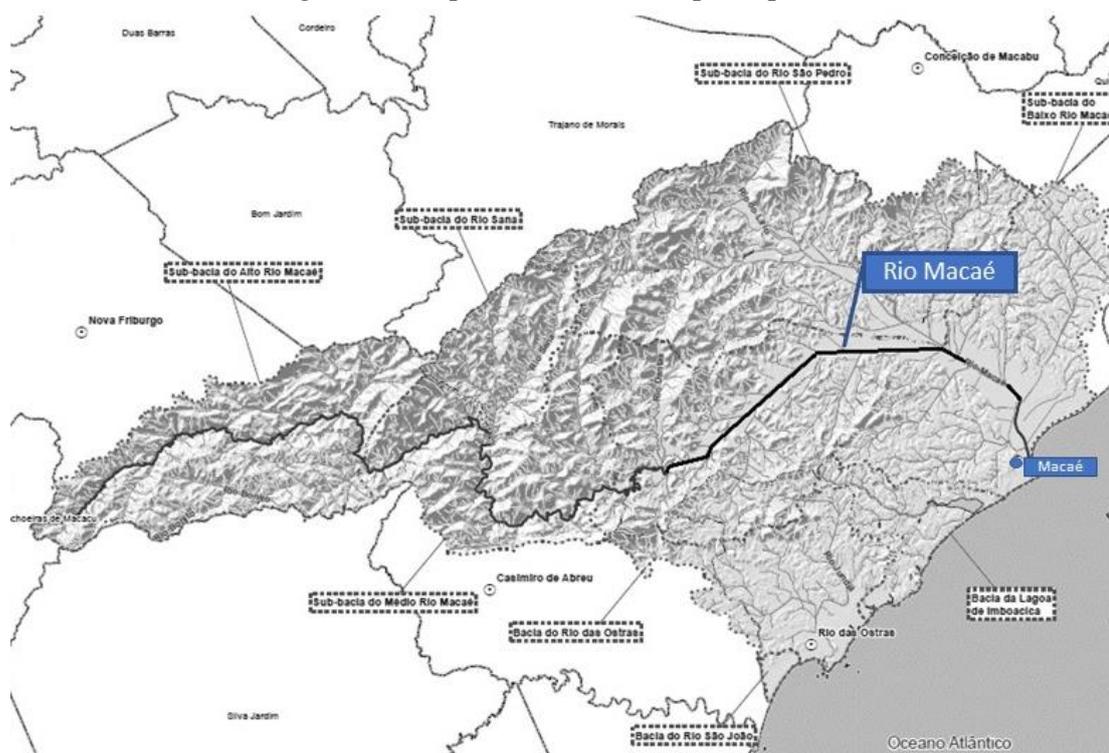
## 2 ÁREAS PARA ESTUDO DE CASO

As áreas escolhidas para as simulações deste trabalho foram: o estuário do rio Macaé e a Baía de Guanabara. As regiões são detalhadas ao decorrer deste capítulo.

### 2.1 Estuário do Rio Macaé

O Estuário do rio Macaé está localizado no município de Macaé, situado na baixada litorânea do estado do Rio de Janeiro, Brasil. O município conta com uma população de mais de 250 mil habitantes, 23 quilômetros de litoral e uma área total de 1.216 km<sup>2</sup>, que correspondem a 12,5% da área da Região Norte Fluminense. A cidade ganhou o título de Capital Nacional do Petróleo por sua grande riqueza de petróleo (PREFEITURA DE MACAÉ, 2021). A região foi escolhida por possuir um rio que corre por toda a sua extensão, carreando, potencialmente, elevadas quantidades de fragmentos plásticos e desaguando num ponto da orla marítima da cidade. A cidade de Macaé e seu principal rio são ilustrados na Figura 7.

Figura 7 - Mapa de Macaé e seu principal rio



Fonte: INEA, 2013, p. 79 (adaptado pelo autor).

O estuário do rio Macaé, localidade estudada neste trabalho, recebe fluxo do antigo canal Macaé, do rio Macaé Campos e principalmente do rio Macaé, como ilustra a Figura 8.

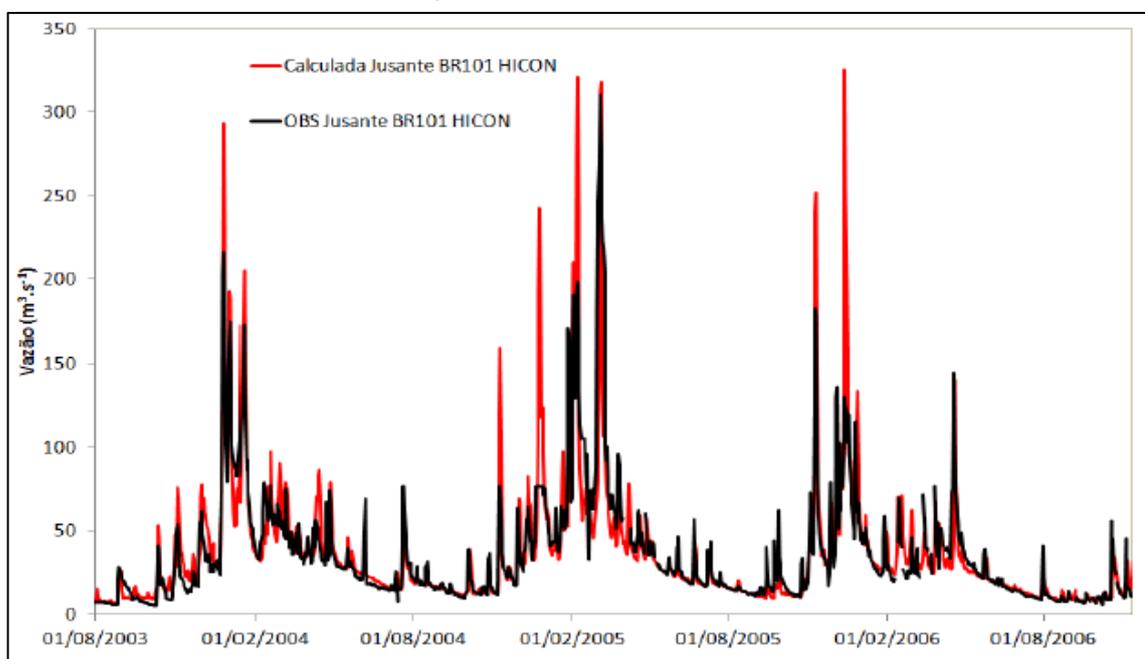
Figura 8 - Mapa da disponibilidade hidrográfica no estuário do rio Macaé



Fonte: O autor, 2021.

O rio Macaé passa por dentro do município, carregando todo o lixo que é descartado incorretamente em suas águas. O caminho percorrido por esses fragmentos depende das vazões dos rios em suas redondezas. Segundo o INEA (2013), as vazões do rio Macaé se alteram em relação à época do ano. Em épocas de estiagem, seu fluxo diminui alcançando uma vazão de 6 m<sup>3</sup>/s e em época de cheia pode aumentar significativamente e chegar até a valores de 300 m<sup>3</sup>/s, como ilustra a Figura 9.

Figura 9 - Hidrograma das vazões observadas (linha preta) e calculadas (linha vermelha tracejada) no rio Macaé, na altura da UTE Norte Fluminense.



Fonte: INEA, 2013, p. 33.

Os dados apresentados dizem respeito à hidrografia das vazões do rio Macaé que foram observadas, representadas através da linha preta, e as que foram calculadas são apresentadas pela linha vermelha, na altura do posto fluviométrico Jusante BR101, localizado junto à UTE Norte Fluminense, no período de agosto de 2003 a novembro de 2006 (INEA, 2013).

Esses dados de vazões do rio Macaé foram utilizados nas simulações de acordo com os períodos e épocas do ano, em que 6 m<sup>3</sup>/s foram utilizados para as simulações da época de estiagem (mês de setembro) e 300 m<sup>3</sup>/s para as simulações da época de cheia (mês de março).

## **2.2 Baía de Guanabara**

A Baía de Guanabara está localizada no estado do Rio de Janeiro, entre 22°41' e 22°58' Sul e 43°02' e 43°18' Oeste. Sua extensão é de aproximadamente 30 km norte-sul e 28 km leste-oeste, e sua entrada possui 1,6 km de extensão entre o Forte São João e Fortaleza de Santa Cruz (VIANA, 2017).

A bacia hidrográfica da Baía de Guanabara conta com uma população de aproximadamente 8.570.000 moradores (DIAGNÓSTICO DO ESTADO DA BAÍA DE GUANABARA, 2016) e engloba praticamente toda a região metropolitana do Rio de Janeiro, correspondendo a cerca de 80% de toda a população do estado, por compreender em sua totalidade ou parcialmente 16 municípios: Belford Roxo, Cachoeiras de Macacu, Duque de Caxias, Guapimirim, Itaboraí, Magé, Mesquita, Nilópolis, Niterói, Nova Iguaçu, Petrópolis, Rio Bonito, Rio de Janeiro, São Gonçalo, São João de Meriti e Tanguá (OLIVATTO, 2017).

A baía representa uma área continental de aproximadamente 4.000 km<sup>2</sup>, sendo 44 km<sup>2</sup> de ilhas, em que se destacam as Ilhas de Paquetá, do Governador e do Fundão. Sua entrada representa um perímetro de 131 km (OLIVATTO, 2017).

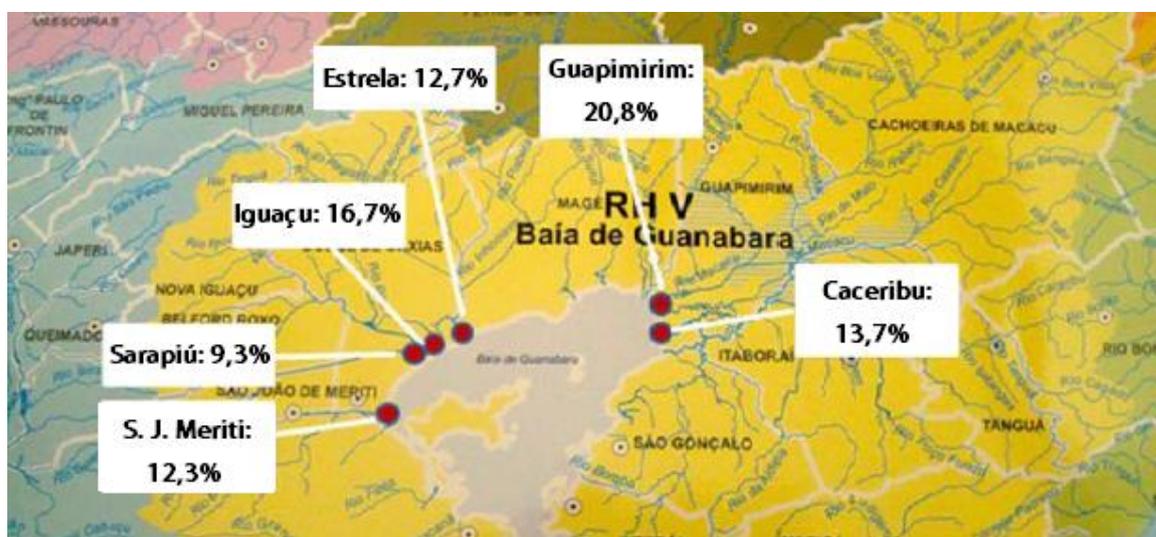
Na bacia hidrográfica da baía existem 55 rios que escoam em sua direção, descarregando, em média, 200 mil litros de água por segundo (DIAGNÓSTICO DO ESTADO DA BAÍA DE GUANABARA, 2016). A rede de drenagem da bacia é apresentada na Figura 10.



Os rios Caceribu, Guapimirim, Estrela, Iguaçu, São João de Meriti e Sarapuí, são os rios que mais contribuem para o fluxo de entrada de água na Baía, representando aproximadamente 85% de todo o aporte de água da Baía de Guanabara (DIAGNÓSTICO DO ESTADO DA BAÍA DE GUANABARA, 2016).

Segundo Kjerfve (1997), a soma da vazão de todos os rios da Baía de Guanabara aporta 100 m<sup>3</sup>/s de água doce, e a variação da vazão média em determinadas épocas do ano é de 33 m<sup>3</sup>/s em julho, no período de estiagem, e uma média de 186 m<sup>3</sup>/s em janeiro, durante a cheia. Esta diferença de vazão contribui com a capacidade de transporte do lixo plástico que é alterado ao decorrer das estações do ano. A Figura 11 ilustra os principais rios que deságuam na baía, ressaltando a porcentagem de seus fluxos em relação à totalidade de água que entra na baía.

Figura 11 - Porcentagem de vazão dos principais cursos d'água da Baía de Guanabara



Fonte: Diagnóstico do estado da Baía de Guanabara, 2015, p. 107 (adaptado pelo autor).

Ao longo do canal central da baía, encontram-se as maiores profundidades, se estendendo desde a sua entrada até as redondezas da ilha de Paquetá. A profundidade máxima da baía ocorre próximo a cerca de 50 m, e, no restante do canal sua profundidade varia de 10 a 20 m. As demais localidades da baía são consideradas rasas, com uma profundidade média de 7,6 m (OLIVATTO, 2017).

Em razão de sua grande extensão, a contaminação plástica naquela região vem aumentando, considerando que ao seu redor ocorre um intenso desenvolvimento industrial e um crescimento populacional desequilibrado nas últimas décadas.

### 3 METODOLOGIA

As principais etapas realizadas no trabalho foram: a) Pesquisa sistemática da literatura e estudos dos modelos matemáticos, apresentada no capítulo 1; b) aquisição, aprendizagem e qualificação no software MOHID; c) pesquisa e aquisição de dados e arquivos utilizados na modelagem; d) realização das simulações para um modelo de duas dimensões; e) calibração e validação do modelo hidrodinâmico.

#### 3.1 MOHID

A plataforma utilizada neste trabalho foi o MOHID (MOdelagem HIDrodinâmica). Este se trata de um sistema de modelagem de problemas matemáticos envolvendo modelos hídricos desenvolvido, em 1985, pela MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center) do Instituto Superior Técnico pertencente à Universidade de Lisboa. Além de Portugal, pesquisadores em mais de 40 países, incluindo o Brasil, têm utilizado a plataforma para estudos ambientais oceânicos partindo de dados experimentais reais obtidos no campo para a calibração dos modelos (RODRIGUES, 2016).

A Plataforma MOHID tem sido utilizada para reproduzir processos que ocorrem em estuários e oceanos, sendo capaz de simular a dispersão de poluentes, a evolução da qualidade da água e do transporte de sedimentos (CAMPOS et al., 2017; PAIVA et al., 2017).

O sistema possui seu código aberto ao público e está programado em ANSI FORTRAN 95, fazendo o uso da filosofia orientada a objeto (RODRIGUES, 2016). A plataforma permite simulações em diferentes áreas da hidrodinâmica, com abordagens unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais, desde que sejam conhecidas informações reais da região de estudo como topografia, vazão, dentre outras (MARETEC 2012).

O modelo pode ser utilizado para a realização de simulações em 2D e 3D, com coordenadas verticais Sigmas, Cartesianas e Isopicnais, assim como com condições de transporte Eulerianas e Lagrangeanas (AMORIM, 2015).

A subdivisão do programa é feita através de um fluxo de informações entre módulos. Atualmente, o MOHID conta com mais de 40 módulos, somando mais de 150.000 linhas de programação, onde cada módulo é responsável por controlar uma informação específica (MARETEC, 2012). Estes módulos são divididos em quatro tipos: os módulos que estão relacionados com a descrição da malha computacional, os módulos que originam a entrada e saída de dados numéricos, os módulos responsáveis pelas condições de fronteira do modelo e os módulos

que alteram as variáveis de estado do modelo (RODRIGUES, 2016). Os principais módulos são descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Principais módulos do MOHID

<b>Módulo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Utilização</b>
Atmosphere	Responsável pelos dados meteorológicos necessários para computar os processos que ocorrem na interface água-ar.	Não foi utilizado na simulação
Discharges	Descargas em rios ou descargas antropogênicas.	Utilizado na simulação
Geometry	Armazena e atualiza as informações de volumes finitos.	Utilizado na simulação
Hydrodynamic	Modelo tridimensional baroclínico com superfície livre. Calcula o nível, as velocidades e os fluxos de água.	Utilizado na simulação
Interface Sediment Water	Calcula as condições de contorno na parte inferior da coluna de água.	Não foi utilizado na simulação
Interface Water Air	Responsável pelos processos que ocorrem na interface água-ar, utilizando o Module Atmosphere como um banco de dados para dados meteorológicos e os combina com informações de outros módulos.	Não foi utilizado na simulação
Lagrangian	Capaz de simular a evolução das mesmas propriedades, utilizando a abordagem lagrangiana. Também pode ser utilizado para simular a dispersão de petróleo.	Utilizado na simulação
Model	Gerencia o fluxo de informações entre o módulo hidrodinâmico e os dois módulos de transporte, bem como a comunicação entre os sub-modelos.	Utilizado na simulação
Tide	Módulo utilizado para gerar os medidores de marés que gerarão a maré nos limites abertos ao longo da simulação.	Utilizado na simulação
Turbulence	Modelo unidimensional de turbulência. Faz uso da formulação adotada no modelo GOTM (Modelo Geral de Turbulência Oceânica).	Utilizado na simulação
Water Quality	Modelo adimensional de qualidade de água. Simula o ciclo do oxigênio, de espécies de nitrogênio e do fósforo. Está acoplado aos modelos de transporte, tanto na abordagem euleriana quanto lagrangiana.	Não foi utilizado na simulação
Water Properties	Modelo de transporte com abordagem euleriana, sendo capaz de simular a evolução de propriedades da água, como temperatura, salinidade, oxigênio etc.	Não foi utilizado na simulação

Fonte: MARETEC, 2012, p. 11 (adaptado pelo autor).

Percebe-se que, para previsão e simulação da dispersão de microplásticos em baías são imprescindíveis dois submodelos: o primeiro é o modelo hidrodinâmico, calculando o campo de velocidades das correntes da água que podem ser induzidas pela ação da maré e pelos ventos, que são denominadas condições meteorológicas. Para esse modelo é necessário se ter os dados de batimetria da região modelada. O segundo é o modelo Lagrangeano, que se inicia com a entrada dos dados dos microplásticos e os locais de descarga, tendo a finalidade de calcular a evolução temporal e espacial das partículas de microplásticos (MARETEC, 2012).

### 3.1.1 Model Module

O módulo modelo mantém todas as informações de um único arquivo, sendo responsável por construir e modificar cada modelagem, além de controlar os fluxos de informação entre os diferentes módulos (MARETEC, 2012).

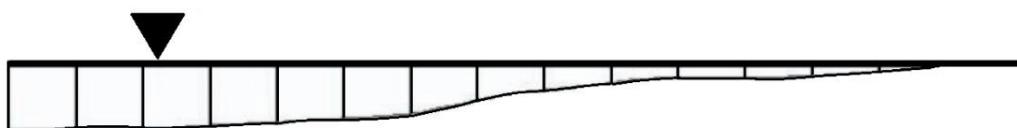
No arquivo de entrada `model_x.dat`, sendo `x` o número referente à simulação a ser rodada, é definido o intervalo de tempo do modelo, controlando todo o tempo das simulações e das propriedades, além de indicar a data de início e de fim da simulação (MOHID WIKI, 2021).

### 3.1.2 Geometry Module

O módulo geometria computa a discretização vertical no MOHID (MARETEC, 2012). Ele foi elaborado para dividir a coluna de água em diferentes coordenadas verticais, como a Sigma, Cartesiana, entre outras (MOHID WIKI, 2021).

As coordenadas Sigma são utilizadas quando o gradiente de pressão é barotrópico (VIANA, 2017), em que a pressão é igual em toda a coluna d'água (MOHID WIKI, 2021). A Figura 12 mostra o domínio Sigma utilizado neste trabalho, considerando uma camada.

Figura 12 - Domínio Sigma com uma camada



Fonte: O autor, 2021.

Os domínios Sigma ajustam-se à batimetria e mudam de acordo com a coluna d'água. Suas espessuras são determinadas em porcentagem da coluna d'água e é inserida na modelagem pelo próprio usuário (MOHID WIKI, 2021).

### 3.1.3 Hydrodynamic Module

O módulo hidrodinâmico é responsável por gerar e atualizar as informações do escoamento no modelo, resolvendo as equações primitivas que formulam o escoamento tridimensional incompressível. Tanto o equilíbrio hidrostático quanto as aproximações de Boussinesq e Reynolds são considerados (LIMA, 2012). A formulação matemática bidimensional usualmente utilizada no modelo hidrodinâmico é:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(uu) - \frac{\partial}{\partial y}(uv) - \frac{\partial}{\partial z}(uw) - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( (v_H + \nu) \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (v_H + \nu) \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( (v_t + \nu) \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1.a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(vu) - \frac{\partial}{\partial y}(vv) - \frac{\partial}{\partial z}(vw) - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( (v_H + \nu) \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (v_H + \nu) \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( (v_t + \nu) \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (1.b)$$

onde  $u$ ,  $v$  e  $w$  são os componentes do vetor de velocidade nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  respectivamente,  $v_H$  e  $v_t$  são as viscosidades turbulentas nas direções horizontal e vertical,  $\nu$  é a viscosidade molecular cinemática (igual a  $1,3 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) e  $p$  é a pressão. O termo do lado esquerdo é a evolução temporal das componentes de velocidades, os três primeiros termos do lado direito são o balanço de transporte advectivo, o próximo termo é o gradiente de pressão e os últimos três termos são a difusão turbulenta (MARETEC, 2012).

As condições de contorno impostas nas simulações foram as laterais fechadas e a de fronteiras abertas. Nas fronteiras de laterais fechadas o domínio simulado é limitado pela terra. Na escala de resolução adotada, essa camada é resolvida de modo que uma condição de impermeabilidade e não escorregamento pode ser assumida (LIMA, 2012).

$$\frac{\partial \vec{v}_H}{\partial \eta} = 0 \quad (2.a)$$

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = 0 \quad (2.b)$$

Essas condições podem ser implementadas de forma direta, utilizando o Método dos Volumes Finitos, além de assumir como nulos tanto o fluxo normal quanto o difusivo de água através das células que estejam em contato com a terra (LIMA, 2012).

Fronteiras abertas surgem da necessidade de se manter o domínio na região de interesse. Os valores das variáveis a serem simuladas têm que ser impostos nessas fronteiras, garantindo que as informações a respeito do que ocorre na região externa ao domínio sejam refletidas para

o interior dele, sem que a solução desejada seja corrompida. É evidenciado que não há condição de fronteira aberta perfeita, e a mais conveniente dependerá do domínio e dos fenômenos que estejam sendo modelados (MOHID WIKI, 2021).

### 3.1.4 Lagrangian Module

O módulo Lagrangeano é utilizado para simular processos de dispersão e trajetória de partículas utilizando o conceito de traçadores lagrangeanos. A propriedade mais importante deste traçador é sua posição no espaço (x,y,z). O movimento de um traçador pode ser influenciado pelo campo de velocidades gerado pelo Módulo Hidrodinâmico, pelo vento do módulo da superfície e ainda por oscilações randômicas da velocidade (MARETEC, 2012).

Esses traçadores são definidos por suas coordenadas espaciais, de volume e de uma série de propriedades. Eles se iniciam em suas origens e dentro de um determinado tempo, eles começam a simulação do movimento aleatório. Os traçadores que iniciam na mesma origem têm a mesma série de propriedades e utilizam os parâmetros iguais para a trajetória aleatória (RODRIGUES, 2016).

As origens no espaço podem ser em um determinado ponto, em uma determinada área ou em uma forma circular em torno de um ponto. Essas origens podem ser agrupadas em grupos, onde as que pertencem ao mesmo grupo são reunidas no arquivo de saída (MOHID WIKI). As coordenadas espaciais podem ser dadas a partir da definição de velocidade:

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = u_i(x_i, t) \quad (3)$$

onde  $u$  representa a velocidade média e  $x$  é a posição de dada partícula. A equação (3) pode ser resolvida utilizando o método direto:

$$x_i^{t+\Delta t} = x_i^t + \Delta t \cdot u_i^t \quad (4)$$

O movimento horizontal aleatório da partícula pode ser *NotRandom* ou *SullivanAllen*. O *NotRandom* não considera qualquer componente horizontal aleatório (MOHID WIKI) e no *SullivanAllen* ocorre uma parametrização baseada na formulação de Sullivan, 1971, e Allen, 1982, sendo calculado usando o comprimento de mistura e o desvio padrão da velocidade turbulenta, resultantes do fechamento turbulento adaptado no modelo hidrodinâmico. Nesse movimento os traçadores mantêm a velocidade aleatória ou turbulenta durante o tempo necessário para circular o comprimento de mistura (FERNANDES, 2001).

### 3.1.5 Discharges Module

O módulo de descargas do MOHID implementa todas as descargas pontuais do modelo. Essas descargas podem ser simples modelos de descargas de água em certos pontos, porém também podem ter propriedades como temperatura, salinidade e nutrientes da água (WIKI MOHID).

Na configuração do modelo são utilizados como dados de entrada o tipo de geometria da descarga, podendo ser linear, pontual ou no formato de um polígono, a localização e o fluxo ( $m^3/s$ ) da descarga da água (WIKI MOHID), além das propriedades mencionadas no parágrafo anterior.

### 3.1.6 Tide Module

As marés são geradas através das forças gravitacionais da Lua e do Sol que agem sobre a Terra, e essas forças gravitacionais mudam de acordo com as posições relativas da Terra, do Sol e da Lua. Essa mudança também tem um efeito estimável nas marés que experimentamos na costa do oceano (NORA, 2021).

Cada constituinte harmônica é um valor matemático que representa o efeito que o movimento alternado do sistema Terra, Sol e Lua tem nas marés (NORA, 2021). Assim, neste módulo são definidas as forçantes das marés através do uso do FES2012. O modelo de maré FES (Finite Element Solution) usa um banco de dados que contém 32 constituintes de marés sendo distribuídos em grades de  $1/16^\circ$ , amplitude e fase (MOHID WIKI, 2021), sendo baseado na resolução das equações barotrópicas de marés em uma configuração espectral (AVISO, 2021). Para a utilização no MOHID, este banco de dados foi reorganizado em um arquivo.

Cada constituinte harmônico fornece os valores matemáticos que descrevem uma curva cosseno específica. As previsões de marés são resultantes de um cálculo, adicionando os efeitos em cada curva de cosseno, para produzir a curva complexa que corresponde às marés previstas, sendo apresentada na Equação (5).

$$h = H_o + soma\{f.H.\cos[at + (V_o + u) - K]\} \quad (5)$$

onde:

$h$  = altura da maré em qualquer momento  $t$ ;

$H_o$  = altura média do nível de água acima do usado para previsão;

$H$  = amplitude média de qualquer constituinte  $A$ ;

$f$  = fator para reduzir a amplitude média  $H$  ao ano de predição;

$a$  = velocidade do constituinte A;

$t$  = tempo calculado a partir de alguma época inicial, como o início do ano das previsões;

$(V_o + u)$  = valor do argumento de equilíbrio do constituinte A quando  $t = 0$ ;

$K$  = época do constituinte A.

Os valores das constantes harmônicas fornecidos para uma estação são  $H$  e  $K$  a partir desta fórmula. As unidades usadas para  $H$  e  $H_o$ , sendo pés ou métricas, determinarão o tipo de unidade das alturas de maré resultantes. As unidades de  $K$ , horário padrão local ou GMT, determinarão o fuso horário dos horários das previsões de marés geradas (NORA, 2021).

O MOHID atribui que se deve produzir níveis do componente harmônico em todos os pontos do limite aberto, porém o usuário pode definir as localizações do medidor das marés, em que o nível da água é gerado partindo dos componentes harmônicos (MOHID WIKI, 2021). O nível de referência da maré também é imposto neste módulo como uma precaução para esse nível não chegar a valores abaixo de zero.

## 3.2 Configuração do Modelo

A proposta para modelar a dispersão de microplásticos constitui-se, em primeiro lugar, no entendimento das condições físicas da região, como a batimetria, e as condições hidrológicas do local, como os fluxos e correntes marinhas (RODRIGUES, 2016). Estes dados são utilizados para criar o campo de velocidades que é simulado através do Módulo Hidrodinâmico do MOHID, descrevendo o deslocamento no espaço da massa de água que constitui o corpo hídrico (MOHID WIKI, 2021). Em todas as simulações foram considerados microplásticos mais leves do que a água, conseqüentemente esses microplásticos estarão flutuando por todo o período da modelagem. Desse modo, no decorrer desta seção serão apresentadas as características utilizadas para cada região de estudo.

### 3.2.1 Modelagem do Estuário do Rio Macaé

A princípio, foi selecionada uma grade regional de 290 x 290 células com uma resolução de 50 m x 50 m, partindo de 22°24'57.2"S e 41°46'11.9"W à um ângulo de 45 graus.

A batimetria da região foi interpolada entre os dados computados do oceano aberto pela *Jet Propulsion Laboratory* do *California Institute of Technology* (PRODUTOS DE DADOS, 2021), juntamente com os dados medidos por Amaral (2003) ao decorrer da extensão do rio Macaé.

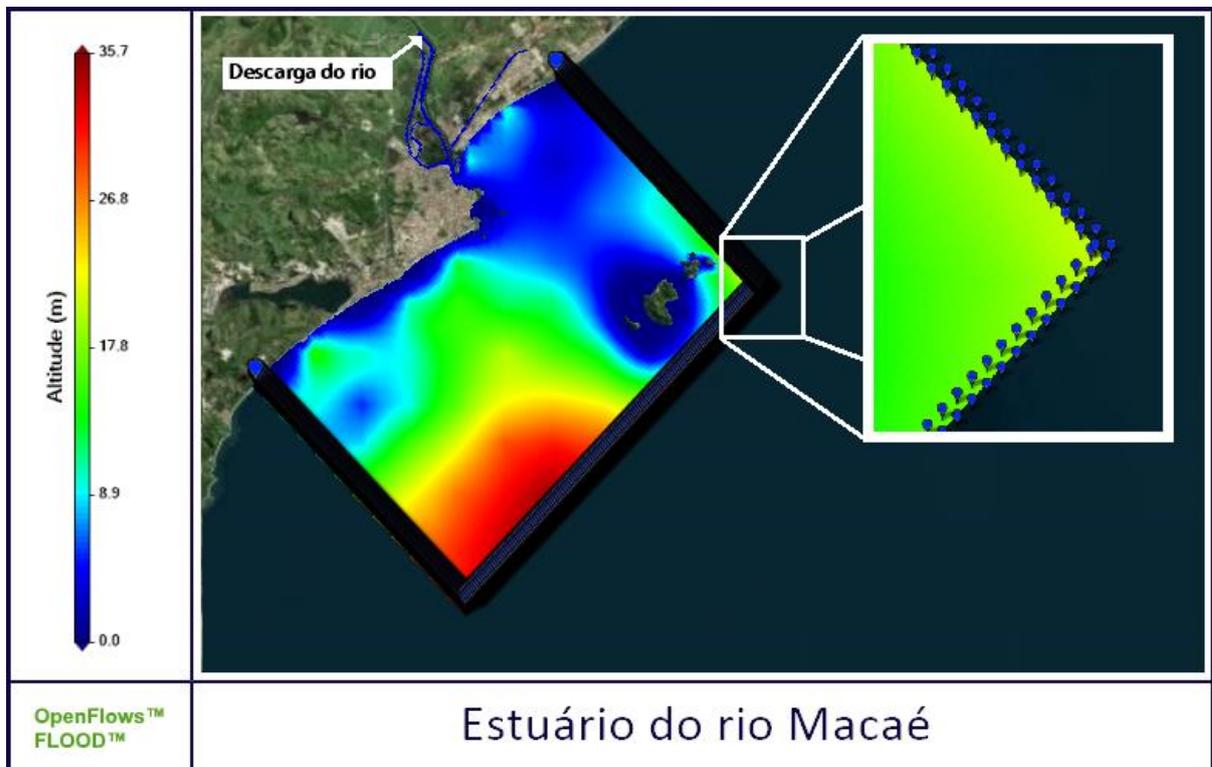
A batimetria gerada por Amaral (2003), ao decorrer do rio, indicou que as profundidades naquela região variam entre 2,1 m e 3,5 m.

Após a interpolação da batimetria do oceano com a batimetria do rio, foi gerada a batimetria utilizada na simulação, com uma profundidade variando até 9 m próximo à costa, podendo atingir profundidades máximas de 35 m em áreas distantes.

As forçantes das marés utilizadas no modelo foram o FES2012 e as localizações do medidor de marés foram desenhadas pelo usuário. A descarga do rio Macaé foi a única a ser considerada na simulação, por se tratar da maior vazão responsável pela entrada de água no estuário. A batimetria, as forçantes e a descarga de água são ilustradas na Figura 13.

Os valores das vazões de descarga de água do rio Macaé foram escolhidos respeitando as épocas de cheia e estiagem, sendo organizados em casos. O Caso 1 faz referência a época de estiagem e no Caso 2 é considerado o caso extremo, a época de cheia, como mostra a Tabela 5.

Figura 13 - Batimetria, forçantes da maré e as descargas dos rios utilizadas nas simulações dentro do estuário do rio Macaé



Fonte: O autor, 2021.

Tabela 5 - Casos de vazões que foram utilizadas na implementação do modelo

Caso 1	Caso 2
Vazão do rio Macaé = $6m^3/s$	Vazão do rio Macaé = $300m^3/s$
Datas simuladas: 02/09/2021 à 17/09/2021	Datas simuladas: 02/03/2021 à 17/03/2021

Fonte: O autor, 2021.

Os pontos de descargas de microplásticos foram escolhidos por se tratarem de localidades estratégicas, visando o espalhamento dos microplásticos dentro das regiões de interesse. O Cenário 1 ( $22^{\circ}22'03.0''S$  e  $41^{\circ}46'50.2''W$ ) está localizado na entrada do estuário, região de grande contaminação por estar próximo ao centro comercial do município. O Cenário 2 ( $22^{\circ}21'49.9''S$  e  $41^{\circ}46'42.0''W$ ) foi escolhido por conectar o canal do Macaé-Campos com o rio Macaé. O Cenário 3 ( $22^{\circ}20'51.7''S$  e  $41^{\circ}47'14.6''W$ ) representa um ponto de contaminação importante, pois carrega todo o lixo do rio até chegar no estuário. E por fim, o Cenário 4 ( $22^{\circ}24'39.6''S$  e  $41^{\circ}48'25.6''W$ ) apontando uma das praias mais movimentadas da cidade, a praia do Pecado, frequentada para banho por moradores e turistas. Os cenários são apresentados na Figura 14.

Figura 14 - Cenários de descarga de microplásticos em Macaé



Fonte: O autor, 2021.

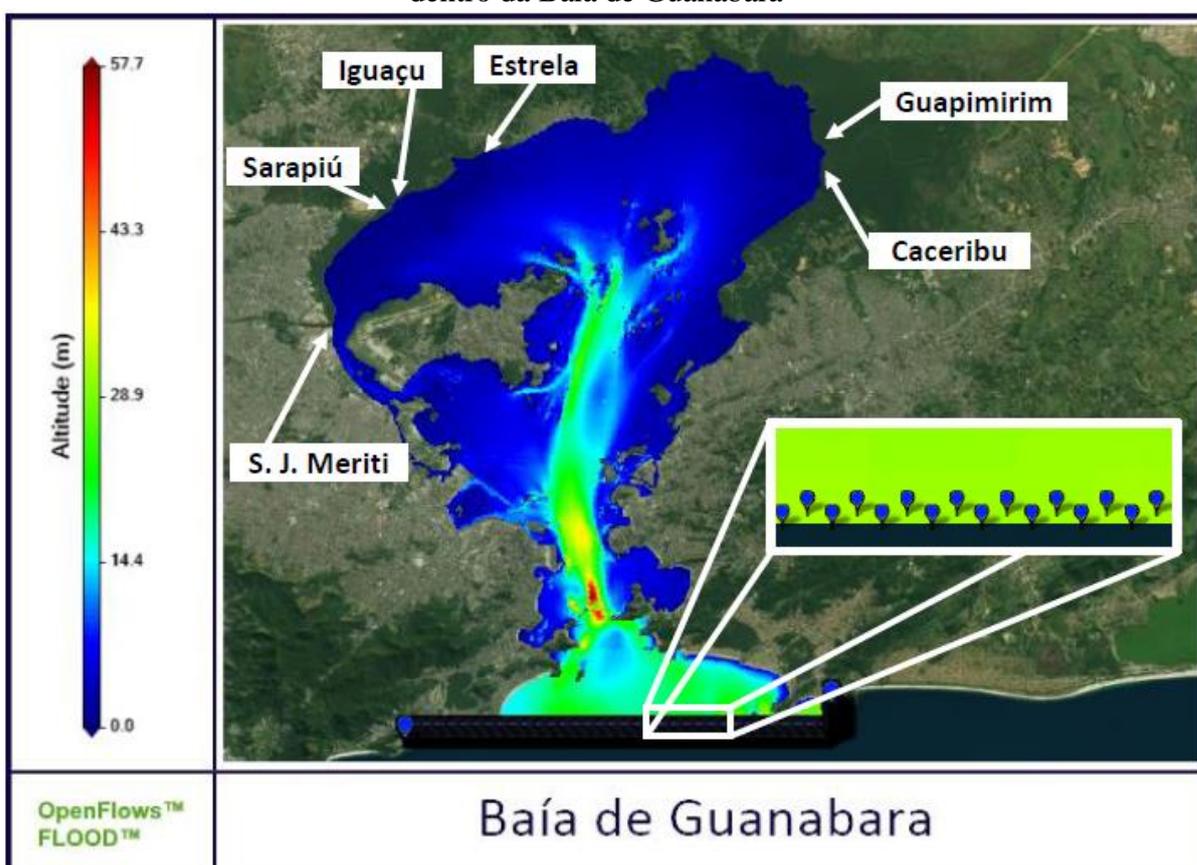
Todos os 4 cenários foram simulados considerando os 2 casos com diferentes fluxos no rio Macaé para a discussão do possível espalhamento nas épocas de cheia e de estiagem. O movimento de partículas escolhido para a simulação foi o SullivanAllen, por se tratar de um movimento randômico.

### 3.2.2 Modelagem da Baía de Guanabara

A grade e a batimetria da Baía de Guanabara foram cedidas por Maurício R. Fragoso, PROOCEANO - A CLS Group Company. O domínio da grade é de 645 x 505 células com uma resolução de 50 m x 50 m, partindo de 22°59'52.4"S e 43°16'42.2"W.

As forçantes das marés do modelo foram as mesmas utilizadas no estuário do rio Macaé, o FES2012 e as localizações do medidor de marés também foram desenhadas pelo usuário. As descargas dos rios, que abastecem a Baía de Guanabara, utilizadas na simulação foram as dos principais fluxos: rio Caceribu, rio Guapimirim, rio Estrela, rio Iguaçu, rio São João de Meriti e rio Sarapiú. Os fluxos médios desses rios foram apresentados na Tabela 3. A batimetria, as forçantes e a descarga de água são ilustradas na Figura 15.

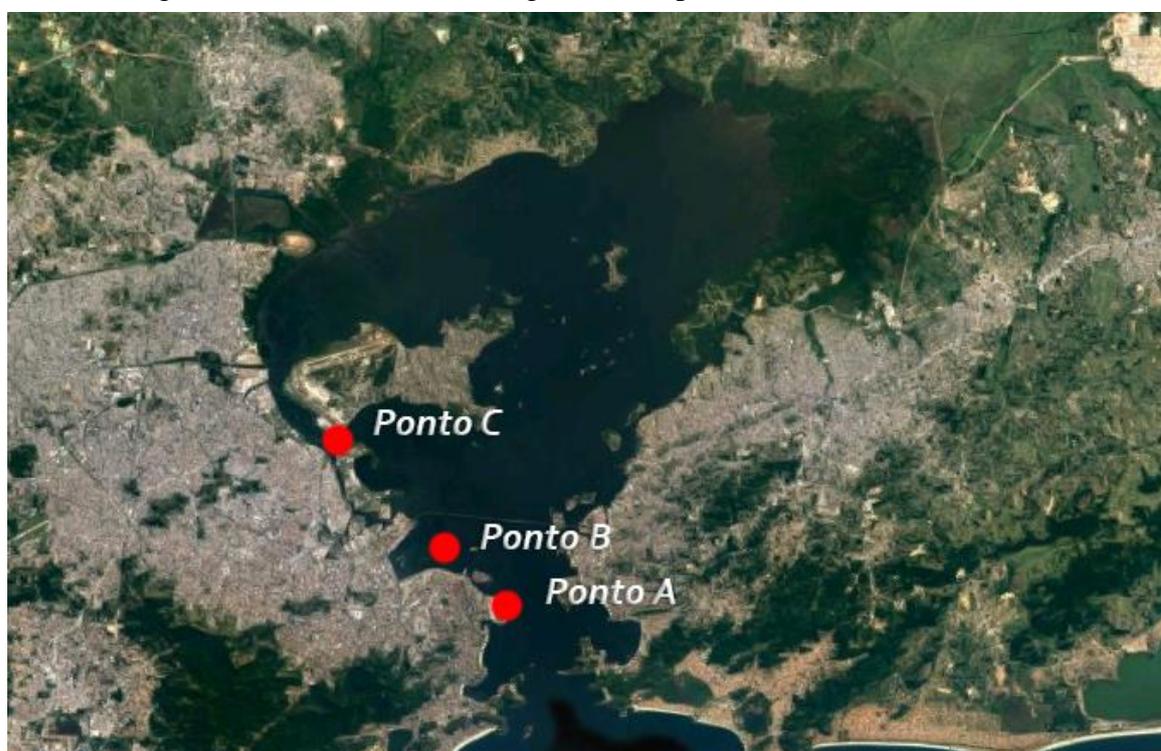
Figura 15 - Batimetria, forçantes da maré e as descargas dos rios utilizadas nas simulações dentro da Baía de Guanabara



Fonte: O autor, 2021.

Os pontos de descargas dos microplásticos utilizados para simulação dentro da Baía de Guanabara foram escolhidos baseados na dissertação de mestrado da aluna e pesquisadora OLIVATTO (2017). Em sua pesquisa, Olivatto escolheu 3 pontos para coleta de material: o Ponto A ( $22^{\circ}54'38.3''\text{S}$  e  $43^{\circ}9'32.6''\text{W}$ ), próximo ao Aeroporto Santos Dumont; o Ponto B ( $22^{\circ}53'15.3''\text{S}$  e  $43^{\circ}10'58.5''\text{W}$ ), próximo à zona portuária e ao canal do mangue e por último, não menos importante, o Ponto C ( $22^{\circ}50'5.5''\text{S}$  e  $43^{\circ}14'32.1''\text{W}$ ), localizado próximo à Ilha do Fundão, pontos potencialmente afetados por plásticos. Olivatto (2017) realizou uma pesquisa de campo e uma análise de microscopia óptica para verificação do material recolhido. Foi constatada uma alta porcentagem de microplásticos na região estudada. A Figura 16 ilustra os pontos de descarga de microplásticos dentro da Baía de Guanabara, que foram utilizados para simulação, baseados na pesquisa de Olivatto (2017).

Figura 16 - Cenários de descarga de microplásticos na Baía de Guanabara



Fonte: O autor, 2021.

As datas escolhidas para a simulação computacional de microplásticos dentro da Baía de Guanabara foram 02/01/2021 à 17/01/2021. Como as vazões utilizadas na simulação foram vazões médias, não houve a necessidade de se especificar datas.

### 3.3 Verificação da Modelagem Hidrodinâmica

Após a coleta de informações e de dados, são iniciados alguns testes de simulações, com o intuito de apurar os resultados obtidos. Esse processo é realizado partindo de dados reais computados dentro das regiões de estudo, os quais são comparados com os resultados simulados pelo MOHID.

Este trabalho foi baseado na comparação da altura de maré resultante da simulação com a registrada no período de simulação através do marégrafo instalado em um determinado ponto da costa. Sua aferição foi realizada através de tentativa e erro. Os dados do marégrafo de cada região foram cedidos pelo Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil (MARINHA, 2021).

Para uma maior precisão, foi realizado um cálculo estatístico a fim de analisar a porcentagem de erro encontrado na validação do modelo. Foi utilizado o somatório do erro relativo, apresentado na Equação 6:

$$\sum_{i=0}^{i=n} ER(\%) = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{|H_{aprox.} - H_{exata}|}{H_{exata}} .100 \quad (6)$$

onde  $n$  representa o número de dados analisados, o  $H_{aprox.}$  é a altura da maré encontrada na simulação e  $H_{exata}$  é a altura da encontrada pelo marégrafo.

#### 3.3.1 Verificação da hidrodinâmica no Estuário do rio Macaé

Para o Estuário do rio Macaé foi utilizada a tábua da maré do Terminal Marítimo de Imbetiba, ilustrado na Figura 17.

Foram utilizados diferentes níveis de referências para a maré, com o intuito de aproximar a curva da altura simulada com a obtida em campo pelo marégrafo. A tábua da maré utilizada para a validação apresentava 0,72 m como a altura média da maré.

Após tentativas e erros, foi constatado que o valor de 0,75 m de nível de referência foi bem representado, posto que as alturas resultantes da maré das simulações se aproximaram das encontradas pela tábua da maré do Terminal Marítimo de Imbetiba. A Tabela 6 ilustra o melhor ajuste da validação no Estuário do rio Macaé.

Figura 17 - Localização do marégrafo no Terminal Marítimo de Imbetiba, Macaé



Fonte: O autor, 2021.

Tabela 6 - Comparação da altura da maré simulada com os valores do marégrafo do estuário do rio Macaé

<b>TERMINAL MARÍTIMO DE IMBETIBA</b>							
<b>Vazão de 6 m<sup>3</sup>/s</b>				<b>Vazão de 300 m<sup>3</sup>/s</b>			
<b>Data</b>	<b>Horário</b>	<b>Altura (m) marégrafo</b>	<b>Altura (m) simulação</b>	<b>Data</b>	<b>Horário</b>	<b>Altura (m) marégrafo</b>	<b>Altura (m) simulação</b>
<b>01.09.2021</b>	04:58	0,5	0,4	<b>01.03.2021</b>	04:17	1,3	1,4
	12:08	1,0	0,9		10:38	0,2	0,2
	18:06	0,6	0,6		16:13	1,4	1,4
	23:41	0,9	0,9		23:02	0,0	0,0
<b>04.09.2021</b>	00:58	1,1	1,2	<b>04.03.2021</b>	00:39	0,3	0,3
	07:23	0,1	0,0		05:43	1,0	1,0
	13:49	1,3	1,3		12:45	0,4	0,4
	19:51	0,3	0,3		18:17	1,1	1,1
<b>07.09.2021</b>	02:43	1,4	1,4	<b>07.03.2021</b>	04:45	0,7	0,7
	15:19	1,4	1,4		10:28	0,8	0,8
	21:32	0,2	0,2		16:56	0,4	0,4
<b>10.09.2021</b>	04:26	1,3	1,3	<b>10.03.2021</b>	01:38	1,2	1,2
	11:15	0,1	0,2		07:24	0,4	0,5
	16:53	1,1	1,1		13:08	1,1	1,2
	23:24	0,3	0,3		19:43	0,1	0,1
<b>13.09.2021</b>	01:04	0,4	0,4	<b>13.03.2021</b>	02:56	1,3	1,3
	06:51	1,0	1,0		09:08	0,2	0,2
	14:09	0,6	0,6		14:51	1,4	1,4
	18:02	0,8	0,8		21:32	0,0	0,1
<b>16.09.2021</b>	05:38	0,3	0,3	<b>16.03.2021</b>	04:09	1,2	1,2
	12:56	1,1	1,1		10:36	0,2	0,2
	18:24	0,6	0,6		16:19	1,3	1,3

Fonte: O autor, 2021.

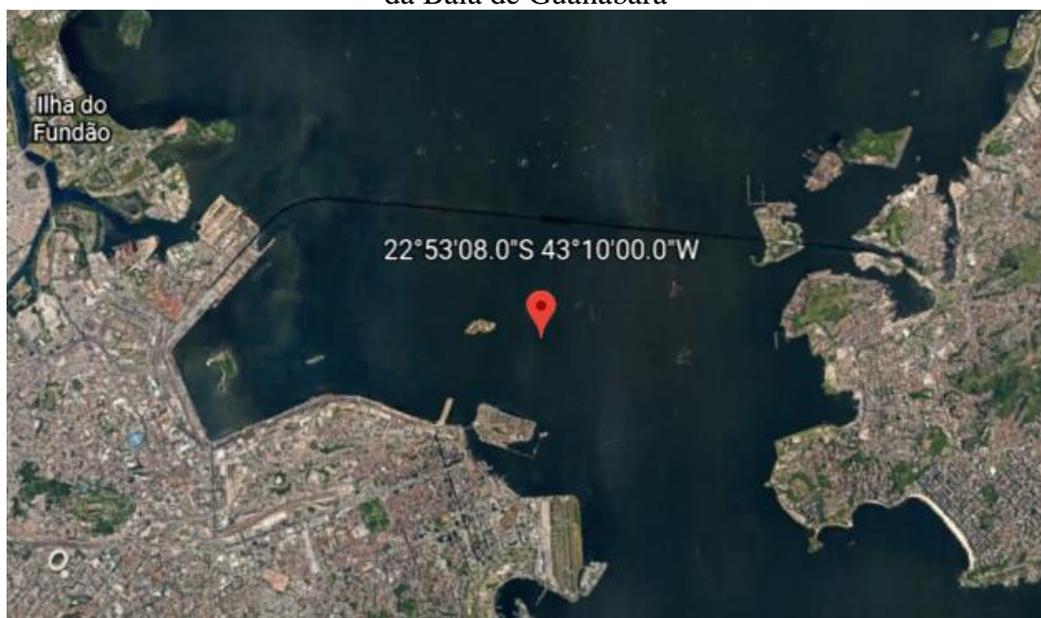
Foi observado que, em ambas simulações, considerando a época de estiagem e a época de cheia, os valores das alturas da maré simulados e os do marégrafo se aproximaram de forma que na maioria dos horários às alturas se igualaram. Quando foi evidenciada uma diferença, em certos horários, esta foi irrelevante, sendo de uma casa decimal.

O modelo mostra que o somatório do erro relativo encontrado para o período de estiagem corresponde a 10,87% e para o período de cheia sendo 1,9%, totalizando um erro relativo de 0,06%, encontrado através da análise de todos os dados juntos, incluindo as épocas de cheia e de estiagem.

### 3.3.2 Verificação da hidrodinâmica na Baía de Guanabara

Para a Baía de Guanabara foi utilizada a tábua da maré do Porto do Rio De Janeiro - Ilha Fiscal. A Figura 18 ilustra a localização deste marégrafo.

Tabela 7 - Comparação da altura da maré simulada com os valores do marégrafo da Baía de Guanabara



Fonte: O autor, 2021.

A tábua da maré da Ilha Fiscal, utilizada para a validação, apresentou o valor de 0,69 m de altura média para a maré naquela localização.

Com o intuito de ajustar os valores da altura da maré gerados pela simulação com os valores encontrados pelo marégrafo, foram simulados alguns valores de níveis, na tentativa de encontrar o melhor ajuste. O valor de 0,69 m como referência foi bem representado, posto que as alturas da maré resultantes da simulação se aproximaram com as medidas pelo marégrafo. A Tabela 7 ilustra o melhor ajuste para a Baía de Guanabara.

Figura 18 - Localização do marégrafo no Porto do Rio De Janeiro - Ilha Fiscal, Baía de Guanabara

<b>PORTO DO RIO DE JANEIRO - ILHA FISCAL</b>			
<b>Data</b>	<b>Horário</b>	<b>Altura (m) marégrafo</b>	<b>Altura (m) simulação</b>
<b>01.01.2021</b>	04:19	1,2	1,2
	11:04	0,4	0,4
	16:00	1,2	1,1
	23:11	0,1	0,1
<b>04.01.2021</b>	01:00	0,2	0,2
	06:26	1,0	1,0
	13:36	0,5	0,5
	18:00	1,1	1,0
<b>07.01.2021</b>	04:11	0,3	0,4
	09:17	0,8	0,8
	16:39	0,5	0,5
	21:28	0,9	0,9
<b>10.01.2021</b>	00:56	1,0	1,1
	07:28	0,4	0,4
	12:43	0,9	0,9
	19:36	0,2	0,2
<b>13.01.2021</b>	02:53	1,2	1,2
	10:00	0,4	0,4
	14:36	1,1	1,1
	21:56	0,0	0,0
<b>16.01.2021</b>	04:43	1,1	1,1
	11:53	0,5	0,5
	16:32	1,2	1,1

Fonte: O autor, 2021.

Para o ajuste da Baía de Guanabara, foi observado que os valores simulados se aproximaram dos valores do marégrafo de uma forma mais satisfatória, quando comparado ao do estuário do rio Macaé, contendo menos valores distintos, e, quando foi evidenciado um valor diferente, foi percebido uma diferença muito pequena, novamente de uma casa decimal e que essa diferença ocorreu uma vez ou menos no dia.

O resultado do somatório do erro relativo foi de 3%, um valor alto quando comparado com o erro encontrado no estuário do rio Macaé, porém ainda sendo considerado um erro relativo baixo comparando a totalidade de dados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos neste trabalho de pesquisa. Primeiramente o modelo foi aquecido com 1 dia de simulação, logo em seguida foi simulada, separadamente, a hidrodinâmica de cada região, a distribuição e o trajeto dos microplásticos. Os resultados encontrados são comparados e apresentados através de figuras e tabelas.

### 4.1 Resultados do estuário do rio Macaé

Para análise do estuário do rio Macaé foram utilizados 4 cenários previamente escolhidos, apresentados na Figura 14, considerando 2 casos de vazão, já descritos na Tabela 5, totalizando 8 diferentes simulações.

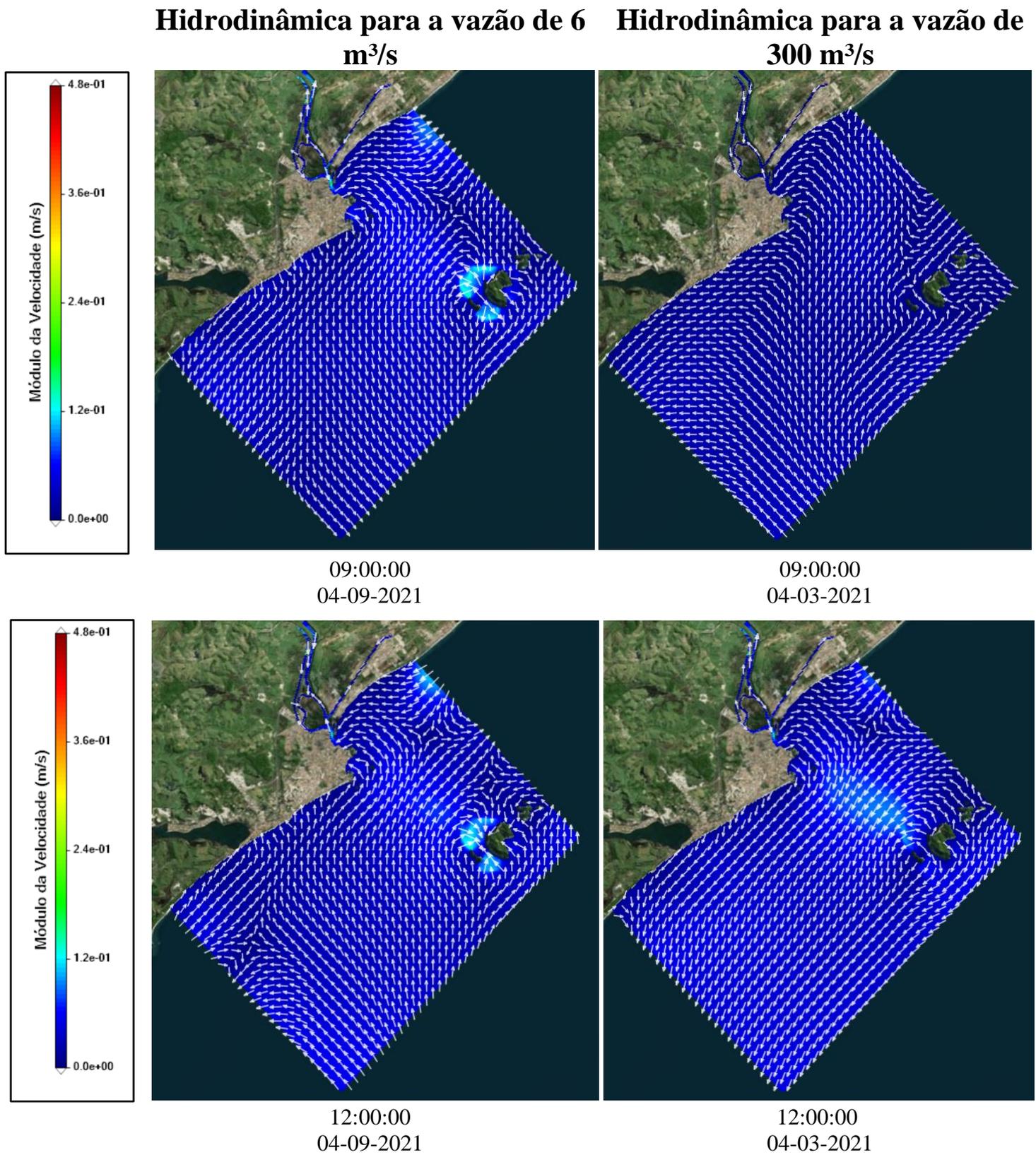
#### 4.1.1 Hidrodinâmica do Estuário do rio Macaé

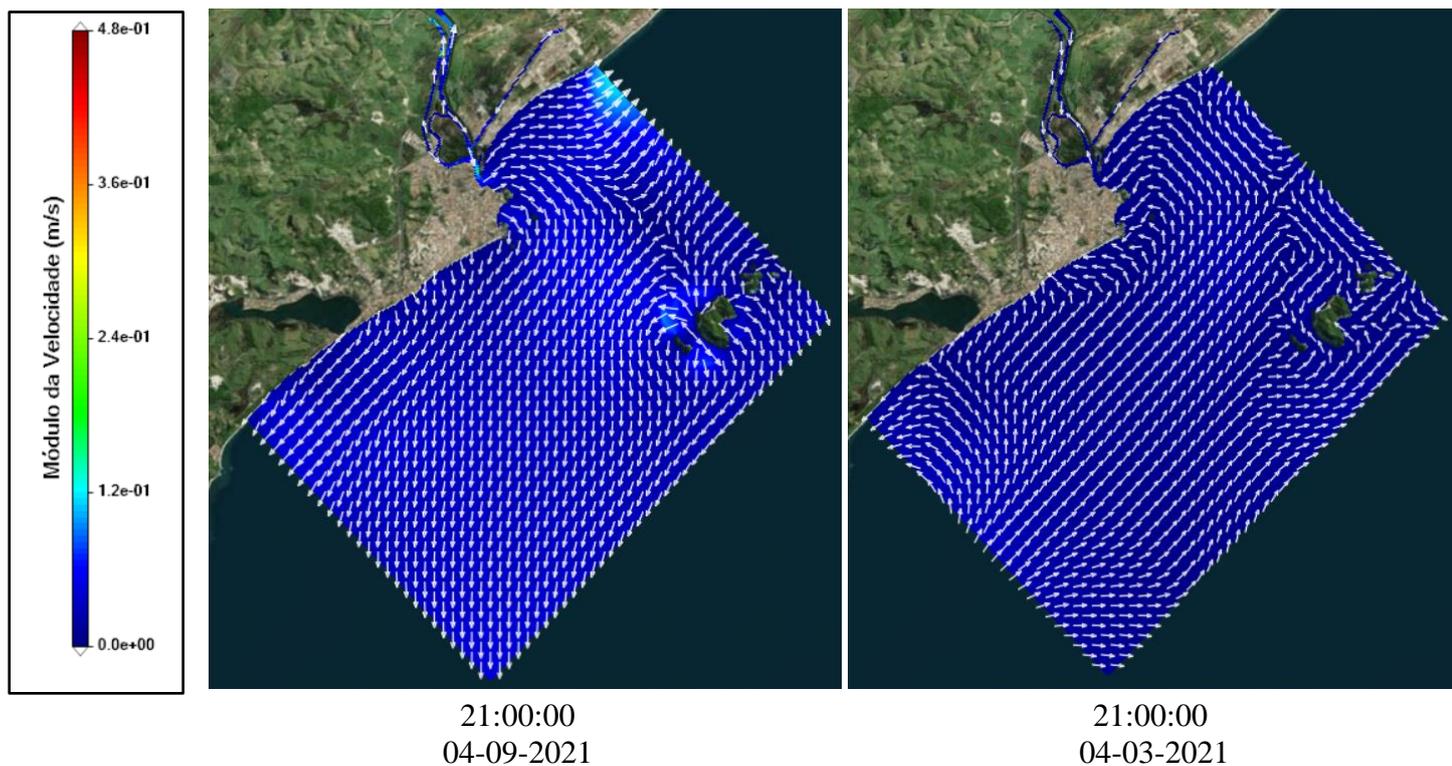
Optou-se por apresentar os resultados das simulações pertinentes aos dois casos de vazões em dois dias por terem características diferenciadas dos demais. Os dias escolhidos para exibir os resultados da simulação foram o terceiro dia e o décimo quinto dia de simulação. A Figura 19 apresenta três diferentes horários do terceiro dia de simulação.

Foi observada uma grande diferença no módulo da velocidade na região entre o estuário e o arquipélago de Sant'Ana em horários específicos em mais de um dia avaliado de simulação. No mês de março, em que a vazão do rio foi extrema houve uma discrepância nela quando comparada com a hidrodinâmica da vazão da época de estiagem. Na época de cheia a velocidade chegava a 0,1 m/s, enquanto em época de estiagem a velocidade oscila entre 0,03 m/s e 0,04 m/s. Também se observou inversão no sentido da velocidade em todo o domínio simulado.

Às 09h da manhã foi percebido que havia uma maior velocidade aos arredores do arquipélago de Sant'Ana quando a vazão estava baixa, comparando-se com o mesmo horário da época de cheia, em que a velocidade se manteve estável. Na época de estiagem, a velocidade aos arredores das ilhas chegou na ordem de 0,13 m/s e na entrada do estuário alcançou os 0,18 m/s. A situação permanece com particularidades semelhantes às 12h e às 21h do mesmo dia, alcançando velocidades menores na época de seca.

Figura 19 - Resultado do terceiro dia de simulação da hidrodinâmica no domínio do estuário do rio Macaé na época de estiagem e de cheia





Fonte: O autor, 2021.

Para avaliação da circulação de água no interior do estuário, foram apresentados os módulos de velocidade nos mesmos horários ilustrados na Figura 19 através da Figura 20, realçando a região interessada.

Foi observado que no período de cheia as águas não alcançaram altas velocidades dentro do local analisado, diferente do período de estiagem, em que houveram altas velocidades em torno da entrada do estuário. Enquanto no período de estiagem a velocidade na entrada do estuário variou na casa dos 0,16 m/s, no período de cheia a velocidade chegou a 0,012 m/s. Essa queda de velocidade na entrada do estuário quando comparado os dois períodos foi observada em todos os resultados das simulações.

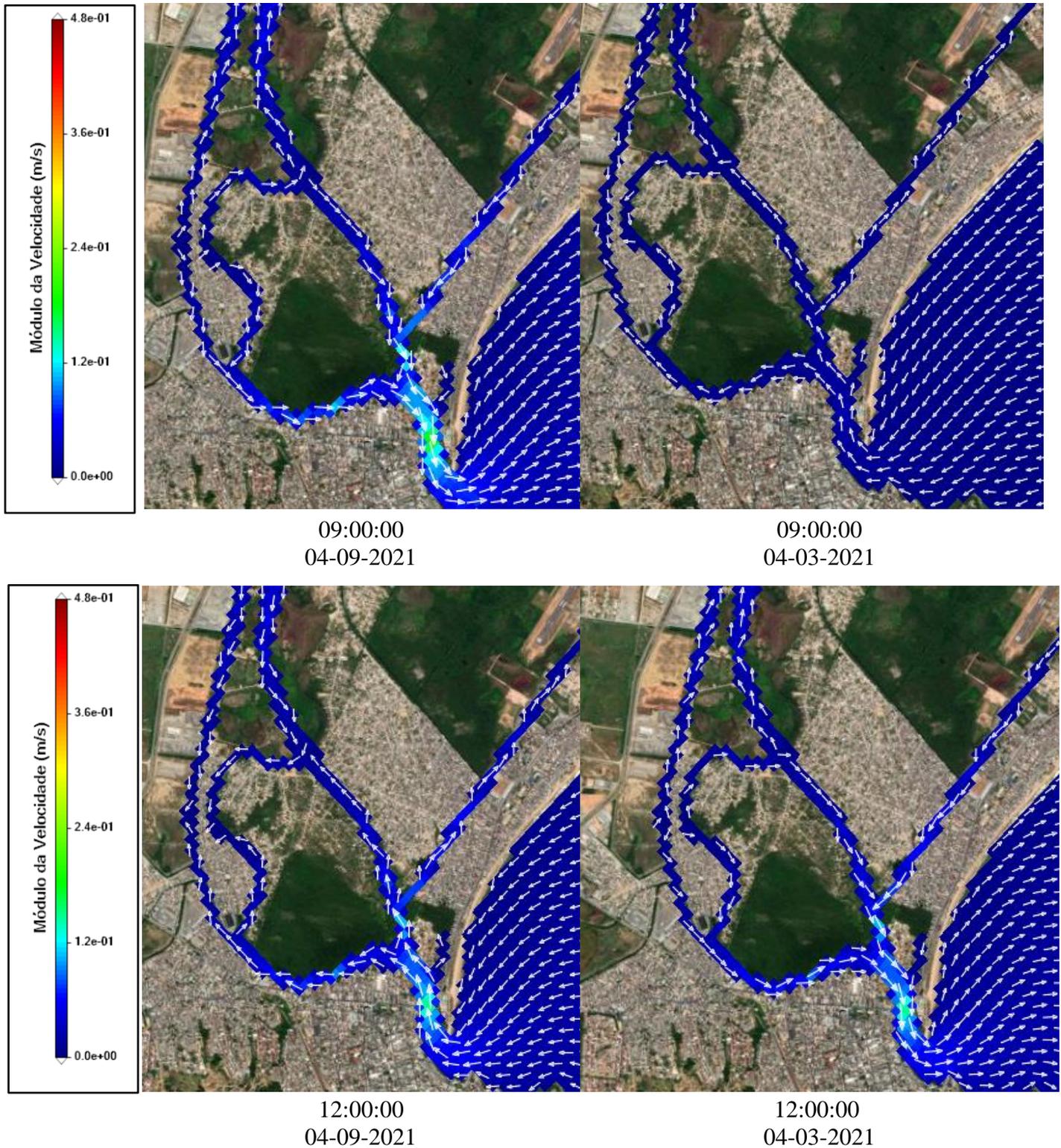
O sentido da velocidade na entrada do estuário variou em todos os dias de simulação, representando uma boa circulação de água no estuário, com a constante entrada e saída de água e, conseqüentemente a movimentação de objetos flutuantes aos seus arredores.

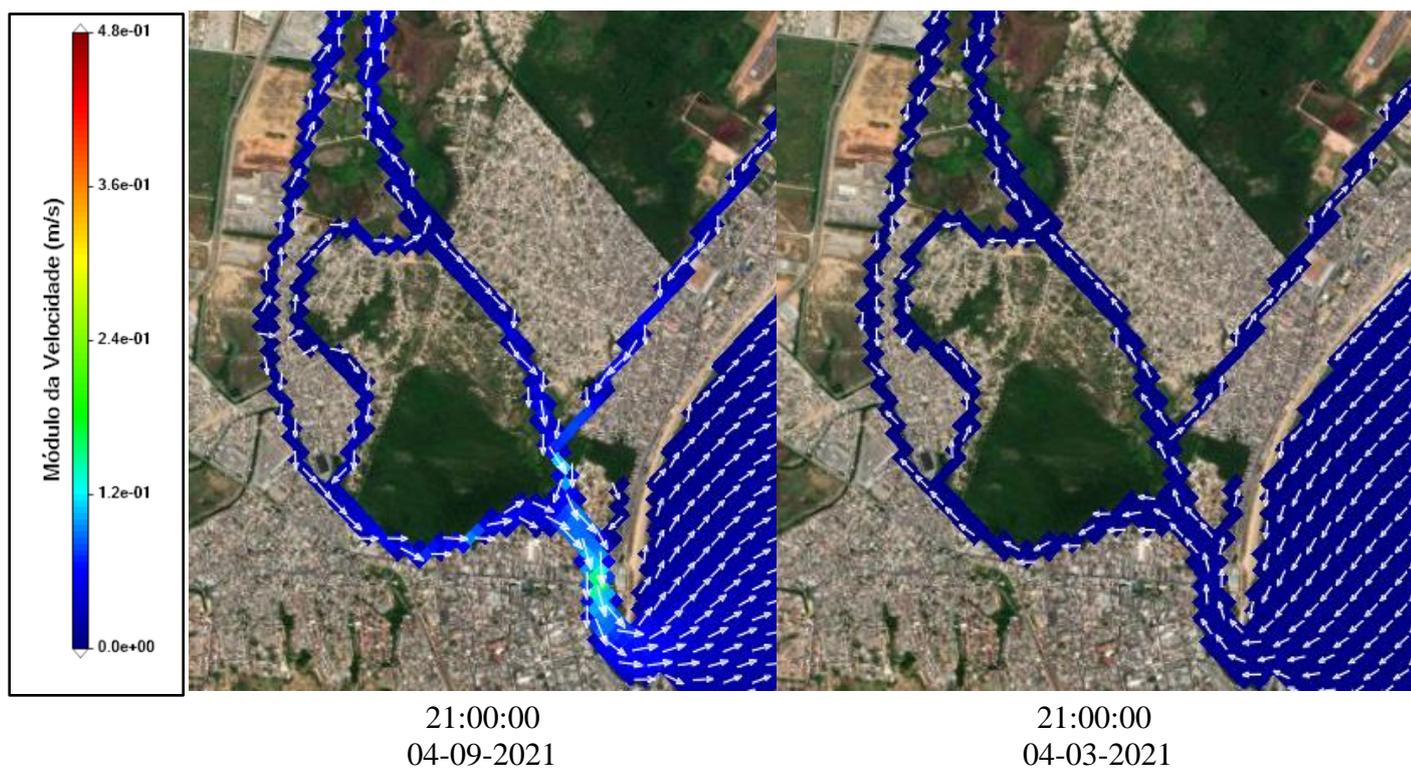
O antigo canal do rio apresentou baixas velocidades em todos os dias simulados, assim como o rio Macaé-Campos, em que houve uma boa variação de entrada e saída de água em seu entorno, porém, não apresentou alta em sua velocidade, diferentemente do rio Macaé que apresentou uma boa variação na velocidade de circulação de água em seu interior.

Figura 20 - Resultado do terceiro dia de simulação da hidrodinâmica dentro do estuário do rio Macaé na época de estiagem e de cheia

**Hidrodinâmica para a vazão de 6 m<sup>3</sup>/s**

**Hidrodinâmica para a vazão de 300 m<sup>3</sup>/s**





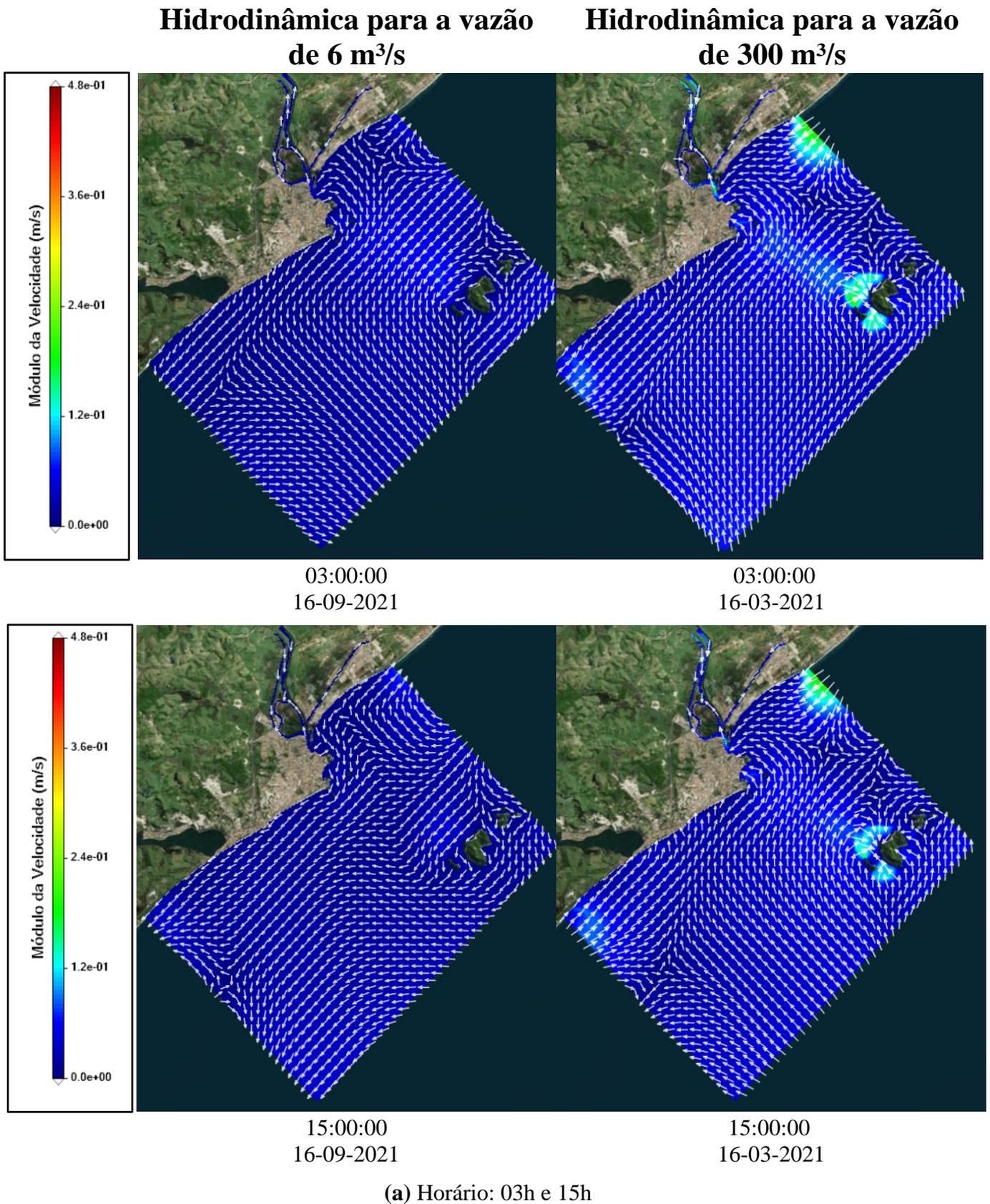
Fonte: O autor, 2021.

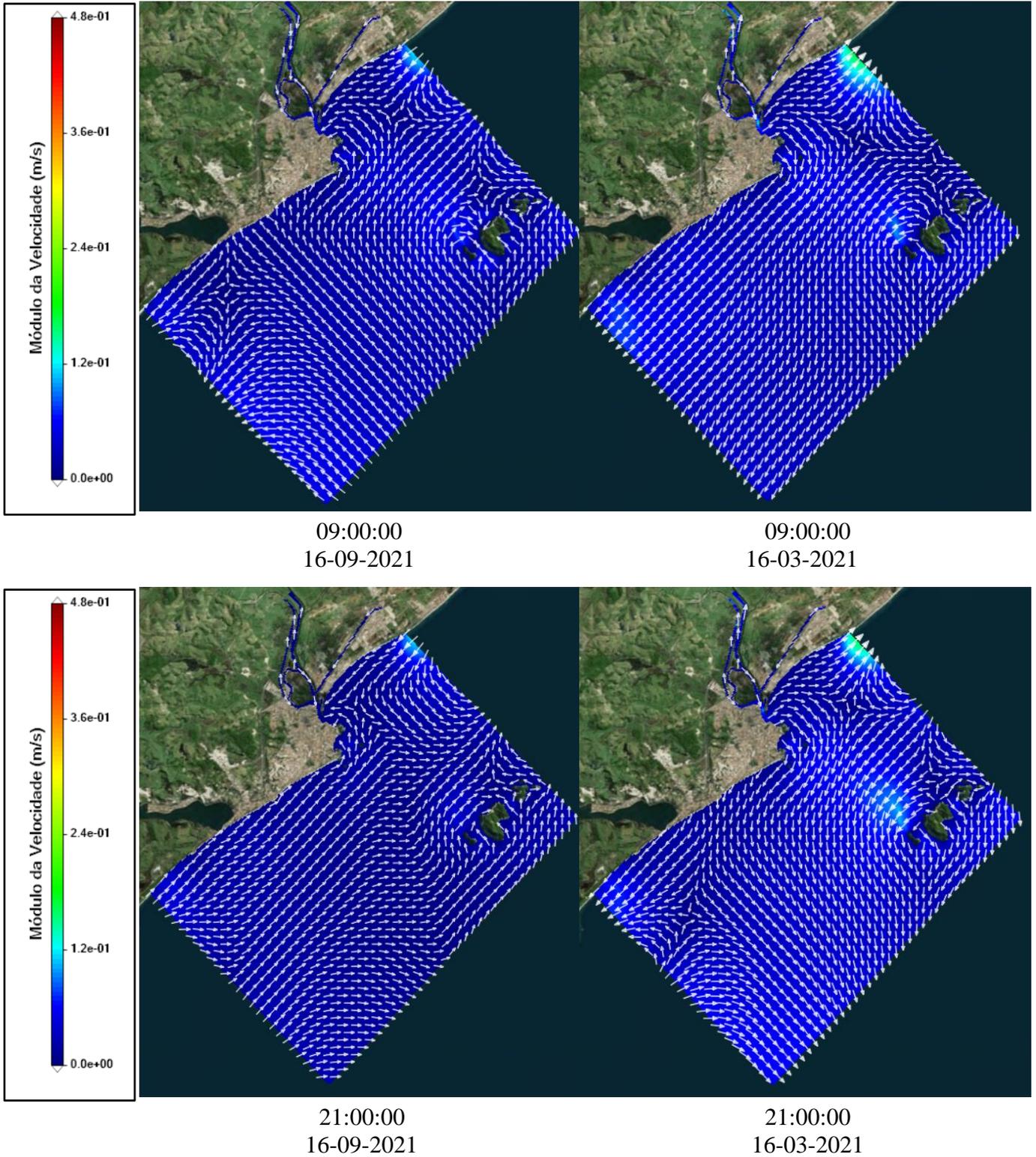
As hidrodinâmicas do décimo quinto dia simulado, pertinentes à vazão de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  são apresentadas na Figura 21 – (a) Horário: 03h e 15h e (b) 09h e 21h.

Neste dia analisado ocorreu uma sincronia de velocidades a cada 12h, em que as alturas aferidas, com a vazão alta, às 03h e às 15h foram semelhantes em todo o domínio simulado. A direção da velocidade foi diferente na época de estiagem, porém, na época de cheia, a direção da velocidade se manteve a mesma em todo o domínio. Às 03h a velocidade próxima às ilhas de Sant’Ana alcançou os  $0,18 \text{ m/s}$  e às 15h os  $0,16 \text{ m/s}$ .

A circunstância se repetiu às 09h e às 21h em que o módulo da velocidade representou valores semelhantes, principalmente na época de cheia, em que a velocidade em torno do arquipélago de Sant’Ana apresentou maiores intensidades. A direção da velocidade se manteve diferente na época de estiagem, enquanto na época de cheia obteve uma boa representação. O mesmo ocorreu às 06h e às 18h.

Figura 21 - Resultado do décimo sexto dia de simulação da hidrodinâmica no Estuário do rio Macaé na época de estiagem e de cheia, (a) horário: 03h e 15h e (b) 09h e 21h





**(b)** Horário: 09h e 21h

Fonte: O autor, 2021.

#### 4.1.2 Cenários simulados no Estuário do rio Macaé

Nesta subseção serão apresentados os resultados gerados nos cenários simulados dentro do estuário do rio Macaé através de figuras.

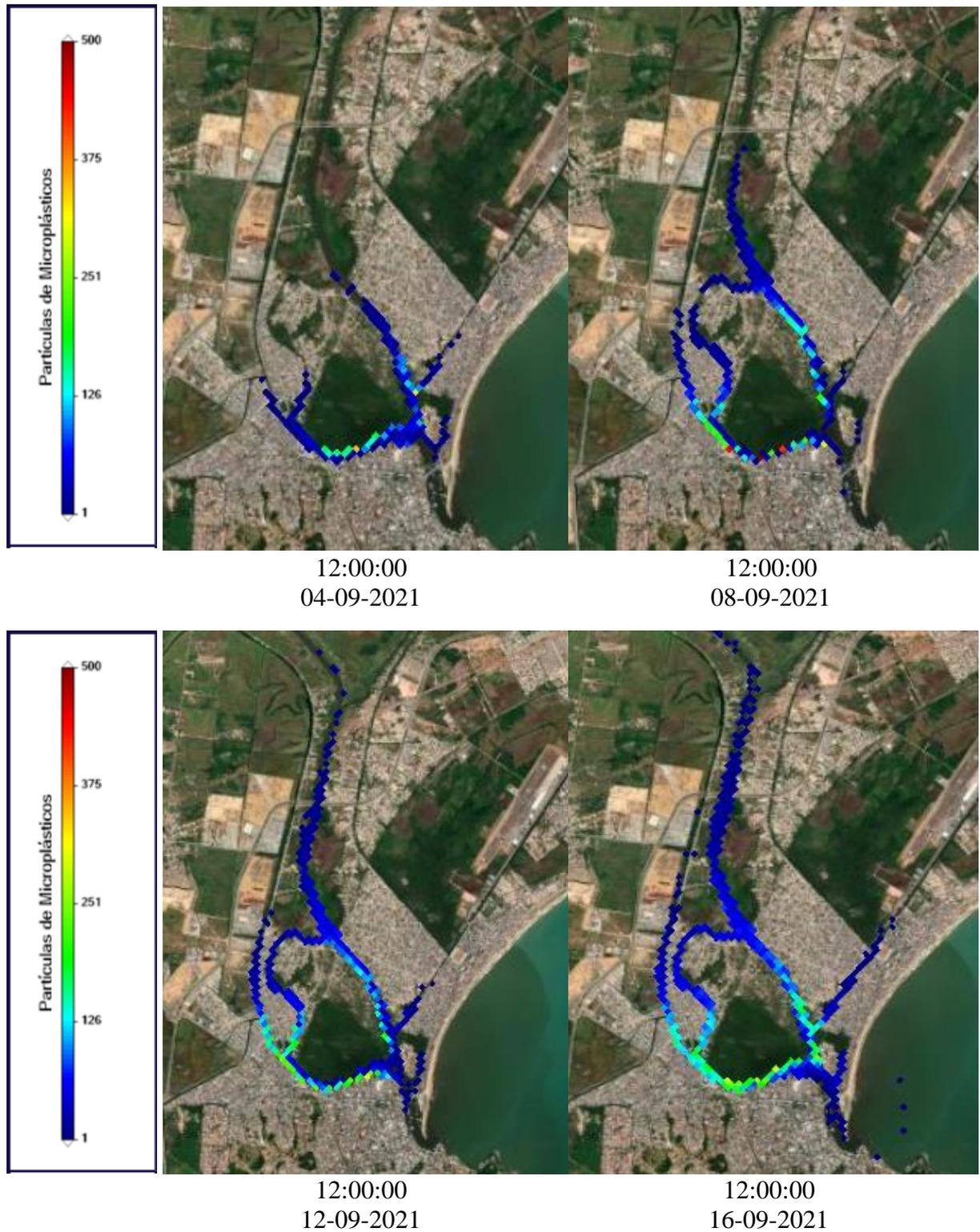
##### 4.1.2.1 Cenário 1 – Entrada do Estuário

Os resultados da simulação para o Cenário 1, localizado entre o antigo canal Macaé e o rio Macaé, com a vazão de 6 m<sup>3</sup>/s estão ilustrados na Figura 22. Foram escolhidos quatro dias intercalados de simulação para apresentação dos resultados: 04, 08, 12 e 16 de setembro, considerando às 12h de cada dia.

Foi observado que houve uma boa distribuição de microplásticos neste cenário, que tomou uma grande proporção nos primeiros dias de simulação, atingindo outras áreas pertinentes ao rio uniformemente. Houve áreas de maior concentração de microplásticos, a primeira, foi próximo a área de lançamento desses fragmentos e, após alguns dias essa concentração também atingiu o braço do rio Macaé, totalizando dois pontos com altos valores de microplásticos por célula, um no canal do antigo rio Macaé e outro no rio Macaé.

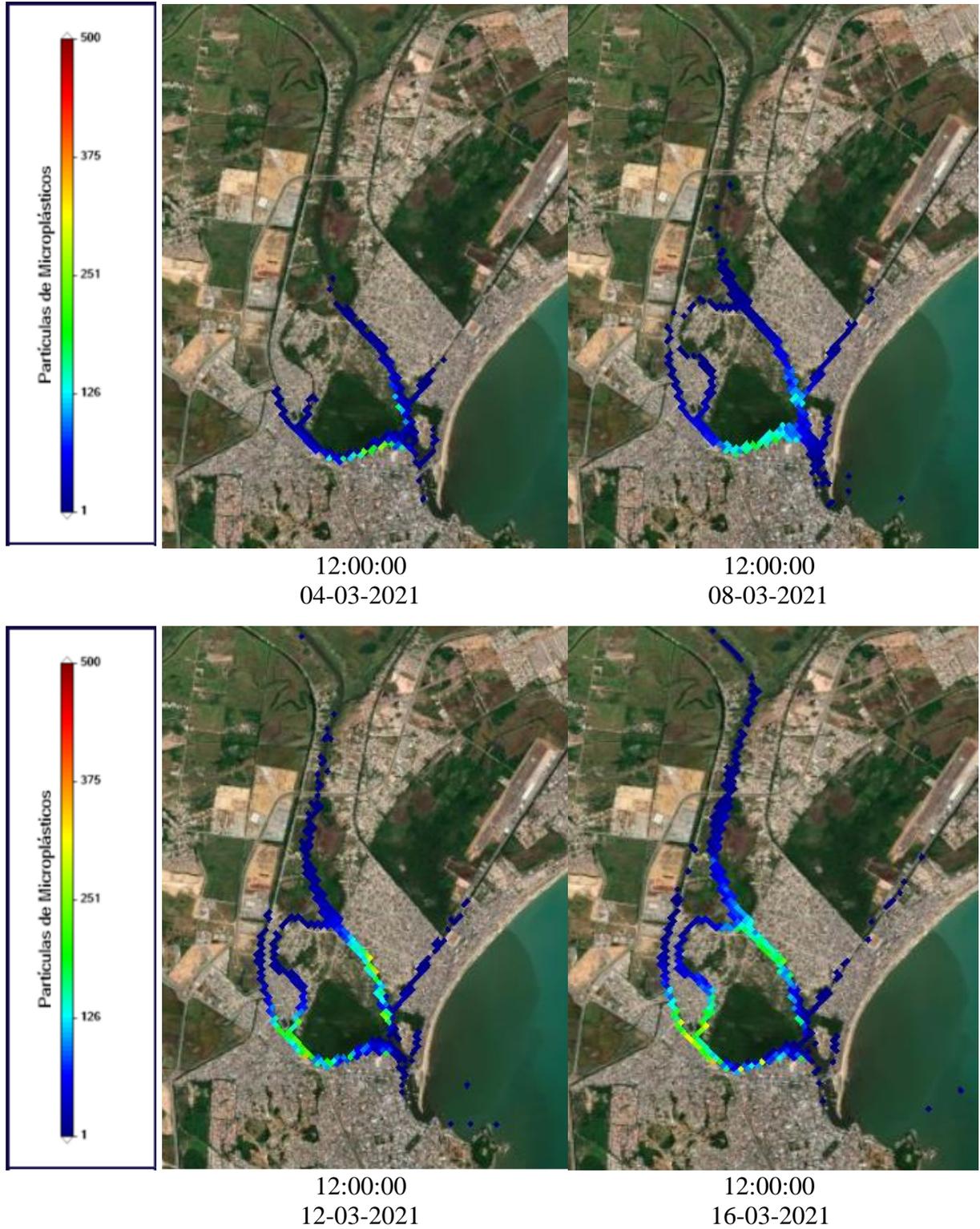
A maior quantidade de microplásticos encontrada nesses quatro dias avaliados foi no sétimo dia de simulação, 07 de setembro de 2021, em que a descarga de microplásticos atingiu a marca de mais de 500 fragmentos em uma célula. Também foi observado que este espalhamento atingiu grande proporção quando os dias foram se avançando.

Percebeu-se que somente no último dia de simulação este microplástico avançou para o oceano, porém, em poucas quantidades, ocorrendo de forma dispersiva. Em toda simulação a maior quantidade de microplásticos registrada em uma célula foi de 834 unidades.

Figura 22 - Resultados do Cenário 1 com a vazão de 6 m<sup>3</sup>/s dentro do Estuário do Rio Macaé**Cenário 1 para uma vazão de 6 m<sup>3</sup>/s**

Fonte: O autor, 2021.

A Figura 23 mostra os resultados obtidos com a vazão de 300 m<sup>3</sup>/s, um caso de vazão extrema quando se trata do rio Macaé.

Figura 23 - Resultados do Cenário 1 com a vazão de 300 m<sup>3</sup>/s dentro do Estuário do Rio Macaé**Cenário 1 para uma vazão de 300 m<sup>3</sup>/s**

Fonte: O autor, 2021.

Os resultados apresentados mostraram que os microplásticos obtiveram uma dispersão significativa, porém a concentração de fragmentos demorou a ocorrer, não acontecendo no oitavo dia de simulação, como apresentado na época de estiagem. A entrada de microplásticos no oceano ocorreu durante a simulação, sendo que eles se deslocaram em poucas quantidades e a maior quantidade registrada em uma célula foi de 794 unidades.

Foi realizada uma comparação do cenário 1 considerando-se as duas vazões simuladas, no decorrer de quatro dias distintos, às 12h de cada dia. Essa comparação é apresentada na Figura 24.

Figura 24 - Comparação do Cenário 1 com a vazão de 6 m<sup>3</sup>/s e de 300 m<sup>3</sup>/s dentro do Estuário do rio Macaé

**Comparação do Cenário 1 para uma vazão de 6 m<sup>3</sup>/s e de 300 m<sup>3</sup>/s**



Fonte: O autor, 2021.

Foi notado que houve uma maior concentração de microplásticos em determinados locais durante a época de estiagem. Este fato é confirmado quando pensamos em grandes rios que acumulam lixo nas épocas de seca, em que seu fluxo é o menor possível, não havendo o auxílio da água para carregar as impurezas.

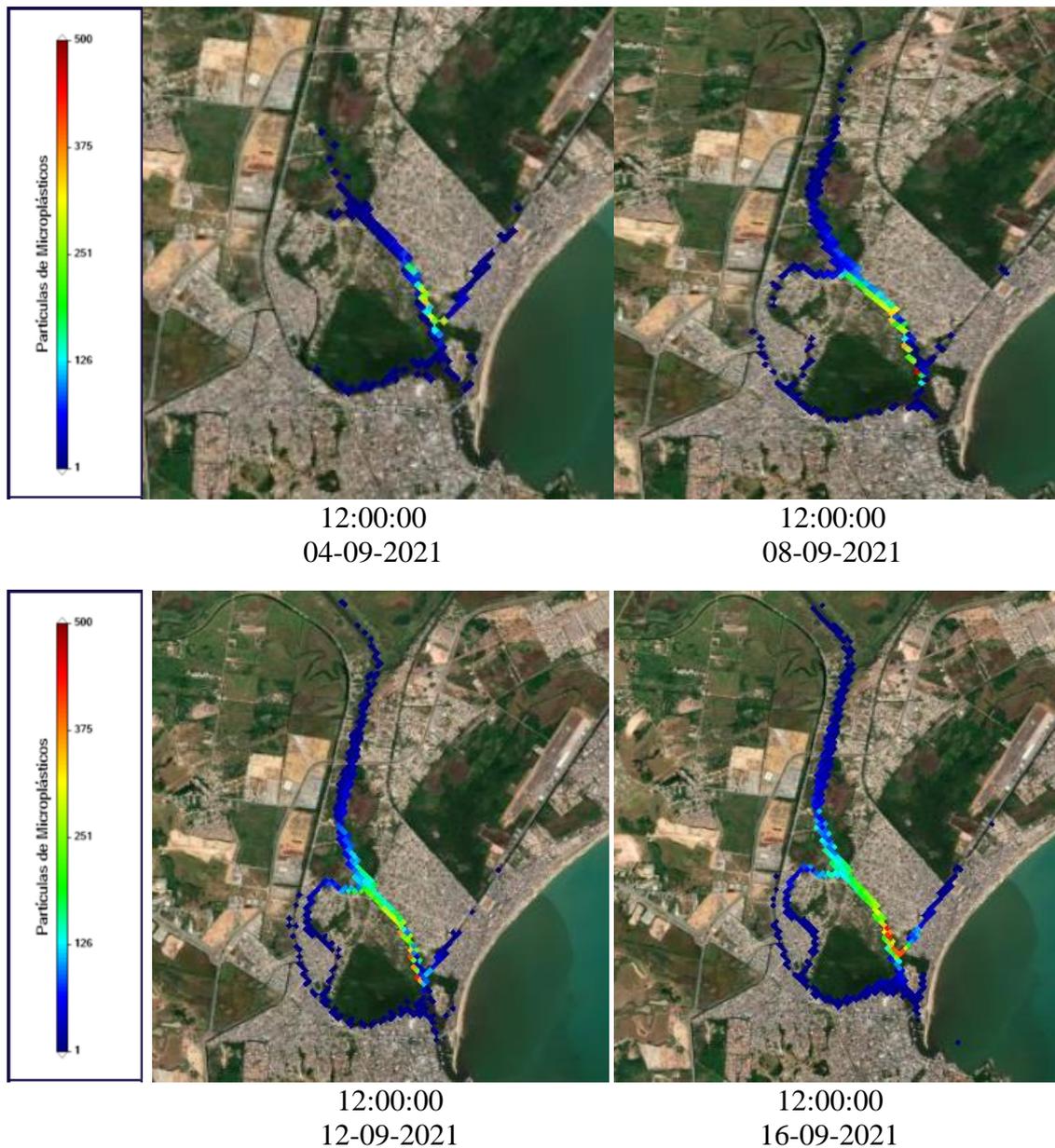
Também foi observada uma diferença no avanço dos microplásticos nos oceanos, ocorrendo mais rápido quando o fluxo do rio é alto, com um avanço maior na metade dos dias simulados.

#### 4.1.2.2 Cenário 2 – Encontro do canal Macaé-Campos com o rio Macaé

Os resultados da simulação do Cenário 2, localizado na entrada do rio Macaé-Campos, para os dias 04, 08, 12 e 16 de setembro, considerando as 12h de cada dia, com a vazão de 6 m<sup>3</sup>/s estão ilustrados na Figura 25.

Figura 25 - Resultados do Cenário 2 com a vazão de 6 m<sup>3</sup>/s dentro do Estuário do Rio Macaé

#### Cenário 2 para uma vazão de 6 m<sup>3</sup>/s



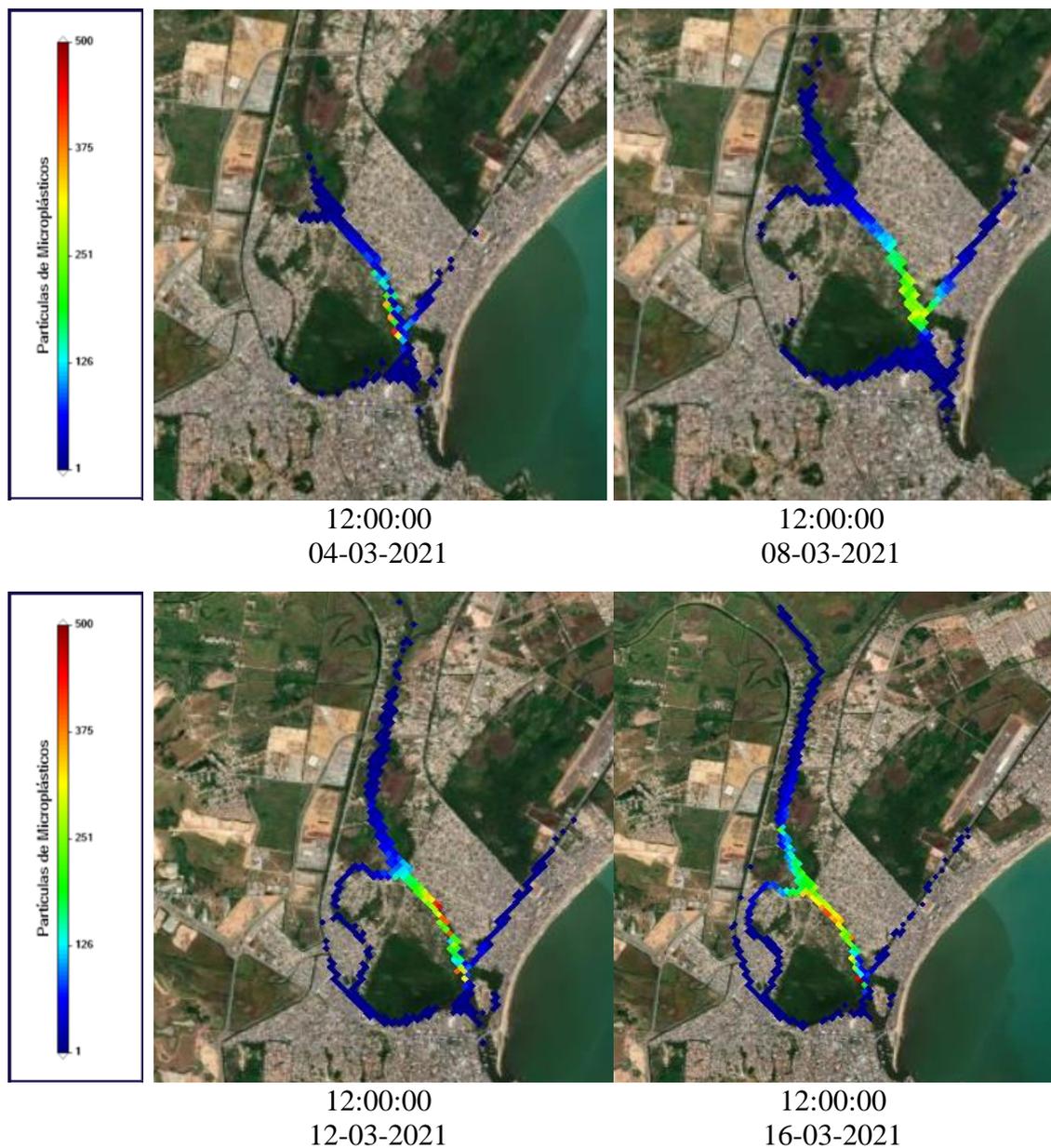
Fonte: O autor, 2021.

Através dos resultados gerados, foi observado que houve uma concentração considerável de microplásticos próximo à localização da descarga desses fragmentos, ocasionando em uma região o acúmulo de lixo plástico. O lixo se estendeu para a parte de dentro do rio Macaé-Campos e se espalhou por todo interior do estuário. Percebe-se que uma pequena quantidade de microplásticos começa a avançar para o oceano somente no último dia de simulação. Foi evidenciada que a maior quantidade de microplásticos em uma célula foi de 1.062 unidades.

A Figura 26 ilustra os resultados obtidos para uma vazão de 300 m<sup>3</sup>/s no rio Macaé.

Figura 26 - Resultados do Cenário 2 com a vazão de 300 m<sup>3</sup>/s dentro do Estuário do Rio Macaé

### Cenário 2 para uma vazão de 300 m<sup>3</sup>/s



Fonte: O autor, 2021.

Em torno da localização da descarga de microplásticos, foi percebido que conforme os dias foram passando, houve uma distribuição expressiva desses fragmentos dentro do estuário, concentrando-se principalmente na região central do rio Macaé, onde uma alta quantidade de partículas foi registrada. Os fragmentos ficaram presos no estuário, não avançando para o oceano. O número máximo de partículas de microplásticos em uma célula foi de 1.201 fragmentos.

A Figura 27 ilustra a comparação das duas vazões simuladas para o cenário 2, no decorrer de quatro dias diferentes, às 12h de cada dia.

Figura 27 - Comparação do Cenário 2 com a vazão de 6 m<sup>3</sup>/s e de 300 m<sup>3</sup>/s dentro do Estuário do rio Macaé

**Comparação do Cenário 2 para uma vazão de 6 m<sup>3</sup>/s e de 300 m<sup>3</sup>/s**



Fonte: O autor, 2021.

Foi observado, no terceiro dia de simulação, que houve uma diferença na concentração de microplásticos na região central do rio Macaé, em ambas as épocas simuladas. Essa diferença não ocorreu de forma padronizada. Houve uma grande quantidade de fragmentos plásticos se concentrando no rio Macaé, para a vazão de 300 m<sup>3</sup>/s, chegando a 470 partículas por célula, entretanto, quando a vazão era inferior, a concentração era menor, na ordem de 270 à 370 partículas por célula.

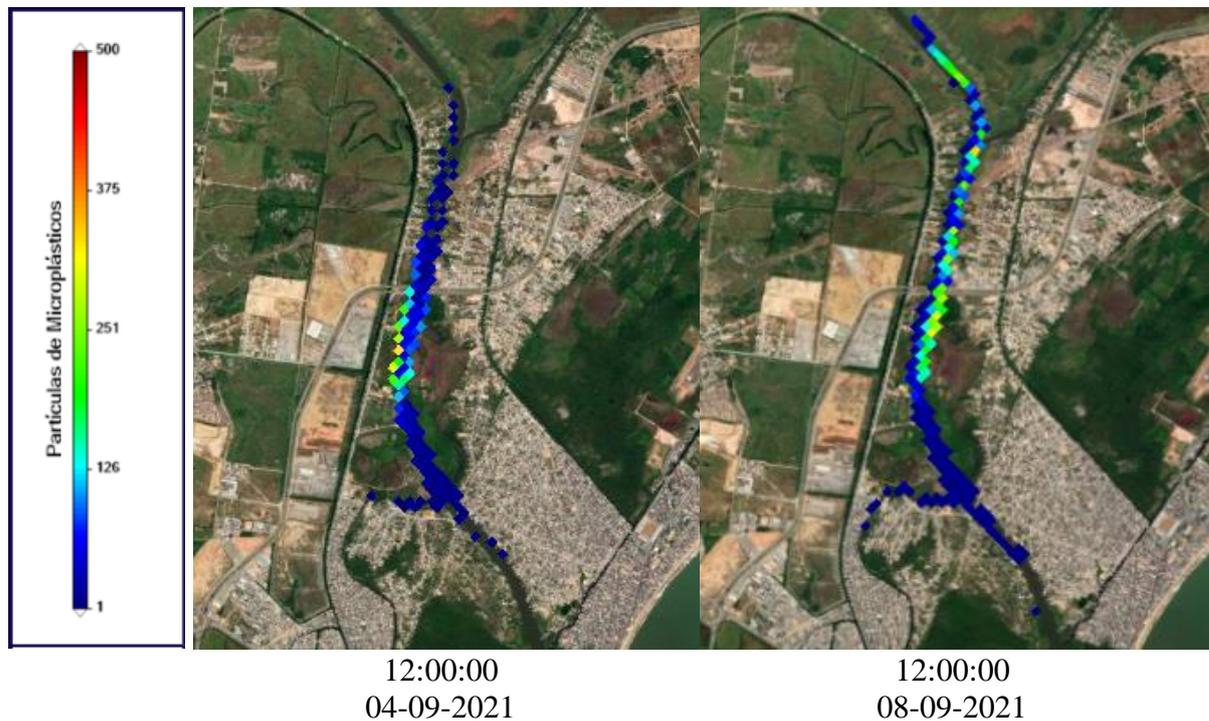
No sétimo dia de simulação ocorreu o contrário, houve uma concentração maior quando a vazão era de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Também foi percebida uma entrada de lixo plástico no rio Macaé-Campos no período de cheias, o que não ocorreu no período de estiagem.

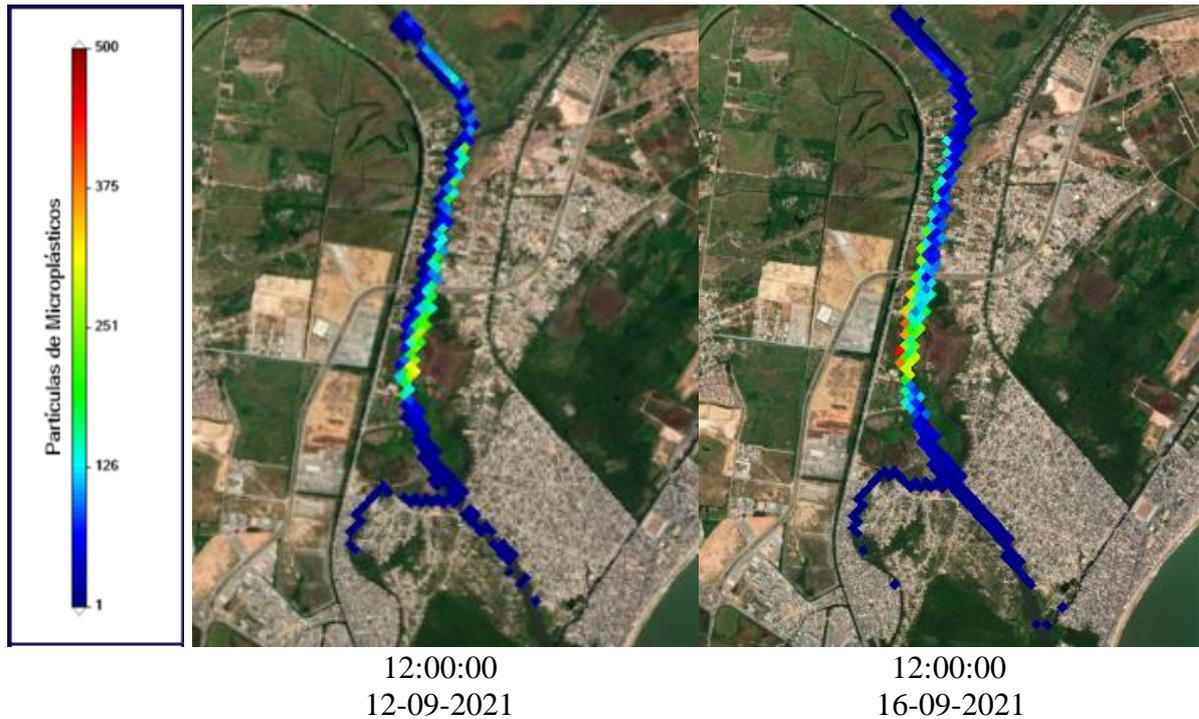
#### 4.1.2.3 Cenário 3 – Rio Macaé

A Figura 28 ilustra os resultados obtidos pela simulação computacional, considerando a vazão de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ , pertinente ao cenário 3, onde a descarga de microplásticos foi localizada próxima a descarga do rio Macaé.

Figura 28 - Resultados do Cenário 3 com a vazão de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  dentro do Estuário do Rio Macaé.

#### **Cenário 3 para uma vazão de $6 \text{ m}^3/\text{s}$**





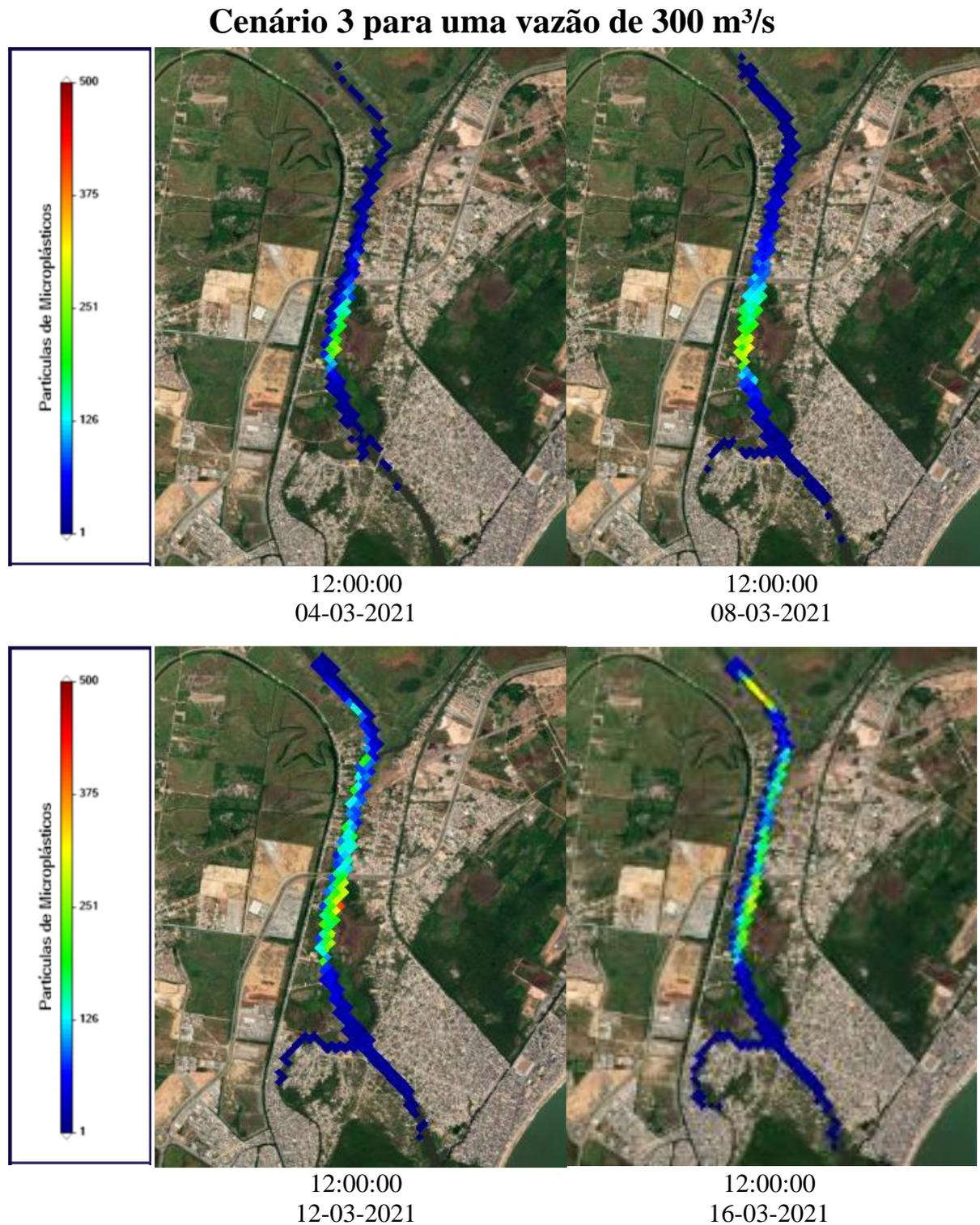
Fonte: O autor, 2021.

A localização de descarga de microplásticos está próxima ao rio, logo foi observado que esses fragmentos circulavam em sua extensão, se estendendo em direção ao encontro do rio Macaé e ao antigo canal do rio. Houve uma maior concentração de microplásticos próxima à localização da descarga desses fragmentos, gerando locais com alta probabilidade de retenção desse lixo. A quantidade máxima de microplásticos registrada em uma célula foi de 704 unidades de microplásticos.

A distribuição de microplásticos não atingiu o rio Macaé-Campos e também não alcançou o estuário porque a velocidade da hidrodinâmica neste ponto não atinge altos valores, atribuindo pontos específicos de concentrações. Não há como afirmar que esses microplásticos irão em direção ao mar aberto caso seja considerado um maior período de simulação.

A Figura 29 a seguir ilustra os resultados obtidos com uma vazão de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ , compreendida no mês de março.

Figura 29 - Resultados do Cenário 3 com a vazão de 300 m<sup>3</sup>/s dentro do Estuário do Rio Macaé.



Foi observado que houve uma distribuição lenta de microplásticos e uma grande concentração desses fragmentos dentro do rio Macaé, atingindo cerca de 370 fragmentos em uma célula no oitavo dia de simulação e altas concentrações de microplástico no último. O máximo registrado foi de 1.129 fragmentos de microplásticos em uma célula.

A Figura 30 mostra a comparação dos dois casos propostos no cenário 2, sendo a vazão mínima e a vazão máxima, durante quatro dias distintos, às 12h de cada dia.

Figura 30 - Comparação do Cenário 3 com a vazão de 6 m<sup>3</sup>/s e de 300 m<sup>3</sup>/s dentro do Estuário do rio Macaé

**Comparação do Cenário 3 para uma vazão de 6 m<sup>3</sup>/s e de 300 m<sup>3</sup>/s**



Fonte: O autor, 2021.

Foi observado, que no terceiro dia de simulação houve uma maior concentração de microplásticos no lado esquerdo do rio, quando a sua vazão era baixa, ao contrário de quando a vazão do rio era alta, ocorrendo, assim uma maior concentração do lado direito do rio.

Analisando o sétimo dia de simulação, para a vazão de 6 m<sup>3</sup>/s foi observada uma alta distribuição desses fragmentos para a parte interna e inicial do domínio do rio. Já para a vazão extrema, 300 m<sup>3</sup>/s, houve uma alta concentração próximo à localização da descarga de microplásticos.

Houve uma variação significativa quando os dias se passaram, percebendo-se que o acúmulo de microplástico ocorre sempre do ponto de descarga desses fragmentos para dentro do rio, em direção à descarga do fluxo de água.

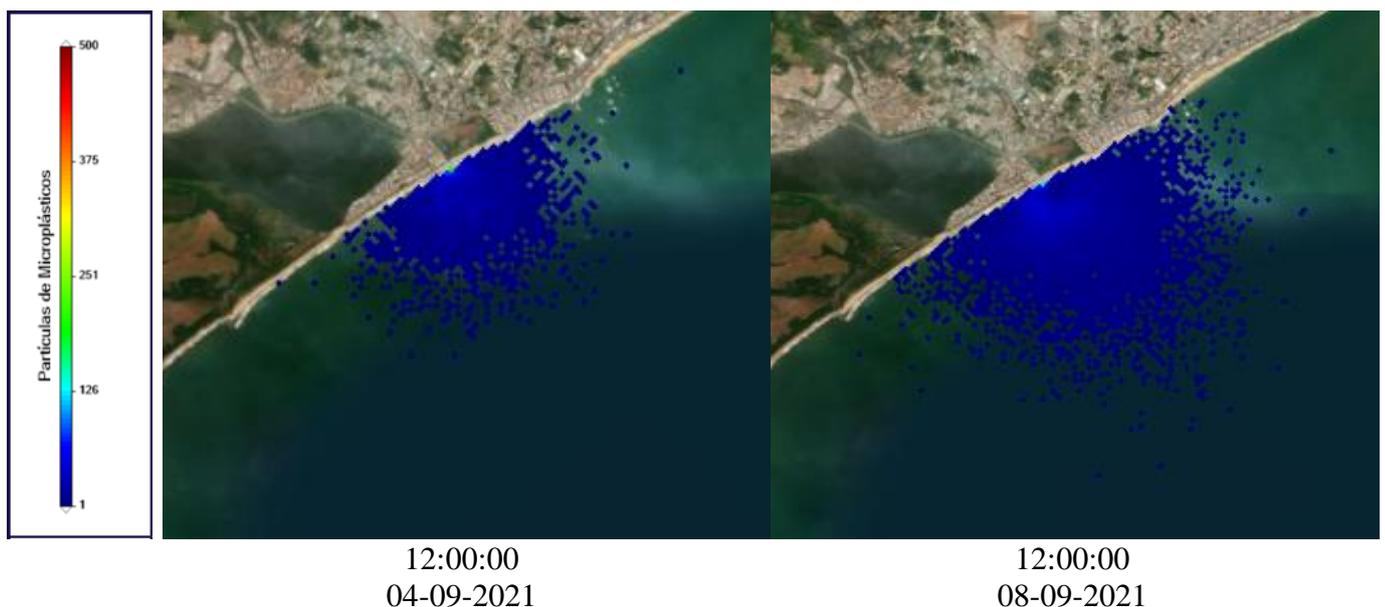
#### 4.1.2.4 Cenário 4 – Praia do Pecado

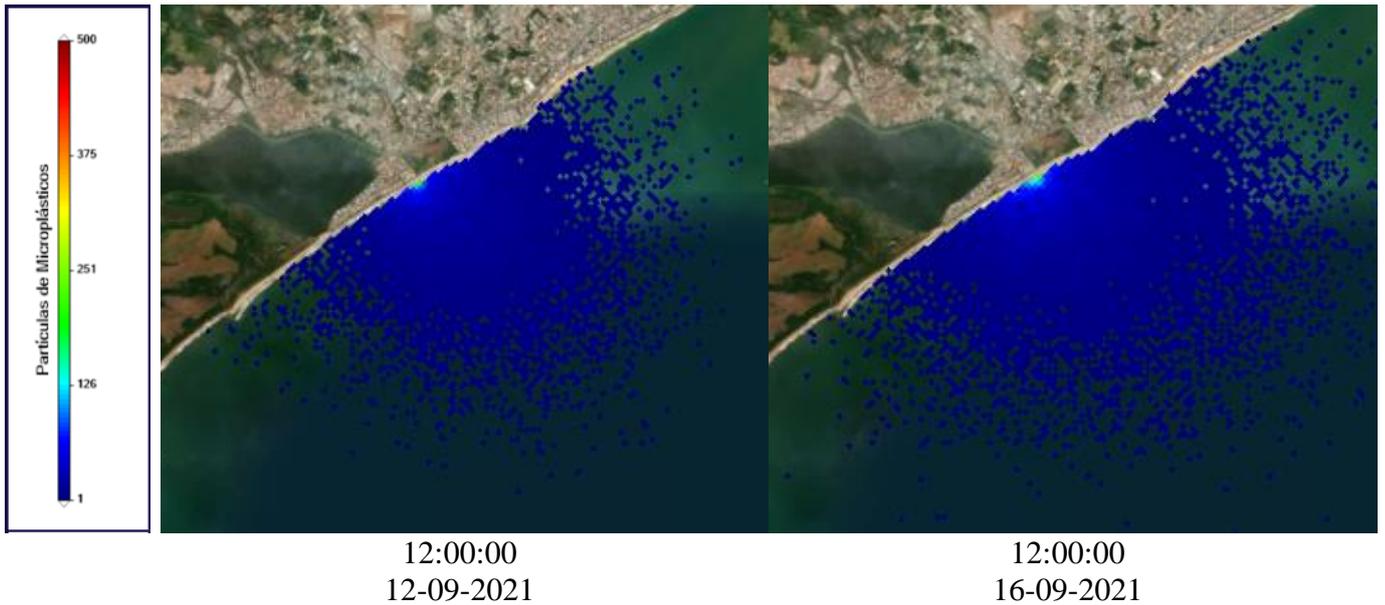
A Figura 31 ilustra os resultados obtidos no último cenário proposto, cenário 4, considerando a vazão de 6 m<sup>3</sup>/s, onde a descarga de microplásticos está localizada em uma das praias mais movimentadas do município, a Praia do Pecado.

Observou-se uma alta distribuição e dispersão de microplásticos dentro do oceano. Não houve um trajeto percorrido por eles. No decorrer dos dias que se passaram foi formada uma alta pluma de lixo plástico em torno da localização da descarga de microplásticos, próximo à costa da praia.

A região escolhida foi estratégica por ser uma região representada por uma baixa velocidade em seu entorno, tanto na época da cheia, quanto na época da estiagem e por se tratar de uma costa. Isso representa o que já era esperado, que este microplástico não traça um caminho em direção ao oceano, já que somente a hidrodinâmica não seria suficiente para circular toda a sujeira lançada.

Figura 31 - Resultados do Cenário 4 com a vazão de 6 m<sup>3</sup>/s dentro do Estuário do Rio Macaé  
**Cenário 4 para uma vazão de 6 m<sup>3</sup>/s**



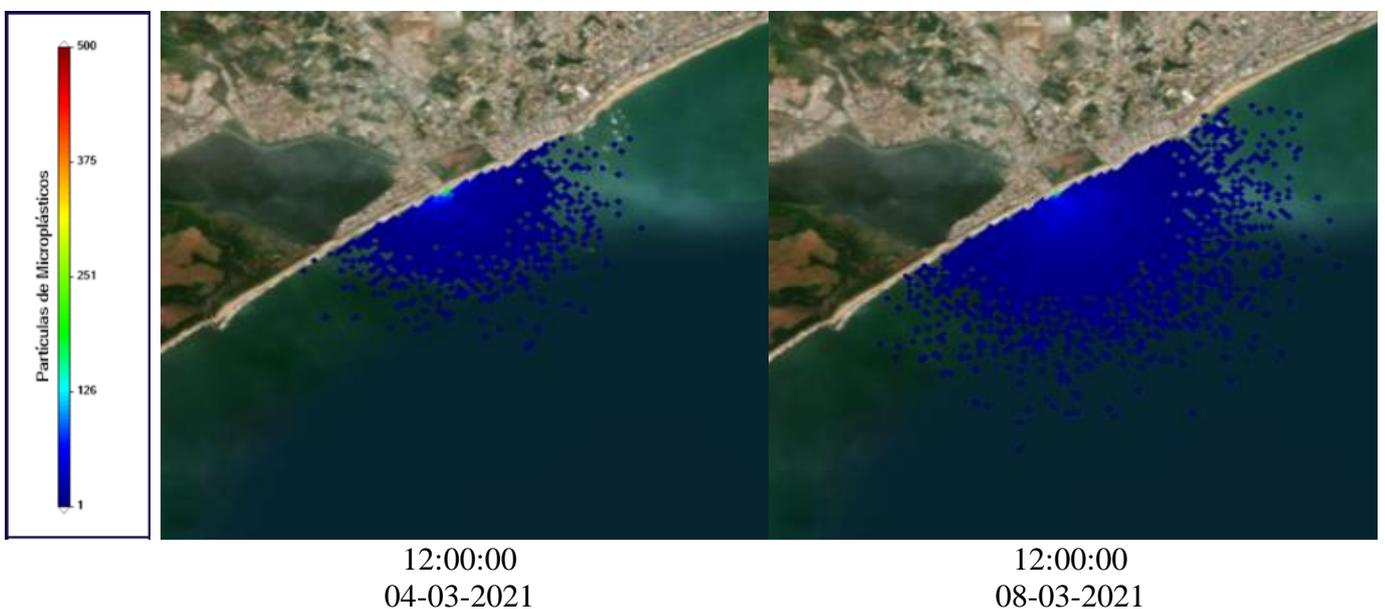


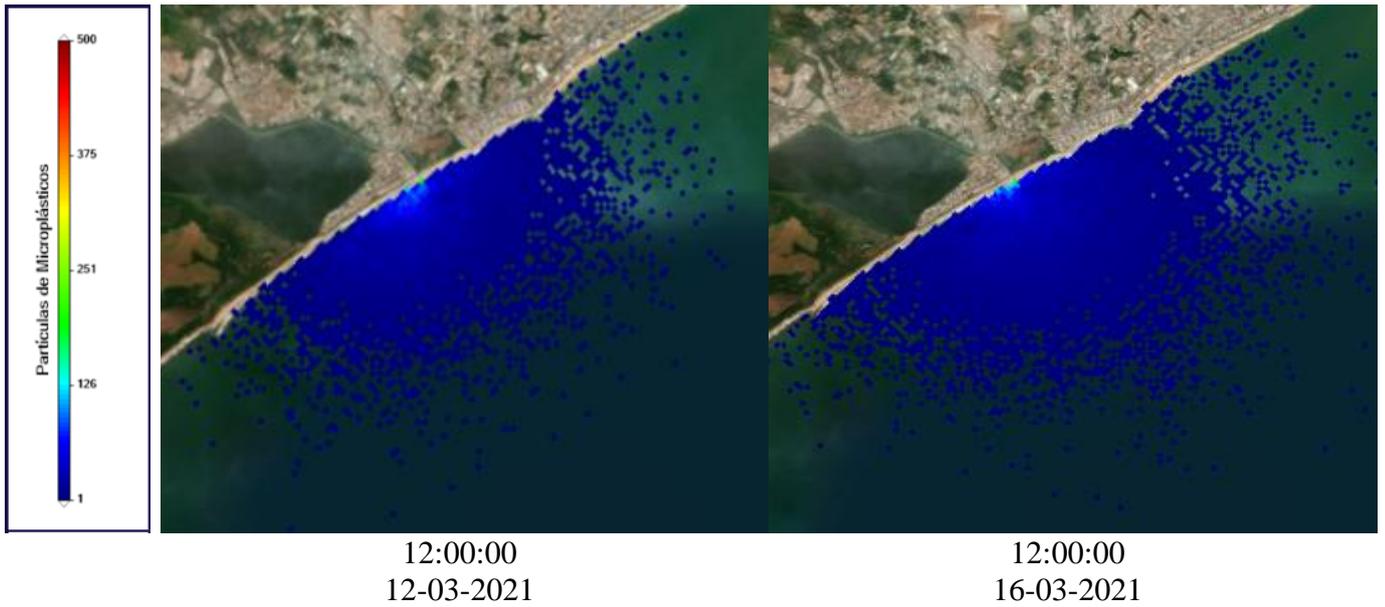
Fonte: O autor, 2021.

Devido à grande dispersão desses fragmentos, foi observado que a quantidade máxima de microplásticos em uma célula foi menor do que em outros cenários, mesmo considerando alguns dias após o início da simulação, havendo célula variando de somente um microplástico a 280 unidades. Vale ressaltar que as células com mais quantidades de microplásticos evidenciadas foram encontradas próximo ao local de descarga desses fragmentos.

Os resultados do cenário 4 para uma vazão de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  são apresentados na Figura 32.

Figura 32 - Resultados do Cenário 4 com a vazão de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  dentro do Estuário do Rio Macaé  
**Cenário 4 para uma vazão de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$**





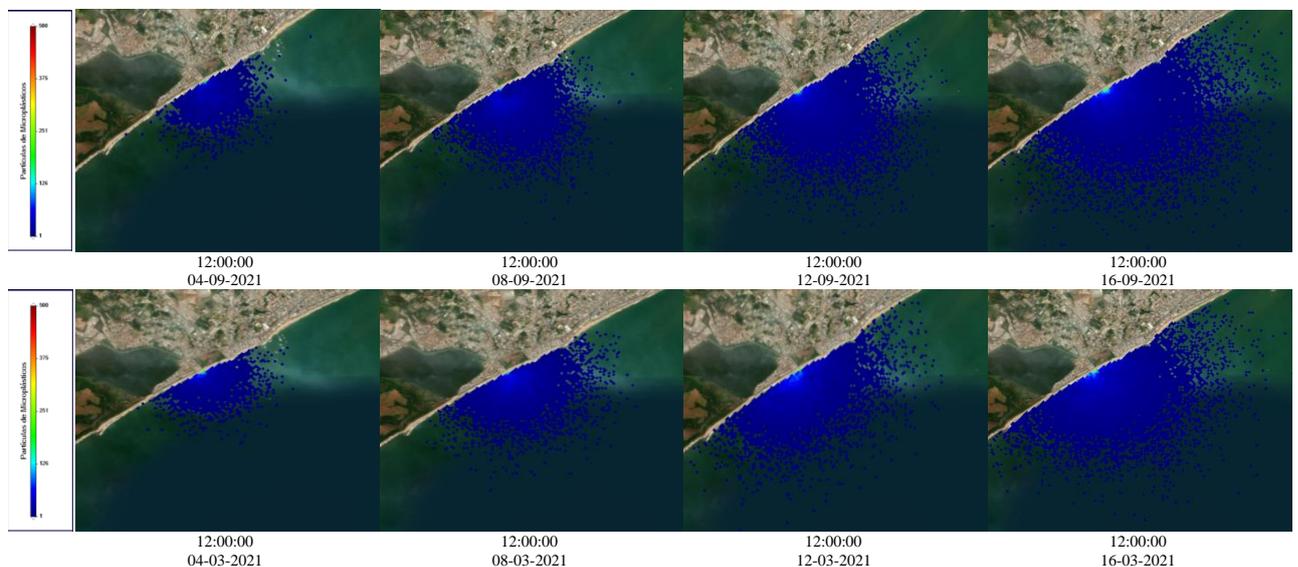
Fonte: O autor, 2021.

Pode-se perceber que novamente foi formada uma pluma com uma alta dispersão de microplásticos, que se concentra ao redor da localização de descarga desses fragmentos. A quantidade máxima de microplásticos em uma célula foi de 317 fragmentos, um valor maior do que o observado quando a vazão do rio era menor.

A comparação detalhada dos resultados do cenário 4 considerando os dois casos de vazão são ilustrados na Figura 33.

Figura 33 - Comparação do Cenário 4 com a vazão de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  e de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  dentro do Estuário do rio Macaé

#### Comparação do Cenário 4 para uma vazão de $6 \text{ m}^3/\text{s}$ e de $300 \text{ m}^3/\text{s}$



Fonte: O autor, 2021.

O fato que mais se destacou nesta observação, da comparação dos dois casos de vazão, foi a dispersão de microplásticos, para a vazão de 300 m<sup>3</sup>/s, na região nordeste e sudoeste, em relação à localização do lançamento de microplásticos do cenário 4 em que foi mais distribuída. O mesmo fato não ocorreu para a vazão de 6 m<sup>3</sup>/s, havendo uma pluma crescendo de forma linear ao redor do ponto de emissão de microplásticos.

## **4.2 Resultados da Baía de Guanabara**

A simulação computacional dentro da Baía de Guanabara utilizou 3 pontos de descarga de microplásticos, previamente escolhidos e apresentados na Figura 16. Os resultados da hidrodinâmica e do espalhamento dos fragmentos são apresentados no decorrer desta seção.

### **4.2.1 Hidrodinâmica da Baía de Guanabara**

A hidrodinâmica da baía foi simulada no decorrer de 15 dias considerando a vazão média dos seis principais rios que a abastecem. É importante ressaltar que nem todos os dias simulados mantiveram características iguais. Houve diferença na direção e na intensidade da velocidade quando se foram analisados todos os dias simulados. As observações foram realizadas considerando um período de 3 em 3 horas.

Foi observado que as maiores velocidades registradas na baía foram no período da madrugada e no período da manhã. Os dias que registraram altas velocidades no período de 03h e 06h da manhã mantiveram baixas velocidades no período de meia noite, variando em torno de 0,21 m/s na entrada da baía, concluindo que não houve um padrão de direção de velocidade da entrada e saída dessa maré.

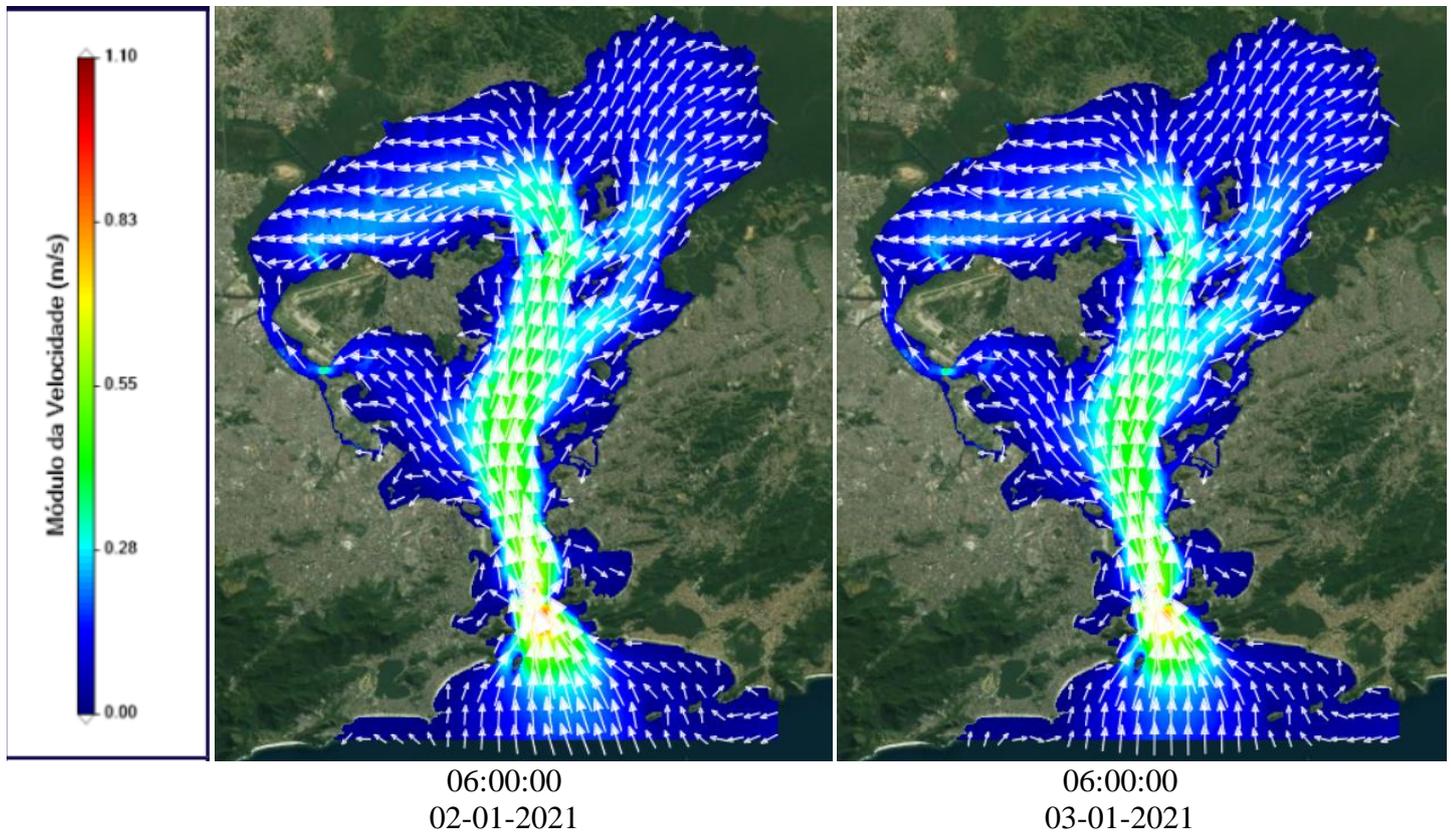
Foi identificada que a velocidade mais alta encontrada na baía foi registrada em sua entrada, chegando a 1,1 m/s. Também foi observado que as maiores velocidades foram registradas das 00h às 09h, como anteriormente apresentada na Tabela 8 e ilustrada na Figura 34.

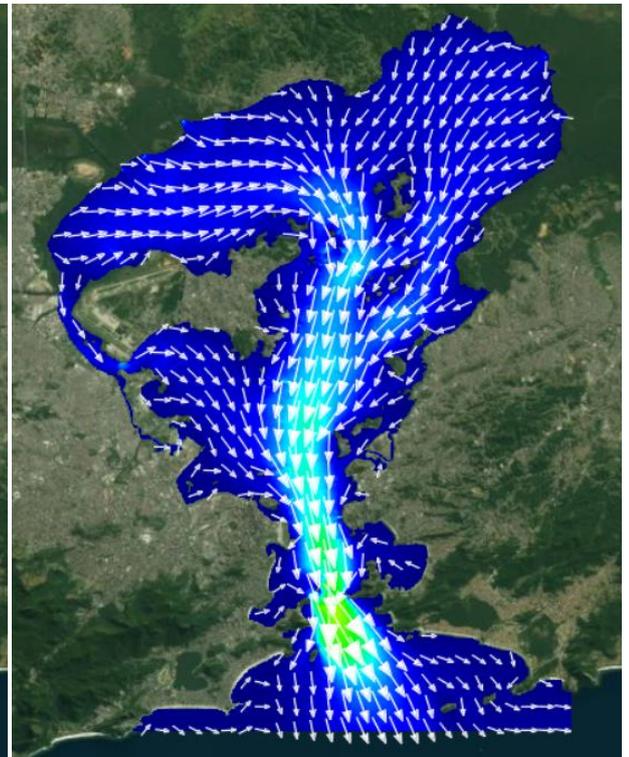
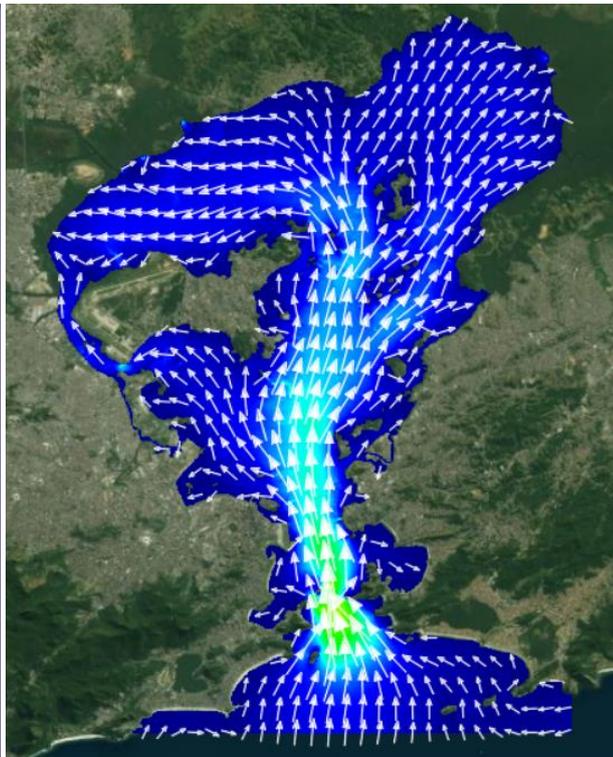
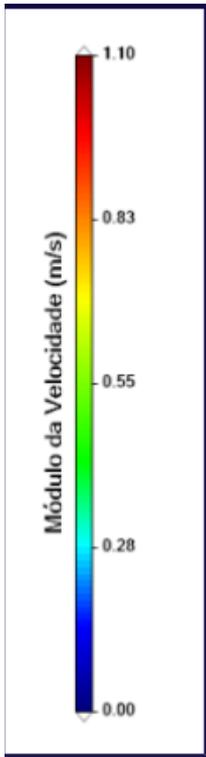
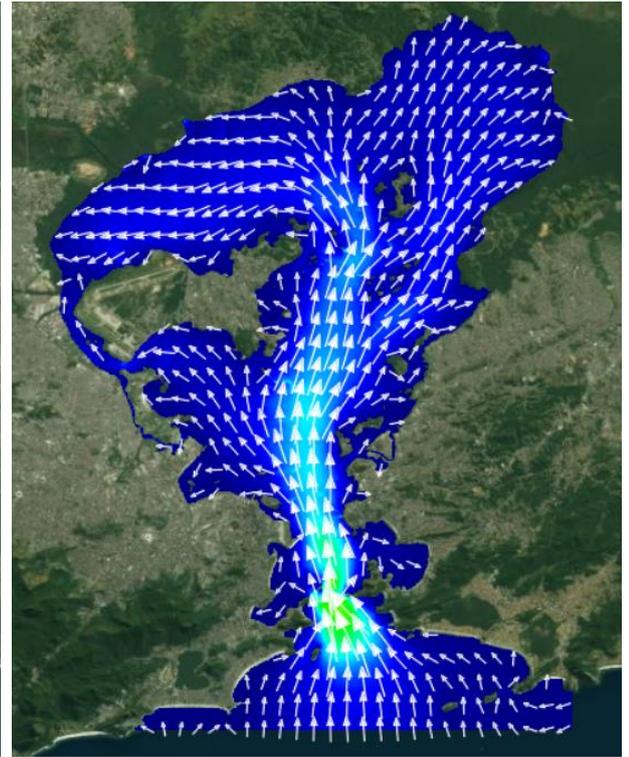
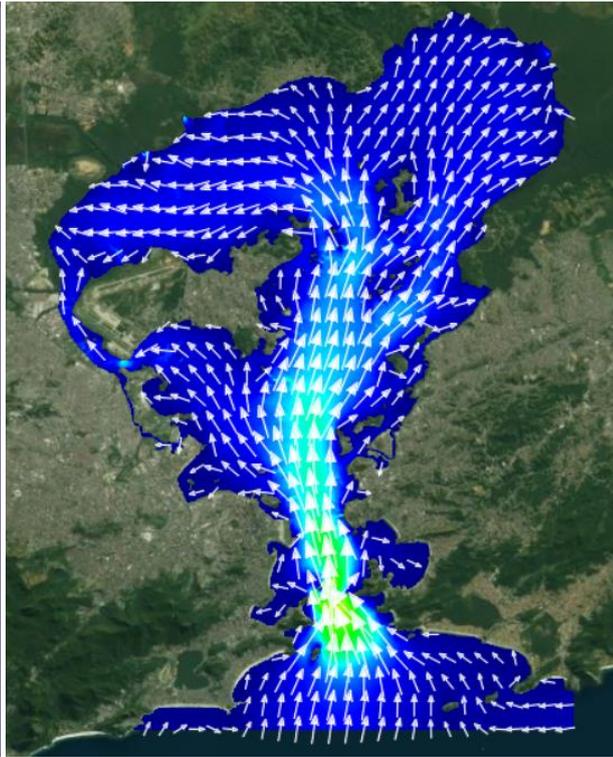
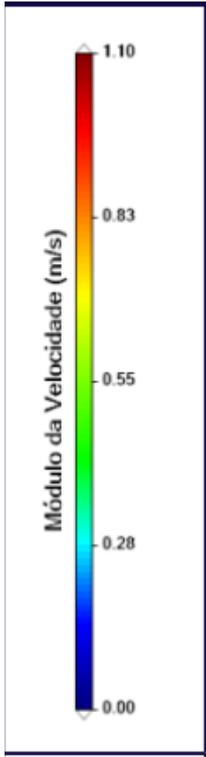
Tabela 8 - Registros de altas velocidades na entrada da Baía de Guanabara

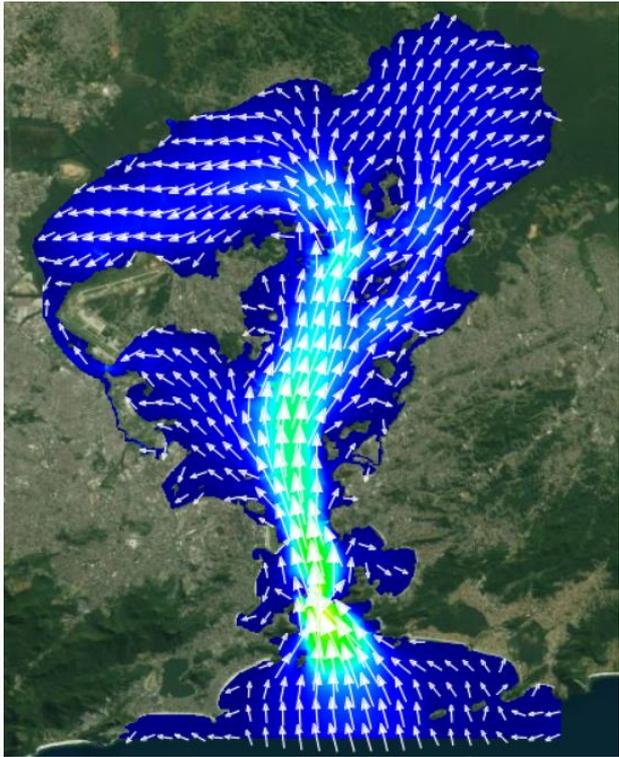
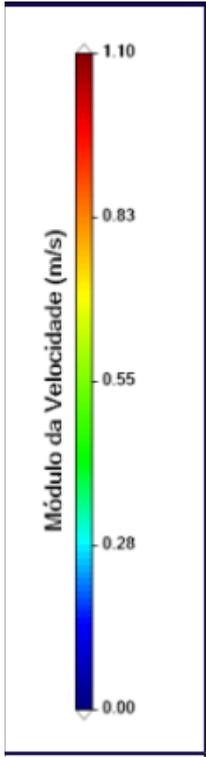
<b>Altas velocidades registradas na entrada da Baía de Guanabara</b>			
02/01/2021	06:00h	10/01/2021	00:00h e 9:00h
03/01/2021		11/01/2021	03:00h e 9:00h
04/01/2021		12/01/2021	03:00h
05/01/2021	não teve	13/01/2021	
06/01/2021		14/01/2021	
07/01/2021		15/01/2021	06:00h
08/01/2021		00:00h	16/01/2021
09/01/2021			

Fonte: O autor, 2021.

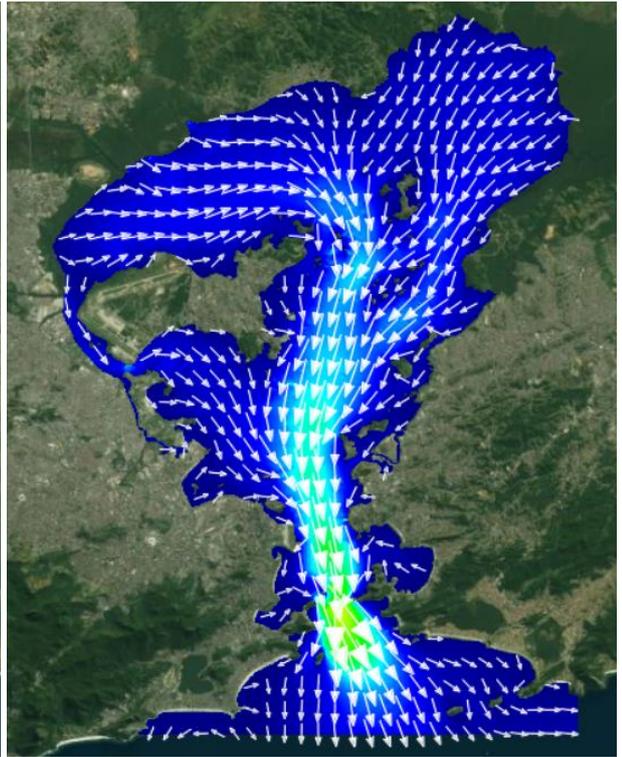
Figura 34 - Hidrodinâmica do registro das altas velocidades na entrada da Baía de Guanabara

**Altas velocidades registradas na entrada da Baía de Guanabara**

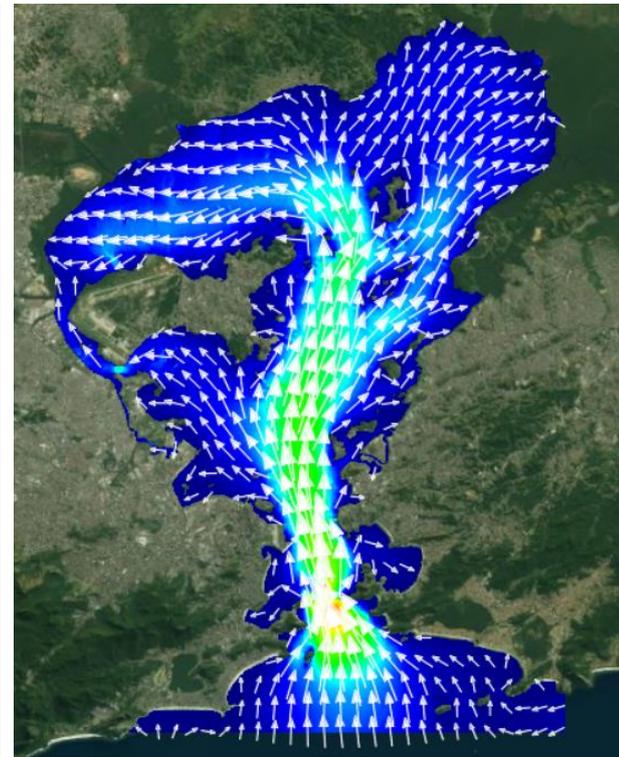
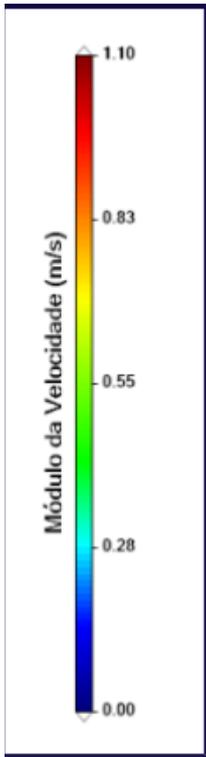




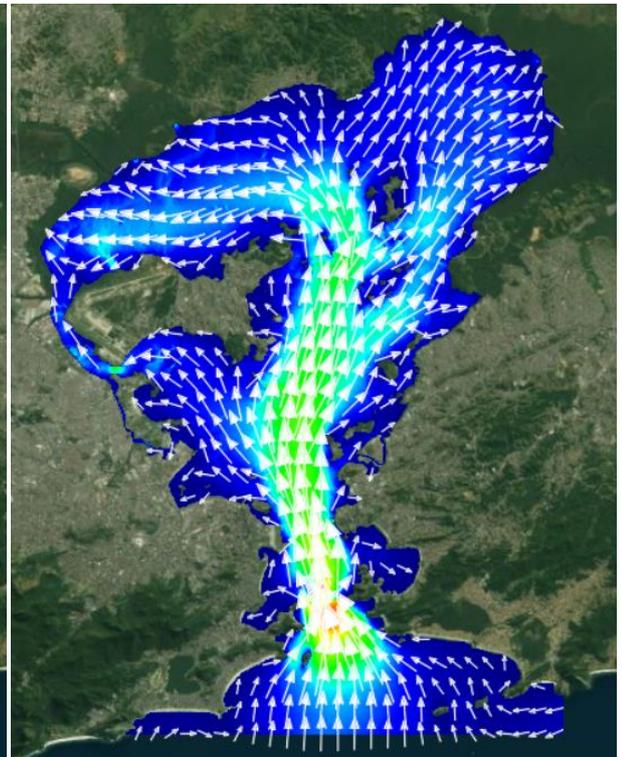
03:00:00  
11-01-2021



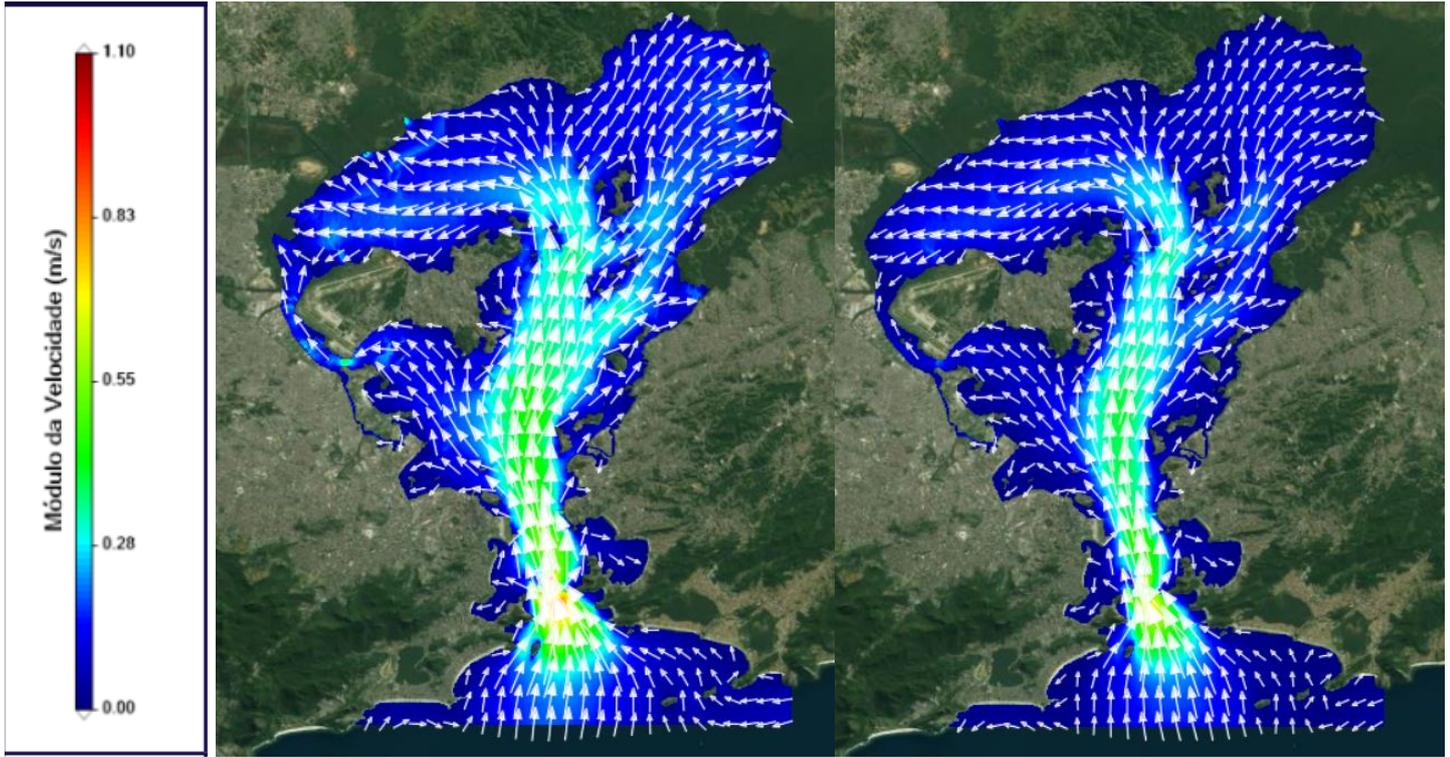
09:00:00  
11-01-2021



03:00:00  
12-01-2021

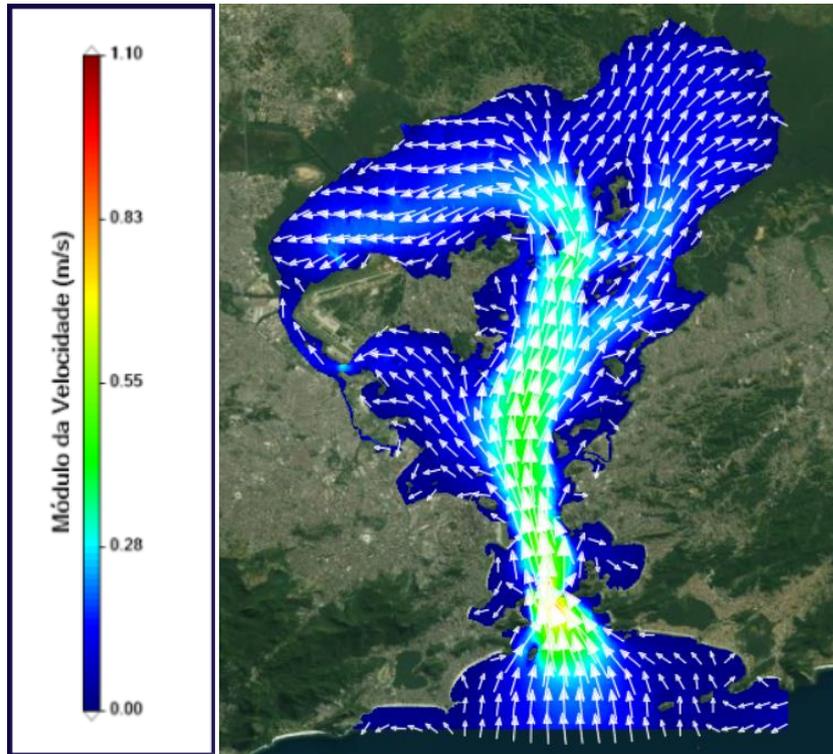


03:00:00  
13-01-2021



03:00:00  
14-01-2021

06:00:00  
15-01-2021



06:00:00  
16-01-2021

Fonte: O autor, 2021.

Como foi observado, quase todos os registros de altas velocidades, em grandes áreas, foram encontradas quando a maré foi lançada em direção à baía. Esse fato ocorre pelo estreito espaço em que a água deve se acomodar para entrar na região interna da baía.

Também foi observado que todos os resultados com a velocidade alcançando 1,1 m/s foram encontrados às 03h ou às 06h. Esta observação foi baseada e constatada pelo resultado da simulação dos dias: 02, 03, 12, 13, 14 e 16 de janeiro de 2021.

#### 4.2.2 Cenários simulados na Baía de Guanabara

Esta subseção foi dividida pelos pontos de localização de descarga de microplásticos escolhidos para serem simulados dentro da Baía de Guanabara. Foi escolhido o último dia de simulação para apresentação dos resultados, com o propósito de compreender como os fragmentos já lançados no mar se comportariam.

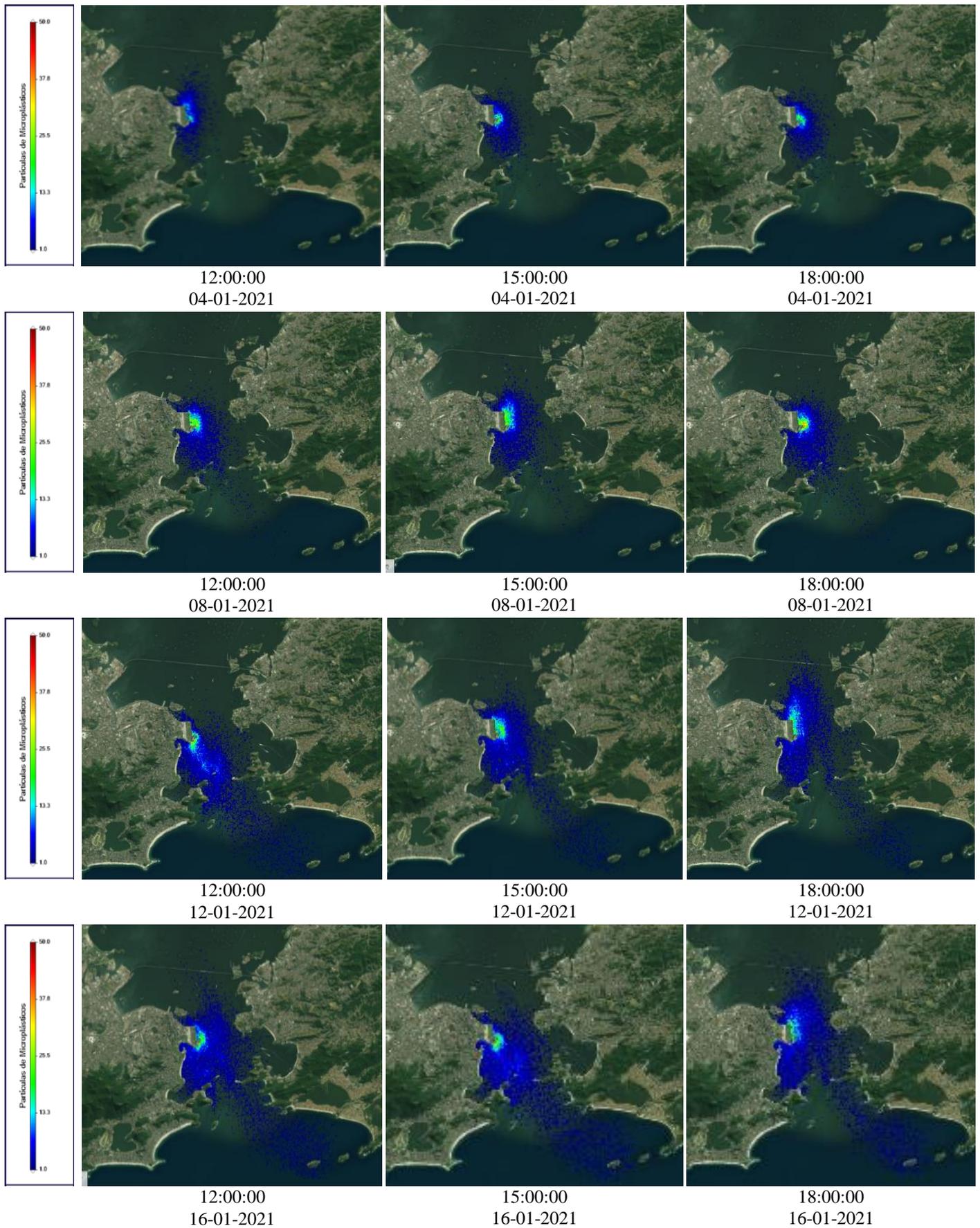
##### 4.2.2.1 Ponto A – Próximo ao Aeroporto Santos Dumont

Foram escolhidos alguns dias e horários para apresentar a distribuição de microplásticos do Ponto A, sendo ilustrados na Figura 35.

A distribuição de microplásticos tomou uma grande proporção, uma vez que uma grande pluma desses fragmentos se formou em torno do ponto de descarga de contaminação. Essa pluma foi guiada pela maré, carregando esses fragmentos para a parte interna da baía e, principalmente para a parte externa, em mar aberto, alcançando a região de Piratininga, em Niterói, no lado direito da baía.

Regiões de alta concentração de microplásticos foram formadas ao redor da localização do ponto de descarga, alcançando a ordem de 40 a 50 partículas por célula no último dia de simulação, porém, devido ao tamanho considerável da pluma de contaminação microplástica, não houve uma grande quantidade de células com essa variação no número de partículas. O número máximo de partículas em uma célula foi de 72 unidades.

Figura 35 - Resultados do Ponto A dentro da Baía de Guanabara

**PONTO A**

Fonte: O autor, 2021.

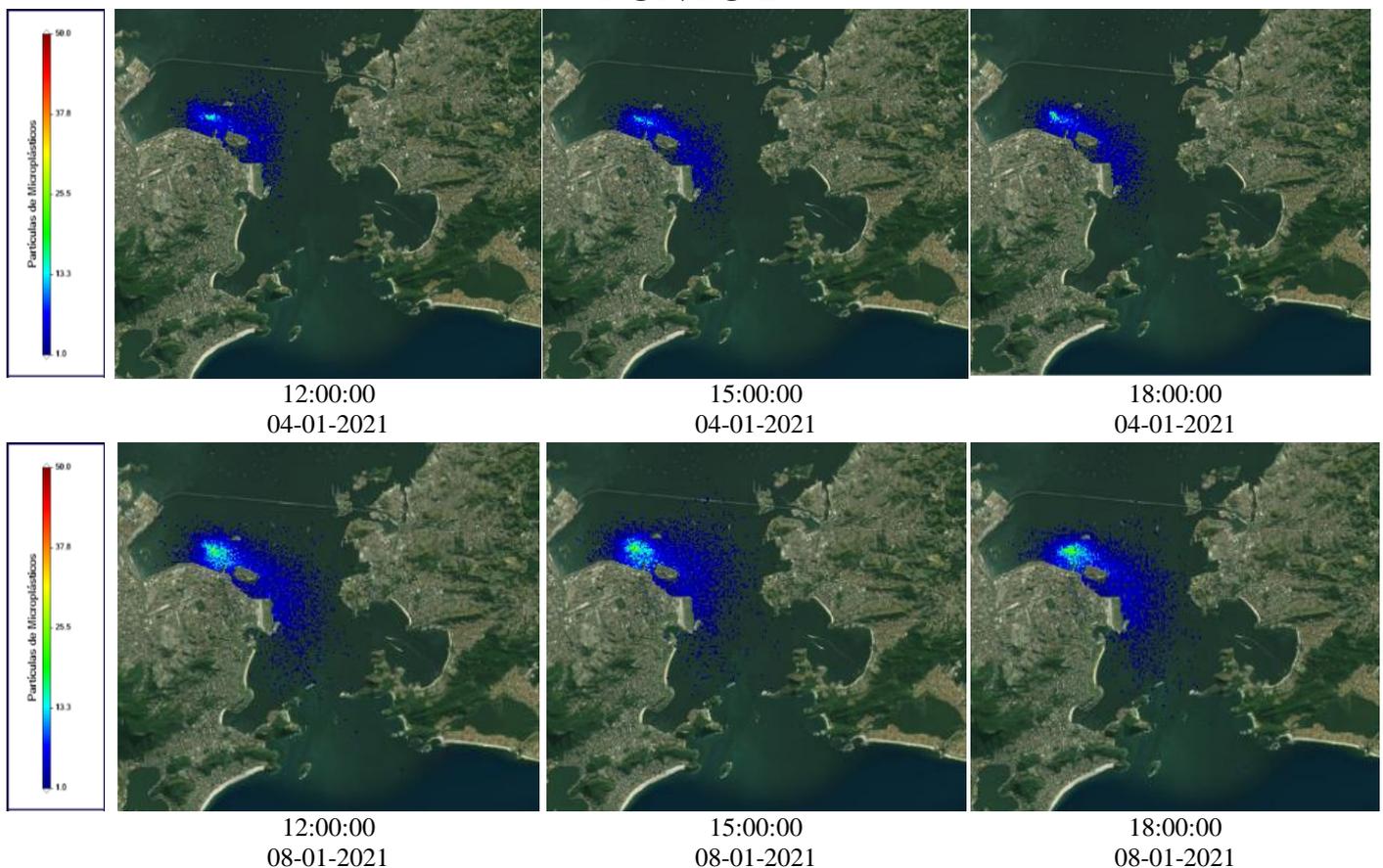
O ponto A se mostrou bastante importante dentro das regiões simuladas na baía, uma vez que os resultados da hidrodinâmica em sua localização alcançaram altos números de velocidade da maré, contribuindo para a evasão de partículas microplásticas para o oceano.

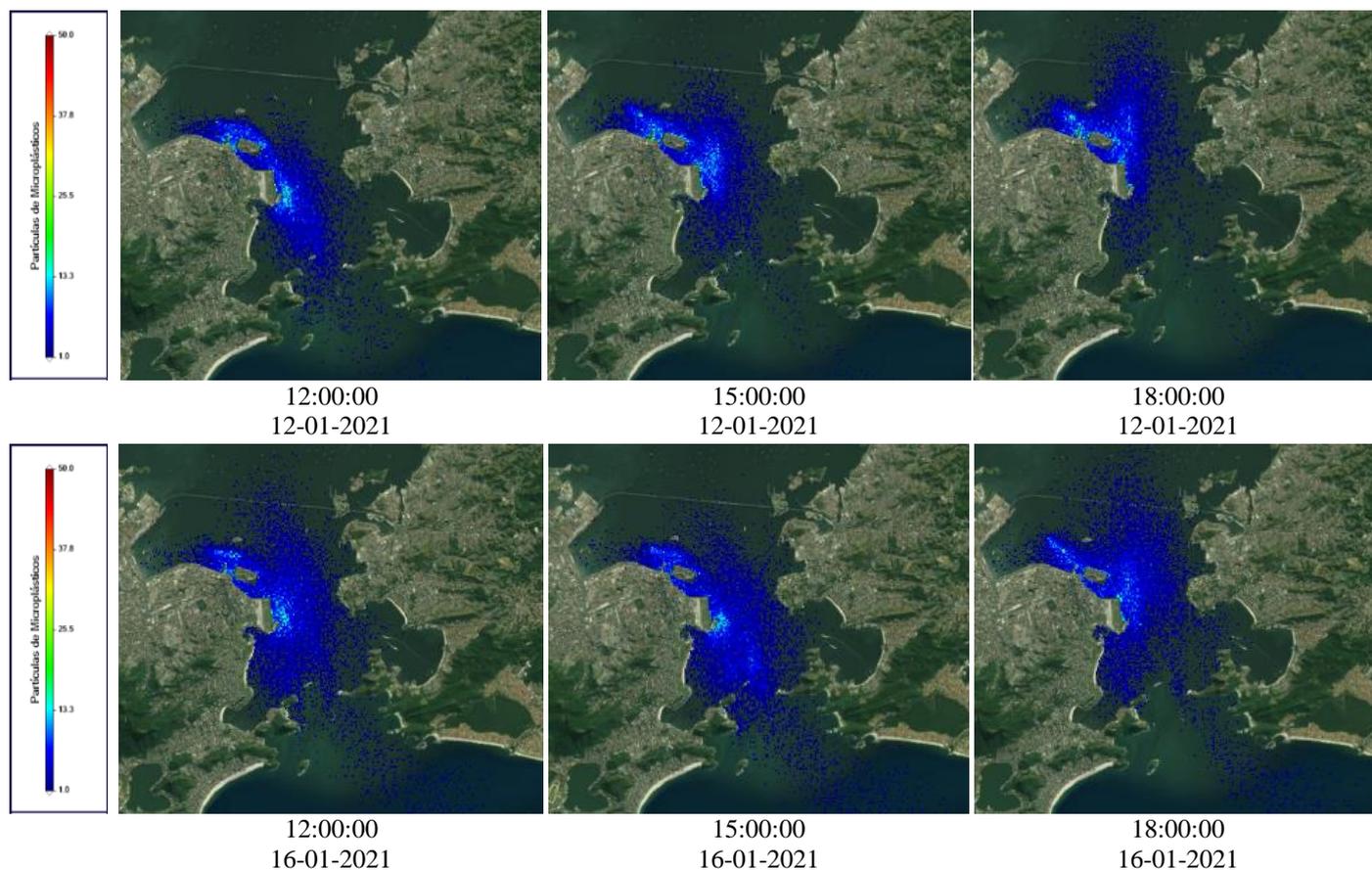
#### 4.2.2.2 Ponto B - Próximo à zona portuária e ao canal do mangue

A Figura 36 ilustra o resultado obtido pela simulação do trajeto de microplásticos no Ponto B, localizado próximo à zona portuária e ao canal do mangue da Baía de Guanabara. Foram escolhidos os mesmos dias e horários do ponto A para a demonstração de distribuição de microplásticos oriundos do ponto B.

Figura 36 - Resultados do Ponto B dentro da Baía de Guanabara

### PONTO B





Fonte: O autor, 2021.

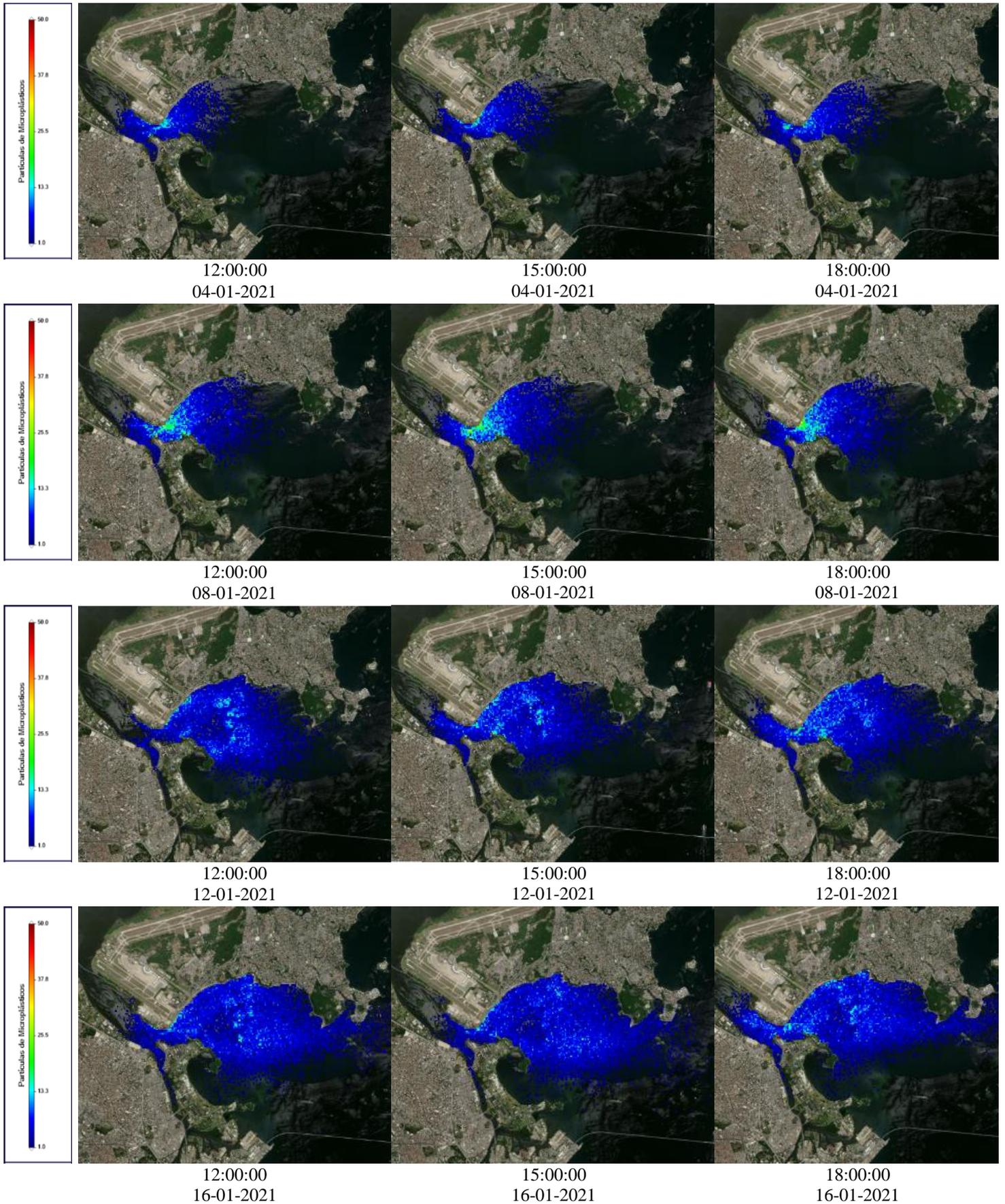
Foi observado que desde os primeiros dias foi criada uma pluma de microplásticos ao redor da localização do ponto de descarga desses fragmentos. Essa pluma foi guiada pela maré e tomou grande proporção com o decorrer dos dias que foram se passando. Foi possível perceber que essa pluma carregou fragmentos para fora da baía, como demonstrado a partir do dia 12 de janeiro de 2021. A maior quantidade de microplásticos em uma célula que foi registrada foi de 59 unidades.

Também se observou que a quantidade de microplásticos por célula não é maior somente próximo ao Ponto B e sim também próximo ao Ponto A, tornando a situação ainda mais preocupante, uma vez que, próximo do aeroporto Santos Dumont recebe contaminação plástica dos dois pontos, aumentando-se ainda mais a quantidade de fragmentos por célula, ou seja, por região dentro da baía.

#### 4.2.2.3 Ponto C - Próximo à Ilha do Fundão

Os resultados da simulação da trajetória dos microplásticos no ponto C, localizado próximo à Ilha do Fundão são apresentados na Figura 37.

Figura 37 - Resultados do Ponto C dentro da Baía de Guanabara  
**PONTO C**



Fonte: O autor, 2021.

Como observado, o ponto C se mostrou com uma particularidade em relação aos demais pontos simulados, pois a sua pluma se manteve ao redor da Ilha do Governador, não ultrapassando esta área. Tal resultado pode ser explicado pelos resultados da hidrodinâmica da região, em que foram obtidas baixas velocidades naquela localidade em toda a totalidade de dias.

A pluma de microplásticos formada pela descarga desses fragmentos se manteve na mesma localidade. Após alguns dias, como demonstrado no dia 08 de janeiro de 2021, essa pluma alcançou maiores quantidades de microplásticos próximo a sua descarga, chegando na ordem de 25 partículas por célula e algumas células podendo atingir 50 partículas.

A partir do dia 11 de janeiro essa concentração de microplásticos se distribuiu ao redor daquela localidade, diminuindo a quantidade elevada de partículas por célula. A quantidade máxima de partículas de microplásticos registrada em uma célula foi de 54 partículas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização da plataforma MOHID neste trabalho, encontrou um desafio tecnológico considerável relacionado ao tempo computacional para a simulação das correntes oceânicas e cenários de descarga de microplásticos em especial na Baía de Guanabara, em que o tempo gasto para a simulação dos casos variou em torno de 96 horas, não considerando o tempo utilizado na calibração do modelo, em que foram demandadas mais horas. Para o Estuário do rio Macaé, foram gastos em torno de 32 horas, de mesma forma, desconsiderando a calibração do modelo. O tempo gasto para a simulação da Baía de Guanabara se manteve elevado devido aos fatores da modelagem da simulação e também do tamanho do domínio escolhido.

Os resultados deste trabalho geraram valores satisfatórios embora a maré e as descargas fluviais tenham sido as únicas forças atuantes na simulação, desconsiderando fatores meteorológicos.

Nas simulações, as ondas geradas pela maré foram calibradas e validadas através de dados reais computados pelo Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil, em que foi constatada uma variação muito pequena do nível da coluna d'água entre os dados simulados e os dados reais obtidos, mostrando que os níveis medidos tiveram boa representação. Porém, vale ressaltar que não foram considerados fatores como temperatura, salinidade, nutrientes da água, condições e força dos ventos, além de que a quantidade inicial de partículas plásticas em meio às águas pode ser diferente do quantitativo gerado pelo aquecimento do modelo, não sendo possível realizar a calibração completa da hidrodinâmica simulada com os dados reais do marégrafo. Por este motivo, como um trabalho de pesquisa futuro mais robusto, é necessário buscar estes dados e incluí-los no modelo, além de realizar a simulação em um ciclo completo da maré, ciclo de 28 dias. Essa busca pode ser realizada por pesquisa de dados gerados em campo ou uma busca criteriosa com os órgãos locais para que, então, possa ser realizada a calibração completa do modelo.

A metodologia utilizada nas simulações foi convincente, dando a possibilidade dos resultados serem gerados com satisfação, sendo possível realizar análises e comparações dos casos escolhidos para as vazões juntamente com os locais de liberação de contaminação plástica em que se mostraram bem escolhidos para ambas regiões.

O resultado lagrangeano relacionado com o estuário do rio Macaé mostrou que a região interna do estuário, principalmente o antigo canal do rio e o rio Macaé são localidades com maior probabilidade de retenção de contaminação plástica, uma vez que a profundidade encontrada naquela região sofre pouca alteração. Também foram identificadas velocidades mais

altas na entrada do estuário e em torno do arquipélago de Sant'Ana, concluindo que os microplásticos que atingem a entrada do estuário alcançam rapidamente o oceano aberto, como aconteceu no Cenário 1.

A Baía de Guanabara mostrou que o lixo plástico manteve um bom espalhamento, de forma que nos pontos A e B esses fragmentos atingiram o oceano com pouco tempo de simulação. Essa distribuição rápida ocorreu devido as localizações das descargas de microplásticos estarem próximas da entrada da baía, aonde foi encontrada uma maior velocidade da maré e por este motivo o espalhamento naquela área se manteve elevado. Devido ao ponto C estar localizado na parte interna da baía, onde a velocidade é baixa, este microplásticos se concentram na área próxima a sua descarga, gerando contaminação ao seu redor.

Por fim, as modelagens obtiveram uma boa representação da simulação das correntes oceânicas e do transporte de microplásticos em localidades no estuário do rio Macaé e na Baía de Guanabara.

## REFERÊNCIAS

ABIPLAST. Associação Brasileira da Indústria de Plástico. Perfil 2018. Disponível em: <<http://www.abiplast.org.br/publicacoes/>>. Acesso em: 01.jun.2021.

ALOSAIRI, Y.; AL-SALEM, S.M.; RAGUM, A.AL. *Three-dimensional numerical modelling of transport, fate and distribution of microplastics in the northwestern Arabian/Persian Gulf*. Elsevier, Marine Pollution Bulletin 161 (2020) 111723.

ALVAREZ, L.I.; CUADRADO, D.G.; PERILLO, G.M.E. *Aplicación de un modelo de trazadores lagrangianos en Bahía Anegada, Argentina*. Revista de Biología Marina y Oceanografía. Vol. 46, Nº2: 199-206, 2011.

AMARAL, K.J. Estuário do rio Macaé: modelagem computacional como ferramenta para o gerenciamento integrado de recursos hídricos. Tese de mestrado. Pós-graduação de engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

AMORIM, L.F. Modelação hidrológica e hidráulica aplicada à bacia hidrográfica do rio pirapó, Paraná – BR. Dissertação de mestrado, Pós Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, 2015.

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE LIXO MARINHO (APLM). **Lixo Marinho: um Problema sem fronteiras**. Lisboa, 2016.

AVISO, Satellite Altimetry Data. Disponível em: < <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes/description-fes2012.html>>. Acesso em: 05.nov.2021.

BALLENT, A.; PANDO, S.; PURSER, A.; JULIANO, M.F.; THOMSEN, L. *Modelled transport of benthic marine microplastic pollution in the Nazaré Canyon*. **Biogeosciences**, 10, 7957–7970, 2013.

BESSELING, E.; QUIK, J.T.K.; SUN, M.; KOELMANS, A.A. *Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: A modeling study*. Elsevier, Environmental Pollution 220, p. 540-548, 2017.

COLLINS, C.; HERMES, J. C. *Modelling the accumulation and transport of floating marine micro-plastics around South Africa*. Elsevier, Marine Pollution Bulletin 139, p. 46–58, 2019.

DE-LA-TORRE, G. Microplásticos no meio marinho: um problema a ser tratado. **Revista Ciência e Tecnologia**, Vol. 15, Nº 4, p. 27-37, 2019.

FERNANDES, R. Modelação de derrames de hidrocarbonetos. Instituto Superior Técnico, Licenciatura em Engenharia do Ambiente, 2001.

FUNDO VERDE. O que são microplásticos? Disponível em: < <https://www.funverde.org.br/blog/o-que-sao-microplasticos/>>. Acesso em: 13.fev.2022.

GENC, A.N.; VURAL, N.; BALAS, L. Modeling transport of microplastics in enclosed coastal waters: A case study in the Fethiye Inner Bay. **Elsevier**, Marine Pollution Bulletin 150, 2020.

GUIMARÃES, R.G.; JUNIOR, J.L.; NETO, A.J.S. Revisão sistemática do transporte de microplástico do continente para o oceano. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v.14, n.1, p. 18-39, 2020.

HE, B.; SMITH, M.; EGODAWATTA, P.; AYOKO, G.A.; RINTOUL, L.; GOONETILLEKE, A. *Dispersal and transport of microplastics in river sediments*. **Elsevier**, Environmental Pollution 279 (2021) 116884.

INEA. Elaboração do plano de recursos hídricos da região hidrográfica Macaé e Rio das Ostras. Relatório do diagnóstico das disponibilidades hídricas da região hidrográfica Macaé e Rio das Ostras (RD-04). 2013.

JUNIOR, J.L.; KALAS, F.A.; RODRIGUES, P.P.G.W.; JEVEAUX, J.L.; NETO, H.G.; JULIANO, M.M.; NETO, A.J.S. Simulação de Trajetória Lagrangiana de Objetos Flutuantes na Região Costeira do Estado de São Paulo. DOI: 10.4028, 2019.

KJERFVE, B.; RIBEIRO, C.H.A.; DIAS, G.T.M.; FILIPPO, A.M.; QUARESMA, V.S. **Oceanographic characteristics of and impacted costal bay: Baía de Guanabara**. Continental Shelf Research, 1997.

KNUT-FRODE, D.; RÖHRS, J.; BREIVIK, Ø.; ÅDLANDSVIK, B. OpenDrift v1.0: a generic framework for trajectory modelling. **Geosci. Modelo Dev.**, 11,1405-1420, 2018.

LIMA, E.B. Problemas Inversos aplicados à identificação de parâmetros hidrodinâmicos de um modelo do estuário do rio Macaé. Tese de Doutorado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2012.

LUCIO, F.T.; MAGNONI, D.M.; VICENTINI, V.E.P.; CONTE, H. Disponibilidade e influências dos microplásticos nos seres vivos e ambiente: uma revisão. **Conexão Ci, Formiga/MG**, Vol. 14, Nº 1, p. 47-55, 2019.

LY, K.; METTERNICHT, G.; MARSHALL, L. Transboundary river catchment areas of developing countries: Potential and limitations of watershed models for the simulation of sediment and nutrient loads. A review. **Elsevier**. Journal of Hydrology: Regional Studies 24 (2019) 100605.

MARETEC. **Descrição do MOHID**. Campos dos Goytacazes: Editora Essentia, 2012 (traduzido por RODRIGUES, P. P. G. W.; FREIRE, B. C.; HORA, H. C. M.; NASCIMENTO, E. C.; LUGON J. JR.).

MOHID WIKI. Disponível em: <[http://wiki.mohid.com/index.php?title=Main\\_Page/](http://wiki.mohid.com/index.php?title=Main_Page/)>. Acesso em: 07.nov.2021.

NORA. Tides & Currents, 2021. Disponível em: < [https://tidesandcurrents.noaa.gov/about\\_harmonic\\_constituents.html](https://tidesandcurrents.noaa.gov/about_harmonic_constituents.html)>. Acesso em: 06.dez.2021.

OLIVATTO, G.P.; CARREIRA, R.; TORNISIELO, V.L.; MONTAGNER, C.C. Microplásticos: Contaminantes de Preocupação Global no Antropoceno. **Revista Virtual de Química**, Vol. 10, Nº 6, p. 1968-1989, nov./dez., 2018.

OLIVATTO, G.P.; MARTINS, M.T.C.; MONTAGNER, C.C.; HENRY, THEODORE B.; CARREIRA, RENATO. S. Microplastic contamination in surface waters in Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil. **Elsevier**. *Marine Pollution Bulletin* 139 (2019) 157–162.

OLIVATTO, G.P. Estudo sobre Microplásticos em águas superficiais na porção oeste da Baía de Guanabara. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Química da PUC-Rio, 2017.

P02: DIAGNÓSTICO DO ESTADO DA BAÍA DE GUANABARA. Programa de Fortalecimento da Governança e da Gestão da Baía de Guanabara. KCI Technologies, Inc. 2016.

PASCHOALETO, A.R.; SOUZA, A.P.B.; SANTOS, J.A.; MATHEUS, P.D.; LOURENÇO, R.V. **Programa das nações unidas (PNUMA) - Guia de Estudos**. SINUS 2014.

Prefeitura de Macaé. Capital Nacional do Petróleo. Disponível em: <<http://www.macaee.rj.gov.br/conteudo/leitura/titulo/capital-nacional-do-petroleo>>. Acesso em: 08 de nov. de 2021.

Produtos de dados. Jet Propulsion Laboratory, 2021. Disponível em: <<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/dataprod.htm>>. Acesso em: 05.ago.2021.

RAIMUNDO, G.I.; SOUSA, M.C.; DIAS, J.M. *Numerical Modelling of Plastic Debris Transport and Accumulation throughout Portuguese Coast*. **Journal of Coastal Research**, SI 95, p. 1252–1257, Coconut Creek, Florida, 2020.

ROGRIGUES, P.H.S. **Estudo de derramamento de óleo utilizando o programa MOHID**. Mestrado em Energia. Instituição de Ensino: Universidade Federal do ABC, Santo André Biblioteca Depositária: UFABC, 2016.

ROJO-NIETO, E.; MONTOTO, T. **Lixo marinho, plásticos, microplásticos: origens, impactos e consequências de uma ameaça global**. Espanha: Ecologistas en Acción, jan. 2017.

SCHERNEWSKI, G.; RADTKE, H.; HAUKE, R.; BARESEL, C.; OLSHAMMAR, M.; OSINSKI, R.; OBERBECKMANN, S. *Transport and Behavior of Microplastics Emissions From Urban Sources in the Baltic Sea*. **Frontiers in Environmental Science**. Sci. 8:579361. doi: 10.3389/fenvs.2020.579361.

SIEGFRIED, M.; KOELMANS, A.A.; BESSELING, E.; KROEZE, C. *Export of microplastics from land to sea. A modelling approach*. **Elsevier**. *Water Research* 127, p. 249 e 257, 2017.

SILVA, P.P.G. **Contaminação e toxicidade de microplásticos em uma área de proteção marinha costeira**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, p. 11-13, 2016.

SOBRAL, P.; FRIAS, J.; MARTINS, J. Microplásticos nos oceanos – um problema sem fim à vista. **Ecologia** 3, p. 12-21, 2011.

STIFTUNG, H.B. **Atlas do Plástico. Fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos.** Rio de Janeiro, Brasil; 2020.

Tábuas de maré. Centro de Hidrografia da Marinha, Marinha do Brasil, 2021. Disponível em: < <https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>>. Acesso em: 11.ago.2021.

VIANA, C.C.G. A assimetria da onda de maré na Baía de Guanabara – RJ. Dissertação, Programa de Pós Graduação em Oceanografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2017.

ZHANG, H. Transport of microplastics in coastal seas. **Estuarine, Coastal and Shelf Science** 199 (2017), p. 74-86, 2017.