



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**LUIZ FELIPE CAVALCANTE DA SILVA**

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA E DA DISPERSÃO DE ÓLEO NA ZONA  
COSTEIRA DE FORTALEZA-CE: UMA FERRAMENTA DE SUPORTE À GESTÃO  
AMBIENTAL E A PLANOS EMERGENCIAIS.**

**FORTALEZA**

**2025**

LUIZ FELIPE CAVALCANTE DA SILVA

MODELAGEM HIDRODINÂMICA E DA DISPERSÃO DE ÓLEO NA ZONA COSTEIRA  
DE FORTALEZA-CE: UMA FERRAMENTA DE SUPORTE À GESTÃO AMBIENTAL E A  
PLANOS EMERGENCIAIS.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto.  
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Colonna Rosman.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- D11m da Silva, Luiz Felipe Cavalcante.  
Modelagem hidrodinâmica e da dispersão de óleo na zona costeira do Fortaleza-CE: uma ferramenta de suporte à gestão ambiental e a planos emergenciais / Luiz Felipe Cavalcante da Silva. – 2025.  
150 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2025.  
Orientação: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto.  
Coorientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Colonna Rosman.
1. Derrame de Óleo. 2. Modelagem hidrodinâmica. 3. SisBaHiA. 4. ADIOS2. 5. Porto do Mucuripe. I. Título.

CDD 627

---

LUIZ FELIPE CAVALCANTE DA SILVA

MODELAGEM HIDRODINÂMICA E DA DISPERSÃO DE ÓLEO NA ZONA COSTEIRA  
DE FORTALEZA-CE: UMA FERRAMENTA DE SUPORTE À GESTÃO AMBIENTAL E A  
PLANOS EMERGÊNCIAIS.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: 26/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Paulo Cesar Colonna Rosman (Coorientador)  
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

---

Dr. Silvano Porto Pereira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Pedro Paulo de Freitas  
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

A Deus.

Aos meus pais, Célia e Gonçalves.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelo dom da vida, pela força, proteção e perseverança ao longo desta jornada e diante dos desafios que ela apresentou.

Agradeço à minha família — em especial aos meus pais, Maria Célia e Gonçalves Antônio, à minha irmã, Ana Paula, e à minha noiva, Luana — pelo apoio incondicional, pelo incentivo e pela compreensão nos momentos em que dediquei tempo e esforço a esta pesquisa. Obrigado por serem meu porto seguro e por sempre acreditarem em mim.

Aos amigos João, Maísa e Thayná, pela parceria acadêmica e pelos momentos de descontração que tornaram esta jornada mais leve, deixo meu reconhecimento e minha gratidão.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Iran, registro minha profunda gratidão pela orientação atenta, pelo apoio constante, pelo estímulo intelectual e pela confiança depositada em meu desenvolvimento acadêmico. Agradeço também ao meu coorientador, Prof. Dr. Rosman, cuja atuação foi fundamental para a realização deste trabalho, especialmente pelo suporte no desenvolvimento do modelo.

Agradeço ao Prof. Dr. Carlos e à Bárbara, membros do Instituto de Ciências do Mar (Labomar), e ao Dr. Silvano, da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (Cagece), pelas valiosas contribuições que possibilitaram as avaliações comparativas realizadas.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram durante esta caminhada acadêmica, deixo meus sinceros agradecimentos.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, por meio da concessão da bolsa de mestrado, cujo fomento foi essencial para a realização desta pesquisa e para minha dedicação plena às atividades acadêmicas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar”. (Josué 1:9).

## RESUMO

Acidentes com derramamento de óleo constituem séria ameaça aos sistemas socioecológicos costeiros, podendo provocar impactos ambientais e socioeconômicos persistentes e perda de biodiversidade. Esta dissertação avalia a aplicabilidade da modelagem computacional como ferramenta de suporte à gestão portuária e ambiental, com ênfase na elaboração de planos de ação emergencial frente a derrames de óleo na zona costeira de Fortaleza (CE), localizada no Nordeste do Brasil. Para tanto, implementou-se o modelo SisBaHiA® e o modelo de decaimento de óleo ADIOS2 para realizar simulações hidrodinâmicas e de derrame, transporte e intemperismo de óleo na zona costeira de Fortaleza. Os principais objetivos consistiram em implementar, calibrar e validar um modelo hidrodinâmico para o domínio costeiro de Fortaleza, utilizando dados observacionais de campo, e em simular a formação e a dispersão de manchas de óleo em três cenários hipotéticos de volume — 8 m<sup>3</sup>, 200 m<sup>3</sup> e 1000 m<sup>3</sup> — no terminal aquaviário do Porto do Mucuripe, considerando a influência sazonal máxima e mínima dos ventos e mapeando as áreas de potencial contaminação. Os resultados hidrodinâmicos foram confrontados com séries observacionais provenientes de uma estação maregráfica e de um ADCP. A comparação evidenciou alta concordância para elevações superficiais (coeficiente de determinação  $R^2 > 0,90$ ; PBIAS  $< \pm 1\%$ ; RMSE  $\approx 5\text{--}14$  cm; índice de coerência entre valores medidos e modelados — CIM  $> 90\%$ ), enquanto a previsão das velocidades apresentou desempenho moderado ( $R^2 \approx 0,40\text{--}0,50$ ; PBIAS  $\approx -3\%$ ; RMSE  $\approx 0,08$  m/s; CIM  $> 80\%$ ), refletindo a maior complexidade física envolvida na representação espacial e temporal das correntes costeiras. A partir das simulações de derrame foram elaborados mapas que combinam uma representação probabilística das áreas potencialmente afetadas por hidrocarbonetos com trajetórias determinísticas para os eventos considerados críticos. Conclui-se que o SisBaHiA® é capaz de prover insumos úteis para avaliação de risco e planejamento de resposta em escala local, embora alguns ajustes e refinamentos, bem como sugestões de continuidade do presente estudo, possam ser implementados para a otimização da capacidade preditiva do comportamento do óleo em ambiente marinho.

**Palavras-chave:** ADIOS2; Derrame de Óleo; Modelagem hidrodinâmica; Porto do Mucuripe; SisBaHiA.

## ABSTRACT

Oil spill incidents pose a serious threat to coastal socio-ecological systems, potentially causing persistent environmental and socio-economic impacts and biodiversity loss. This dissertation evaluates the applicability of computational modeling as a support tool for port and environmental management, with emphasis on the development of emergency action plans for oil spill events in the coastal zone of Fortaleza (CE), Northeastern Brazil. To this end, the SisBaHiA® hydrodynamic model and the ADIOS2 oil weathering/decay model were implemented to perform hydrodynamic simulations and to simulate oil release, transport and weathering in the coastal domain of Fortaleza. The principal objectives were to implement, calibrate and validate a hydrodynamic model for the Fortaleza coastal domain using field observational data, and to simulate the formation and dispersion of oil slicks under three hypothetical spill volumes (8 m<sup>3</sup>, 200 m<sup>3</sup> and 1000 m<sup>3</sup>) at the Mucuripe Port terminal, accounting for seasonal extremes of wind forcing and mapping areas of potential contamination. Hydrodynamic results were evaluated against observational time series from a tide gauge station and an ADCP. The comparison showed strong agreement for surface elevations (coefficient of determination  $R^2 > 0.90$ ; PBIAS  $< \pm 1\%$ ; RMSE  $\approx 5\text{--}14$  cm; model–observation agreement index CIM  $> 90\%$ ), whereas current velocity predictions exhibited moderate performance ( $R^2 \approx 0.40\text{--}0.50$ ; PBIAS  $\approx -3\%$ ; RMSE  $\approx 0.08$  m/s; CIM  $> 80\%$ ), reflecting the greater physical complexity involved in the spatiotemporal representation of coastal currents. Oil-spill simulations produced maps that combine probabilistic representations of areas potentially affected by hydrocarbons with deterministic trajectories for the events deemed critical. It is concluded that SisBaHiA® can provide useful inputs for local-scale risk assessment and response planning, although further adjustments and refinements, as well as continuity of this research, are recommended to optimize the model's predictive capability for oil behaviour in the marine environment.

**Keywords:** ADIOS2; Hydrodynamic modelling; Mucuripe Port; Oil spill; SisBaHiA.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Número de derrames de petróleo médios (7 – 700 toneladas) e grandes (> 700 toneladas), entre 1970 e 2024. ....	19
Figura 2 – Quantidades de petróleo derramado com 7 toneladas ou mais em incidentes com petroleiros, entre 1970 e 2024. ....	20
Figura 3 – Distribuição espacial da navios-tanques na costa brasileira (dados AIS em tempo real).....	21
Figura 4 – Visão geral dos principais processos de intemperismo atuantes sobre o óleo derramado no ambiente marinho .....	35
Figura 5 – Imagem ampliada (x1.000) de uma emulsão água-em-óleo, mostrando gotas de água individuais envoltas por óleo.....	43
Figura 6 – Recuperação de óleo combustível pesado emulsificado, apresentando uma coloração típica de vermelho/marrom. A análise revelou que o conteúdo de água da emulsão pode chegar a até 50%. ....	44
Figura 7 – Tela de abertura do SisBaHiA <sup>®</sup> versão 12bSG .....	52
Figura 8 – Sistema de coordenadas do módulo hidrodinâmico (2DH e 3D) do SisBaHiA <sup>®</sup> , onde NR é o nível de referência. ....	54
Figura 9 - Mapa de localização do município de Fortaleza.....	63
Figura 10 – Mapa de localização do Porto do Mucuripe.....	64
Figura 11 – Domínio de modelagem com contornos de mar e terra e indicação do píer petroleiro do Porto do Mucuripe, em Fortaleza – CE. Mapa produzido no SisBaHiA <sup>®</sup> , utilizando o software de pós-processamento <i>Surfer</i> <sup>®</sup> .....	66
Figura 12 – Malha de elementos finitos usada para a discretização espacial do domínio de modelagem .....	67
Figura 13 – Digitalização das cotas batimétricas a partir das cartas náuticas da DHN nº 701 e 710. Os pontos vermelhos são os pontos de cotas batimétricas digitalizadas. ....	68
Figura 14 – Batimetria resultante da interpolação dos dados das cartas náuticas nº 701 e 710 da DHN no domínio de modelagem.....	69
Figura 15 – Distribuição da amplitude da rugosidade equivalente de fundo ( $\epsilon$ ) na região do domínio de modelagem. ....	71
Figura 16 – Variação mensal média da intensidade do vento na região de estudo para o ano de 2021. ....	72
Figura 17 - Distribuição espacial das estações do FES2014 e do HYCOM na região de estudo. ....	77

Figura 18 – Níveis de maré astronômica e maré meteorológica para os meses de março (A) e outubro (B) de 2021.....	78
Figura 19 – Posicionamento das estações de vento obtidas dos dados de reanálise do modelo atmosférico ERA5, do ECMWF, de onde foram obtidas as séries temporais de vento utilizadas como forçantes no modelo hidrodinâmico. ....	79
Figura 20 - Rosa dos ventos das estações do ERA5, para os meses de março (esquerda) e outubro (direita) de 2021. ....	80
Figura 21 – Mapa dos ventos para os meses de março (esquerda) e outubro (direita) de 2021 .....	81
Figura 22 – Posicionamento do Marégrafo do IBGE e do ADCP, usados no processo de calibração, dentro da área de estudo.....	82
Figura 23 - Parâmetros do modelo de geração de ondas acoplados ao modelo hidrodinâmico	85
Figura 24 - Dados de vento utilizados no modelo de geração de ondas acoplado ao modelo hidrodinâmico.....	85
Figura 25 - Carta operacional de sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo - Bacias do Ceará e Potiguar (Porto do Mucuripe, Fortaleza-CE). ....	88
Figura 26 – Gráfico de perda de massa do óleo no software ADIOS2. Em azul, apresenta-se o percentual de massa evaporada; em verde, tem-se o percentual dispersado; e, em cinza, observa-se o percentual de massa remanescente.....	89
Figura 27 – Curva de decaimento do óleo, obtida do programa ADIOS2, indicando que o volume remanescente após 5 dias é de aproximadamente 85%. ....	90
Figura 28 - Séries temporais de elevação da superfície livre para os meses de março (A) e outubro (B) de 2021.....	94
Figura 29 - Séries temporais de intensidade corrente média para os meses de março (A) e outubro (B) de 2021.....	96
Figura 30 – Elipses de corrente (dispersão) dos meses de março (A) e outubro (B) de 2021..	97
Figura 31 – Caracterização de circulação hidrodinâmica para as fases de baixamar (A), meia-maré enchente (B), preamar (C) e meia-maré vazante (D) de sizígia no mês de março de 2021 (correntes subsuperficiais – 15 cm abaixo da superfície livre). ....	98
Figura 32 – Caracterização de circulação hidrodinâmica para as fases de baixamar (A), meia-maré enchente (B), preamar (C) e meia-maré vazante (D) de sizígia no mês de outubro de 2021 (correntes subsuperficiais – 15 cm abaixo da superfície livre). ....	99
Figura 33 - Mapa da evolução vetorial das correntes nas proximidades do píer petroleiro do Porto do Mucuripe nos meses de março e outubro de 2021.....	100

Figura 34 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 3 h e 6 h após um derrame instantâneo (20 minutos) de 8 m <sup>3</sup> no mês de março.....	102
Figura 35 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 12 h e 24 h após um derrame instantâneo (20 minutos) de 8 m <sup>3</sup> no mês de março.....	102
Figura 36 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 3 h e 6 h após um derrame instantâneo (20 minutos) de 8 m <sup>3</sup> no mês de outubro. ....	104
Figura 37 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 12 h e 24 h após um derrame instantâneo (20 minutos) de 8 m <sup>3</sup> no mês de outubro.....	105
Figura 38 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 3 h e 6 h após um derrame instantâneo (20 minutos) de 200 m <sup>3</sup> no mês de março.....	106
Figura 39 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 12 h e 24 h após um derrame instantâneo (20 minutos) de 200 m <sup>3</sup> no mês de março.....	107
Figura 40 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 3 h e 6 h após um derrame instantâneo (20 minutos) de 200 m <sup>3</sup> no mês de outubro. ....	108
Figura 41 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 12 h e 24 h após um derrame instantâneo (20 minutos) de 200 m <sup>3</sup> no mês de outubro. ....	109
Figura 42 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 3 h e 6 h em um derrame de 1000 m <sup>3</sup> , continuado por 24 horas, no mês de março. ....	110
Figura 43 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 12 h e 24 h, em um derrame de 1000 m <sup>3</sup> , continuado por 24 horas, no mês de março. ....	111
Figura 44 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 3 h, 6 h, 12 h e 24 h, em um derrame de 1000 m <sup>3</sup> , continuado por 24 horas, no mês de outubro.....	112
Figura 45 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 3 h, 6 h, 12 h e 24 h, em um derrame de 1000 m <sup>3</sup> , continuado por 24 horas, no mês de outubro.....	113
Figura 46 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, com concentrações acima de 29 mg/L, no mês de março.....	116
Figura 47 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, com concentrações acima de 29 mg/L, no mês de outubro. ....	117
Figura 48 – Visualização quantitativa (isolinhas de espessura do filme de óleo na camada superficial) da progressão da mancha de óleo de um derrame instantâneo (20 minutos) de 8 m <sup>3</sup> ocorrido no mês de março de 2021.....	120
Figura 49 – Visualização qualitativa (nuvem de partículas, marcando em azul os trechos da costa atingidos pelo óleo) da progressão da mancha de óleo de um derrame instantâneo (20 minutos) de 8 m <sup>3</sup> ocorrido no mês de março de 2021. ....	122

Figura 50 – Visualização quantitativa (isolinhas de espessura do filme de óleo na camada superficial) da progressão da mancha de óleo de um derrame instantâneo (20 minutos) de 200 m <sup>3</sup> ocorrido no mês de março de 2021. ....	123
Figura 51 – Visualização qualitativa (nuvem de partículas, marcando em azul os trechos da costa atingidos pelo óleo) da mancha de óleo de um derrame instantâneo (20 minutos) de 200 m <sup>3</sup> ocorrido no mês de março de 2021. ....	124
Figura 52 – Visualização quantitativa (isolinhas de espessura do filme de óleo na camada superficial) da progressão da mancha de óleo de um derrame de 1.000 m <sup>3</sup> , continuado por 24 horas, ocorrido no mês de março de 2021. ....	126
Figura 53 – Visualização qualitativa (nuvem de partículas, marcando em azul os trechos da costa atingidos pelo óleo) da mancha de óleo de um derrame de 1.000 m <sup>3</sup> , continuado por 24 horas, ocorrido no mês de março de 2021. ....	127
Figura 54 – Tabela de estatística de toque do poluente no litoral, calculada pelo modelo Lagrangeano probabilístico do SisBaHiA <sup>®</sup> . ....	128
Figura 55 – Visualização quantitativa (isolinhas de espessura do filme de óleo na camada superficial) da progressão da mancha de óleo de um derrame instantâneo (20 minutos) de 8 m <sup>3</sup> ocorrido no mês de outubro de 2021. ....	130
Figura 56 – Visualização qualitativa (nuvem de partículas, marcando em azul os trechos da costa atingidos pelo óleo) da mancha de óleo de um derrame instantâneo (20 minutos) de 8 m <sup>3</sup> ocorrido no mês de outubro de 2021. ....	131
Figura 57 – Visualização quantitativa (isolinhas de espessura do filme de óleo na camada superficial) da progressão da mancha de óleo de um derrame instantâneo (20 minutos) de 200 m <sup>3</sup> ocorrido no mês de outubro de 2021. ....	132
Figura 58 – Visualização qualitativa (nuvem de partículas, marcando em azul os trechos da costa atingidos pelo óleo) da mancha de óleo de um derrame instantâneo (20 minutos) de 200 m <sup>3</sup> ocorrido no mês de outubro de 2021. ....	133
Figura 59 – Visualização quantitativa (isolinhas de espessura do filme de óleo na camada superficial) da progressão da mancha de óleo de um derrame de 1.000 m <sup>3</sup> , continuado por 24 horas, ocorrido no mês de outubro de 2021. ....	134
Figura 60 – Visualização qualitativa (nuvem de partículas, marcando em azul os trechos da costa atingidos pelo óleo) da mancha de óleo de um derrame de 1.000 m <sup>3</sup> , continuado por 24 horas, ocorrido no mês de outubro de 2021. ....	135

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise da composição elementar média do petróleo típico .....	29
Tabela 2 – Classificação de petróleos segundo a densidade.....	30
Tabela 3 – Relação entre a aparência do óleo no mar, a espessura estimada da mancha e o volume estimado.....	32
Tabela 4 – Regimes de espalhamento mecânico unidimensional e bidimensional da mancha.	40
Tabela 5 - Coeficientes de espalhamento para cada fase.....	40
Tabela 6 - Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo, $\epsilon$ , sem efeitos de ondas, para uso no módulo 2DH do modelo FIST3D. ....	70
Tabela 7 - Constantes harmônicas referentes à estação FES 1 .....	74
Tabela 8 - Constantes harmônicas referentes à estação FES 2 .....	75
Tabela 9 - Constantes harmônicas referentes à estação FES 3 .....	76
Tabela 11 – Métricas e avaliação estatística da qualidade dos resultados simulados.....	83
Tabela 10 - Relação dos tipos de costa com os respectivos índices de sensibilidade do litoral. ....	87

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>25</b>
2.1 Objetivo geral.....	25
2.2 Objetivos específicos .....	25
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>26</b>
3.1 Panorama legal e regulamentar .....	26
3.1.1 Convenções internacionais .....	26
3.1.2 Legislação brasileira .....	27
3.2 Características e propriedades do petróleo.....	28
3.2.1 Densidade .....	29
3.2.2 Viscosidade .....	32
3.2.3 Tensão superficial .....	33
3.2.4 Distribuição dos pontos de ebulição.....	33
3.2.5 Solubilidade .....	33
3.2.6 Formação de emulsões.....	34
3.3 Transporte e intemperismo do óleo derramado.....	34
3.3.1 Advecção .....	35
3.3.2 Espalhamento.....	37
3.3.3 Difusão turbulenta .....	41
3.3.4 Evaporação .....	42
3.3.5 Emulsificação .....	42
3.3.6 Dispersão .....	45
3.3.7 Dissolução .....	46
3.3.8 Sedimentação.....	46
3.3.9 Oxidação .....	47
3.3.10 Biodegradação .....	48
3.3.11 Interação com a linha de costa.....	49

3.4	Modelagem como ferramenta de apoio na gestão ambiental.....	49
3.5	Sistema de modelagem adotado: SisBaHiA® — Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental .....	50
3.5.1	Modelo hidrodinâmico .....	53
3.5.2	Modelo de geração de ondas .....	60
3.5.3	Modelo de transporte lagrangeano.....	60
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>63</b>
4.1	Região de estudo .....	63
4.2	Modelagem digital do terreno .....	64
4.2.1	Domínio de modelagem e contornos de terra e mar.....	65
4.2.2	Discretização do domínio de modelagem.....	66
4.2.3	Batimetria .....	67
4.2.4	Rugosidade equivalente de fundo.....	69
4.3	Modelo hidrodinâmico (MH).....	71
4.3.1	Cenários de modelagem.....	71
4.3.2	Dados de maré .....	72
4.3.3	Dados de vento .....	78
4.4	Modelo de geração de ondas (MGO).....	81
4.5	Modelo de transporte lagrangeano (MTL).....	85
4.5.1	Condições de contorno .....	86
4.5.2	Curva de decaimento do óleo .....	88
4.5.3	Hipóteses de acidentes.....	90
4.5.4	Análise estatística .....	91
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>93</b>
5.1	Calibração .....	93
5.2	Caracterização dos regimes de circulação hidrodinâmica .....	97
5.3	Transporte da mancha de óleo.....	101

5.3.1	Análise probabilística .....	101
5.3.2	Análise Determinística .....	118
5.3.2.1	Cenário com ventos menos intensos (março de 2021) .....	118
5.3.2.2	Cenário com ventos mais intensos (outubro de 2021).....	128
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>137</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>142</b>

## 1 INTRODUÇÃO

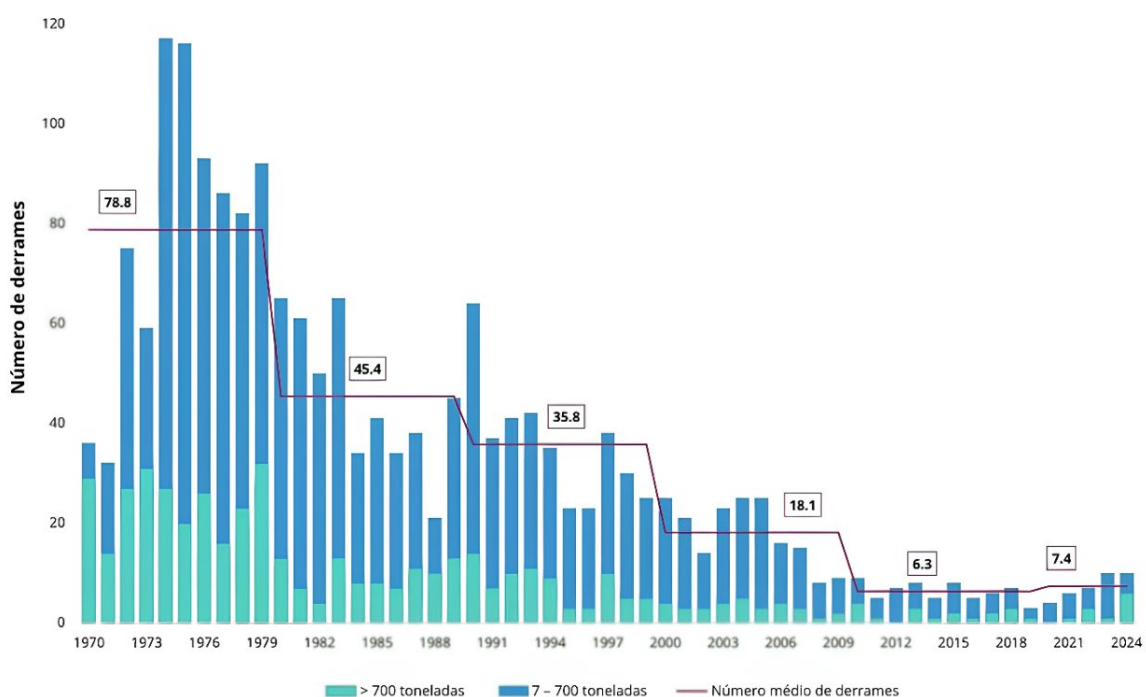
Ao lado dos vastos oceanos e mares, as zonas costeiras estão entre os recursos naturais mais valiosos do planeta. Caracterizadas por elevada densidade demográfica e por abrigarem atividades econômicas de grande relevância — como a indústria, o turismo, a pesca e as operações portuárias —, essas áreas tornam-se especialmente suscetíveis a incidentes de poluição. Tais eventos podem ter origem em operações internas aos portos ou em localidades próximas à linha de costa, mas também em sinistros ambientais ocorridos em alto mar cujas correntes e ventos superficiais acabam por conduzir os poluentes até as áreas costeiras (MARTA-ALMEIDA *et al.*, 2013; CHIAU, 2005).

Nesse contexto, a ocorrência de acidentes envolvendo derrames de óleo em zonas costeiras representa um sério risco aos ecossistemas marinhos, às atividades econômicas dependentes do mar e às comunidades litorâneas, podendo resultar em uma ampla gama de impactos ambientais, econômicos e sociais, com potencial para gerar efeitos residuais de longo prazo na biodiversidade marinha (VANTIKOS e SOTIROPOULOS, 2014; SINGH *et al.*, 2015). De acordo com dados da International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF, 2014b) além dos custos decorrentes da interferência do óleo nas atividades econômicas primordiais dessas regiões, diversos outros setores e instalações essenciais, como usinas de geração de energia elétrica e estações de dessalinização de água do mar, podem ser gravemente afetados, sem mencionar os elevados dispêndios associados às operações de remoção e contenção do produto derramado.

Mesmo com relevantes melhorias tecnológicas e regulatórias, ainda há registros significativos de vazamentos por transporte marítimo, operações portuárias, plataformas e terminais. Em 2024 foram registrados seis derrames de grande proporção (> 700 toneladas), na América do sul, Ásia e Europa, e quatro derrames de média proporção (7 – 700 toneladas), sendo dois na Europa, um na Ásia e um na América do Norte, totalizando cerca de 10.000 toneladas de óleo liberadas no mar envolvendo, principalmente, óleo do tipo combustível. Embora esse número seja menor, quando comparado a décadas passadas, a média da década de 2020, até o momento atual, vem se estabilizando em aproximadamente 7,4 episódios/ano, um registro ligeiramente superior ao da década de 2010, com 6,3 episódios/ano, evidenciando que o risco não foi eliminado e que melhorias nos níveis de segurança marítima e de proteção do meio ambiente marinho ainda são desejáveis e necessárias (ITOPF, 2025; KONTOVAS; PSARAFTIS; VENTIKOS, 2010).

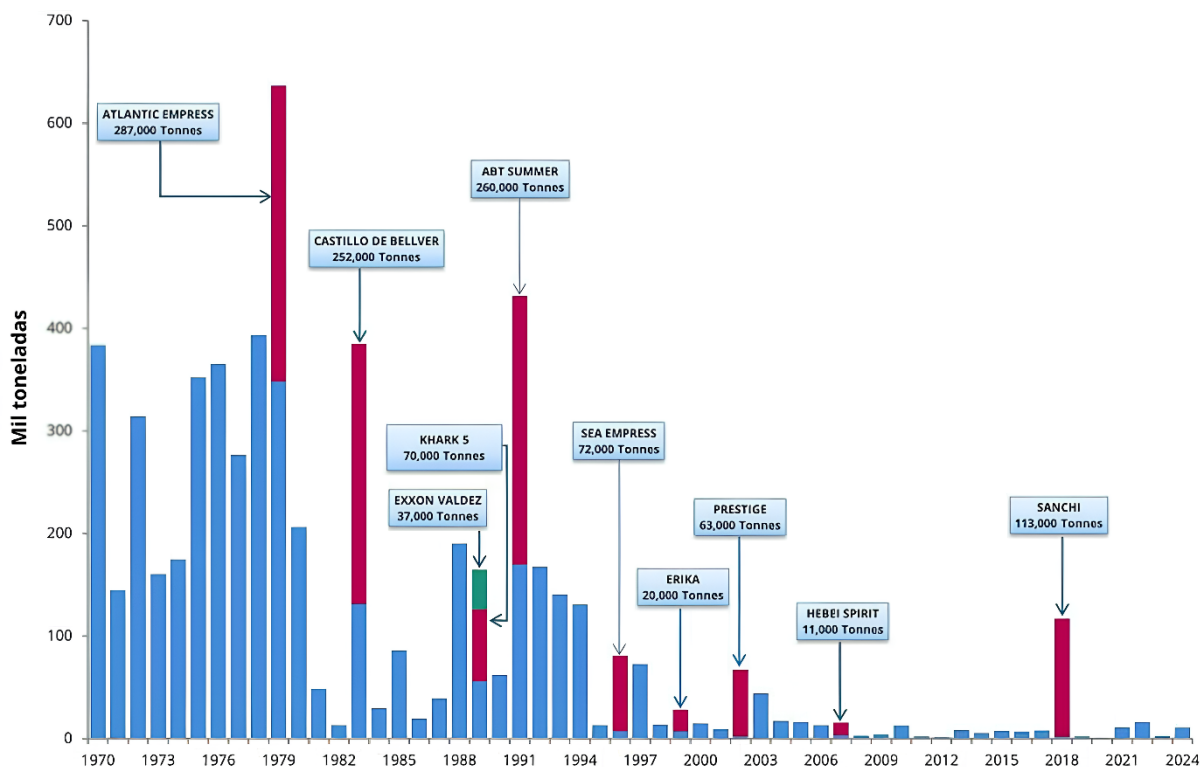
A Figura 1 ilustra o número anual de derrames de petróleo médios (7 – 700 toneladas) e grandes (> 700 toneladas) em petroleiros entre os anos de 1970 até 2024. A observação torna evidente um decréscimo quase constante do número de total de derrames de óleo ao longo das décadas, bem como uma maior ocorrência de eventos de proporção média. Essa tendência de decréscimo também pode ser observada na Figura 2, que exibe a quantidade anual de óleo derramado entre 1970 e 2024. Em termos volumétricos, a quantidade anual de óleo derramado pode ser fortemente influenciada por um único evento de grande magnitude, distorcendo significativamente as estatísticas de longo prazo. Episódios representativos incluem o acidente do Atlantic Empress (1979), com 287.000 toneladas derramadas; o Castillo de Bellver (1983), com 252.000 toneladas; o ABT Summer (1991), com 260.000 toneladas; e o Sanchi (2018), com 113.000 toneladas de óleo liberado no mar (ITOPF, 2025).

Figura 1 – Número de derrames de petróleo médios (7 – 700 toneladas) e grandes (> 700 toneladas), entre 1970 e 2024.



Fonte: ITOPF (2025)

Figura 2 – Quantidades de petróleo derramado com 7 toneladas ou mais em incidentes com petroleiros, entre 1970 e 2024.



Fonte: ITO PF (2025)

Ainda que esse cenário represente uma mudança positiva do ponto de vista ambiental, a intensificação do tráfego marítimo e das operações portuárias das últimas décadas tem elevado de forma significativa o risco de poluição associado à navegação. Para além dos grandes acidentes que provocam derrames pontuais, ganha relevância a poluição crônica decorrente das emissões operacionais de óleo por embarcações. Tais liberações não intencionais ocorrem em atividades rotineiras, como o descarte de água de lastro contaminada por hidrocarbonetos, a descarga de efluentes de máquinas, resíduos pesados e lubrificantes, bem como por vazamentos de casco, falhas em sistemas de bunker, operações de transferência entre navios (*ship-to-ship*) e vazamentos de dutos. Embora o volume individual de cada evento seja geralmente reduzido, seus efeitos cumulativos podem superar em impacto ambiental os próprios derrames de grande magnitude, configurando uma ameaça persistente aos ecossistemas costeiros (DONG *et al*, 2022; LIUBARTSEVA *et al*, 2023; OCEAN STUDIES BOARD, 2003; NACIONAL RESEARCH COUNCIL [NRC], 2003).

A fim de ilustrar essa intensificação do tráfego marítimo, a Figura 3 apresenta a



(BERNARDINHO; SUMIDA, 2017).

Nesse sentido, a intensa expansão econômica do setor petrolífero brasileiro, iniciada nos anos 2000, foi acompanhada por um aumento substancial no número de acidentes com derrames de óleo, atingindo um pico histórico desses eventos. Em resposta, diversas políticas públicas de proteção ambiental foram implementadas e lograram reduzir significativamente tais incidentes ao longo da década seguinte. No entanto, observa-se uma retomada na frequência de poluição por óleo nas águas jurisdicionais brasileiras desde 2019 (ZACHARIAS *et al.*, 2024).

Entre agosto de 2019 e junho de 2021, mais de 3.000 km de extensão da costa brasileira, do extremo nordeste ao sudeste do país, foram atingidos por resíduos de um óleo escuro e viscoso, que reapareceu de forma intermitente durante os períodos de maior intensidade dos ventos, ondas mais altas e de marés de sizígia (REDDY *et al.*, 2022). Estudos baseados em modelagem de derrame e transporte de óleo apresentaram uma estimativa de volume derramado entre 5.000 e 12.500 m<sup>3</sup>, sob a hipótese de descarregamento lento intermediado por falhas estruturais ou mecânicas em um petroleiro (ZACHARIAS; GAMA; FORNARO, 2021).

Em razão da magnitude dos impactos e da extensão territorial afetada, este incidente configura-se como o maior derrame já registrado na costa da América do Sul e em ambientes tropicais. A ausência de coordenação e liderança eficazes por parte do Governo Federal, aliada aos recentes cortes orçamentários em pesquisa científica, comprometeu a implementação de uma resposta rápida e articulada, evidenciando a necessidade urgente de investimentos em programas de pesquisa e na formulação de políticas públicas capazes de prover ferramentas de apoio a emergências ambientais (AZEVEDO *et al.*, 2022; SOARES *et al.*, 2020).

Nesse contexto nacional, o Porto do Mucuripe, situado em Fortaleza, capital do estado do Ceará, configura-se como um polo estratégico de logística e abastecimento energético sob gestão da Petrobras Transportes S.A. (Transpetro) para atender ao polo da Refinaria Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste (Lubinox), sendo a região de estudo selecionada para este trabalho. O terminal aquaviário concentra operações de transferência e armazenagem de gás liquefeito de petróleo (GLP), diesel, gasolina, óleo combustível, lubrificantes e *bunker* (óleo combustível de navios), além de embarque e desembarque de derivados e grânéis líquidos, operando 24 h por dia, sete dias por semana.

Em 2024, o píer petroleiro do Porto do Mucuripe foi palco de 14 operações de transbordo entre navios (*ship-to-ship*), um salto significativo em relação às duas operações

realizadas em 2023, evidenciando a intensificação anual dessas atividades (TRANSPETRO, 2025). Essas operações, que normalmente incluem transferência de óleo combustível, lubrificantes e derivados, reduzem custos logísticos e evitam áreas portuárias superlotadas, mas simultaneamente ampliam a exposição a riscos de poluição por óleo durante manobras complexas, atividades de *bunkering* (abastecimento de combustível para navios) e conexão de oleodutos.

A complexidade e frequência desses procedimentos aumentam a probabilidade de pequenas liberações acidentais de óleo durante manobras de conexão de dutos e *bunkering*. Por exemplo, em 2008, uma colisão entre um rebocador e um navio cargueiro, na bacia do Mucuripe, ocasionou derrame de aproximadamente três toneladas de óleo combustível, incidente que exigiu resposta imediata das autoridades portuárias para contenção. Posteriormente, em 2015, uma extensa mancha vermelha apareceu ao longo da orla de Fortaleza, decorrente de um vazamento de óleo vegetal, resultante da ruptura de tubulações durante as operações do porto, contaminando sedimentos costeiros e comprometendo a qualidade da água.

Tais eventos, ainda que de baixa magnitude individual, possuem potencial para configurar um padrão de poluição crônica, caracterizado por emissões repetidas e cumulativas que podem comprometer a qualidade dos sedimentos e a integridade das comunidades bentônicas adjacentes ao terminal (DONG *et al.*, 2022; LIUBARTSEVA *et al.*, 2023). Ao eleger o Porto do Mucuripe como área de estudo, esta dissertação propõe investigar de forma integrada a hidrodinâmica local e as especificidades operacionais do terminal aquaviário do Porto do Mucuripe, com o objetivo de fundamentar recomendações para a elaboração de políticas de gestão costeira mais resilientes ao contexto tropical cearense.

Em face do exposto, torna-se evidente que a ampliação das opções de resposta a acidentes com derrames de óleo requer o entendimento detalhado do comportamento e transporte das plumas contaminantes sob diferentes condições ambientais — marés, vento, ondas e correntes hidrodinâmicas. Nesse sentido, a aplicação de modelos computacionais de circulação costeira, integrados a submodelos de qualidade de água e transporte de contaminantes, revela-se fundamental para apoiar a elaboração de planos emergenciais e a adoção de estratégias de contingência eficazes. Ao permitir a simulação de cenários hipotéticos e a previsão espacial-temporal da dispersão de óleo, esses sistemas de modelagem fornecem subsídios técnicos indispensáveis à tomada de decisão pelos gestores portuários e ambientais, contribuindo para a mitigação de impactos e o aprimoramento contínuo das práticas de proteção costeira.

Nesse contexto, diversos estudos sobre a circulação hidrodinâmica costeira em Fortaleza têm sido conduzidos via modelagem numérica nos últimos anos, com destaque para a aplicação do SisBaHiA<sup>®</sup> (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental) — um conjunto avançado de modelos computacionais desenvolvido por pesquisadores da COPPE/UFRJ, que utiliza elementos finitos para simular a circulação das águas (modelagem hidrodinâmica 2D ou 3D) e o transporte de contaminantes por meio de módulos eulerianos e lagrangeanos integrados. As simulações realizadas em Fortaleza, utilizando o SisBaHiA<sup>®</sup>, apresentaram excelente concordância com dados observacionais de maré e correntes, validando o uso da plataforma para reproduzir os padrões hidrodinâmicos locais (PEREIRA *et al.*, 2015; SILVA, PEREIRA e ROSMAN, 2017; PEREIRA *et al.*, 2021). Essa robustez metodológica reforça a confiança em sua aplicação para caracterizar o comportamento costeiro local e sustenta sua adoção em estudos de transporte costeiro na região.

Apesar de existirem estudos analíticos, geoquímicos (AZEVEDO *et al.* 2022) e de mapeamento de manchas de óleo nas praias da costa brasileira, especialmente durante os eventos de 2019 e 2022 (ZACHARIAS *et al.*, 2021; ZACHARIAS *et al.*, 2023 LEMOS *et al.*, 2024; ZACHARIAS *et al.*, 2024), não foi identificada na literatura nenhuma aplicação de modelagem numérica da dispersão, trajetória e destino de óleo especificamente na região costeira de Fortaleza ou no Porto do Mucuripe. Em particular, não há registros de uso do SisBaHiA<sup>®</sup> com esse propósito nessa região.

Porém, investigações similares em áreas vizinhas oferecem pistas metodológicas úteis. A modelagem de dispersão de óleo nas proximidades do terminal portuário do Pecém (município do Ceará) empregou o modelo Delft3D para simular cenários de derrame em diferentes estações do ano, destacando-se como uma das poucas aplicações em ambiente costeiro cearense com foco em transporte de óleo (SOUZA *et al.*, 2019).

Além disso, casos de modelagem em regiões estuarinas (como Paranaguá-PR) utilizaram o SisBaHiA<sup>®</sup> acoplado ao modelo de decaimento ADIOS2 para simular derrames hipotéticos sob diferentes cenários hidrodinâmicos, mostrando que os modelos são ferramentas potenciais para suporte à decisão operacional e planejamento emergencial (SOTO, 2004).

Em suma, este trabalho representa um avanço relevante ao introduzir, pela primeira vez em Fortaleza, uma modelagem numérica integrada de derrames de óleo que conecta circulação costeira, transporte e intemperismo em ambiente portuário, ampliando a capacidade de resposta ambiental a partir de análises probabilísticas e determinísticas dos resultados.

## 2 OBJETIVOS

Este capítulo apresenta os objetivos que orientarão o desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente, descreve-se o objetivo geral, que delimita o propósito central e a contribuição esperada do trabalho. Em seguida, são expostos os objetivos específicos, os quais detalham as etapas metodológicas e os resultados parciais necessários para o alcance do objetivo maior.

### 2.1 Objetivo geral

Esta dissertação tem como objetivo geral aplicar técnicas de modelagem hidrodinâmica, integradas a submodelos de transporte de manchas de óleo, para simular cenários de derrames hipotéticos no píer petroleiro do Porto do Mucuripe (Fortaleza–CE), visando a fornecer subsídios técnicos ao planejamento de contingências e à tomada de decisão em gestão portuária e ambiental.

### 2.2 Objetivos específicos

- Implementar, calibrar e validar um modelo hidrodinâmico para o domínio costeiro de Fortaleza–CE, utilizando dados observacionais de campo para assegurar sua fidelidade;
- Caracterizar os regimes de circulação na região de estudo, contemplando:
  - Correntes de maré astronômica (ciclos de sizígia e quadratura);
  - Influência sazonal dos ventos (intensidades mínimas em março e máximas em outubro);
  - Fluxos resultantes da interação entre maré, vento e batimetria.
- Simular a formação e dispersão de manchas de óleo em cenários de derrames hipotéticos no terminal aquaviário do Porto do Mucuripe, mapeando as áreas de contaminação potencial;
- Fornecer subsídios técnicos à gestão portuária, orientando o planejamento de contingências e o desenho de estratégias de resposta a emergências ambientais.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo delinea o arcabouço teórico que embasa a presente investigação, organizado em cinco seções principais.

Inicialmente, a Seção 3.1 examina o panorama legal e regulamentar aplicável ao gerenciamento de riscos de derrames de óleo, incluindo as principais diretrizes internacionais e normas nacionais.

Em seguida, a Seção 3.2 aborda as propriedades físico-químicas do petróleo, enquanto a seção 3.3 apresenta seus processos de intemperismo em meio marinho, determinantes na evolução e destino das plumas contaminantes.

Na sequência, a Seção 3.4 discute a modelagem hidrodinâmica como uma ferramenta de apoio à gestão ambiental costeira, enfatizando sua aplicação em cenários de emergência.

Finalmente, a Seção 3.5 detalha o modelo hidrodinâmico SisBaHiA<sup>®</sup> adotado e o esquema de transporte lagrangeano, evidenciando seus princípios de funcionamento, parametrizações e condições de contorno.

#### 3.1 Panorama legal e regulamentar

A legislação sobre derrames de óleo configura-se como um arcabouço jurídico complexo, cujo desenvolvimento tem sido impulsionado por grandes acidentes ambientais e pela necessidade de proteção dos ecossistemas marinhos e costeiros. Tanto em âmbito internacional quanto nacional, busca-se conciliar medidas preventivas, corretivas e de responsabilização, estruturando planos de contingência e mecanismos de resposta imediata. A seguir, apresentam-se os principais instrumentos legais que norteiam a gestão ambiental de derrames de óleo, com ênfase nas convenções internacionais e nos diplomas normativos brasileiros (DEMONER, 2023; GURGEL, 2016; SOTO, 2004).

##### 3.1.1 *Convenções internacionais*

Desde meados do século XX, o tratamento jurídico dos derrames de óleo evoluiu de maneira progressiva, sempre motivado por grandes acidentes e pelo crescente reconhecimento dos riscos à biodiversidade marinha.

Nesse cenário pioneiro, a International Convention for the Prevention of Pollution of the Sea by Oil (OILPOL) foi adotada em 1954, estabelecendo limites de descarga de efluentes oleosos em 100 ppm até 50 milhas náuticas ( $\approx 92,6$  km) da costa e impondo aos

Estados-parte a instalação de estações receptoras de águas oleosas (IMO, 1954; SIQUEIRA, 2015)

Posteriormente, em 1969, a Convenção de Responsabilidade Civil por Poluição por Óleo (CLC) instituiu a responsabilidade objetiva do armador, definindo um sistema obrigatório de seguro para petroleiros e tetos de indenização em Direitos Especiais de Saque (SDR), variando de 3 milhões a 59,7 milhões SDR (IMO, 1969). Em complemento, a Convenção de 1971 criou o IOPC Fund, um fundo financiado por contribuições sobre o volume de petróleo transportado, destinado a cobrir danos que excedam o limite de responsabilidade do armador, o qual foi revisado em 1992 para teto global de 750 milhões SDR (IOPC Fund, 1992; DOMONER, 2023; SIQUEIRA, 2015; SOTO, 2004).

A necessidade de ampliar o escopo levou, em 1973/78, à MARPOL, que hoje é o principal instrumento para controle de poluentes de navios. Com seis anexos sobre óleo, substâncias nocivas, esgotos, lixo e emissões atmosféricas, a MARPOL instituiu o casco duplo para petroleiros construídos após julho de 1996 e reduziu sua vida útil para 25 anos, reforçando inspeções periódicas (IMO, 1973/78; DOMONER, 2023; SIQUEIRA, 2015; SOTO, 2004).

Com vistas a cobrir também a poluição de origem terrestre, a Convenção de Paris de 1974 responsabiliza os Estados-parte por descargas provenientes de portos, terminais e instalações costeiras, em vigor desde maio de 1978 (UNESCO/IMO, 1978; SOTO, 2004).

Por fim, a OPRC 1990 fortaleceu a cooperação internacional em emergências, impondo a elaboração de planos de contingência em portos, plataformas e terminais, além de protocolos de notificação e assistência mútua (IMO, 1990; SIQUEIRA, 2015; SOTO, 2004).

### ***3.1.2 Legislação brasileira***

No Brasil, a recepção dessas convenções foi acompanhada por um aprofundamento interno, resultando em um arcabouço robusto, porém em constante aperfeiçoamento.

Desde o Decreto 3.334/1899, que já vedava o lançamento de resíduos de navios em águas interiores, até a Lei 5.357/1967, primeira “Lei do Óleo” nacional, estabelecendo sanções para embarcações e terminais poluidores, o Brasil deu os primeiros passos em direção a um controle ambiental mais rigoroso. A seguir, os Decretos 79.437/1971 e 83.540/1979 internalizaram a CLC 1969, enquanto o Decreto Legislativo 2.508/1998 aprovou a MARPOL 73/78 e o 43/1998 ratificou a OPRC 90. Esses atos garantiram alinhamento técnico e legal com as melhores práticas internacionais (DOMONER, 2023; Gurgel, 2016; SOTO, 2004; POSSOBON et al, 2021).

Na virada do milênio, destacam-se a Lei 9.478/1997, que criou a ANP e impôs comunicação imediata de incidentes, e a Lei 9.966/2000, marco contemporâneo que proibiu totalmente a descarga de óleo em águas jurisdicionais e estruturou a Autoridade Marítima como coordenadora da resposta emergencial. Ademais, o Decreto 4.136/2002 definiu sanções para infrações e o 4.871/2003 instituiu Planos de Área integrando múltiplos Planos de Emergência Individuais. Mais recentemente, o Decreto 8.127/2013 criou o Plano Nacional de Contingência (PNC), fundamental para grandes acidentes (DOMONER, 2023; SIQUEIRA, 2015; SOTO, 2004).

Ao mesmo tempo, portarias e resoluções detalharam exigências operacionais: As Portarias MT 124/1980 e Marinha 046/1996 estabeleceram afastamentos mínimos de estruturas poluentes e implementaram o Código ISM, que estabelece requisitos para implantação de um sistema de gestão de segurança a bordo de navios; As Resoluções CONAMA 237/1997, 269/2000, 398/2008, 472/2015 e 482/2017 definiram critérios para licenciamento, uso de dispersantes, elaboração de Planos de Emergência Individual (PEIs) e queima in situ; A Instrução Normativa IBAMA 26/2018 aprimorou o monitoramento do uso de dispersantes (DOMONER, 2023; SIQUEIRA, 2015; SOTO, 2004).

### **3.2 Características e propriedades do petróleo**

O petróleo é um recurso natural de origem fóssil, formado pela deposição e transformação termoquímica de matéria orgânica, majoritariamente compostos planctônicos e vegetais, em ambientes sedimentares lacustres ou marinhos ao longo de milhões de anos. Apresentando-se em estado líquido ou semissólido, sua coloração varia entre tonalidades âmbar e negra, dependendo das características geológicas do reservatório (ROSSO, 1987).

Segundo a norma ASTM D4175 (2024), o petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos que ocorre naturalmente, geralmente em estado líquido, podendo também conter compostos de enxofre, nitrogênio, oxigênio, metais e outros elementos, que influenciam suas propriedades e o tornam um recurso essencial para a produção de combustíveis e produtos derivados.

As diferentes famílias de hidrocarbonetos presentes no petróleo, como parafínicos, naftênicos e aromáticos, possuem propriedades distintas, o que resulta em variações significativas nas características do petróleo. Essas variações podem incluir desde óleos claros e fluidos, com altas proporções de destilados leves, até óleos viscosos e escuros, ricos em destilados pesados. O petróleo é inflamável à temperatura ambiente e sua densidade pode variar

entre 0,75 e 1,0. Em alguns casos, seu odor é desagradável devido à presença de compostos sulfurados (FARAH, 2012). Mesmo com tais distinções, sua composição elementar média, apresentada na Tabela 1, é pouco variável.

Tabela 1 – Análise da composição elementar média do petróleo típico

<b>Elemento</b>	<b>Porcentagem Mássica (%)</b>
Carbono	83,0 a 87,0
Hidrogênio	11,0 a 14,0
Enxofre	0,06 a 8,0
Nitrogênio	0,11 a 1,7
Oxigênio	0,5
Metais	0,3

Fonte: FARAH (2012).

As propriedades físico-químicas do óleo são de fundamental importância na caracterização do grau de impacto causado em situações de derramamento no mar, dado que elas têm influência direta sobre o comportamento evolutivo da mancha de óleo ao longo do tempo. Durante os processos de transporte e intemperismo do óleo derramado, essas propriedades assumem um comportamento variável no tempo, em especial a densidade, a viscosidade e a tensão superficial (WANG, SHEN e ZHENG, 2005).

### **3.2.1 Densidade**

A densidade é definida como massa por unidade de volume e varia conforme a temperatura e a pressão às quais a substância é submetida. Por ser uma propriedade aditiva em termos volumétricos, a densidade representa uma informação essencial sobre o petróleo, pois permite estimar a composição média das frações leves e pesadas que o compõem (FARAH, 2012). Apesar de a maioria dos óleos possuírem densidade inferior à da água, alguns tipos apresentam densidade superior a 1,0 kg/L, o que torna o comportamento da mancha dependente das condições de salinidade e temperatura da água no local do derramamento. Nessas circunstâncias, o óleo flutuará se sua densidade for menor do que a da água.

Além de variar com a temperatura, a densidade do óleo também tende a aumentar após um derramamento devido à evaporação de suas frações voláteis, que possuem menor densidade. Esse processo de evaporação pode ser suficientemente intenso para elevar a

densidade de determinados óleos, resultando em seu eventual afundamento na coluna d'água (SOTO, 2004). De acordo com Farah (2012), a indústria do petróleo frequentemente utiliza a escala de densidade API (American Petroleum Institute), que é baseada na densidade relativa (ou densidade específica) do produto a 15,6 °C/15,6 °C (Equação 1).

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{d_{15,6/15,6}} - 131,5 \quad (1)$$

A classificação do petróleo com base na densidade API é apresentada na Tabela 2. Óleos com maior densidade API (ou menor densidade relativa) tendem a ser menos persistentes no ambiente. Contudo, seu comportamento específico também depende de suas propriedades e das condições ambientais no momento do derrame (ITOPF, 2014d).

Tabela 2 – Classificação de petróleos segundo a densidade

Densidade (°API)	Classificação
API ≥ 40	Extra leve
40 > API ≥ 33	Leve
33 > API ≥ 27	Médio
27 > API ≥ 19	Pesado
19 > API ≥ 15	Extra pesado
API < 15	Asfáltico

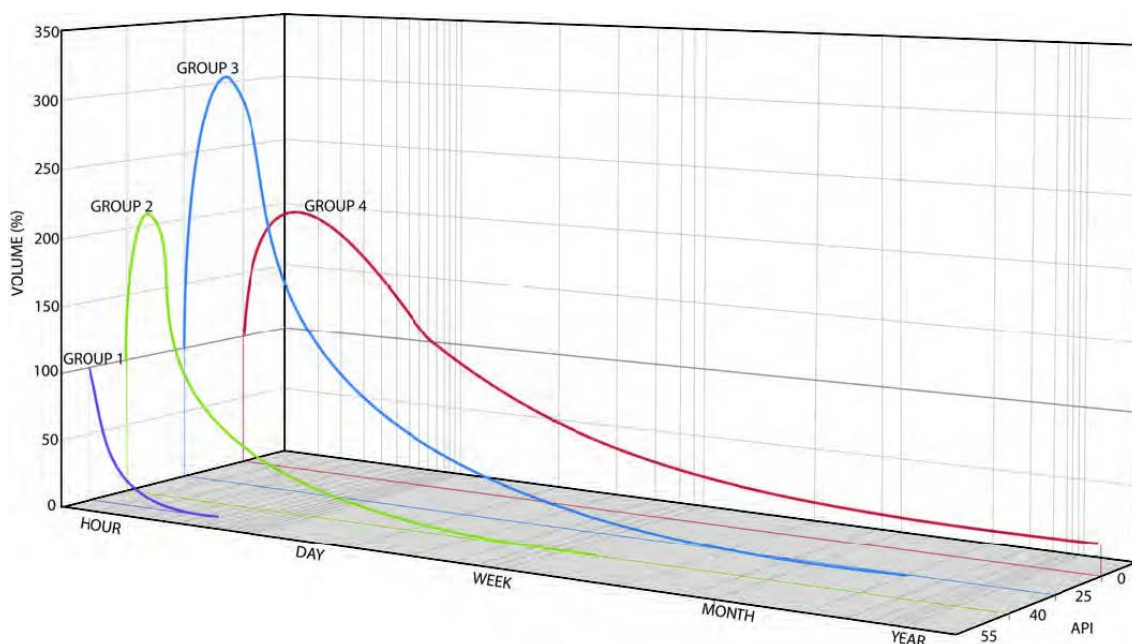
Fonte: FARAH (2012).

De acordo com a publicação técnica nº 2 do ITOPF (2014d), óleos com maior densidade API tendem a ser menos persistentes no ambiente. Para estimativas empíricas aproximadas de sua persistência, os óleos são classificados em quatro grupos com base na densidade específica: o Grupo 1 inclui óleos com densidade específica inferior a 0,8 (API > 45); o Grupo 2 abrange óleos com densidade específica entre 0,8 e 0,85 (API 35–45); o Grupo 3 compreende óleos com densidade específica entre 0,85 e 0,95 (API 17,5–35); e o Grupo 4 corresponde aos óleos com densidade específica superior a 0,95 (API < 17,5).

O Gráfico 1 apresenta, de forma simplificada, a taxa de remoção natural de óleos classificados nos quatro grupos supracitados, considerando os processos de intemperismo e a formação de emulsões óleo-água ao longo do tempo. Esse esquema, fundamentado em

observações realizadas em campo, visa demonstrar a relação entre a persistência do óleo e suas propriedades físicas. Contudo, ressalta-se que as curvas representam um comportamento médio estimado para cada grupo, de modo que o comportamento real do óleo no ambiente pode variar significativamente em função de suas características intrínsecas e das condições ambientais presentes no momento do derrame (ITOPF, 2014d). Os processos de transporte intemperismo que ocorrem após o derramamento do óleo no ambiente marinho são descritos detalhadamente na seção 2.3.

Gráfico 1 – Volume de óleo e emulsão de água em óleo, remanescente na superfície do mar ao longo de seu envelhecimento para os quatro grupos.



Fonte: ITOPF (2014d).

Conforme a publicação técnica nº 1 do ITOPF (2024), é possível realizar uma estimativa aproximada do volume de óleo derramado de uma ordem de magnitude ao considerar a aparência e cor da mancha. A espessura do óleo pode sofrer variações substanciais dentro de uma mancha, desde valores inferiores a  $4 \times 10^{-5}$  mm até valores superiores a 1 mm, dependendo de fatores como a viscosidade do óleo e as condições ambientais. Óleos com baixa viscosidade tendem a se espalhar rapidamente e atingem uma espessura média de aproximadamente 0,1 mm, enquanto óleos mais viscosos podem manter uma espessura maior.

Para a quantificação do volume de óleo observada no mar, um método amplamente utilizado é o Bonn Agreement Oil Appearance Code (BAOAC), que classifica a mancha de óleo em cinco categorias de aparência, associando-as a faixas de espessura. Essas categorias

forneem uma estimativa do volume derramado, sendo que os valores mínimos são empregados para propósitos legais ou de execução, enquanto os valores máximos são usados para operações de planejamento e resposta. Além disso, alguns óleos podem formar emulsões, incluindo pequenas gotículas de água, o que aumenta seu volume e dificulta a estimativa precisa do conteúdo de água, que pode variar de 50% a 75% da mistura. O BAOAC é especialmente útil para operadores de aeronaves de vigilância, permitindo uma avaliação rápida e eficiente da situação, embora sempre com a ressalva de que essas estimativas devem ser tratadas com cautela devido às incertezas inerentes ao processo (ITOPF, 2024). A relação entre a aparência e coloração do óleo com a espessura aproximada da mancha pode ser apreciada na Tabela 3.

Tabela 3 – Relação entre a aparência do óleo no mar, a espessura estimada da mancha e o volume estimado.

Aparência	Espessura (mm)	Volume (m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )
Brilho prateado/cinza	0,00004 – 0,0003	0,04 – 0,3
Brilho iridescente/arco-íris	0,0003 – 0,005	0,3 – 5,0
Brilho metálico	0,005 – 0,05	5,0 – 50
Cor natural descontínua	0,05 – 0,2	50 – 200
Cor natural contínua	> 0,2	> 200
Marrom/laranja	> 0,1	> 1.000

Fonte: ITOPF, 2024

### 3.2.2 Viscosidade

A viscosidade é definida como a resistência de um fluido ao movimento ou escoamento, podendo também ser descrita como o atrito interno entre suas moléculas ou a resistência ao cisalhamento. Trata-se de um fator que influencia diretamente a facilidade com que o produto se desloca, sendo que fluidos com menor viscosidade apresentam maior facilidade de escoamento. Pode ser expressa como viscosidade dinâmica (ou absoluta) ou viscosidade cinemática.

Essa propriedade diminui com o aumento da temperatura e aumenta com o envelhecimento do óleo. A viscosidade é um parâmetro determinante para o grau de dispersão do óleo, sua penetração em solos ou sedimentos e para a escolha dos equipamentos mecânicos mais adequados à sua remoção (SOTO, 2004). Nos modelos, a viscosidade cinemática é mais comumente utilizada, pois é uma função da viscosidade absoluta e da densidade, sendo, portanto, inversamente proporcional à temperatura (ZACHARIAS, 2017).

### ***3.2.3 Tensão superficial***

Quando o óleo é derramado na água, ocorre uma tendência ao espalhamento, resultante da ação das forças gravitacional e de tensão superficial, sendo amplificada pelo movimento da superfície, induzido por ventos, correntes e marés. As forças que atuam como resistência a esse espalhamento são a força de inércia e a viscosidade. (FAY, 1969; FAY, 1971)

A tensão superficial age na interface entre a mancha e a água marinha, desempenhando dois papéis principais: promover a coesão da mancha, evitando a fragmentação em manchas menores, e impedir a mistura entre os componentes da mancha e o meio aquático (FAY, 1971).

No contexto de derramamentos de óleo, a borda frontal da mancha em expansão apresenta um desequilíbrio entre as tensões superficiais na interface água-ar e a soma das tensões superficiais nas interfaces óleo-ar e óleo-água. A diferença líquida dessas tensões, denominada coeficiente de espalhamento, é o fator que impulsiona o óleo a se espalhar sobre a superfície da água, atuando na borda da película e puxando-a para fora. Ao contrário da força gravitacional, que é proporcional à espessura da mancha de óleo, a força de espalhamento é independente desse parâmetro, fazendo com que, eventualmente, a força da tensão superficial predomine como a força de espalhamento (FAY, 1971).

### ***3.2.4 Distribuição dos pontos de ebulição***

O ponto de ebulição é definido como a temperatura à qual a pressão de vapor de uma substância iguala a pressão externa exercida sobre ela, permitindo a transição da fase líquida para a fase de vapor. De acordo com Soto (2004), na indústria de refino de petróleo, a distribuição dos pontos de ebulição de um produto é amplamente utilizada para avaliar a qualidade de novos produtos, monitorar sua conformidade durante o transporte e otimizar os resultados nos processos de refinação.

No contexto da análise de óleos para fins ambientais, essas informações são fundamentais para indicar a volatilidade e a distribuição dos componentes do produto, permitindo prever a evolução do processo de evaporação. De maneira geral, a determinação da distribuição dos pontos de ebulição é realizada por meio de destilação (SOTO, 2004).

### ***3.2.5 Solubilidade***

Hidrocarbonetos leves, como aromáticos e algumas parafinas, possuem uma solubilidade relativamente elevada, permitindo que se dissolvam rapidamente na água,

especialmente em condições de turbulência. Esses compostos, caracterizados por baixos pontos de ebulição, tendem a se evaporar rapidamente após o derramamento. No entanto, a solubilidade total de um petróleo na água permanece extremamente baixa, mesmo considerando a presença desses compostos mais solúveis. (SOTO, 2004).

Conforme as frações mais leves, e conseqüentemente mais solúveis, do óleo vão sendo evaporadas, ocorre um gradual aumento na densidade e na viscosidade do óleo remanescente, progredindo conforme o avanço da idade (envelhecimento) da mancha de óleo (ZACHARIAS, 2017).

### **3.2.6 Formação de emulsões**

De acordo com Soto (2004). Uma emulsão água-óleo consiste em uma dispersão estável de pequenas gotículas de água no interior do óleo. Após sua formação, essas emulsões podem adquirir propriedades significativamente diferentes das do óleo antes do processo de emulsificação. Essas alterações têm implicações relevantes tanto para o comportamento do óleo derramado quanto para as operações subsequentes de limpeza. Por essa razão, é essencial avaliar se o óleo possui tendência à formação de emulsões estáveis e determinar o conteúdo máximo de água que essas emulsões podem incorporar.

### **3.3 Transporte e intemperismo do óleo derramado**

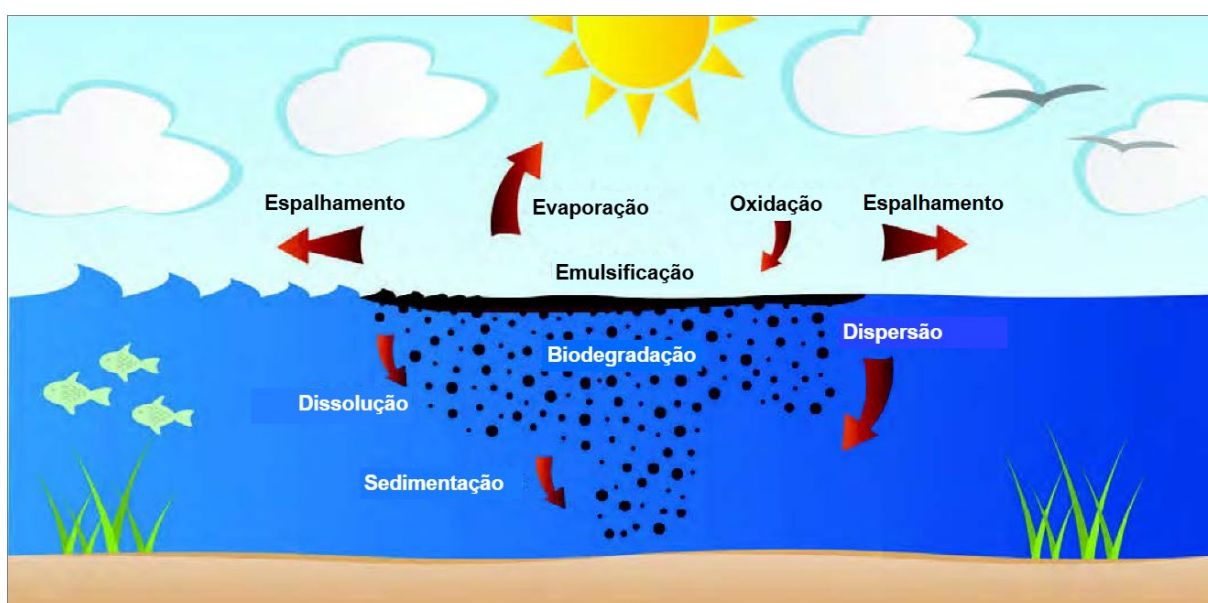
De acordo com a NORTAM 09, da Diretoria de Portos e Costas da Marinha do Brasil (BRASIL, 2007), quando ocorre o derrame de óleo (e de seus derivados) no ambiente marinho, o material se espalha pela superfície da água e é submetido a uma série de processos químicos e físicos, conhecidos coletivamente como intemperismo. Esses processos alteram as características do óleo e determinam seu destino no meio aquático.

Alguns desses mecanismos, como evaporação, dispersão, dissolução e sedimentação, contribuem para a remoção do óleo da água. Por outro lado, outros processos, como a formação de emulsões (*mousse*), e o resultante aumento na viscosidade, prolongam a presença do óleo na superfície marinha. Em prazos mais longos, o próprio ecossistema marinho desempenha um papel essencial na assimilação do óleo, principalmente por meio do processo natural de biodegradação (BRASIL, 2007).

Os modelos desenvolvidos para simular as diferentes etapas de um derrame de óleo no ambiente marinho geralmente classificam os processos predominantes em nove categorias principais: advecção, espalhamento, evaporação, dissolução, emulsificação, dispersão,

oxidação, sedimentação e biodegradação. Essa abordagem metodológica é amplamente reconhecida na literatura, conforme destacado por Huang (1983), e permite compreender de forma mais precisa as dinâmicas químicas e físicas que determinam o comportamento do óleo no ecossistema afetado. A Figura 4 ilustra, de maneira esquemática, os processos de intemperismo que atuam sobre o óleo derramado no ambiente marinho.

Figura 4 – Visão geral dos principais processos de intemperismo atuantes sobre o óleo derramado no ambiente marinho



Fonte: Adaptado de ITOPF (2014d).

Conforme Siqueira (2015), nos estágios iniciais de um derramamento de óleo, os processos de evaporação, dissolução, espalhamento e dispersão são os principais mecanismos atuantes, predominando nas primeiras horas após o evento. Por outro lado, a formação de emulsões tende a se intensificar após dias ou semanas de exposição do óleo ao ambiente. Já os processos de oxidação, biodegradação e sedimentação, embora menos significativos em termos de impacto imediato, começam a desempenhar um papel mais relevante alguns dias após o incidente, mantendo sua influência por períodos prolongados. Esses processos, no conjunto, determinam o comportamento e a persistência do óleo no ambiente marinho ao longo do tempo.

### 3.3.1 Advecção

A advecção refere-se ao transporte da mancha de óleo sobre a superfície oceânica, influenciado por forçantes como os ventos, ondas e correntes marítimas. Esse processo é

fundamental para prever o deslocamento da mancha desde o ponto de origem até sua destinação final, permitindo identificar as áreas potencialmente afetadas pelo derramamento de óleo (ZACHARIAS, 2017). Nesse sentido, as correntes subsuperficiais também desempenham um papel relevante ao transportar pequenas partículas de óleo que se desprendem da mancha principal por dispersão e permanecem suspensas na coluna d'água por determinado período de tempo (PALADINO, 2000).

De acordo com Huang (1983), os mecanismos que governam a advecção das manchas de óleo na superfície são, em sua maioria, as tensões de cisalhamento geradas pelo vento e pelas correntes subjacentes. Em particular, o vento desempenha um papel essencial ao criar tensões na interface entre o ar e o mar, o que induz correntes de deriva superficial e ondas que transportam as manchas de óleo. Por isso, a modelagem precisa do campo do vento é tão relevante quanto a modelagem do campo das correntes marítimas nos processos de advecção. Paladino (2000) destaca que as correntes induzidas pelas ondas e ventos locais são usualmente adotadas como proporcionais à velocidade do vento, utilizando-se um fator semi-empírico e um ângulo de deflexão relativo à rotação da terra.

Dentro desse contexto, Zacharias (2017) afirma que a combinação entre os efeitos das correntes de vento e de superfície no processo advectivo da mancha de óleo é usualmente expresso a partir da soma vetorial entre os componentes ( $u$ ,  $v$ ) dessas forçantes. Essa abordagem costuma ser preferencialmente adotada pela maioria dos modelos, dada a sua simplicidade, rápida implementação, facilidade de calibração e capacidade de representar os efeitos majoritários do transporte.

Modelos hidrodinâmicos bidimensionais descrevem de maneira bastante adequada a trajetória da mancha em condições de ventos fracos e sem ondas, uma vez que os movimentos predominantes são horizontais e a uniformidade das forças atuantes na superfície limita os efeitos de dispersão (entranhamento de gotículas de óleo na coluna d'água) da mancha. No entanto, com o surgimento de ondas e o aumento da velocidade do vento, tem-se a intensificação do processo de dispersão da mancha de óleo (ZACHARIAS, 2017). Além disso, devido à elevada fluotabilidade do óleo, seu transporte tende a ocorrer majoritariamente na camada superficial, resultando em uma maior concentração de esforços na representatividade do transporte nessa camada pela maioria dos modelos (HUANG, 1993).

No contexto de um derramamento, os processos de transformação físico-química aos quais o óleo é submetido podem alterar significativamente suas propriedades, incluindo sua densidade. Caso o óleo adquira densidade semelhante à da água, ele perde parte de sua

flutuabilidade e passa a estar sujeito, também, ao transporte vertical na forma de pequenas gotículas imersas na coluna d'água (REED et. al., 1999).

Diante desse cenário, os modelos hidrodinâmicos tridimensionais podem fornecer resultados de correntes em várias camadas ao longo de toda coluna d'água, possibilitando a simulação do transporte advectivo subsuperficial, bem como do movimento vertical do óleo disperso. Contudo, sua eficácia é dependente de ajustes precisos, calibração adequada e disponibilidade de dados sobre correntes diferentes profundidades da região. Além disso, o tipo de óleo, que nem sempre entra ou permanece na coluna d'água, e as condições superficiais, como a agitação necessária para dar início ao processo de dispersão, são fatores determinantes para o sucesso da simulação (ZACHARIAS, 2017).

### ***3.3.2 Espalhamento***

O espalhamento natural do óleo pode ser entendido como a expansão da área da mancha oriunda da tendência que o óleo possui de escoar sobre si mesmo. Trata-se de um dos efeitos mais importantes para a correta descrição do desenvolvimento da mancha de óleo ao longo do tempo, principalmente nos estágios iniciais após o derrame. Fay (1969) analisa que esse fenômeno é governado pelo equilíbrio entre forças gravitacionais e de tensão superficial, que promovem a expansão da mancha, e forças viscosas, que geram resistência a esse movimento.

De acordo com Zacharias (2017), as equações que descrevem o intemperismo da mancha de óleo tomam a espessura e/ou a área como variáveis fundamentais, conferindo ao processo de espalhamento uma característica de controle sobre a evolução temporal do intemperismo ao longo de uma simulação. Dentro desse contexto, Huang (1983) destaca a importância da correta caracterização do processo de espalhamento no que tange a determinação de contramedidas emergenciais em casos de derramamento, possibilitando a determinação da área de contaminação, a escolha dos métodos de recolhimento do óleo e os dispersantes químicos a serem utilizados. Além disso, outros mecanismos de intemperismo, como a evaporação, a dissolução, a foto-oxidação e a biodegradação, sofrem forte influência desse processo.

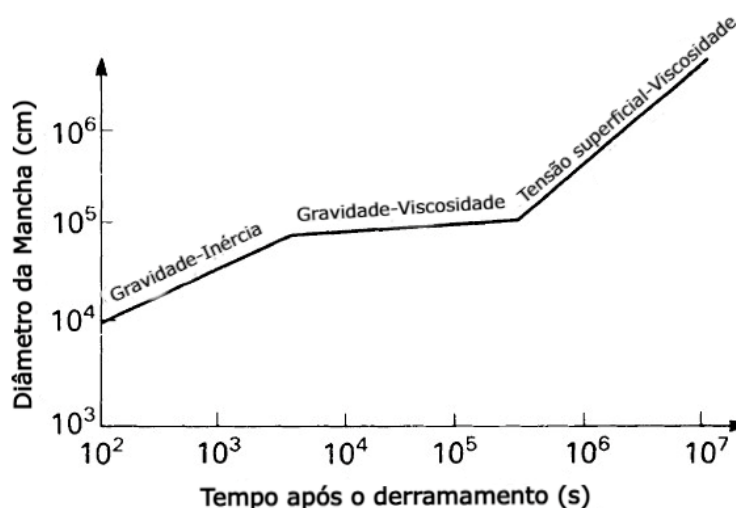
Segundo Fay (1969), o espalhamento do óleo pode ser dividido em três fases principais, cada uma caracterizada por um equilíbrio distinto entre as forças envolvidas. Na fase inicial (gravidade-inércia), a gravidade é a força dominante e impulsiona a expansão horizontal do óleo para reduzir sua energia potencial, atuando como força ativa. Nesse estágio, as forças

inerciais do óleo e da camada de água adjacente resistem ao movimento, criando uma dinâmica em que a mancha se expande rapidamente, mas com resistência crescente. Essa fase é particularmente relevante nos primeiros minutos após o derramamento, quando a espessura da mancha ainda é significativa e a energia potencial do sistema é alta.

Nesse sentido, à medida que o tempo avança, o espalhamento entra na fase intermediária (gravidade-viscosidade), na qual a gravidade continua a atuar como força motriz, mas a resistência viscosa na interface óleo-água começa a limitar a expansão. A espessura da mancha diminui consideravelmente, e a camada de água arrastada pelo óleo aumenta, ampliando o efeito retardador da viscosidade. Essa fase é marcada por uma redução gradual na taxa de espalhamento, conforme a energia cinética do sistema é dissipada (FAY, 1969; PALADINO, 2000).

Por fim, na fase final (tensão superficial-viscosidade), a tensão superficial torna-se a força dominante, enquanto a viscosidade continua a atuar como fator de resistência. Nesse estágio, a espessura da mancha é bastante reduzida, e a expansão ocorre em um ritmo muito mais lento. A tensão superficial na interface óleo-água promove uma expansão residual, mas a viscosidade do óleo e da água limita significativamente o movimento. Essa fase é crucial para entender a estabilização da mancha e a cessação do espalhamento, que ocorre quando as forças de expansão e resistência atingem um equilíbrio (FAY, 1969; FINGAS, 2015; PALADINO, 2000). O Gráfico 2 ilustra uma curva típica de espalhamento, onde as três fases descritas por Fay (1969) podem ser observadas.

Gráfico 2 - Curva de espalhamento típica de uma mancha de petróleo em águas calmas.

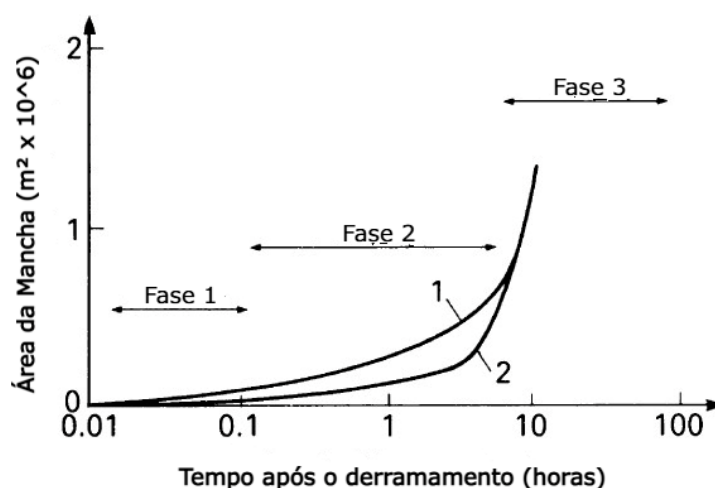


Fonte: Adaptado de Doerffer (1992).

A tensão superficial é uma propriedade relacionada a duas faces ou substâncias, de modo que é necessário utilizar uma relação entre os três elementos envolvidos no sistema – água, ar e óleo. A quantificação da tensão superficial que atua na mancha é feita usualmente a partir da definição do coeficiente de espalhamento, que corresponde à diferença entre a tensão superficial do ar e da água (PALADINO, 2000).

Uma vez que a gravidade é a força motriz do espalhamento da mancha nos instantes iniciais, a densidade do óleo influencia inicialmente sua dispersão superficial após o derrame, com óleos leves espalhando-se mais rapidamente que os pesados. Entretanto, Doerffer (1992) aponta estudos que mostram uma convergência das áreas de espalhamento, cerca de seis horas após o espalhamento, para óleos com diferentes densidades, evidenciando que o coeficiente de espalhamento predomina sobre a densidade do óleo como fator determinante do fenômeno e refletindo a sua dinâmica temporal. O Gráfico 3 ilustra a influência da densidade no espalhamento para um óleo leve (0,700 kg/L) e um óleo pesado (0,980 kg/L).

Gráfico 3 – Influência da densidade do óleo na taxa de espalhamento para um derramamento de  $10^3\text{m}^3$  e coeficiente de espalhamento de 5 mN: (1) densidade do óleo de 0,700 kg/L; (2) densidade do óleo de 0,980 kg/L.



Fonte: Adaptado de Doerffer (1992).

Os valores do raio da mancha ( $R_m$ ), quando sua forma é considerada aproximadamente circular (espalhamento bidimensional), e do comprimento da mancha ( $L_m$ ), quando ela possui forma alongada (espalhamento unidimensional), podem ser obtidos a partir das equações apresentadas na Tabela 4, descritas para cada fase do espalhamento (FAY, 1971). A mancha pode ser considerada alongada quando a razão entre seu comprimento e sua largura for maior que três (SHEN; YAPA; PETROSKI, 1987).

Tabela 4 – Regimes de espalhamento mecânico unidimensional e bidimensional da mancha.

<b>Fase do Espalhamento</b>	<b>Unidimensional</b>	<b>Bidimensional</b>
<b>Inercial</b>	$L_m = K_{1i}(\Delta g A t^2)^{1/3}$	$R_m = K_{2i}(\Delta g V t^2)^{1/4}$
<b>Gravitacional-Viscosa</b>	$L_m = K_{1v} \left( \frac{\Delta g A^2 t^3}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{4}}$	$R_m = K_{2v} \left( \frac{\Delta g V^2 t^3}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{6}}$
<b>Tensão Superficial</b>	$L_m = K_{1t} \left( \frac{\sigma^2 t^3}{\rho_w^2 \nu} \right)^{\frac{1}{4}}$	$R_m = K_{2t} \left( \frac{\sigma^2 t^3}{\rho_w^2 \nu} \right)^{\frac{1}{4}}$

Fonte: FAY (1971).

Em que:

- $A$ : área da mancha;
- $V$ : volume derramado de óleo;
- $\sigma$ : tensão superficial resultante;
- $\nu$ : coeficiente de viscosidade cinemática da água;
- $g$ : aceleração gravitacional;
- $\rho_w$ : densidade da água;
- $\rho_o$ : densidade do óleo;
- $\Delta$ :  $(\rho_w - \rho_o)/\rho_w$ ;
- $K$ : coeficiente de espalhamento, descrito para cada regime conforme a Tabela 5 (FAY, 1971).

Tabela 5 - Coeficientes de espalhamento para cada fase

<b>Fase</b>	<b>Unidimensional</b>	<b>Bidimensional</b>
<b>Inercial</b>	$K_{1i} = 1,5$	$K_{2i} = 1,14$
<b>Gravitacional-Viscosa</b>	$K_{1v} = 1,5$	$K_{2v} = 1,45$
<b>Tensão superficial</b>	$K_{1t} = 1,33$	$K_{2t} = 2,30$

Fonte: FAY (1971).

Conforme descrito por Soto (2004), a fase inercial de propagação de uma mancha de óleo é de duração tão breve que raramente é objeto de modelagem explícita. Em geral,

calcula-se a área inicial e o tempo de término dessa etapa, marcando a transição para a fase gravitacional-viscosa. A fase de tensão superficial, por sua vez, torna-se irrelevante na maioria dos cenários práticos, uma vez que somente se inicia quando a camada de óleo atinge espessura extremamente reduzida, condição que tende a fragmentar a mancha sob a ação do vento.

Em consequência disso, a modelagem do espalhamento inicial de manchas de óleo costuma se restringir à fase gravitacional-viscosa, a qual se estende até que a camada de óleo atinja uma espessura crítica (Soto, 2004). Mackay et al. (1980) propuseram esse limite em 0,1 mm, enquanto Reed (1989) adaptou o critério, empregando 0,1 mm para óleos brutos de alta viscosidade e 0,01 mm para produtos menos densos e mais fluidos. A adoção desses valores como parâmetro de encerramento da fase gravitacional-viscosa permite uma transição coerente para os estágios subsequentes de intemperismo em modelos preditivos de destino de óleo.

Diante disso, a área final da fase inercial é comumente utilizada como área inicial válida para a modelagem do destino do óleo. As expressões que definem o tempo de transição,  $t_0$  e o raio da mancha circular ao final da fase inercial,  $R_0$ , são apresentadas nas equações 2 e 3.

$$t_0 = \left(\frac{k_2}{k_1}\right)^4 \left(\frac{V_0}{\Delta g v_w}\right)^{1/3} \quad (2)$$

$$R_0 = \frac{k_2^2}{k_1} \left(\frac{\Delta g V_0^5}{v_w}\right)^{1/12} \quad (3)$$

### 3.3.3 *Difusão turbulenta*

A difusão turbulenta é um importante mecanismo na dinâmica de derramamentos de óleo em ambientes marinhos, caracterizado pelo transporte caótico de massa dentro da mancha devido a movimentos aleatórios induzidos por cisalhamento interno e fluxos turbulentos (ZACHARIAS, 2017). Esse processo, inerente a sistemas hidrodinâmicos complexos, influencia diretamente a dispersão horizontal e vertical do óleo, modulando a evolução espacial e temporal da mancha. Enquanto forças físicas como gravidade e tensão superficial governam o espalhamento inicial, a turbulência introduz incertezas significativas, tornando a modelagem um desafio que requer a integração de parâmetros empíricos e abordagens estatísticas (HUANG, 1983; PALADINO, 2000).

### **3.3.4 Evaporação**

No tocante ao intemperismo do petróleo, a evaporação é o processo dominante nas fases iniciais de um derramamento e o principal responsável por sua remoção da superfície marinha. Em certo grau, esse fenômeno determina a persistência do petróleo na superfície, uma vez que controla as perdas de massa do produto derramado para a atmosfera. Entretanto, a caracterização dessa perda não é trivial, uma vez que o petróleo é um fluido formado por uma combinação complexa de hidrocarbonetos que apresenta diferentes volatilidades entre seus constituintes, resultando em diferentes velocidades de evaporação dentro de um mesmo composto (ZACHARIAS, 2017; MISHRA e KUMAR, 2015).

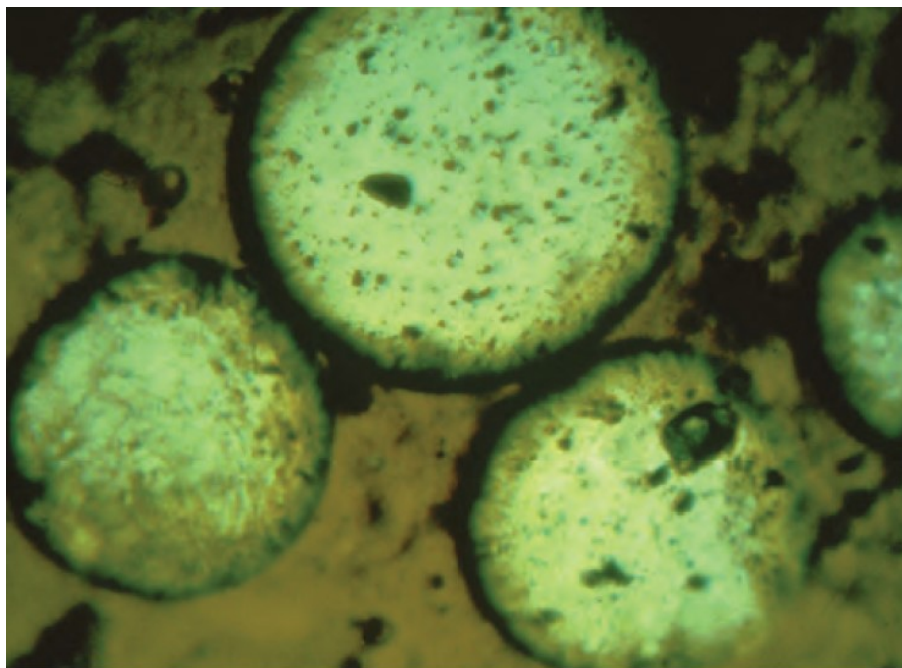
Nesse sentido, Huang (1983) aponta que os principais fatores que influenciam a taxa de evaporação do óleo são a área de derramamento, a velocidade do vento, a pressão de vapor, a espessura da mancha e a temperatura, seguindo um padrão logarítmico, ou uma cinética de primeira ordem.

Dentro desse contexto, a taxa inicial de espalhamento do óleo se relacionada diretamente com sua taxa de evaporação, uma vez que as frações mais leves evaporarão mais rapidamente quanto maior for a área da mancha. Além disso, de acordo com as características físico-químicas de cada tipo de óleo, os componentes residuais do processo de evaporação possuem valores mais elevados de densidade e viscosidade, interferindo em processos posteriores de intemperismo e em técnicas de remoção do óleo (ITOPF, 2014d). Essa gradual alteração nas propriedades do óleo, devida ao efeito progressivo da evaporação sobre a mancha, também aumenta a probabilidade de formação de emulsões (FINGAS, 2017; MISHRA e KUMAR, 2015).

### **3.3.5 Emulsificação**

O processo de emulsificação consiste na dispersão gradual de gotículas de água no interior do óleo derramado, resultando em um novo sistema estável que pode apresentar características físico-químicas distintas dos produtos originais. Por sua aparência, esse tipo de emulsão (água-óleo) é comumente chamada de mousse ou mousse de chocolate (FINGAS, 2017). A Figura 5 ilustra essa estrutura em uma imagem altamente ampliada (x1.000), evidenciando as gotas de água individuais envoltas pela matriz oleosa, característica fundamental para a estabilidade da emulsão.

Figura 5 – Imagem ampliada (x1.000) de uma emulsão água-em-óleo, mostrando gotas de água individuais envoltas por óleo.



Fonte: ITOPF (2014d)

A formação de emulsões água-óleo inicia-se com a ação energética das ondas e da turbulência, que introduz gotículas de água (10–25  $\mu\text{m}$ ) na matriz oleosa. Em óleos de viscosidade moderada, essas gotículas não são expelidas imediatamente, permanecendo suspensas e interagindo com compostos polares, como asfaltenos e resinas, que atuam na estabilização interfacial. Esse processo é potencializado após um período de evaporação, no qual a perda de frações leves do óleo eleva sua viscosidade e concentra resinas e asfaltenos, criando condições críticas para a estabilização química das emulsões (FINGAS, 2017; LERH, 2002; MISHRA e KUMAR, 2015).

De acordo com Fingas (2017), as emulsões podem ser classificadas em três tipos principais, dependendo da sua estabilidade e dos componentes do óleo. As emulsões instáveis são formadas quando as gotas de água ficam temporariamente retidas no óleo devido à sua viscosidade, mas se separam em minutos ou poucas horas.

Já as emulsões mesoestáveis apresentam maior estabilidade, pois as gotas de água são parcialmente estabilizadas pela viscosidade do óleo e pela interação com asfaltenos e resinas, podendo se decompor em poucos dias, resultando em óleo, água e, por vezes, um resíduo estável (FINGAS, 2017).

Por fim, as emulsões estáveis são aquelas em que a presença significativa de resinas

e asfaltenos impede a separação da água, tornando a emulsão extremamente viscosa (800 a 1000 vezes a viscosidade do óleo original) e duradoura, permanecendo intacta por semanas ou até meses e tornando o óleo um material semissólido e pesado (FINGAS, 2017).

Além dessa notável alteração da viscosidade nas emulsões estáveis água-óleo, elas podem conter 50% a 80% de água, causando uma expansão volumétrica do material derramado da ordem de duas a cinco vezes, um efeito contrário ao da evaporação (FINGAS *et al.*, 1996; LERH, 2002).

Os processos de degradação natural do óleo, assim como as operações de limpeza, são diretamente impactados pelo aumento no volume e na viscosidade causados pela emulsificação. Em emulsões mesoestáveis, observa-se uma considerável desaceleração na evaporação e na biodegradação do óleo, enquanto a dissolução de seus componentes solúveis pode ser interrompida. Por outro lado, o processo de degradação natural de emulsões estáveis pode levar anos para ocorrer, ou até mesmo não acontecer (FINGAS, 2017). A Figura 6 ilustra uma operação de recuperação de óleo combustível pesado que passou por processo de emulsificação, com teor de água de 50% identificado na análise laboratorial.

Figura 6 – Recuperação de óleo combustível pesado emulsificado, apresentando uma coloração típica de vermelho/marrom. A análise revelou que o conteúdo de água da emulsão pode chegar a até 50%.



Fonte: ITOPF (2014d)

A formação e estabilidade de emulsões água-óleo dependem principalmente do teor de asfaltenos e parafinas no petróleo, com um mínimo de 3% em massa necessário para estabilização, conforme observado por Fingas *et al.* (1996). Enquanto produtos refinados, pela ausência desses compostos, não formam emulsões estáveis, óleos crus os mantêm dissolvidos por solventes aromáticos. Desse modo, processos como evaporação e foto-oxidação reduzem esses solventes, levando à precipitação de asfaltenos e parafinas, que diminuem a tensão superficial na interface óleo-água e estabilizam gotículas de água dispersas no óleo. Diante disso, para a maioria dos óleos crus, a emulsificação geralmente ocorre após um período de envelhecimento do óleo e é favorecida por condições de mar agitado, além da composição original do petróleo (SOTO, 2004).

### **3.3.6 Dispersão**

A dispersão do óleo ocorre por meio de sua fragmentação em gotículas de 10 a 100  $\mu\text{m}$ , que se incorporam à coluna d'água. Esse processo reduz a persistência do óleo na superfície e permite sua penetração nas camadas subsuperficiais, onde é transportado pela coluna d'água por difusão turbulenta (DELVIGNE e SWEENEY, 1988; KISAMU; WU; BIAN, 2020; STRIGNARI *et al.*, 2013). Esse fenômeno é predominantemente induzido por turbulência gerada por ondas e vento, que rompe a interface óleo-água e promove a submersão das partículas (NRC, 2003). Sua eficiência, contudo, varia conforme propriedades físico-químicas do óleo, como viscosidade e tensão interfacial, além da presença de compostos como asfaltenos, que estabilizam emulsões e inibem a fragmentação (FINGAS, 2015).

Os processos de depuração do óleo atuam de maneira intensificada sobre as bolhas, dada sua proporção superfície-volume em relação ao corpo da mancha, de modo que a velocidade de degradação aumenta de maneira inversamente proporcional à dimensão das bolhas (PALADINO, 2000).

Nesse contexto, o arraste oriundo da turbulência e as forças de flutuação criam um mecanismo de balanço que causa o afundamento e a reflutuação das bolhas (PALADINO, 2000). Normalmente, gotículas de óleo menores que cerca de 70  $\mu\text{m}$  de diâmetro têm sua velocidade de reflutuação equilibrada pela turbulência e tendem a se manter suspensas na coluna d'água, misturando-se a volumes cada vez maiores de água do mar, o que favorece a atuação de processos de degradação, como biodegradação, dissolução e sedimentação (ITOPF, 2014d). A aplicação de dispersantes químicos possibilita uma aceleração da dispersão da mancha de óleo, modificando a tensão interfacial e ampliando a sua fragmentação, embora sua

eficácia dependa de fatores como temperatura e salinidade (NASEM, 2019).

Conforme Reed *et al.* (1999), o evento da dispersão natural reduz a taxa de ocorrência da emulsificação, e a relação também ocorre de forma inversa, de modo que são processos concorrentes. Desse modo, a emulsificação e a espessura da mancha de óleo são fatores cruciais a serem considerados na determinação da duração da dispersão, das estratégias e ações de resposta e dos impactos ambientais (REED, 1999). Adicionalmente, a dispersão compete com processos como evaporação e sedimentação, exigindo modelos integrados para representar adequadamente o destino do óleo em múltiplas escalas temporais e espaciais (NRC, 2003; NASEM, 2019). Estudos recentes destacam a necessidade de incorporar incertezas nos coeficientes empíricos, visando aumentar a confiabilidade das previsões em cenários reais (NASEM, 2019).

### **3.3.7 Dissolução**

A dissolução é um processo no qual componentes do petróleo se transferem para a coluna d'água. Esse fenômeno ocorre pela liberação de frações solúveis da mancha de óleo, incluindo compostos inorgânicos e alguns compostos orgânicos, como hidrocarbonetos aromáticos e alifáticos de baixo peso molecular (ZACHARIAS, 2017). Embora não seja o principal mecanismo de intemperismo em termos de perda de massa do petróleo, dada a reduzida presença de hidrocarbonetos solúveis em sua composição, a dissolução é relevante devido à toxicidade dos compostos dissolvidos. Esses contaminantes podem se acumular na água, formando microrregiões poluídas que representam um risco significativo para a vida marinha, inclusive para organismos mais complexos (SOTO, 2004; WANG, SHEN e ZHENG, 2005).

### **3.3.8 Sedimentação**

A intemperização do petróleo desencadeia transformações sequenciais, como a evaporação das frações mais leves, a emulsificação e a oxidação fotoquímica, resultando na alteração de suas propriedades físico-químicas, como o aumento de sua densidade relativa para valores superiores aos da densidade relativa da água circundante. Nesse sentido, as partículas tendem a descrever um movimento descendente na coluna d'água, sedimentando-se lentamente em direção ao leito marinho. Esse processo é conhecido como sedimentação.

De acordo com Huang (1983), a ação direta do intemperismo tem um papel secundário no afundamento do petróleo, sendo mais provável que a sedimentação ocorra devido

à adesão do óleo às partículas em suspensão na coluna d'água e à subsequente deposição de um flóculo composto por óleo e material particulado. Essa adesão entre o óleo e as partículas de sedimento é influenciada, principalmente, pelo tipo, tamanho e carga do sedimento em suspensão, pela salinidade da água, pelos teores de enxofre e matéria orgânica na composição do óleo e pelo grau de agitação do meio. Nesse contexto, Soto (2004) destaca que, embora esse processo tenha baixa relevância nos primeiros dias após o derramamento, ele se torna mais significativo em regiões próximas à costa, onde a maior concentração de partículas em suspensão favorece a sedimentação.

A presença de contaminantes derivados de petróleo em sedimentos oceânicos configura uma ameaça ambiental de elevada magnitude, especialmente para organismos que habitam a interface sedimento-água, cuja fisiologia e ecologia estão intrinsecamente vinculadas às características do substrato. Modificações nas propriedades do ambiente bentônico – como alterações na permeabilidade, hipóxia localizada e desequilíbrios na disponibilidade de matéria orgânica – interferem diretamente em funções biológicas essenciais, incluindo taxas de bioturbação, eficiência alimentar e trocas gasosas. Considerando o papel desses organismos como base de redes tróficas costeiras, sua exposição a compostos persistentes pode induzir processos de biomagnificação, comprometendo a saúde de predadores superiores e a resiliência do ecossistema marinho (ROGOWSKA, WOLSKA e NAMIESNIK, 2010; ZACHARIAS, 2017).

### **3.3.9 Oxidação**

A oxidação de uma mancha de óleo no mar ocorre quando os compostos presentes reagem com o oxigênio, resultando em sua degradação. Esse processo pode acontecer por meio da foto-oxidação, bio-oxidação ou oxidação química. Dentre esses mecanismos, a foto-oxidação é desencadeada pela radiação ultravioleta do sol (fotólise), favorecendo a incorporação de oxigênio aos hidrocarbonetos. Como consequência, essas substâncias são transformadas em compostos intermediários ou finais com maior hidrossolubilidade em relação aos compostos originais, o que facilita sua degradação (HUANG, 1983). No entanto, quando a mancha apresenta camadas espessas de óleo de alta viscosidade ou emulsões de água em óleo, há uma maior probabilidade de formação de resíduos oxidativos persistentes, resultando em uma camada superficial protetora que dificulta a degradação completa (ITOPF, 2014d).

A eficiência desse processo é limitada por diversos fatores, como a espessura da camada de óleo, que interfere na penetração da luz, a baixa difusão de oxigênio, a

disponibilidade de radiação com comprimento de onda inferior a 400 nm, a latitude, a presença de metais na composição do petróleo e a salinidade da água (SOTO, 2004). Embora contínuo, seu ritmo é lento — menos de 0,1% de degradação diária em películas finas — e tem um papel menos significativo na dissipação do óleo em comparação à evaporação ou dispersão (ITOPF, 2014d).

### **3.3.10 Biodegradação**

A biodegradação é um mecanismo fundamental para mitigar os impactos ambientais causados por derramamentos de petróleo no mar. Esse processo ocorre por meio da ação de microrganismos aquáticos, como algas, bactérias, fungos e protozoários, que ingerem e metabolizam hidrocarbonetos, convertendo-os em dióxido de carbono e água nesse processo. Esse é um dos mecanismos mais influentes na remoção de óleo do ambiente marinho a longo prazo (IOTPF, 2014d). Esses microrganismos estão amplamente distribuídos nos ecossistemas marinhos, sendo encontrados em diversas regiões oceânicas, muito embora sua concentração tenda a ser significativamente maior em áreas impactadas por poluentes crônicos, como descargas industriais e efluentes domésticos não tratados, devido ao aporte contínuo de matéria orgânica e compostos petrolíferos, que favorecem a proliferação dessas comunidades microbianas especializadas (ROSSO, 1997).

A eficácia desse mecanismo está intrinsecamente ligada a fatores ambientais e biológicos. Um exemplo é a proliferação de microrganismos capazes de degradar hidrocarbonetos, que depende da disponibilidade de nutrientes, como nitrogênio e fósforo. Além disso, as rotas metabólicas são diretamente influenciadas pela presença de aceptores de elétrons, como o oxigênio, essencial para vias aeróbicas, e o nitrato, que atua em ambientes anóxicos. Ainda nesse sentido, fatores ambientais, como a temperatura, pH e salinidade da água, podem interferir no metabolismo bacteriano, influenciando a taxa de biodegradação (ITOPF, 2014; ODOKUMA e WILLIAMS, 2012).

Huang (1983) destaca que a biodegradação é um processo marcado por sua lentidão, com efeitos perceptíveis apenas em longo prazo. Sua dinâmica é influenciada por múltiplos fatores interligados, o que dificulta a criação de modelos preditivos e leva à sua frequente desconsideração em análises de curto prazo, como os primeiros 15 a 30 dias após derramamentos. Essa complexidade é reforçada pela lacuna de conhecimento que ainda existe em relação às características metabólicas dos organismos microbianos envolvidos no processo.

### ***3.3.11 Interação com a linha de costa***

A chegada do óleo à linha de costa desencadeia interações complexas, especialmente na zona de arrebentação, onde alterações na hidrodinâmica costeira afetam seu transporte. A absorção de sedimentos pelo óleo altera propriedades físicas, como densidade, favorecendo seu afundamento parcial. Conforme a capacidade de retenção da costa diminui devido à saturação progressiva, parte do óleo é retida e outra rejeitada, com a proporção rejeitada aumentando ao longo do tempo (PALADINO, 2000). Em praias de areia expostas, o óleo pode passar por ciclos sazonais de acumulação e erosão de sedimentos, sendo enterrado e desenterrado no processo, enquanto em costas protegidas, ele pode formar “pavimentos de asfalto” persistentes em substratos de seixos (ITOPF, 2014d).

## **3.4 Modelagem como ferramenta de apoio na gestão ambiental**

A gestão ambiental contemporânea enfrenta desafios complexos, tais como as mudanças climáticas, a escassez de recursos naturais e os efeitos da poluição, cada vez mais intensos devido às interferências antrópicas. Nesse sentido, tornam-se necessárias abordagens integradas e sistemáticas para a formulação de políticas públicas e a implementação de ações sustentáveis. Nesse contexto, a modelagem computacional destaca-se como uma ferramenta estratégica fundamental, pois permite a simulação de cenários, a previsão de impactos e a otimização de decisões com base em dados científicos. Ao integrar conhecimentos de diversas áreas, esses modelos contribuem significativamente para a construção de soluções que promovam a sustentabilidade ambiental.

Por meio de simulações dinâmicas, a modelagem computacional possibilita a antecipação de eventos extremos e a elaboração de estratégias de adaptação. Modelos climáticos, por exemplo, os quais têm sido utilizados em relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), fornecem projeções de tendências de temperatura e precipitação que fundamentam a formulação de medidas adaptativas (IPCC, 2021). Paralelamente, modelos hidrológicos embasados em dados atualizados, como os apresentados no Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, elaborado pela Agência Nacional de Águas (ANA), permitem o planejamento de infraestruturas resilientes e o uso racional da água (ANA, 2020).

Nesse contexto, conforme destacado por Rosman (2025), modelos hidrodinâmicos ambientais são indispensáveis para integrar processos físicos, químicos e biológicos, como circulação hidrodinâmica, transporte de contaminantes e dinâmica sedimentológica. Esses

sistemas permitem simular cenários atuais e futuros, viabilizando a previsão de impactos e a otimização de estratégias de intervenção. Sem tais modelos, torna-se inviável obter uma visão integrada de fenômenos como variações de qualidade da água ou dispersão de poluentes em estuários, rios e zonas costeiras, especialmente em contextos de mudanças climáticas e intervenções antrópicas crescentes.

Ao computar movimentos, transportes e fluxos de água e seus constituintes (nutrientes, sedimentos, contaminantes), os modelos podem subsidiar a elaboração de mapas de risco, a definição de zonas prioritárias para monitoramento e a criação de planos de mitigação. Por exemplo, em casos de derrames acidentais de óleo, a capacidade preditiva em tempo real permite coordenar operações de contenção, reduzindo danos ecológicos e sociais. Além disso, a integração de dados espacialmente dispersos e a interpolação de informações em áreas sem monitoramento direto ampliam a eficácia da gestão, superando limitações de medições pontuais.

No contexto de zonas costeiras, o estudo completo dos processos envolvidos requer dados de campo precisos e modelos analíticos adequados para descrever sua dinâmica. Porém, a obtenção desses dados é cara e as soluções analíticas muitas vezes são inviáveis ao considerar a batimetria e a configuração real da costa. Assim, a modelagem computacional surge como alternativa viável, permitindo representações mais realistas do ambiente costeiro por meio de aproximações adequadas (TORRES JÚNIOR, 1995 *apud* GURGEL, 2016).

É importante ressaltar que a obtenção de bons resultados na modelagem está relacionada ao entendimento do modelador sobre esse tipo de ferramenta e sobre os processos envolvidos no cenário modelado, uma vez que seu uso de maneira indevida pode levar a resultados enganosos, trazendo consequências desastrosas (ROSMAN, 2025).

### **3.5 Sistema de modelagem adotado: SisBaHiA<sup>®</sup> — Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental**

Para o desenvolvimento deste trabalho adotou-se o SisBaHiA<sup>®</sup> (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), um sistema computacional profissional registrado pela Fundação Coppetec, entidade vinculada ao COPPE/UFRJ – Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Com novas versões sendo desenvolvidas continuamente desde 2000, o sistema passou por ampliações de escopo e aprimoramentos técnicos derivados de pesquisas acadêmicas, incluindo teses de mestrado e doutorado, além de projetos vinculados à instituição. Constituído como ferramenta de referência para modelagem hidrodinâmica, o SisBaHiA<sup>®</sup> tem sido amplamente

adotado em estudos ambientais e projetos contratados pela Fundação Coppetec, especialmente em análises de corpos hídricos naturais, consolidando-se como um produto científico-tecnológico de excelência associado à expertise interdisciplinar da COPPE/UFRJ. Sua evolução contínua reflete a integração entre pesquisa teórica e aplicações práticas, garantindo relevância em cenários complexos de gestão de recursos hídricos (ROSMAN, 2025).

Seus modelos implementados podem ser utilizados para previsão do escoamento e movimento das águas, bem como para o transporte de grandezas escalares de interesse. A plataforma computacional é aplicável a simulações em cenários diversos, como águas costeiras, baías, estuários, canais, reservatórios, lagos ou lagoas, visando à análise integrada da dinâmica ambiental nesses sistemas complexos. O sistema conta com os seguintes módulos:

1. Malhas e Domínio de Modelagem;
2. Modelo Hidrodinâmico;
3. Modelos de Transporte de Sedimentos e Evolução Morfológica do Fundo;
4. Modelos de Qualidade da Água e Eutrofização;
5. Modelos de Transporte Euleriano;
6. Modelos de Transporte Lagrangeano – Determinístico;
7. Modelos de Transporte Lagrangeano – Probabilístico;
8. Modelo de Campo Próximo e Decaimento Bacteriano para Emissários e Fontes Pontuais;
9. Modelo de Geração de Ondas;
10. Modelo de Propagação de Ondas;
11. Módulo de Análise e Previsão de Marés.

O SisBaHiA<sup>®</sup> foi escolhido como ferramenta central neste estudo devido a um conjunto de atributos técnicos que combinam praticidade, eficiência e adaptabilidade. Sua interface amigável simplifica a operação dos modelos integrados, permitindo não apenas a configuração de simulações de forma intuitiva, mas também a visualização em tempo real de resultados por meio de gráficos e animações, facilitando a interpretação dos dados. Do ponto de vista operacional, o sistema exige recursos computacionais modestos, sendo executável em máquinas de uso cotidiano, o que amplia sua acessibilidade em ambientes acadêmicos e profissionais.

Neste trabalho, foi utilizada a versão 12bSG do SisBaHiA<sup>®</sup>. As letras S e G referem-se, respectivamente, aos softwares de pós-processamento Surfer e Grapher, utilizados para

representação gráfica dos resultados de modelagem. Maiores detalhes podem ser consultados na Referência Técnica do SisBaHiA<sup>®</sup> (ROSMAN, 2025). A tela de abertura do SisBaHiA<sup>®</sup> está ilustrada na Figura 7.

Figura 7 – Tela de abertura do SisBaHiA<sup>®</sup> versão 12bSG



Fonte: Capturado da tela inicial do SisBaHiA<sup>®</sup>.

Neste estudo, foram empregados três módulos integrados do SisBaHiA<sup>®</sup>: o Modelo Hidrodinâmico (MH), o Modelo de Geração de Ondas (MGO) e o Modelo de Transporte Lagrangeano (MTL). O MH resolve as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento para fluidos incompressíveis em ambiente costeiro e estuarino, considerando os efeitos da maré, vento, pressão atmosférica e gradientes de densidade. O MGO é executado de forma acoplada ao MH, o que permite a retroalimentação entre o campo de ondas e a circulação hidrodinâmica, resultando em uma simulação mais realista das condições do meio físico (ROSMAN, 2025).

Adicionalmente, o Modelo de Transporte Lagrangeano simula a dispersão de contaminantes, como manchas de óleo, por meio do lançamento de partículas virtuais que se deslocam com as correntes hidrodinâmicas calculadas pelo MH. Essa abordagem é particularmente eficaz para representar fontes pontuais e processos com forte gradiente espacial, como o espalhamento inicial de uma mancha de óleo, superando limitações associadas a métodos eulerianos tradicionais (ROSMAN, 2025).

As seções 3.6.1 a 3.6.3 detalham os módulos utilizados na modelagem, com ênfase em suas características e aplicações.

### **3.5.1 Modelo hidrodinâmico**

O MH é a base fundamental de um sistema de modelagem e consiste em uma representação matemática discretizada de sistemas aquáticos, implementada computacionalmente para a resolução numérica das equações governantes da dinâmica de fluidos (equações de Navier-Stokes ou suas formulações simplificadas, como as equações de águas rasas de Saint-Venant 2D/3D), cujo objetivo primário é simular os padrões espaciais e temporais de velocidade, direção de fluxo e transporte de massa. Esses modelos resolvem equações de conservação de massa e quantidade de movimento, incorporando forçantes físicas (gradientes de pressão hidrostática, tensões turbulentas, forças de Coriolis, atrito de fundo e vento) para calcular campos hidrodinâmicos como a distribuição tridimensional de velocidades, as variações de elevação da superfície livre, os gradientes de pressão e a vorticidade.

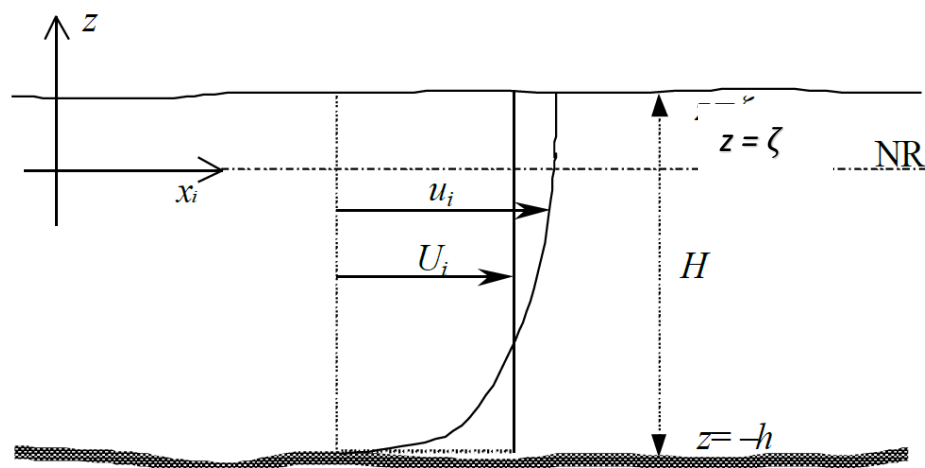
Segundo o Rosman (2025), o SisBaHiA® utiliza modelos com técnicas de filtragem espaço-temporal (FIST – *filtered in space and time*), otimizadas para corpos de água naturais. O método FIST consiste em uma abordagem de modelagem para superfícies livres de água, na qual a separação entre escalas resolvíveis e não resolvíveis da turbulência é realizada por meio de filtragem, seguindo princípios semelhantes aos da Simulação de Grandes Vórtices (LES – *Large Eddy Simulation*). Esta última é reconhecida como a técnica mais avançada para modelar turbulência em escoamentos geofísicos. A versão tridimensional do FIST, conforme descrito, resolve as equações completas de Navier-Stokes com aproximação de águas rasas, utilizando a premissa de pressão hidrostática em sua formulação.

O modelo FIST3D utiliza uma técnica numérica eficiente, estruturada em dois módulos complementares: o primeiro calcula a elevação da superfície livre por meio de uma formulação bidimensional verticalmente integrada (2DH), enquanto o segundo determina o campo de velocidades, podendo ser configurado para simulações tridimensionais (3D) ou bidimensionais (2DH), de acordo com os dados de entrada disponíveis. Trata-se de um modelo versátil, aplicável a diferentes e capaz de simular com precisão campos de corrente tridimensionais ou verticalmente promediados, especialmente em escoamentos com baixa sensibilidade à baroclinicidade vertical. Ainda assim, efeitos baroclínicos integrados à coluna d'água podem ser incorporados ao modelo, ampliando sua aplicabilidade a cenários de maior complexidade (ROSMAN, 2025).

Optou-se pela versão tridimensional do modelo por sua configuração modular, na qual o componente 2DH, responsável pela determinação da elevação da superfície livre, e o módulo analítico-numérico 3D, encarregado do cálculo do campo de velocidade em toda a coluna, operam de forma desacoplada. Dessa forma, a superfície fornecida pelo esquema 2DH é usada como condição de contorno superior para o módulo 3D, que, em contrapartida, estima o cisalhamento do fundo com base nos perfis verticais de velocidade previamente calculados. A opção pelo módulo tridimensional justifica-se pela sua capacidade de fornecer campos de velocidade em diferentes níveis da coluna d'água, incluindo a possibilidade de seleção de camadas subsuperficiais, poucos cm abaixo da superfície. Nessa faixa, as flutuações turbulentas geradas pelo vento, respingos e interações onda-corrente já se encontram atenuadas, resultando em um campo de corrente que melhor representa o transporte efetivo das manchas de óleo do que os valores pontuais captados exatamente na superfície (ROSMAN, 2025; SIQUEIRA, 2015).

O sistema de coordenadas utilizado pelo MH (2DH e 3D) do SisBaHiA<sup>®</sup> encontra-se representado na Figura 8. Na ilustração,  $U_i$  representa a velocidade promediada na vertical para o módulo 2DH, ao passo que  $u_i$  refere-se à velocidade da direção  $x_i$ . Utilizando a notação indicial, adota-se a convenção de que o índice  $i = 1$  refere-se à componente na direção  $x$ ,  $i = 2$  à direção  $y$  e  $i = 3$  à direção  $z$ . Além disso, define-se  $\zeta$  como a elevação da superfície livre em relação a um referencial,  $H$  como a profundidade instantânea ou altura da coluna d'água, e  $h$  como a cota do leito ou fundo do corpo hídrico.

Figura 8 – Sistema de coordenadas do módulo hidrodinâmico (2DH e 3D) do SisBaHiA<sup>®</sup>, onde NR é o nível de referência.



Fonte: Rosman (2025)

O módulo 3D aplicado a escoamentos em águas rasas calcula as quatro incógnitas da circulação hidrodinâmica tridimensional ( $u$ ,  $v$ ,  $w$  e  $\zeta$ ) e fundamenta-se em um conjunto de equações diferenciais que garantem a conservação de massa e de momento na coluna d'água. Inicialmente, utiliza-se a equação de continuidade considerada para fluidos incompressíveis (4), que assegura o balanço de volume. Em seguida, as equações de momento com aproximação hidrostática nas direções horizontais  $x$  (5) e  $y$  (6) representam as forças advectivas, de pressão e de atrito, possibilitando a determinação do campo de velocidade horizontal tridimensional. Por fim, a equação de continuidade integrada ao longo da vertical (7) estabelece a relação entre os perfis de velocidade ao longo da profundidade, garantindo a consistência da massa em um quadro 3D integrado (ROLLNIC e MEDEIROS, 2013; ROSMAN, 2025).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} g \int_{-h}^{\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2\phi \text{sen } \theta v \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} g \int_{-h}^{\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2\phi \text{sen } \theta u \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} v dz = 0 \quad (7)$$

Onde:

- $u$ ,  $v$  e  $w$  são, respectivamente, as componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$  da velocidade de escoamento;
- $\zeta$  é a elevação da superfície livre;
- $g$  é a aceleração da gravidade;
- $\rho$  é a densidade do fluido local;
- $\rho_0$  é a densidade constante de referência;
- $\phi$  é a velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local; e
- $\theta$  é o ângulo de latitude (em radianos).

O significado de cada termo da equação da continuidade (4) é explicado do Quadro

Quadro 1 – Significado dos termos da equação da continuidade (4)

$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$	<p>Faz com que o divergente da velocidade do escoamento seja nulo. Ou seja, uma massa fluida escoar de forma incompressível, i.e., muda de forma, mas permanece com o mesmo volume à medida que se movimenta.</p>
---	---

Fonte: Rosman (2025)

O Quadro 2 utiliza a equação da quantidade de movimento na direção  $x$  como exemplo para explicar o significado de cada termo nas equações 5 e 6.

Quadro 2 – Significado dos termos das equações de momento nas direções horizontais  $x$  (5) e  $y$  (6), utilizando a direção  $x$  como exemplo.

$\frac{\partial u}{\partial t}$	<p>Aceleração local do escoamento, ou seja, em uma dada posição, a taxa de variação temporal da quantidade de movimento por unidade de massa. Em escoamentos permanentes, esse termo é igual a zero.</p>
$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}$	<p>Aceleração advectiva do escoamento, ou seja, em um determinado instante, esses termos representam o balanço dos fluxos advectivos, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção <math>x</math>, por unidade de massa. Em escoamentos uniformes, esses termos são iguais a zero.</p>
$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$	<p>Gradiente de pressão na direção <math>x</math>, devido à declividade da superfície livre. Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força escoamentos de lugares onde o nível de água é mais alto para lugares onde o nível de água é mais baixo.</p>
$-\frac{1}{\rho_0} g \int_{-h}^{\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz$	<p>Gradiente de pressão na direção <math>x</math>, devido às diferenças de densidade <math>\rho</math>. Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força escoamento de lugares onde a água é mais densa para lugares onde a água é menos densa, gerando efeitos de empuxo que tendem a deixar no fundo a água mais densa.</p>

Fonte: Rosman (2025)

Quadro 2 – Significado dos termos das equações de momento nas direções horizontais  $x$  (5) e  $y$  (6), utilizando a direção  $x$  como exemplo (continuação).

$\frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right)$	<p>Resultante das tensões turbulentas dinâmicas no escoamento, ou seja, em um determinado instante, esses termos representam o balanço dos fluxos difusivos, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção <math>x</math>, por unidade de massa. Entre outras coisas, é através desses termos que o escoamento sente o atrito do fundo e a ação do vento sobre a superfície livre gerando os perfis de velocidade.</p>
$2\phi \sin \theta v$	<p>Representa a aceleração de Coriolis decorrente do referencial estar se movendo com a rotação da Terra. Esse termo é irrisório próximo ao equador, ou seja, em baixas latitudes, e pouco relevante em corpos de água relativamente pequenos.</p>

Fonte: Rosman (2025).

Por fim, o Quadro 3 apresenta o significado dos termos para a equação da continuidade integrada ao longo da vertical (7).

Quadro 3 – Significado dos termos da equação da continuidade integrada na vertical (7).

$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u \, dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} v \, dz = 0$	<p>Possui o mesmo significado da Equação 4, porém, sua forma possui a variação da coluna de água (<math>\zeta + h</math>) ao longo do tempo como resultado dos fluxos efetivos através da coluna de água nas direções <math>x</math> e <math>y</math> respectivamente. A batimetria é considerada constante durante todo o período simulado, além de ser imposta a condição de escoamento incompressível.</p>
---	---

Fonte: Rosman (2025).

A adequada resolução das equações governantes em modelos hidrodinâmicos requer a definição explícita de condições iniciais e de contorno, as quais devem ser fornecidas pelo modelador conforme as especificidades do domínio simulado. As condições de contorno podem ser classificadas em horizontais e verticais. As condições horizontais incluem contornos de terra e fronteiras abertas. Os contornos de terra delimitam fisicamente o corpo hídrico dentro do domínio computacional, compreendendo margens litorâneas, canais de afluência e estruturas de captação. Já as fronteiras abertas correspondem aos limites externos do domínio de modelagem — que não representam barreiras físicas, mas sim artificiais — e são usualmente definidas por séries temporais de elevação da superfície livre ( $\zeta$ ), podendo também incorporar campos de velocidade (MACHADO; DA SILVA, 2010).

As condições de contorno verticais, por sua vez, compreendem o estabelecimento de velocidade nula na interface de fundo, em função da condição de não deslizamento, e a imposição de tensão de cisalhamento do vento na superfície livre, a qual é determinada a partir das velocidades de vento inseridas como dado de entrada no modelo (MACHADO; DA SILVA, 2010).

No que se refere às condições iniciais, estas são essenciais para que o modelo numérico possa iniciar os cálculos de evolução temporal dos parâmetros hidrodinâmicos. Dessa forma, é necessário especificar, para o instante inicial da simulação, os campos de elevação da superfície livre ( $\zeta$ ) e as componentes horizontais da velocidade ( $u$  e  $v$ ) em todos os nós do domínio computacional. Essas informações servem de base para a realização das interpolações e extrapolações necessárias ao processo de integração numérica (SAMPAIO, 2003).

O cálculo das tensões turbulentas é essencial para modelar adequadamente o atrito nas interfaces do sistema — tanto no fundo oceânico quanto na superfície livre —, pois esses termos, extraídos das equações de quantidade de movimento, representam o cisalhamento gerado pelo vento e pelas correntes. No módulo 3D do SisBaHiA®, o cisalhamento vertical atuante em planos horizontais ( $\tau_i^z$ ) é determinado diretamente, assegurando uma representação precisa da distribuição de velocidades ao longo da coluna d'água. Embora o cisalhamento horizontal sobre planos verticais ( $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yx}$ ) não seja calculado de forma explícita no 3D, seus efeitos estão indiretamente incorporados via interações verticais e são completamente contemplados no módulo 2DH, quando se emprega uma integração horizontalmente bidimensional (ROLLNIC; MEDEIROS, 2013; ROSMAN, 2025).

É por meio do termo resultante dessas tensões turbulentas dinâmicas que o modelo quantifica o atrito no fundo e o atrito de vento sobre a superfície livre. Em particular, a tensão

de cisalhamento no fundo é obtida diretamente do componente turbulento dinâmico das equações de momento, conforme ilustrado na Equação 8 (GURGEL, 2016; ROLLNIC; MEDEIROS, 2013).

$$\tau_i^F = \rho_0 \frac{\sqrt{g}}{C_h} |u^*| \hat{u}_i \quad (8)$$

Onde:

- $\tau_i^F$  é a tensão de atrito do fundo na direção  $x_i$ , com  $i = 1$  ou  $2$  (N/m<sup>2</sup>);
- $\rho_0$  é a massa específica da água (kg/m<sup>3</sup>);
- $g$  é a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);
- $\hat{u}_i$  é a velocidade promediada na vertical do fluxo na direção  $x_i$  (m/s);
- $u^*$  é a velocidade de atrito característica, em função do perfil de velocidades (m/s); e
- $C_h$  é o coeficiente de Chezy, conforme a Equação 9.

$$C_h = 18 \log \left( \frac{6H}{\varepsilon} \right) \quad (9)$$

Em que:

- $H$  é a altura da coluna d'água (m); e
- $\varepsilon$  é a amplitude da rugosidade equivalente do fundo (m).

Com relação ao modelo 3D, a tensão de atrito devido à ação do vento causada na superfície livre é dada pela Equação 10 (GURGEL, 2016; ROLLNIC; MEDEIROS, 2013).

$$\tau_i^S = \rho_{ar} C_D W_{10}^2 \cos \phi_i \quad (10)$$

Onde:

- $\tau_i^S$  é a tensão de atrito na superfície livre devida ao vento na direção  $x_i$ , com  $i = 1$  ou  $2$  (N/m<sup>2</sup>);
- $\rho_{ar}$  é a densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>);
- $W_{10}$  é a intensidade da velocidade do vento local, aferida 10 m acima da superfície livre (m/s);
- $\phi_i$  é o ângulo de atrito entre o vetor de velocidade do vento local e a direção  $x_i$  (rad); e
- $C_D$  é o coeficiente de arraste do vento, calculado pela Equação 11.

$$C_D = (0,80 + 0,065 \cdot W_{10}) \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

### **3.5.2 Modelo de geração de ondas**

O módulo de geração de ondas do SisBaHiA (MGO) utiliza uma formulação espectral para simular a formação e evolução das ondas locais induzidas pela ação do vento. Com base na intensidade e direção do vento em intervalos de tempo contínuos, o modelo determina parâmetros essenciais como altura significativa e período de pico, além das tensões oscilatórias no fundo marinho. Essa abordagem considera limites físicos da geração de ondas, como o comprimento da pista de vento e sua duração efetiva, elementos cruciais para domínios costeiros onde ventos persistentes afetam a energia das ondas ao longo de horas. Além disso, o acoplamento entre o MGO e o módulo hidrodinâmico (MH) permite que estas ondas influenciem diretamente a circulação da coluna d'água, modulando velocidades, cisalhamento e tensões de fundo — parâmetros determinantes para a simulação precisa do transporte advectivo-difusivo de contaminantes, sobretudo óleo (ROSMAN, 2025).

### **3.5.3 Modelo de transporte lagrangeano**

A modelagem do transporte de substâncias contaminantes em ambientes aquáticos exige a adoção de abordagens que conciliem precisão numérica e fidelidade física aos fenômenos observados. Nesse contexto, os modelos de transporte Lagrangeanos destacam-se como ferramentas eficazes, especialmente em simulações de manchas com alta variabilidade espacial e temporal. Ao contrário da abordagem Euleriana, na qual as concentrações são computadas em pontos fixos de uma malha espacial, os modelos Lagrangeanos acompanham o deslocamento individual de partículas representativas da substância em estudo, advectadas pelas correntes hidrodinâmicas (GURGEL, 2016).

A principal vantagem desse tipo de modelagem reside na capacidade de representar o transporte de contaminantes em regiões onde ocorrem fortes gradientes ou quando a escala espacial da pluma é significativamente menor do que a do domínio hidrodinâmico (GÓIS, 2008). Essa abordagem minimiza conflitos de escala, uma vez que o espaço de posição das partículas é contínuo, utilizando-se a discretização do modelo hidrodinâmico apenas para interpolações dos campos de velocidade (ROSMAN, 2025; RODRIGUES, 2023). Dessa forma, evita-se a introdução de erros numéricos frequentes em modelos Eulerianos, como a difusão numérica e falhas na conservação de massa.

No âmbito do sistema SisBaHiA®, a implementação do Modelo de Transporte Lagrangeano Advectivo-Difusivo com Reações Cinéticas (MTLADR) é particularmente útil para simular o transporte de constituintes que estejam flutuando, dispersos em apenas uma

camada da coluna d'água ou completamente misturados, conforme ocorre em eventos como derrames de óleo ou emissários submarinos (RODRIGUES, 2023).

O MTLADR permite ainda uma flexibilidade significativa na definição das fontes de lançamento do contaminante, que podem ser pontuais ou distribuídas, instantâneas ou contínuas, com vazão constante ou variável. O número de regiões fonte pode ser ampliado quase sem limites, como evidenciado em simulações realizadas na costa de Salvador, que contemplaram cerca de 70 fontes pontuais simultâneas (ROSMAN, 2025). A escalabilidade do modelo é complementada por sua alta eficiência computacional, alcançando ganhos de tempo que variam de 10 a 100 vezes em comparação com modelos puramente hidrodinâmicos, como o FIST3D (ROSMAN, 2025).

Diante dessa contextualização, é de grande relevância a discussão sobre modelos probabilísticos de derrame de óleo, que se baseiam na premissa de que os regimes meteorocinográficos passados fornecem um repertório representativo para cenários futuros. Esses modelos geram dezenas ou centenas de trajetórias simuladas — iniciadas a partir de pontos e horários aleatórios ao longo de uma janela temporal extensa — para capturar a variabilidade das condições ambientais e inferir probabilidades de diferentes padrões de dispersão (GUO, 2017; LIUBARTSEVA, 2023).

Um exemplo significativo foi oferecido por Liubartseva *et al.* (2021), que aplicou modelagem estocástica acoplada ao modelo MEDSLIK-II e um modelo hidrodinâmico de alta resolução no Porto de Taranto. Ao amostrar condições ambientais entre 2018 e 2020, sua metodologia permitiu construir mapas probabilísticos de contaminação costeira, demonstrando dispersão quase isotrópica do óleo devido à variabilidade das correntes, ondas e mistura turbulenta.

A metodologia típica inclui três fases principais. Primeiro, define-se um cenário de derrame hipotético com base no tipo de óleo, sua quantidade, forma de liberação, local e condições ambientais iniciais (como aquele estudo no Porto de Taranto). Em seguida, um modelo de trajetória simula o transporte físico do óleo, abrangendo processos como advecção, difusão aleatória, intemperismo e encalhe costeiro. Por fim, os resultados são agregados estatisticamente: gera-se mapas de probabilidade de contato do óleo com a costa, tempos de chegada, balanço de massa e extensão da área afetada, entre outras métricas (LIUBARTSEVA, 2023; LIUBARTSEVA, 2021).

Esses modelos oferecem uma série de aplicações práticas. Eles são aplicados para avaliar riscos ambientais (por exemplo, selecionar o melhor local para instalação portuária),

planejar respostas emergenciais e desenvolver estratégias proativas. No caso brasileiro, a abordagem estocástica — utilizando kriging e amostragem aleatória de Monte Carlo — foi usada para estimar regiões e datas prováveis de vazamento no evento costeiro de 2019, contribuindo para diferenciação entre derrames acidentais e poluição crônica advinda de operações rotineiras (SBRAGIO; FILHO; MARTINS, 2023).

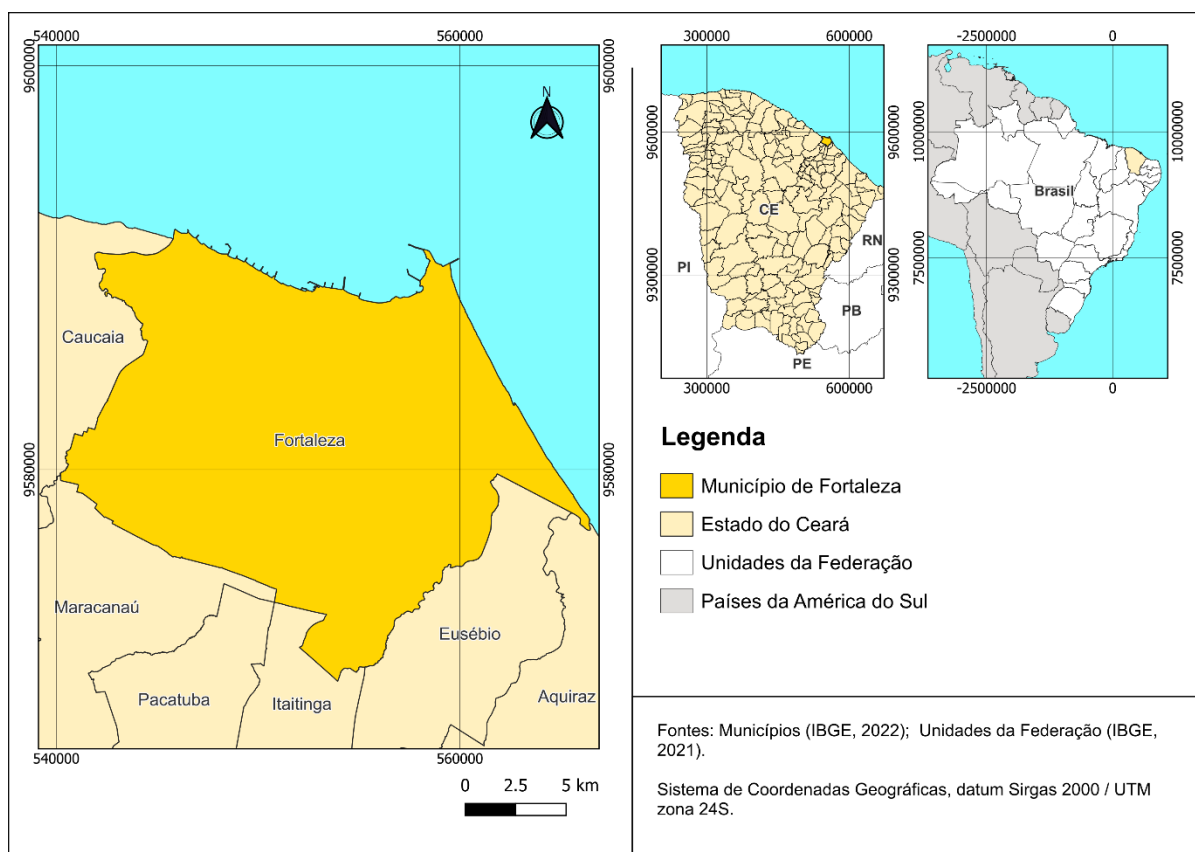
Além disso, ferramentas probabilísticas permitem representar incertezas inerentes ao sistema — tanto nos dados ambientais quanto nos parâmetros do modelo — e propiciar interpretações mais robustas sobre a extensão e magnitude do risco. O uso de metamodelos, como kriging, permite acelerar simulações complexas e reduzir custos computacionais, viabilizando análises em larga escala sem perda significativa de precisão (SBRAGIO; FILHO; MARTINS, 2023; GUO, 2017).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Região de estudo

A cidade de Fortaleza, capital do estado do Ceará, localiza-se na região Nordeste do Brasil, entre as coordenadas  $3^{\circ}43'02''S$  e  $38^{\circ}32'35''W$ . O município possui uma extensão territorial de 312,353 km<sup>2</sup>, estando inserido na zona costeira e banhado pelo Oceano Atlântico. Fortaleza limita-se territorialmente com os municípios de Caucaia, Maracanaú, Itaitinga, Eusébio, Aquiraz e Pacatuba (IBGE, 2022; IPECE, 2017). Na Figura 9, observa-se a localização do município de Fortaleza.

Figura 9 - Mapa de localização do município de Fortaleza.

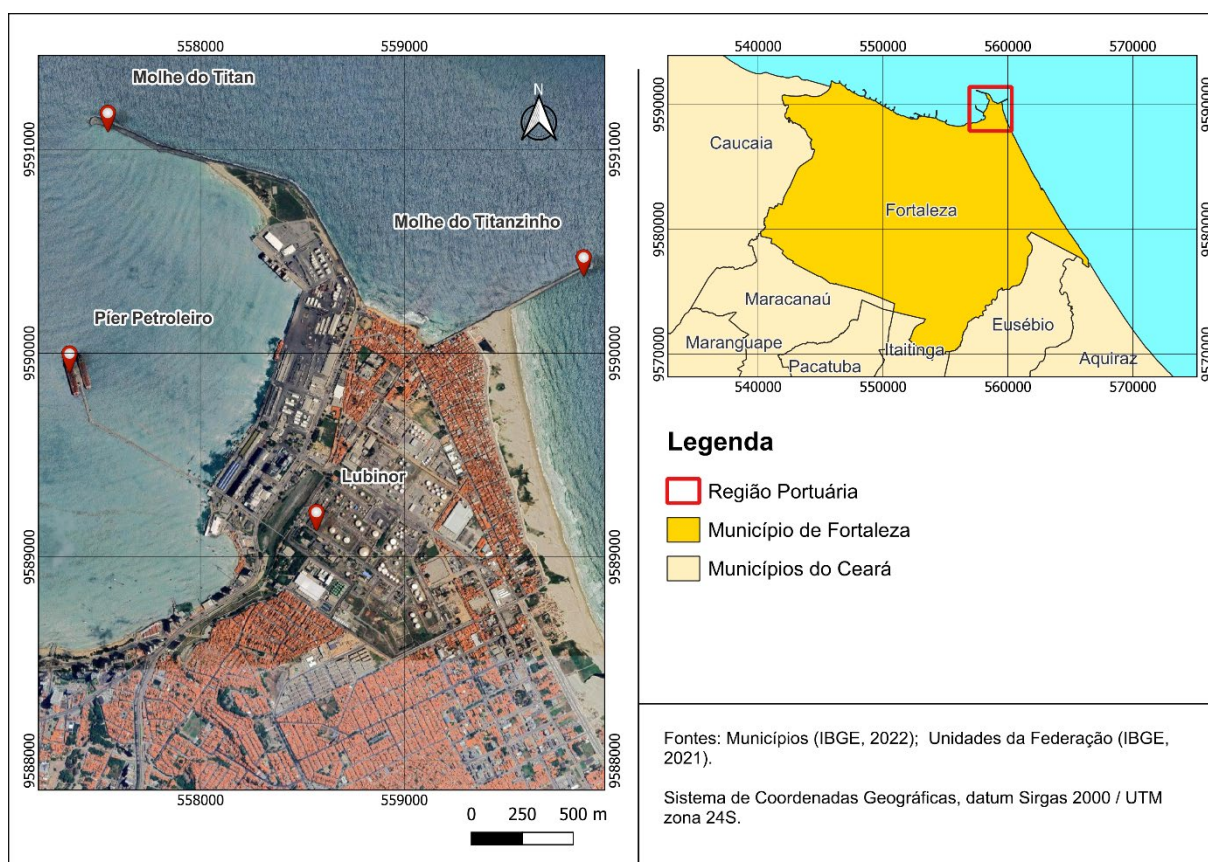


Inserido na zona costeira de Fortaleza, o Porto do Mucuripe é um terminal multifuncional que acumula relevância econômica e estratégica para o estado do Ceará. Conforme Plano Mestre do Porto do Mucuripe (CDC, 2015), o porto dispõe de um cais comercial linear com cerca de 1.080 m de extensão, além de um píer petroleiro composto pelos berços 201 e 202, cada um com 250 m de comprimento e profundidades de 11,5 m (interno) e 12,0 m (externo). Essa infraestrutura suporta operações de granéis líquidos, sólidos, contêineres

e passageiros.

O píer está conectado à terra por uma ponte de acesso de 853 m de extensão, estruturada em duas faixas distintas. A seção destinada à dutovia, com 4,40 m de largura, abriga tubulações que ligam o terminal à Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste (Lubnor) e a uma fábrica de margarina adjacente. Paralelamente, a faixa de rolamento, com 3,60 m de largura, comporta de forma segura a passagem de um único veículo leve ou de manutenção por vez (CDC, 2015). A Figura 10 apresenta o mapa de localização do Porto do Mucuripe.

Figura 10 – Mapa de localização do Porto do Mucuripe



## 4.2 Modelagem digital do terreno

A modelagem digital do terreno é fundamental para a modelagem hidrodinâmica rigorosa, pois determina a base geométrica, influencia a qualidade dos resultados numéricos, orienta a resolução de malhas e é elemento central na previsão geomorfológica e do transporte de contaminantes ou sedimentos. Um modelo digital de terreno (MDT) bem construído e analisado reduz incertezas, promove resultados confiáveis e viáveis em estudos ambientais e operacionais. Desse modo, é imprescindível que o modelador tenha especial atenção a esta fase do trabalho de modelagem, evitando problemas futuros e retrabalhos.

A apresentação do MDT do presente estudo iniciará pela definição do domínio de modelagem e dos contornos de terra e mar. Em seguida, será apresentada a discretização do domínio de modelagem, com a construção da malha de elementos finitos. Na sequência, será demonstrada a inserção dos dados batimétricos e de rugosidade de fundo, essenciais para a resolução das equações hidrodinâmicas. Cada etapa será detalhada nas seções a seguir.

#### **4.2.1 Domínio de modelagem e contornos de terra e mar**

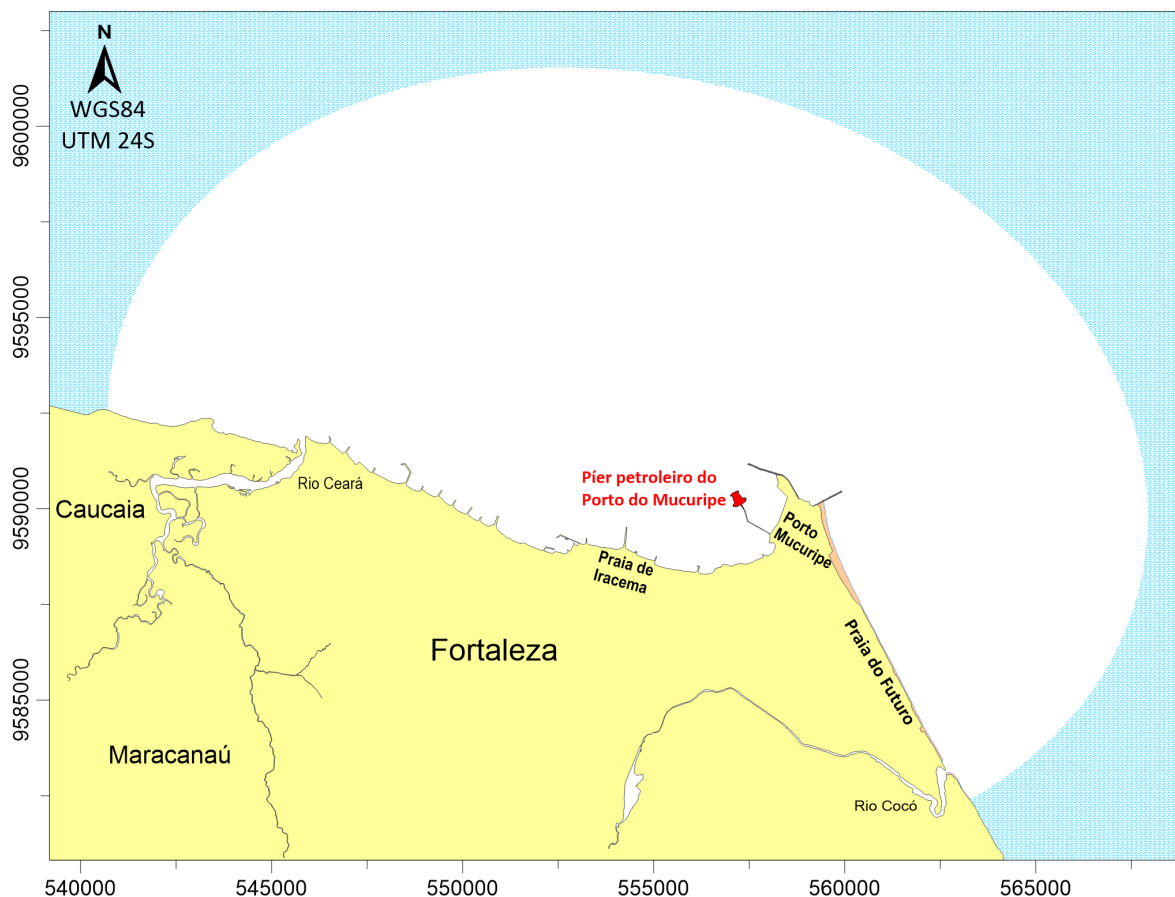
Com o objetivo de avaliar a circulação na região portuária do Mucuripe e prever o destino de derrames de óleo na zona costeira de Fortaleza, o domínio de modelagem abrangeu toda a orla da capital e parte de Caucaia. Nos extremos leste e oeste encontram-se os estuários dos Rios Cocó e Ceará, áreas urbanizadas e de alta dinâmica sedimentar que podem funcionar como pontos de retenção e acumulação de contaminantes.

O contorno de fronteira de terra delimita espacialmente o domínio de modelagem hidrodinâmica e foi extraído por meio de digitalização vetorial de ortofotos de alta resolução, disponibilizadas pelo *Google Earth*, previamente georreferenciadas em sistema de projeção UTM, e desenhada com o auxílio do software *Surfer*. Essa fronteira fechada é representada por um conjunto de nós topologicamente conectados, através dos quais apenas fluxos prescritos podem atravessar, garantindo a conservação de massa e o fechamento hidráulico do domínio. Dessa forma, assegura-se que as interações entre o sistema modelado e suas vizinhanças ocorram unicamente por meio das condições de contorno especificadas, o que é essencial para a estabilidade numérica e a fidedignidade dos resultados.

O contorno de mar, ou fronteira aberta, é definido por uma série de nós ao longo da linha costeira em que não existem barreiras físicas, nos quais se aplicam condições de contorno abertas para garantir o intercâmbio realista de massa e energia entre o domínio modelado e o oceano adjacente. A digitalização da fronteira aberta também foi feita por meio do *Google Earth* e posteriormente desenhada com o uso do software *Surfer*.

Com a definição dos contornos de fronteira de terra e de mar, foi possível a criação do mapa base da região de interesse, apresentado na Figura 11. A região em branco ilustra o domínio de modelagem, enquanto as regiões em amarelo e azul são, respectivamente, os contornos de terra e de mar. Encontra-se destacada a indicação do píer petroleiro do Porto do Mucuripe.

Figura 11 – Domínio de modelagem com contornos de mar e terra e indicação do píer petrolífero do Porto do Mucuripe, em Fortaleza – CE. Mapa produzido no SisBaHiA<sup>®</sup>, utilizando o software de pós-processamento *Surfer*<sup>®</sup>.



#### 4.2.2 Discretização do domínio de modelagem

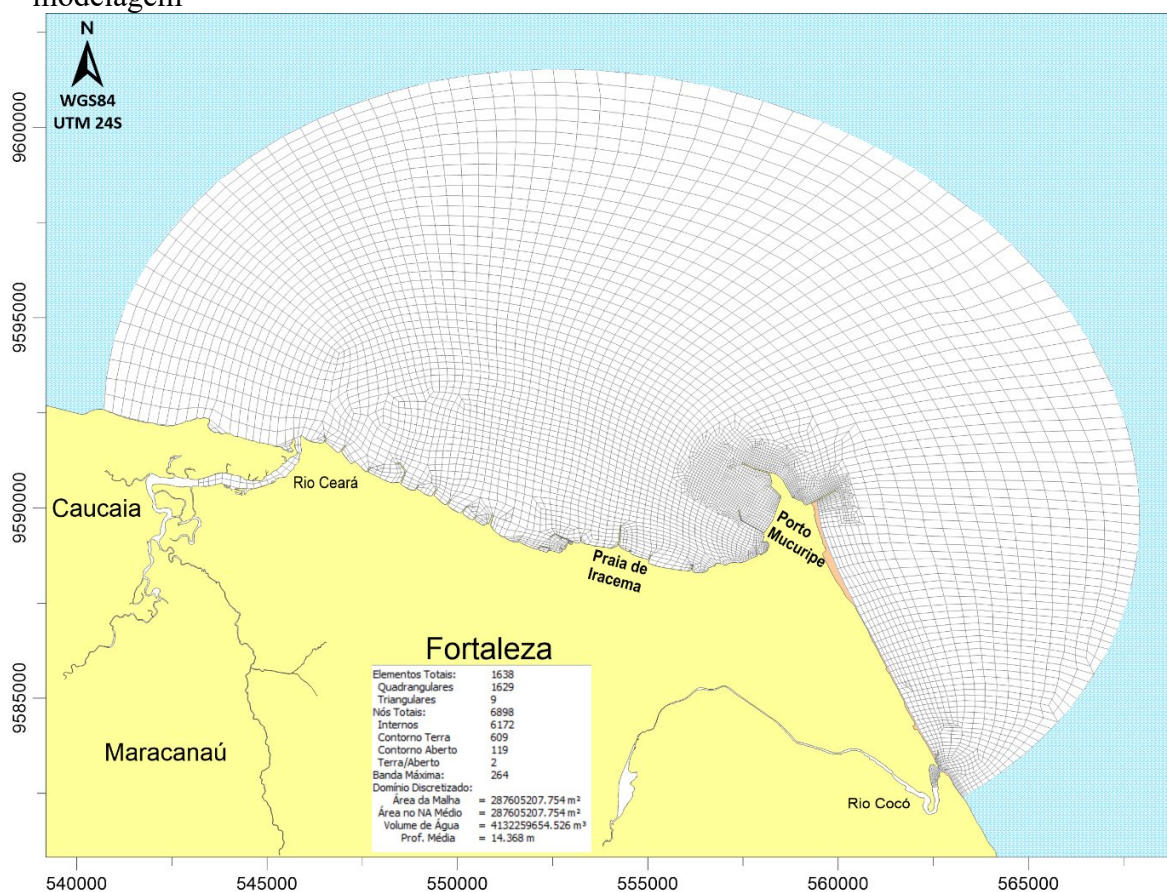
A malha de elementos constitui o resultado da discretização espacial do domínio de modelagem e representa um dos componentes mais relevantes para a obtenção de resultados hidrodinâmicos precisos. Sua construção deve ser realizada com elevado rigor técnico, de modo a refletir, com fidelidade, as características geomorfológicas da área de estudo e garantir a estabilidade e a acurácia numérica do modelo.

No presente trabalho, a elaboração da malha foi orientada pelo traçado das margens do domínio costeiro de interesse, buscando-se um alinhamento criterioso dos elementos aos contornos da linha de costa e às estruturas portuárias. A densidade da malha foi ajustada conforme a complexidade local da geometria e a importância relativa de cada sub-região. Em particular, o entorno do Porto do Mucuripe — área central da pesquisa — recebeu refinamento adicional, com o intuito de captar com maior resolução os processos hidrodinâmicos induzidos pelas operações portuárias. Além disso, estruturas artificiais presentes na costa de Fortaleza,

como molhes e espigões distribuídos ao longo do litoral, também motivaram o aumento da resolução local, assegurando uma representação mais fidedigna do ambiente real.

A Figura 12 apresenta a malha de elementos finitos implementada no SisBaHiA<sup>®</sup>, composta por 1.638 elementos no total. Desses, 1.629 são elementos quadrangulares biquadráticos e 9 são triangulares quadráticos. Segundo Rosman (2025), os elementos quadrangulares biquadráticos oferecem maior flexibilidade geométrica e superior capacidade de representação espacial, embora demandem maior custo computacional quando comparados a elementos de ordem inferior.

Figura 12 – Malha de elementos finitos usada para a discretização espacial do domínio de modelagem

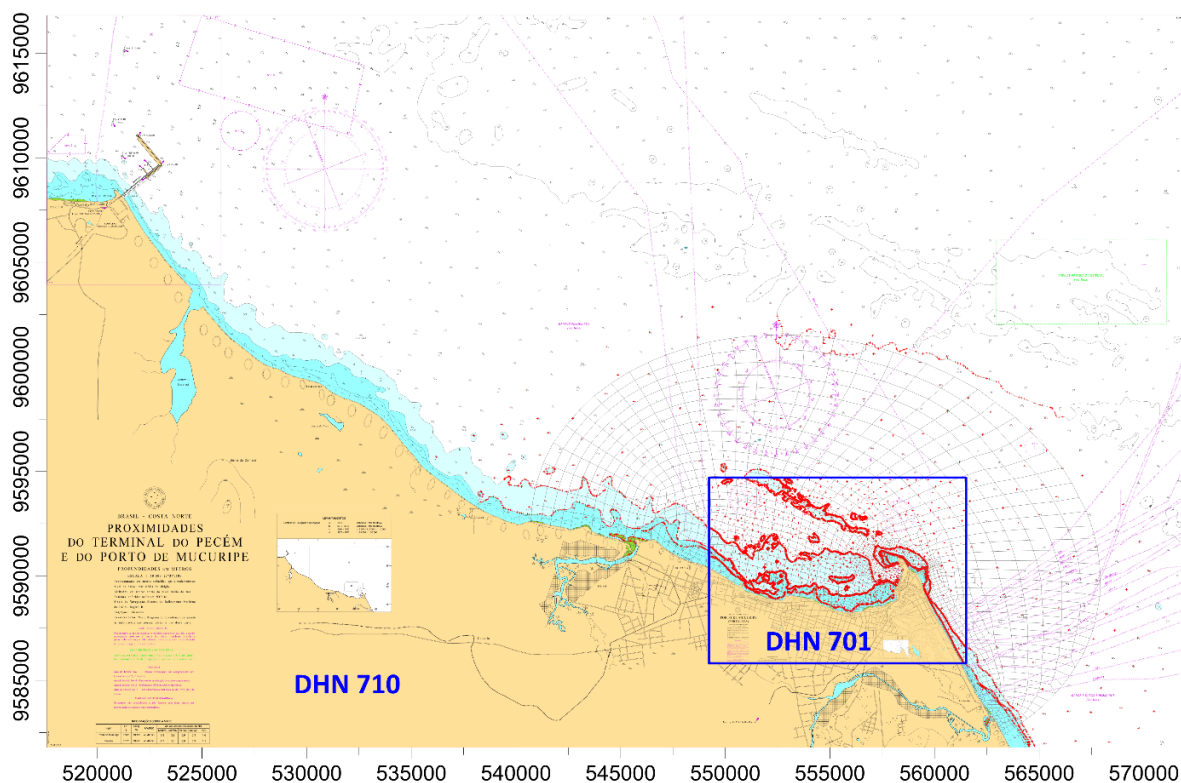


#### 4.2.3 Batimetria

As informações batimétricas utilizadas neste estudo foram obtidas a partir de cartas náuticas produzidas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN), especificamente: a carta náutica nº 701, referente ao Porto do Mucuripe, com escala de 1:13.000; e a carta náutica nº 710, que abrange as proximidades dos terminais do Porto do Pecém e do

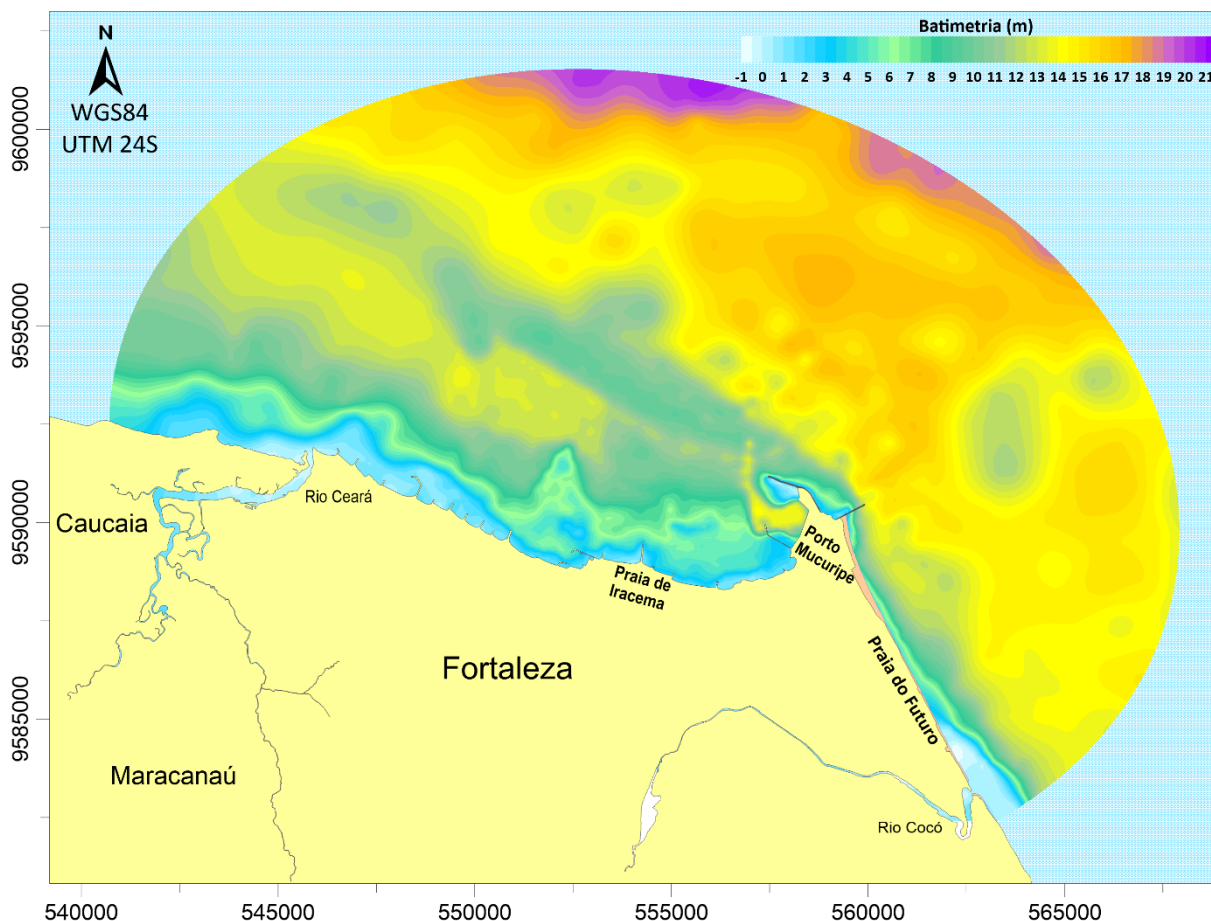
Porto do Mucuripe, em escala de 1:50.000. A Figura 13 ilustra o processo de digitalização das cotas batimétricas, apresentando a sobreposição das duas cartas náuticas. A carta DHN nº 701 foi utilizada em conjunto com a DHN nº 710 por oferecer maior detalhamento da região portuária, o que contribuiu significativamente para a qualidade e resolução da batimetria adotada no domínio de modelagem hidrodinâmica no entorno do Porto do Mucuripe.

Figura 13 – Digitalização das cotas batimétricas a partir das cartas náuticas da DHN nº 701 e 710. Os pontos vermelhos são os pontos de cotas batimétricas digitalizadas.



Os dados batimétricos digitalizados foram processados no ambiente SisBaHiA®, empregando o software Surfer para interpolação geoespacial via kriging. A Figura 14 exhibe o mapa de batimetria resultante, projetado sobre a malha de elementos finitos, evidenciando a distribuição de profundidades com alta resolução e fidelidade ao contorno costeiro. Os contornos batimétricos usam como referência o Nível de Redução (NR) da carta náutica nº 701, de 1,60 m.

Figura 14 – Batimetria resultante da interpolação dos dados das cartas náuticas nº 701 e 710 da DHN no domínio de modelagem.



#### 4.2.4 Rugosidade equivalente de fundo

A determinação da tensão de cisalhamento no leito marinho requer a caracterização precisa da rugosidade equivalente ( $\epsilon$ ), a qual varia conforme a natureza dos sedimentos de fundo. No SisBaHiA®, esses valores de rugosidade são convertidos em coeficientes de Chézy, que entram diretamente na formulação da tensão de atrito sobre o substrato. Dessa forma, torna-se imprescindível atribuir, a cada nó da malha computacional, um valor de  $\epsilon$  representativo das características granulares locais.

Para este estudo, os parâmetros de rugosidade foram selecionados a partir das diretrizes da Referência Técnica do SisBaHiA®, conforme sumarizado na Tabela 6. Na região de interesse — dominada por sedimentos de areia grossa — optou-se por valores de  $\epsilon$  que refletem a granulometria predominante, objetivando uma proximidade ao realismo na simulação do fluxo próximo ao fundo.

Tabela 6 - Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo,  $\epsilon$ , sem efeitos de ondas, para uso no módulo 2DH do modelo FIST3D.

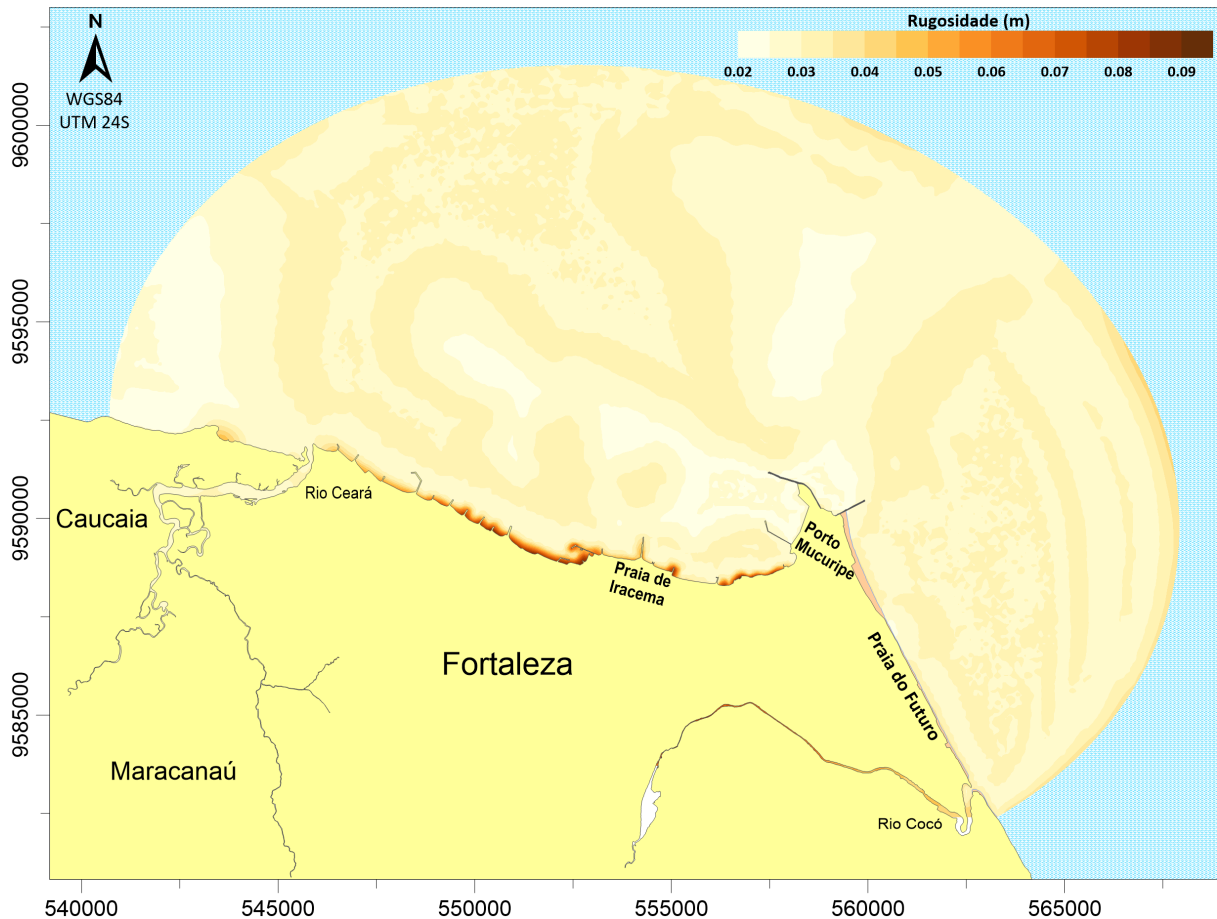
<b>Leito de sedimentos com rugas e similares</b>	<b><math>\epsilon</math></b>
Predominância de lama fluida	$0,1E-6 \text{ m} < \epsilon < 0,0001 \text{ m}$
Predominância de siltes e finos	$0,0001 \text{ m} < \epsilon < 0,0100 \text{ m}$
Predominância de areias finas	$0,0070 \text{ m} < \epsilon < 0,0150 \text{ m}$
Predominância de areias médias	$0,0100 \text{ m} < \epsilon < 0,0300 \text{ m}$
Predominância de areias grossas	$0,0250 \text{ m} < \epsilon < 0,0500 \text{ m}$
Predominância de areias muito grossas	$0,0400 \text{ m} < \epsilon < 0,0800 \text{ m}$
Predominância de areias com cascalhos	$0,0500 \text{ m} < \epsilon < 0,1200 \text{ m}$
Sedimentos com vegetação	$0,0500 \text{ m} < \epsilon < 0,1500 \text{ m}$
Sedimentos com obstáculos (pedras, troncos)	$0,1500 \text{ m} < \epsilon < 0,4000 \text{ m}$

Fonte: Rosman (2025)

A variação espacial da rugosidade do fundo, representada pelos valores de  $\epsilon$ , evidencia distintas microzonas de resistência ao escoamento, refletindo a heterogeneidade dos sedimentos ao longo do domínio estudado. Na Figura 15, o mapa de distribuição da amplitude de rugosidade do fundo revela áreas de maior aspereza — associadas a sedimentos mais grossos ou estruturas artificiais, como molhes — e setores de menor rugosidade, típicos de superfícies arenosas mais uniformes.

Essas flutuações de  $\epsilon$  desempenham papel crucial na definição do campo de tensões de cisalhamento no leito, pois zonas de rugosidade elevada geram atrito adicional, reduzindo velocidades locais e alterando padrões de circulação nas proximidades do fundo. Conseqüentemente, microzonas de elevado atrito podem promover retenção de sedimentos finos e modificar trajetórias de partículas de contaminantes, ao passo que áreas de menor resistência permitem escoamentos mais rápidos e maior dispersão. Incorporar essa distribuição detalhada de rugosidade ao modelo hidrodinâmico é, portanto, fundamental para garantir a precisão das simulações de correntes e do transporte.

Figura 15 – Distribuição da amplitude da rugosidade equivalente de fundo ( $\epsilon$ ) na região do domínio de modelagem.



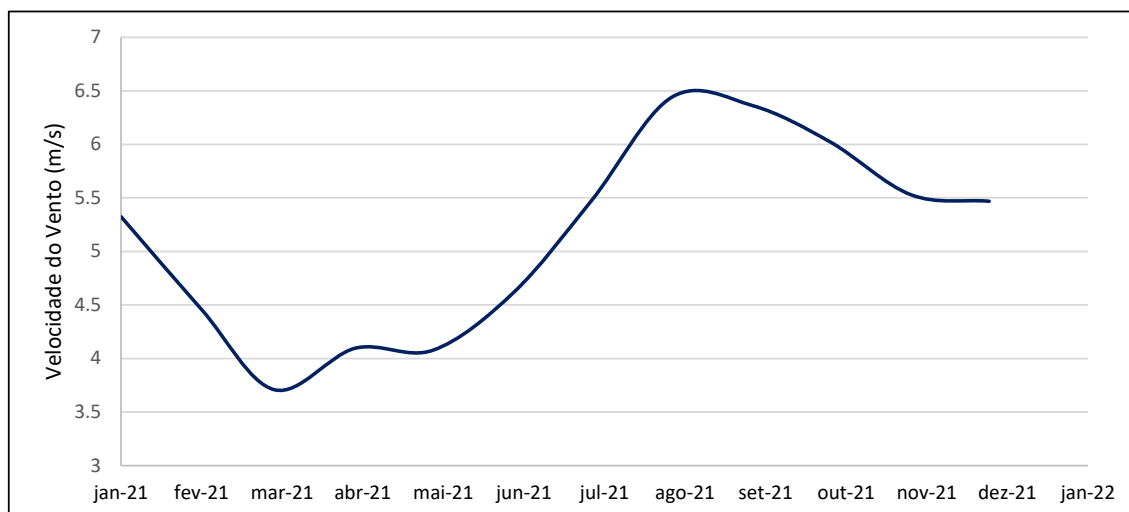
### 4.3 Modelo hidrodinâmico (MH)

No desenvolvimento desta seção são apresentadas a definição dos cenários de modelagem hidrodinâmica e as forçantes barotrópicas utilizadas para a circulação do modelo (vento e maré).

#### 4.3.1 Cenários de modelagem

A seleção dos cenários de simulação hidrodinâmica foi fundamentada nas diferenças sazonais de intensidade dos ventos na costa de Fortaleza–CE, reconhecida como variável determinante na dinâmica costeira e no transporte de contaminantes. Um estudo conduzido por Stringari *et al.* (2012) sugere que a influência do vento local é a principal força impulsionadora do destino do óleo derramado. A Figura 16 exhibe a média mensal da intensidade dos ventos do ano de 2021 na região de estudo. A escolha do ano de simulação se deu em função da disponibilidade de dados para calibração dos resultados.

Figura 16 – Variação mensal média da intensidade do vento na região de estudo para o ano de 2021.



Fonte: ERA5 Land.

Análises climatológicas revelam que os meses de março, abril e maio registram os ventos menos intensos ao longo do ano na costa de Fortaleza, com média horária inferior à observada em outros períodos e favorecendo condições de circulação mais suaves. Tal cenário representa um extremo relevante para avaliar o transporte de óleo em condições relativamente calmas. Por outro lado, os meses de agosto, setembro e outubro caracterizam-se por apresentarem ventos significativamente mais intensos, resultando em velocidades médias superiores e maior turbulência superficial — condições esperadas em episódios de maior risco de deriva e dispersão acelerada de manchas de óleo.

Com base nesses levantamentos estatísticos, e na disponibilidade de dados hidrodinâmicos para calibração, os dois cenários climáticos extremos adotados foram os meses de março (ventos de intensidade mínima) e outubro (ventos de intensidade máxima), permitindo avaliar a sensibilidade da pluma de óleo a variações importantes das forças externas. Essa abordagem comparativa enriquece o estudo, permitindo distinguir claramente como diferentes regimes eólicos influenciam o destino e espalhamento de óleo na zona costeira, contribuindo para o planejamento de contingências ambientais mais robustas e dinâmicas.

#### 4.3.2 Dados de maré

Para estabelecer as condições de contorno na fronteira aberta do modelo,

elaborou-se uma série temporal de elevações da superfície livre resultante da combinação da maré astronômica e das variações meteorológicas. Essa série define o nível do mar aplicado como entrada de contorno ao modelo hidrodinâmico.

A contribuição astronômica foi obtida por meio de 33 constantes harmônicas extraídas do FES2014 (Finite Element Solution), uma solução global de marés baseada em elementos finitos e dados altimétricos de satélites, selecionadas em três estações ao longo da borda do domínio. Já as flutuações meteorológicas do nível médio do mar — englobando efeitos de vento, pressão atmosférica e correntes de deriva na plataforma continental — foram extraídas das simulações do HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model), um modelo global que utiliza coordenadas híbridas para representar processos termohalinos e dinâmicas de mesoescala com elevada fidelidade.

As 33 constantes harmônicas das três estações do FES2014, utilizadas para gerar as séries temporais de elevação a serem inseridas como condição de contorno de fronteira aberta, no modelo podem ser apreciadas nas Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 7 - Constantes harmônicas referentes à estação FES 1

<b>Constante</b>	<b>Período (s)</b>	<b>Amplitude (m)</b>	<b>Fase (grau)</b>
2n2	46459.34794	0.0288033	104.2185211
MNS2	47258.16272	0.0085561	90.094574
j1	83154.51628	0.0053696	229.5525513
k1	86164.09058	0.0719617	221.7493744
k2	43082.04529	0.0871625	145.9474792
l2	43889.83274	0.0215849	134.319397
lambda2	43998.3869	0.0064023	133.0054321
m2	44714.16431	0.940433	129.8276978
m3	29809.44289	0.0004782	222.9555359
m4	22357.08217	0.0073722	331.5863342
m6	14904.72144	0.0076152	37.5144348
m8	11178.54108	0.0005021	129.1140442
mf	1180292.344	0.0177224	354.9911194
mks2	44587.80812	0.0010127	37.1859512
mm	2380713.365	0.0085528	354.4740295
mn4	22569.02603	0.0071598	211.3265381
ms4	21972.02139	0.0030676	66.8505554
msf	1275721.423	0.0001367	210.6281891
mtm	789085.4144	0.0035709	357.7314148
mu2	46338.32735	0.0393	107.1359711
n2	45570.05357	0.2017404	116.3102722
n4	22785.02679	0.0015756	158.0686493
nu2	45453.61584	0.0406818	115.3360596
o1	92949.6301	0.0688845	184.1078339
p1	86637.20483	0.0234922	222.1372833
q1	96726.08376	0.015067	155.3566589
r2	43140.94484	0.0025484	141.6685791
s1	86399.98873	0.0108913	109.9951096
s2	43200.00002	0.3107314	149.5540161
s4	21600	0.0016072	329.2236938
sa	31556955.92	0.0000108	54.8890495
ssa	15778463.36	0.0071334	359.6932983
t2	43259.21709	0.018579	142.697876

Fonte: FES2014

Tabela 8 - Constantes harmônicas referentes à estação FES 2

<b>Constante</b>	<b>Período (s)</b>	<b>Amplitude (m)</b>	<b>Fase (grau)</b>
2n2	46459.34794	0.0289969	104.3908997
MNS2	47258.16272	0.0085885	90.0351868
j1	83154.51628	0.0053968	229.6064301
k1	86164.09058	0.0709942	222.2863617
k2	43082.04529	0.0885301	145.5665741
l2	43889.83274	0.021962	134.3135071
lambda2	43998.3869	0.0064369	132.7757263
m2	44714.16431	0.9500089	129.749939
m3	29809.44289	0.0005281	224.6190796
m4	22357.08217	0.0072587	331.0481873
m6	14904.72144	0.0114588	30.7149353
m8	11178.54108	0.0006696	175.6224213
mf	1180292.344	0.0176852	354.9719543
mks2	44587.80812	0.0008534	39.9855881
mm	2380713.365	0.0085056	354.4661865
mn4	22569.02603	0.0074012	208.8264618
ms4	21972.02139	0.0036372	74.0621033
msf	1275721.423	0.0001997	195.3593903
mtm	789085.4144	0.0035612	357.7461548
mu2	46338.32735	0.0395608	107.4267731
n2	45570.05357	0.2031726	116.3594971
n4	22785.02679	0.0018282	155.6942596
nu2	45453.61584	0.0411225	115.3444214
o1	92949.6301	0.0680201	183.4063263
p1	86637.20483	0.0230688	222.7412415
q1	96726.08376	0.0149831	154.0575256
r2	43140.94484	0.0025827	141.2958679
s1	86399.98873	0.0113336	111.3329849
s2	43200.00002	0.3148609	149.3323059
s4	21600	0.0015897	330.1462402
sa	31556955.92	0.0000082	102.9811859
ssa	15778463.36	0.0071271	359.7326355
t2	43259.21709	0.0188239	142.3164673

Fonte: FES2014

Tabela 9 - Constantes harmônicas referentes à estação FES 3

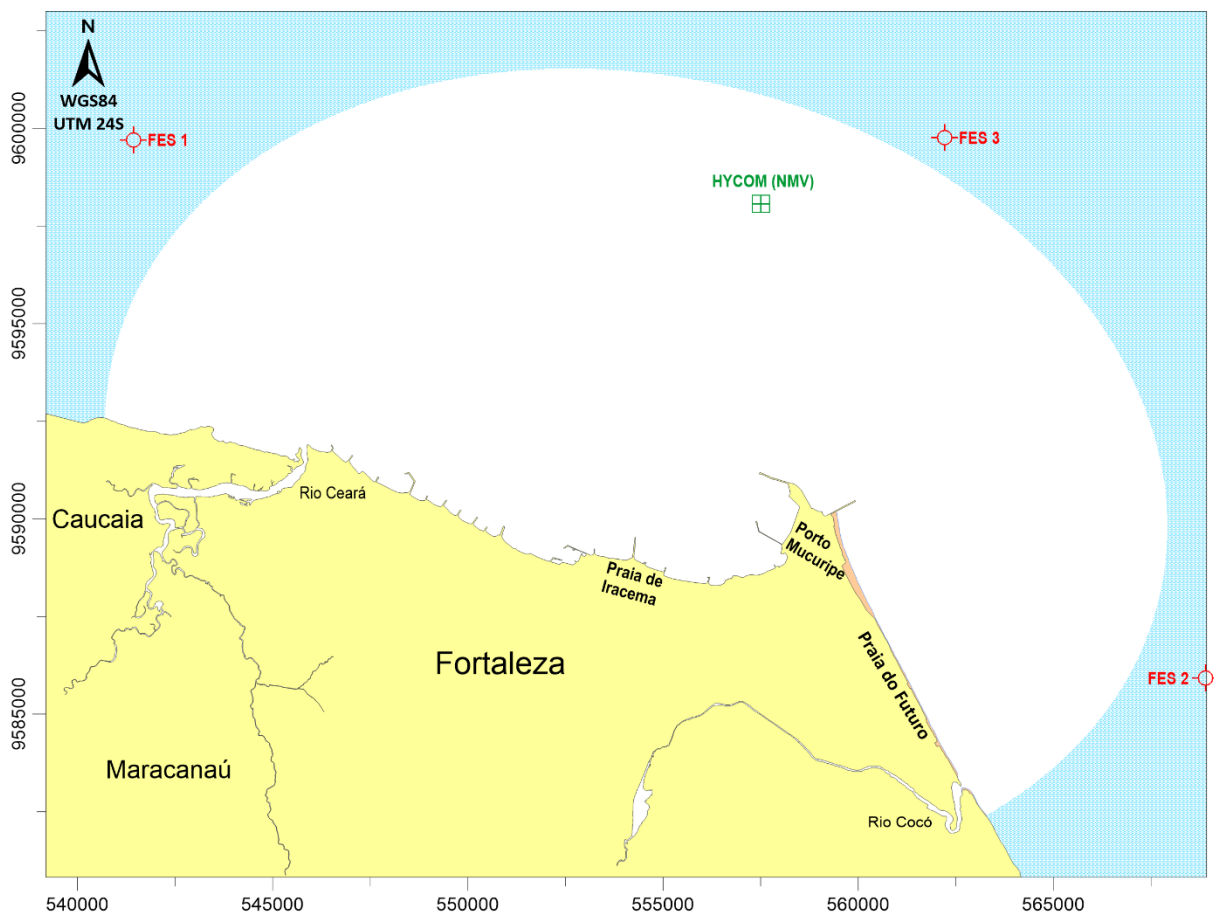
<b>Constante</b>	<b>Período (s)</b>	<b>Amplitude (m)</b>	<b>Fase (grau)</b>
2n2	46459.34794	0.0285938	104.0545807
MNS2	47258.16272	0.0084757	89.8391724
j1	83154.51628	0.0053445	229.8052368
k1	86164.09058	0.0713991	222.1563873
k2	43082.04529	0.0867017	145.6064758
l2	43889.83274	0.0215131	134.1478882
lambda2	43998.3869	0.006337	132.7997742
m2	44714.16431	0.9349805	129.590332
m3	29809.44289	0.0004515	222.0405731
m4	22357.08217	0.0071504	326.809906
m6	14904.72144	0.0078748	34.9396362
m8	11178.54108	0.0004993	149.1879425
mf	1180292.344	0.0176932	354.8873596
mks2	44587.80812	0.0009497	40.0457306
mm	2380713.365	0.0084639	354.1489563
mn4	22569.02603	0.0071734	211.5657806
ms4	21972.02139	0.0028054	64.8193359
msf	1275721.423	0.0003825	200.4600677
mtm	789085.4144	0.0035605	357.688324
mu2	46338.32735	0.0390272	106.9596863
n2	45570.05357	0.2003079	116.1008453
n4	22785.02679	0.0016076	160.7185516
nu2	45453.61584	0.0404141	115.1672363
o1	92949.6301	0.068255	183.7138977
p1	86637.20483	0.0232083	222.4609222
q1	96726.08376	0.0149638	154.6897736
r2	43140.94484	0.0025348	141.3577271
s1	86399.98873	0.0097625	113.7747116
s2	43200.00002	0.3090662	149.2742004
s4	21600	0.001671	329.3883972
sa	31556955.92	0.000013	147.0653229
ssa	15778463.36	0.0071193	359.73349
t2	43259.21709	0.0184792	142.3807983

Fonte: FES2014

A Figura 17 ilustra a distribuição espacial das três estações do FES2014 e da estação do HYCOM na região de estudo.

Ao integrar ambas as séries, o modelo consegue reproduzir simultaneamente os ciclos harmônicos previsíveis da maré e os desvios induzidos por condições meteorológicas, providenciando uma condição de contorno dinâmica essencial para simulações precisas de transporte e dispersão costeira.

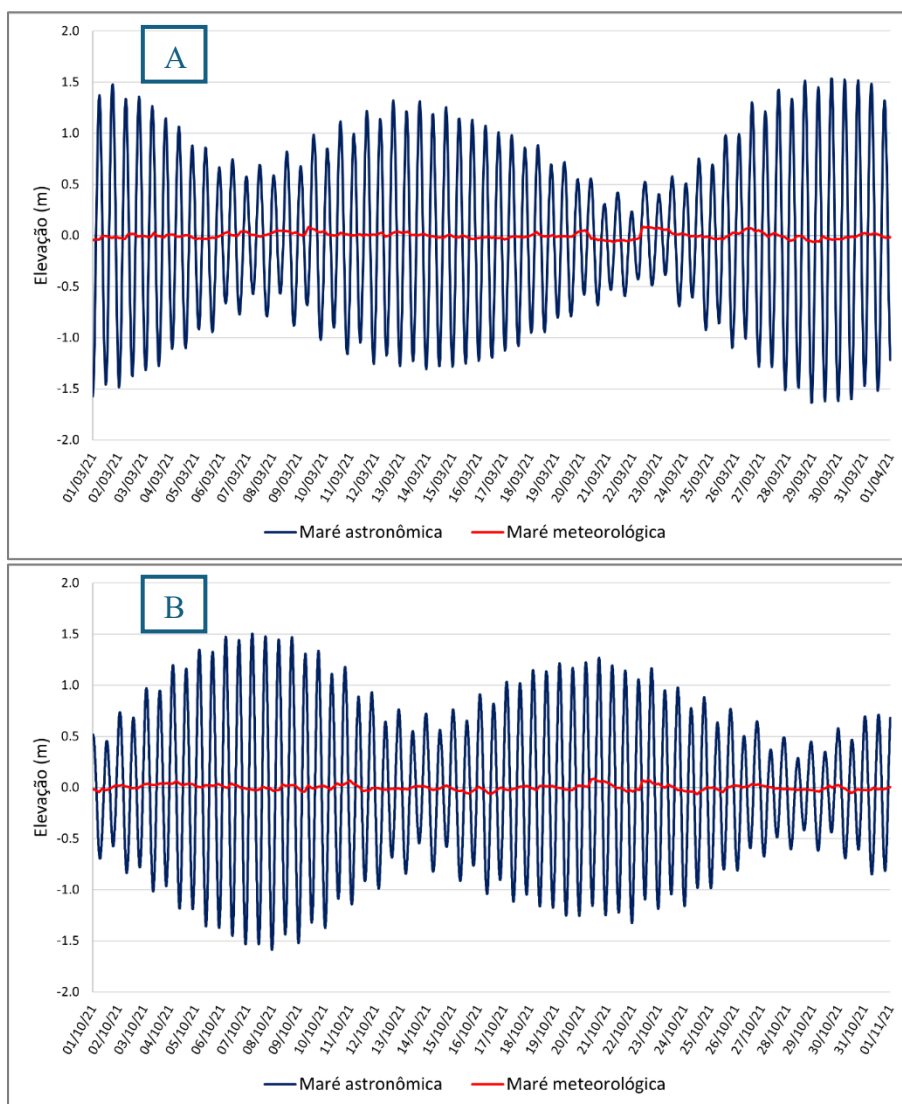
Figura 17 - Distribuição espacial das estações do FES2014 e do HYCOM na região de estudo.



Para as condições de contorno de fronteira fechada (contorno de terra), foi utilizado fluxo normal nulo, devido à consideração de elemento impermeável.

A Figura 18 apresenta as séries temporais de nível de mar consideradas para os cenários de março e outubro de 2021, respectivamente. Como o modelo HYCOM não incorpora os componentes astronômicos da maré, as variações mostradas refletem exclusivamente os forçamentos meteorológicos e a propagação de ondas de plataforma. Observa-se que essas oscilações meteorológicas exercem impacto reduzido sobre o nível médio do mar na região de Fortaleza–CE, em razão de sua proximidade ao Equador, onde a influência barométrica sobre a coluna d'água é relativamente fraca. Complementarmente, a área estudo apresenta regime semidiurno de mesomaré, cujas amplitudes oscilam de aproximadamente 1,5 m em condições de quadratura até cerca de 3,0 m nas principais sizígias.

Figura 18 – Níveis de maré astronômica e maré meteorológica para os meses de março (A) e outubro (B) de 2021.



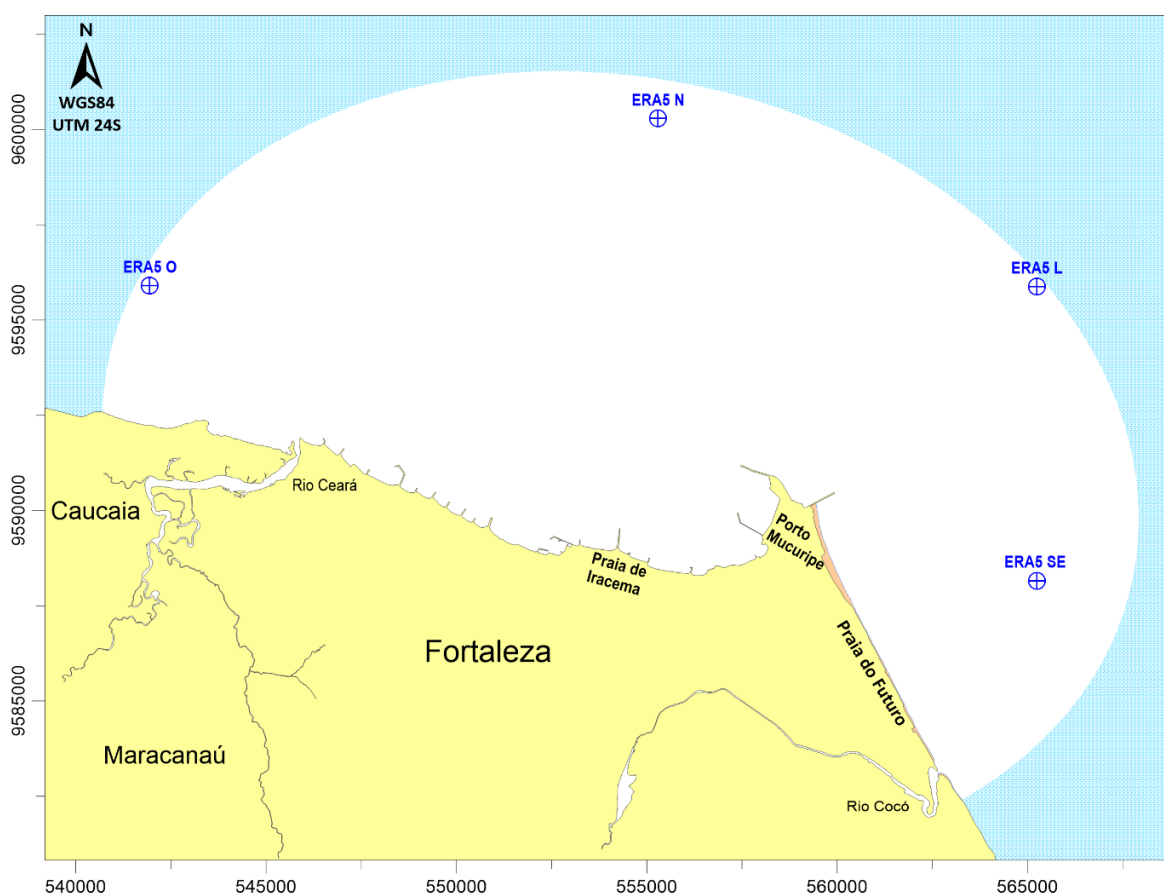
#### 4.3.3 Dados de vento

A inclusão dos forçamentos eólicos no modelo hidrodinâmico é realizada por meio da aplicação de séries temporais de vento, que alimentam o cálculo da tensão de cisalhamento na interface entre o ar e a superfície livre da água. Esses dados, essenciais para representar a influência do vento na geração de correntes superficiais e na dispersão de poluentes, foram extraídos do repositório ERA5, produto de reanálise global desenvolvido pelo ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). O ERA5 fornece campos de vento de resolução horária e alta cobertura espacial, mas para este estudo optou-se por dados com passo de três horas, contemplando os meses de março e outubro de 2021.

As componentes de velocidade e direção do vento, obtidas em quatro pontos estratégicos dentro do domínio de modelagem, foram interpoladas espacialmente para os nós

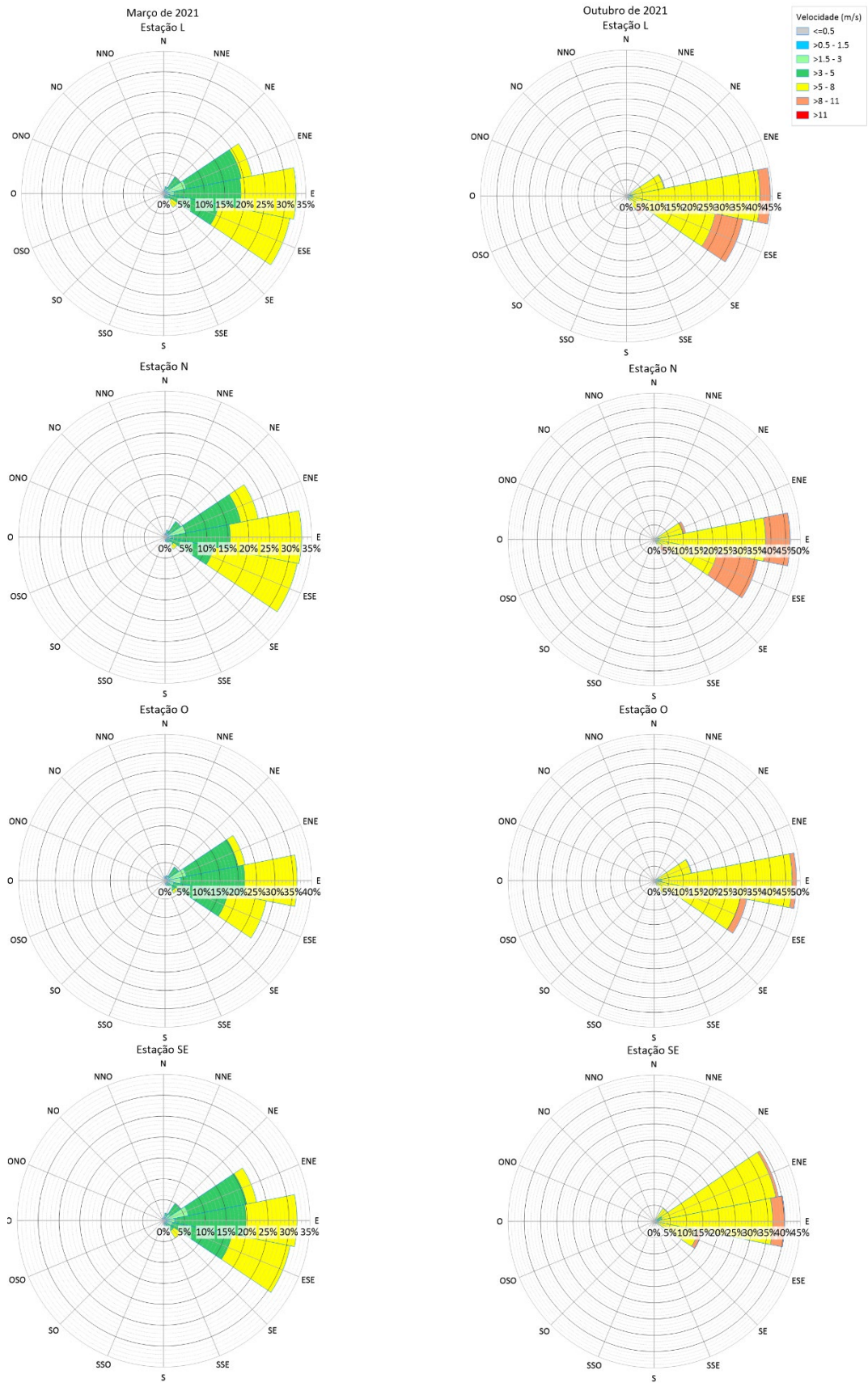
da malha do SisBaHiA<sup>®</sup>, garantindo um campo de vento contínuo sobre toda a área costeira. Esse procedimento permite que o modelo compute a tensão de atrito de vento — diretamente relacionada à intensidade e ao ângulo de entrada dos ventos — e, por consequência, represente adequadamente o forçamento eólico na constituição de correntes de superfície. Em estudos de derrame de óleo, essa parametrização eólica é crítica, pois modula tanto a trajetória inicial da mancha quanto seu espalhamento advectivo-difusivo, influenciando o tempo de chegada e a extensão da área impactada (STRINGARI, 2012). O posicionamento das estações de vento pode ser apreciado na Figura 19.

Figura 19 – Posicionamento das estações de vento obtidas dos dados de reanálise do modelo atmosférico ERA5, do ECMWF, de onde foram obtidas as séries temporais de vento utilizadas como forçantes no modelo hidrodinâmico.



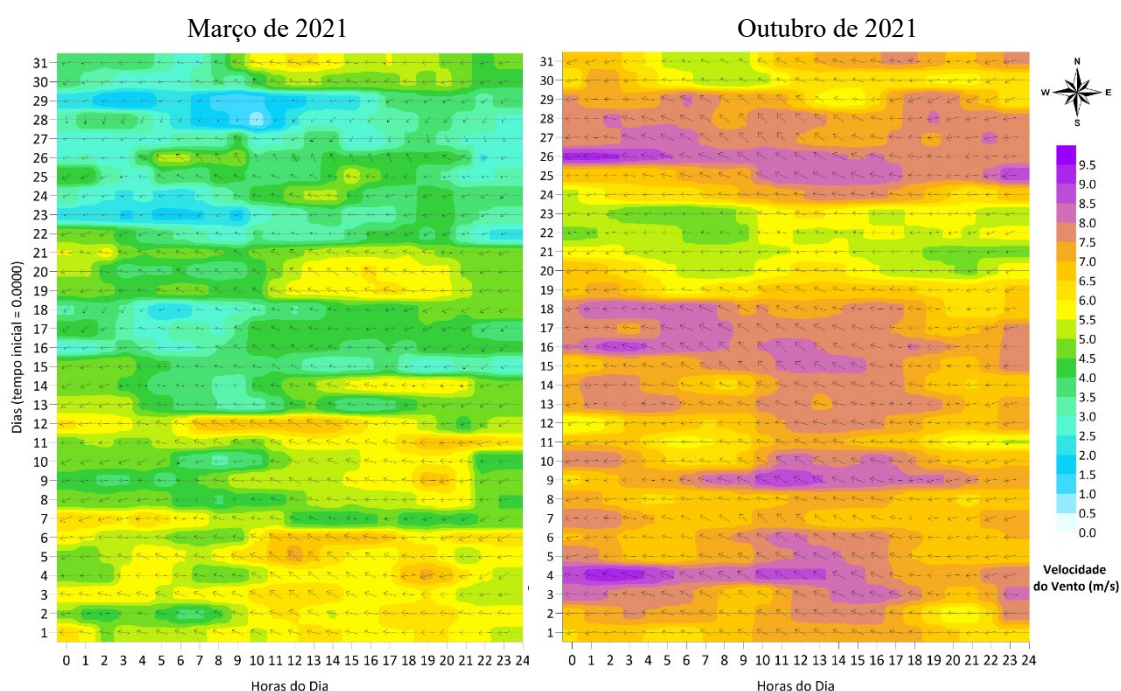
O diagnóstico do regime eólico ao longo de Fortaleza–CE, ilustrado pelas rosas dos ventos na Figura 20, evidencia uma predominância de ventos de Leste (E) e de Leste-Sudeste (ESE). No cenário de março, as velocidades máximas registradas alcançaram cerca de 7 m/s, ao passo que, em outubro, chegaram a 9 m/s, representando o aumento sazonal na força do vento.

Figura 20 - Rosa dos ventos das estações do ERA5, para os meses de março (esquerda) e outubro (direita) de 2021.



Para facilitar a análise das flutuações temporais na direção e intensidade dos ventos durante o período simulado, a Figura 21 apresenta os campos vetoriais correspondentes aos meses de março e outubro de 2021, respectivamente. Em cada mapa, os vetores são escalonados segundo a velocidade e orientados conforme a direção do vento em intervalos regulares, permitindo identificar de forma clara as diferenças sazonais no regime eólico e seu impacto potencial sobre a dinâmica costeira.

Figura 21 – Mapa dos ventos para os meses de março (esquerda) e outubro (direita) de 2021



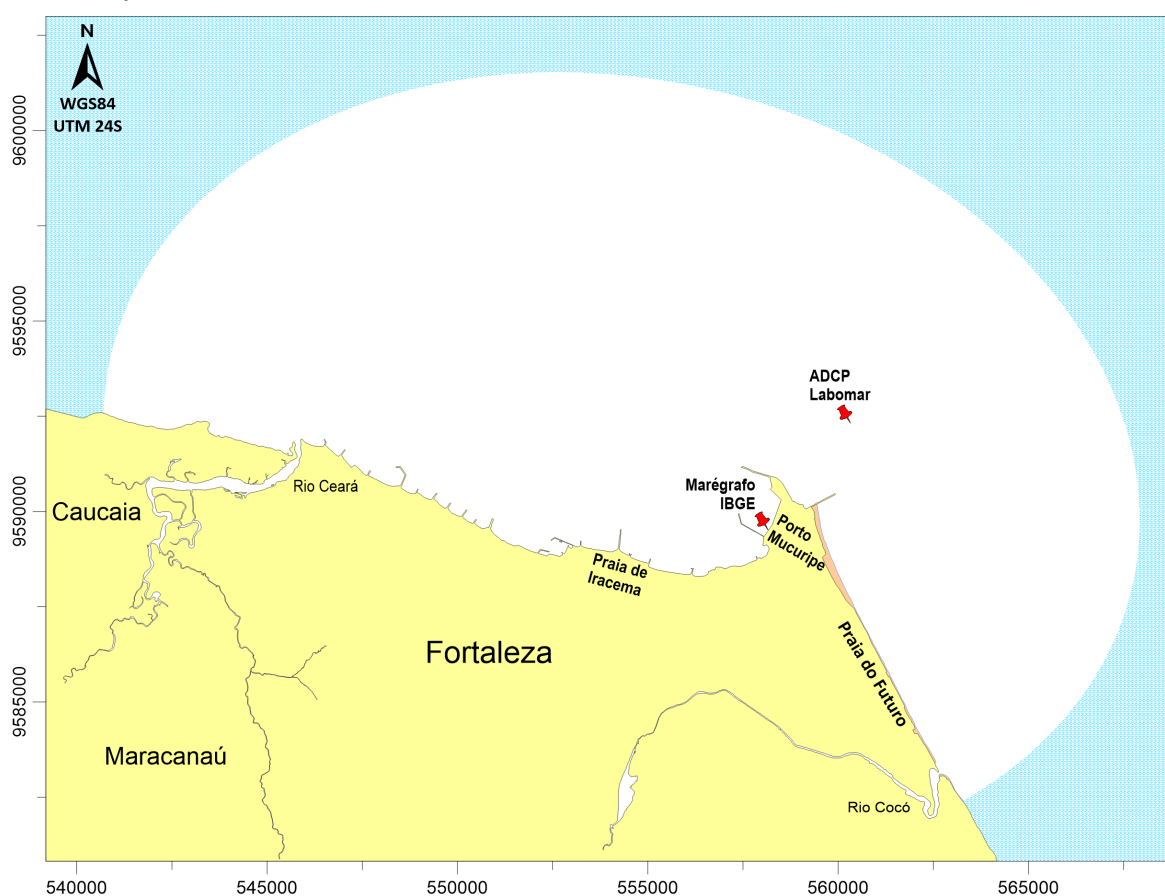
#### 4.3.4 Calibração

A calibração do modelo hidrodinâmico é uma etapa prévia fundamental para assegurar que o comportamento simulado reflita com precisão as condições reais observadas na região de estudo. No SisBaHiA<sup>®</sup>, esse processo envolve o ajuste criterioso de parâmetros sensíveis, como a rugosidade de fundo ou coeficientes de atrito vento-água, de modo a minimizar diferenças entre os resultados numéricos e os dados empíricos registrados em campo (PEREIRA *et al.*, 2024; ROSMAN, 2025).

O modelo hidrodinâmico foi calibrado por meio da análise comparativa entre as elevações de superfície livre e as magnitudes de corrente simuladas e observadas. Para a elevação do nível do mar, utilizou-se o registro da estação maregráfica do IBGE, instalada no Porto do Mucuripe (03°42'52,55" S; 38°28'36,54" O; datum SIRGAS 2000), cujos dados serviram de referência temporal e espacial para o ajuste das predições de maré.

Simultaneamente, as velocidades de corrente geradas pelo modelo foram confrontadas com as medições obtidas por um perfilador acústico de correntes por efeito Doppler (ADCP) do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará (Labomar/UFC), fundeado a aproximadamente 2 km da linha de costa (03°41'19" S; 38°27'19" O; datum SIRGAS 2000) em profundidade média de 15 m, também nas imediações do Porto do Mucuripe. Os posicionamentos do marégrafo do IBGE e do ADCP, dentro da área de estudo, podem ser apreciados na Figura 22.

Figura 22 – Posicionamento do Marégrafo do IBGE e do ADCP, usados no processo de calibração, dentro da área de estudo.



A qualidade dos resultados obtidos foi avaliada com base nas métricas: coeficiente de determinação ( $R^2$ ); percentual de viés médio (PBIAS); Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE); e Índice de Coerência entre Valores Medidos e Calculados (CIM). Os parâmetros  $R^2$ , RMSE e CIM são frequentemente utilizados para validar modelos hidrodinâmicos em zonas costeiras e estuarinas e atestar seus níveis de acurácia (PRASAD, *et al.*, 2020; FRENCH-MCCAY *et al.*, 2021; ALDARIAS *et al.*, 2023; CARVALHO, *et al.*, 2024). Enquanto isso, o PBIAS mede a tendência média dos valores simulados subestimarem ou superestimarem os

valores observados, sendo uma métrica bastante utilizada em trabalhos para calibração e validação de modelos hidrológicos e meteorológicos (MORIASI *et al.*, 2015; DURAP, 2025).

As Métricas utilizadas para a avaliação da acurácia do modelo estão descritas na Tabela 11, que reúne os cada índice, sua descrição e a fórmula de cálculo correspondente, facilitando a visualização. A combinação dos quatro índices neste estudo acrescenta um reforço à avaliação do modelo, não apenas pela força de seu ajuste, mas também pela precisão absoluta, pela minimização de viés e pela correspondência temporal das oscilações.

Tabela 10 – Métricas e avaliação estatística da qualidade dos resultados simulados

Índice	Descrição	Fórmula
$R^2$	Proporção da variância observada explicada pelo modelo (correlação linear). Varia de 0 a 1, sendo tanto melhor quanto mais próximo de 1.	$R^2 = \left[ \frac{\sum (V_{obs} - \bar{V}_{obs})(V_{sim} - \bar{V}_{sim})}{\sqrt{\sum (V_{obs} - \bar{V}_{obs})^2 \sum (V_{sim} - \bar{V}_{sim})^2}} \right]^2$
PBIAS	Viés percentual médio em relação ao total observado; quantifica a tendência de sobre ou subestimação em porcentagem; conforme Moriasi <i>et al.</i> (2015): <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>PBIAS &lt; \pm 5\%</math> → muito bom;</li> <li>• <math>\pm 5\% \leq PBIAS &lt; \pm 10\%</math> → bom;</li> <li>• <math>\pm 10\% \leq PBIAS &lt; \pm 15\%</math> → satisfatório;</li> <li>• <math>PBIAS \geq \pm 15\%</math> → insatisfatório.</li> </ul>	$PBIAS = \frac{\sum (V_{sim} - V_{obs})}{\sum V_{obs}} \times 100$
RMSE	Erro quadrático médio da raiz entre valores simulados e observados; expressa a magnitude média absoluta do erro. Quanto menor o RMSE, melhor a qualidade do resultado.	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{sim,i} - V_{obs,i})^2}$
CIM	Percentual de coerência estrutural entre séries observadas e simuladas. Varia de 0% a 100%, sendo melhor quanto mais próximo for de 100%.	$CIM = \left( 1 - \frac{\sum  V_{obs} - V_{sim} }{\sum  V_{obs} } \right) \times 100$

Fonte: MORIASI *et al.*, (2007); MORIASI *et al.*, (2015); WILLIAMS e ESTEVES (2017); CARVALHO *et al.* (2024).

#### 4.4 Modelo de geração de ondas (MGO)

O Modelo de Geração de Ondas (MGO) do SisBaHiA® permite simular o clima de ondas com base nas condições eólicas locais, calculando variáveis como altura significativa ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ) e tensões oscilatórias no fundo para cada nó da malha ao longo do

tempo. Para configurar o MGO, o usuário define uma série temporal de ventos (velocidade e direção) e especifica a duração do vento atuante na modelagem — parâmetros que devem ser consistentes com os utilizados no MH, em termos de tempo inicial e final da simulação e resolução temporal.

A geração de ondas locais pela ação eólica fundamenta-se na transferência de momento do ar para a superfície aquática, processo governado primariamente por três variáveis: velocidade do vento, duração do vento e extensão da pista de vento (fetch).

Para representar adequadamente o desenvolvimento da agitação de superfície em Fortaleza–CE, considerou-se uma duração de vento contínuo de 12 horas, valor que reflete o ciclo diário típico da brisa marítima local e garante tempo suficiente para a evolução das ondas até o estado de mar em desenvolvimento. Durante esse período, a altura significativa das ondas cresce com o aumento da pista até alcançar o estado de “mar completamente desenvolvido”, quando a energia fornecida pelo vento é integralmente dissipada pela quebra das cristas (CAMELO, 2008). Esse procedimento assegura que o modelo de geração de ondas do SisBaHiA® reproduza fielmente tanto a fase inicial de crescimento — dependente da duração e extensão da pista — quanto o teto dinâmico de altura, elementos cruciais para simular a interação entre ondas locais e correntes na dispersão de manchas de óleo.

A Figura 23 e a Figura 24 apresentam, respectivamente, as telas de definição de parâmetros do MGO e características do vento. Quando o MGO é executado de forma acoplada ao MH, a série de vento já fornecida ao MH é automaticamente adotada pelo MGO, dispensando a necessidade de inserção manual redundante dos dados dentro do módulo de geração de ondas. Essa integração assegura que os mesmos valores de vento (velocidade, direção e ritmo temporal) orientem simultaneamente o cálculo da tensão de superfície no MH e o processamento do clima de ondas no MGO, garantindo coerência e consistência entre os módulos de modelagem.

Figura 23 - Parâmetros do modelo de geração de ondas acoplados ao modelo hidrodinâmico

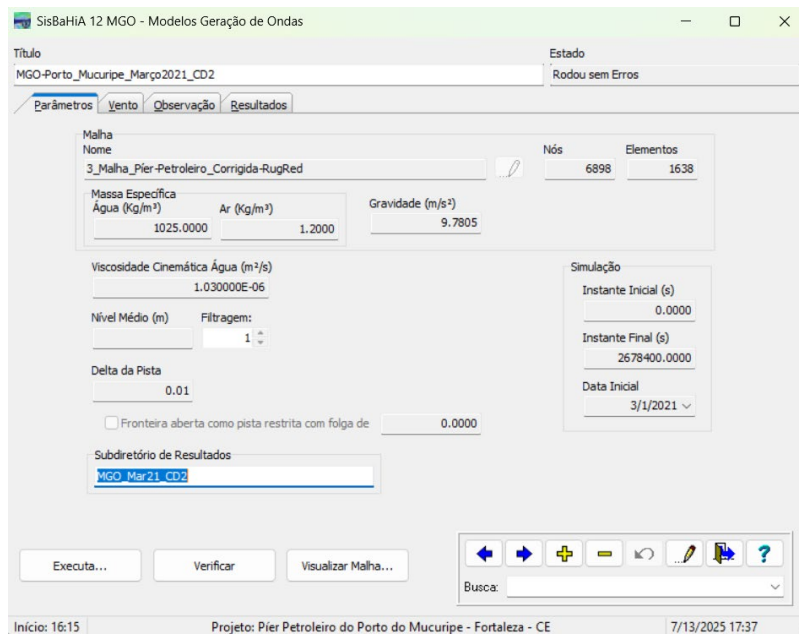
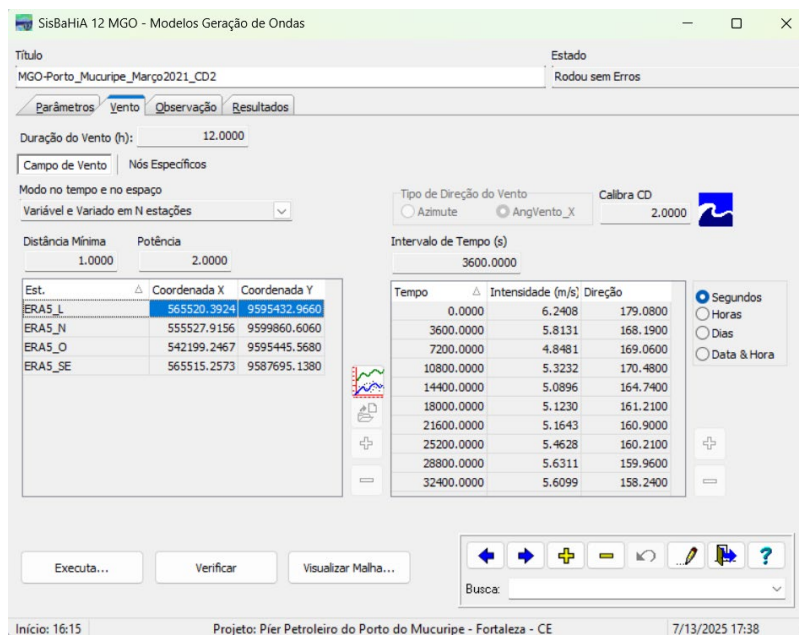


Figura 24 - Dados de vento utilizados no modelo de geração de ondas acoplado ao modelo hidrodinâmico.



#### 4.5 Modelo de transporte lagrangeano (MTL)

Esta seção aborda a implementação do modelo de transporte lagrangeano das partículas do óleo derramado, suas condições de contorno, curva de decaimento do óleo e os cenários de modelagem definidos.

#### 4.5.1 Condições de contorno

No módulo de Transporte Lagrangeano do SisBaHiA®, as condições de contorno são fundamentais para representar o destino das partículas que simulam parcelas de óleo derramado. Quando uma partícula cruza a fronteira aberta do domínio de modelagem, ela é automaticamente removida da simulação, sendo considerada “perdida” para o sistema. Por essa razão, recomenda-se posicionar as fontes de emissão suficientemente afastadas dessas bordas, de modo a evitar saídas prematuras de partículas que possam enviesar os resultados e comprometer a validade dos cenários estudados (GURGEL, 2016).











Já na interface litoral (contorno terrestre), cada partícula que atinge a costa retorna ao meio aquático, mas pode sofrer uma perda parcial de massa em função da interação com o substrato. Essa retenção é controlada por um coeficiente de absorção (CA), definido para cada nó da malha costeira, variando de 0 (sem retenção) a 1 (retenção total). No presente estudo, os valores de CA foram atribuídos com base nos Índices de Sensibilidade do Litoral (ISL), conforme o Atlas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo das Bacias Marítimas do Ceará e Potiguar (BRASIL, 2004):

- ISL 1 (costões rochosos e estruturas artificiais lisas) → CA = 0,05;
- ISL 3 (praias de areia média) → CA = 0,30;
- ISL 6 (substratos de elevada permeabilidade) → CA = 0,40;
- ISL 9 (áreas vegetadas) → CA = 0,50; e
- ISL 10 (mangues) → CA = 0,60.

Embora esses coeficientes sejam estimados empiricamente, eles permitem discriminar qualitativamente diferentes trechos de costa quanto à capacidade de retenção de óleo. Para simulações que demandem maior acurácia quantitativa, recomenda-se calibrar esses parâmetros por meio de estudos de campo e experimentos de laboratório direcionados a cada tipo de sedimentação costeira (ROSMAN, 2025).

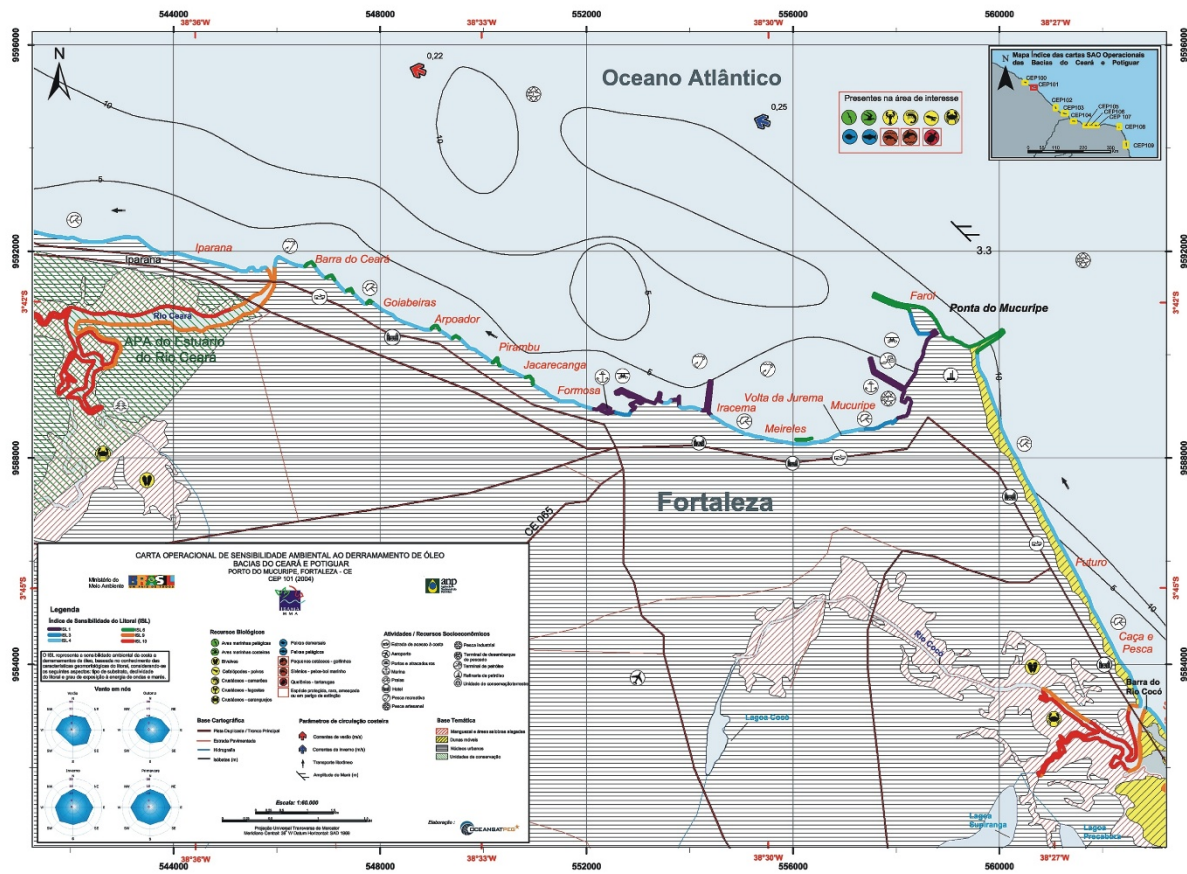
A Tabela 10 apresenta a relação dos tipos de costa com os respectivos ISL, enquanto a Figura 25 exhibe a carta de sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo na região do Porto do Mucuripe, Fortaleza-CE.

Tabela 11 - Relação dos tipos de costa com os respectivos índices de sensibilidade do litoral.

COR	ÍNDICE	CÓDIGO			TIPOS DE COSTA
		R	G	B	
	ISL 1	119	38	105	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costões rochosos lisos, de alta declividade, expostos</li> <li>- Falésias em rochas sedimentares, expostas</li> <li>- Estruturas artificiais lisas (paredões marítimos artificiais), expostas</li> </ul>
	ISL 2	174	153	191	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Costões rochosos lisos, de declividade média a baixa, expostos</li> <li>- Terraços ou substratos de declividade média, expostos (terraço ou plataforma de abrasão, terraço arenítico exumado bem consolidado, etc.)</li> </ul>
	ISL 3	0	151	212	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Praias dissipativas de areia média a fina, expostas</li> <li>- Faixas arenosas contíguas à praia, não vegetadas, sujeitas à ação de ressacas (restingas isoladas ou múltiplas, feixes alongados de restingas tipo "long beach")</li> <li>- Escarpas e taludes íngremes (formações do grupo Barreiras e Tabuleiros Litorâneos), expostos</li> <li>- Campos de dunas expostas</li> </ul>
	ISL 4	146	209	241	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Praias de areia grossa</li> <li>- Praias intermediárias de areia fina a média, expostas</li> <li>- Praias de areia fina a média, abrigadas</li> </ul>
	ISL 5	152	206	201	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Praias mistas de areia e cascalho, ou conchas e fragmentos de corais</li> <li>- Terraço ou plataforma de abrasão de superfície irregular ou recoberta de vegetação</li> <li>- Recifes areníticos em franja</li> </ul>
	ISL 6	0	149	32	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Praias de cascalho (seixos e calhaus)</li> <li>- Costa de detritos calcários</li> <li>- Depósito de tálus</li> <li>- Enrocamentos ("rip-rap", guia corrente, quebra-mar) expostos</li> <li>- Plataforma ou terraço exumado recoberto por concreções lateríticas (disformes e porosas)</li> </ul>
	ISL 7	214	186	0	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Planície de maré arenosa exposta</li> <li>- Terraço de baixa-mar</li> </ul>
	ISL 8	225	232	0	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Escarpa / encosta de rocha lisa, abrigada</li> <li>- Escarpa / encosta de rocha não lisa, abrigada</li> <li>- Escarpas e taludes íngremes de areia, abrigados</li> <li>- Enrocamentos ("rip-rap" e outras estruturas artificiais não lisas) abrigados</li> </ul>
	ISL 9	248	163	0	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Planície de maré arenosa / lamosa abrigada e outras áreas úmidas costeiras não vegetadas</li> <li>- Terraço de baixa-mar lamoso abrigado</li> <li>- Recifes areníticos servindo de suporte para colônias de corais</li> </ul>
	ISL 10	214	0	24	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deltas e barras de rio vegetadas</li> <li>- Terraços alagadiços, banhados, brejos, margens de rios e lagoas</li> <li>- Brejo salobro ou de água salgada, com vegetação adaptada ao meio salobro ou salgado; apicum</li> <li>- Marismas</li> <li>- Manguezal (mangues frontais e mangues de estuários)</li> </ul>

Fonte: Brasil (2004)

Figura 25 - Carta operacional de sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo - Bacias do Ceará e Potiguar (Porto do Mucuripe, Fortaleza-CE).



Fonte: Brasil (2004)

#### 4.5.2 Curva de decaimento do óleo

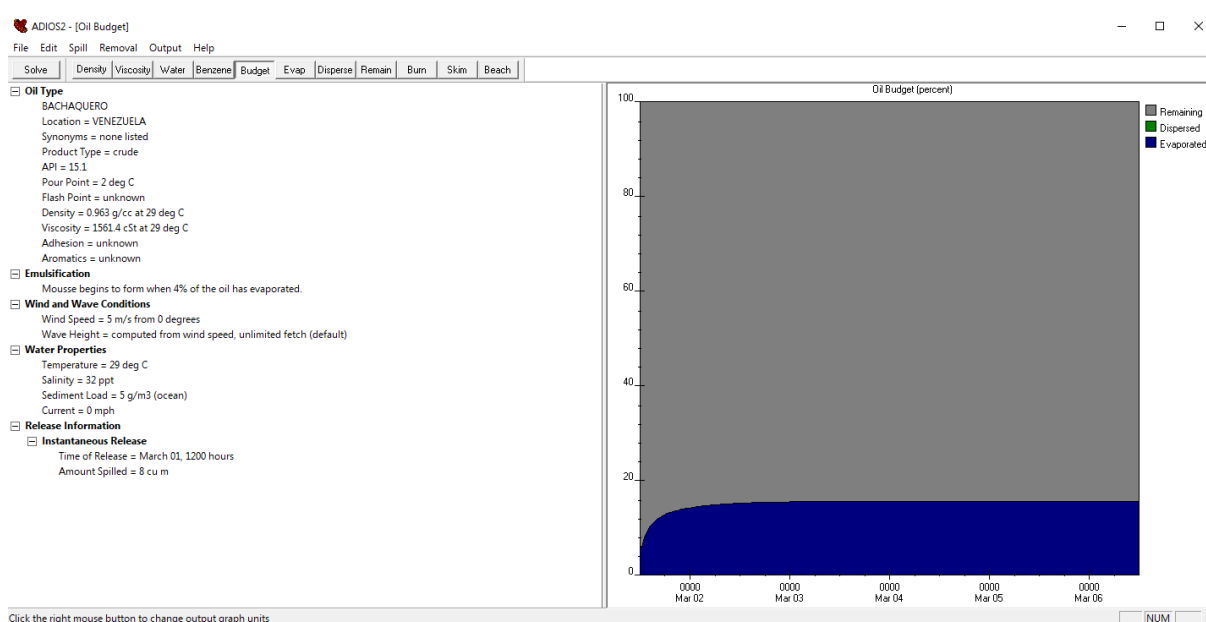
As manchas de óleo, ao serem transportadas, sofrem redução gradual de massa em decorrência dos processos de intemperismo descritos na Seção 3.3. Neste estudo, a evolução temporal dessa massa foi modelada por meio de curvas de decaimento que consideram os principais mecanismos de perda: evaporação, dispersão de gotículas e, em menor proporção, emulsificação. Tais transformações foram simuladas pelo ADIOS2 (*Automated Data Inquiry for Oil Spills*), modelo de intemperismo desenvolvido pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), o qual dispõe de uma extensa biblioteca com mais de 1000 tipos de óleos brutos e derivados e faz estimativas de seu comportamento em ambiente marinho. Reconhecido internacionalmente por sua robustez, esse modelo é amplamente empregado em estudos de derrames de óleo para fornecer previsões confiáveis de variação mássica (NOAA, 2018).

Conforme informações da Petrobras (2025), a Lubnor (Refinaria de Lubrificantes e

Derivados do Nordeste), com sede no Porto do Mucuripe em Fortaleza-CE, processa exclusivamente petróleo ultra-pesado, sendo 85% proveniente do Espírito Santo e 15% do Ceará. Desse modo, optou-se por escolher um tipo de óleo pesado para os cenários de simulação.

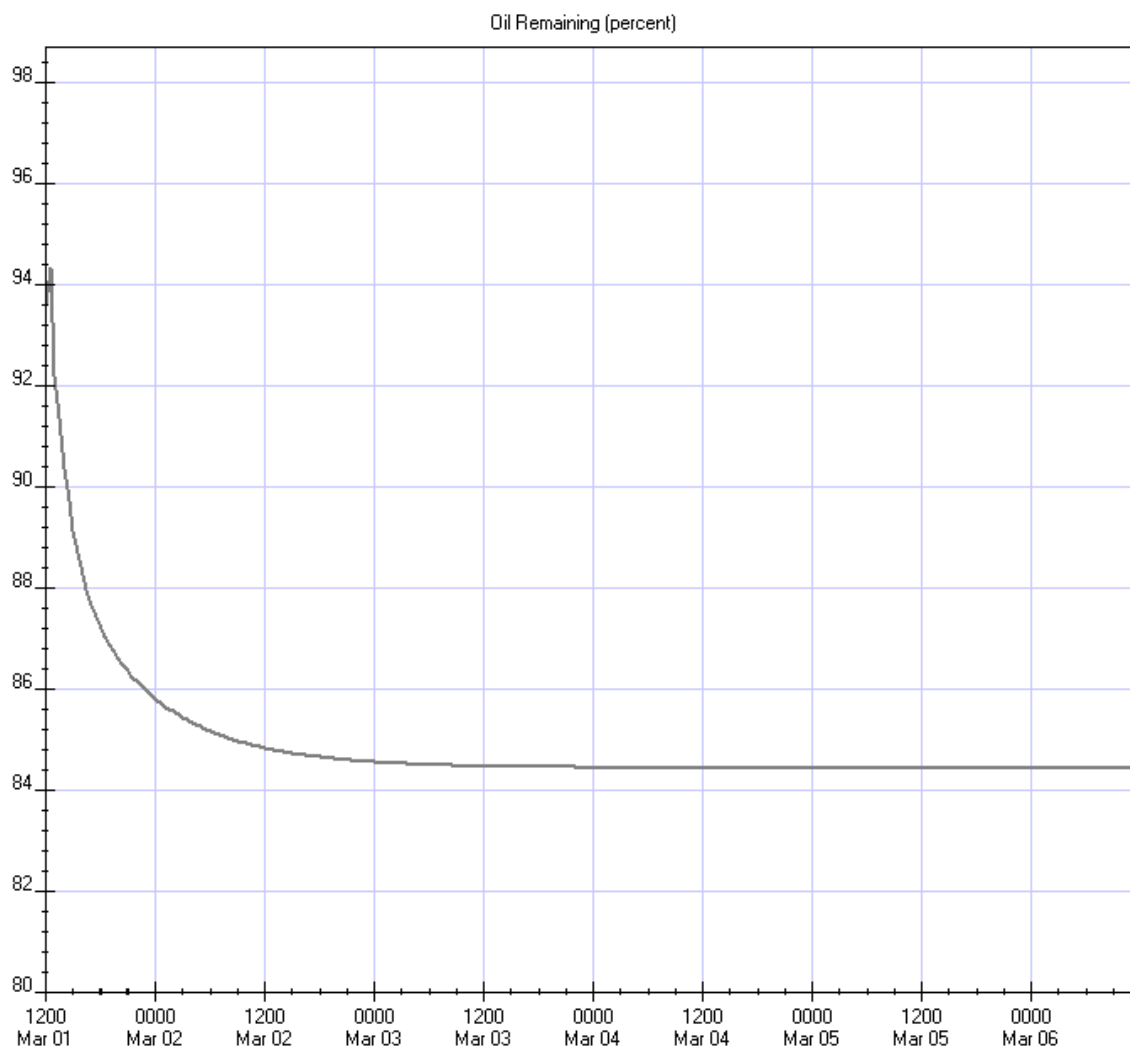
A Figura 26 apresenta o gráfico de evolução temporal da perda de massa de óleo gerado pelo módulo ADIOS2. Nesse modelo, os processos de intemperismo são parametrizados em função do tipo de óleo, da intensidade do vento, das temperaturas do ar e da água e da velocidade média das correntes. Para esta simulação, selecionou-se na biblioteca do ADIOS2 o petróleo Bachaquero (API 15,1), cujas propriedades físico-químicas influenciam diretamente a forma e a taxa de decaimento da mancha ao longo do tempo.

Figura 26 – Gráfico de perda de massa do óleo no software ADIOS2. Em azul, apresenta-se o percentual de massa evaporada; em verde, tem-se o percentual dispersado; e, em cinza, observa-se o percentual de massa remanescente.



A curva de decaimento de massa do óleo, obtida a partir do ADIOS2 e apresentada na Figura 27, pode ser diretamente incorporada ao MTL do SisBaHiA<sup>®</sup>. Ao inserir esse perfil de perda de massa no MTL, o modelo passa a representar de forma integrada os processos de transporte advectivo-difusivo e os mecanismos de intemperismo, assegurando que cada partícula virtual reduza sua massa conforme as condições físico-químicas e ambientais simuladas.

Figura 27 – Curva de decaimento do óleo, obtida do programa ADIOS2, indicando que o volume remanescente após 5 dias é de aproximadamente 85%.



Para determinar a área inicial da mancha, utilizou-se a teoria de Fay (1971), empregando a Equação 3 para calcular essa área em função dos diferentes volumes definidos para os cenários simulados.

#### 4.5.3 Hipóteses de acidentes

Para aprofundar a compreensão dos fatores que influenciam a dispersão de óleo no ambiente costeiro estudado, foram elaborados cenários de simulação que combinam variações no regime eólico com diferentes modalidades de vazamento. De um lado, consideram-se ventos fracos, típicos de março, e ventos fortes, característicos de outubro, cujas intensidades contrastantes afetam diretamente a advecção e a persistência das plumas na zona de derrame.

Foram então estabelecidos, para cada regime sazonal (março e outubro), três

categorias de vazamento em conformidade com o estabelecido na Resolução CONAMA 398/2008:

A capacidade de resposta da instalação deverá ser assegurada por meio de recursos próprios ou de terceiros provenientes de acordos previamente firmados, obedecidos os critérios de descargas pequenas (8 m<sup>3</sup>) e médias (até 200 m<sup>3</sup>) e de pior caso definidos a seguir. O Plano de Emergência Individual pode assumir, com base nesses critérios, estruturas e estratégias específicas para cada situação de descarga, conforme os cenários acidentais estabelecidos e seus requerimentos (BRASIL, 2008, p. 727).

O vazamento crítico, definido da supracitada resolução como pior caso, é usualmente determinado a partir de estudos de consultoria especializada, que avaliam detalhadamente a infraestrutura e os procedimentos operacionais no ambiente portuário. Como o presente trabalho não possui o objetivo específico de determinar esse cenário com precisão, fez-se uma estimativa com base em trabalhos semelhantes e critérios hipotéticos.

Desse modo, para os meses de março e outubro, foram concebidos três cenários de vazamento representativos dessas faixas de volume, permitindo a análise comparativa do comportamento das plumas sob distintas intensidades de vento e distintos regimes de liberação de óleo. Os cenários definidos foram:

- Derrame instantâneo pequeno (8 m<sup>3</sup>, com duração de 20 minutos);
- Derrame instantâneo médio (200 m<sup>3</sup>, com duração de 20 minutos);
- Derrame contínuo crítico (1000 m<sup>3</sup>, com duração de 1 dia).

Os derrames instantâneos de pequeno (8 m<sup>3</sup>) e médio porte (200 m<sup>3</sup>) foram concebidos para reproduzir situações operacionais pontuais — como falhas em válvulas ou conexões durante transferências e rupturas parciais de dutos — considerando um intervalo de 20 minutos entre a detecção do vazamento e o acionamento do sistema de contenção. O cenário crítico, com volume estimado em 1000 m<sup>3</sup>, emula eventos de maior severidade que exigem estratégias de contenção mais complexas, como aqueles decorrentes de colisões, explosões ou naufrágios de petroleiros. Todos os cenários são hipotéticos e baseiam-se em estudos semelhantes (GURGEL, 2016; GÓIS, 2008).

#### ***4.5.4 Análise estatística***

Para incorporar a variabilidade temporal e ambiental inerente a eventos de derrame de óleo, empregou-se uma abordagem de simulação Monte Carlo em cada um dos cenários definidos. Para isso, foram geradas 100 liberações hipotéticas de óleo por cenário, cada uma iniciada em instantes aleatórios distribuídos ao longo da janela temporal de simulação. Essa

técnica possibilita capturar a incerteza associada ao momento exato do vazamento e às condições hidrodinâmicas variáveis, conferindo robustez estatística às previsões, conforme os estudos realizados por Amir-Heidari *et al.* (2019).

Cada derrame hipotético seguiu a mesma configuração: foi associado o tipo de óleo selecionado (com suas propriedades físico-químicas) e sua curva de decaimento de massa derivada do ADIOS2, de modo que o módulo de Transporte Lagrangeano do SisBaHiA<sup>®</sup> aplicou simultaneamente os processos de advecção, difusão e intemperismo em cada partícula. A ordem de execução consistiu em: (1) sorteio do tempo de início de cada fonte poluidora, feito a partir de uma planilha eletrônica, posteriormente agregada ao modelo; (2) lançamento das partículas na fonte definida; (3) acompanhamento da trajetória e da perda de massa, de acordo com as condições de vento, correntes e temperatura; e (4) registro dos principais indicadores — tempo de chegada à costa, extensão da mancha e balanço de massa evaporada, dispersa e encalhada. Cada fonte poluidora é simulada como um evento individual.

Ao final de cada conjunto de 100 simulações, os resultados foram agregados para produzir distribuições probabilísticas dos parâmetros de interesse. Por meio de estatísticas descritivas e mapas de probabilidade de contaminação, tornou-se possível determinar, por exemplo, as faixas temporais de maior risco de chegada do óleo e identificar áreas costeiras com maior probabilidade de contato com a mancha. Essa implementação estocástica transforma as incertezas inerentes em informações quantificáveis, apoiando a análise de risco e o planejamento de respostas emergenciais na gestão portuária e ambiental (LIUBARTSEVA *et al.*, 2021; LIUBARTSEVA *et al.*, 2023).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, apresentam-se os resultados advindos das simulações realizadas no SisBaHiA<sup>®</sup>. Organizado de forma a refletir o fluxo do processo de modelagem, o capítulo inicia com a Seção 5.1, dedicada à calibração do modelo, na qual as saídas numéricas são confrontadas com dados observados em campo. Na Seção 5.2, procede-se à caracterização dos regimes de circulação hidrodinâmica na área de estudo, destacando seus padrões espaço-temporais. Finalmente, a Seção 5.3 examina o comportamento e o transporte das plumas de óleo em cada cenário proposto, avaliando métricas de dispersão, tempo de chegada e balanço de massa. Juntos, esses resultados não apenas aprofundam a compreensão dos processos de poluição costeira por derrames de óleo, mas também oferecem subsídios técnicos para o refinamento de planos de contingência e o desenvolvimento de estratégias operacionais de resposta.

### 5.1 Calibração

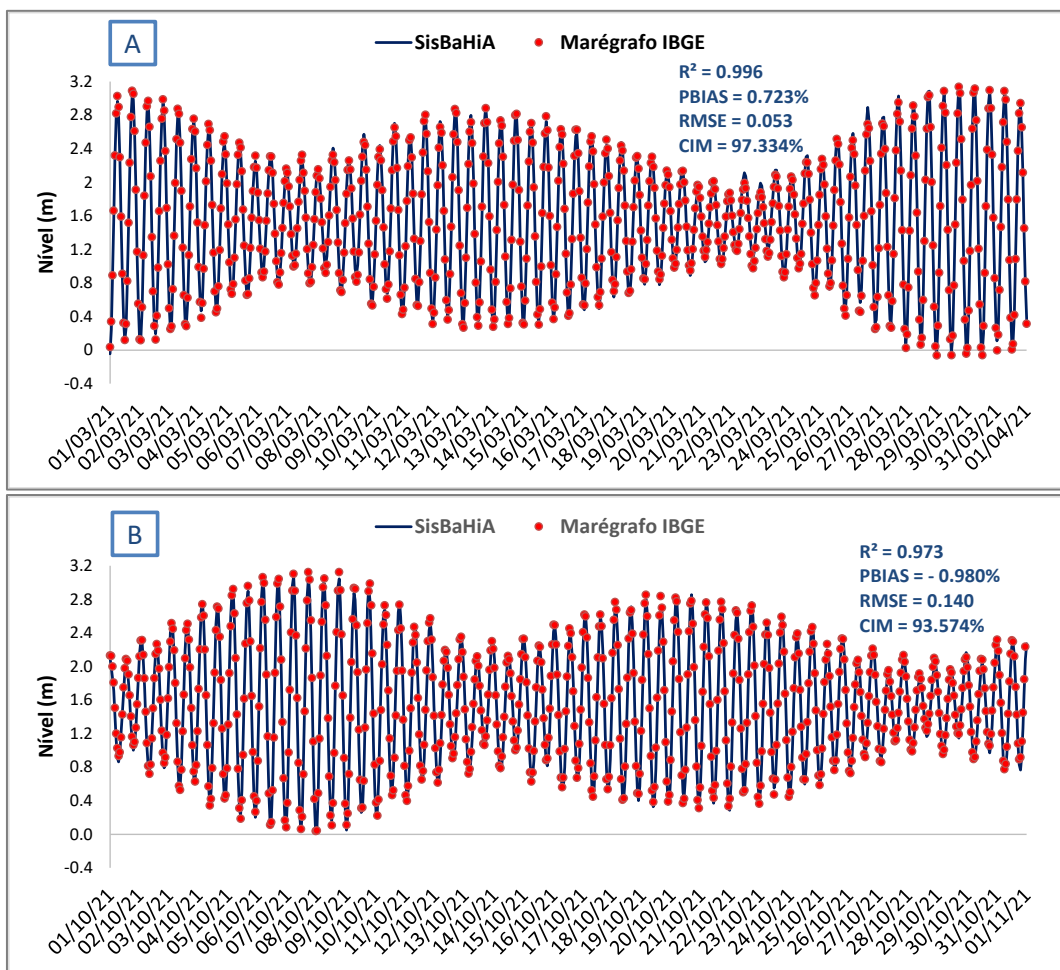
Nas séries temporais apresentadas na Figura 28, os resultados das simulações das elevações de superfície livre são comparados com os dados medidos pela estação maregráfica do IBGE nos meses de março (Figura 28A) e outubro (Figura 28B) de 2021.

Os resultados de março de 2021 revelam um desempenho excepcional do modelo hidrodinâmico, tanto na comparação visual das séries quanto nos indicadores estatísticos. Com  $R^2$  de 0,996, o coeficiente de determinação evidencia correspondência quase perfeita entre os valores simulados e os registros maregráficos do IBGE, superando amplamente o limiar de excelência ( $R^2 > 0,9$ ) recomendado para calibração em ambientes costeiros e estuarinos (DURAP, 2025). O PBIAS de +0,723 % aponta leve superestimação, mas dentro da faixa de até  $\pm 5$  %, considerada como excelente por MORIASI *et al.* (2015) e corroborada por Nkhonjera, Dinka e Woyessa (2021) e Abdulahi, Husen e Muleta (2024), o que indica ausência de viés sistemático relevante. Em termos de erro absoluto, o RMSE = 0,053 m reforça a acurácia do modelo, visto que valores inferiores a 0,1 m são considerados excelentes em simulações de maré costeira (WILLIAMS e ESTEVES, 2017). Complementarmente, o Índice de Coerência entre Valores Medidos e Calculados (CIM = 97,334 %) confirma que mais de 97 % da forma temporal e dos picos observados foram reproduzidos, um patamar acima dos 90 % definidos como coerência excepcional em modelagens costeiras (CARVALHO *et al.*, 2024).

Embora o mês de outubro apresente acurácia ligeiramente inferior, os resultados mantêm-se excelentes. O  $R^2$  de 0,973 indica boa representação da variabilidade temporal,

enquanto o PBIAS de  $-0,980\%$  sugere discreta subestimação — ainda considerada desprezível segundo os mesmos parâmetros de referência. O RMSE =  $0,140\text{ m}$ , porém, revela erro absoluto maior do que em março; essa diferença pode ser atribuída à intensificação dos ventos no período, responsável pelo fenômeno *wind setup*, que resulta na elevação adicional do nível da água não explicada pela maré astronômica (CAMPOS-CABA *et al.*, 2024). Mesmo assim, o CIM de  $93,574\%$  atesta boa coerência estrutural entre as séries simuladas e observadas, corroborando a robustez do modelo mesmo sob condições meteorológicas mais severas.

Figura 28 - Séries temporais de elevação da superfície livre para os meses de março (A) e outubro (B) de 2021.



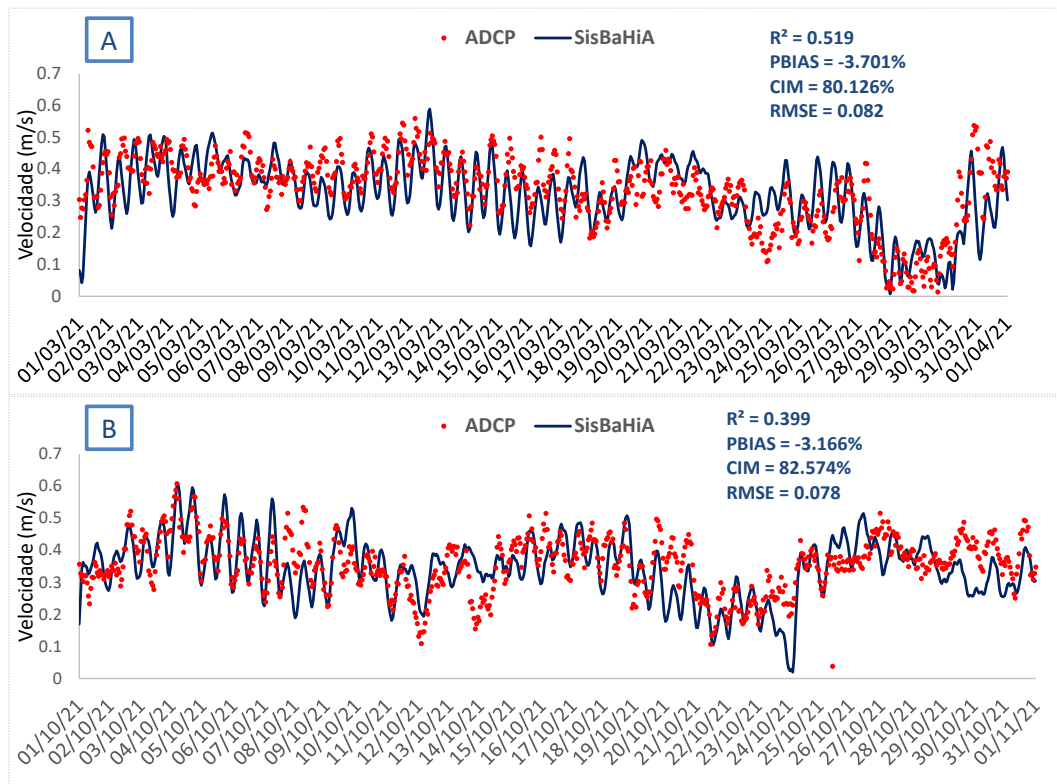
Nas séries temporais de intensidade de correntes, calibradas a partir de dados observacionais obtidos por meio de um ADCP, os resultados referentes aos meses de março e outubro evidenciam distintos níveis de desempenho do modelo hidrodinâmico, conforme ilustrado na Figura 29. Durante o processamento dos dados do ADCP, os perfis de velocidade foram inicialmente discretizados em 50 níveis verticais, com espaçamento uniforme de  $0,4\text{ m}$ . Contudo, a base de dados apresentou inconsistências em alguns níveis, especialmente em

relação aos níveis máximos da maré local. Em razão disso, procedeu-se à filtragem dos dados, que consistiu na exclusão dos sete primeiros níveis a partir da superfície e dos quatro níveis mais próximos ao fundo da coluna d'água, resultando em um total de 39 níveis considerados válidos. A partir desses níveis, calculou-se a velocidade média vertical, utilizada posteriormente na comparação com as velocidades verticalmente promediadas fornecidas pelo modelo hidrodinâmico. Essa etapa de filtragem teve como objetivo adicional minimizar as interferências tipicamente associadas às medições por ADCP em regiões próximas à superfície e ao fundo da coluna d'água, onde efeitos como ruído instrumental e reflexões do feixe acústico tendem a comprometer a qualidade dos dados.

Em março de 2021 (Figura 29A), o coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,519$ ) revela que apenas cerca de 52 % da variabilidade observada foi capturada pelo modelo. O viés percentual médio (PBIAS =  $-3,701$  %) sinaliza leve subestimação, ainda dentro de parâmetros excelentes (MORIASI *et al.*, 2015). O RMSE de 0,082 m/s representa erro absoluto moderado e condizente com modelos de corrente de precisão satisfatória, enquanto o Índice de Coerência (CIM = 80,126 %) aponta que aproximadamente 80 % da forma temporal da série foi reproduzida, caracterizando relativa boa coerência estrutural.

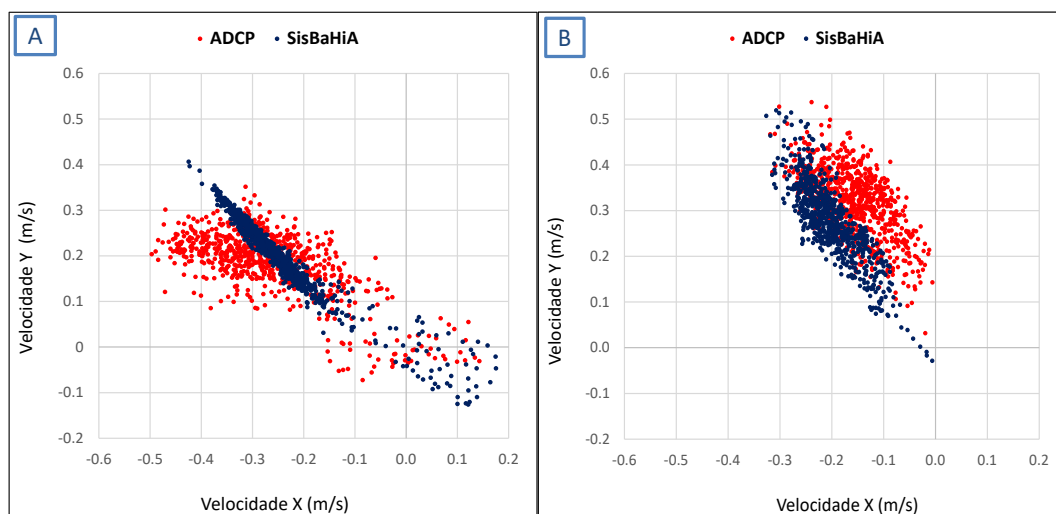
A série de outubro de 2021 (Figura 29B) apresentou menor capacidade explicativa semelhante à do mês de março de 2021. O coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,399$ ) indica que apenas cerca de 40 % da variabilidade observada foi modelada. O PBIAS de  $-3,166$  % demonstra subestimação levemente menor que em março, mantendo-se dentro da faixa considerada boa (MORIASI *et al.*, 2015). O RMSE de 0,078 m/s manteve-se praticamente estável quando comparado ao mês de março, sugerindo consistência na magnitude média do erro. O CIM de 82,574 % reflete ligeira melhoria na coerência estrutural, apesar da leve piora da correlação linear.

Figura 29 - Séries temporais de intensidade corrente média para os meses de março (A) e outubro (B) de 2021.



Complementando a análise estatística das séries temporais, a Figura 30 apresenta os diagramas de dispersão (elipses de corrente) que comparam espacialmente as componentes vetoriais de velocidade (X, Y) simuladas versus observadas pelo ADCP nos meses de março (Figura 30A) e outubro (Figura 30B) de 2021. Ambos os modelos apresentam boa concordância direcional entre as correntes simuladas e observadas. Em ambos os casos, nota-se que o espalhamento dos pontos calculados pelo modelo tende a ser menor do que os pontos registrados pelo ADCP, evidenciando uma subestimação pelo modelo da variabilidade intrínseca das correntes costeiras e gerando uma representação mais suavizada da dinâmica local.

Figura 30 – Elipses de corrente (dispersão) dos meses de março (A) e outubro (B) de 2021.



Embora os indicadores estatísticos mostrem limitações na exatidão das velocidades simuladas, a análise visual das séries temporais (Figura 29) evidencia uma notável coerência entre o modelo hidrodinâmico e os registros do ADCP. Essa sintonia nos padrões de variação revela que o modelo reproduz com coerência a dinâmica essencial do sistema costeiro, preservando sua estrutura cinemática mesmo sob diferentes regimes hidrodinâmicos. Esse comportamento concorda com as modelagens hidrodinâmicas realizadas por Pereira *et al.* (2024) na mesma área, corroborando a robustez do SisBaHiA<sup>®</sup> na representação dos processos físicos dominantes. As divergências pontuais nas métricas quantitativas parecem decorrer sobretudo da atenuação das microvariabilidades turbulentas, inerente à discretização numérica, e não de deficiências conceituais na formulação física.

## 5.2 Caracterização dos regimes de circulação hidrodinâmica

De forma geral, as correntes litorâneas ao largo da costa de Fortaleza apresentam direção predominante para oeste. No entanto, esse padrão se torna mais complexo nas proximidades da costa, especialmente nas praias situadas junto a estruturas artificiais como molhes e espigões. Em especial, as correntes na região do Porto do Mucuripe sofrem grande intervenção do molhe do Titan, estrutura responsável pela proteção da enseada interna do porto contra ondas e correntes. Segundo Pereira e Rosman (2009), a circulação hidrodinâmica na região é caracterizada por padrões predominantemente barotrópicos, resultado da atuação de fortes correntes de maré, de um regime de ventos persistente e da baixa estratificação da coluna d'água. Nessa condição, os diferenciais horizontais de pressão gerados pelos declives da

superfície livre exercem influência muito maior do que os efeitos associados aos gradientes de densidade.

A Figura 31 apresenta a distribuição espacial das correntes subsuperficiais (15 cm abaixo da superfície livre) durante o mês de março de 2021, caracterizando sua variabilidade nas diferentes fases da maré de sizígia. Nas áreas adjacentes ao píer petroleiro, as velocidades oscilaram entre 0,13 m/s e 0,20 m/s, aproximadamente.

Em contraste, a Figura 32 demonstra a dinâmica de outubro sob as mesmas fases de maré e profundidade. Neste período, registrou-se intensificação significativa das correntes, com magnitudes entre 0,28 m/s e 0,31 m/s nas adjacências da zona portuária, um aumento significativo em relação a março. Esta amplificação pode ser atribuída, principalmente, aos ventos sazonais mais intensos, que potencializam o transporte de massa na coluna d'água superficial.

Figura 31 – Caracterização de circulação hidrodinâmica para as fases de baixamar (A), meia-maré enchente (B), preamar (C) e meia-maré vazante (D) de sizígia no mês de março de 2021 (correntes subsuperficiais – 15 cm abaixo da superfície livre).

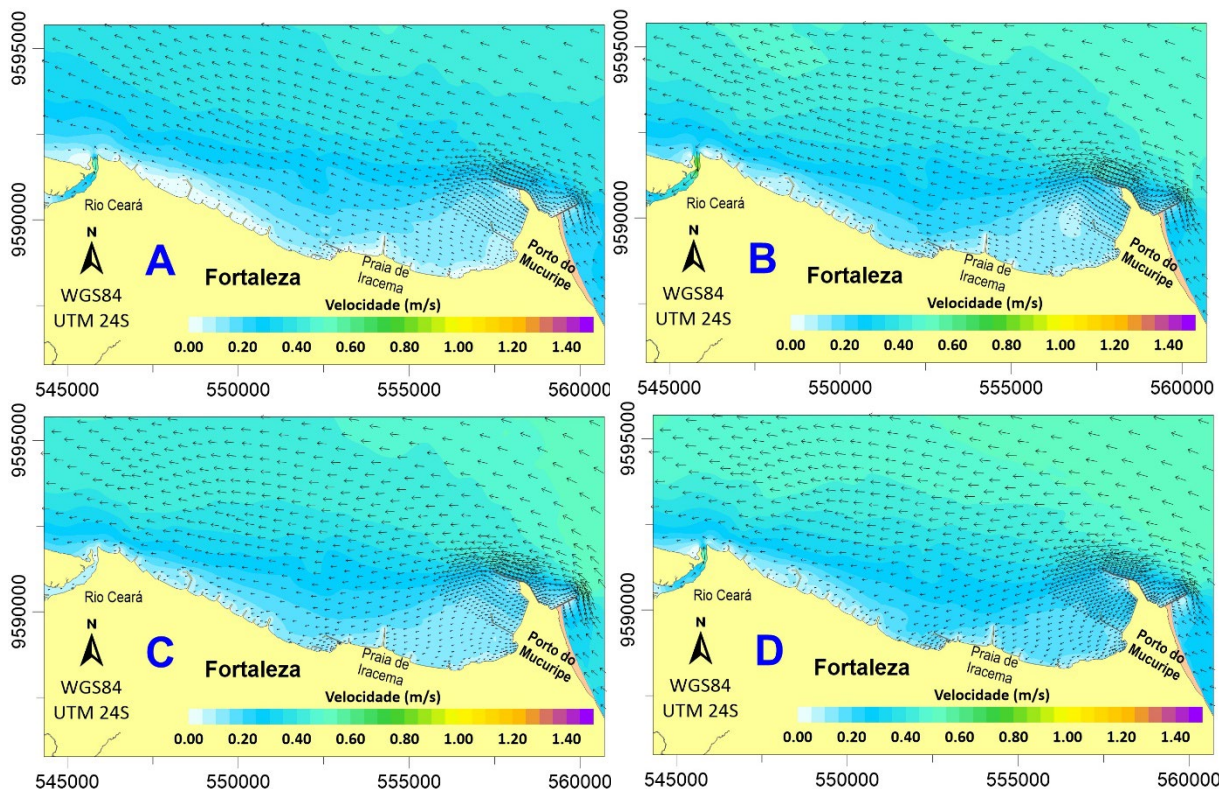
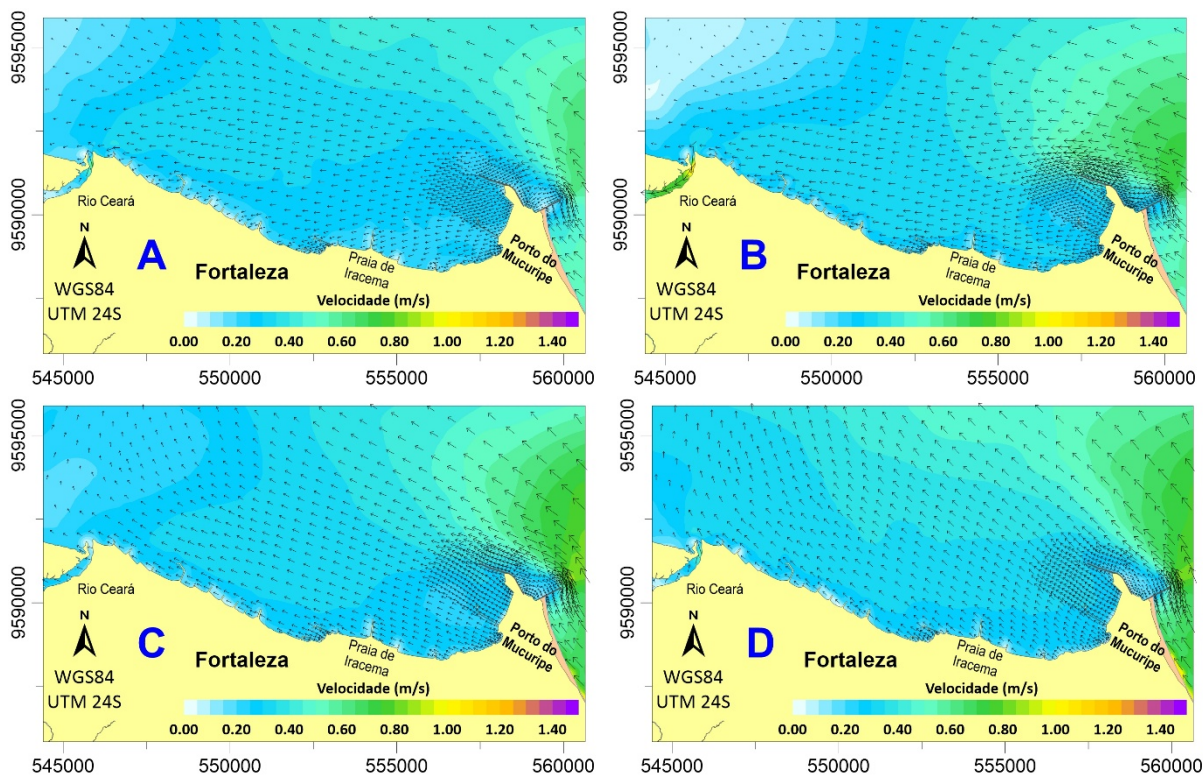


Figura 32 – Caracterização de circulação hidrodinâmica para as fases de baixamar (A), meia-maré enchente (B), preamar (C) e meia-maré vazante (D) de sizígia no mês de outubro de 2021 (correntes subsuperficiais – 15 cm abaixo da superfície livre).



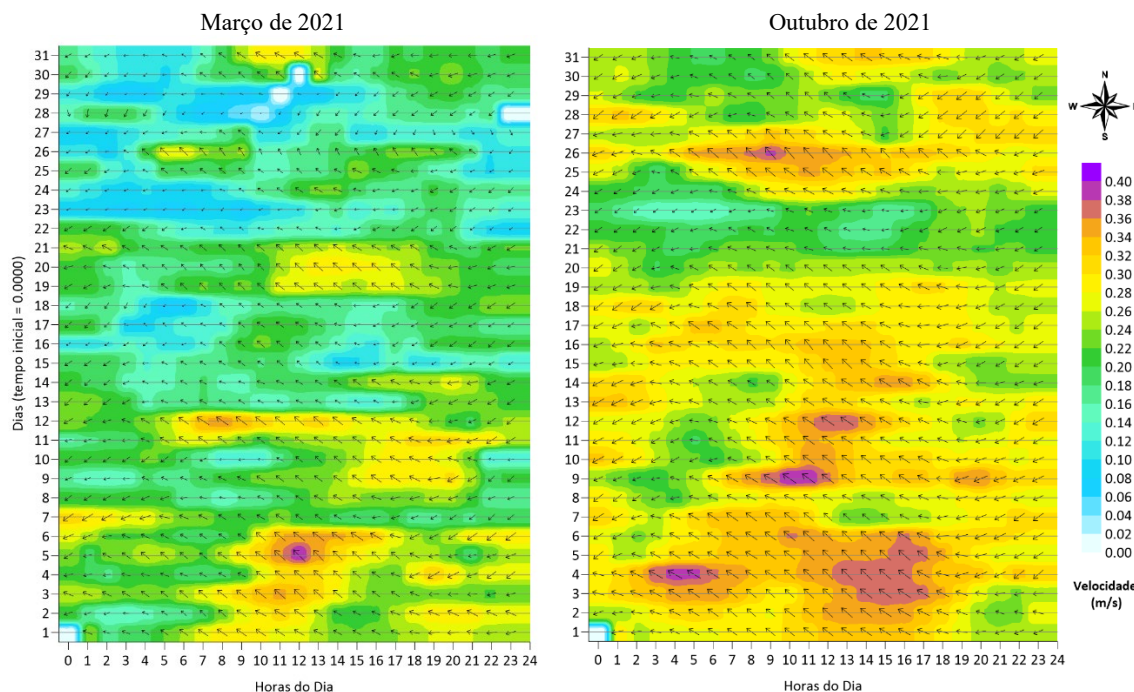
A Figura 33 apresenta, com maior resolução temporal, a evolução vetorial das correntes na área adjacente ao píer petrolífero do Porto do Mucuripe nos meses de março e outubro de 2021. Observa-se uma predominância contínua da direção noroeste ao longo da maior parte do intervalo analisado, intercalada por breves períodos de inversão para sudoeste, direcionados à costa.

Essa alternância de fluxo pode gerar distintos cenários de dispersão de óleo. Correntes rumo a sudoeste favorecem a aproximação acelerada da mancha à linha de costa, com potencial atingimento imediato das praias situadas nas imediações do porto, principalmente no mês de outubro, quando as correntes possuem maior intensidade. Em contraste, correntes rumo a noroeste conduzem a pluma afastando-a da bacia portuária, deslocando-a para oeste e ampliando a faixa costeira vulnerável durante os episódios de reversão do fluxo.

Em termos de modelagem de derrames, essa variabilidade direcional implica um aumento na complexidade dos cenários de poluição, pois combinações temporais de correntes podem estender significativamente o alcance horizontal da mancha de óleo. Portanto, a caracterização da frequência e duração dos eventos de inversão é fundamental para a definição

de áreas de maior risco e elaboração de planos de contingência costeira.

Figura 33 - Mapa da evolução vetorial das correntes nas proximidades do píer petroleiro do Porto do Mucuripe nos meses de março e outubro de 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados obtidos conseguem reproduzir de modo bastante satisfatório o comportamento hidrodinâmico da região, apresentando excelente concordância com as recirculações costeiras e variabilidade física descritas por Silva *et al.* (2017), que empregaram o modelo SisBaHiA<sup>®</sup> forçado por marés, vento e ondas para caracterizar o escoamento ao longo das praias de Fortaleza. Essa configuração vetorial também encontra ressonância no padrão de escoamento modelado por estudos sobre plumas de efluentes de emissários submarinos (PEREIRA e ROSMAN, 2009), contaminação bacteriana costeira oriunda da combinação entre as contribuições fluviais, das galerias de drenagem urbana e do emissário submarino (PEREIRA *et al.*, 2015) e análise hidrodinâmica aplicada à modelagem da diluição de solução hipersalina de plantas de dessalinização (PEREIRA *et al.*, 2021; PEREIRA *et al.*, 2024), todos realizados na região costeira de Fortaleza.

Apesar das magnitudes de corrente diferirem quantitativamente daquelas encontradas nos supracitados trabalhos, em função das condições sazonais, o comportamento qualitativo da circulação permanece análogo esses referenciais, reforçando a confiabilidade dos resultados obtidos.

### 5.3 Transporte da mancha de óleo

Os resultados dos cenários de transporte da mancha contaminante são apresentados a seguir sob duas abordagens complementares: probabilística e determinística. Na seção 5.3.1, realiza-se a análise probabilística com base nos modelos de Monte Carlo descritos na seção 4.5.4, ilustrando-se os achados por meio de mapas de probabilidade de ocorrência da mancha de óleo ao longo do domínio de estudo. Já na seção 5.3.2, são exibidos os mapas de evolução temporal do transporte da mancha para os derrames mais críticos de cada cenário, definidos em função da maior extensão de costa atingida pelo óleo.

#### 5.3.1 Análise probabilística

As Figuras 34 à 45 apresentam mapas de probabilidade de trânsito da mancha de óleo no domínio de modelagem, construídos a partir de isolinhas que representam a frequência de ocorrência da passagem do óleo em cada célula da malha numérica ao longo do tempo simulado. Para isso, foram avaliados instantes de 3 h, 6 h, 12 h e 24 h após o evento de derrame. Essa abordagem probabilística é particularmente valiosa para identificar as zonas com maior suscetibilidade ao contato com a mancha, bem como para estimar os tempos de atuação necessários às operações de contingência, de modo a maximizar sua eficácia.

A Figura 34 e a Figura 35 ilustram o cenário de derrame pequeno ( $8 \text{ m}^3$ ) em março, enquanto a Figura 36 e a Figura 37 referem-se a um evento de idêntica magnitude em outubro. Constatou-se comportamento qualitativamente semelhante entre os meses, porém outubro exhibe maior probabilidade de toque no litoral ( $\approx 20\%$ ) após 3 h do acidente, ao passo que em março essa probabilidade é praticamente nula no mesmo intervalo de tempo. Nos intervalos de 6 h e 12 h, o transporte em março evidencia maior dispersão direcional provável, enquanto em outubro as trajetórias tendem a se concentrar nas direções dominantes das correntes costeiras (noroeste e sudoeste). Tal padrão corrobora os mapas vetoriais de circulação (Figura 33), uma vez que as correntes mais intensas de outubro promovem deslocamento mais rápido e linear da mancha, ao contrário das menores velocidades simuladas para março, que favorecem maior detenção e recirculação do óleo em porções localizadas do domínio.

Após 24 h do derrame, ambos os cenários apresentam elevado potencial de contaminação em uma extensa porção do litoral, com probabilidades de contato variando entre 10% e 20%, aproximadamente, ao longo da linha de costa. É possível inferir que, durante o predomínio de correntes direcionadas para noroeste, a mancha se move paralelamente à costa,

sendo subsequentemente empurrada em direção à praia quando ocorre inversão do sentido das correntes para sudoeste, conforme evidenciado pela dinâmica vetorial apresentada na Figura 33.

Figura 34 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 3 h e 6 h após um derrame instantâneo (20 minutos) de 8 m<sup>3</sup> no mês de março.

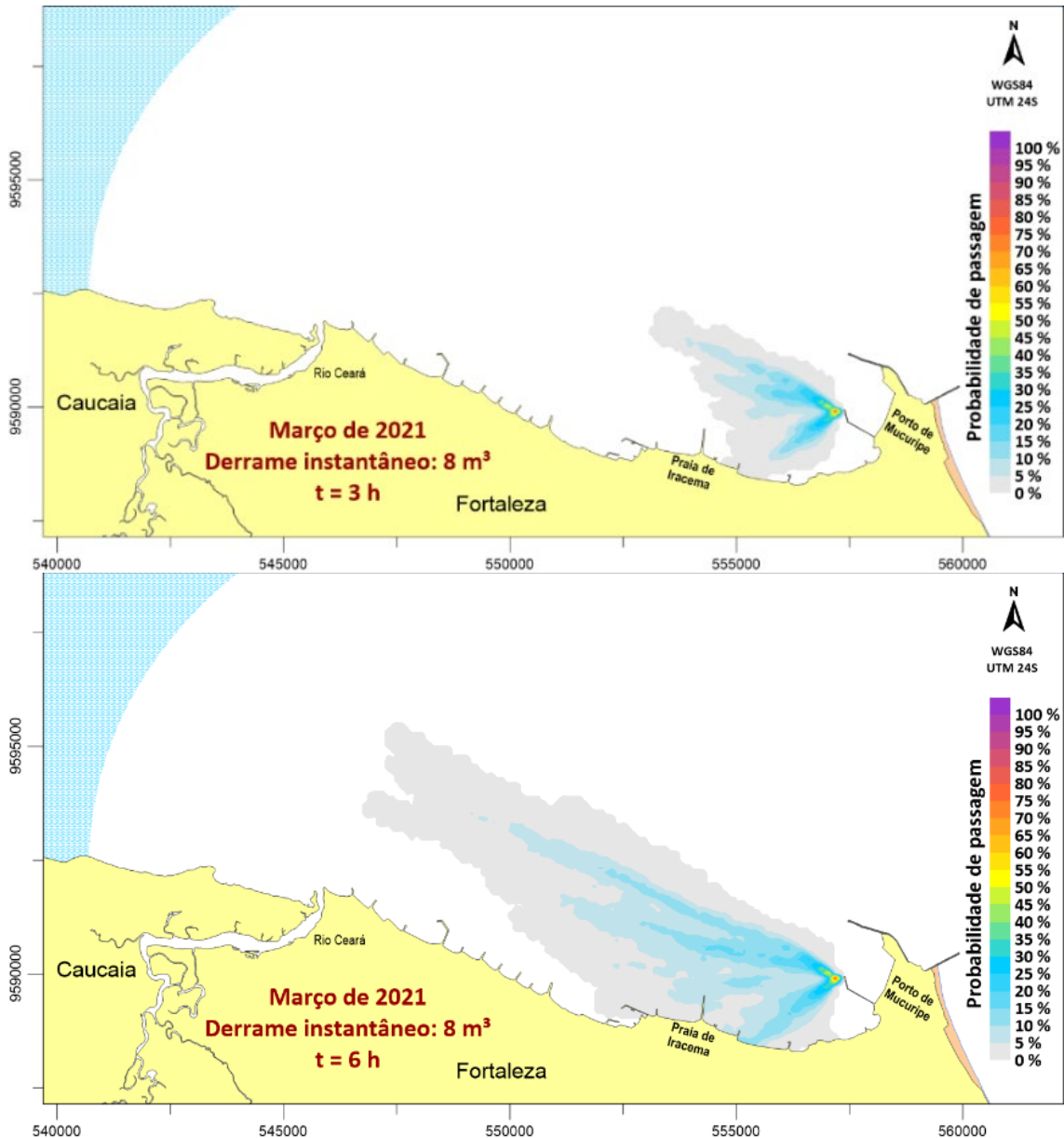


Figura 35 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 12

h e 24 h após um derrame instantâneo (20 minutos) de 8 m<sup>3</sup> no mês de março.

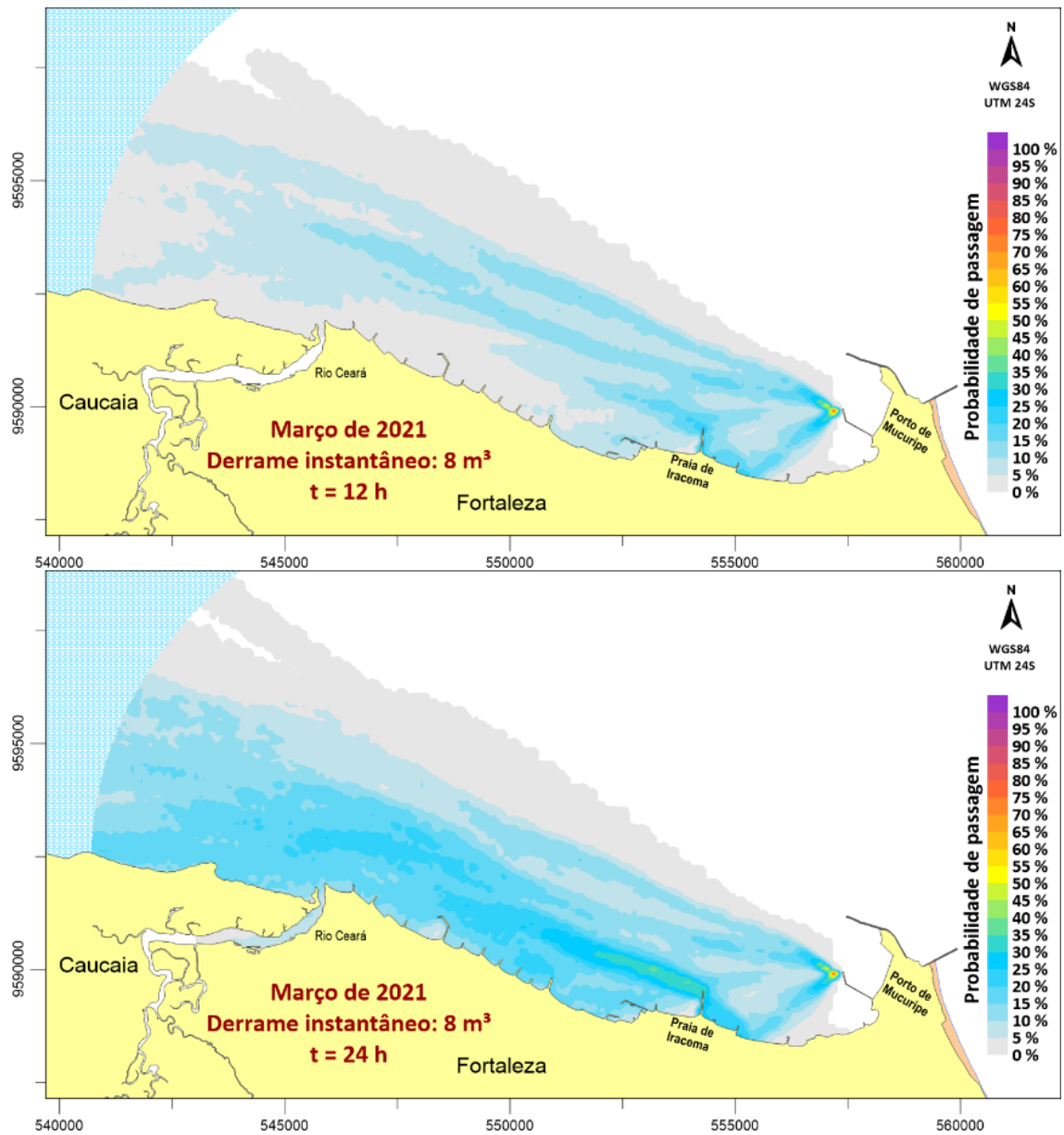


Figura 36 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 3 h e 6 h após um derrame instantâneo (20 minutos) de 8 m<sup>3</sup> no mês de outubro.

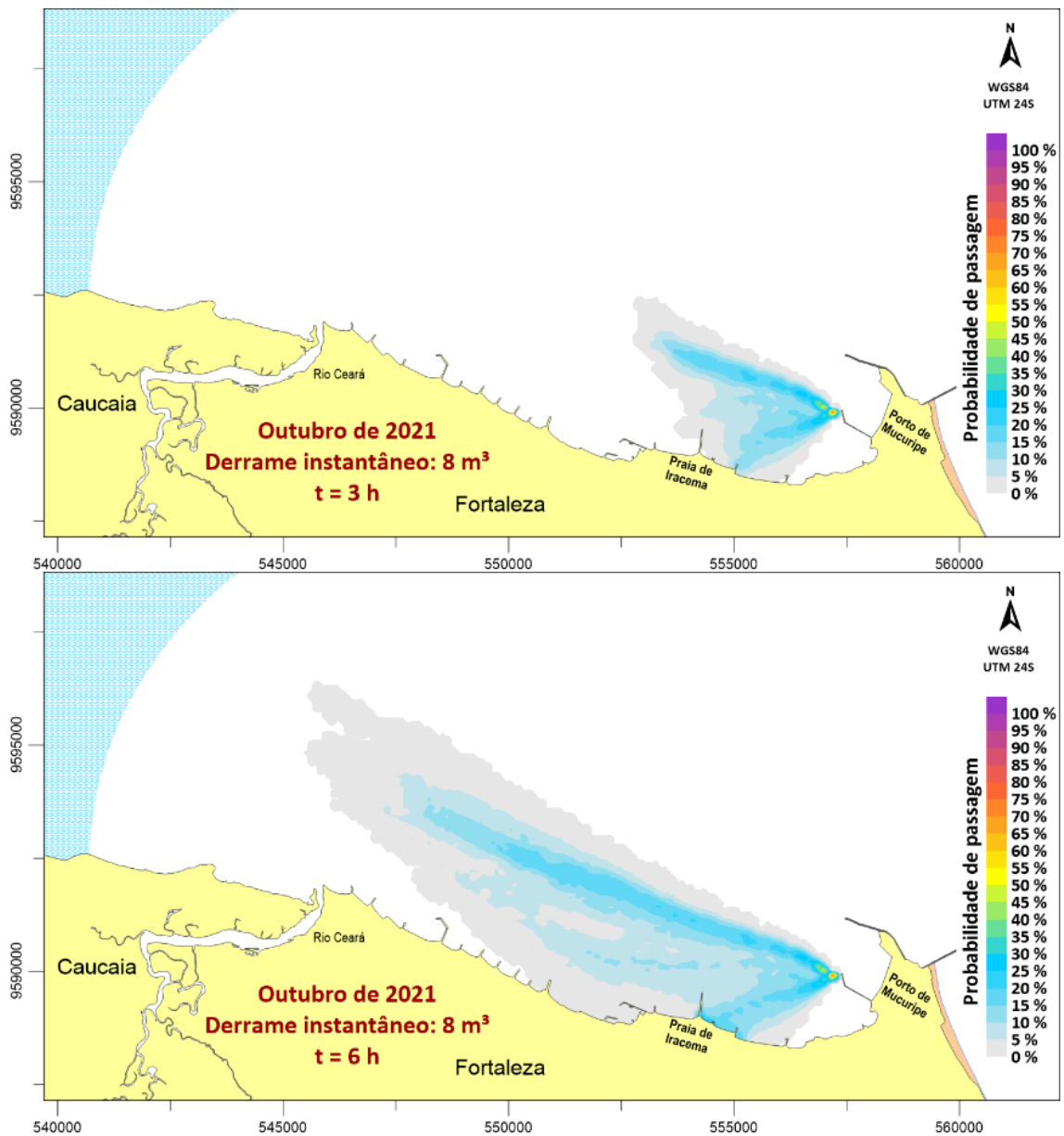
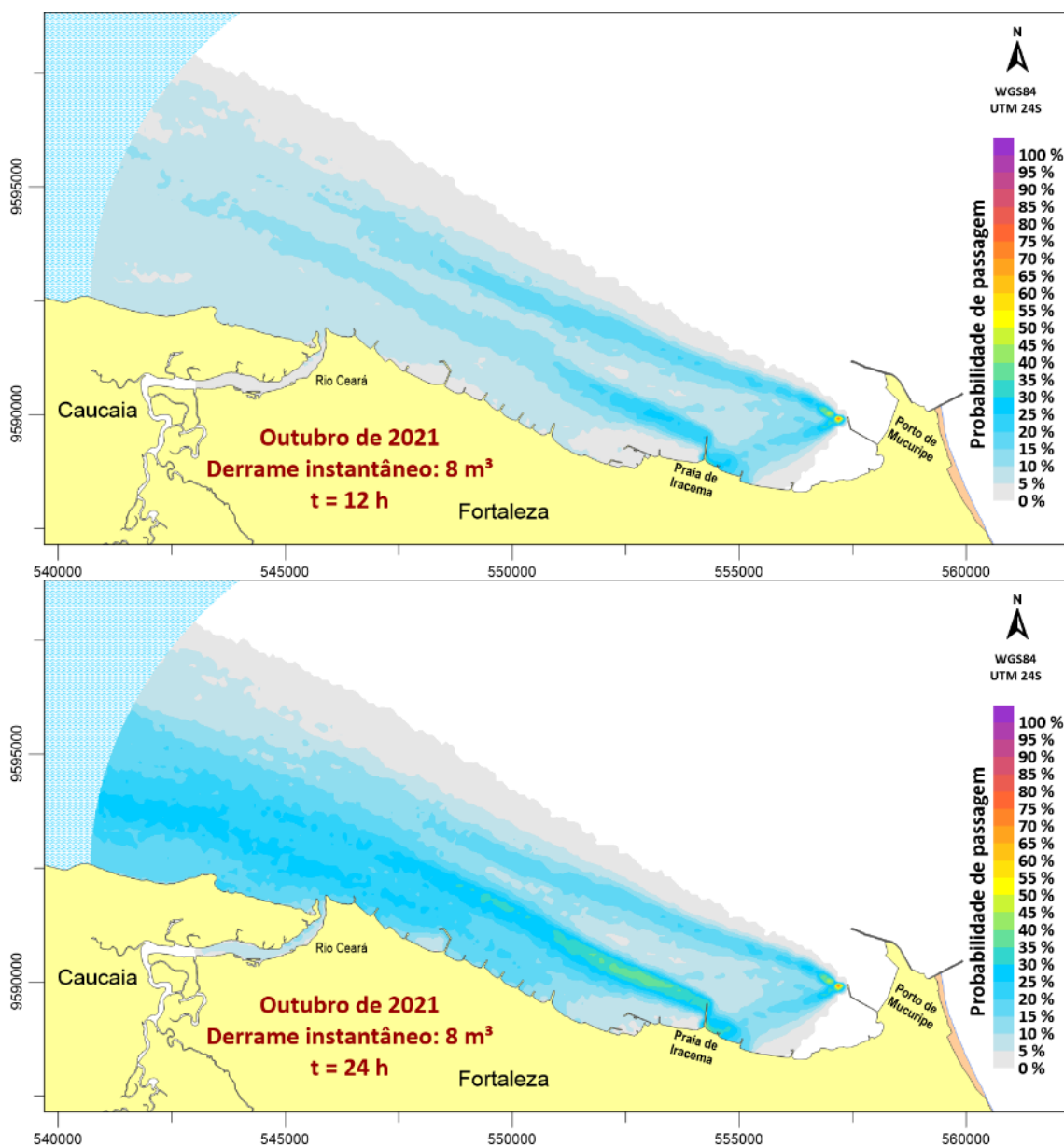


Figura 37 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 12 h e 24 h após um derrame instantâneo (20 minutos) de 8 m<sup>3</sup> no mês de outubro.



De modo análogo ao observado nos derrames de pequena proporção, os cenários de derrames médios (200 m<sup>3</sup>) evidenciam um padrão vetorial similar de deslocamento da mancha. A principal diferença reside na expansão espacial da pluma, que torna as isolinhas de probabilidade mais amplas, refletindo maior extensão de cobertura e contornos que se estendem mais longe no domínio de modelagem. A Figura 38 e a Figura 39 apresentam os mapas de probabilidade para o cenário de derrame médio (200 m<sup>3</sup>) em março, ao passo que a Figura 40 e a Figura 41 retratam o mesmo evento simulado para o mês de outubro.

Figura 38 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 3 h e 6 h após um derrame instantâneo (20 minutos) de 200 m<sup>3</sup> no mês de março.

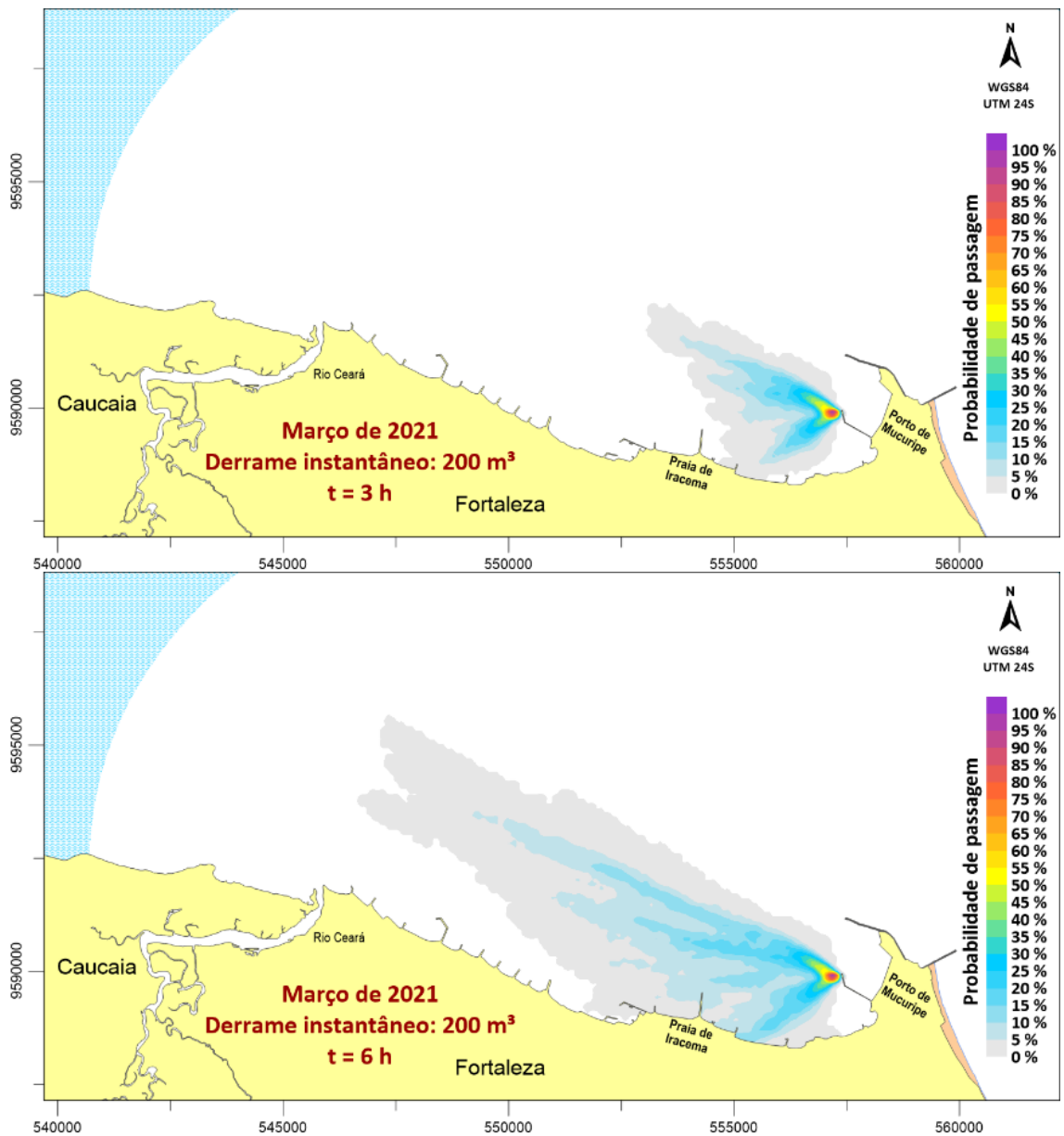


Figura 39 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 12 h e 24 h após um derrame instantâneo (20 minutos) de 200 m<sup>3</sup> no mês de março.

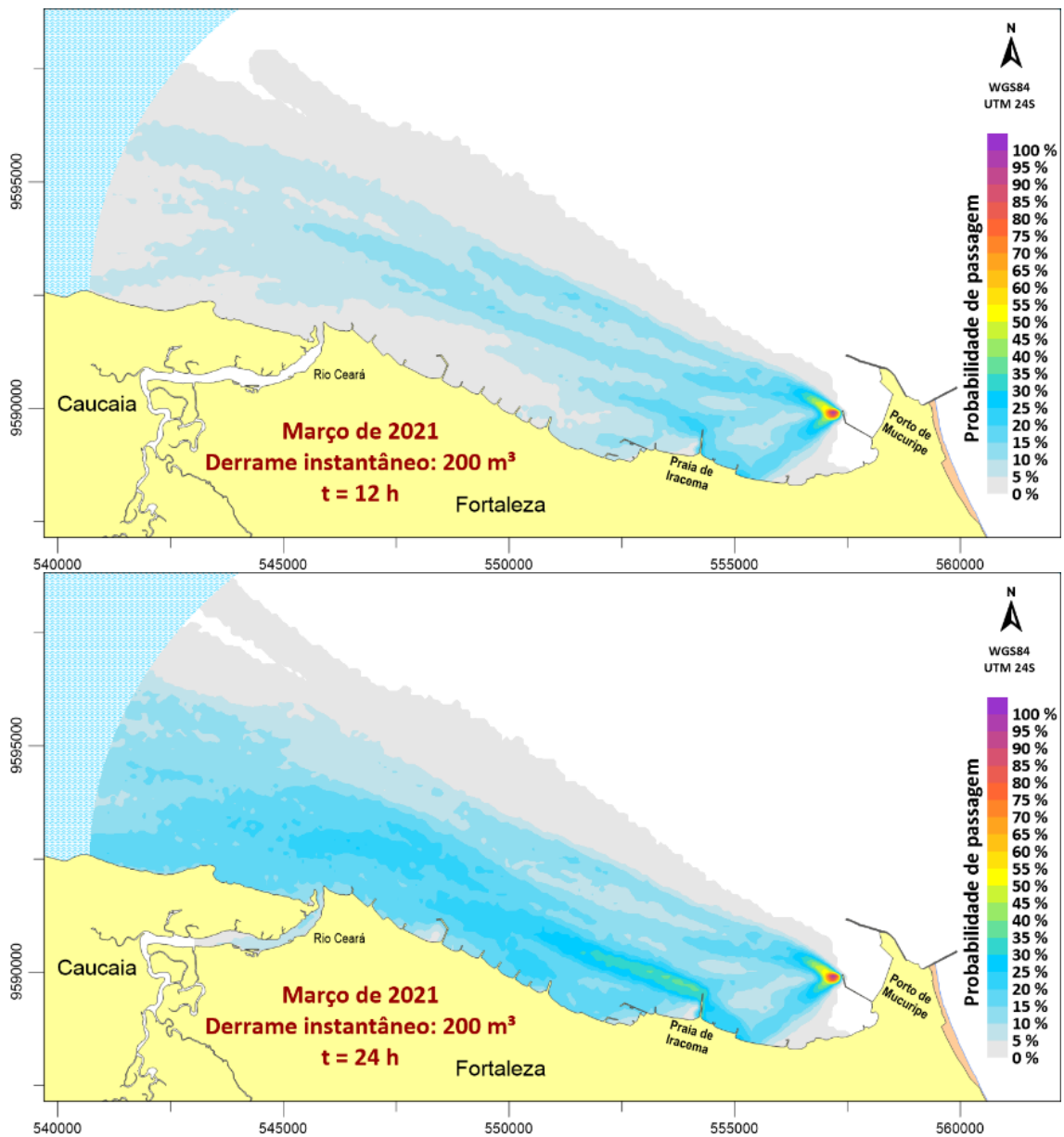


Figura 40 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 3 h e 6 h após um derrame instantâneo (20 minutos) de 200 m<sup>3</sup> no mês de outubro.

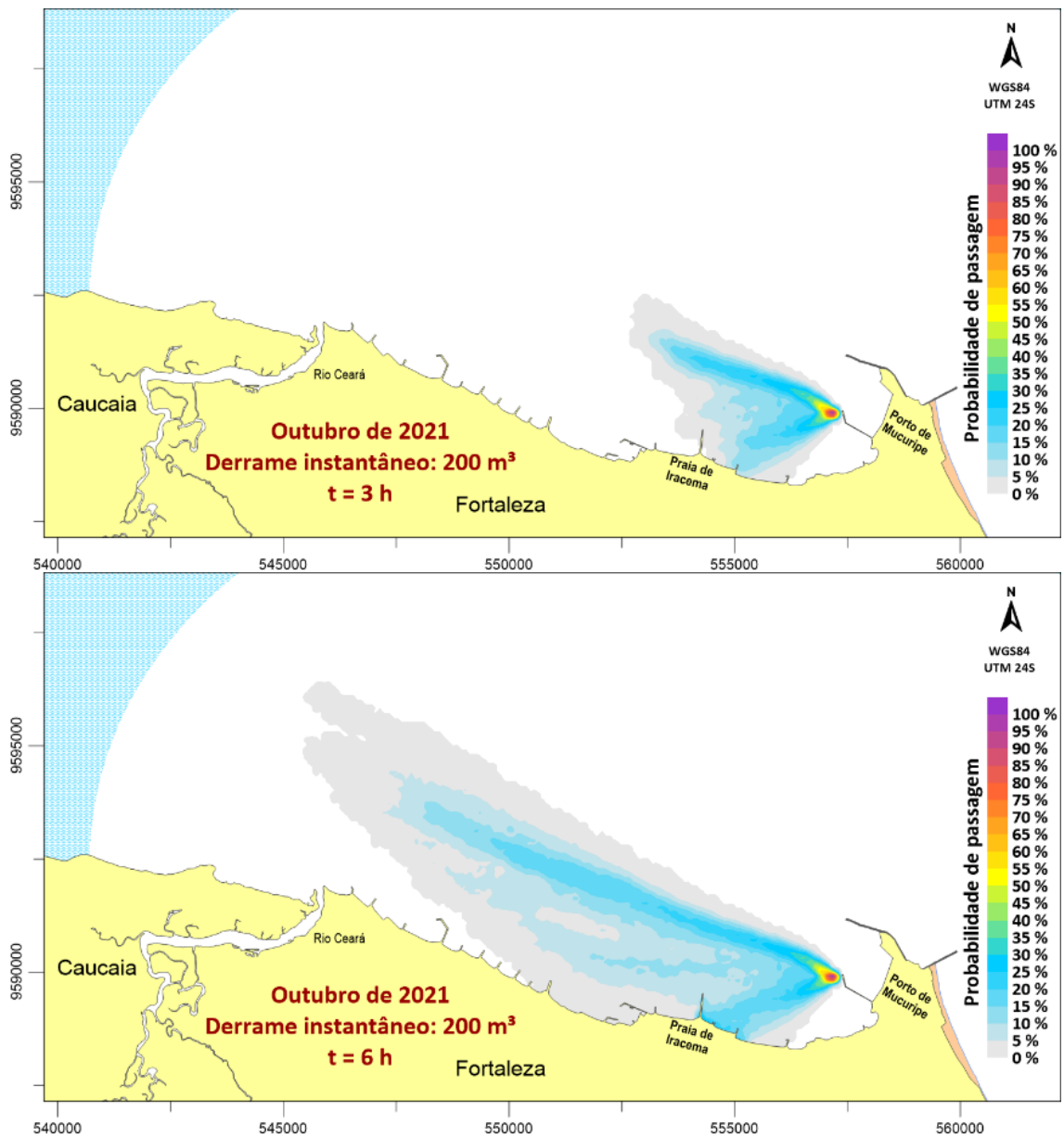
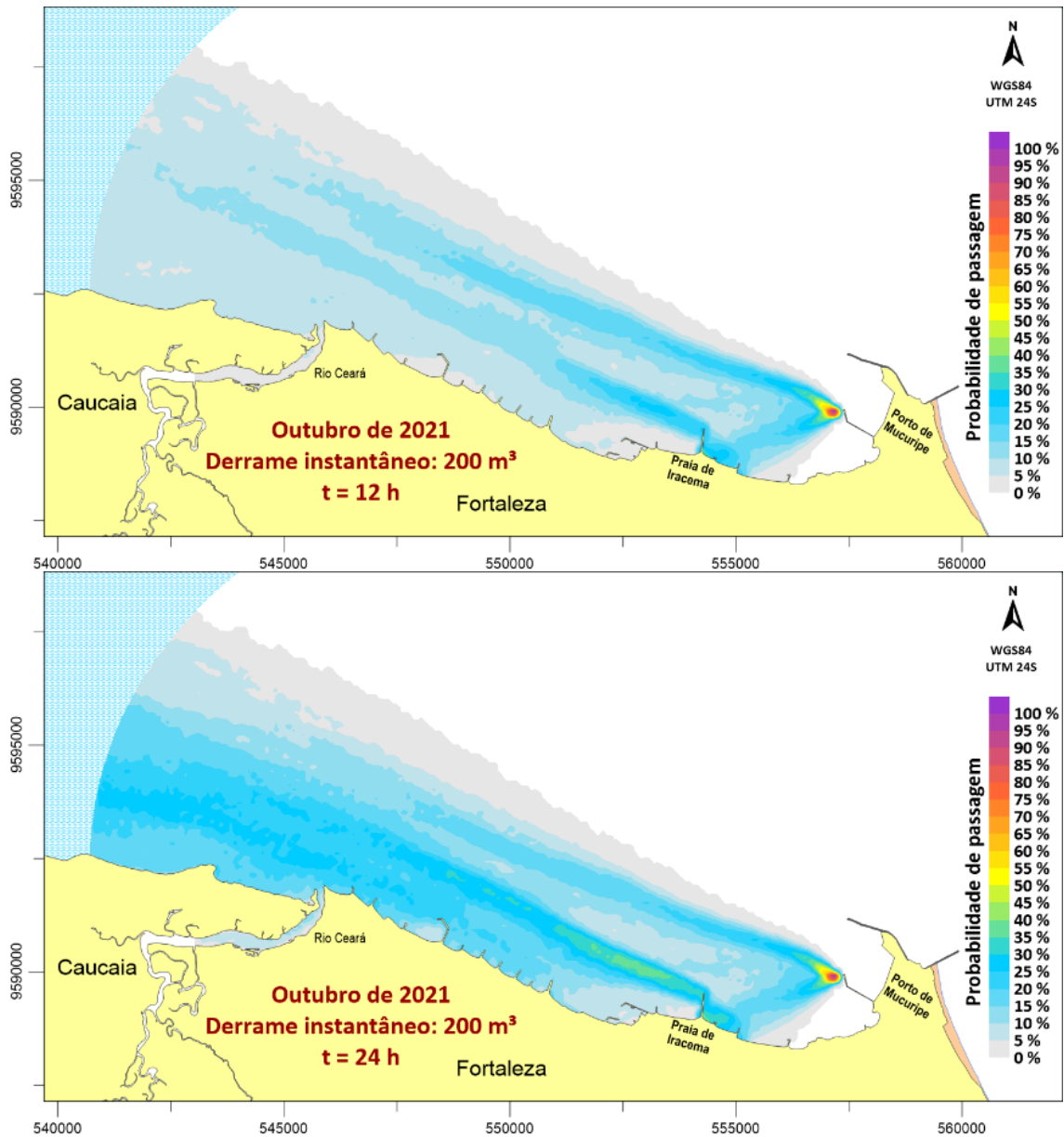


Figura 41 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 12 h e 24 h após um derrame instantâneo (20 minutos) de 200 m<sup>3</sup> no mês de outubro.



A Figura 42 e a Figura 43 apresentam os mapas de probabilidade correspondentes ao cenário crítico — descarga de 1.000 m<sup>3</sup> continuada em 24 horas — para o mês de março, enquanto a Figura 44 e a Figura 45 ilustram o mesmo caso hipotético para o mês de outubro. A liberação continuada da pluma contaminante amplifica de forma significativa a severidade dos impactos, em comparação aos cenários de menor vazão.

Figura 42 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 3 h e 6 h em um derrame de 1000 m<sup>3</sup>, continuado por 24 horas, no mês de março.

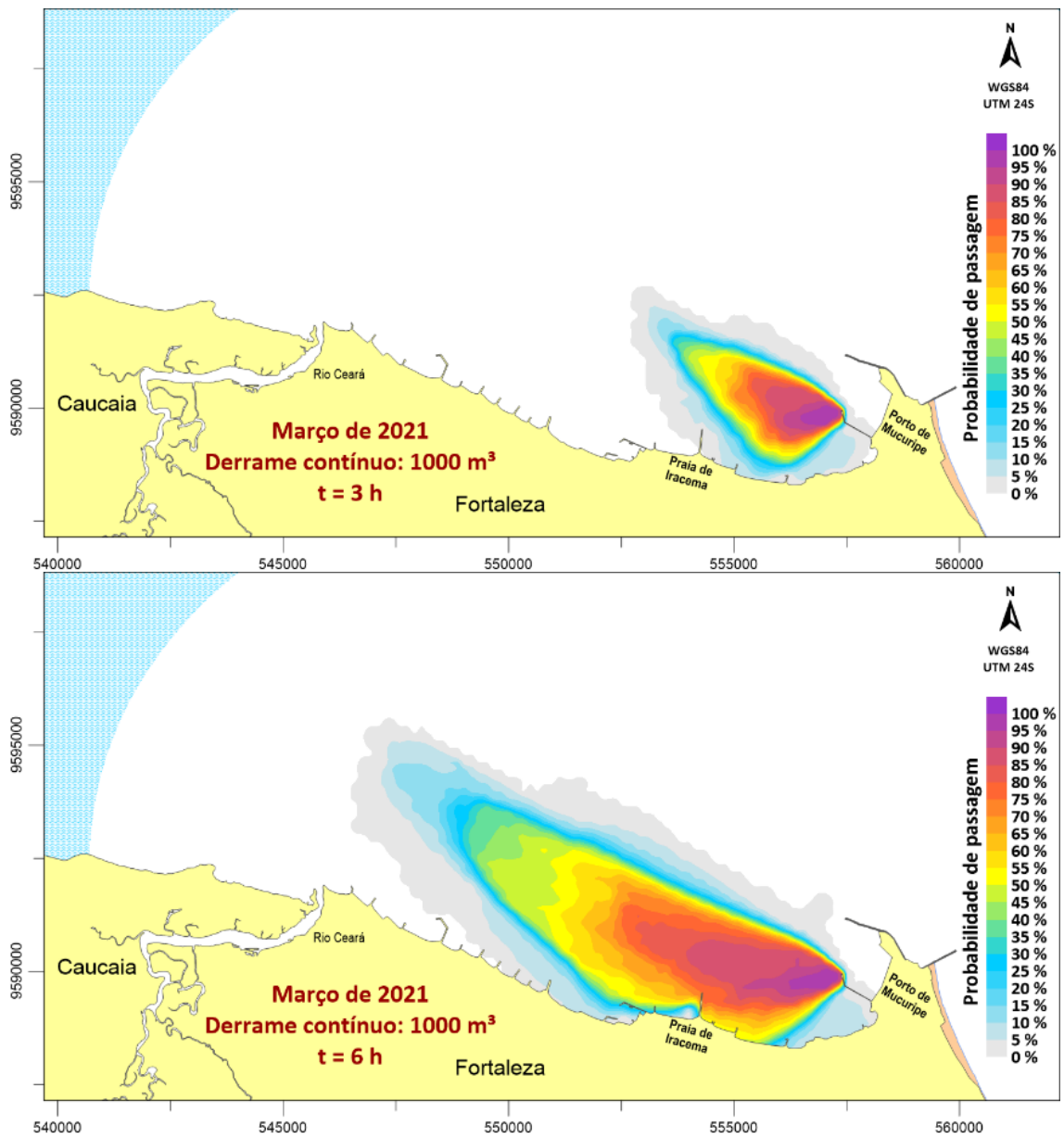


Figura 43 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 12 h e 24 h, em um derrame de 1000 m<sup>3</sup>, continuado por 24 horas, no mês de março.

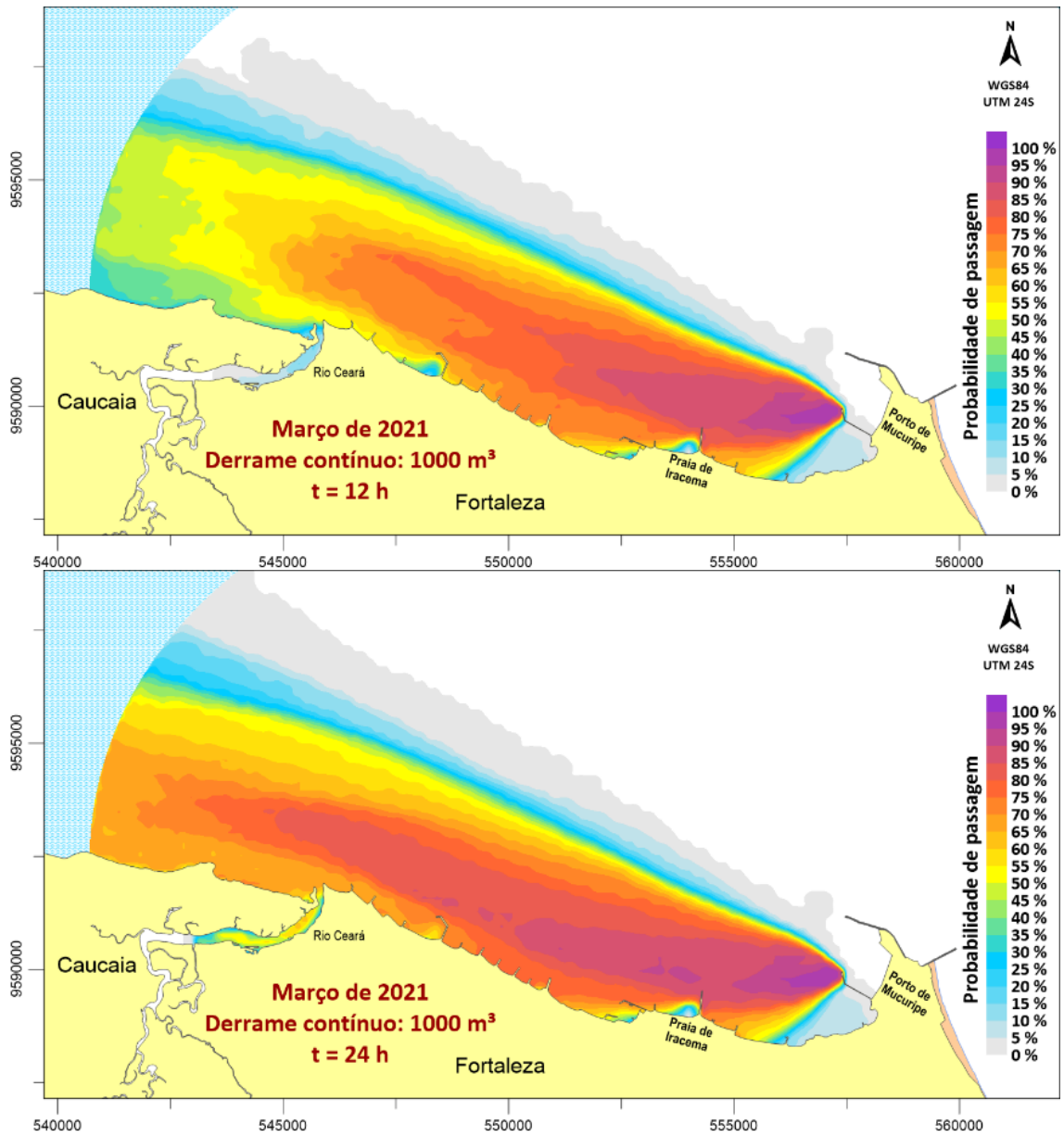


Figura 44 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 3 h, 6 h, 12 h e 24 h, em um derrame de 1000 m<sup>3</sup>, continuado por 24 horas, no mês de outubro.

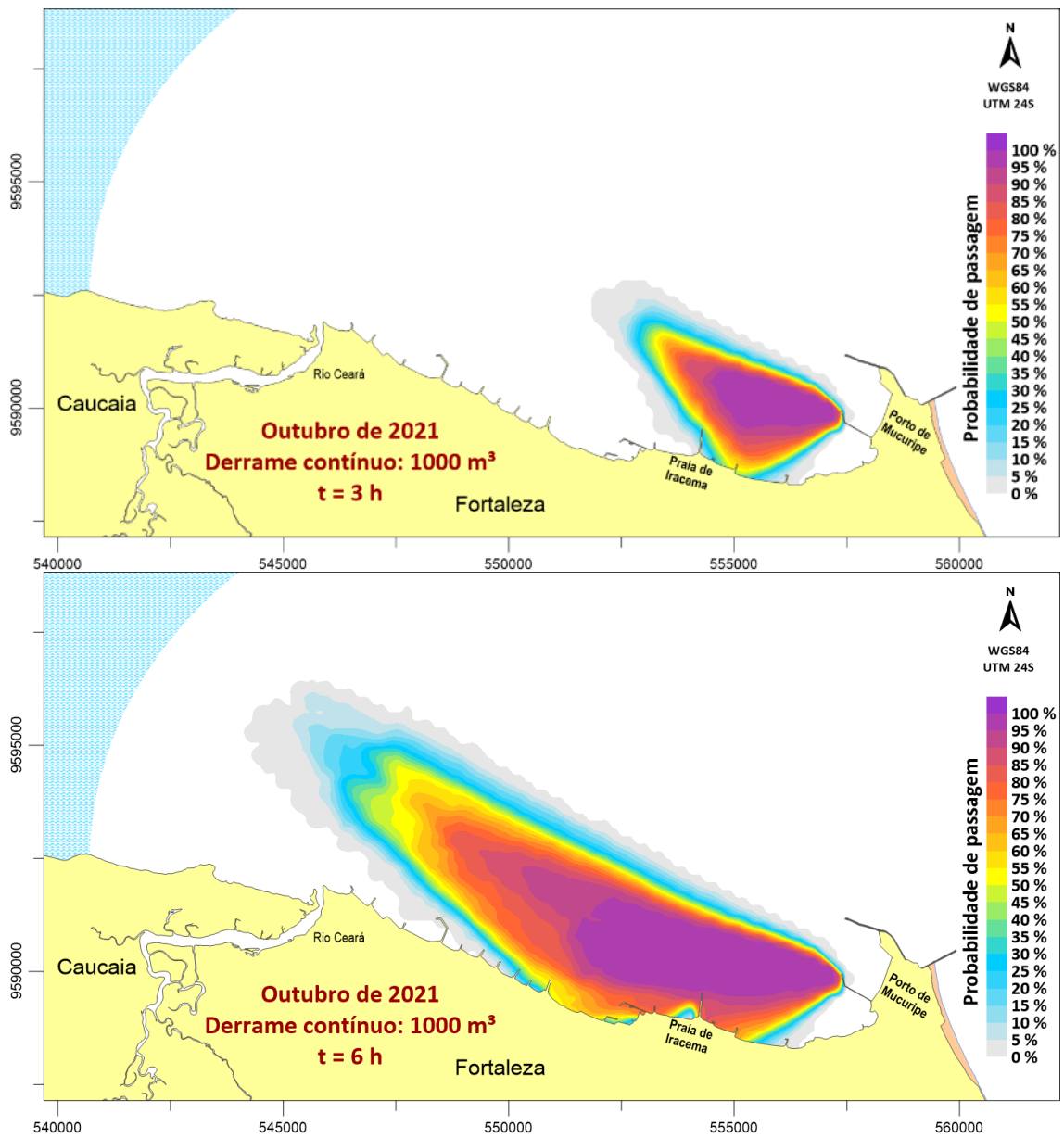
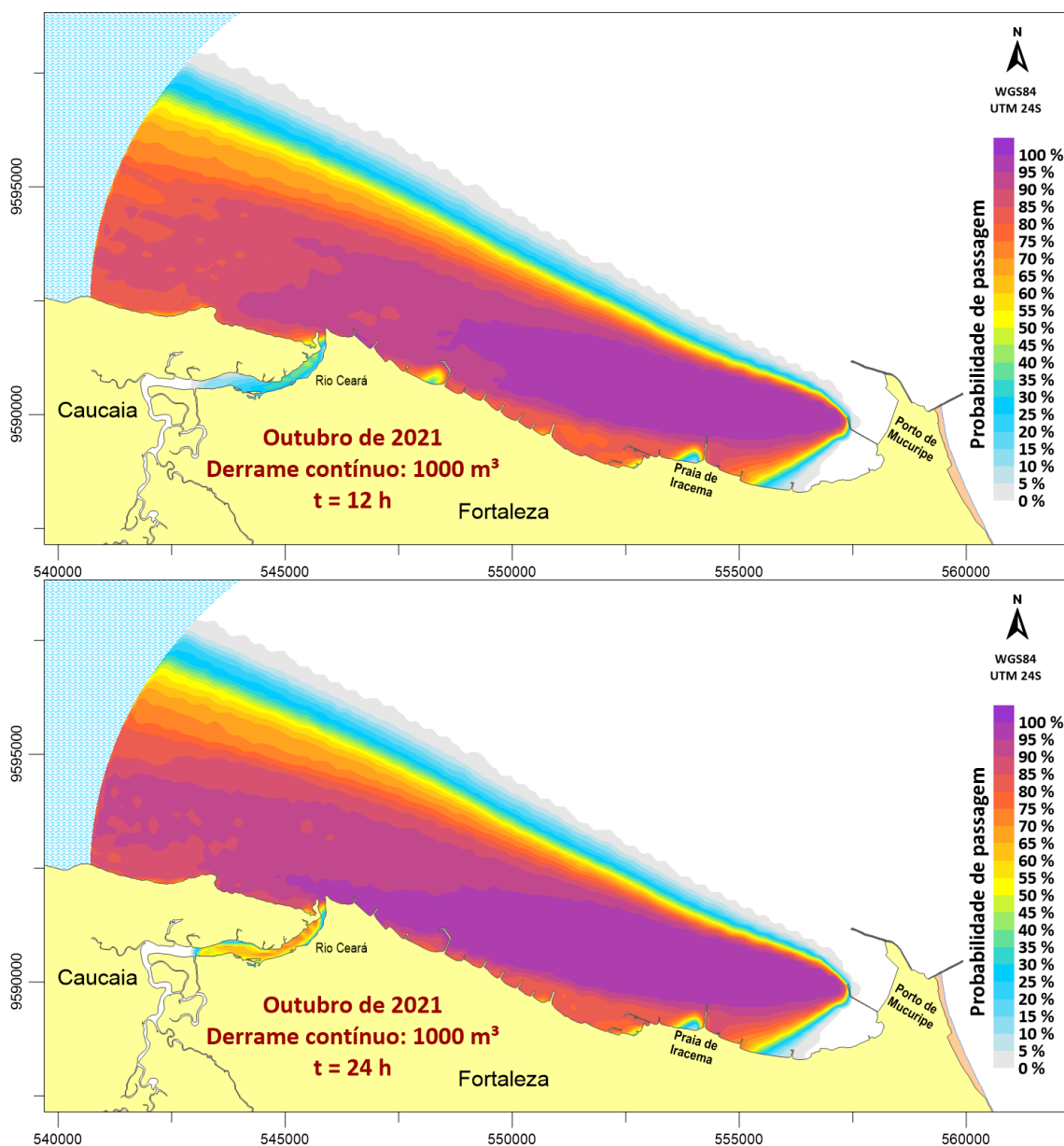


Figura 45 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, nos intervalos de 3 h, 6 h, 12 h e 24 h, em um derrame de 1000 m<sup>3</sup>, continuado por 24 horas, no mês de outubro.



Em março, a probabilidade de contato com a linha de costa nas primeiras 3 h pós-derrama situa-se em torno de 10% a 15%, enquanto em outubro, devido às correntes costeiras mais e ventos mais intensos, esse índice eleva-se para aproximadamente 50% no mesmo intervalo de tempo. Após 6 h, ambos os cenários apresentam probabilidades superiores a 50% de toque ao longo de uma vasta extensão costeira.

Após 24 h de simulação, as probabilidades de impacto ultrapassam 60% ao longo de praticamente toda a costa a oeste do porto. Adicionalmente, o estuário do Rio Ceará — área de elevada sensibilidade ambiental — também registra probabilidade de contaminação acima

de 60%, configurando um quadro de criticidade máxima, dada a vulnerabilidade dos manguezais e da biota estuarina aos efeitos adversos dos hidrocarbonetos.

Em todos os cenários simulados, a pluma de óleo adveciona exclusivamente para a porção ocidental do porto, sem projeção de impacto na região oriental adjacente ao Molhe do Titan. Esse padrão decorre da orientação predominante dos ventos e das correntes de deriva costeira, que direcionam o transporte da mancha apenas para o lado esquerdo do ponto de contaminação, inibindo sua penetração na área à direita do molhe.

No contexto da modelagem da qualidade da água em cenários de contaminação, é essencial estabelecer limites regulatórios de concentração ( $C$ ) para orientar decisões de avaliação da criticidade e dos impactos gerados por eventos poluidores. Nesse sentido, a Resolução CONAMA nº 393/2007 regula o descarte contínuo de água produzida em plataformas marítimas de petróleo e gás natural, estabelecendo que o teor de óleos e graxas não deve exceder a concentração média aritmética simples mensal de 29 mg/L, com um valor máximo diário permitido de 42 mg/L (BRASIL, 2007).

Dentro desse contexto, Rosman (2000) propõe um critério bastante prático para uniformizar os limites de apresentação de resultados em modelos de derrame de óleo, adotando como valor da espessura de mistura ( $E_M$ ) a razão, em metros, entre a densidade do óleo derramado ( $\rho_o$ ) e a densidade da água pura a 4 °C, conforme a Equação 12.

$$E_M = \frac{\rho_o (kg/m^3)}{1000 (kg/m^3)} (m) \quad (12)$$

A partir dessa abordagem, pode-se adotar o valor de concentração  $C_o$ , em kg/m<sup>3</sup>, numericamente igual ao da espessura do filme de óleo  $e$ , em mm, conforme observa-se na Equação 13.

$$C \left( \frac{kg}{m^3} \right) = \frac{m_o (kg)}{V (m^3)} = \frac{\rho_o (kg/m^3) \times A (m^2) \times e (m)}{A (m^2) \times E_M (m)} = \frac{\rho_o \left( \frac{kg}{m^3} \right) \times A (m^2) \times e (m)}{A (m^2) \times \frac{\rho_o \left( \frac{kg}{m^3} \right)}{1000 \left( \frac{kg}{m^3} \right)} (m)} \quad (13)$$

$$\therefore C \left( \frac{kg}{m^3} \right) = 1000 \times e [m] (kg/m^3) \equiv e (mm)$$

Com base nesses critérios, os resultados das simulações foram utilizados para elaborar mapas de probabilidade de passagem da mancha de óleo considerando uma

concentração acima de 29 mg/L, que equivale a uma espessura de filme de 0,029 mm, ilustrados na Figura 46 e na Figura 47, que apresentam esses resultados para os meses de março e outubro, respectivamente.

Nos cenários instantâneos analisados sob critério de concentração limite, observa-se uma inversão na localização do impacto litoral: em março, a probabilidade de toque atinge uma faixa costeira mais ampla do que em outubro. Esse comportamento pode ser atribuído à maior intensidade dos ventos em outubro, que promovem o transporte dominante da fração superficial da mancha via arraste pelo vento (*wind drift*), deslocando-a paralelamente à costa nas direções oeste e noroeste. Em contraste, os ventos mais fracos em março reduzem o efeito de deriva e permitem que as correntes costeiras comandem o transporte subsuperficial do óleo, direcionando concentrações elevadas em direção ao litoral por meio de fluxos orientados sudoeste. Esse padrão está em conformidade com estudos que destacam a influência relativa de vento e correntes na evolução horizontal de derrames: o *wind drift* predomina em condições eólicas mais intensas, enquanto correntes oceânicas governam o trajeto em situações de vento fraco (BREAKER e BRATKOVICH, 1993; JONES *et al.*, 2016; KUANG *et al.*, 2023).

Assim, os resultados obtidos pelo modelo evidenciam coerência com a literatura especializada, em que modelos como MEDSLIK-II e MOHID demonstram que a variação sazonal dos parâmetros atmosféricos pode alterar significativamente a dispersão lateral e direção da mancha de óleo (CORREIA LIMA, 2025)

Os cenários de derrame contínuo simulados para ambos os meses evidenciam de forma mais clara esse padrão de transporte da mancha de óleo. Conforme indicado na Figura 40, no mês de março, as plumas com maiores concentrações possuem maior probabilidade de permanecer mais confinadas nas proximidades da fonte do derrame, o que sugere uma menor capacidade de dispersão lateral. Em contraste, a Figura 41 revela que, em outubro, há uma elevada probabilidade de que concentrações superiores ao limite estabelecido se propaguem de forma mais ampla ao longo do domínio de modelagem, refletindo a influência das correntes mais intensas e dos ventos sazonais na advecção do poluente.

Figura 46 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, com concentrações acima de 29 mg/L, no mês de março.

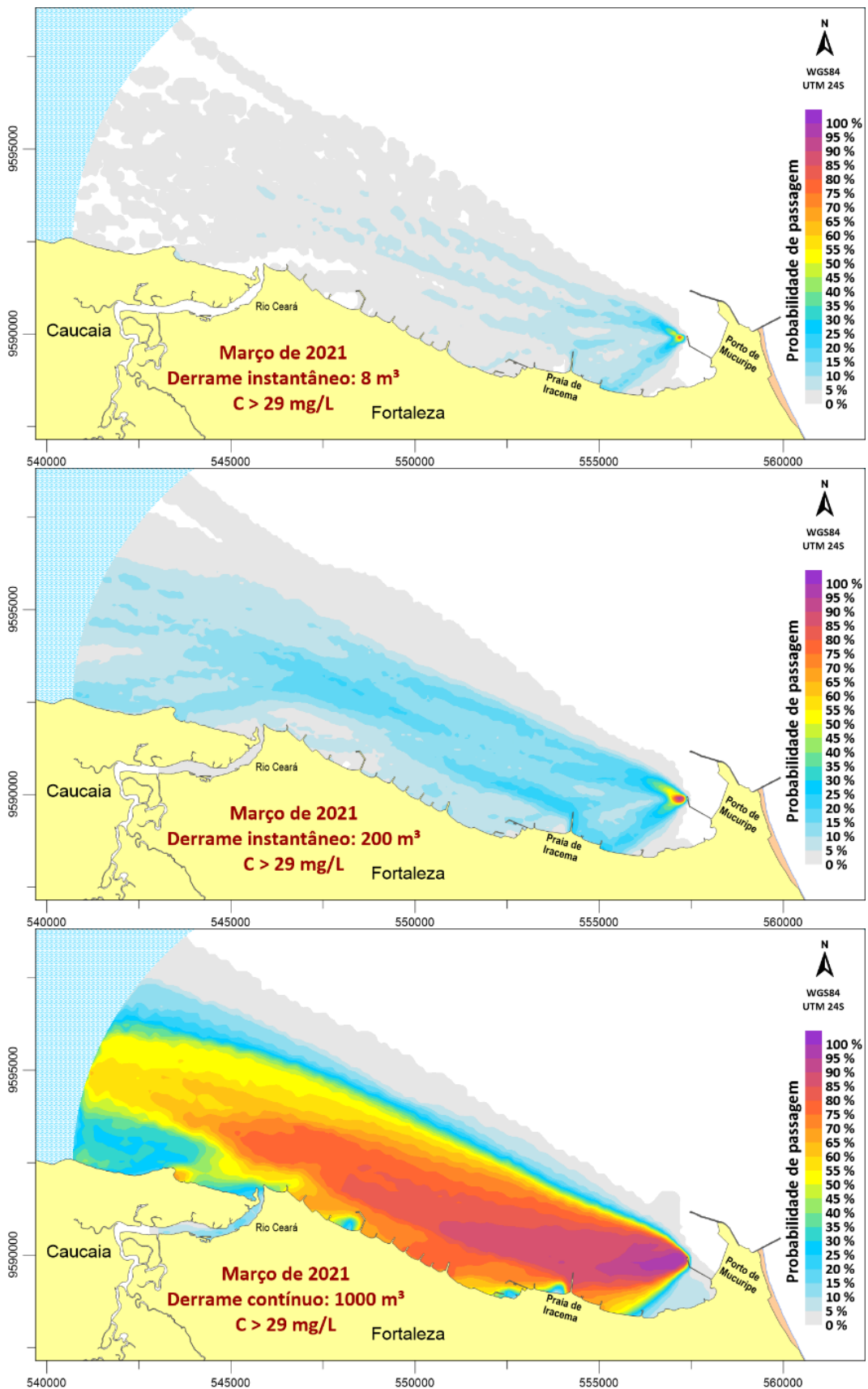
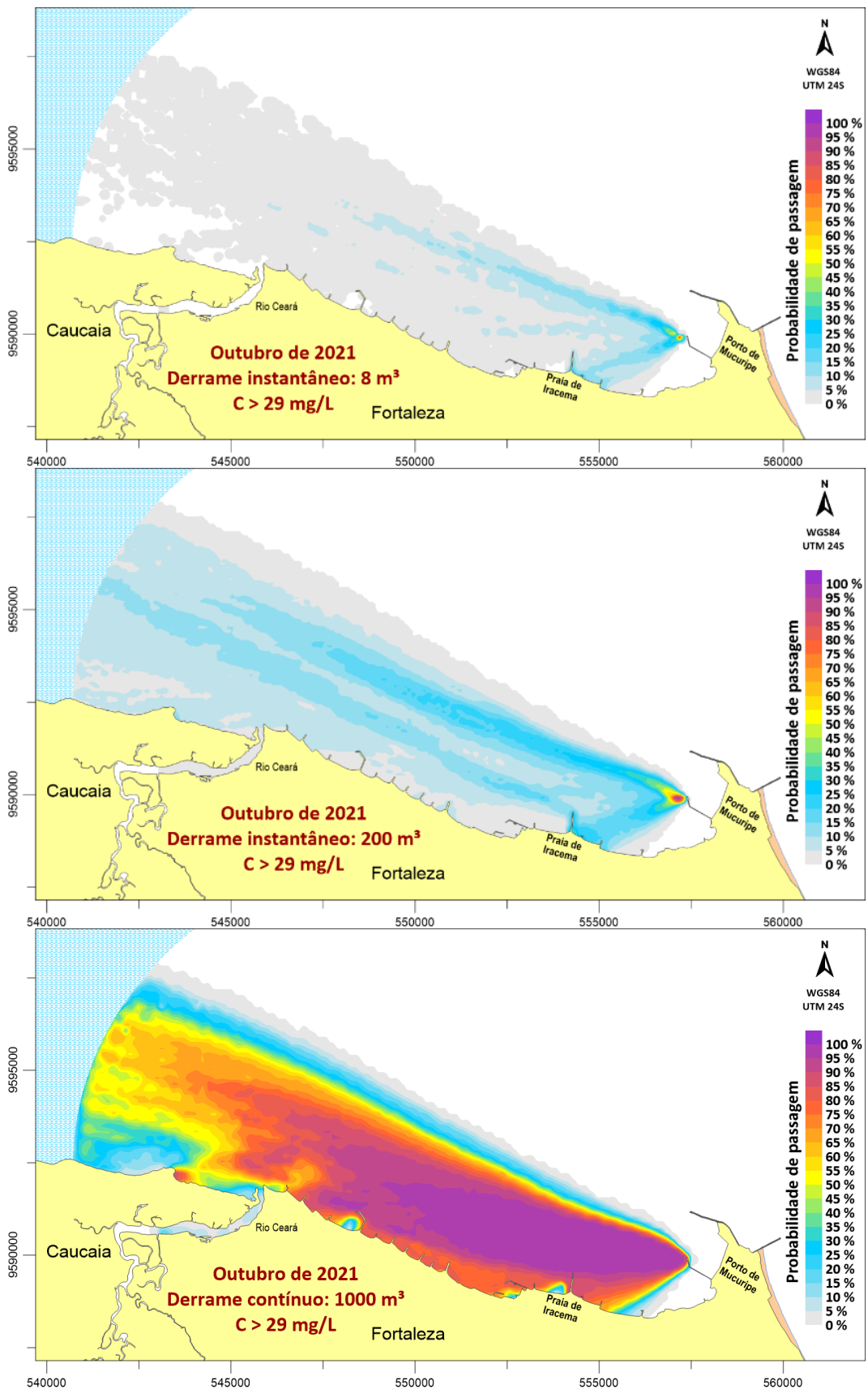


Figura 47 – Probabilidade de passagem da mancha de óleo pesado, com concentrações acima de 29 mg/L, no mês de outubro.



Observa-se, adicionalmente, que o mês de março apresenta uma maior frequência e intensidade de ventos provenientes de nordeste, conforme ilustrado pela rosa dos ventos na Figura 20. Essa condição favorece uma atuação mais significativa do componente de *wind drift* sobre a mancha de óleo, promovendo seu deslocamento em direção ao sudoeste, ou seja, em direção à zona costeira. Como consequência, os padrões de transporte da mancha em março tendem a apresentar maior variabilidade direcional, em contraste com o mês de outubro, cujas trajetórias predominantes seguem direções preferenciais para oeste e noroeste, refletindo o regime mais persistente dos ventos nesse período.

Considerando essas distinções entre os dois períodos sazonais, observa-se, com base nas ilustrações, que o estuário do Rio Ceará apresenta uma susceptibilidade ligeiramente maior a impactos significativos decorrentes de derrames simulados para o mês de março, em comparação aos eventos modelados para o mês de outubro.

### **5.3.2 Análise Determinística**

Para a análise determinística do comportamento e transporte da mancha de óleo, foram selecionadas, dentre as 100 fontes geradas aleatoriamente no modelo de Monte Carlo, aquelas identificadas como mais críticas em cada cenário de simulação. Ressalte-se que diversos critérios de criticidade podem ser adotados em estudos ambientais — por exemplo, o derrame com menor tempo de chegada ao litoral ou aquele com maior probabilidade de afetar áreas de elevada sensibilidade — dependendo da região e dos objetivos da investigação. Neste trabalho, foi priorizada a seleção dos eventos que resultaram na maior extensão de linha costeira diretamente impactada pelo poluente, de modo a representar de forma significativa o potencial de contaminação dos acidentes simulados.

Os resultados serão apresentados sob duas vertentes complementares: uma perspectiva quantitativa, com mapas contendo o transporte da mancha de óleo e isolinhas de concentração, as quais ilustram a variação de espessura ao longo da área afetada; e uma perspectiva qualitativa, com mapas de trajetória de partículas, evidenciando o trecho de costa onde o óleo encalha, perdendo fração de sua massa no substrato litorâneo.

#### **5.3.2.1 Cenário com ventos menos intensos (março de 2021)**

A Figura 48 e a Figura 49 apresentam o transporte do óleo decorrente de um derrame hipotético de 8 m<sup>3</sup>, ocorrido em 16 de março de 2021 às 15:00, sob vento de leste com velocidade média de 3,5 m/s. Na Figura 48, adota-se uma abordagem quantitativa, na qual

isolinhas de espessura da camada de óleo delineiam a distribuição da pluma contaminante. Alternativamente, estes resultados também podem ser expressos em termos de concentração, alterando-se a unidade para  $\text{kg/m}^3$ .

Uma hora após o evento, a mancha assume configuração elipsoidal, com área aproximada de  $0,035 \text{ km}^2$  e espessura variando de  $0,0001 \text{ mm}$  nas margens a  $0,86 \text{ mm}$  no núcleo. À medida que a pluma é deslocada pelas correntes e pelo arraste eólico, e sofre ações de intemperismo, observa-se expansão da área superficial concomitante à redução de sua espessura média. Doze horas após o derrame, a espessura da mancha detectada no domínio de modelagem situa-se entre  $0,01 \text{ mm}$  e  $0,03 \text{ mm}$ .

A variação na massa da mancha (com a consequente redução de sua espessura) é função processos de intemperismo simulados pelo ADIOS2, inseridos no modelo pela curva de decaimento apresentada na Figura 24. Esses processos promovem mudanças nas frações mais voláteis e na estrutura física do óleo, reduzindo a massa disponível em suspensão e alterando a distribuição espacial da pluma ao longo do tempo.

Adicionalmente, uma parcela da massa oleosa é perdida durante o contato com a faixa costeira. Esse mecanismo depende intrinsecamente das características do substrato litorâneo. Porosidade, granulometria, fração orgânica e grau de umidade influenciam a absorção, a penetração do filme oleoso no perfil sedimentar e o limite de saturação do material.



variáveis que controlam a capacidade de retenção, como o limite de saturação (volume máximo de óleo retido por unidade de volume de sedimento) e a profundidade de penetração do filme oleoso no perfil sedimentar.

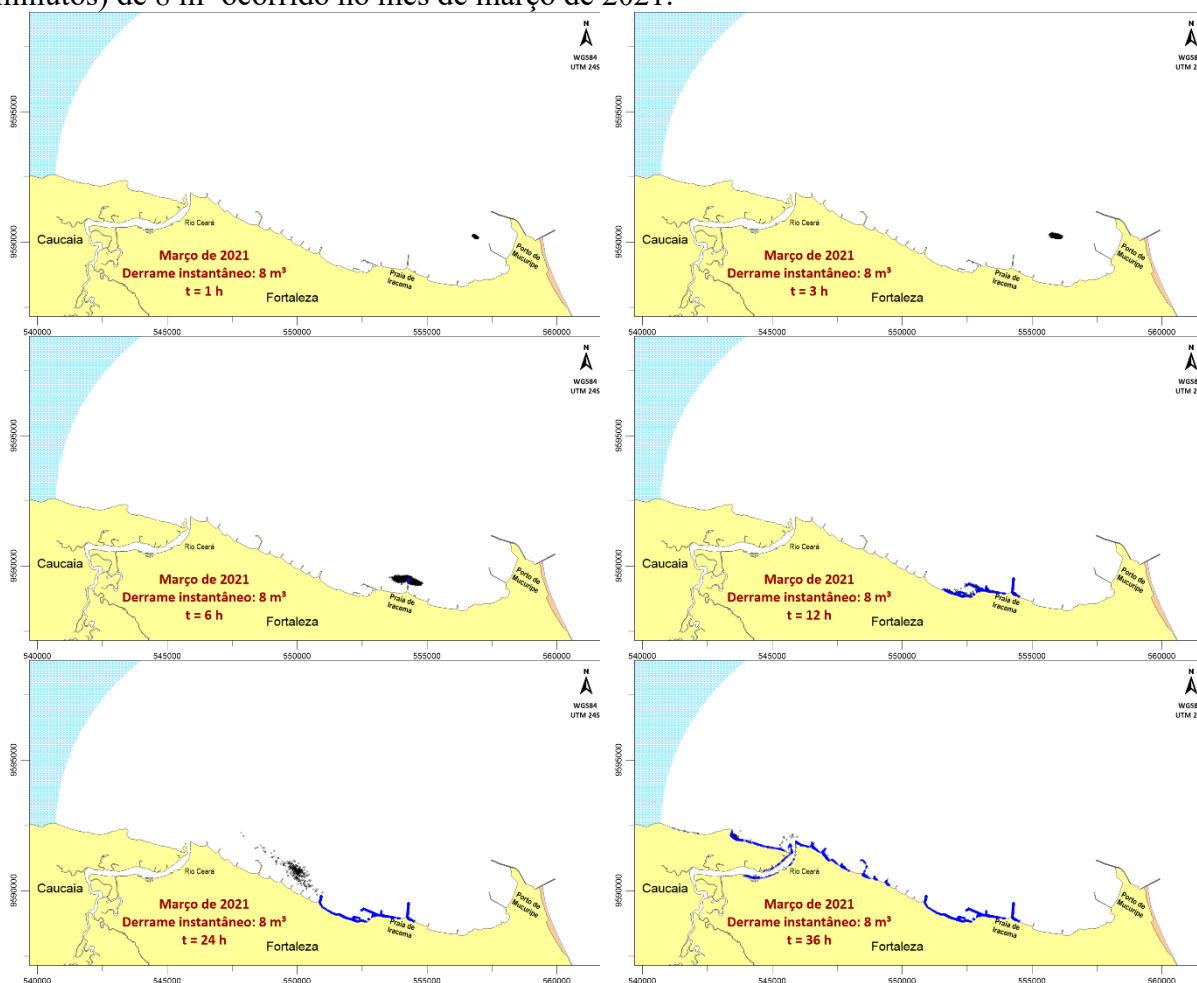
Em laboratório, devem ser conduzidos ensaios padronizados para determinar parâmetros diretamente utilizáveis no modelo: coeficientes de absorção, curvas de saturação, taxas de penetração e processos de remoção, como lixiviação, ressuspensão e biodegradação. É igualmente importante testar diferentes tipos de óleo, a depender do propósito do estudo, pois as propriedades físico-químicas do hidrocarboneto influenciam sua interação com o substrato.

O emprego de coeficientes empíricos de absorção de óleo por diferentes classes de substrato constitui uma limitação reconhecível deste trabalho. Tais coeficientes refletem valores médios e transferíveis que não capturam totalmente a variabilidade espacial e temporal das propriedades do sedimento (porosidade, granulometria, teor orgânico, grau de compactação). Por essa razão, o modelo não pretende oferecer uma predição de alta precisão sobre a massa retida em cada centímetro de costa, mas sim fornecer estimativas aproximadas da perda de massa por contato costeiro e identificar as zonas costeiras com maior probabilidade de serem tocadas pelo óleo, informação essa útil para priorização de vistorias e ações de resposta.

Ademais, a literatura registra que a persistência e o comportamento do óleo encalhado dependem fortemente das características do substrato e dos processos de intemperismo, de modo que inferências robustas exigem calibração com dados de campo e ensaios laboratoriais específicos para a área estudada. Sem essa calibração, as projeções conservam incertezas substanciais que devem ser explicitadas na avaliação de resultados (OWENS; TAYLOR; HUMPHREY, 2008; KERAMEA, *et al.* 2021).

Expostas essas considerações, a Figura 49 ilustra, sob enfoque qualitativo, o rastreamento temporal das partículas de óleo. Cada vez que as partículas alcançam o litoral, parcela de sua massa é sequestrada pelo substrato — representada pelo destaque em azul no contorno de fronteira fechada —, enquanto as partículas que ultrapassam o limite do domínio pelo contorno aberto são consideradas removidas do sistema e não estão sujeitas ao retorno para ao domínio de modelagem.

Figura 49 – Visualização qualitativa (nuvem de partículas, marcando em azul os trechos da costa atingidos pelo óleo) da progressão da mancha de óleo de um derrame instantâneo (20 minutos) de 8 m<sup>3</sup> ocorrido no mês de março de 2021.



A Figura 50 e a Figura 51 reproduzem o mesmo protocolo de análise empregado para o derrame de 8 m<sup>3</sup>, agora aplicado a um volume de 200 m<sup>3</sup> sob idênticas condições de vento (leste, 3,5 m/s), correntes e maré. Uma hora após o incidente, a pluma contaminante alcançou área de aproximadamente 0,248 km<sup>2</sup>, com espessura oscilando entre 0,0001 mm nas extremidades e 8,76 mm em seu núcleo.

Em ambos os cenários, o padrão inicial de vento de leste induz deslocamento primário da mancha em direção ao oeste. Posteriormente, a inversão das correntes para sudoeste direciona o óleo para a faixa costeira, cujo primeiro ponto de contato é o espigão da Praia de Iracema. Após o encalhe, parte da massa permanece retida no substrato, enquanto o remanescente retorna a deriva para o oeste. Dessa forma, somente os trechos de praia situados a oeste do espigão são efetivamente impactados pela mancha à deriva.

Figura 50 – Visualização quantitativa (isolinhas de espessura do filme de óleo na camada superficial) da progressão da mancha de óleo de um derrame instantâneo (20 minutos) de 200 m<sup>3</sup> ocorrido no mês de março de 2021.

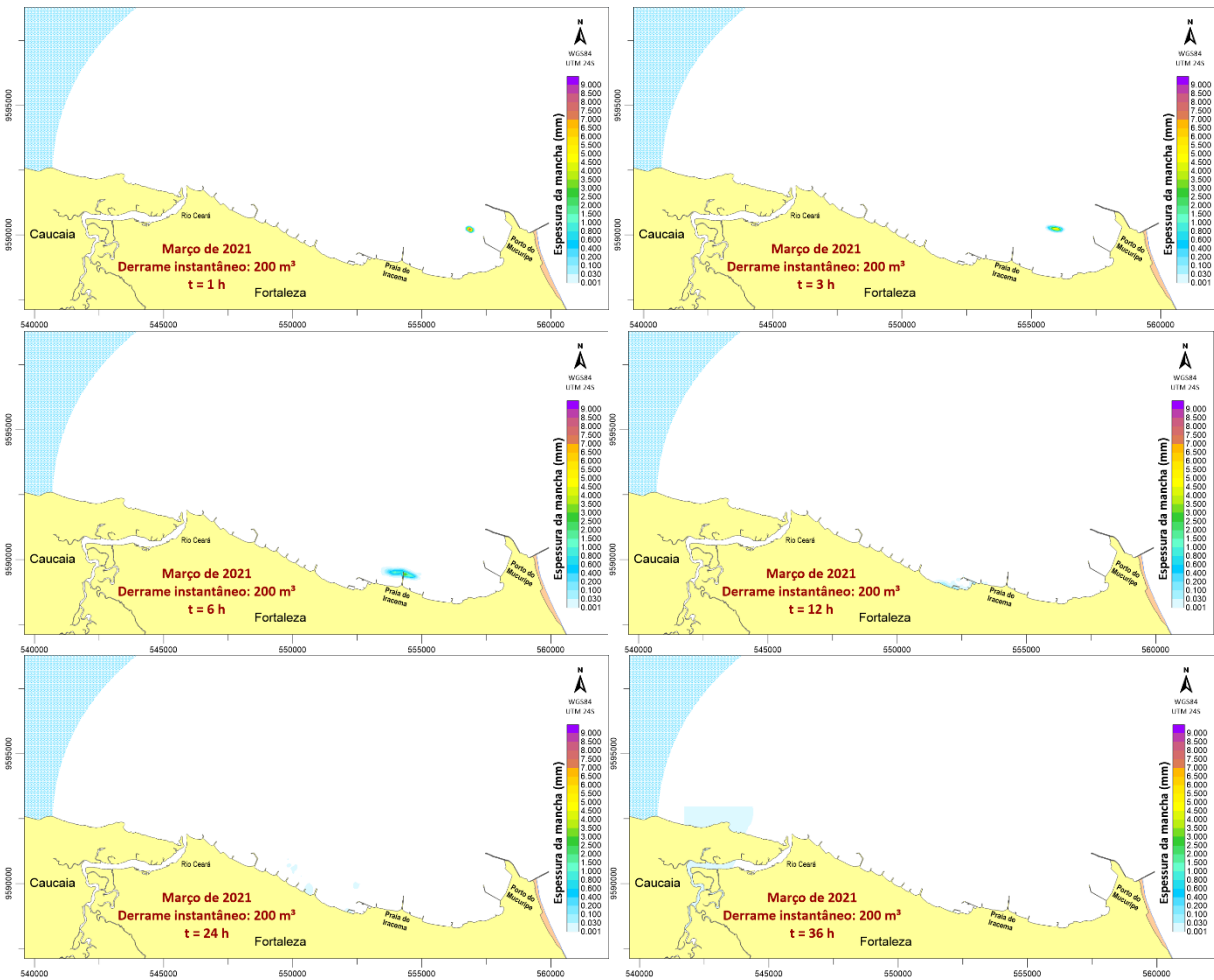
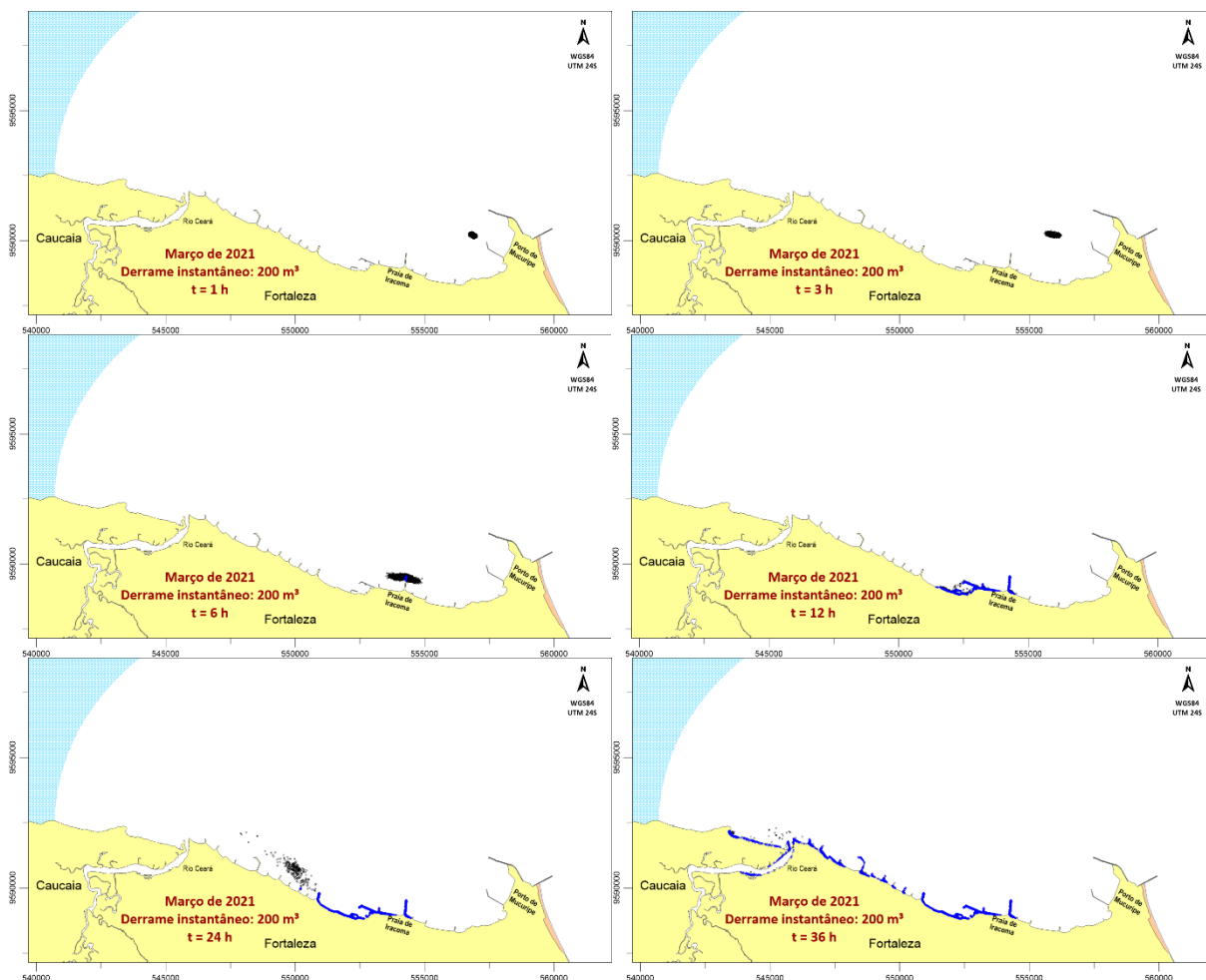


Figura 51 – Visualização qualitativa (nuvem de partículas, marcando em azul os trechos da costa atingidos pelo óleo) da mancha de óleo de um derrame instantâneo (20 minutos) de 200 m<sup>3</sup> ocorrido no mês de março de 2021.



Para o cenário de derrame continuado (1.000 m<sup>3</sup> liberados ao longo de 24 horas), adotou-se como condição inicial uma fonte poluidora que descreve um derrame ocorrido em 16/03/2021 às 10:00, com vento médio de sudeste de 4,5 m/s. A vazão média correspondente a esse lançamento contínuo é de aproximadamente 0,012 m<sup>3</sup>/s, valor que se manteve constante ao longo do período de emissão considerado no modelo. As condições hidrodinâmicas e de vento nos primeiros 12 horas mantiveram o material liberado afastado da linha de costa, de modo que não foi observado encalhe durante esse intervalo inicial.

Durante as primeiras 12 horas a pluma evoluiu predominantemente por advecção ao longo da costa, assumindo uma morfologia alongada e paralela à linha de enseada em resposta à combinação do campo de correntes e ao arraste eólico. Esse regime de transporte, associado à vazão relativamente baixa e contínua, condicionou uma faixa de espessura relativamente estável, com valores médios entre 0,2 mm e 0,6 mm. A manutenção dessas

espessuras é compatível com um balanço entre aporte contínuo, dispersão lateral e processos de intemperismo que não foram suficientes, no intervalo analisado, para promover um afinamento substancial da pluma.

Ao final do período de liberação (24 horas), a alteração no forçamento hidrodinâmico, representada pela mudança de direção das correntes e pela reorientação dos ventos, provocou advecção da pluma em direção ao litoral. Esse rebatimento dirigiu a mancha para a zona costeira a oeste do Porto do Mucuripe e possibilitou o ingresso de frações da pluma no estuário do Rio Ceará. O primeiro contato efetivo com a costa ocorreu entre as 12 e 24 horas após o início do derrame, e, na condição final, a faixa oleosa foi fortemente direcionada ao litoral, afetando ampla extensão da costa local.

Concomitantemente ao encalhe, observou-se fragmentação da pluma alongada em múltiplos lóbulos e manchas discretas, fenômeno coerente com processos de cisalhamento horizontal, forçamento de maré e heterogeneidade do campo de velocidades. Essa fragmentação, ocorrida após a cessação da vazão, tem implicações operacionais importantes: a distribuição espacial final do óleo tende a ser mais difusa, aumentando a área a ser monitorada e exigindo estratégias de amostragem e resposta que priorizem setores costeiros identificados como mais vulneráveis.

Por fim, convém ressaltar que as previsões descritas são dependentes das condições iniciais e do campo de forças utilizado pelo modelo. Incertezas inerentes aos parâmetros hidrodinâmicos e às parametrizações de intemperismo devem ser consideradas ao interpretar os resultados. Todo o trajeto descrito para o derrame de vazão continuada do mês de março pode ser apreciado na Figura 52 e a na Figura 53.

Figura 52 – Visualização quantitativa (isolinhas de espessura do filme de óleo na camada superficial) da progressão da mancha de óleo de um derrame de 1.000 m<sup>3</sup>, continuado por 24 horas, ocorrido no mês de março de 2021.

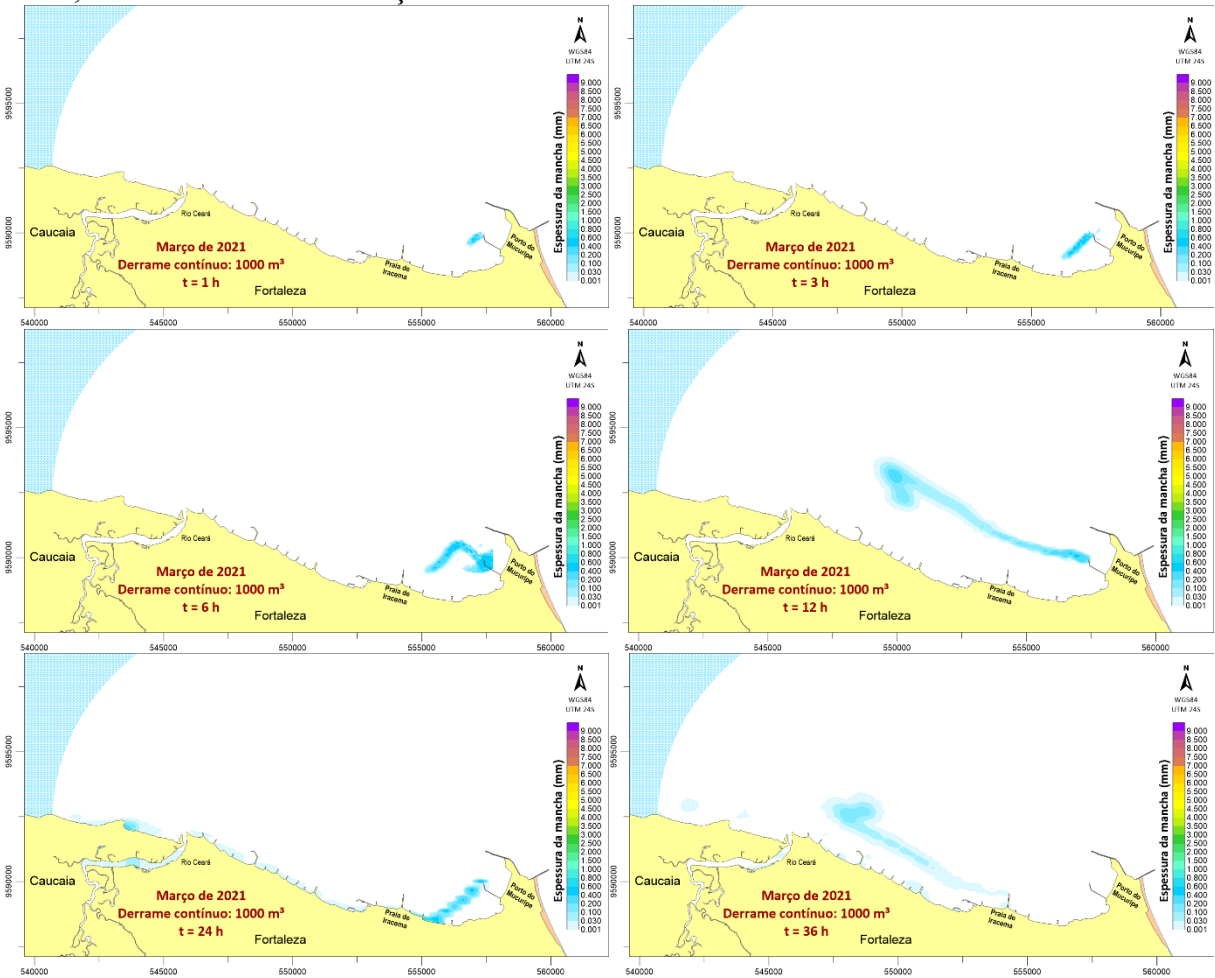
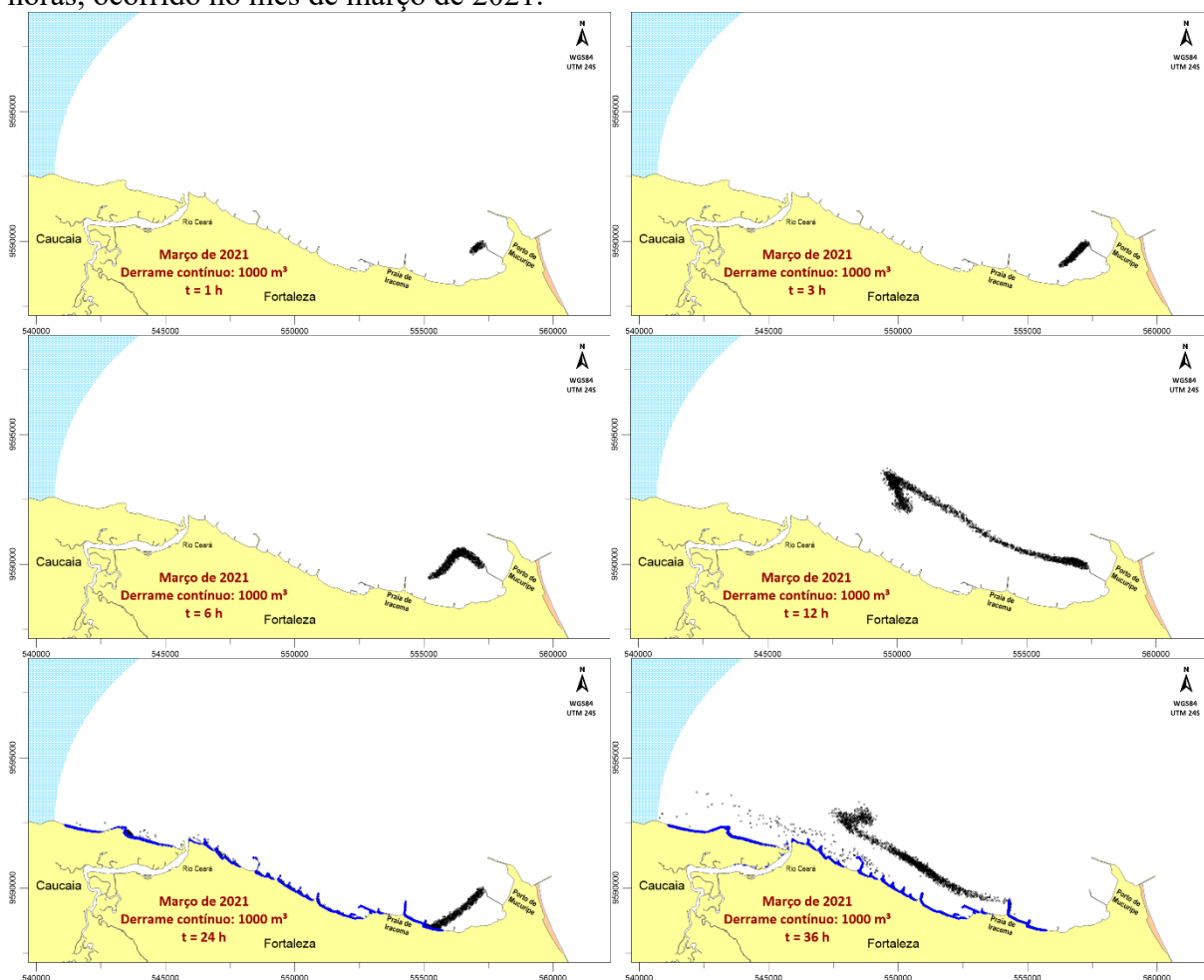


Figura 53 – Visualização qualitativa (nuvem de partículas, marcando em azul os trechos da costa atingidos pelo óleo) da mancha de óleo de um derrame de 1.000 m<sup>3</sup>, continuado por 24 horas, ocorrido no mês de março de 2021.



O SisBaHiA<sup>®</sup> dispõe de uma ferramenta estatística específica para o registro do contato das manchas oleosas com a linha de costa, que permite a extração e a visualização de indicadores quantitativos essenciais à avaliação de risco. Para exemplificar essa saída, a Figura 48 apresenta a tabela de estatística de toque no litoral gerada pelo sistema. A partir dessa tabela é possível obter, para cada fonte simulada, (1) a probabilidade de um derrame tocar o litoral ao longo do período modelado, (2) o tempo de chegada associado a cada fonte e (3) a massa ou volume de óleo acumulado na faixa costeira em decorrência do encalhe.

Figura 54 – Tabela de estatística de toque do poluente no litoral, calculada pelo modelo Lagrangeano probabilístico do SisBaHiA®.

Estadística de Toque no Litoral

Percentagem: 71.00 %

Fonte	Toque Inicial (h)	Massa Acumulada	Volume Acumulado
2	4.63	2909.277	3.021
8	7.60	7157.730	7.433
9	4.20	6772.022	7.032
13	8.07	4766.430	4.950
14	2.57	7523.648	7.813
16	3.90	7474.435	7.762
17	4.23	3270.859	3.397
21	9.43	12.983	0.013
22	2.83	7695.760	7.991
23	2.73	7695.987	7.997

Os cenários de derrame instantâneo (8 m<sup>3</sup> e 200 m<sup>3</sup> em 20 min) apresentaram, ambos, aproximadamente 71% de probabilidade de encalhe na linha de costa, com tempo médio de chegada de 7 h 30 min e tempo mínimo registrado de 2 h 34 min. Em contraste, o cenário de derrame contínuo (1.000 m<sup>3</sup> em 24 h) mostrou maior probabilidade de impacto costeiro — aproximadamente 95% — e tempos de chegada mais curtos, com média de 3 h 54 min e menor intervalo observado de 2 h 28 min.

### 5.3.2.2 Cenário com ventos mais intensos (outubro de 2021)

Para o cenário representativo do mês de outubro, os três derrames analisados foram simulados sob condições idênticas: início em 08/10/2021 às 13:00, com ventos de sudeste de intensidade média de 7,5 m/s e ocorrência de baixa-mar de sizígia. O padrão de transporte da pluma contaminante apresenta similaridades com o observado nos eventos de março. Contudo, a maior intensidade dos ventos e correntes em outubro promove uma advecção mais rápida do óleo, reduzindo o tempo de chegada ao litoral e promovendo um transporte mais rápido da mancha até praias mais afastadas, a oeste do porto. Essa aceleração no transporte implica que, em poucas horas, a mancha pode atingir zonas costeiras sensíveis, tornando indispensável que as ações emergenciais considerem tempos de mobilização e resposta substancialmente menores.

Do ponto de vista operacional, a rápida aproximação da pluma à costa amplia o risco de impacto em setores litorâneos situados além da área de estudo, a oeste do município de

Caucaia. Nesses casos, a combinação de forte forçamento meteoceanográfico e maré de sizígia pode favorecer a dispersão longitudinal da mancha, alcançando trechos de costa com elevado valor ecológico e socioeconômico que não foram avaliados diretamente nesta modelagem. Esse cenário reforça a necessidade de planos de contingência que extrapolem os limites geográficos inicialmente analisados, incorporando rotas potenciais de transporte e áreas adjacentes vulneráveis ao encalhe.

As Figuras 54 à 60 ilustram, de forma integrada, a evolução temporal e o transporte da mancha de óleo para cada derrame representativo selecionado no mês de outubro. Analogamente ao mês de março, foi feita uma combinação de análises quantitativas, representadas pela variação espacial e temporal da espessura, e análises qualitativas, que descrevem a dinâmica de deslocamento das partículas e identificam os trechos do litoral potencialmente sujeitos ao encalhe do poluente.

Figura 55 – Visualização quantitativa (isolinhas de espessura do filme de óleo na camada superficial) da progressão da mancha de óleo de um derrame instantâneo (20 minutos) de 8 m<sup>3</sup> ocorrido no mês de outubro de 2021.

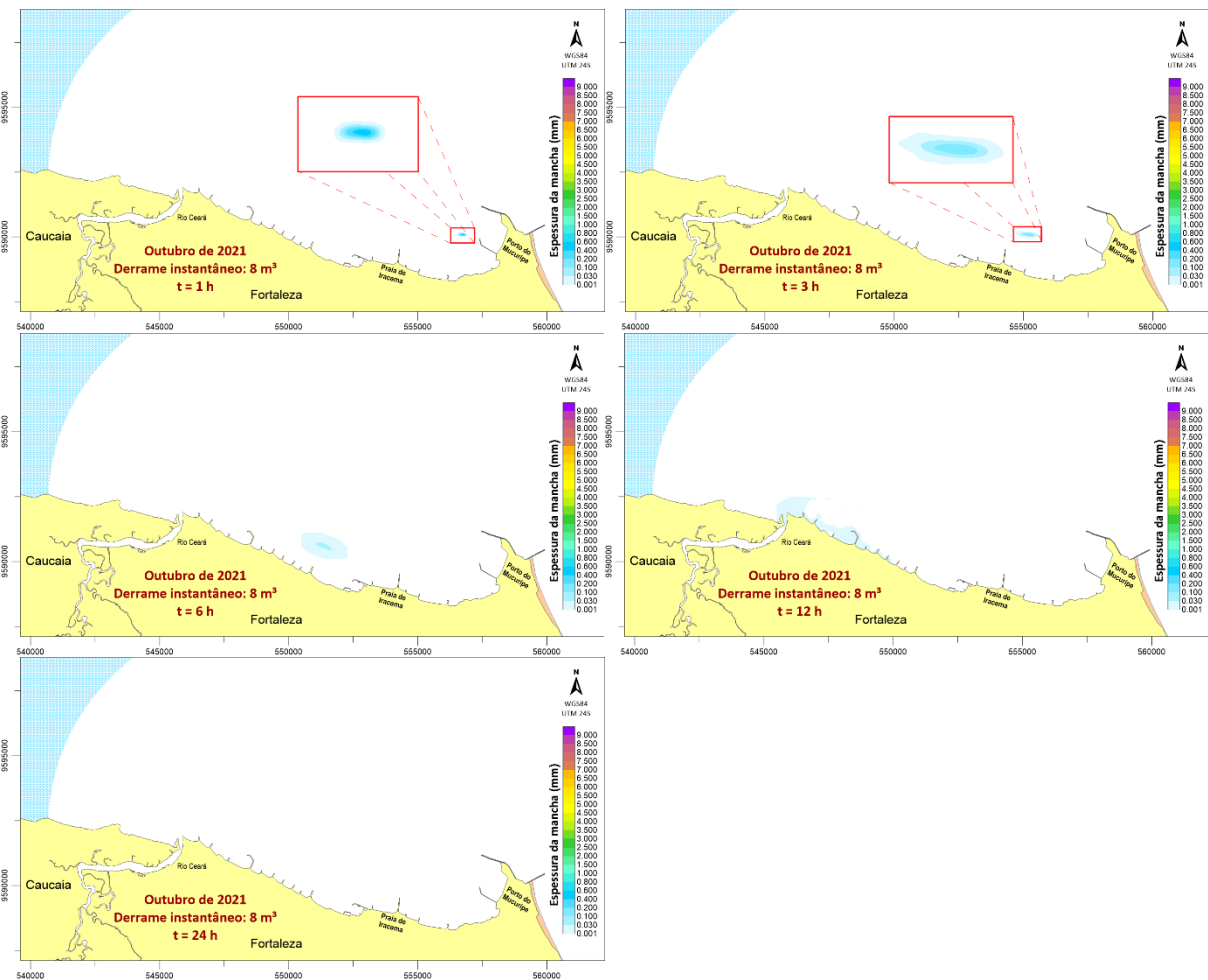


Figura 56 – Visualização qualitativa (nuvem de partículas, marcando em azul os trechos da costa atingidos pelo óleo) da mancha de óleo de um derrame instantâneo (20 minutos) de 8 m<sup>3</sup> ocorrido no mês de outubro de 2021.

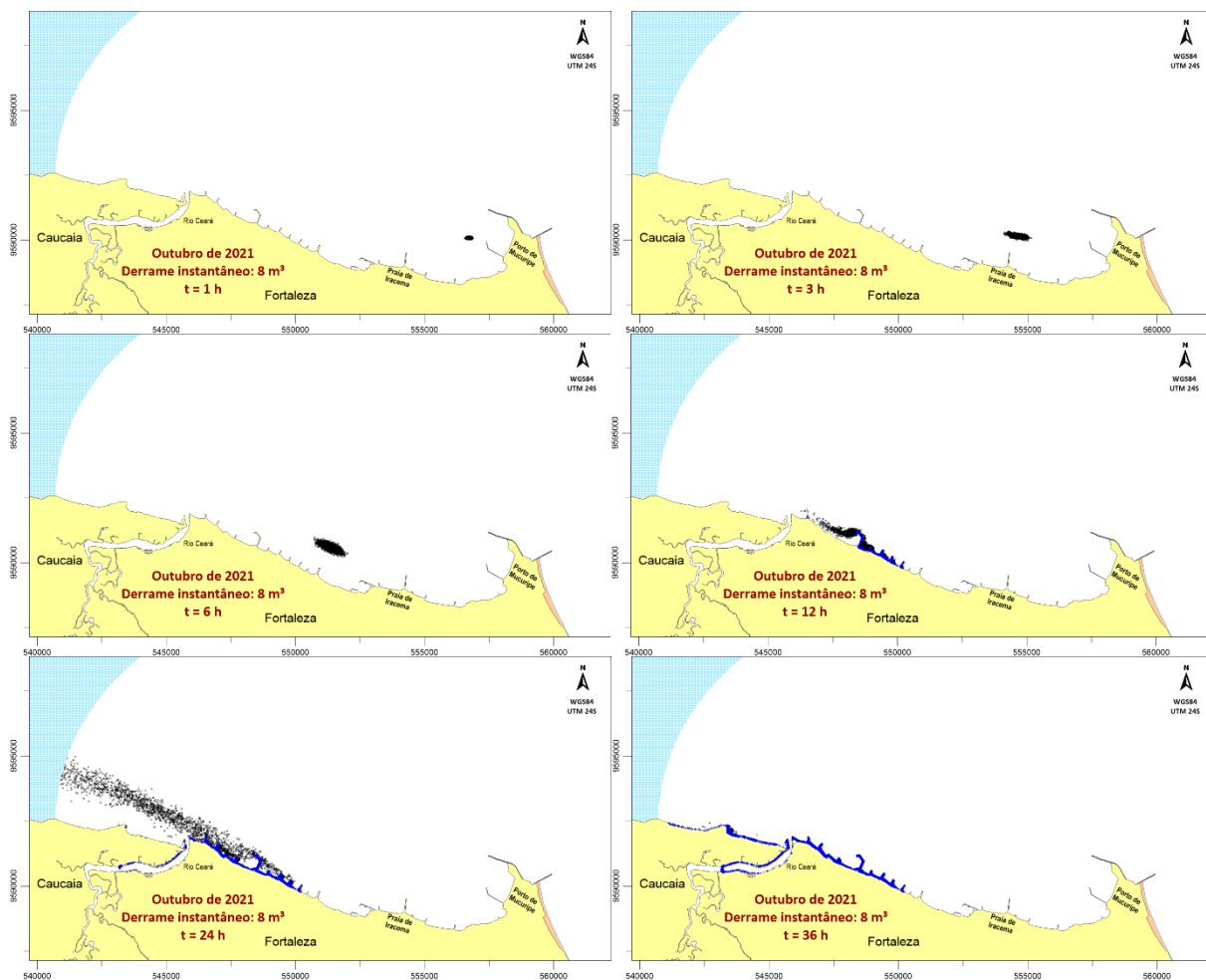


Figura 57 – Visualização quantitativa (isolinhas de espessura do filme de óleo na camada superficial) da progressão da mancha de óleo de um derrame instantâneo (20 minutos) de 200 m<sup>3</sup> ocorrido no mês de outubro de 2021.

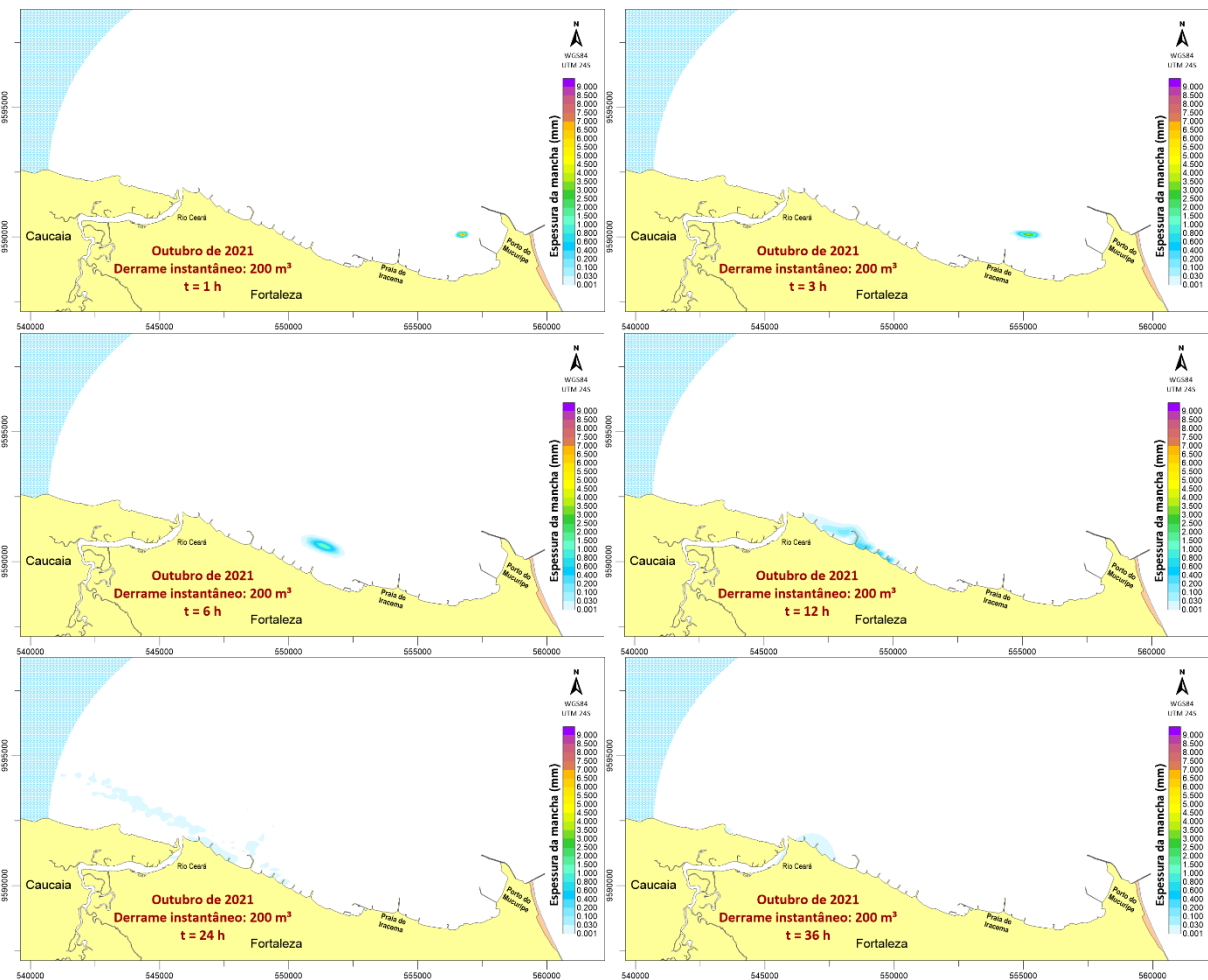


Figura 58 – Visualização qualitativa (nuvem de partículas, marcando em azul os trechos da costa atingidos pelo óleo) da mancha de óleo de um derrame instantâneo (20 minutos) de 200 m<sup>3</sup> ocorrido no mês de outubro de 2021.

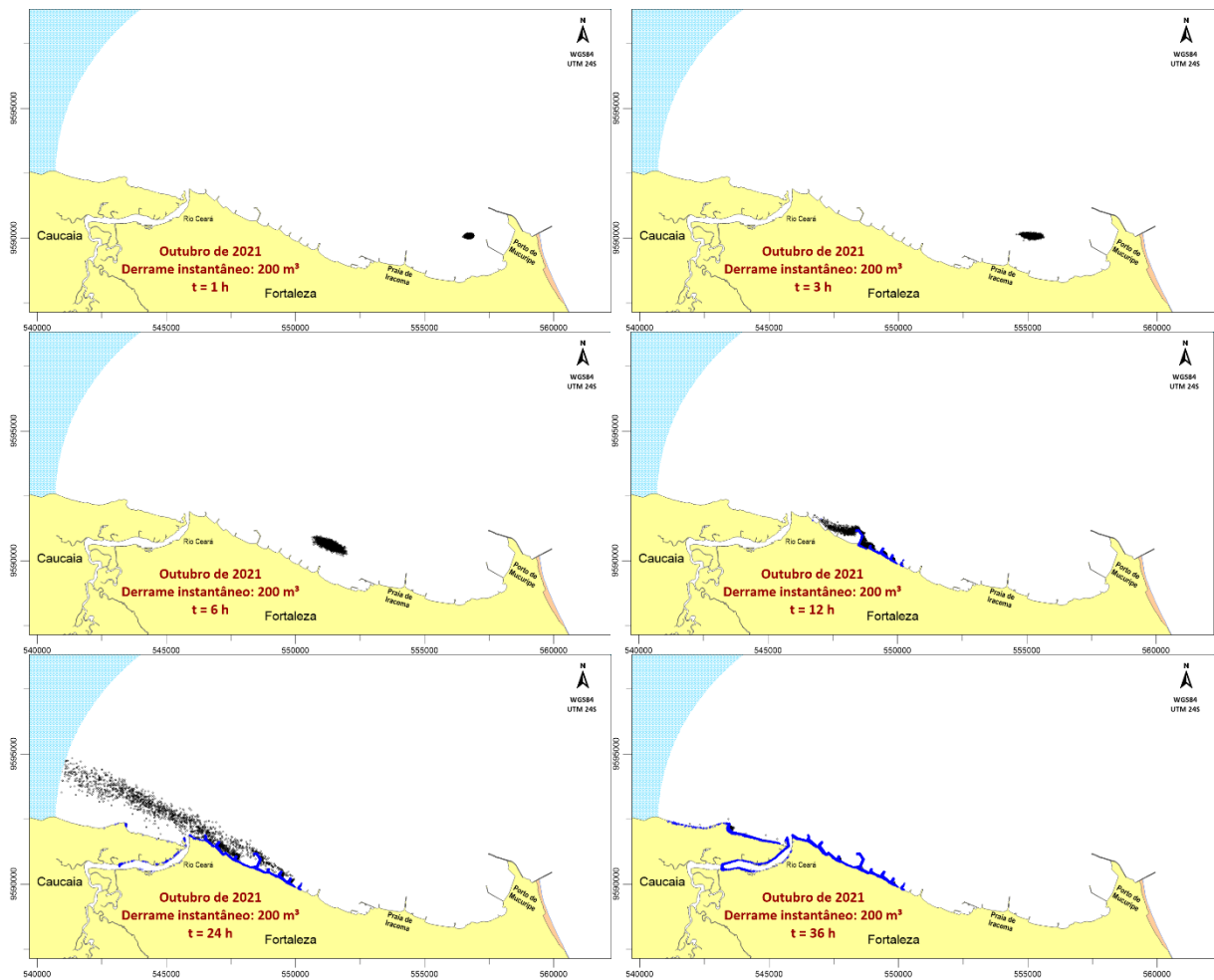


Figura 59 – Visualização quantitativa (isolinhas de espessura do filme de óleo na camada superficial) da progressão da mancha de óleo de um derrame de 1.000 m<sup>3</sup>, continuado por 24 horas, ocorrido no mês de outubro de 2021.

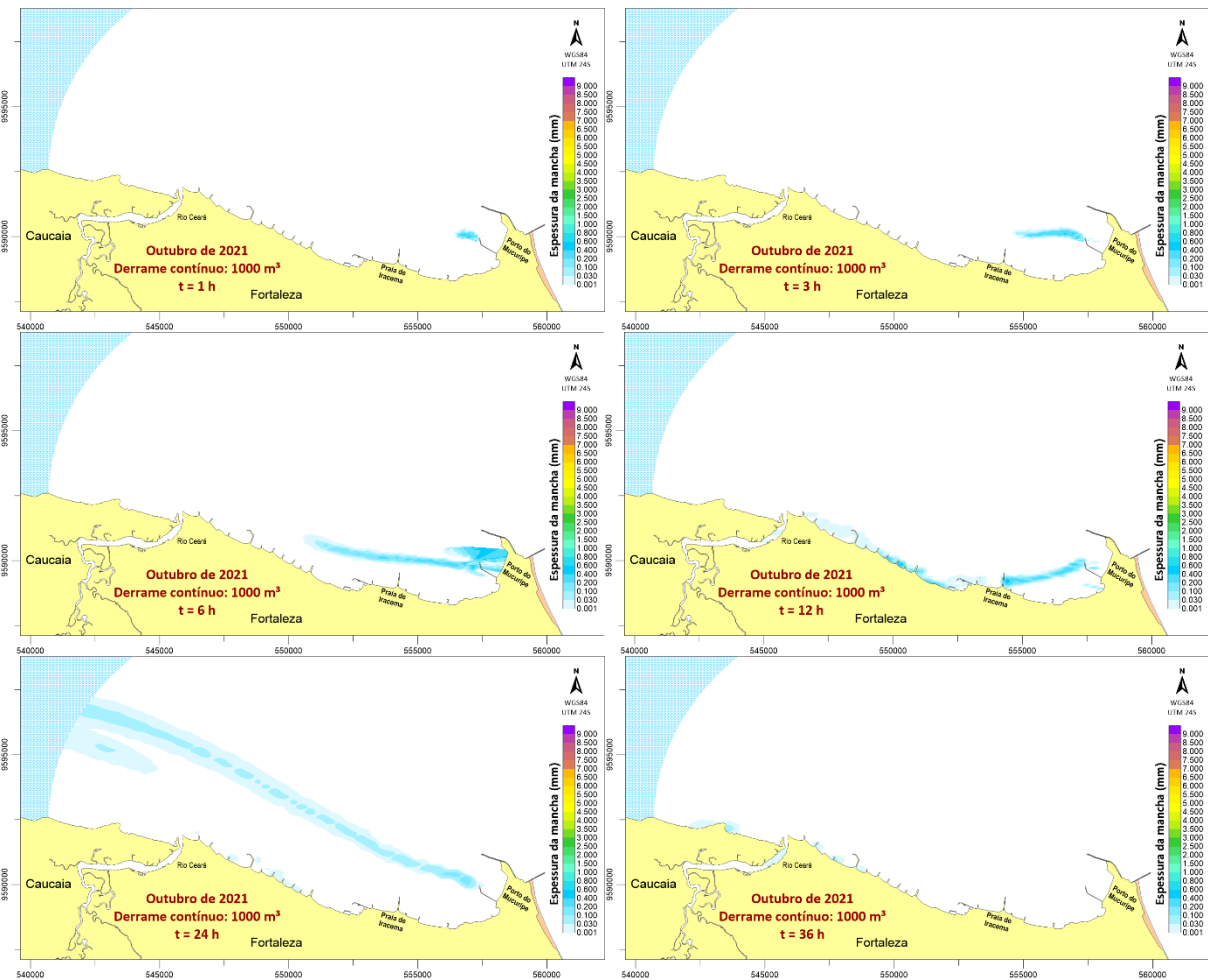
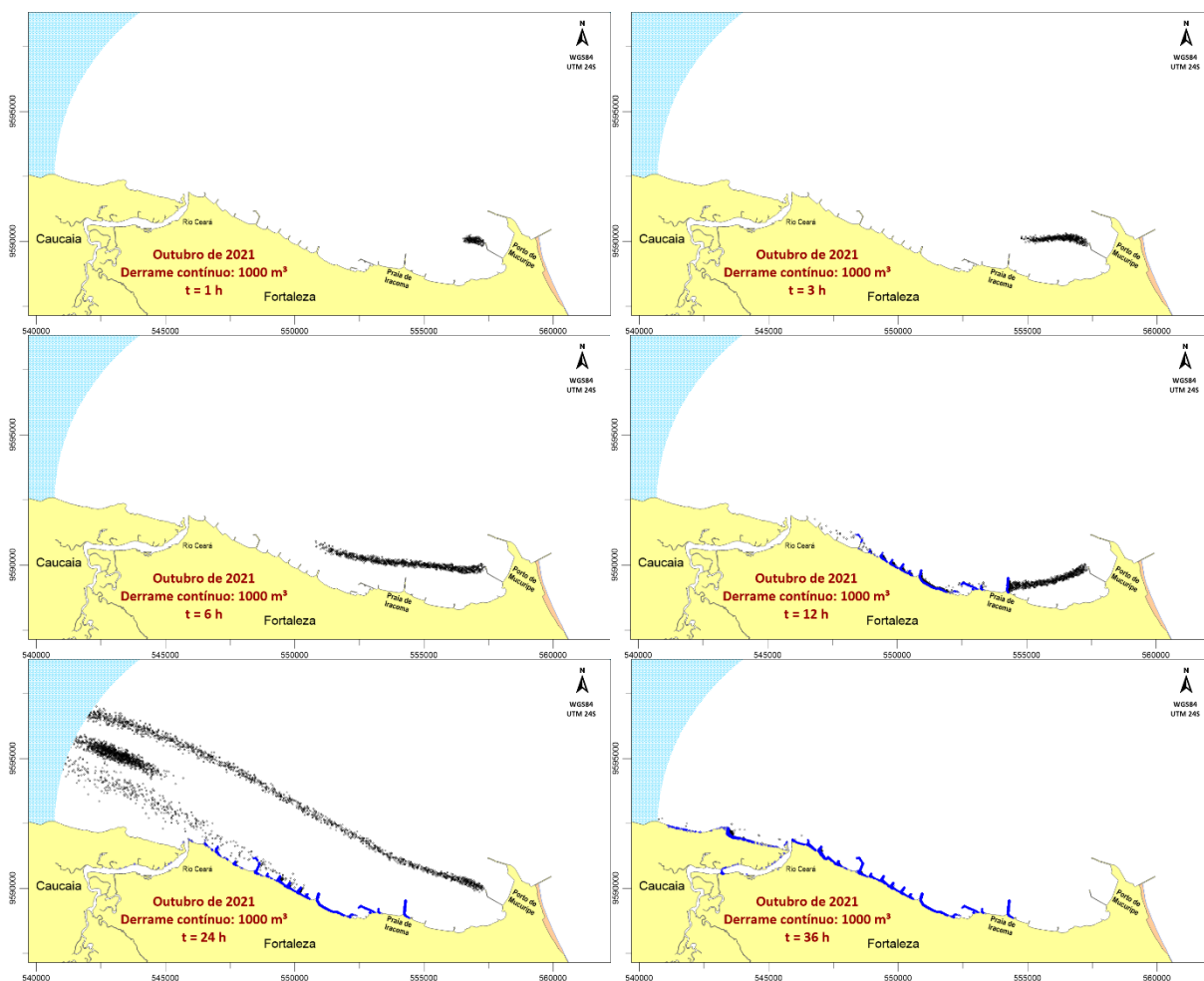


Figura 60 – Visualização qualitativa (nuvem de partículas, marcando em azul os trechos da costa atingidos pelo óleo) da mancha de óleo de um derrame de 1.000 m<sup>3</sup>, continuado por 24 horas, ocorrido no mês de outubro de 2021.



Com base nas tabelas de estatística de toque no litoral, o mês de outubro apresentou uma probabilidade de toque no litoral de 65% ao considerar os derrames instantâneos de 8 m<sup>3</sup> e 200 m<sup>3</sup>, com tempo médio de chegada de 4 h 44 min e tempo mínimo registrado de 2 h 20 min. Por sua vez, o cenário de derrame contínuo (1.000 m<sup>3</sup> em 24 h) indicou que 100% dos derrames atinge o litoral de Fortaleza e a média de tempo de chegada foi de 3 h 54 min, com o menor intervalo observado sendo de 2 h 28 min.

A partir das tabelas de estatística de toque no litoral, observou-se que, para o mês de outubro, os cenários de derrame instantâneo (8 m<sup>3</sup> e 200 m<sup>3</sup>) apresentaram probabilidade combinada de contato com a linha de costa de 65%. O tempo médio de chegada ao litoral nesses cenários foi de 4 h 44 min, com o menor tempo registrado igual a 2 h 20 min.

Por outro lado, o cenário de derrame contínuo (1.000 m<sup>3</sup> liberados ao longo de 24

h) indicou probabilidade de encalhe de 100% na área estudada, com tempo médio de chegada de 3 h 21 min e menor intervalo observado de 2 h.

## 6 CONCLUSÃO

As principais contribuições deste estudo residem em duas frentes complementares. Primeiramente, apresenta-se uma caracterização detalhada dos regimes de circulação hidrodinâmica da região costeira de Fortaleza, obtida por meio de modelagem numérica calibrada e avaliada por uma combinação de índices estatísticos. Essa avaliação multifacetada permite quantificar a robustez e a fidelidade do modelo na reprodução das condições observadas, fornecendo um fundamento objetivo para a interpretação dos resultados e delineando as suas limitações sob diferentes forçamentos meteoceanográficos.

Em segundo lugar, o estudo fornece previsões do transporte e do intemperismo de manchas de óleo associadas a cenários hipotéticos de derrame vinculados às operações do Porto do Mucuripe. Por meio de simulações que combinam forçamento de vento, marés e processos de intemperismo (incluindo parametrizações locais de perda por contato costeiro), foram identificadas as rotas predominantes de transporte, a evolução temporal da distribuição de espessura (concentração) das manchas e os trechos de costa com maior probabilidade de encalhe.

Os testes realizados com o intuito de validar o modelo exibiram boa aderência aos dados de campo do marégrafo do IBGE e do ADCP do Labomar/UFC. As comparações referentes à elevação da superfície resultaram em correlações excelentes —  $R^2 > 0,9$ ; PBIAS  $< \pm 1\%$ ; RMSE de 5 cm (março) e 14 cm (outubro) —, atestando a acurácia do modelo na previsibilidade de séries históricas a partir das constantes harmônicas de maré.

O confronto entre as séries de velocidade de correntes observadas pelo ADCP e os resultados das simulações hidrodinâmicas indica desempenho moderado do modelo. Embora a magnitude do erro absoluto (RMSE) tenha se mantido estável e a coerência temporal (CIM) apresentado valores elevados, o modelo reproduz com maior fidelidade a intensidade média e a estrutura temporal das correntes do que sua variabilidade instantânea, limitação que se mostra acentuada sob condições de ventos mais intensos.

Diante disso, recomenda-se cautela na interpretação de previsões sensíveis ao transporte de massa. Em trabalhos futuros, sugere-se priorizar:

- O refinamento da malha de elementos finitos e a atualização dos levantamentos batimétricos, objetivando melhorar a representação espacial do campo de velocidades;
- a revisão e o enriquecimento das séries históricas de vento, objetivando

reduzir erros no forçamento eólico; e

- a condução de análises de sensibilidade e de incerteza, bem como campanhas de campo direcionadas à calibração local.

Essas medidas tendem a reduzir as discrepâncias observadas e a aumentar a confiabilidade das previsões de transporte da pluma contaminante.

O campo de correntes medido no local do fundeio original do ADCP indica predominância de fluxo para NW em ambos os períodos analisados. Entretanto, as simulações na vizinhança do píer petroleiro apontam para um campo mais complexo, com duas direções dominantes, para NW e para SW.

Para trabalhos futuros, sugere-se o fundeio de pelo menos um ADCP na área do píer, objetivando o enriquecimento do processo de calibração do modelo. A presença de medidas *in situ* naquele ponto é importante para:

- Reduzir a incerteza associada a gradientes espaciais de velocidade e direção entre o local de medição existente e o campo hidrodinâmico de interesse;
- caracterizar o cisalhamento vertical e eventuais estruturas de corrente locais, como redemoinhos associados ao píer, que influenciam diretamente o transporte longitudinal e o encalhe de plumas; e
- fornecer séries temporais adequadas para validar respostas do modelo a variações de maré e vento.

Apesar de existirem ajustes passíveis de incrementar a acurácia do modelo, o padrão hidrodinâmico obtido mostrou-se coerente com estudos prévios sobre a circulação costeira da região, realizados por Rodrigues (2023) e Pereira *et al.* (2024). A avaliação através de métricas estatísticas ( $R^2$ , RMSE, PBIAS e CIM) não apenas quantifica as incertezas inerentes à simulação, mas também fornece critérios objetivos para orientar futuras intervenções de calibração, como as recomendações supracitadas.

As simulações estocásticas do derrame de óleo e do transporte das plumas visaram produzir previsões probabilísticas da contaminação por hidrocarbonetos na zona costeira de Fortaleza, resultante de acidentes operacionais portuários. Os resultados das simulações foram sintetizados em mapas que representam a evolução temporal e espacial da pluma oleosa, incluindo trajetórias de partículas, isolinhas de espessura e mapas de acúmulo em faixa costeira.

Essa representação permitiu caracterizar de forma detalhada o comportamento das plumas resultantes de derrames hipotéticos no entorno do Porto do Mucuripe, por meio de: (1) mapas temporais de trajetória acompanhados de isolinhas de concentração (espessura do filme)

do óleo; (2) mapas probabilísticos de passagem da mancha, considerando a probabilidade de as concentrações de hidrocarbonetos superarem limites de referência ou níveis toleráveis; (3) mapas de trajetória de partículas e de deposição costeira, que identificam os trechos litorâneos mais propensos ao encalhe e ao acúmulo de massa oleosa; e (4) estatísticas dos tempos de chegada ao litoral. Essa abordagem integrada e probabilística, largamente adotada na literatura recente (LIUBARTSEVA *et al.*, 2021; LIUBARTSEVA *et al.*, 2023;), fornece uma visão clara tanto do potencial impacto quanto da evolução temporal dos eventos de derrame, oferecendo insumos quantitativos valiosos para priorização de monitoramento, planejamento de resposta e definição de medidas mitigadoras.

De forma geral, o mês de outubro apresentou-se como o período mais crítico, uma vez que as maiores intensidades de ventos e correntes observadas nessa época favorecem o transporte acelerado do óleo, tanto em direção ao litoral de áreas adjacentes quanto para regiões mais distantes, incluindo zonas ambientalmente sensíveis situadas além da área portuária. Tal característica reforça a necessidade de implementação de respostas emergenciais mais ágeis, destacando outubro como um cenário de referência para o planejamento e a definição de estratégias de mitigação em casos de derramamento.

Dada a relativa proximidade do píer do porto com a faixa litorânea e as condições hidrodinâmicas locais, todos os cenários simulados indicaram elevado potencial de contato do óleo com a linha de costa, caso nenhuma medida de contenção seja adotada em tempo hábil. Os derrames instantâneos de 8 m<sup>3</sup> e 200 m<sup>3</sup> apresentaram comportamentos praticamente equivalentes, diferenciando-se apenas pela área da mancha formada, em função da diferença volumétrica. Já os derrames contínuos revelaram impactos ambientais significativamente mais severos, com aumento da probabilidade de toque e da extensão da faixa litorânea potencialmente atingida, além da redução do tempo médio de chegada do óleo até o litoral.

A adoção de cenários estocásticos diversificados estabelece uma base metodológica robusta para a formulação e validação de estratégias emergenciais. Ao contrário de abordagens determinísticas, que focalizam eventos pontuais e sob condições pré-determinadas, a modelagem estocástica incorpora variabilidade e incertezas, permitindo a consideração de um amplo espectro de acidentes potenciais sob distintas combinações de variáveis ambientais. Essa pluralidade de cenários propicia um mapeamento probabilístico das áreas críticas, realçando as zonas de maior vulnerabilidade (LIUBARTSEVA *et al.*, 2021; LIUBARTSEVA *et al.*, 2023; JIANG *et al.*, 2024).

Além disso, é possível integrar sistemas de monitoramento em tempo real e esse

tipo de abordagem, buscando fortalecer a tomada de decisão operacional. A informação dinâmica e probabilisticamente informada melhora significativamente a capacidade de resposta rápida e embasada, elevando a eficiência e a segurança das ações emergenciais, com vistas à mitigação de impactos ambientais adversos.

O SisBaHiA<sup>®</sup> revelou-se uma ferramenta robusta para a modelagem do transporte de plumas oleosas, especialmente quando acoplado ao módulo de intemperismo ADIOS2. Essa integração permite representar de forma bastante coerente os principais processos de transformação superficial (advecção, evaporação, dispersão e emulsificação) articulados com a advecção e a difusão advindas do campo hidrodinâmico local, resultando em produtos úteis para avaliação de risco e planejamento de resposta.

Múltiplos avanços recentes demonstram o papel crescente do sensoriamento remoto na detecção e monitoramento de derrames de óleo, representando um recurso valioso para a calibração e validação de modelos de transporte de hidrocarbonetos no ambiente costeiro (ZHANG, 2022; DE PADOVA *et al.*, 2016). Além de aprimorar a caracterização do arraste e dispersão da mancha à deriva, produtos de sensoriamento remoto (em particular, imagens térmicas no infravermelho) têm-se mostrado promissores para quantificar aspectos do intemperismo do óleo, dada a correlação observada entre temperatura de superfície e espessura do filme oleoso (JIANG *et al.*, 2022).

A integração operacional entre modelos hidrodinâmicos e de transporte e técnicas de sensoriamento remoto constitui, portanto, uma via natural para aprofundar e fortalecer os resultados apresentados neste trabalho. Recomenda-se que estudos futuros implementem procedimentos formais de assimilação de dados e de validação multiplataforma, apoiados por métricas estatísticas objetivas, de modo a quantificar rigorosamente incertezas e ganhos de desempenho decorrentes do uso de observações remotas.

Como aplicação prioritária desta recomendação, sugere-se investigar a poluição crônica associada a operações portuárias rotineiras, tais como vazamentos operacionais de pequena escala, descarte de águas de lastro e lavagem de equipamentos, enfatizando os efeitos cumulativos produzidos pela exposição prolongada do sistema costeiro ao petróleo. Estudos desse tipo devem combinar séries temporais de sensoriamento remoto com campanhas de amostragem *in situ* para:

- Caracterizar espacialmente áreas-alvo de contaminação;
- avaliar processos de intemperismo e transporte em diferentes condições meteorológicas e oceanográficas; e

- estimar cargas e frequências de eventos de baixa intensidade que, isoladamente, podem passar despercebidos, mas, em conjunto, resultar em impacto ambiental significativo.

## 7 REFERÊNCIAS

- ABDULAH, S. D.; HUSEN, S. B.; MULETA, A. H. Comparison and evaluation of hydrologic performance of satellite, reanalysis and climate model-based precipitation products in the Upper Awash River Basin, Ethiopia. **Water Practice & Technology**, v. 19, n. 7, p. 2473–2491, 2024.
- AMIR-HEIDARI, P. et al. A state-of-the-art model for spatial and stochastic oil spill risk assessment: A case study of oil spill from a shipwreck. *Environment international*, v. 126, p. 309–320, 2019.
- ALDARIAS, A. *et al.* Validation of Sentinel-3a SARAL coastal sea level data at high posting rate: 80Hz. **arXiv [physics.ao-ph]**, 2023. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.07183>.
- ANA, 2020. Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020**. informe anual. 118 p. Brasília, 2020.
- ANP, 2025. Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2024**. Ministério de Minas e Energias. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-brasileiro-do-petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis-2024#Se%C3%A7%C3%A3o%201>. Acesso em 24 de junho de 2025.
- ASTM. **ASTM D4175 - Standard terminology relating to petroleum, petroleum products, and lubricants**. In: Annual Book of Standards. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA. Volume 05.01. 2024
- AZEVEDO, R. N. A. *et al.* Is there a similarity between the 2019 and 2022 oil spills that occurred on the coast of Ceará (Northeast Brazil)? An analysis based on forensic environmental geochemistry. **Environmental pollution** (Barking, Essex: 1987), v. 314, 2022.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução N° 398, de 11 de junho de 2008**. Dispõe sobre o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional, originados em portos organizados, instalações portuárias, terminais, dutos, sondas terrestres, plataformas e suas instalações de apoio, refinarias, estaleiros, marinas, clubes náuticos e instalações similares, e orienta a sua elaboração. Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF, 12 jun. 2008.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n° 393, de 8 de agosto de 2007**. Dispõe sobre o descarte contínuo de água de processo ou de produção em plataformas marítimas de petróleo e gás natural. Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, 9 ago. 2007.
- BRASIL. Comando da Marinha do Brasil. Diretoria de Portos e Costas. **Norma Técnica Ambiental para Elaboração de Laudo Técnico Ambiental – NORTAM 09**. 62p. 2007
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Atlas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo das Bacias Marítimas do Ceará e Potiguar**. Brasília: MMA, 2004. 55 p.

- BREAKER, L. C.; BRATKOVICH, A. Coastal-ocean processes and their influence on the oil spilled off San Francisco by the M/V Puerto Rican. **Marine environmental research**, v. 36, n. 3, p. 153–184, 1993. [https://doi.org/10.1016/0141-1136\(93\)90094-G](https://doi.org/10.1016/0141-1136(93)90094-G).
- CAMELO, H. N. *et al.* **Análise estatística da velocidade do vento no estado do Ceará**. Rev. Tecnol. Fortaleza, v. 29, n. 2, p.211-223, dez. 2008.
- CARVALHO, A. C. B. DE *et al.* Modeling a hypersaline lagoon to evaluate salinity changes due to morphology of an ocean connection. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 29, 2024.
- CHIAU, W.-Y. Changes in the marine pollution management system in response to the Amorgos oil spill in Taiwan. **Marine pollution bulletin**, v. 51, n. 8–12, p. 1041–1047, 2005
- COMPANHIA DOCAS DO CEARÁ (CDC). **Plano Mestre do Porto do Mucuripe**. Fortaleza: CDC, 2015. 120 p. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/se10-pdf/@download/file/se10.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2025.
- CORREIA LIMA, E. J. A. *et al.* The effect of wind parametrizations in MEDSLIK-II oil spill simulations: A case study of the FPU P-53 incident in Brazilian waters. **Marine pollution bulletin**, v. 218, n. 118118, p. 118118, 2025.
- DELVIGNE, G. A. L.; SWEENEY, C. E. **Natural dispersion of oil**. Oil and Chemical Pollution, v. 4, p. 281 – 310, 1988.
- DE PADOVA, D. *et al.* Synergistic use of an oil drift model and remote sensing observations for oil spill monitoring. **Environmental science and pollution research international**, v. 24, n. 6, p. 5530–5543, 2017.
- DONG, Y. *et al.* Chronic oiling in global oceans. **Science (New York, N.Y.)**, v. 376, n. 6599, p. 1300–1304, 2022.
- DURAP, A. Interpretable machine learning for coastal wind prediction: Integrating SHAP analysis and seasonal trends. **Journal of coastal conservation**, v. 29, n. 3, 2025.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados: Fortaleza**. 2022. Disponível em: [cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/fortaleza](https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/fortaleza). Acesso em: 21/02/2021.
- DOERFFER, J. **Oil spill response in the marine environment**. Oxford: Pergamon Press, 1992.
- FARAH, Marco A. **O Petróleo e seus Derivados**. Rio de Janeiro: LTC, 2012. E-book. p.17. ISBN 978-85-216-2151-5. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2151-5/>. Acesso em: 08 nov. 2024.
- FAY, James A. **The Spread of Oil Slicks on a Calm Sea**. Massachusetts Institute of Technology, 1969.

FAY, J.A. Physical processes in the spread of oil on a water surface. **Proceedings of the Joint Conference on the Prevention and Control of Oil Spills**, Washington, p. 463-467, 1971.

FINGAS, et al. Physical and Chemical Studies on Dispersants: The effect of Dispersant **Amount and Energy**. Proceedings of the Sixteenth Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar, EnvironmentCanada, Ottawa, 1993. p. 861-876.

FINGAS, et al., **Oil Spill Behaviour and Modeling**. Environmental Technology Center, Environment Canada, Ottawa, Canada 1996.

FINGAS, M. **Oil spill science and technology**. Prevention, Response and Clean-up, Boston, 2011. ISBN: 978-1-85617-943-0.

FINGAS, M. F. **Handbook of oil spill science and technology**. Chichester: Wiley-Blackwell, 2015. ISBN 978-0-470-45551-7

FINGAS, M. F. **Oil spill science and technology**. Second edition. Cambridge, Ma; Singapore: Gulf Professional Publishing, 2017. ISBN: 978-0-12-809413-6

FRENCH-MCCAY, D. P. et al. Validation of oil trajectory and fate modeling of the Deepwater Horizon oil spill. **Frontiers in marine science**, v. 8, 2021.

GEYER, W. R.; SIGNELL, R. Measurements of tidal flow around a headland with a shipboard acoustic Doppler current profiler. **Journal of geophysical research**, v. 95, n. C3, p. 3189, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1029/JC095iC03p03189>

GÓIS, D. M. M. **Estudo da circulação hidrodinâmica e da dispersão de óleo na zona costeira entre Macau e Galinhos RN**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Sanitária). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008

GUO, W. Development of a statistical oil spill model for risk assessment. **Environmental pollution** (Barking, Essex: 1987), v. 230, p. 945–953, 2017.

GUO, W. *et al.* A modified probabilistic oil spill model and its application to the Dalian New Port accident. **Ocean engineering**, v. 121, p. 291–300, 2016.

GURGEL, F. O. M. J. **Aplicações de Modelagem Hidrodinâmica para Ações de Resposta a Incidentes de Poluição por Óleo: Estudo de Caso da Enseada dos Anjos em Arraial do Cabo-RJ**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Urbana e Ambiental). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2016.

HUANG, J. C. **A review of the state-of-the-art of oil spill fate/behavior models**. Oil Spill Conference, Portsmouth, Rhode Island, 1983.

IMO (International Maritime Organization). **International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation (OPRC)**. Londres: IMO, 1990. Disponível em: <https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume%201987/volume-1987-I-34547-English.pdf>.

IMO (International Maritime Organization). **International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)**, adotada em 2 de novembro de 1973 e modificada pelo Protocolo de 1978. Londres: IMO, 1978. Disponível em: <https://portalcip.org/wp-content/uploads/2024/05/MARPOL-INGLES.pdf>.

IMO (International Maritime Organization). **International Convention on Civil Liability for Oil Pollution Damage (CLC)**. Londres: IMO, 1969. Disponível em: <https://cil.nus.edu.sg/wp-content/uploads/2019/02/1969-CLC.pdf>.

IMO (International Maritime Organization). **International Convention for the Prevention of Pollution of the Sea by Oil (OILPOL)**. Londres: IMO, 1954. Disponível em: <https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume%20327/volume-327-I-4714-English.pdf>.

IOPC Fund (International Oil Pollution Compensation Fund). **International Convention on the Establishment of an International Fund for Compensation for Oil Pollution Damage – 1992 Protocol**. Londres: IOPC Fund, 1992. Disponível em: <https://cil.nus.edu.sg/wp-content/uploads/2019/02/1992-Oil-Pollution-Fund-Convention.pdf>.

IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. 280 p. Cambridge University Press. 2021.

IPECE. **Perfil Municipal de Fortaleza**. 2017. Disponível em: [https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Fortaleza\\_2017.pdf](https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Fortaleza_2017.pdf). Acesso em 21/02/2025.

ITOPF, 2025. **Oil Tanker Spill Statistics 2024**. Disponível em: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/oil-tanker-spill-statistics-2024/>. Acesso em: 22 jun. 2025.

ITOPF. **Aerial observation of marine oil spills**. technical information paper N 1, 2024. Disponível em: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/tip-01-aerial-observation-of-marine-oil-spills/>. Acesso em: 7 de janeiro 2025.

ITOPF. **Effects of oil pollution on fisheries and mariculture**. technical information paper N 11, 2014a. Disponível em: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/tip-11-effects-of-oil-pollution-on-fisheries-and-mariculture/>. Acesso em: 7 de janeiro 2025.

ITOPF. **Effects of oil pollution on social and economic activities**. technical information paper N 12, 2014b. Disponível em: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/tip-12-effects-of-oil-pollution-on-social-and-economic-activities/>. Acesso em: 7 de janeiro 2025.

ITOPF. **Effects of oil pollution on the marine environment**. technical information paper N 13, 2014c. Disponível em: <https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/tip-13-effects-of-oil-pollution-on-the-marine-environment/>. Acesso em: 7 de janeiro 2025.

ITOPF. **Fate of marine oil spills**. technical information paper N 2, 2014d. Disponível em:

<https://www.itopf.org/knowledge-resources/documents-guides/tip-02-fate-of-marine-oil-spills/>. Acesso em: 7 de janeiro 2025.

JIANG, W. *et al.* Emergency materials management of petrochemical accidents considering the randomness and uncertainty base on stochastic programming. **Frontiers in energy research**, v. 12, n. 1370291, 2024. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1370291>.

JIANG, Z. *et al.* **Research on thermal infrared remote sensing detection of oil spill on sea surface**. IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Anais...IEEE, 2022.

JONES, C. E. *et al.* Measurement and modeling of oil slick transport. **Journal of geophysical research. Oceans**, v. 121, n. 10, p. 7759–7775, 2016. <https://doi.org/10.1002/2016JC012113>.

KERAMEA, P. *et al.* Oil spill modeling: A critical review on current trends, perspectives, and challenges. **Journal of marine science and engineering**, v. 9, n. 2, p. 181, 2021. <https://doi.org/10.3390/jmse9020181>

KONTOVAS, C. A.; PSARAFTIS, H. N.; VENTIKOS, N. P. An empirical analysis of IOPCF oil spill cost data. **Marine pollution bulletin**, v. 60, n. 9, p. 1455–1466, 2010.

KUANG, C. *et al.* Effect of wind-wave-current interaction on oil spill in the Yangtze River Estuary. **Journal of marine science and engineering**, v. 11, n. 3, p. 494, 2023. <https://doi.org/10.3390/jmse11030494>.

LEHR, W. J. **Review of modeling procedures for oil spill weathering behavior**. Advances in Ecological Sciences, v. 9, p. 51-90, 2001.

LEHR, W. J. *et al.* **Revisions of the ADIOS oil Spill Model**. Environmental Modelling & Software, p. 191-199, 2002.

LEMOS, A. *et al.* Ship Route Oil Spill Modeling: A Case Study of the Northeast Brazil Event, 2019. **Appl. Sci.** 2024, 14, 865. doi: <https://doi.org/10.3390/app14020865>.

LIUBARTSEVA, S. *et al.* Modeling chronic oil pollution from ships. **Marine pollution bulletin**, v. 195, 2023

LIUBARTSEVA, S. *et al.* Stochastic oil spill modeling for environmental protection at the Port of Taranto (southern Italy). **Marine pollution bulletin**, v. 171, 2021.

MACHADO, B. V. Z.; DA SILVA, R. M. L. C. F. **Análise da Influência da Baía da Guanabara na Qualidade da Água das Praias Oceânicas Adjacentes através da Modelagem Computacional**, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

MACKAY *et al.* Oil spill processes and models., Manuscript Report No. EE-8. **Environment Canada**, Ottawa, Ontario 1980.

MARTA-ALMEIDA, M. *et al.* Efficient tools for marine operational forecast and oil spill

tracking. **Marine pollution bulletin**, v. 71, n. 1–2, p. 139–151, 2013.

MISHRA, A. K.; KUMAR, G. S. Weathering of oil spill: Modeling and analysis. **Aquatic procedia**, v. 4, p. 435–442, 2015.

MORIASI, D. N. *et al.* Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. **Transactions of the ASABE**, v. 58, n. 6, p. 1763–1785, 2015.

MORIASI, D. N. *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE (NASEM). 2020. **The Use of Dispersants in Marine Oil Spill Response**. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25161>.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). 2003. **Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects**. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/10388>.

NKHONJERA, G. K.; DINKA, M. O.; WOYESSA, Y. E. Assessment of localized seasonal precipitation variability in the upper middle catchment of the Olifants River basin. **Journal of water and climate change**, v. 12, n. 1, p. 250–264, 2021.

ODOKUMA, L. O.; WILLIAMS, J. O. **A mathematical model incorporating the influence of biodegradation on the fate of a simulated oil spill in a brackish aquatic system**. British Journal of Environment and Climate Change, v. 2, n. 1, p. 73–98, 2012.

OWENS, E. H.; TAYLOR, E.; HUMPHREY, B. The persistence and character of stranded oil on coarse-sediment beaches. **Marine pollution bulletin**, v. 56, n. 1, p. 14–26, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.08.020>

PALADINO, E. E. **Modelagem matemática e simulação numérica de trajetórias de derrames de petróleo no mar**. 110 p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Florianópolis, 2000.

PEREIRA, S. P. *et al.* A novel tool for modeling the near- and far-field dispersion of brine effluent from desalination plants. **Frontiers in marine science**, v. 11, 2024.

PEREIRA, S. P. *et al.* Brine outfall modeling of the proposed desalination plant of Fortaleza, Brazil. **Desalination and water treatment**, v. 234, p. 22–30, 2021.

PEREIRA, S. P. *et al.* Modeling of coastal water contamination in Fortaleza (Northeastern Brazil). **Water Sci Technol**. 2015; 72(6):928–36. doi: 10.2166/wst.2015.292.

PEREIRA, S. P.; ROSMAN, P. C. C. **Modelagem computacional da pluma de efluentes do emissário submarino de Fortaleza**. 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Recife, PE, set. 2009.

PETROBRAS. 2025. **Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste (Lubnor)**. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/quem-somos/refinarinaria-lubrificantes-derivados->

nordeste>. Acesso em: 13 jul. 2025.

POSSOBON, R. Z.; ESTEVES, R. C.; PEREIRA, A. C. S.; XAVIER, G. Brazilian regulation on oil spill: The need of review. **International Oil Spill Conference Proceedings, 2021(1)**. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2021.1.689571>. 2021.

PRASAD, S. J. *et al.* Oil spill trajectory prediction with high-resolution ocean currents. **Journal of operational oceanography**, v. 13, n. 2, p. 84–99, 2020.

REED, M. *et al.* Oil spill modeling toward the close of the 20th century: Overview of the state-of-art. **Spill Science and Technology Bulletin**, 1999.

REED, M. The physical fates component of the natural resource damage assessment model system. **Oil & Chemical Pollution**, v.5. 1989, p. 99-123

REDDY, C. M. *et al.* Synergy of analytical approaches enables a robust assessment of the Brazil mystery oil spill. **Energy & fuels: an American Chemical Society journal**, v. 36, n. 22, p. 13688–13704, 2022.

RODRIGUES, M. F. **ANÁLISE DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES COM BOIÂNCA NEGATIVA EM CORPOS DE ÁGUA NATURAIS**. 2023. 81p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

ROGOWSKA, J.; WOLSKA, L; NAMIEŚNIK, J. Impacts of pollution derived from ship wrecks on the marine environment on the basis of s/s “Stuttgart” (Polish coast, Europe). *Science of the Total Environment*, v. 408, n. 23, p. 5775-5783, 2010.

ROLLNIC, M.; MEDEIROS, C. Application of a probabilistic sediment transport model to guide beach nourishment efforts. **Journal of coastal research**, v. 165, p. 1856–1861, 2013.

ROSMAN, P. C. C. (Editor) **Referência Técnica do SisBaHiA®**. Fundação COPPETEC - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2025. 426 p. Acesso em fevereiro 2025. Disponível em: [www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br).

ROSMAN, P.C.C. **Um critério para uniformizar os limites de apresentação de resultados de modelos de derrame de óleo**. – PENO – Programa de Engenharia Costeira e Oceanográfica. 2000.

ROSMAN, P.C.C. **Subsídios para Modelagem de Sistemas Estuarinos** In: Métodos Numéricos em Recursos Hídricos (Vol 3). Org. por Rosman, P.C.C., Mascarenhas, F.C.B., Miguez, M.G., Campos, R.O.G., Eiger, S. 1ª ed., capítulo 3, Rio de Janeiro, RJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 1997.

ROSMAN, P. C. C. (1987), **Modeling Shallow Water Bodies via Filtering Techniques**. Tese de Doutorado – Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology. Julho de 1987.

ROSSO, T. C. A. **Modelo hidrodinâmico para o transporte de mancha de óleo em regiões costeiras**. 1997. 115 p. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 1997.

SBRAGIO, R.; FILHO, O. R.; MARTINS, M. R. Methodology for the estimation of an oil spill origin: Analysis of the 2019 Brazilian coast oil spill. **Marine pollution bulletin**, v. 197, 2023.

SHEN, H.T.; YAPA, P.D.; PETROSKI, M.E. A Simulation Model for Oil Slick Transport in Lakes. **Water Resources Research**, Vol. 23, No. 10, p. 1949- 1957. October, 1987.

SILVA, R. A. G.; PEREIRA, S. P.; ROSMAN, P. C. C. Modelagem numérica da circulação costeira e das correntes litorâneas na costa de Fortaleza – Ce. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS - SBRH, XXII.**, 26 nov. a 01 dez. 2017, Florianópolis, Santa Catarina-Brasil. Anais [...] Florianópolis, Santa Catarina, 2017. Tema: “Ciência e tecnologia da água: inovação e oportunidades para o desenvolvimento sustentável”. 2017.

SIMPSON, J. H.; SOUZA, A. J. The modification of tidal ellipses by stratification in the Rhine ROFI. **Continental shelf research**, v. 100, n. C4, p. 7037–7044, 1995.

SINGH, A. et al. Potential oil spill risk from shipping and the implications for management in the Caribbean Sea. **Marine pollution bulletin**, v. 93, n. 1–2, p. 217–227, 2015.

SIQUEIRA, L. F. G. **Sobre a Eficiência de Operações de Recolhimento de Derramamentos de Óleo com e sem Técnica de Decantação**. 163p. Dissertação (Mestre em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

SOARES, M. O. et al. Déjà vu: New oil spill poses cumulative risks to protected coastal environments in the South Atlantic. **Marine policy**, v. 155, n. 105764, p. 105764, 2023.

SOARES, M. O. et al. Brazil oil spill response: Time for coordination. **Science (New York, N.Y.)**, v. 367, n. 6474, p. 155, 2020.

SOTO, Y. J. M. A modelagem hidrodinâmica como apoio a tomada de decisão em caso de derrame de óleo na parte interna do complexo estuarino Antonina-Paranaguá-PR. 2004. 187 p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2004.

STACEY, M. T.; MONISMITH, S. G.; BURAU, J. R. Measurements of Reynolds stress profiles in unstratified tidal flow. **Journal of geophysical research**, v. 104, n. C5, p. 10933–10949, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1029/1998JC900095>.

STRINGARI, C. E. *et al.* Modeling an oil spill along the southern brazilian shelf: Forcing characterization and its influence on the oil fate. **International Journal of Geosciences**, Vol. 4, No. 2, p. 397-407, 2013.

STRINGARI, C. E. *et al.* Modeling the wind influence in an oil spill along the southern brazilian shelf. **Revista de Engenharia Térmica**, [S. l.], v. 11, n. 1-2, p. 100–109, 2012.

SAMPAIO, M. **Estudo de Circulação Hidrodinâmica 3D e Trocas de Massas d'Água da Baía de Guanabara** – RJ. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 2003.

TRANSPETRO, 2025. **Transpetro expande operações ship to ship e fortalece presença no Norte e Nordeste**. Disponível em: <<https://transpetro.com.br/transpetro-institucional/noticias/transpetro-expande-operacoes-ship-to-ship-e-fortalece-presenca-no-norte-e-nordeste.htm>>. Acesso em: 25 jun. 2025.

UNESCO/IMO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/ International Maritime Organization). **International Convention Relating to Intervention on the High Seas in Cases of Oil Pollution Casualties**. Londres: UNESCO/IMO, 1978. Disponível em: <https://www.iaphworldports.org/n-iaph/wp-content/uploads/legal-db/B-2-INTERNATIONAL-CONVENTION.pdf>.

VENTIKOS, N. P.; SOTIROPOULOS, F. S. Disutility analysis of oil spills: graphs and trends. **Marine pollution bulletin**, v. 81, n. 1, p. 116–123, 2014.

WANG, S. D.; SHEN, Y. M.; ZHENG, Y. H. **Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas**. *Ocean Engineering* (32), p. 1556-1571, 2005.

WARNER, J. C. et al. Performance of four turbulence closure models implemented using a generic length scale method. **Ocean modelling**, v. 8, n. 1–2, p. 81–113, 2005.

WILLIAMS, J. J.; ESTEVES, L. S. Guidance on setup, calibration, and validation of hydrodynamic, wave, and sediment models for shelf seas and estuaries. **Advances in civil engineering**, v. 2017, p. 1–25, 2017.

ZACHARIAS, D. C. et al. Offshore oil spills in Brazil: An extensive review and further development. **Marine pollution bulletin**, v. 205, 2024.

ZACHARIAS, D. C. et al. Oil reaching the coast: Is Brazil on the route of international oceanic dumping? **Marine pollution bulletin**, v. 196, 2023.

ZACHARIAS, D. C.; GAMA, C. M.; FORNARO, A. Mysterious oil spill on Brazilian coast: Analysis and estimates. **Marine pollution bulletin**, v. 165, 2021.

ZACHARIAS, D. C. **Desenvolvimento do STFM (Spill, Transport and Fate Model): Modelo computacional lagrangeano de transporte e degradação de manchas de óleo**. 2017. 215 p. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade de São Paulo.

ZHANG, Z. *et al.* Exploring the potential of optical polarization remote sensing for oil spill detection: A case study of Deepwater Horizon. **Remote sensing**, v. 14, n. 10, p. 2398, 2022.