

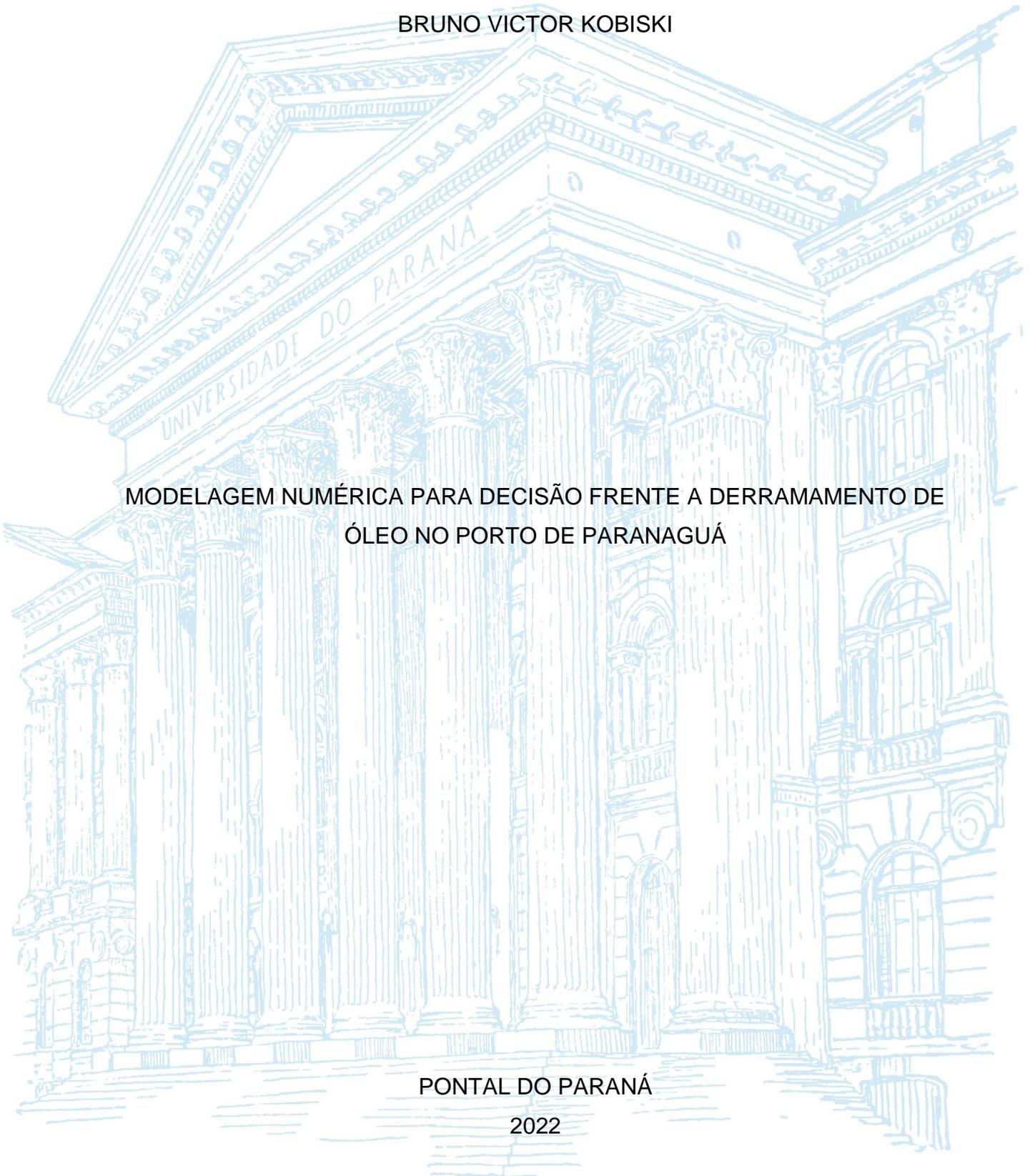
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNO VICTOR KOBISKI

MODELAGEM NUMÉRICA PARA DECISÃO FRENTE A DERRAMAMENTO DE
ÓLEO NO PORTO DE PARANAGUÁ

PONTAL DO PARANÁ

2022



BRUNO VICTOR KOBISKI

**MODELAGEM NUMÉRICA PARA DECISÃO FRENTE A
DERRAMAMENTO DE ÓLEO NO PORTO DE PARANAGUÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Eduardo de Paula Kirinus

PONTAL DO PARANÁ
2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DO CENTRO DE ESTUDOS DO MAR

Kobiski, Bruno Victor

K797m Modelagem numérica para decisão frente a derramamento de óleo no Porto de Paranaguá - PR / Bruno Victor Kobiski. – Pontal do Paraná, 2022.
1 arquivo [49 f.] : PDF.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo de Paula Kirinus

Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Paraná, Campus Pontal do Paraná, Centro de Estudos do Mar, Curso de Engenharia Civil.

1. Modelagem. 2. Derramamento de óleo. I. Kirinus, Eduardo de Paula. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD – 551.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ATA DE REUNIÃO

TERMO DE APROVAÇÃO

Bruno Victor Kobiski

**“MODELAGEM NUMÉRICA PARA DECISÃO FRENTE A DERRAMAMENTO DE
ÓLEO NO PORTO DE PARANAGUÁ - PR”**

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos membros:

Prof. Dr. Eduardo de Paula Kirinus

Prof. Orientador - CPP-CEM/UFPR

Profa. Dra. Roberta Brondani Minussi

CPP-CEM - UFPR

Profa. Dra. Amanara Potykyta de Sousa Dias Vieira

CPP-CEM - UFPR

Pontal do Paraná, 09 de setembro de 2022.

Referência: Processo nº 23075.056870/2022-89

SEI nº 4862409

AGRADECIMENTOS

Agradeço este trabalho à minha esposa, meus pais, e meus filhos, pela compreensão, paciência e amor dispensados.

*"Veni, Vidi, Vici".
(Gaius Iulius Caesar)*

RESUMO

Na medida em que o mundo se moderniza, cresce a necessidade de transporte de cargas e o uso da navegação. Um dos principais sistemas de transporte hoje se configura no modal aquaviário, que carrega consigo um grande potencial de poluição do ambiente aquático. Frente aos possíveis impactos causados por derrames acidentais de óleo, o objetivo deste trabalho é facilitar a tomada de decisão frente a eventos de derrame de óleo na área do porto de Paranaguá, através do uso de modelagem numérica. Sendo assim, foram utilizados os modelos numéricos TELEMAC 3D e ECOS acoplados para simular a hidrodinâmica e o transporte advectivo do óleo além das suas propriedades de intemperismo na região portuária de Paranaguá. Dois cenários de derrame hipotético foram avaliados e os resultados mostraram que o vento foi a principal forçante capaz de direcionar o espalhamento da pluma, que atingiu locais com alta sensibilidade ambiental. Parâmetros de intemperismo foram modelados com limitações, como evaporação e emulsificação do óleo, a partir do derramamento. Por fim, o modelo desenvolvido conseguiu simular a área de estudo e seus padrões hidrodinâmicos com qualidade oferecendo resultados importantes para possível uso para a tomada de decisões frente a derrames de óleo.

Palavras-chave: Modelagem numérica, derramamento de óleo, Baía de Paranaguá.

ABSTRACT

As the world modernizes, the need for cargo transport and the use of navigation grows. One of the main transport systems today is the waterway modal, which carries with it a great potential for pollution of the aquatic environment. Faced with the possible impacts caused by accidental oil spills, the objective of this work is to facilitate decision making in the event of oil spills in the Paranaguá port area, through the use of numerical modeling. Therefore, TELEMAC 3D and coupled ECOS numerical models were used to simulate the hydrodynamics and advective transport of oil in addition to its weathering properties in the port region of Paranaguá. Two hypothetical spill scenarios were evaluated and the results showed that the wind was the main forcing capable of directing the plume spreading, which reached places with high environmental sensitivity. Weathering parameters were modeled with limitations, such as evaporation and emulsification of the oil, from the spill. Finally, the model developed was able to simulate the study area and its hydrodynamic patterns with quality, offering important results for possible use for decision making in the face of oil spills.

Key Words: Numeric Modelling, Oil Spill, Paranaguá Bay.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – LOGÍSTICA DA PRODUÇÃO DE ÓLEO COMBUSTÍVEL MARÍTIMO	18
FIGURA 2 – PROCESSOS QUE OCORREM A PARTIR DO DERRAMAMENTO	19
FIGURA 3 – PORTO DE PARANAGUÁ, BERÇOS DE GRANEL SÓLIDO E CONTÊINERES	20
FIGURA 4 – TERMINAL DE INFLAMÁVEIS (AO FUNDO) E TERMINAL DE GRANÉIS SÓLIDOS PRIVADO	21
FIGURA 5 – MAPA DE SENSIBILIDADE AO ÓLEO DA REGIÃO DO LITORAL DO PARANÁ	22
FIGURA 6 – RESULTADOS TÍPICOS DE MODELAGENS DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO	24
FIGURA 7 – SIMULAÇÃO DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO EM SÃO FRANCISCO DO SUL	25
FIGURA 8 – ÁREA DE ESTUDO	26
FIGURA 9 – ÁREA DE ESTUDO APROXIMADA	26
FIGURA 10 – MALHA UTILIZADA PARA A MODELAGEM NUMÉRICA	29
FIGURA 11 – BATIMETRIA DA ÁREA DE ESTUDO, DADOS DE ENTRADA	30
FIGURA 12 – BATIMETRIA DA ÁREA DE ESTUDO, VISÃO MUNICIPAL	31
FIGURA 13 – BATIMETRIA DA ÁREA DE ESTUDO, VISÃO LOCAL	31
FIGURA 14 – MÉDIA DIÁRIA DE VELOCIDADE (M/S) E DIREÇÃO DE CORRENTE NO PONTO SELECIONADO, 2016	33
FIGURA 15 – AMPLITUDE HORÁRIA DE MARÉ , 2016	34
FIGURA 16 – MÉDIA DIÁRIA DE VELOCIDADE (M/S) E DIREÇÃO DE VENTO NO PONTO SELECIONADO,2016	34
FIGURA 17 – VELOCIDADE MÉDIA (M/S) NO PERÍODO DE SIMULAÇÃO	35
FIGURA 18 – DESVIO PADRÃO DA VELOCIDADE NO PERÍODO DE SIMULAÇÃO	36
FIGURA 19 – VELOCIDADE MÁXIMA (M/S) NO PERÍODO DE SIMULAÇÃO	37
FIGURA 20 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 225, HORA 2	38
FIGURA 21 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 225, HORA 5	38
FIGURA 22 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 225, HORA 9	38
FIGURA 23 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 225, HORA 10	39
FIGURA 24 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 225, HORA 11	39
FIGURA 25 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 225, HORA 12	39
FIGURA 26 – VARIAÇÃO DE DENSIDADE DO ÓLEO	40
FIGURA 27 – EMULSIFICAÇÃO DO ÓLEO	41

FIGURA 28 – EVAPORAÇÃO	41
FIGURA 29 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 145,HORA 1	42
FIGURA 30 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 145, HORA 2	43
FIGURA 31 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 145,HORA 3	43
FIGURA 32 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 145,HORA 4	43
FIGURA 33 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 145,HORA 5	44
FIGURA 34 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 145, HORA 6	44
FIGURA 35 – VARIAÇÃO DE DENSIDADE DO ÓLEO	44
FIGURA 36 – EMULSIFICAÇÃO DO ÓLEO	45
FIGURA 37 – EVAPORAÇÃO	45

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PARÂMETROS UTILIZADOS NO ECOS	32
TABELA 2 – DADOS DO PERÍODO DE SIMULAÇÃO	36

LISTA DE SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo
CEP	Complexo Estuarino de Paranaguá
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ECOS	Easy Coupling Oil System
GFS	Global Forecast System
ISL	Índice de Sensibilidade ao Óleo
NCEI	National Centers for Environment Information
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NOPP	National Ocean Partnership Program
PEI	Plano de Emergência Individual
SAO	Sensibilidade ao Óleo

SUMÁRIO

1	–	INTRODUÇÃO	14
1.1		JUSTIFICATIVA	15
1.2		OBJETIVOS	16
1.2.1		Objetivo Geral	16
1.2.2		Objetivos Específicos	16
1.3		METODOLOGIA DE PESQUISA	16
2	–	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1		ÓLEO COMBUSTÍVEL MARÍTIMO	18
2.2		PORTO DE PARANAGUÁ	19
2.3		CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS DA BAÍA DE PARANAGUÁ	21
2.3.1		Sensibilidade ao óleo	21
2.4		PLANO DE EMERGÊNCIA INDIVIDUAL	22
2.5		MODELAGEM NUMÉRICA APLICADA A DERRAMAMENTOS DE ÓLEO	23
3	–	MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1		ÁREA DE ESTUDO	26
3.2		MODELO NUMÉRICO	27
3.2.0.1		TELEMAC 3D	27
3.2.1		ECOS	28
3.2.2		Malha Numérica	28
3.2.3		Delimitações do estudo	29
4	–	RESULTADOS	33
4.1		MÓDULO HIDRODINÂMICO	33
4.2		SIMULAÇÃO DO DERRAMAMENTO DE ÓLEO	36
4.2.1		Derrame 12 de agosto - dia 225	38
4.2.2		Derrame 24 de Maio - Dia 145	42
5	–	CONCLUSÃO	46
		REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Nos tempos atuais, organizações de diversos setores tem dado maior importância a questões relacionadas ao meio ambiente. Esta importância se traduz, entre outras ações, em uma legislação que vem se tornando cada vez mais exigente no que tange o impacto ambiental das atividades em todo o mundo. Dentro desta perspectiva, o setor portuário recebe grande enfoque, devido à sua importância na logística de transporte de combustíveis líquidos por navios. No Brasil, de acordo com a Agência Nacional de Petróleo - ANP, a produção de nacional de petróleo alcançou 2,9 milhões de barris por dia em 2020, registrando alta de quase 6 % em relação ao ano anterior (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, 2021). Este grande volume de produção também implica diversas outras ações que devem ser pensadas de forma a minimizar possíveis impactos ambientais relacionados a acidentes no transporte de combustíveis, assim como na transferência desses entre a costa e os navios.

A preocupação com derramamentos de óleo em águas é de grande preocupação para empresas, indústrias e autoridades. Diversos foram os momentos em que ocorreram acidentes envolvendo óleo, com expressivo dano ambiental atrelado. Como exemplo, a plataforma de extração de petróleo *Deepwater Horizon* explodiu no golfo do México em abril de 2010, matando 11 trabalhadores e causando um vazamento de aproximadamente 4 milhões de barris de petróleo – 635 milhões de litros, e provocando um extenso dano ambiental à costa dos Estados Unidos. A empresa responsável foi multada em 5,5 bilhões de dólares pela poluição da água e mais 8,8 bilhões de dólares por danos aos recursos naturais envolvidos (ENVIRONMENTAL PROTECT AGENCY, 2022).

Levantamentos de acidentes ambientais envolvendo óleo em transporte aquaviário na região do Estado de São Paulo (TREVISANI *et al.*, 2014), contam com 55 ocasiões entre 1974 e 2012, com volumes de até 6.000 m³, estabelecendo uma relação entre o surgimento das auditorias ambientais compulsórias e a diminuição de acidentes envolvendo óleo em navios.

Em 2008, foi promulgada pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, a resolução de número 398, que lança diretrizes para ajudar, empresas, portos e outras instalações portuárias a prever situações de risco e atuar rapidamente na resposta em acidentes ambientais envolvendo óleo, por meio de um Plano de Emergência Individual. Segundo esta resolução, como mínimo, as instalações devem proporcionar equipamentos, pessoas e capacidade logística de atender prontamente quaisquer acidentes que ocasionem derramamento de óleo ou seus derivados em águas sob jurisdição nacional. Para uma ação eficiente, devem ser feitas simulações (modelagens) de derramamento, afim de se conhecer melhor o comportamento de uma pluma de contaminação.(CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2008)

O porto de Paranaguá é um dos maiores portos do Brasil, sendo o maior porto em movimentação de grãos da América Latina. Em 2020 foram 43,9 milhões de toneladas movimentadas na estrutura do porto organizado, sendo que 9,2 milhões foram de carga geral, 29,1 milhões são referentes à granel sólido, e 5,5 milhões de toneladas foram movimentações de granel líquido (PORTOS DO PARANÁ, 2020).

Como parte das preocupações da administração do porto de Paranaguá, a Portos do Paraná, através da Diretoria de Meio Ambiente, mantém um sistema de gestão integrada, representado pela Ordem de Serviço n° 173/2020, o qual estipula diretrizes documentais para os prestadores de serviço dentro da faixa portuária, como fornecedores de combustíveis, removedores de sludge, fornecedores de químicos envasados, fumigadoras entre outros.

Neste documento constam, inclusive, obrigações relativas ao Plano de Emergência Individual – PEI, de forma que as empresas possam se apoiar no conteúdo da Resolução CONAMA n° 398/2008 para prever acidentes com óleo e estipular ações de resposta rápida, delegando responsabilidades e definindo protocolos de comunicação, com base em dados previamente analisados e modelagens matemáticas. Assim, para poder prestar serviços dentro da área portuária, as empresas devem manter o PEI e outros documentos sempre atualizados.

Todas as operações envolvendo granel líquido ocorrem no terminal de inflamáveis, controlado pela Transpetro, subsidiária da Petrobrás, ou no terminal de inflamáveis privado controlado pela Cattalini Terminais. São dois berços de atracação para cada terminal, onde ocorrem transferências de material derivado de petróleo, sendo na modalidade de importação ou exportação.

Neste sentido, este trabalho utilizará uma ferramenta de modelagem numérica a fim de fornecer dados para apoiar a tomada de decisão a partir de um cenário de derramamento de óleo no terminal de inflamáveis do Porto de Paranaguá.

1.1 JUSTIFICATIVA

Este trabalho possui antecedentes em diversos outros artigos técnicos que versam sobre modelagem aplicada a acidentes ambientais ((MARQUES *et al.*, 2017); (MONTEIRO *et al.*, 2017);(MONTEIRO, 2020), sendo um tema recorrente e de relevante aplicação de conhecimento técnico em situações de emergências, que já ocorreram em muitos lugares do Brasil.

Adicionalmente, as modelagens numéricas têm se tornado cada vez mais precisas em razão do aumento do potencial de cálculo dos processadores computacionais, dando espaço a várias aplicações cotidianas, como por exemplo o entendimento de questões atmosféricas e outros fenômenos naturais (SPOLAVORI, 2014). Assim, justifica-se o uso desta ferramenta como parte de uma iniciativa que amplia horizontes de dados disponíveis para tomadas de decisão.

Mundialmente, segundo dados da International Tankers Owners Pollution Federation Limited (ITOPF), foram registrados apenas em 2021, 7 vazamentos de óleo com volumes estimados entre 7 e 700 toneladas. Este mesmo banco de dados aponta para a ocorrência de 1 vazamento com volume maior que 700 toneladas, restando claro que todas as iniciativas que agreguem mais informação são extremamente bem vindas, visto que elas ainda são bastante necessárias devido a recorrência de acidentes.

De outra forma, este trabalho também contribui para a disponibilidade de dados

específicos sobre a região de Paranaguá, onde já ocorreram acidentes envolvendo óleo. Como exemplo, o navio Vicuña, que em 2004 explodiu durante uma operação de transferência de metanol, derramando óleo combustível em quantidade aproximada de 290 toneladas. Este vazamento contaminou restingas, manguezais e outros sistemas naturais, que acabaram por afetar a pesca, o turismo e diversas outras atividades na baía de Paranaguá (FIGUEIRA, 2019).

Outros vazamentos como o do Navio Norma, que derramou Nafta na baía de Paranaguá em 2001, e outro derramamento de óleo em 2011, que culminou com a morte de dezenas de toneladas de fauna aquática são exemplos que mostram a importância do uso de ferramentas de modelagem numérica para promover maior eficiência nas ações de contenção de danos ambientais, diminuindo em muito os prejuízos aos recursos naturais e às atividades pesqueiras na baía de Paranaguá.

Por fim, justifica-se este projeto em diversas legislações recentes, que versam sobre a qualidade do meio ambiente e em especial a Resolução CONAMA nº 398/2008, que é clara quanto à necessidade da modelagem numérica como ferramenta para antecipar ações dentro de um Plano de Emergência Individual.

1.2 OBJETIVOS

Para este trabalho, foram definidos dois tipos de objetivos, conforme abaixo demonstrado.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta proposta é facilitar a tomada de decisão frente a eventos de derrame de óleo na área do porto de Paranaguá, através do uso de modelagem numérica.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Definir região de impacto direta e indireta
- b) Avaliar áreas afetadas pela dispersão especial de óleo derramado
- c) Analisar períodos de eventos extremos e seus impactos associados

1.3 METODOLOGIA DE PESQUISA

A metodologia de pesquisa adotada para este trabalho foi o estudo de caso. (VENTURA, 2007) define limites relativos às particularidades de cada caso, visto que as informações encontradas no avanço deste projeto devem servir, na prática, somente para a área escolhida. Entende-se, portanto, que este tipo de pesquisa tem uma aplicabilidade bastante restrita, tendo sua replicabilidade prejudicada sem os devidos ajustes.

De acordo com Gil (1995), não há formas rígidas de se apresentar esta metodologia de pesquisa, embora haja sempre alguns elementos chave, que devem ser cautelosamente delimitados, a saber:

- Delimitação do caso
- Coleta de dados
- Refinamento, cálculos, análises e interpretação
- Conclusões e restrições de replicabilidade

Assim, este estudo procurou preservar estas características, atendo-se às especificidades regionais para gerar uma modelagem de caráter único, totalmente aplicável à região estudada.

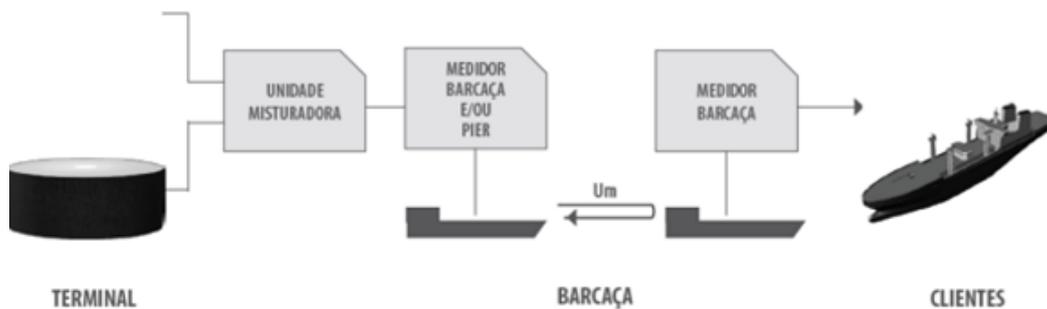
2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são descritos conceitos fundamentais ao embasamento teórico do tema.

2.1 ÓLEO COMBUSTÍVEL MARÍTIMO

Os óleos combustíveis marítimos são produzidos a partir de misturas de resíduos de destilação de petróleo e alguns solventes para ajustar a viscosidade da mistura. São, chamados de “óleos *Bunker*”, e são produzidos com a finalidade principal de abastecer navios, conforme figura abaixo. Possuem classificação de risco 3 (resolução ANTT nº 420/04) e tem classificação ONU 3256- Líquido Inflamável com ponto de fulgor maior ou igual a 60°C (PETROBRAS, 2021).

FIGURA 1 – LOGÍSTICA DA PRODUÇÃO DE ÓLEO COMBUSTÍVEL MARÍTIMO



FONTE: (PETROBRAS, 2021)

A partir de um derramamento de óleo, a pluma se dispersa de acordo com a maré ou ventos, enquanto diversos processos ocorrem, sendo eles de origem química, física ou biológica.

O livro da Federação Internacional sobre poluição de *Tankers* (ITOPF, 2021), define que estes processos são simultâneos, e incluem:

1. Espalhamento : É um fenômeno físico em que o óleo ocupa uma área maior, se tornando mais fino em espessura, ou seja, se espalhando sobre a água. Ocorre de acordo com a viscosidade do óleo, e também com o volume derramado, sendo importante característica a ser analisada na previsão das ações a serem tomadas, de acordo com o grau de espalhamento da pluma de contaminação.

2. Evaporação: As frações mais voláteis do óleo derramado irão sofrer evaporação, passando para a atmosfera, devido à luz solar, ventos e também devido à temperatura ambiente.

3. Afundamento: Em águas salobras ou doces, há maiores possibilidades de ocorrer afundamento de frações densas de óleo

4. Dispersão: É a fragmentação do óleo em gotículas ou partes menores, que contribui para o espalhamento e também ocorre com mais facilidade em águas agitadas ou em locais

com quebra de ondas.

5. Emulsificação: É um fenômeno químico que consiste na incorporação de água no óleo, pode aumentar significativamente a o volume da pluma de contaminação.

6. Encalhamento: O óleo pode também “encalhar” nas costas, geralmente acontece quando o derramamento acontece em águas rasas ou protegidas. A forma da costa ou tipo podem modificar bastante o comportamento do encalhe, dificultando as ações de recolhimento.

7. Dissolução: Há uma contribuição minoritária para as ações de recolhimento, advindas da dissolução de parcelas de óleo na água. A quantidade dissolvida geralmente é muito pequena em relação à quantidade de contaminante a ser recolhido.

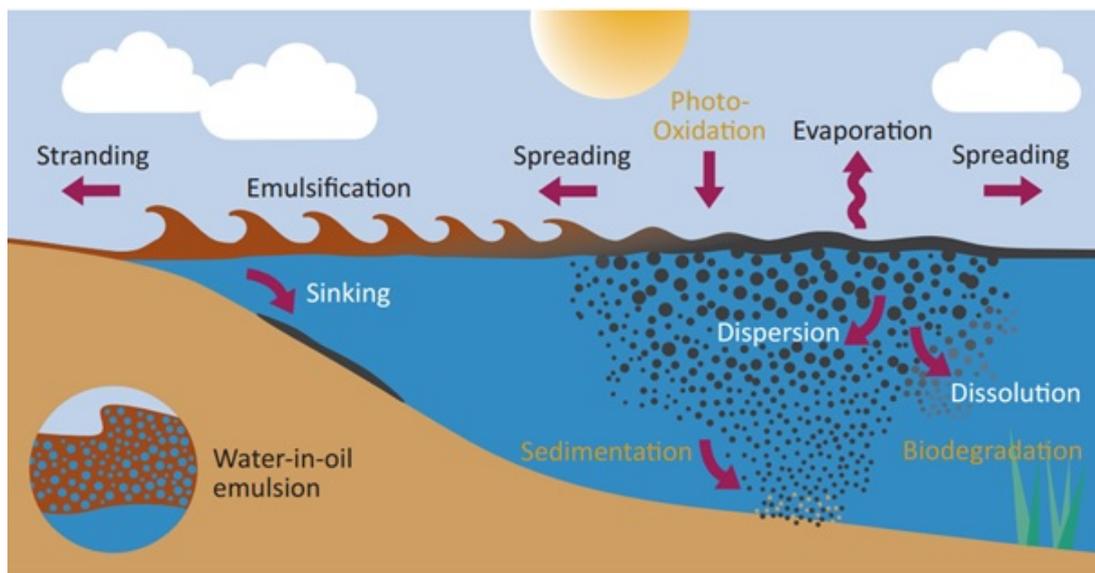
8. Oxidação: A partir da luz do sol, na presença de oxigênio, o óleo pode formar borras persistentes.

9. Sedimentação: Partículas de óleo dispersado podem interagir com a matéria orgânica ou partículas do sedimento, sendo carregadas para baixo.

10. Biodegradação: O óleo pode sofrer metabolização por bactérias, dependendo da quantidade de nutrientes disponíveis, oxigênio e temperatura, sendo transformado em diversos outros compostos.

Na figura abaixo são exemplificados os tipos de processos.

FIGURA 2 – PROCESSOS QUE OCORREM A PARTIR DO DERRAMAMENTO



FONTE: (ITOPF, 2021)

2.2 PORTO DE PARANAGUÁ

O porto de Paranaguá se configura hoje como o maior porto da América latina em relação ao seu potencial graneleiro. Foi batizado em homenagem ao imperador do Brasil, Dom Pedro II, em 1872, iniciando suas atividades. Porém as atividades portuárias sob gestão do Estado do Paraná iniciaram somente em 1935.

Se encontra no litoral do Paraná, Brasil, tendo sido construído nas águas protegidas da baía de Paranaguá, contando com 20 berços de atracação, sendo 16 berços no cais comercial – para movimentação de granel sólido e contêineres, e 4 berços no terminal de inflamáveis – para movimentação de granel líquido, operados pela Transpetro e pela Cattalini Terminais. A movimentação de carga no corredor de exportação chega a 9 mil toneladas por hora (PORTOS DO PARANÁ, 2021)).

FIGURA 3 – PORTO DE PARANAGUÁ, BERÇOS DE GRANEL SÓLIDO E CONTÊINERES



FONTE: (PORTOS DO PARANÁ, 2021)

FIGURA 4 – TERMINAL DE INFLAMÁVEIS (AO FUNDO) E TERMINAL DE GRANÉIS SÓLIDOS PRIVADO



FONTE: (PORTOS DO PARANÁ, 2021)

2.3 CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS DA BAÍA DE PARANAGUÁ

2.3.1 Sensibilidade ao óleo

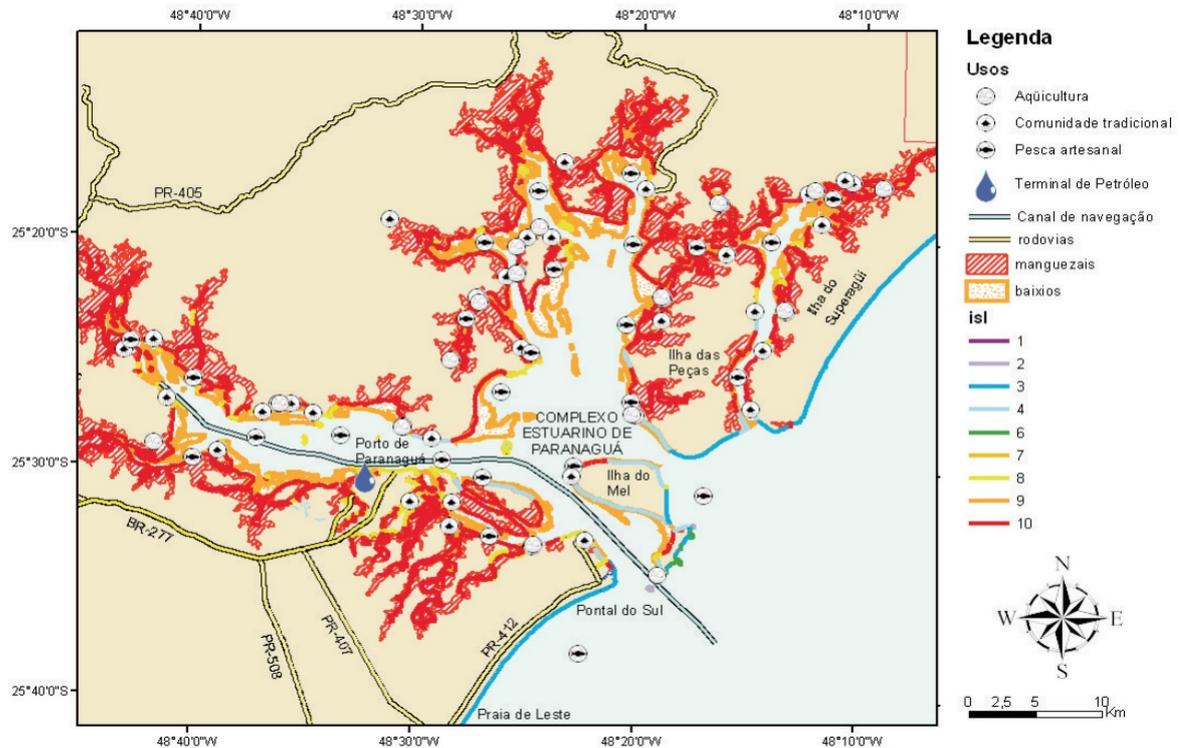
A Lei nº9.966/2000, que dispõe sobre diretrizes de prevenção, controle e fiscalização da poluição por óleo, conferiu ao Ministério do Meio Ambiente – MMA, o papel de determinar as áreas ecologicamente sensíveis nacionais. Assim, o (MMA, 2004) criou o caderno de Especificações e Normas Técnicas para Elaboração de Cartas de Sensibilidade ao Óleo. Este documento aborda diversas normas nacionais e internacionais e elenca as seguintes características como principais informações disponíveis na carta SAO:

- Índice de sensibilidade ao óleo (ISL), confeccionado a partir de conhecimento das características geográficas e também morfológicas da região, grau de exposição a marés, composição granulométrica e química do fundo, declividade entre outros fatores;
- Atividades socioeconômicas que poderão ser impactadas em um evento de derramamento, incluindo lazer, pesca, captação de recursos hídricos e outros.
- Fauna sensível na região da carta, contendo informações sobre habitats, alimentação das espécies, reprodução, rotas de migração entre outras características

As cartas podem ser de caráter estratégico, tático, ou operacional, tendo como base sua aplicação, de acordo com a escala utilizada, respectivamente de 1:500.000, 1:150.000, e

1:10.000. Noernberg et al. (2009) estudaram a bacia litorânea paranaense para fornecer dados de sensibilidade ao óleo, trazendo dados de ISL (figura abaixo) relacionando espécies por meio de pesquisa bibliográfica, assim como descrevendo atividades socioeconômicas que podem ser impactadas.

FIGURA 5 – MAPA DE SENSIBILIDADE AO ÓLEO DA REGIÃO DO LITORAL DO PARANÁ



FONTE: (NOERNBERG *et al.*, 2009)

A figura 5, demonstra que o litoral paranaense possui extrema sensibilidade, contando com mais de 80 % da linha de costa na baía com ISL 10, caracterizado por manguezais (NOERNBERG *et al.*, 2009).

Parente *et al* (2016) elaboraram uma carta SAO para a ilha de Mosqueiro, em Belém no Pará, concluindo que elas são cruciais no planejamento de ações de resposta, e também que as ações de contingência devem ser realizadas o mais rápido possível, consoante com a sensibilidade apresentada nas cartas. (PARENTE *et al.*, 2016).

2.4 PLANO DE EMERGÊNCIA INDIVIDUAL

O plano de emergência individual (PEI) é uma ferramenta de gestão de acidentes envolvendo poluição ambiental por óleo em instalações portuárias e similares, concebido através da resolução CONAMA 398/2008. Esta ferramenta foi baseada nos seguintes princípios:

- a) Necessidade de gestão de impactos ambientais em instalações portuárias e similares

- b) Necessidade de atualização de diretrizes de ações a serem tomadas em caso de poluição por óleo nestas instalações
- c) Continuidade e melhor especificação da lei nº 9966/2000, que dispunha sobre diretrizes de controle de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional;

O PEI tem como principal objetivo a previsão de cenários acidentais para poder prever ações de resposta rápida e de comunicação, de forma a mitigar impactos ambientais causados pela poluição do óleo. O primeiro artigo da resolução CONAMA 398/2008 já traz a obrigatoriedade de execução do PEI para todos os portos organizados, instalações portuárias, refinarias, marinas, terminais e outras estruturas similares. Deve ser comprovada a capacidade de execução imediata das ações previstas no plano, de forma que sejam empregados recursos humanos e materiais em suficiência.

O conteúdo mínimo do PEI encontra-se no anexo I da mesma resolução acima citada, no qual são elencados, entre outras exigências, principalmente: 1. Uma estrutura organizacional de resposta, elencando nomeando recursos humanos e respectivas responsabilidades, assim como tempo necessário para as ações; 2. Um procedimento de comunicação de acidente, a ser seguido a partir de um evento; 3. Descrição dos materiais de resposta e suas funcionalidades; 4. Descrição de variados procedimentos de resposta, para contenção, absorção e recolhimento de óleo, assim como coleta e disposição final do mesmo; 5. Descrição de procedimentos de resposta para proteção da fauna e flora local; 6. Dados geográficos, mapas, fotografias, cartas náuticas e outros documentos relevantes; 7. Identificação da empresa e do profissional responsável pela coordenação do PEI; 8. Descrição de cenários acidentais, considerando a atividade desenvolvida, e cálculo do volume de pior caso derramado; 9. Análise de risco relativa aos cenários acidentais.

Todas estas caracterizações podem encarecer bastante a execução e a manutenção de um PEI. Considerando que a empresa deverá adquirir todos os equipamentos mencionados no plano, antes de sua aprovação, e que devem ser feitos estudos de modelagens numéricas para prever a resultante dos diversos processos que ocorrem com o óleo após o derramamento, o custo pode se tornar um fator limitante para empresas.

O PEI é uma oportunidade para as empresas conhecerem suas vulnerabilidades, sendo uma mais valia para as mesmas, mesmo considerando o custo de execução do plano. A autora ainda cita que toda e qualquer ação relacionada à segurança e emergência é de extrema importância para as organizações, sobretudo se forem consideradas as questões ambientais e prejuízos diretos e indiretos ocasionados por um acidente. (FERREIRA, 2007).

2.5 MODELAGEM NUMÉRICA APLICADA A DERRAMAMENTOS DE ÓLEO

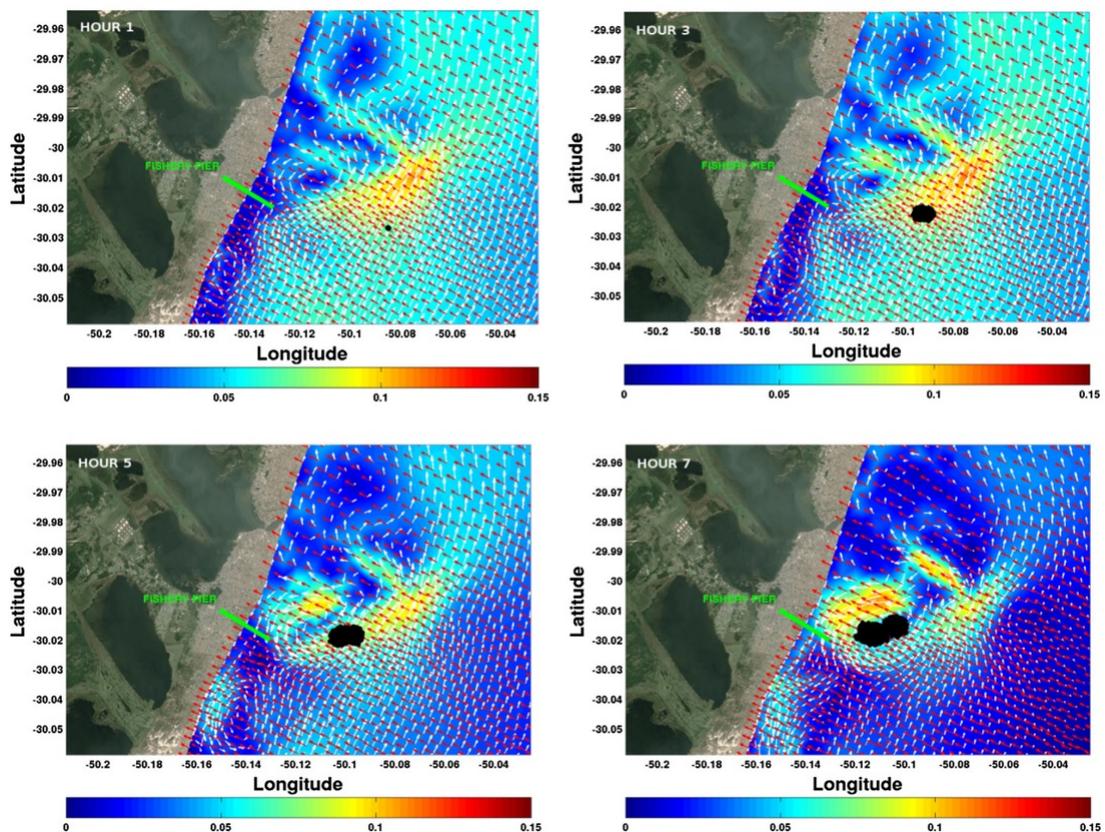
A modelagem numérica é uma ferramenta tecnológica que traz uma abordagem de cálculo computacional para resolver ou simular sistemas complexos, de forma eficiente. Dentro do escopo deste trabalho, a modelagem numérica se utiliza de conhecimento matemático e físico como o princípio de conservação das massa, usando equações de Navier-Stokes e dados específicos como dados de maré, corrente, ventos, salinidade, densidade da água entre outros,

para fornecer uma previsão do comportamento de uma pluma de contaminação de um ambiente aquático por óleo (ITOPF, 2021).

Existem passos a serem seguidos para a utilização de modelos numéricos, estes são relacionados abaixo (CASEIRO, 2011) :

1. Entender a dinâmica da área de estudo
2. Adaptar o entendimento para a linguagem matemática
3. Utilizar dados de entrada nas equações adaptadas para realizar o processamento dos dados, rodando o modelo de simulação computacional
4. Refino e validação dos resultados obtidos. Diversos são os modelos computacionais disponíveis para realizar estas simulações. (MARQUES *et al.*, 2017) utilizaram o software de modelagem hidrodinâmica 3d, denominado TELEMAC3D, em conjunto com o sistema ECOS (Easy Coupling Oil System), que utiliza uma discretização das partículas e uma aproximação lagrangeana, para modelar um derramamento de óleo na praia de Tramandaí, Rio Grande do Sul, ao longo de uma determinada janela de tempo, alcançando resultados significativos, conforme figura abaixo:

FIGURA 6 – RESULTADOS TÍPICOS DE MODELAGENS DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO



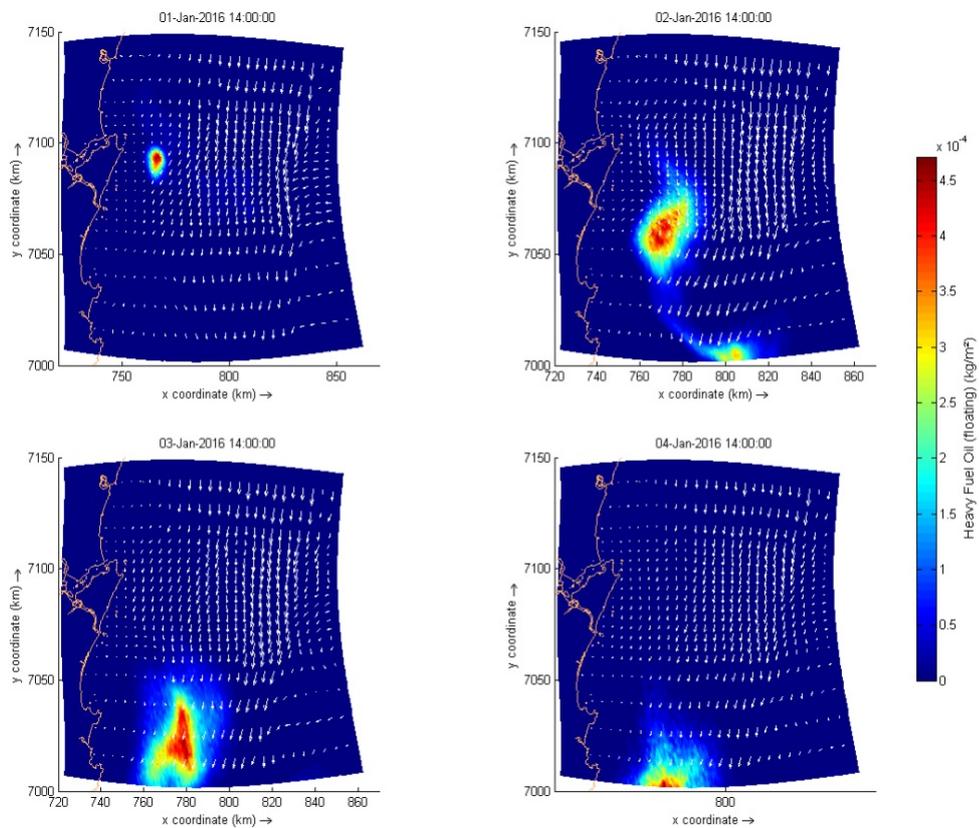
FONTE: (MARQUES *et al.*, 2017)

Os resultados acima levaram em consideração dados de vento, corrente, topografia de fundo, entre outros para realizar a modelagem da dispersão do vazamento de óleo ao longo do tempo, resultando em uma ferramenta que pode servir para prever o comportamento de

novos vazamentos na região, de acordo com as características hidrodinâmicas fornecidas para o processamento.

O software Delft3D foi usado em outro estudo para modelar a dispersão de uma pluma de contaminação por óleo a partir de um derrame teórico em São Francisco do Sul, SC, mostrando que os dados de entrada podem causar impactos significativos no comportamento da pluma. O período sazonal também se mostrou importante. Segundo o autor, diferentes épocas do ano trazem diferentes formas de dispersão do óleo. A figura abaixo demonstra parcialmente o resultado da simulação (GRAZIOTTO, 2019).

FIGURA 7 – SIMULAÇÃO DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO EM SÃO FRANCISCO DO SUL



FONTE: (GRAZIOTTO, 2019)

Dessa maneira, a região de estudo contou com uma análise dos impactos destes derrames frente a uma zona de impactos diretos e indiretos, analisando possíveis alterações como aumento ou redução de espalhamento do óleo, impactos nas regiões litorâneas, transporte do óleo em direção à saída do CEP, além das propriedades de advecção e envelhecimento do óleo frente as regiões rasas e impactos nas ilhas próximas e manguezais.

3.2 MODELO NUMÉRICO

O software utilizado para a execução do modelo hidrodinâmico foi o TELEMAC 3D, em uma configuração de acoplamento de dados do software ECOS. O resultado da análise foi descrito em imagens exploratórias dos resultados, visando indicar resultados de forma clara. Adicionalmente, pontos de interesse dentro das regiões de impactos diretos e indiretos foram abordados de acordo com análise de séries temporais objetivando avaliar a variação das taxas de contaminação por óleo derramado frente aos eventos extremos na região de estudo.

3.2.0.1 TELEMAC 3D

Desenvolvido dentro do consórcio *open* TELEMAC-MASCARET, este módulo é utilizado para estudos de aspectos relacionados à hidrodinâmica tridimensional. O módulo resolve as equações de Navier-Stokes utilizando o método de elementos finitos para a discretização espacial e coordenadas sigma para a discretização vertical, de tal maneira que acompanham os limites superficiais e de fundo (HERVOUET, 2007). Considerando as variações locais na superfície livre do fluido, o módulo utiliza aproximação de Boussinesq para a resolução da equação de conservação de *momentum* e desconsidera as variações de densidade na equação de conservação de massa.

O método de elementos finitos permite melhor representação da linha de costa, gradientes batimétricos e áreas de interesse, sendo considerado um bom método para estudos em regiões costeiras e estuarinas (KIRINUS; TOMAS, 2021).

A aproximação hidrostática considera a simplificação dos termos da velocidade vertical w , desconsiderando a difusão, os termos fonte e a aceleração na equação de movimento na vertical. Considerando apenas as variações de pressão hidrostática e gravidade na equação vertical da quantidade de movimento. Portanto, a pressão em um ponto depende apenas do peso da coluna d'água sobre a partícula e da pressão atmosférica na superfície.

A aproximação de Boussinesq considera que a diferença na densidade ($\Delta\rho$) em relação a um valor de referência (ρ_o) é pequena e pode ser desprezada. De tal maneira que é possível definir a influência nas equações hidrodinâmicas, visto que a equação do estado relaciona a densidade do fluido com a concentração dos traçadores de massa de água.

A equação de Navier-Stokes para superfície livre de um fluido geofísico é descrita pelas equações da continuidade e conservação de *momentum*, que podem ser expressas em um sistema cartesiano (Equações 2, 3 e 4), desconsiderando variações de densidade na equação de

conservação de massa.

A equação da continuidade (Equação 1) é aplicada para a manutenção do equilíbrio no sistema. Para uma descrição completa sobre a técnica de elementos finitos aplicadas ao Telemac-3D, acesse (HERVOUET, 2007).

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 (u) + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 (v) + F_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \nu \nabla^2 (w) + F_z \quad (4)$$

Onde u , v e w representam as componentes da velocidade, t o tempo, g a aceleração gravitacional, F_x , F_y e F_z os termos fonte nas direções x , y e z , respectivamente. ν é o coeficiente de viscosidade cinemática, $\nabla^2(u)$, $\nabla^2(v)$ e $\nabla^2(w)$ são os operadores laplacianos no plano das coordenadas cartesianas.

3.2.1 ECOS

O módulo escolhido para descrever os processos de dinâmica do óleo no meio marinho foi o ECOS (*Easy Coupling Oil System*), desenvolvido na FURG (Universidade Federal do Rio Grande) desde 2010 registrado no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) sob numero BR 51 2013 00013 (MARQUES; STRINGARI; MELLO, 2013). O ECOS manipula o óleo como partículas discretas usando a aproximação Lagrangiana para descrever a variação das propriedades de advecção, espalhamento e turbulência.

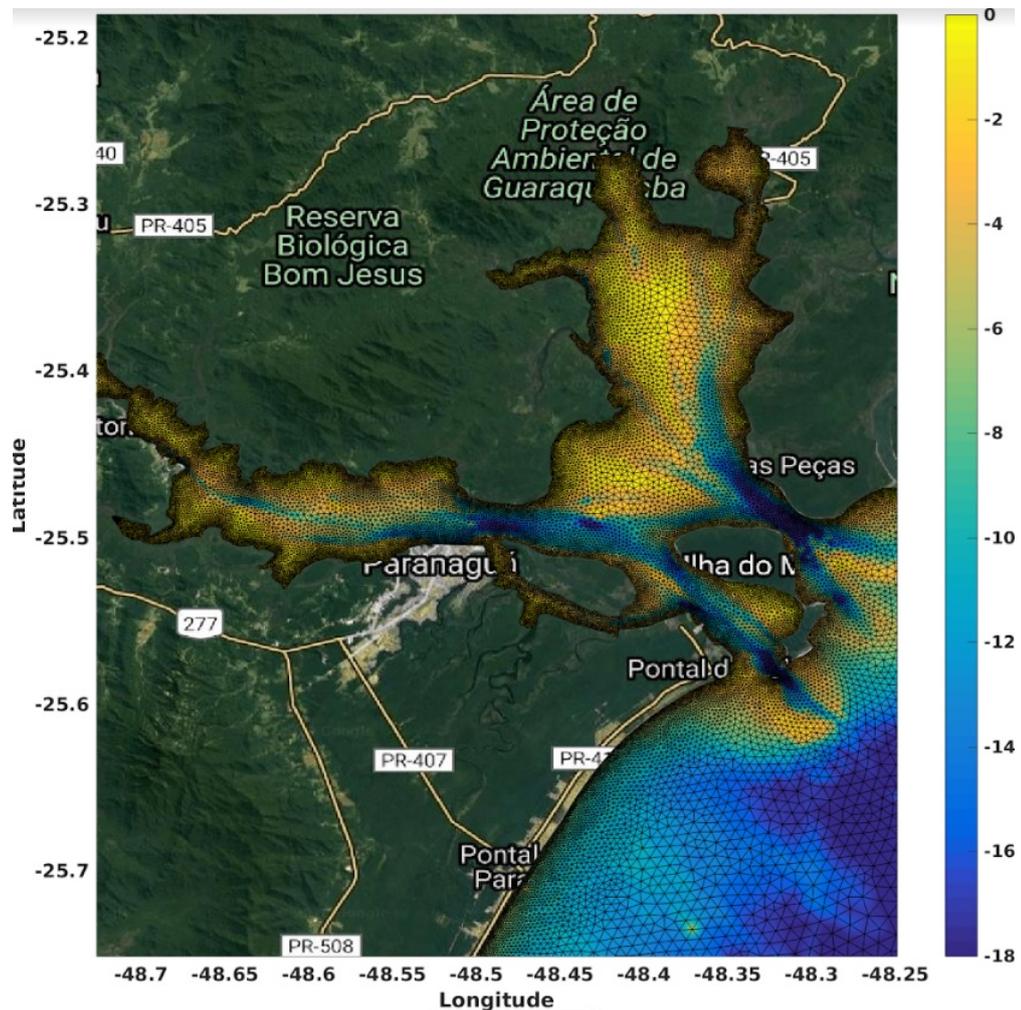
O deslocamento é avaliado considerando uma mancha de óleo não-homogênea e as propriedades do intemperismo são calculadas usando condições homogêneas, conforme (MARQUES *et al.*, 2017). A posição final das partículas de óleo depende da velocidade de corrente, da velocidade do vento, do efeito do espalhamento e da difusão turbulenta.

Além do deslocamento, o módulo considera a alteração de massa específica e emulsificação para descrever os processos de intemperismo, que são resolvidos a partir de equações diferenciais que variam no tempo. Maiores informações podem ser obtidas em (MARQUES; STRINGARI; MELLO, 2013) e (MARQUES *et al.*, 2017).

3.2.2 Malha Numérica

Foi utilizada uma malha batimétrica não estruturada do litoral do paraná, criada a partir de elementos finitos, contendo a região costeira, com 70.151 nós, realizada por (KIRINUS; TOMAS, 2021), conforme figura abaixo:

FIGURA 10 – MALHA UTILIZADA PARA A MODELAGEM NUMÉRICA



FONTE: (KIRINUS; TOMAS, 2021)

3.2.3 Delimitações do estudo

O estudo considerou um horizonte de tempo de 10 anos de simulações hidrodinâmicas com condições de contorno realísticas para a região de estudo, com a malha numérica citada acima.

Foram analisados dados de velocidade e direção de vento para obtenção de um ano preferencial de análise, onde a direção dos ventos pudessem representar várias direções diferentes. A partir do ano escolhido, os seguintes dados foram analisados para determinar a hidrodinâmica do local de estudo:

- a) Módulo da Velocidade de corrente,
- b) Direção de corrente,
- c) Módulo da Velocidade do vento,
- d) Direção do vento,
- e) Salinidade
- f) Temperatura

- g) Nível do mar,
- h) topografia do fundo,

Cada dado foi analisado com uma variação horária no ano escolhido para a análise, permitindo que a modelagem do derrame pudesse se apoiar nas variáveis e se comportar de forma mais suave, durante o período de vazamento.

A partir da análise hidrodinâmica, dentro do ano escolhido, foram selecionados períodos temporais que representaram forçantes de direção de corrente consecutivas para determinadas direções, a fim de representar um vazamento em diferentes ocasiões.

Dados de direção e velocidade de corrente, salinidade, temperatura, e elevação do nível do mar foram obtidos através do *HYCOM Consortium*, enquanto que dados de vento foram obtidos por meio do *ERA5 - ECMWF* (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), modelo europeu de condições atmosféricas.

Duas simulações foram realizadas para representar a dispersão do óleo em diferentes condições hidrodinâmicas. As diferenças das duas simulações se basearam em diferentes velocidades e direções de vento, corrente e também diferentes condições de temperatura, salinidade, densidade e nível do mar, conforme dados retirados do HYCOM e ERAS. Os dados de entrada podem ser vistos graficamente, conforme figuras 11 12 e 13:

FIGURA 11 – BATIMETRIA DA ÁREA DE ESTUDO, DADOS DE ENTRADA

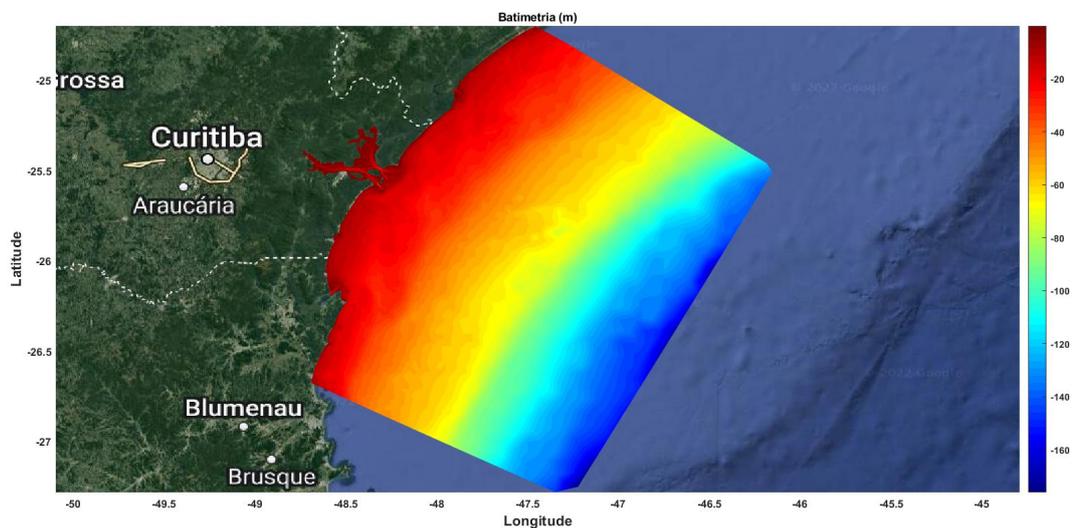


FIGURA 12 – BATIMETRIA DA ÁREA DE ESTUDO, VISÃO MUNICIPAL

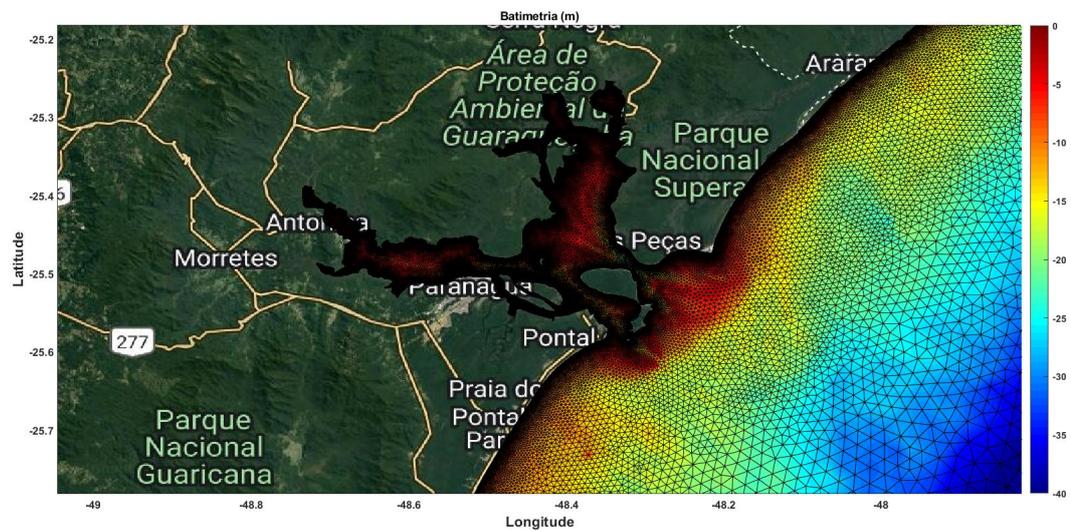
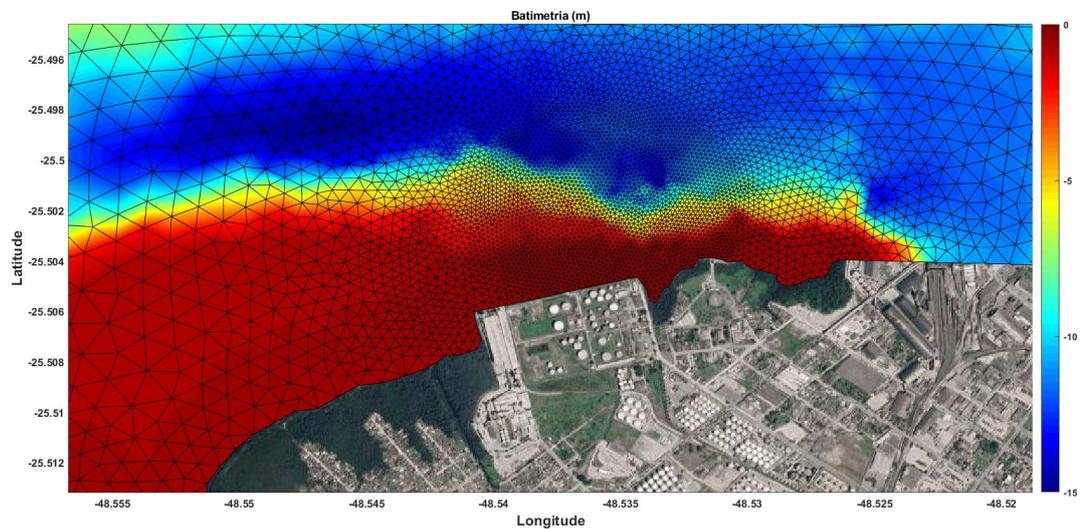


FIGURA 13 – BATIMETRIA DA ÁREA DE ESTUDO, VISÃO LOCAL



Dados de vento, corrente, salinidade e temperatura foram acoplados de forma semelhante para o processamento pelo *software* TELEMAC 3D, de forma a gerar as condições hidrodinâmicas.

O ponto analisado foi o local de atracação externo do píer de inflamáveis, onde há movimentação diária de navios e onde já ocorreram vazamentos de quantidades significativas de combustíveis derivados de petróleo.

O *software* ECOS utilizou condições as seguintes condições para executar o processamento dos dados:

TABELA 1 – PARÂMETROS UTILIZADOS NO ECOS

Parâmetro de Calibração	Valor	unidade
Densidade do óleo	830	kg/m ³
Densidade Média da água	1025	kg/m ³
Aceleração da Gravidade	9,80665	m/s ²
Volume de Partícula	0.05	m ³
Volume inicial do derrame óleo	1.569	m ³
Quantidade de Partículas	40.000	un
Tempo mínimo de passo	90	s
de Coriolis	6,39320	1.00E-05

FONTE: Produzido pelo Autor (2022)

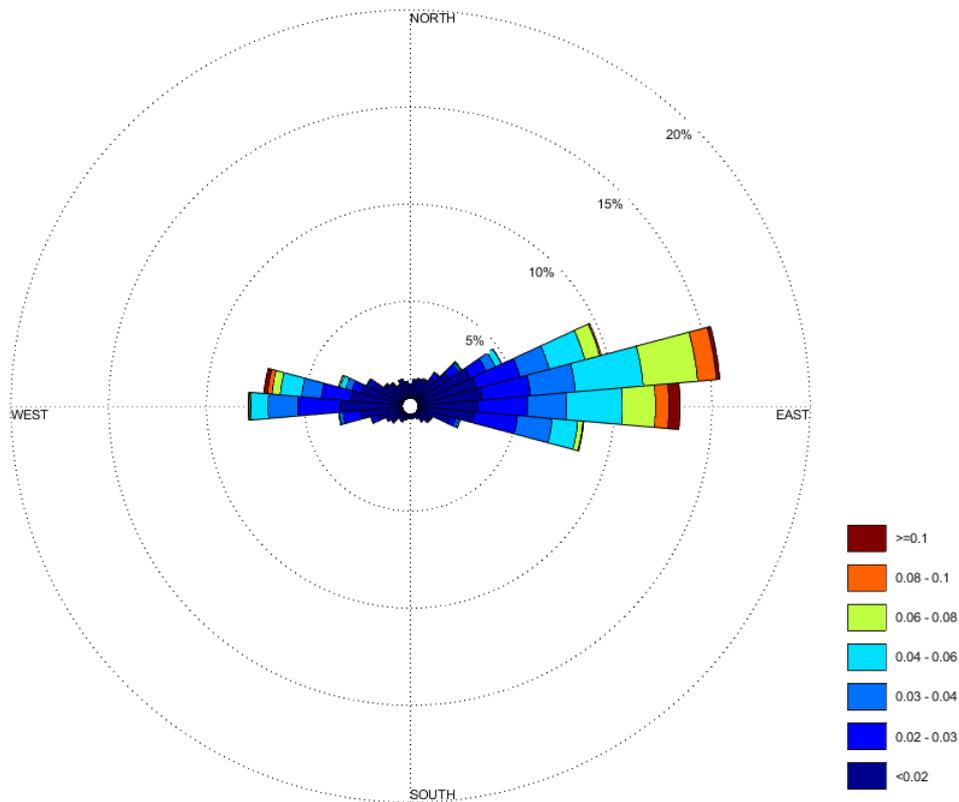
Na tabela acima, o volume de 1569 m³ inicial de derrame foi considerado devido ao volume máximo de armazenamento de combustível do navio tanque *Vicuña*, que, de acordo com as informações contidas no relatório de investigação da Diretoria de Portos e Costas da Marinha do Brasil, em novembro de 2004 explodiu , causando derramamento de óleo na baía de Paranaguá. .

4 RESULTADOS

4.1 MÓDULO HIDRODINÂMICO

Os resultados encontrados na simulação levam em conta os parâmetros e técnicas percorridos na seção metodológica. O ano escolhido para a análise foi o de 2016, de acordo com os parâmetros de vento e velocidade de corrente, onde este se mostrou com mais variedade de dados, conforme figuras abaixo.

FIGURA 14 – MÉDIA DIÁRIA DE VELOCIDADE (M/S) E DIREÇÃO DE CORRENTE NO PONTO SELECIONADO, 2016

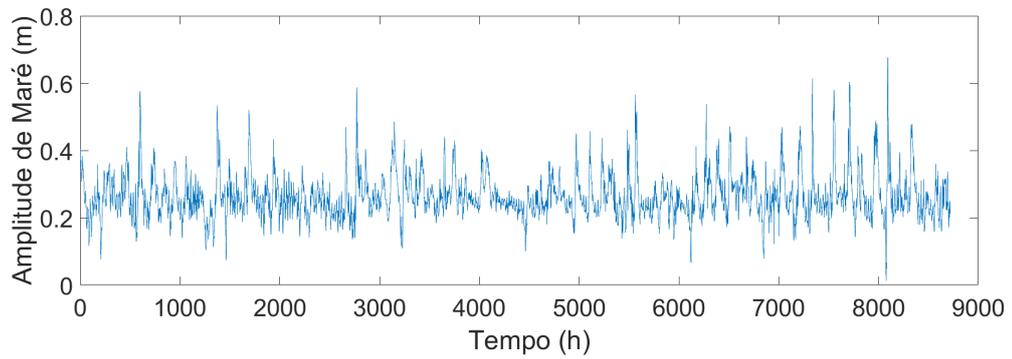


FONTE: O Autor (2022)

O perfil de corrente mostrado acima demonstra que há grande tendência lateral de movimentação da água, compatível com a geografia da baía, e com o local designado para a análise. Este resultado corrobora com (LANA *et al.*, 2001) que descreve o eixo de direção da corrente do CEP, internamente, como sendo de Leste-Oeste, no trecho analisado.

É possível notar que há maior intensidade de corrente no sentido de vazante (leste), que pode ser devido à descarga fluvial na baía, aumentando o fluxo de vazante, porém este estudo não pôde verificar esta característica.

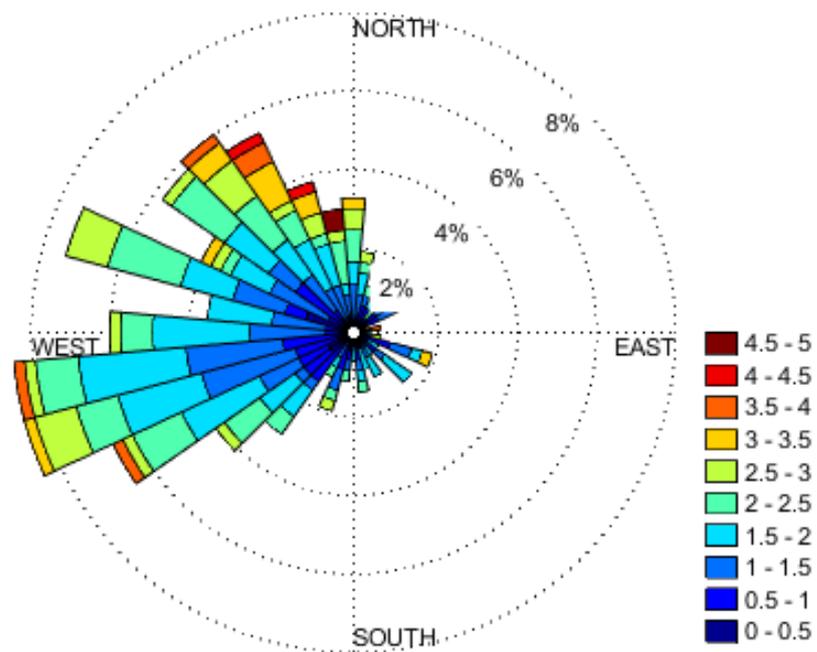
FIGURA 15 – AMPLITUDE HORÁRIA DE MARÉ , 2016



FONTE: O Autor (2022)

A elevação do nível do mar também foi avaliada, sendo encontrada uma variação de até +0.6 metros de amplitude de maré em relação aos dados de batimetria.

FIGURA 16 – MÉDIA DIÁRIA DE VELOCIDADE (M/S) E DIREÇÃO DE VENTO NO PONTO SELECIONADO, 2016

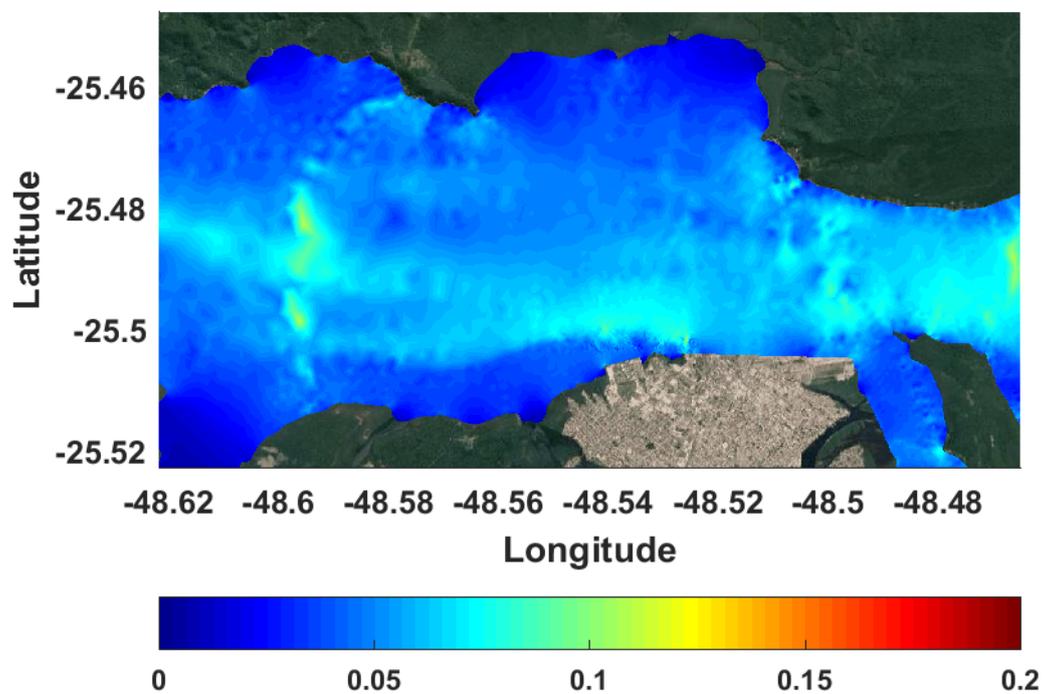


FONTE: O Autor (2022)

Os dados de vento mostram uma predileção pelas direções oeste , sudoeste e nordeste, com maiores frequências entre 1 e 3 m/s. Também denotou-se uma relativa ausência de ventos nas direções Sudeste, e Nordeste durante o ano de 2016.

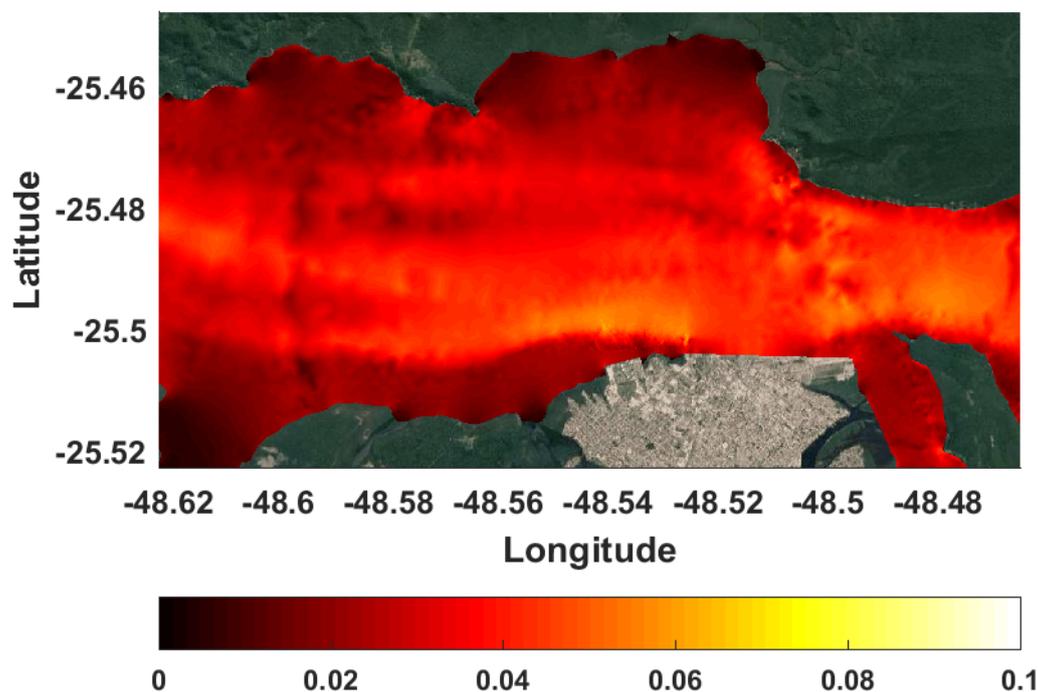
A velocidade máxima de corrente, a média e seu desvio padrão são condizentes com o perfil de corrente, e são abaixo denotados. As velocidades médias apresentam valores elevados dentro do canal de navegação corroborados por um alto desvio padrão nas mesmas regiões. Velocidades máximas de 0,5 m/s foram observadas no canal de navegação além de baixas intensidades nas regiões de menor profundidade.

FIGURA 17 – VELOCIDADE MÉDIA (M/S) NO PERÍODO DE SIMULAÇÃO



FONTE: O Autor (2022)

FIGURA 18 – DESVIO PADRÃO DA VELOCIDADE NO PERÍODO DE SIMULAÇÃO



FONTE: O Autor (2022)

TABELA 2 – DADOS DO PERÍODO DE SIMULAÇÃO

n ^o Dia	Data	Tempo de Início (h)	Direção predominante do Vento	Direção de Corrente
145	24/mai	60	Sudoeste	leste-oeste
225	12/ago	66	Norte	leste-oeste

FONTE: O autor(2022)

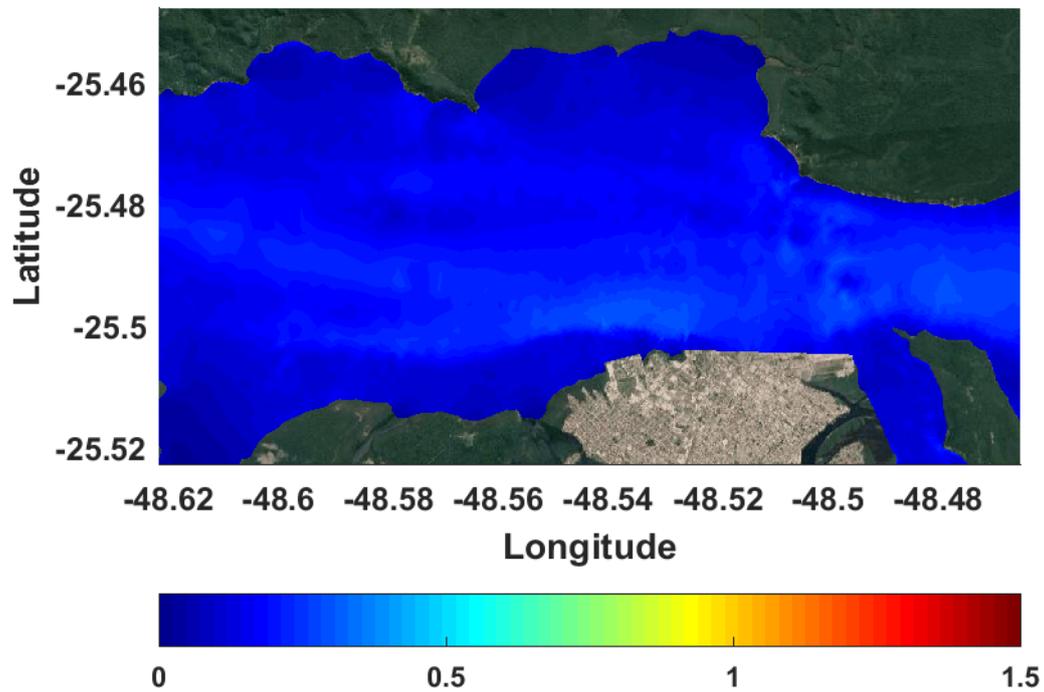
4.2 SIMULAÇÃO DO DERRAMAMENTO DE ÓLEO

Para o derramamento de óleo, foram analisados os dados de entrada de vento e velocidade de corrente, encontrando dois cenários distintos de caminhamento da pluma de contaminação, atingindo diferentes pontos da baía.

O vento foi elencado como variante determinante na seleção do período de simulação, consoante com (POSSA, 2019), que analisou a influência do vento em modelagens hidrodinâmicas, concluindo que este é capaz de influenciar fortemente a dinâmica do ambiente hídrico.

Os dias escolhidos para a simulação do derramamento foram os de n^o 145 e 225, correspondendo aos dias 24 de maio e 12 de agosto de 2016, conforme tabela 2 acima.

FIGURA 19 – VELOCIDADE MÁXIMA (M/S) NO PERÍODO DE SIMULAÇÃO

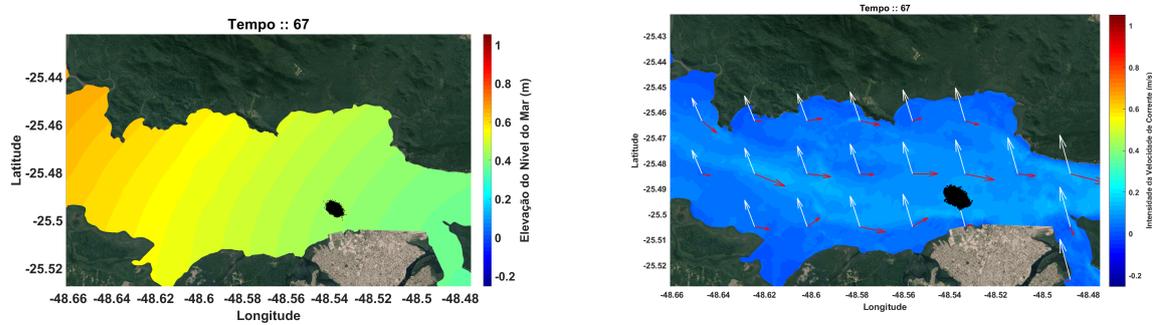


FONTE: O Autor (2022)

O tempo de início foi considerado devido às incertezas iniciais do processamento dos dados na modelagem hidrodinâmica, que interfere bastante na estabilidade dos primeiros dados. Assim, foi adotado um período de início do derramamento de 60 e 66 horas, a fim tornar os dados mais confiáveis. As figuras abaixo dão uma perspectiva da evolução da pluma de contaminação para o período considerado, assim como denotam conjuntamente a variação da elevação do nível do mar.

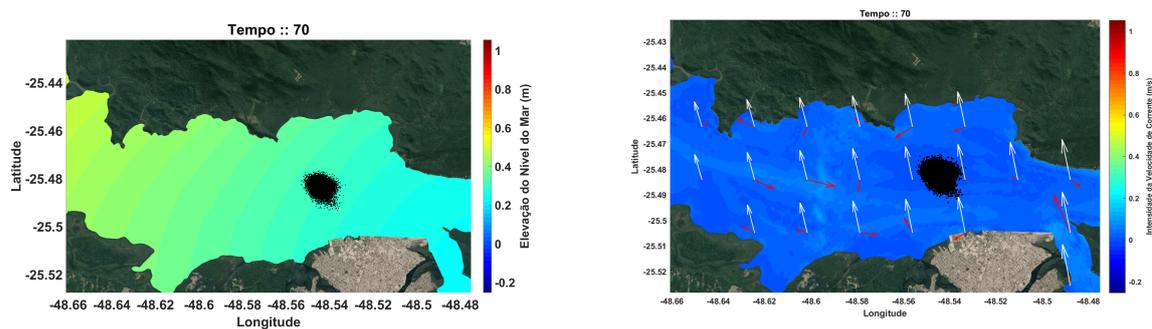
4.2.1 Derrame 12 de agosto - dia 225

FIGURA 20 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 225, HORA 2



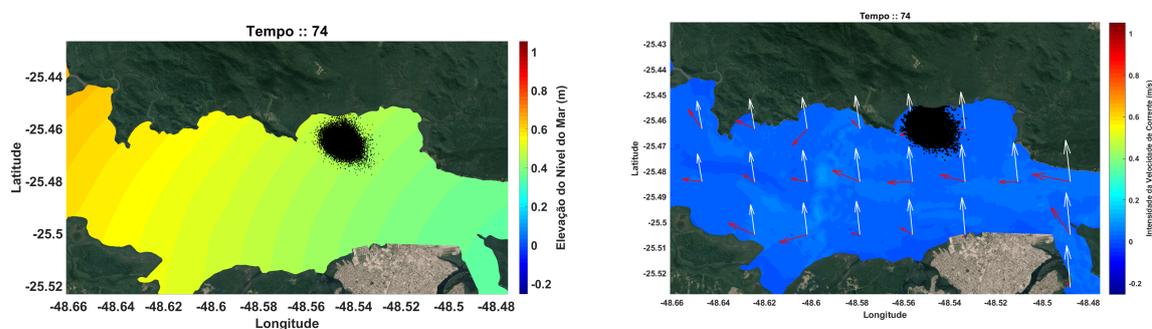
FONTE: O Autor (2022)

FIGURA 21 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 225, HORA 5



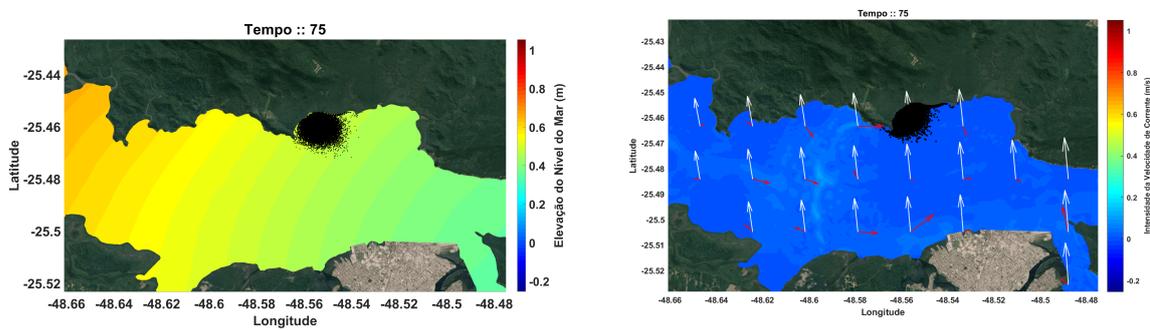
FONTE: O Autor (2022)

FIGURA 22 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 225, HORA 9



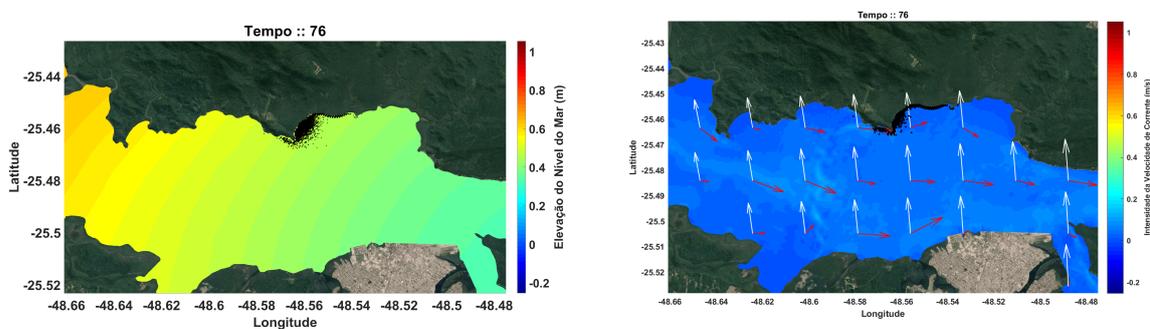
FONTE: O Autor (2022)

FIGURA 23 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 225, HORA 10



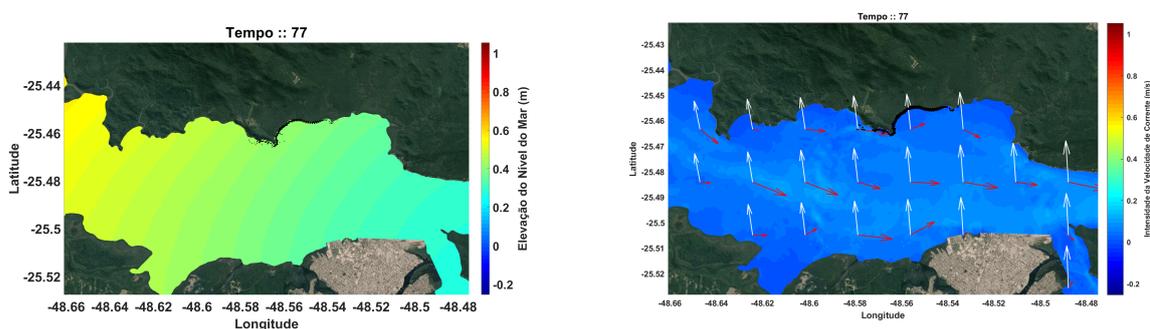
FONTE: O Autor (2022)

FIGURA 24 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 225, HORA 11



FONTE: O Autor (2022)

FIGURA 25 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 225, HORA 12



FONTE: O Autor (2022)

As figuras acima demonstram que o óleo derramado seguiu direção preferencial norte, com alguma variação no sentido leste-oeste, demonstrando que as velocidades e intensidades de corrente tiveram interferência minoritária na região, para o período considerado.

Abaixo, as direções e intensidades de corrente e vento foram concatenadas junto às figuras, em resolução suficiente para permitir visualização, para verificar o comportamento da

mancha de óleo em relação às duas forçantes.

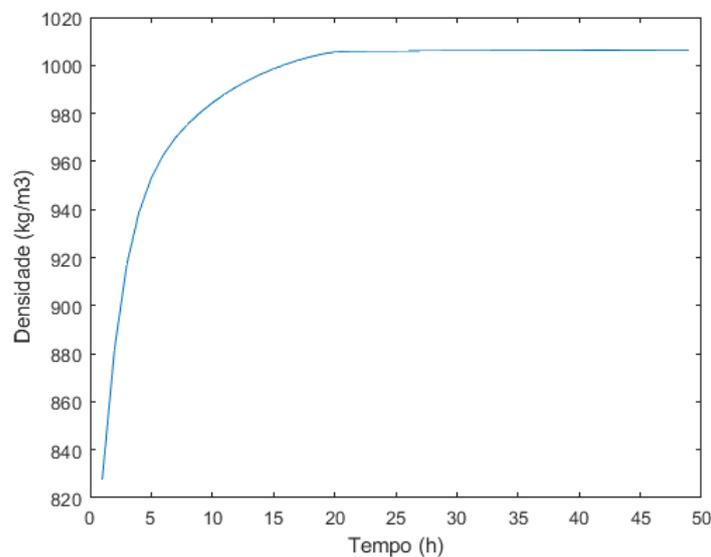
As figuras mostraram que a forçante vento possui grande influência no espriamento da pluma de contaminação, fazendo com que esta se desloque com pouca interferência da velocidade e direção de corrente, apesar de haver um movimento sensível no sentido leste - oeste.

Após o contato da pluma com a costa, o espriamento para, sendo considerado que o óleo se aderiu à superfície costeira. No caso desta simulação, o óleo derramado se movimentou pela baía e atingiu uma região próxima à reserva biológica Bom Jesus, importante remanescente de mata atlântica, também uma região de mangue, a região conhecida como Eufrasina, e as desembocaduras dos rios Itimirim e Buquerinha. A área possui ISL 10, sendo considerada extremamente sensível ao óleo (NOERNBERG *et al.*, 2009).

Há relativa inércia governamental, assim como burocracia exagerada no que tange ações rápidas para contenção de acidentes ambientais. Assim, fica clara a necessidade do setor privado de tomar responsabilidade pelas ações preventivas e planejamentos para frear a conter o avanço da pluma, evitando que a mesma chegue em locais de extrema sensibilidade. (PENA *et al.*, 2020)

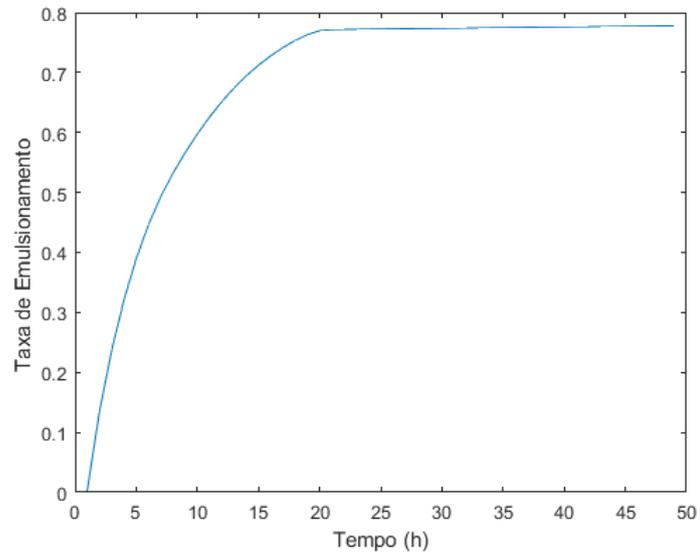
As variáveis de degradação também puderam ser avaliadas, conforme abaixo, a variação de densidade, emulsificação e evaporação do óleo.

FIGURA 26 – VARIAÇÃO DE DENSIDADE DO ÓLEO



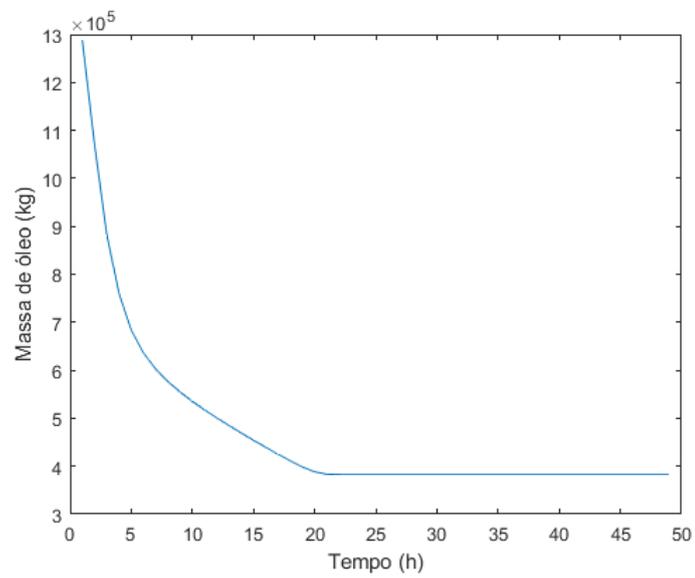
FONTE: O Autor (2022)

FIGURA 27 – EMULSIFICAÇÃO DO ÓLEO



FONTE: O Autor (2022)

FIGURA 28 – EVAPORAÇÃO



FONTE: O Autor (2022)

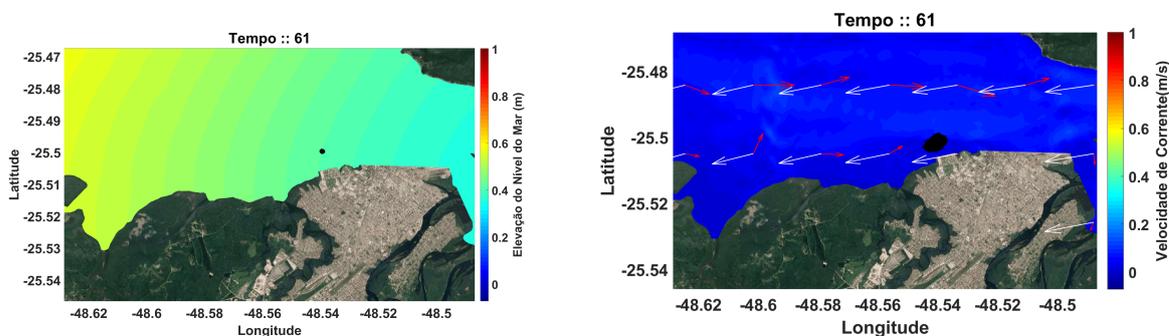
A observação das figuras que caracterizam o intemperismo do óleo permite perceber que há limites metodológicos no atual modelo de simulação do óleo, sendo que a taxa de emulsificação, que afeta a própria densidade, facilitando o seu afundamento, estabiliza em quase 80 %. Esta é uma limitação da ferramenta de processamento.

A massa de óleo também demonstra uma evaporação de 67,5 % até a vigésima hora de simulação, sendo estabilizada após este tempo. Este é um dado que não condiz com diretrizes. Frações pesadas de petróleo não são passíveis de tão alta taxa de evaporação, sendo esta uma inconsistência do modelo (IPIECA *et al.*, 2015), (MONTEIRO *et al.*, 2017) . Para além disto, os processos de intemperismo que ocorrem a partir da chegada do óleo na costa não são processados pelo modelo, que apenas para de calcular novas posições para as partículas, citando que este também é um ponto a ser melhorado no processamento. (MONTEIRO *et al.*, 2017)

4.2.2 Derrame 24 de Maio - Dia 145

As figuras a seguir são relativas ao derramamento ocorrido no dia 145. A direção de espalhamento do óleo teve como principal forçante o vento, assim como na simulação do dia 225.

FIGURA 29 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 145, HORA 1

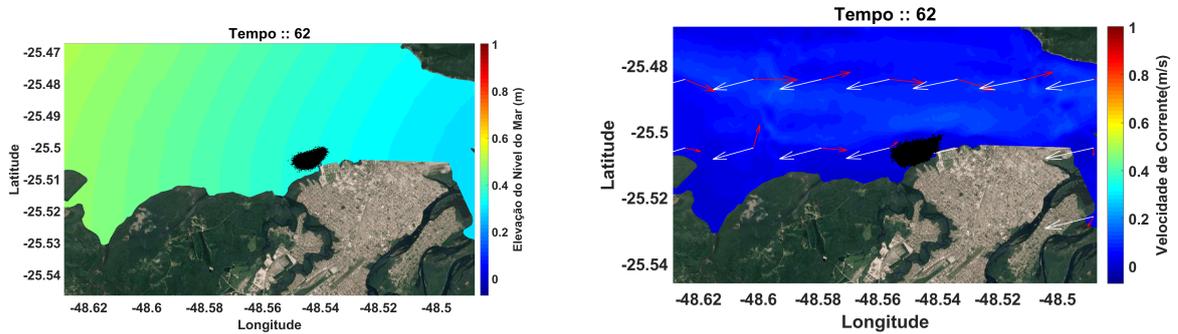


FONTE: O Autor (2022)

Nesta simulação, há uma derivação do óleo para o sudoeste, atingindo rapidamente os manguezais próximos, e as regiões de desembocadura do rio Emboguaçu, que também possuem índice ISL 10, configurando que nas duas simulações, o impacto ambiental do derramamento foi bastante significativo.

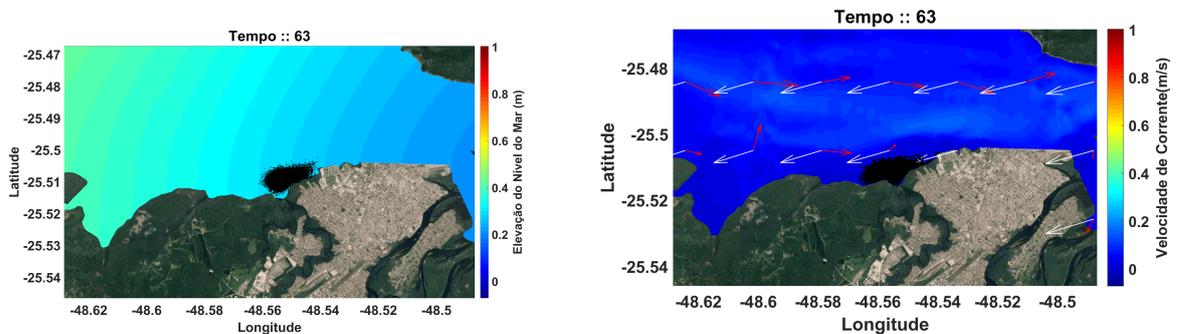
Quanto ao intemperismo do óleo, as figuras abaixo denotam a mesma condição da análise do dia 225. Considera-se, portanto, que há limitações no processamento destes parâmetros.

FIGURA 30 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 145, HORA 2



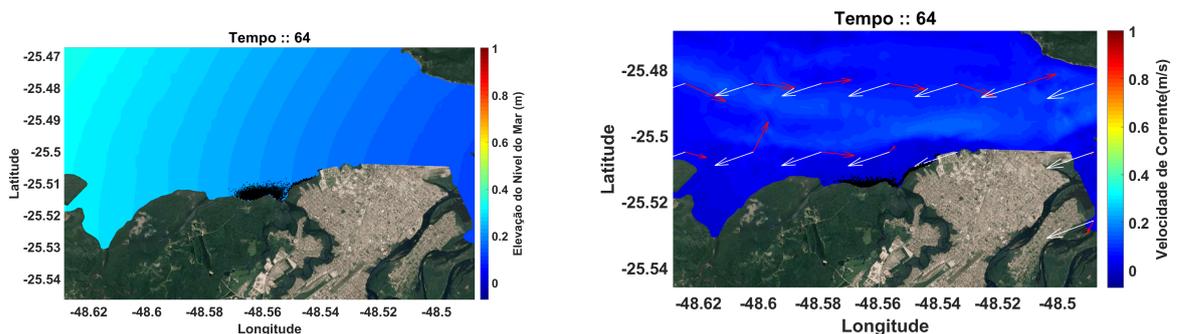
FONTE: O Autor (2022)

FIGURA 31 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 145, HORA 3



FONTE: O Autor (2022)

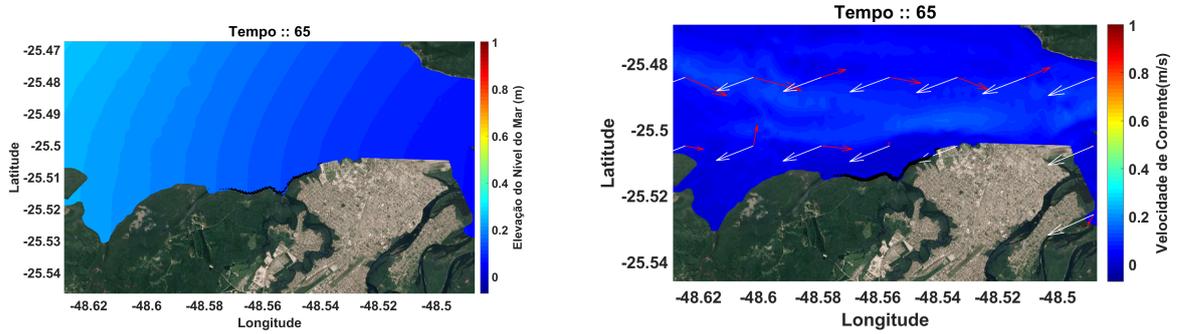
FIGURA 32 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 145, HORA 4



FONTE: O Autor (2022)

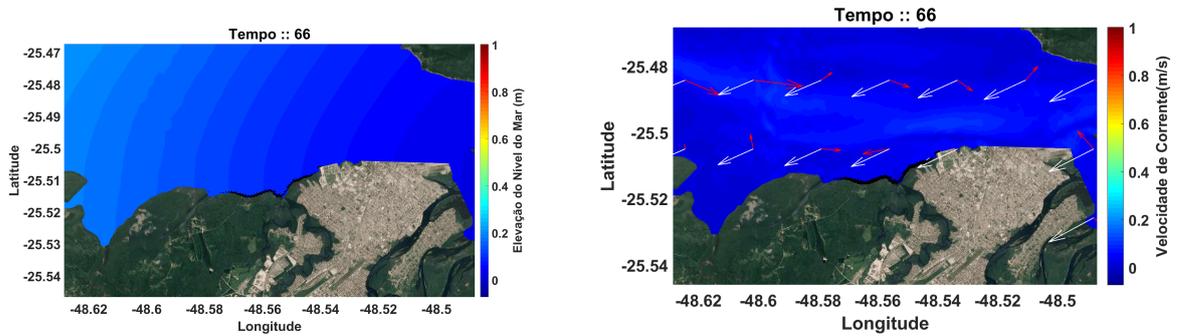
O intervalo de estabilização do intemperismo é mais curto do que a análise do dia 225, devido à aderência do óleo na costa, que se deu de forma mais rápida na simulação do dia 145.

FIGURA 33 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 145, HORA 5



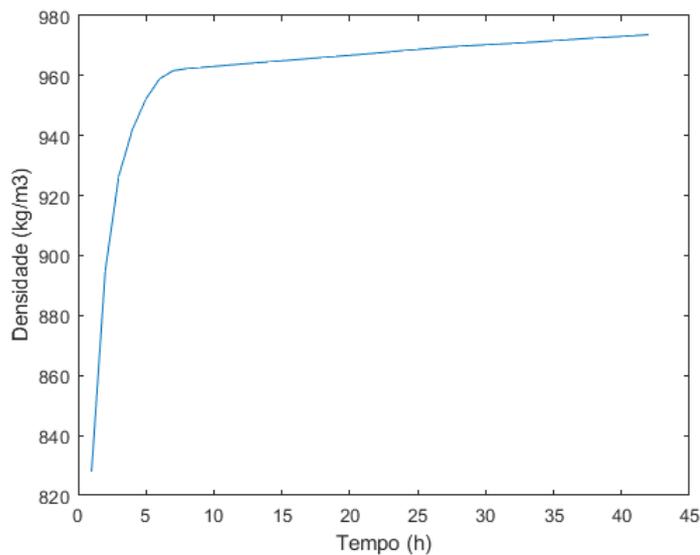
FONTE: O Autor (2022)

FIGURA 34 – SIMULAÇÃO DO DERRAME DE ÓLEO, NÍVEL, VELOCIDADE E DIREÇÃO DE CORRENTE, DIA 145, HORA 6



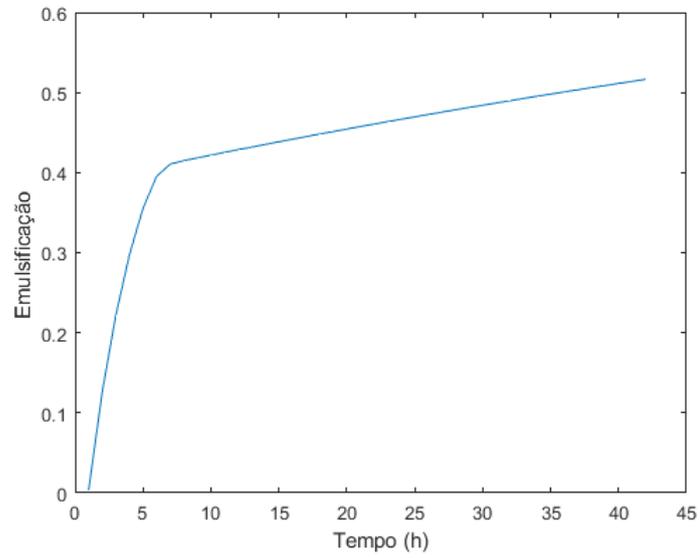
FONTE: O Autor (2022)

FIGURA 35 – VARIAÇÃO DE DENSIDADE DO ÓLEO



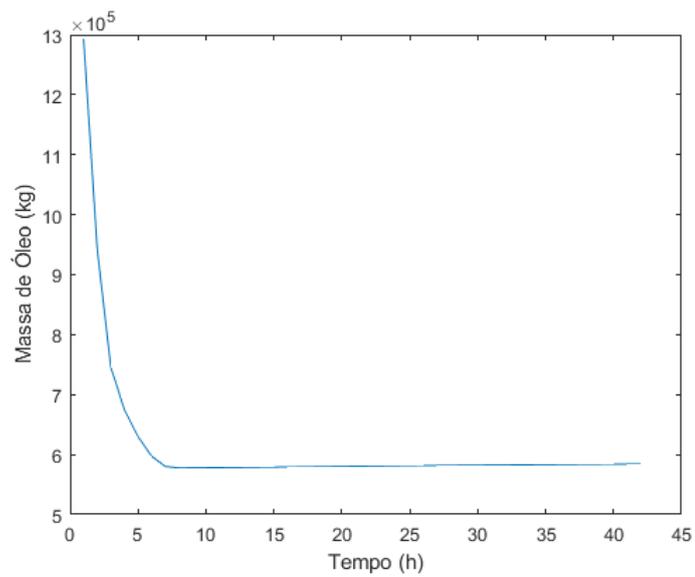
FONTE: O Autor (2022)

FIGURA 36 – EMULSIFICAÇÃO DO ÓLEO



FONTE: O Autor (2022)

FIGURA 37 – EVAPORAÇÃO



FONTE: O Autor (2022)

5 CONCLUSÃO

O modelo de simulação hidrodinâmica e o de derrame de óleo foram executados de forma a representar um espalhamento teórico de uma pluma de contaminação com volume de 1659 m³. Foram utilizadas diversas variáveis como condições de entrada das análises, como velocidade e direção de corrente, velocidade e direção de vento, nível do mar, salinidade, temperatura, profundidade entre outros.

O modelo hidrodinâmico impactou significativamente a dispersão da pluma, sendo que a principal forçante identificada foi o vento, que sobrepujou fortemente a velocidade e direção de corrente.

Alguns parâmetros não puderam ser representados com fidelidade devido à limitações do modelo, como taxa de emulsificação e evaporação, sendo que estes se configuram como importantes parâmetros a serem avaliados, o que impossibilitou uma análise mais aprofundada.

Os locais atingidos pela pluma de óleo nas simulações (manguezais e desembocadura de rios) se mostraram de bastante fragilidade ambiental, com ISL 10, demonstrando que há relevância no trabalho e que há necessidade de se manter Planos de Emergência Individual atualizados e com garantia de resposta rápida, visto que o óleo pode chegar rapidamente à costa. O dano também toma proporções socioeconômicas quando é analisado prejuízo à pesca.

A extensão do dano ambiental nas comunidades e no entorno pode ser avaliada em estudos futuros, e este estudo pode servir de base para planejamento de ações de resposta ou modelagens, desde que sejam levadas em consideração as condições hidrodinâmicas.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2021**. Brasil, 2021. 264 p. Citado na página 14.
- CASEIRO, A. M. **Simulação de um eventual vazamento de óleo no oleoduto da Baía da Babitonga - SC**. [S.l.: s.n.], 2011. Citado na página 24.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 398/2008**: 2008. Brasil, 2008. 23 p. Citado na página 14.
- ENVIRONMENTAL PROTECT AGENCY. **DeepWater Horizon, BP Gulf Of Mexico Oil Spill**. 2022. Citado na página 14.
- FERREIRA, I. C. G. **O Plano de Emergência: a sua importância**. [S.l.: s.n.], 2007. Citado na página 23.
- FIGUEIRA, P. O. Memórias do desastre ambiental do navio vicuña (2004). **Faces da História**, v. 6, 6 2019. Disponível em: <<https://seer.assis.unesp.br/index.php/facesdahistoria/article/view/1300>>. Citado na página 16.
- GOOGLE. **Google Maps - Litoral do Paraná**. 2022. Citado na página 26.
- GRAZIOTTO, M. P. L. **Modelagem numérica como ferramenta para caracterizar a dispersão da pluma de um derrame de óleo em São Francisco do Sul, Santa Catarina**. [S.l.: s.n.], 2019. Citado na página 25.
- HERVOUET, J. **Hydrodynamics of Free Surface Flows**. [S.l.]: Wiley, 2007. ISBN 9780470035580. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- IPIECA; IMO; OGP; CEDRE. Aerial observation of oil spills at sea: Good practice guidelines for incident management and emergency response personnel. **IOGP Report Number 518**, 2015. Disponível em: <www.imo.org>. Citado na página 42.
- ITOPF. **ITOPF HandBook**. [S.l.: s.n.], 2021. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 24.
- KIRINUS, E. P.; TOMAS, G. P. Análise computacional dos processos erosivos na desembocadura do canal do departamento nacional de obras e saneamento (dnos) e zonas de praia próximas no município pontal do paraná-pr. **Sociedade, ambiente e tecnologia: Mar afora, costa adentro**, p. 83–102, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 29.
- LANA, P.; MARONE, E.; LOPES, R.; MACHADO, E. The subtropical estuarine complex of paranagu?? bay, brazil. In: _____. [S.l.: s.n.], 2001. v. 144, p. 131–145. ISBN 978-3-642-08657-1. Citado na página 33.
- MARQUES, W.; STRINGARI, C.; KIRINUS, E.; MÖLLER, O.; TOLDO, E.; ANDRADE, M. Numerical modeling of the tramandaí beach oil spill, brazil—case study for january 2012 event. **Applied Ocean Research**, v. 65, p. 178–191, 4 2017. ISSN 01411187. Citado 3 vezes nas páginas 15, 24 e 28.
- MARQUES, W. C.; STRINGARI, C. E.; MELLO, L. F. **ECOS - Easy Coupling Oil System**. 2013. Citado na página 28.

MMA. **Especificações e Normas Técnicas para Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para Derramamentos de Óleo**. [S.l.], 2004. Citado na página 21.

MONTEIRO, C. Suscetibilidade e vulnerabilidade ambiental a vazamentos de óleo em áreas ambientalmente sensíveis. 2020. Citado na página 15.

MONTEIRO, C.; KIRINUS, E.; MARQUES, W.; OLEINIK, P.; COSTI, J. Analysis of two oil spills in the southern brazilian shelf, in the years of 2012 and 2014. **Defect and Diffusion Forum**, v. 372, p. 70–80, 3 2017. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 42.

NOERNBERG, M.; ANGELOTTI, R.; CALDEIRA, G.; SOUSA, A. Environmental sensitivity assessment of paraná coast for oil spill. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 12, 1 2009. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 40.

PARENTE, Y.; MENDES, A.; BERREDO, J.; MIRANDA, A. **Elaborao de Cartas de ndice de Sensibilidade Ambiental ao Derrame de leo Para a Ilha de Mosqueiro - Belém /PA**. [S.l.: s.n.], 2016. 1082-1089 p. Citado na página 22.

PENA, P. G. L.; NORTHCROSS, A. L.; LIMA, M. A. G. de; RGO, R. de C. F. Derramamento de óleo bruto na costa brasileira em 2019: emergência em saúde pública em questão. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 36, 2020. ISSN 1678-4464. Citado na página 40.

PETROBRAS. **Combustíveis Marítimos**. Brasil, 2021. 11 p. Citado na página 18.

PORTOS DO PARANÁ. **SGI - Sistema de Gestão Integrada OS 173/2020**. Brasil, 2020. 230 p. Citado na página 14.

PORTOS DO PARANÁ. **Anuário Estatístico 2021**. Brasil, 2021. 1 p. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

POSSA, T. M. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada da bacia hidrográfica mirim-são gonçalo com influência do vento. **Universidade Federal de Pelotas**, 2019. Citado na página 36.

SPOLAVORI, A. D. Computao de alto desempenho aplicada a modelagem numérica de fenmenos atmosféricos. 2014. Citado na página 15.

TREVISANI, J.; A, B. B.; BAETTKER, E.; CRISTINA, E.; KOBISKI, B. V.; NAGALLI, A. Auditorias ambientais compulsórias: instrumento para minimizao de acidentes com derramamento de petróleo. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 6, p. 200–218, 6 2014. Citado na página 14.

VENTURA, M. M. O estudo de caso como modalidade de pesquisa. **Rev. Socerj**, v. 20, p. 383–386, 2007. Citado na página 16.