



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA

JOSÉ ADELJAN MARINHO DA SILVA

**ESTUDO NUMÉRICO PRELIMINAR DA DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL
DE POTENCIAIS VAZAMENTOS DE PETRÓLEO DECORRENTES DE
NAVIOS QUE PASSAM PRÓXIMOS AO ARQUIPÉLAGO DE FERNANDO DE
NORONHA**

RECIFE

Janeiro de 2023

JOSÉ ADELJAN MARINHO DA SILVA

**ESTUDO NUMÉRICO PRELIMINAR DA DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL
DE POTENCIAIS VAZAMENTOS DE PETRÓLEO DECORRENTES DE
NAVIOS QUE PASSAM PRÓXIMOS AO ARQUIPÉLAGO DE FERNANDO DE
NORONHA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de graduação
em Engenharia Naval e Oceânica da
Universidade Federal de Pernambuco,
em Recife/PE, como requisito parcial
para a obtenção do título de
Engenheiro Naval.

Orientador: Heitor de Oliveira Duarte

RECIFE

Janeiro de 2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, José Adeljan Marinho da.

Estudo numérico preliminar da dinâmica espaço-temporal de potenciais vazamentos de petróleo decorrentes de navios que passam próximos ao arquipélago de Fernando de Noronha / José Adeljan Marinho da Silva. - Recife, 2023.

76 p. : il., tab.

Orientador(a): Heitor de Oliveira Duarte

Coorientador(a): Paulo Gabriel Santos Campos de Siqueira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Naval - Bacharelado, 2023.

9.

Inclui referências, apêndices.

1. Vazamentos de Petróleo. 2. Análise Quantitativa de Risco. 3. Riscos Ambientais. 4. Condições Meteoceanográficas. I. Duarte, Heitor de Oliveira. (Orientação). II. Siqueira, Paulo Gabriel Santos Campos de. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

JOSÉ ADELJAN MARINHO DA SILVA

**ESTUDO NUMÉRICO PRELIMINAR DA DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL
DE POTENCIAIS VAZAMENTOS DE PETRÓLEO DECORRENTES DE
NAVIOS QUE PASSAM PRÓXIMOS AO ARQUIPÉLAGO DE FERNANDO DE
NORONHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Pernambuco
como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval e
Oceânica.

Data de Aprovação: Recife – PE, 20 de janeiro de 2023.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

HEITOR DE OLIVEIRA DUARTE

Data: 09/11/2023 15:21:08-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Heitor de Oliveira Duarte, DSc.

(Orientador – UFPE – Departamento de Engenharia Mecânica)



Documento assinado digitalmente

PAULO GABRIEL SANTOS CAMPOS DE SIQUEIRA

Data: 17/10/2023 21:03:42-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Paulo Gabriel Santos Campos de Siqueira, MSc.

(Coorientador – UFPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção)



Documento assinado digitalmente

MIGUEL ANGEL CELIS CARBAJAL

Data: 11/11/2023 21:14:22-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Miguel Angel Celis Carbajal, DSc.

(Examinador interno – UFPE – Departamento de Engenharia Mecânica)



Documento assinado digitalmente

ANA CLAUDIA SOUZA VIDAL DE NEGREIROS

Data: 07/02/2023 10:32:08-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Ana Cláudia Souza Vidal de Negreiros, DSc.

(Examinador externo – UFPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, Maria e Adelson, pelos esforços e incentivos a chegar até a conclusão deste curso.

À minha irmã Mary e cunhado Vinícius pelo apoio nos momentos difíceis; e a Bento, por trazer luz à minha vida.

Ao meu orientador, Professor Doutor Heitor de Oliveira Duarte, pela orientação, paciência e ensinamentos.

Ao meu coorientador, amigo e irmão, Paulo Gabriel, pela paciência, orientação e acima de tudo, amizade.

A Eliezer, pelo amor e companheirismo.

Aos amigos que fiz na graduação: Beatriz, Maria Luísa e Maria Laura.

Aos professores do Curso de Engenharia Naval da UFPE, pelos esforços para formar bons profissionais.

A outros profissionais que, de alguma forma, incentivaram este trabalho: professores Márcio Moura, Marcus Silva e Moacyr Araújo; práticos de navio Alexander Kreuger e Márcio Cajaty; e oficiais de náutica Robert Kreuger e Daniel Galvão.

“The whole future lies in uncertainty.

Live immediately.”

Lúcio Aneu Séneca

RESUMO

Vazamentos de óleo nos oceanos e mares são uma ameaça latente que podem causar impactos desastrosos em ecossistemas marinhos. Os impactos de um vazamento de óleo se estendem nos aspectos ecológicos, sociais e econômicos. O óleo afeta diretamente a vida marinha, aumentando a mortalidade das espécies e causando má-formações congênitas, para citar alguns exemplos. Além disso, há também o impacto no aspecto socioeconômico do local afetado pelo vazamento, prejudicando atividades comerciais (e.g. turismo, pesca) e as condições de vida dos habitantes. Estes fatores acentuam a importância de avaliar os riscos de potenciais vazamentos, com o intuito de promover direcionamento para que sejam desenvolvidas estratégias adequadas de mitigação de impactos e, principalmente, prevenção dos acidentes. Neste contexto, o trabalho em questão se propõe a simular casos de vazamentos de petróleo decorrentes de acidentes envolvendo navios petroleiros na região circunvizinha ao Arquipélago de Fernando de Noronha (AFN). O objetivo de tais simulações é identificar se, na eventualidade de um acidente no qual haja derramamento de óleo no oceano, a pluma decorrente afetaria a costa do AFN. A trajetória da mancha de óleo é simulada por meio de um modelo lagrangiano (i.e., MEDSLIK-II) que integra os efeitos das condições meteoceanográficas (i.e. correntes oceânicas, vento, temperatura da superfície do oceano) e intemperismos (i.e. evaporação, dispersão, emulsificação) na concentração da mancha de óleo ao longo do deslocamento desta pelo oceano e identificar se haveria concentração na costa do arquipélago. As simulações revelaram que, no mês de julho, um dos vazamentos simulados atingiu o AFN, levando uma grande quantidade de óleo à costa da região, em aproximadamente 20 horas. Este resultado indica que, na ocorrência de um vazamento na região, há possibilidade de grandes impactos tanto no ecossistema local quanto nos aspectos socioeconômicos do AFN. Estes resultados podem posteriormente integrados a uma Avaliação Quantitativa de Risco Ecológico (AQRE) para vazamentos de petróleo, fornecendo resultados úteis para a etapa de avaliação de consequências.

Palavras-chave: Vazamentos de Petróleo; Análise Quantitativa de Risco; Riscos Ambientais; Condições Meteoceanográficas.

ABSTRACT

Oil spills in the oceans and seas are a latent threat that can cause serious damage to marine ecosystems. The impacts of an oil spill can extend to ecological, social and biological aspects. Oil directly affects marine life, increasing species mortality and causing congenital malformations, to name a few examples. In addition, there is also the impact on the socioeconomic aspect of the place affected by the leak, harming commercial activities (e.g., tourism, fishing) and the living conditions of the inhabitants. These factors emphasize the importance of assessing the risks of leaks, with the aim of promoting guidance so that impact mitigation strategies may be designed and, above all, accident prevention. In this context, the work in question proposes simulating cases of oil spills caused by accidents involving oil tankers in the region surrounding the Fernando de Noronha Archipelago (AFN). The objective of such simulations is to identify whether, in the event of an accident in which there is an oil spill in the ocean, the resulting plume would affect the AFN coast. The trajectory of the oil slick is simulated using a Lagrangian model (i.e., MEDSLIK-II) that integrates the effects of meteoceanographic conditions (i.e., ocean currents, wind, ocean surface temperature) and weathering (i.e., evaporation, diffusion, emulsification) on the concentration of the oil slick as it moves across the ocean and identify whether there would be concentration on the coast of the archipelago. The simulations revealed that, in July, one of the simulated leaks consumed the AFN, taking a large amount of oil to the coast of the region, in approximately 20 hours. This result indicates that, in the event of a leak in the region, there is possibility of major impacts both on the local ecosystem and on the socioeconomic aspects of the AFN. These results can later be integrated into a Quantitative Ecological Risk Assessment (QERA) for oil spills, providing useful results for the consequence assessment step.

Keywords: Oil Spills; Quantitative Risk Analysis; Environmental Risks; Meteoceanographic Conditions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. International Marine Organization (IMO) em ação de mitigação dos impactos do derramamento de óleo MV Wakashio nas Ilhas Mauritius.	13
Figura 2. Declínio no número de derramamentos de navios-tanque versus crescimento no comércio de petróleo bruto e outros navios-tanque carregados, 1970-2020. As barras representam o número de vazamentos maiores que 7 tons. A linha vermelha representa o volume total de óleo e outros tipos de transporte por navios tanques (em milhões de toneladas métricas)	15
Figura 3. Modelo que constitui uma Avaliação Quantitativa de Risco Ecológico (AQRE). Destaque (em azul) para a etapa de Modelagem de Dispersão, desenvolvida neste trabalho.....	18
Figura 4. Localização do Arquipélago de Fernando de Noronha (latitude x longitude) no Oceano Atlântico Sul.....	20
Figura 5. Principais processos de intemperismo atuantes em um derramamento de óleo.	30
Figura 6. Metodologia do procedimento de solução do modelo MEDSLIK-II.....	37
Figura 7. Representação esquemática das classes de concentração de óleo (as esferas cinzas representam as partículas de óleo e LC - o litoral).	39
Figura 8. Esquema simplificado do MEDSLIK-II com as entradas (modelos oceanográficos e atmosféricos Eulerianos) e as saídas (modelo de destino e transporte do derramamento de óleo).	46
Figura 9. Evolução mensal das velocidades dos ventos no AFN.	47
Figura 10. Principais rotas junto à AFN: Ponce e Colón – Cabo da Boa Esperança (PC – CGH, ida); Recife – Ilha da Madeira (Rec – MI, ida e volta); Recife – Cabo Noaudhibou (REC – CN, ida e volta). Seis marcos estão representados na figura: (A) Colina do Pico; (B) Farol FN; (C) Igreja de São Pedro; (D) Antena; (E) Ilha do Ovo; (F) Pontinha. Escala 1:4222.....	48
Figura 11. Localização do AFN e coordenadas dos pontos de liberação P1, P2 e P3 para as simulações de derramamento de óleo.....	50
Figura 12. Distribuição média da velocidade do vento (cores, m/s) e direção (setas) para março (a) e julho (b).	52

Figura 13. Distribuição média da TSM (cores, °C) e direção das correntes de superfície (setas) para março (a) e julho (b).....	53
Figura 14. Concentração de óleo na água para o cenário P2J (ton/km ²) após (a) 01 hora; (b) 10 horas; e (c) 20 horas. As cruzes representam o ponto de liberação do derramamento de óleo.	55
Figura 15. Sugestão de delimitação de região para limitação de tráfego no AFN. P1, P2 e P3 representam os pontos de vazamento considerados nas simulações.	58
Figura 16. Sugestão de perímetro de instalação de boias de contenção para plano emergencial.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Número de vazamentos médios (7-700 toneladas) e grandes (>700 toneladas) por década, de 1970 a 2000.	14
Tabela 2. Maiores vazamentos de óleo recentes.....	16
Tabela 3. Comparação dos modelos de derramamento de óleo.	23
Tabela 4. Acidentes de Navegação.....	41
Tabela 5. Resumo dos cenários de simulação de derramamento de óleo.....	50
Tabela 6. Parâmetros do modelo de dispersão	51
Tabela 7. Resumo, para cada cenário, da porcentagem de óleo que evaporou, permaneceu na superfície do mar, disperso na coluna de água e fixado na costa e no fundo do mar.....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	O ARQUIPÉLAGO DE FERNANDO DE NORONHA.....	19
1.2	OBJETIVOS	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
3.1	MEDSLIK-II.....	27
3.1.1	Equações Governantes e Variáveis de Estado do Modelo	28
3.1.2	Processos de Intemperismo	30
3.1.2.1	Espalhamento.....	30
3.1.2.2	Evaporação.....	32
3.1.2.3	Emulsificação.....	34
3.1.2.4	Dispersão	34
3.1.3	Metodologia de Simulação	36
3.1.4	Principais Resultados do MEDSLIK-II	38
3.2	Análise Quantitativa de Risco Ecológico	39
3.3	Regulamentação e Legislação.....	40
4	METODOLOGIA	44
4.1	IDENTIFICAR POSSÍVEIS CENÁRIOS DE VAZAMENTO	44
4.2	DADOS METEOCEANOGRÁFICOS	45
4.3	SIMULAÇÕES DE VAZAMENTO	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1	CENÁRIOS ACIDENTAIS DE VAZAMENTO	47
5.1.1	Definição das Rotas	47
5.1.2	Pontos de Vazamento	49
5.1.3	Consolidação dos Cenários de Vazamento	50
5.2	RESULTADOS OCEANOGRÁFICOS E ATMOSFÉRICOS	51

5.3	SIMULAÇÕES DE VAZAMENTO.....	53
5.4	DISCUSSÕES.....	56
5.4.1	Vantagens e Limitações	60
6	CONCLUSÕES.....	62
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
	APÊNDICES	72

1 INTRODUÇÃO

Derramamentos de óleo no oceano são ameaças potenciais que podem causar impactos catastróficos no ambiente marinho e nos ecossistemas dos países costeiros. (CHEN et al., 2019). O elevado número de embarcações petroleiras que circulam pelo globo e eventos extremos (i.e., tempestades, ciclones tropicais) devido ao aquecimento global, aumentam a probabilidade de ocorrência de acidentes envolvendo este tipo de embarcação que, consequentemente, podem afetar ilhas oceânicas (QUEIROZ et al., 2019). Apesar dos imensos esforços das autoridades marítimas internacionais e nacionais ao longo dos anos para aumentar a segurança dos navios, a taxa de ocorrência de acidentes marítimos ainda pode ser considerada elevada, segundo dados da *International Tanker Owners Pollution Federation Limited* (ITOPF, 2022; UNG, 2019). A Figura 1, por exemplo, mostra o maior vazamento dos últimos três anos, nas ilhas Maurício, em 2020, decorrente de uma colisão do MV Wakashio com um recife de corais. Estima-se que o acidente liberou mil toneladas de óleo no oceano, impactando o ecossistema marinho das Ilhas Maurício, que abriga 1.700 espécies, incluindo cerca de 800 espécies de peixes, 17 espécies de mamíferos marinhos e duas espécies de tartarugas (THE DIPLOMATIC AFFAIRS, 2020).

Figura 1. *International Marine Organization* (IMO) em ação de mitigação dos impactos do derramamento de óleo MV Wakashio nas Ilhas Maurício.



Fonte: IMO, 2020.

Entre 2010 e 2019, por exemplo, ocorreram ao todo 63 derramamentos, cujo volume estimado reportado foi de aproximadamente 164 mil toneladas de óleo, que foi a menor quantidade derramada nas últimas décadas completas (ITOPF, 2022). Já entre 2020 e 2022, ocorreram dez vazamentos de óleo reportados (Tabela 1). O volume total de óleo derramado em 2021 foi aproximadamente 10 mil toneladas, que é uma quantidade superior aos dois anos anteriores, entretanto, este fato é atribuído a um único acidente registrado, ilustrado na Figura 1 (ITOPF, 2022).

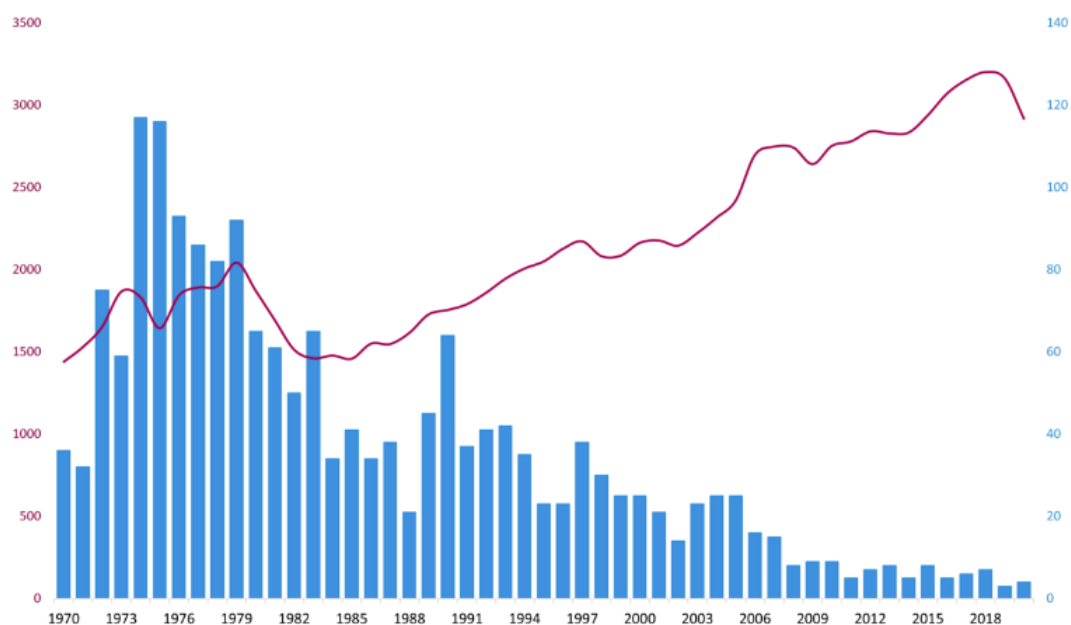
Tabela 1. Número de vazamentos médios (7-700 toneladas) e grandes (>700 toneladas) por década, de 1970 a 2000.

Período	7-700 toneladas	>700 toneladas
1970-1979	543	245
1980-1989	360	94
1990-1999	281	77
2000-2009	149	32
2010-2019	45	18
2020-2022	9	1
Total	1387	467

Fonte: Adaptado de (ITOPF, 2022).

A quantidade de óleo derramado em decorrência de acidentes nas últimas décadas variou de algumas centenas de toneladas (i.e., vazamentos médios) para milhares de toneladas (i.e., vazamentos grandes) (ITOPF, 2022). Apesar do volume de óleo ser uma métrica limitada no contexto de avaria ou impacto ao ambiente afetado, o alto número de vazamentos graves ocorridos nos últimos anos, como descrito na Tabela 2, levanta questionamentos sobre a necessidade de propostas de prevenção de tais eventos. Adicionalmente, apesar do aumento considerável no volume de transporte marítimo de petróleo nos últimos anos, houve uma diminuição também considerável no total de acidentes com navios tanque, devido principalmente ao aumento da segurança no transporte de petróleo. Este comparativo é apresentado na Figura 2. Entretanto, dado que a comercialização do petróleo é uma atividade vital no desenvolvimento econômico, há previsão de intensificação do fluxo do transporte, que vem ocorrendo em maiores volumes, devido ao aumento da capacidade dos navios de transporte e da demanda na comercialização, o que, por sua vez, aumenta tanto a possibilidade de ocorrência de vazamentos quanto as suas consequências (CHEN et al., 2019).

Figura 2. Declínio no número de derramamentos de navios-tanque versus crescimento no comércio de petróleo bruto e outros navios-tanque carregados, 1970-2020. As barras representam o número de vazamentos maiores que 7 tons. A linha vermelha representa o volume total de óleo e outros tipos de transporte por navios tanques (em milhões de toneladas métricas)



Fonte: UNTCTADStat, 2020; ITOPF, 2022.

Estes fatos evidenciam a importância de avaliar os riscos desses acidentes nos ecossistemas costeiros e marinhos. Na avaliação de risco de derramamento de óleo decorrente de acidentes com petroleiros, é fundamental entender o comportamento do óleo pós-derramamento no oceano para avaliar a extensão espaço-temporal do impacto. Além disso, o processo envolve a identificação dos ecossistemas vulneráveis que sofrerão as possíveis consequências. Neste contexto, modelos de simulação de derramamento de óleo foram desenvolvidos para simular trajetórias e destinos de manchas de óleo (i.e., modelos de dispersão) sob condições ambientais reais de derramamentos criados a partir do tráfego marítimo, produção de petróleo ou outras fontes (KERAMEA et al., 2021; SPAULDING, 2017). Dessa forma, os riscos de derramamento de óleo são determinados pelo perigo potencial de poluição por óleo e pelas características ambientais (e.g., correntes oceânicas, ventos, ondas e temperatura da superfície do mar (TSM)).

Tabela 2. Maiores vazamentos de óleo recentes.

Acidente Industrial	Ano	Local	Impacto
Vazamento de óleo na costa de Callao, Peru	2022	Peru	Aproximadamente 6,000 barris de óleo derramados no oceano
Wakashio, um navio de carga japonês, atingiu um recife de corais na Costa de Mauríius, no oceano Índico	2020	Costa de Mauríius	Milhares de toneladas de petróleo derramados no mar, sufocando a vida marinha em uma lagoa.
Vazamento de óleo na costa do nordeste do Brasil	2019	Brasil	4,000 km de costa reportados com presença de óleo e 5,000 toneladas de resíduos do vazamento foram coletados. Prejuízos a corais, mangues e ecossistemas marinhos.
Colisão do navio Suezmax Sanchi com um navio de carga.	2018	Xangai	Incêndio no navio seguido de queima por uma semana. Morte de 32 membros da equipe. Uma mancha de 11 km de extensão se formou na superfície.
Vazamento do navio de produção FPSO, SeaRose	2018	Canadá	Aproximadamente 250,000 litros de petróleo do SeaRose encontrados na costa sudeste de Terra Nova, no Canadá.
Agia Zoni II	2017	Grécia	Aproximadamente 500 toneladas de óleo de combustível pesado foram despejados no oceano, contaminando as costas da Salamina e Atenas.
Vazamento de um poço da Chevron, na Bacia de Campos	2011	Brasil	32,000 a 52,000 litros de pré-óleo inseridos no oceano por dia. Pequenos impactos ambientais reportados e nenhuma parcela de óleo atingiu a costa do Rio de Janeiro.
Vazamento de óleo marítimo decorrente de um navio container	2011	Costa da Nova Zelândia	Cerca de 350 toneladas de óleo despejadas no mar. Mais de 1,000 espécimes de pássaros morreram em decorrência.
Explosão da Plataforma <i>Deep-Water Horizon</i>	2010	Golfo do México	11 vítimas e mais de 600 espécies ameaçadas

Fonte: O Autor, 2022.

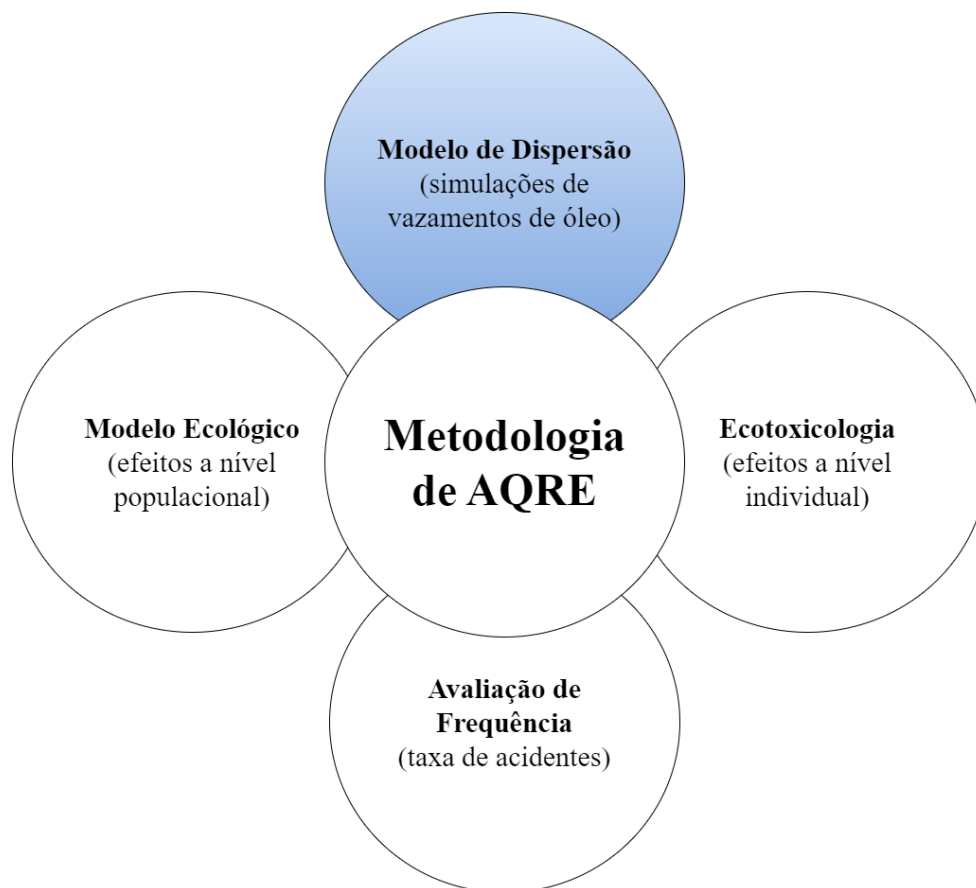
O desenvolvimento de modelos para avaliação de risco em derramamentos de óleo é uma área de pesquisa em constante desenvolvimento devido aos impactos da poluição marinha por derramamentos de óleo. Neste contexto, a Análise Quantitativa de Riscos Ecológicos (AQRE) foca na modelagem matemática de riscos ecológicos, sendo capaz de fornecer resultados quantitativos de risco. Essa abordagem se dá geralmente por meio de modelos populacionais, que focam na simulação da dinâmica populacional de uma única espécie pré-determinada (DUARTE et al., 2013, 2019; DUARTE; DROGUETT, 2015; SIQUEIRA et al., 2021).

Ao aplicar o AQRE no contexto de derramamento de óleo, os riscos são estimados considerando uma avaliação de exposição e os efeitos (CETESB, 2020). Para este fim, AQREs utilizam de modelos de:

- Avaliação de frequência de ocorrência;
- Avaliação das consequências, através de modelagem de dispersão do petróleo no oceano;
- Análise ecotoxicológica, para avaliar os efeitos do derramamento a nível individual; e
- Modelo ecológico, para avaliar os efeitos a nível populacional.

O esquema simplificado do modelo é apresentado na Figura 3.

Figura 3. Modelo que constitui uma Avaliação Quantitativa de Risco Ecológico (AQRE). Destaque (em azul) para a etapa de Modelagem de Dispersão, desenvolvida neste trabalho.



Fonte: Adaptado de (DUARTE, 2011) (p. 7).

Os modelos desenvolvidos podem ser integrados para gerar os resultados da AQRE. Este trabalho tem foco no item ‘b’, em outras palavras, na modelagem da dinâmica espaço-temporal de uma pluma de petróleo no oceano causada por derramamento com origem em navio petroleiro. Para este propósito, neste estudo, adotamos o modelo Lagrangeano MEDSLIK-II para simular trajetórias e transformações de derramamento de óleo no ambiente oceânico (Al Shami et al., 2017; De Dominicis et al., 2013b, 2013a; Liubartseva et al., 2021).

O MEDSLIK-II é um modelo de óleo lagrangiano que pode ser acoplado a modelos de circulação euleriana para simular o transporte, difusão e transformação de óleo na superfície da água do mar. Vale ressaltar que uma versão preliminar deste trabalho foi publicada em um congresso internacional, o MARTECH 2022, na área de Engenharia Naval (SIQUEIRA et al., 2022), onde o autor deste TCC participou como coautor do artigo.

O restante deste trabalho está estruturado como segue. A seção 1.1 descreve as características gerais do Arquipélago de Fernando de Noronha (AFN), bem como as justificativas que levaram à escolha da região para aplicação dos métodos desenvolvidos neste

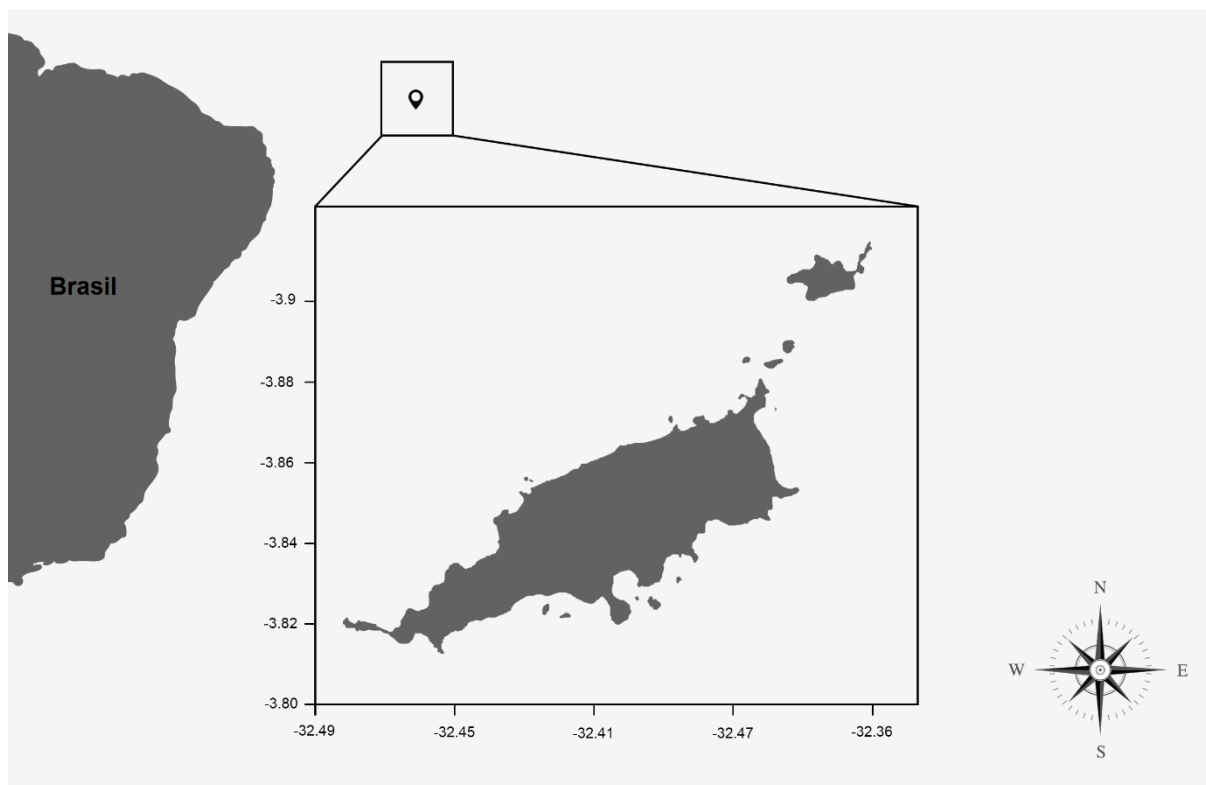
trabalho. Os objetivos são apresentados na Seção 1.2. A seção 2 fornece uma revisão bibliográfica para mostrar o estado da arte neste tema de pesquisa. A seção 3 introduz os conceitos básicos referentes aos modelos escolhidos para realização das simulações. A Seção 4 desenvolve uma metodologia genérica para escolha de parâmetros referentes à realização das simulações. A Seção 5 apresenta os resultados obtidos da metodologia aplicada em AFN, com comentários e discussões acerca do obtido, incluindo as vantagens e limitações referentes aos métodos e resultados. Por último, são apresentadas as conclusões sobre o trabalho, acompanhadas de sugestões para trabalhos futuros.

1.1 O ARQUIPÉLAGO DE FERNANDO DE NORONHA

Ilhas oceânicas são *hotspots* de biodiversidade que abrigam um grande número de espécies endêmicas com valor biológico único. O isolamento dessas áreas permite que sejam um repositório de espécies ameaçadas sendo regiões prioritárias para ações legais de conservação (GILLESPIE, 2001; GOVE et al., 2016; KUEFFER; KINNEY, 2017; WHITTAKER; FERNÁNDEZ-PALACIOS, 2007). No contexto do Brasil, o Arquipélago de Fernando de Noronha (AFN) é a ilha oceânica mais bem estudada, devido à grande diversidade de espécies marinhas e terrestres, fato que pode ser atribuído à sua extensão e heterogeneidade do habitat. O AFN está localizado entre as latitudes $03^{\circ} 45'S$ e $03^{\circ} 45'S$ e as longitudes $32^{\circ} 19'W$ e $32^{\circ} 41'W$, no Atlântico Sul Equatorial Ocidental. Este está situado a aproximadamente 345 km da costa nordeste do Brasil e é composta por 21 ilhas e ilhotas com área total de 26 km² (Figura 4) (IBAMA, 2005).

O AFN está em uma região tropical quente, cuja temperatura média do ar é de $25^{\circ}C$ e tem uma estação seca bem definida entre agosto e fevereiro, e uma estação chuvosa entre março e julho, com precipitação média de 1400mm (SERAFINI; FRANÇA, 2010). Os ventos predominantes são os ventos alísios de sudeste. A maior intensidade ocorre entre julho e agosto (TCHAMABI et al., 2017). As temperaturas da superfície do mar mais elevadas ocorrem entre março e junho, tipicamente superiores a $28^{\circ}C$ devido à ocorrência da piscina quente do Atlântico tropical sudoeste (CINTRA et al., 2015) e as mais baixas entre agosto e novembro ($SST \sim 26.6^{\circ}C$) (HOUNSOU-GBO et al., 2015; SILVA et al., 2009; TCHAMABI et al., 2017). Na superfície oceânica, o ramo central da Corrente Sul Equatorial (CSEs) flui para oeste até atingir a Corrente Norte do Brasil (CNB) próximo à costa (LUMPKIN; GARZOLI, 2005; STRAMMA; SCHOTT, 1999). O CSEs é mais forte entre março e julho, e mais fraco entre agosto e fevereiro (LUMPKIN; JOHNSON, 2013; TCHAMABI et al., 2017).

Figura 4. Localização do Arquipélago de Fernando de Noronha (latitude x longitude) no Oceano Atlântico Sul.



Fonte: SIQUEIRA, P.G.S.C., 2022.

O AFN tem *status* de Unidade de Conservação, que tem o intuito de proteger as espécies endêmicas e manter um ecossistema insular saudável (SERAFINI; FRANÇA, 2010). Dois terços do AFN são constituídos pelo Parque Nacional Marinho de FN (PARNAMAR-FN), uma Área de Proteção Ambiental (APA) (ICMBIO, 2013). O objetivo fundamental da criação do PARNAMAR-FN é preservar ecossistemas naturais de grande significado ecológico e beleza cênica, para que seja possível a ocorrência de atividades de pesquisa científica, educação ambiental, recreação e ecoturismo (BRASIL, 2000). A maioria dos projetos concebidos e desenvolvidos para a preservação do PARNAMAR-FN concentra-se na conservação de uma única espécie representativa (por exemplo, golfinho-rotador, tartarugas, tubarões, recifes de corais) (AMARAL et al. LIRA; AMARAL; FARRAPEIRA, 2009; MAIDA; FERREIRA, 1995; SILVA, 2010; TAMAR, 2006). No entanto, a gestão desta APA precisa avaliar e gerenciar os riscos ecológicos causados por atividades humanas rotineiras (i.e., de alta frequência/baixa consequência) dentro do PARNAMAR-FN. Esse tipo de avaliação também deve contemplar eventos improváveis e significativos (i.e., baixa frequência/alto impacto).

Embora não haja evidências de grandes derramamentos nos últimos anos, estes eventos continuam sendo uma ameaça latente (IUCN, 2020). Dos casos de vazamentos mais

recentes, pode-se citar o derramamento de óleo de originado de um vazamento do navio NM Bouboulina, de bandeira grega, em 2019 (ZACHARIAS, D. et al, 2021). Da data do primeiro aparecimento do óleo nas praias até atualmente, foram recolhidas aproximadamente 5,3 mil toneladas em 1013 localidades de 11 estados da costa brasileira (FOLHA DE S. PAULO, 2022). Também é importante citar aparições de bolhas de óleo na costa do AFN, em agosto de 2021 (ICMBIO, 2021), cuja precedência é desconhecida, mas assumida como originada deste mesmo incidente. Em média, 75 navios, principalmente petroleiros, navegam diariamente nas rotas próximas a FN (MEDEIROS, 2009), o que conceitualmente indica a possibilidade de ocorrência de acidentes, devido ao alto tráfego.

1.2 OBJETIVOS

Dentro do contexto de AQREs, o objetivo geral deste trabalho é realizar a etapa de simulações de vazamentos acidentais de petróleo decorrentes de navios petroleiros que navegam ao largo do AFN.

Para atingir este objetivo geral tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar e consolidar os cenários de vazamento
- Coletar os dados meteoceanográficos da região onde ocorre o vazamento;
- Simular a evolução espaço-temporal da pluma de petróleo;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Há vários modelos de simulação de derramamento de óleo, que são usados mundialmente com a finalidade de simular a evolução de uma mancha (pluma) de óleo decorrente de acidentes de tráfego marítimo, produção de petróleo ou outras origens (KERAMEA, P. et al., 2021; SPAULDING, M. L., 2017). Esses modelos envolvem cálculos avançados de nova geração, com modelos numéricos tridimensionais e acoplados a modelos meteorológicos, hidrodinâmicos e modelos de ondas. Os modelos do estado-da-arte de simulação preveem em alta resolução e com alta precisão o transporte e o destino do petróleo (KERAMEA, P. et al., 2021; SPAULDING, M. L., 2017).

A simulação do transporte, difusão e transformação do óleo derramado no oceano pode ser realizada a partir de um formalismo Lagrangiano pareado com modelos de circulação Eulerianos. O formalismo Lagrangiano pode rastrear elementos de massa, como as gotas de óleo na água, enquanto o foco da abordagem Euleriana está nas propriedades do fluxo em um ponto específico no espaço em função do tempo para que seja possível modelar as correntes e campos de vento (FOX et al., 2014).

Alguns dos modelos Lagrangianos existentes são COZOIL (REED; GUNDLACH; KANA, 1989), SINTEF OSCAR (REED; AAMO; DALING, 1995), OILMAP (SPAULDING et al., 1994), GULFSPILL (AL-RABEH; LARDNER; GUNAY, 2000), ADIOS (LEHR et al., 2002), MOTHY (DANIEL et al., 2003), MOHID (CARRACEDO et al., 2006), POSEIDON OSM (ANNIKA et al., 2001; NITTIS et al., 2006), OD3D (HACKETT; BREIVIK; WETTRE, 2006), o modelo Seatrack Web SMHI (AMBJORN, 2006), MEDSLIK (LARDNER et al., 2006; ZODIATIS et al., 2008), GNOME (ZELENKE et al., 2012), OILTRANS (BERRY; DABROWSKI; LYONS, 2012), MEDSLIK-II (DE DOMINICIS et al., 2013a, 2013b) e OPENOIL (RÖHRS, J. et al., 2018).

Dentre os modelos Lagrangianos, os modelos de código *open source* são apenas GNOME, MEDSLIK-II, OILTRANS, MOHID e OPENOIL, fornecendo *software* disponível gratuitamente para os usuários, o que implica maior possibilidade de aplicação e desenvolvimento. Simulações de derramamento de óleo, assim como a parametrização do destino do óleo e seus processos de transporte variam consideravelmente entre os modelos de derramamento de óleo citados, mas todos eles são criticamente dependentes das condições meteoceanográficas. Na Tabela 3 são apresentados comparativos referentes às características gerais de cada modelo (e.g., tipo de modelo, presença de base de dados) e características

referentes aos parâmetros da modelagem (i.e., intemperismos e dados meteoceanográficos) que cada modelo considera na modelagem de vazamentos.

Tabela 3. Comparação dos modelos de derramamento de óleo.

		GNOME	MEDSLIK-II	OILTRANS	MOHID	OPENOIL
Características Gerais	Modelagem de Destino e Transporte	✓	✓	✓	✓	✓
	Modelo de Superfície	✓	✓	✓	✓	✓
	Modelagem Reversa	✓	✓		✓	✓
	Componente Estocástico	✓	✓	✓	✓	✓
	Base de Dados Para Óleo	✓	✓	✓	✓	✓
	Base de Dados de Batimetria	✓	✓	✓	✓	✓
Processos de Transporte de Óleo e Intemperismos	Advecção	✓	✓	✓	✓	✓
	Espalhamento	✓	✓	✓	✓	✓
	Difusão	✓	✓	✓	✓	✓
	Dispersão Natural	✓	✓	✓	✓	✓
	Evaporação	✓	✓	✓	✓	✓
	Emulsificação	✓	✓	✓	✓	✓
	Dissolução	✓		✓	✓	
	Sedimentação		✓		✓	
	Arrasto do Vento	✓	✓	✓	✓	✓
	Mistura por Turbulência Vertical		✓	✓	✓	✓
	Retorno do Óleo à Superfície	✓	✓	✓		✓
	Arrasto de Stokes		✓	✓	✓	✓

Fonte: Adaptado de (KERAMEA, P. et al., 2021).

GNOME, MEDSLIK-II e MOHID se apresentam como os modelos mais robustos, dentre os considerados, em relação às características esperadas na modelagem de dispersão Lagrangiana. Os três modelos apresentam alto grau de similaridade entre as características gerais, mas se diferenciam na parametrização do destino do óleo e dos processos de transporte, que tem um papel importante no contexto de Análise de Risco Ecológico (KERAMEA, P. et al., 2021). O processo de Sedimentação, por exemplo, é desconsiderado no GNOME. Interações entre óleo e sedimentos são fatores críticos na dispersão e degradação de derramamentos de óleo (GONG, Y. et al., 2014), o que aponta esse fator como uma limitação do modelo. Analogamente, MOHID não considera o processo de *Resurfacing* (i.e., retorno do

óleo à superfície). Este processo ocorre rapidamente após a dispersão para gotas de óleo maiores, enquanto as gotas pequenas permanecem na subsuperfície por um longo período e só ressurgem quando a turbulência das ondas diminui (SPAULDING, M. L., 2017) sendo de grande importância enquanto parâmetro de simulação de dispersão do óleo.

Por último, o processo de Dissolução é desconsiderado no MEDSLIK-II, Entretanto, a maioria dos compostos do óleo possui baixa solubilidade ($< 1 \text{ mg/L}$) e o processo ocorre competitivamente com a evaporação, cujas taxas são mais altas (ABIANEH, O. S. et al., 2012). Adicionalmente, um ponto positivo do MEDSLIK-II é a disponibilidade de trabalhos com aplicações variadas do modelo, o que facilita sua replicação e o configura como o modelo mais adequado para a realização de simulações de dispersão dentre os modelos *open source*. Por isso, esse será o modelo utilizado neste trabalho.

Uma descrição abrangente do MEDSLIK-II com o conceito matemático elaborado e os parâmetros básicos correspondentes do modelo é fornecida por De Dominicis et al. (DE DOMINICIS et al., 2013a, 2013b). Aplicações interessantes do modelo, em situações reais no contexto de vazamentos de petróleo, foram desenvolvidas por De Dominicis et al. (DE DOMINICIS et al., 2014), De Dominicis et al. (DE DOMINICIS et al., 2016), Liubartseva et al. (LIUBARTSEVA, S. et al., 2016), Rutherford et al. (RUTHERFORD, R. et al., 2015) e Liubartseva et al., (LIUBARTSEVA, S. et al., 2020).

De Dominicis et al. (DE DOMINICIS et al., 2014) utilizaram do modelo MEDSLIK-II para fornecer previsões de correntes oceânicas, possíveis cenários de derramamento de óleo e simulações de trajetórias de *drifters*, durante o caso de emergência do navio Costa Concordia, na Itália, em 2014. Analogamente, De Dominicis et al. (DE DOMINICIS et al., 2016), utilizaram do modelo de dispersão, observando as trajetórias de diferentes tipos de boias, na região da ilha de Elba, em 2014. O ensaio experimental foi executado afim de validar o modelo, com a instalação e monitoramento de boias em uma mancha encontrada no oceano, para comparação e análise da influência dos efeitos meteoceanográficos no transporte e destino da mancha. Os resultados concluíram que as simulações condizem com os resultados reais.

Pode-se citar também que Liubartseva et al. (LIUBARTSEVA, S. et al., 2016) desenvolveram um modelo de apoio à decisão para facilitar o gerenciamento de emergência no caso de acidentes com derramamento de óleo, que utiliza do MEDSLIK-II acoplado a dados meteoceanográficos para simular o destino e transformação do óleo no oceano, chamado WITOIL (i.e., *Where Is The Oil*). O sistema pode ser aplicado para criar uma previsão de eventos de derramamento de óleo, avaliar a incerteza dessas previsões e calcular

perigos com base em conjuntos de dados meteoceanográficos históricos. O desenvolvimento desse sistema resultou em uma aplicação para *Android*, como forma de facilitar sua utilização por autoridades competentes, instituições técnicas e científicas e cidadãos.

Já Rutherford et al. (RUTHERFORD, R. et al., 2015) avaliaram o modelo de previsão e propagação de uma mancha de óleo no oceano, CransSLIK, utilizando resultados de múltiplas simulações realizadas usando o MEDSLIK-II, através de regressão múltipla, para identificar melhorias que poderiam ser incorporadas ao CranSLIK. Este esforço resultou no modelo revisado, CranSLIK 2.0, com melhorias significativas em relação à previsão de casos e capacidade de simular uma gama maior de cenários de vazamento.

Em um caso de aplicação mais recente, Liubartseva et al., (LIUBARTSEVA, S. et al., 2020) utilizou o modelo MEDSLIK-II para prever o destino e transporte do derramamento de óleo causado pela colisão entre o navio Ro-Ro Ulysse e o CSL Virginia, em outubro de 2018. Esta foi a primeira aplicação do modelo capaz de prever corretamente o encalhe do óleo na praia, que ocorreu próximo a Saint-Tropez, na França.

No contexto do Brasil, a aplicação do modelo se mostra escassa, com poucos trabalhos desenvolvendo a metodologia. O modelo foi utilizado por Protasio et al. (PROTASIO, L., S. et al., 2022), num esforço para analisar o impacto da circulação oceânica em possíveis derramamentos de óleo próximos à Zona Econômica Exclusiva (ZEE) do Brasil, através de simulações realizadas com o MEDSLIK-II, com uma representação Lagrangiana de derramamento de óleo. Analogamente, Sepp Neves AA, et al. (SEPP NEVES et al., 2020) desenvolveu uma metodologia para quantificar a ameaça de ocorrência de óleo nas praias, decorrente de vazamentos. a partir da realização de diferentes simulações de vazamento. Através da variação das posições de liberação do óleo, em três áreas diferentes do Oceano Atlântico Norte, e das alterações das condições do oceano, foi possível determinar a concentração de óleo em mar aberto ou ao longo da costa, utilizando o MEDSLIK-II para resolver as equações de advecção-difusão.

Queiroz et al. (QUEIROZ, S. et al., 2019) desenvolveu um modelo para simular a evolução de uma mancha de petróleo decorrente de acidentes entre navios petroleiros próximos ao AFN, acoplando o modelo de dispersão MEDSLIK-II com o Sistema Regional de Modelagem Oceânica (ROMS). O trabalho foi realizado com o intuito de investigar se há possibilidade de um vazamento ocorrido na região próxima ao arquipélago atingir a costa de Fernando de Noronha. Dados os resultados afirmativos da hipótese, foi proposta a restrição do tráfego de navios tanques para uma região a aproximadamente 62 km a leste do arquipélago, a fim de aumentar a janela de tempo de resposta no caso de ocorrência de acidente. As

principais diferenças que podem ser citadas em relação ao presente trabalho é a utilização de pontos de simulação e condições meteoceanográficas diferentes. Apesar do modelo de dispersão utilizado ser o mesmo, foi utilizado o ROMS como modelo principal para processamento dos dados meteoceanográficos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentados os conceitos básicos referentes ao modelo de simulação de vazamentos de óleo em ilhas oceânicas, MEDSLIK-II, escolhido para realização deste trabalho na Seção 2. Em seguida, será apresentada uma introdução sobre o conceito de AQRE, conceituando o papel de uma simulação da dispersão no processo de modelagem de vazamentos de óleo no oceano.

3.1 MEDSLIK-II

Dada a finalidade deste trabalho, foi utilizado o modelo de dispersão Lagrangiano MEDSLIK-II para realizar as simulações de derramamento de óleo (DE DOMINICIS et al., 2013a, 2013b). O MEDSLIK-II é um modelo de simulação de dispersão de óleo Lagrangiano projetado para simular processos de transporte e transformação de manchas de óleo para derramamentos na superfície marítima (DE DOMINICIS et al., 2013a, 2013b). A simulação do transporte, difusão e transformação do óleo derramado no oceano pode ser realizada usando um formalismo Lagrangiano acoplado a modelos de circulação Eulerianos. O formalismo Lagrangiano pode rastrear elementos de massa, como as gotas de óleo na água; enquanto na abordagem Euleriana, o foco está nas propriedades do fluxo em um ponto específico do espaço em função do tempo para que se possa modelar as correntes oceânicas (FOX et al., 2014).

Quando ocorre um derramamento de óleo, o vento e as correntes de superfície são as forças primárias que atuam no transporte de óleo no ambiente aquático (SPAULDING, 2017). Portanto, o transporte de óleo no oceano é atribuído principalmente à advecção pelo campo de fluxo de grande escala, enquanto os componentes do fluxo turbulento causam a dispersão. Além do transporte, o impacto de derramamentos de óleo depende principalmente das condições ambientais que controlam os processos de intemperismo no local do derramamento (e.g., correntes, clima, ondas) e o tempo necessário para realizar operações de mitigação (LEE et al., 2015; MARTA-ALMEIDA et al., 2013; NRC, 2003). O vento (i.e., cisalhamento e deriva em função da velocidade do vento) e as correntes de superfície são as forças primárias para o transporte de petróleo no ambiente aquático (SPAULDING, 2017).

O MEDSLIK-II simula o transporte de uma mancha de superfície, considerando os fatores que influenciam seu movimento e destino no mar (DE DOMINICIS et al., 2013a, 2013b). Dessa forma, o modelo considera que:

- O movimento da mancha é governado pelas correntes de água e pelo vento;
- As partículas de óleo também são dispersas por componentes de flutuação turbulenta que são parametrizados com um esquema de deslocamento aleatório;
- Além do deslocamento advectivo-difusivo, as partículas do derramamento de óleo mudam devido aos processos físico-químicos (i.e., intemperismos) que transformam o óleo (i.e., evaporação, emulsificação, dispersão na coluna d'água, adesão à costa);
- Inclui uma representação adequada de correntes de alta frequência e campos de vento nos componentes advectivos do modelo de trajetória lagrangiana, a introdução da velocidade de deriva de Stokes e o acoplamento com os dados de sensoriamento remoto.

Desta forma, o modelo pode fazer uso do vento atmosférico e dos campos oceanográficos (i.e., correntes, temperatura) para prever a posição das partículas de óleo no ambiente oceânico através da resolução das equações.

3.1.1 Equações Governantes e Variáveis de Estado do Modelo

A equação geral para uma concentração de rastreadores $C(x, y, z, t)$, em unidades de massa sobre volume, misturados no ambiente marinho é (DE DOMINICIS et al., 2013a):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla C = \nabla \cdot (\mathbf{K} \nabla C) + \sum_{j=1}^M r_j(\mathbf{x}, C(\mathbf{x}, t), t) \quad (3.1)$$

Onde $\frac{\partial C}{\partial t}$ é o operador local de taxa de mudança da concentração no tempo, $\mathbf{U}$ é a distribuição tridimensional das componentes horizontais da corrente oceânica $\mathbf{u}$ e $\mathbf{v}$, $\mathbf{K}$ é o tensor de difusividade turbulenta, que parametriza os processos de escala sub-grade; o vetor posição (x, y, z) é denotado por $\mathbf{x}$; e $r_j(\mathbf{x}, C(\mathbf{x}, t), t)$ são as taxas de transformação M que modificam a concentração do rastreador através dos processos de intemperismo (isto é, transformações físicas e químicas).

O volume da superfície é subdividido em uma parcela delgada, V^{TN} , e uma parcela espessa, V^{TK} . Esta suposição justifica o uso dos algoritmos de processos de transformação de Mackay. Nesta abordagem, os processos de intemperismo são considerados separadamente para a mancha delgada e espessa (DE DOMINICIS et al., 2013a). O volume de óleo de superfície (V_s) é escrito como:

$$V_s = V^{TN} + V^{TK} \quad (3.2)$$

Onde:

$$V^{TN}(x, y, t) = A^{TN}(t)T^{TN}(x, y, t) \quad (3.3)$$

$$V^{TK}(x, y, t) = A^{TK}(t)T^{TK}(x, y, t) \quad (3.4)$$

Onde A^{TK} e A^{TN} são as áreas ocupadas pelo volume da mancha espessa e delgada e T^{TK} e T^{TN} correspondem às espessuras do volume da mancha espessa e delgada, respectivamente.

A movimentação de óleo no ambiente marinho é geralmente atribuída à advecção pelo campo de escoamento de larga escala, com dispersão causada por componentes de escoamento turbulento. Enquanto o óleo se move, sua concentração muda devido a vários efeitos físicos e processos químicos (i.e., processos de intemperismo) conhecidos como intemperismos (DE DOMINICIS et al., 2013a, 2013b).

Seguindo a abordagem lagrangiana, a mancha de óleo é constituída de partículas de óleo que se movem como parcelas de água. No entanto, os processos de intemperismo atuam em toda a mancha, não só nas propriedades de partícula única. Assim, a equação do rastreador ativo pode ser efetivamente dividida em duas equações componentes:

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = \sum_{j=1}^M r_j(x, C_1(x, t), t) \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\mathbf{U} \cdot \nabla C_1 + \nabla \cdot (\mathbf{K} \nabla C_1) \quad (3.6)$$

Onde C_1 é a concentração de óleo devido aos processos de intemperismo, enquanto a taxa final de mudança de C é dada pela advecção-difusão atuando em C_1 . O modelo primeiro resolve (3.5) considerando os processos de intemperismo atuando no volume total da mancha de óleo: assim, as variáveis de estado da mancha de óleo devem ser definidas. As variáveis de estado estrutural correspondem às concentrações de óleo: na superfície do mar, disperso, sedimentado no fundo e encalhado nas parcelas costeiras.

As variáveis relativas ao estado de pluma são usadas para os processos de transformação, e as variáveis de estado de partícula são usadas para resolver os processos de difusão-advecção. Em seguida, aplica-se o formalismo lagrangiano para resolver (3.6), a parte advecção-difusão da equação, discretizando a mancha de óleo superficial em partículas com incrementos de posição dados por:

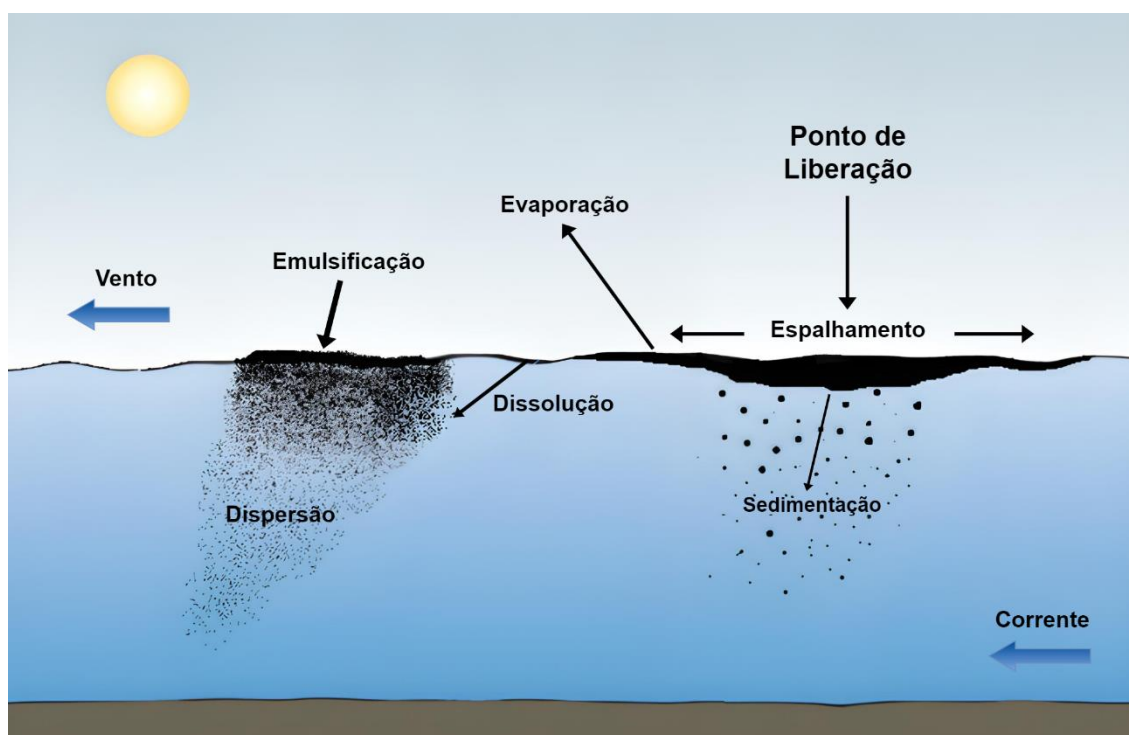
$$d\mathbf{x}(t) = \mathbf{U}(\mathbf{x}, t)dt + \mathbf{Z}\sqrt{2\mathbf{K}dt} \quad (3.7)$$

Onde dt é o passo de tempo do modelo; $\mathbf{Z}$ são vetores aleatórios independentes normalmente distribuídos, ou seja, $\mathbf{Z} \in N(0,1)$; e $\mathbf{K}$ é o tensor da diagonal de difusão turbulenta. O primeiro termo do lado direito da equação é a parte determinística do campo de fluxo, enquanto a segunda é o termo estocástico, que caracteriza o movimento aleatório.

3.1.2 Processos de Intemperismo

Processos de Intemperismo é uma definição geral para mudanças nas propriedades do óleo devido a processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem quando o derramamento é exposto a condições ambientais (e.g., em sistemas aquáticos). Os principais processos de intemperismo que governam o destino de uma mancha de óleo no mar são espalhamento, evaporação, dispersão e emulsificação (Figura 5).

Figura 5. Principais processos de intemperismo atuantes em um derramamento de óleo.



Adaptado de (TRB; NRC, 2014)

3.1.2.1 Espalhamento

O processo mais dominante no primeiro estágio de um derramamento é espalhar óleo de baixo ponto de fluidez (ou seja, a temperatura abaixo da qual o óleo perde suas propriedades líquidas) na água. O espalhamento influencia fortemente processos tardios, como evaporação e dispersão (SEBASTIÃO; GUEDES SOARES, 1995). O espalhamento

consiste em dois processos: o primeiro é a área perdida devido ao óleo convertido da mancha espessa para a delgada, e o segundo é devido à fase de espalhamento viscosa por gravidade de Fay (AL-RABEH; LARDNER; GUNAY, 2000).

Quando o óleo entra em contato com a água, eles atingem rapidamente a temperatura da água, que pode estar abaixo do ponto de fluidez dos óleos cerosos. Assim, um pré-requisito para que o espalhamento de um determinado tipo de óleo ou produto refinado após o derramamento ocorra é que seu ponto de fluidez seja inferior à temperatura ambiente da água do mar. Um alto ponto de fluidez caracteriza óleos brutos com alto teor de cera ou produtos refinados, e esses materiais solidificam rapidamente imediatamente ou logo após o derramamento no mar. A formação de matrizes de cristal de cera no óleo também reduz a capacidade de dispersão natural do óleo como gotículas no oceano, daí a forma muitas vezes de bolhas flutuantes de tamanho considerável (SEBASTIÃO; GUEDES SOARES, 1995).

Muitos óleos derramados na superfície de águas calmas se espalharão em uma camada contínua dentro de um padrão circular devido à gravidade e à tensão superficial líquida (ou coeficiente de espalhamento). O coeficiente de espalhamento é a diferença entre a tensão e a soma da tensão superficial ar/óleo e a tensão interfacial óleo/água. Embora a viscosidade afete a taxa de espalhamento, particularmente logo após o derramamento, muitos óleos tendem a se espalhar na superfície da água aproximadamente na mesma taxa, embora possam possuir viscosidades diferentes. Os parâmetros físico-químicos dominantes do petróleo bruto que determinam o espalhamento são, portanto, além de seu ponto de fluidez, densidade e coeficiente de espalhamento (SEBASTIAO; SOARES, 1995).

As taxas de volume de manchas delgadas e espessas devido ao espalhamento são escritas como (DE DOMINICIS et al., 2013a):

$$\left. \frac{dV^{TK}}{dt} \right|_{(S)} = - \left. \frac{dV^{TN}}{dt} \right|_{(S)} + T^{TK} FG \quad (3.8)$$

$$\left. \frac{dV^{TN}}{dt} \right|_{(S)} = T^{TN} \left. \frac{dA^{TN}}{dt} \right|_{(S)} \quad (3.9)$$

Onde FG é o espalhamento decorrente da gravidade de Fay, que será definido posteriormente. O modelo de Mackay (MACKAY et al., 1979; MACKAY; PATERSON; TRUDEL, 1980) aproxima o incremento da área de manchas delgadas por:

$$\left. \frac{dA^{TN}}{dt} \right|_{(S)} = C_1^{(S)} (A^{TN})^{1/3} (T_0^{TK})^{4/3} \exp \left(\frac{-C_3^{(S)}}{T^{TK} + \epsilon} \right) \quad (3.10)$$

Onde $C_1^{(S)} (s^{-1})$ é a taxa constante de espalhamento da mancha delgada; $C_3^{(S)} (m)$ controla a dependência da espessura do espalhamento da mancha delgada; T_0^{TK} é $1 m$ e ϵ é um parâmetro constante para o deslocamento da mancha. Para a mancha espessa, o espalhamento de Fay é assumido como:

$$FG = C_2^{(S)} (A^{TK})^{1/3} (T^{TK})^{4/3} \quad (3.11)$$

Onde $C_2^{(S)}$ é a taxa constante de espalhamento da mancha espessa.

A taxa temporal de variação de área da mancha espessa devido ao espalhamento é:

$$\left. \frac{dA^{TK}}{dt} \right|_{(S)} = \frac{1}{T^{TK}} \left. \frac{dV^{TK}}{dt} \right|_{(S)} \quad (3.12)$$

3.1.2.2 Evaporação

A evaporação é o processo inicial primário envolvido na remoção de óleo do mar. A taxa de evaporação é determinada pelas propriedades físico-químicas do óleo e aumenta com sua propagação, altas temperaturas da água, ventos fortes e mar agitado. Por evaporação, os componentes de baixo ponto de ebulição serão rapidamente removidos, reduzindo assim o volume restante da mancha. Para muitos óleos, a evaporação da mancha superficial é o processo de perda de massa mais importante durante as primeiras horas de um derramamento de óleo (SEBASTIÃO; GUEDES SOARES, 1995).

A taxa de evaporação diminui para volumes de derramamento maiores, uma vez que a razão área/volume da mancha para esses derramamentos diminui, ou seja, a espessura da mancha aumenta. Como esperado, a taxa de evaporação aumenta com o aumento da temperatura e da velocidade do vento. No entanto, esse efeito é relativamente pequeno. Consequentemente, há remoção dos hidrocarbonetos mais leves por evaporação e, uma vez que o volume diminui, a densidade e a viscosidade aumentam. A mudança desses parâmetros é essencial no que diz respeito à dispersão natural, emulsificação, dissolução e afundamento do óleo (SEBASTIÃO; GUEDES SOARES, 1995).

O volume de óleo perdido por evaporação é calculado através do algoritmo de Mackay para evaporação (MACKAY; PATERSON; TRUDEL, 1980). A evaporação altera o volume das partes espessas e delgadas da mancha. A taxa temporal de variação do volume perdido por evaporação da mancha espessa, V^{TK} , pode ser expressa como:

$$\left. \frac{dV^{TK}}{dt} \right|_{(E)} = \left. \frac{df_{TK}}{dt} \right|_{(E)} [V^{TK}(t_0) + V^{TN}(t_0)] \quad (3.13)$$

Onde $V^{TK}(t_0)$ e $V^{TN}(t_0)$ são os volumes iniciais das manchas espessa e delgada, respectivamente e $\left. \frac{df_{TK}}{dt} \right|_{(E)}$ é a taxa temporal de mudança da fração de óleo evaporado. Para a mancha de óleo espessa, a taxa temporal de variação da fração de óleo evaporada é:

$$\left. \frac{df_{TK}}{dt} \right|_{(E)} = \frac{P_0 \exp(-cf_{TK}t)}{P_{oil}} K_M \frac{A^{TK}}{V^{TK}} (1 - f_{TK}) \quad (3.14)$$

$$P_{oil} = \frac{RT}{V_{MOL}} \quad (3.15)$$

Onde P_{oil} (bar) é a pressão de vapor do óleo; P_0 é a pressão de vapor inicial (depende do tipo de óleo utilizado); c (s^{-1}) é uma constante que mede a taxa de diminuição da pressão de vapor com a fração já evaporada; $A^{TK}(t)$ é a área da parte espessa da mancha; K_M (ms^{-1}) é a exposição evaporativa ao vento; T (K) é a temperatura; R ($bar\ m^3\ mol^{-1}\ K$) é a constante do gás; e V_{MOL} ($mol\ m^{-3}$) é o volume molar do óleo. Para K_M assumimos:

$$K_M = C_1^{(E)} \left(3.6 \frac{W}{W_0} \right)^\gamma \quad (3.16)$$

Onde $\frac{W}{W_0}$ é o modulo de vento 10m não-dimensional, (W_0 é $11ms^{-1}$); γ é uma constante; e $C_1^{(E)}$ (ms^{-1}) é a taxa de evaporação.

Para a mancha delgada, a taxa temporal de variação do volume é igual a:

$$\left. \frac{dV^{TN}}{dt} \right|_{(E)} = \left. \frac{df_{TN}}{dt} \right|_{(E)} [V^{TK}(t_0) + V^{TN}(t_0)] \quad (3.17)$$

Onde $\left. \frac{df_{TN}}{dt} \right|_{(E)}$ é a taxa temporal da fração de óleo evaporada da mancha delgada.

Presume-se que o componente evaporativo na mancha delgada desapareça imediatamente. Ainda, por meio do processo de espalhamento, a mancha delgada é alimentada pelo óleo da mancha espessa que, em geral, ainda não evaporou totalmente. Igualando o teor de óleo da mancha delgada antes e depois do escoamento, obtêm-se

$$\left. \frac{df_{TN}}{dt} \right|_{(E)} = \left. \frac{dV^{TN}}{dt} \right|_{(S)} \frac{(f_{MAX} - f_{TK})}{V^{TN}} \quad (3.18)$$

Onde f_{MAX} é a fração inicial do componente evaporativo, representando o valor máximo que a fração de óleo evaporada da mancha delgada pode atingir. Além disso, a evaporação leva a um aumento da viscosidade do óleo, que é calculada por:

$$\eta = \eta_0 \exp(K^{(E)} f_{TK}) \quad (3.19)$$

Onde η_0 (m^2s^{-1}) é a viscosidade inicial, que depende do tipo de óleo utilizado, e $K^{(E)}$ é uma constante que determina o aumento da viscosidade por evaporação.

3.1.2.3 Emulsificação

No processo de Emulsificação, a água se mistura com o óleo na mancha, formando a *mousse*. O resultado deste processo é um aumento significativo de volume (3 ou 4 vezes o volume do óleo original estabilizado), um aumento substancial da densidade e um aumento substancial da viscosidade (SEBASTIÃO; GUEDES SOARES, 1995).

A formação da *mousse* provoca um aumento da viscosidade calculado pela equação de Mooney (SEBASTIÃO; GUEDES SOARES, 1995):

$$\eta_{EM} = \eta \exp \left[\frac{2.5f^W}{1-C_1^{(M)}f^W} \right] \quad (3.20)$$

Onde η é definido pela Eq. 3.18, f^W é a fração de água na mistura óleo-água (*mousse*), $C_1^{(M)}$ é a constante que controla o efeito da presença da água na viscosidade da *mousse*. O processo de Emulsificação é assumido contínuo até que η_{EM} atinja um limite máximo η_{max} , que corresponde a uma *mousse* composto por bolhas de óleo flutuantes. O modelo de Mackay (MACKAY et al., 1979) para a taxa de variação de f^W é dado por:

$$\frac{df^W}{dt} = C_2^{(M)} \left(\frac{W}{W_0} + 1 \right)^2 \left(1 - C_3^{(M)}f^W \right) \quad (3.21)$$

Onde a razão W/W_0 é a velocidade do vento não-dimensional, calculada no centro da mancha; $C_2^{(M)}$ é uma constante que controla a taxa de absorção da água na *mousse*; e $C_3^{(M)}$ é uma constante que controla a máxima fração de água na *mousse*.

3.1.2.4 Dispersão

A ação das ondas no óleo o leva para a água, formando uma nuvem de gotículas abaixo do derramamento. As gotas podem ser classificadas como grandes gotas que sobem rapidamente e coalescem novamente com o derramamento da superfície ou pequenas gotas que sobem mais lentamente e podem ficar imersas por tempo suficiente para se difundir nas camadas inferiores das colunas de água. Neste último caso, as gotas são perdidas do derramamento de superfície e consideradas permanentemente dispersas. O que caracteriza as gotículas é que sua velocidade ascendente sob forças de empuxo é comparável à sua velocidade de difusão. Para gotas grandes, é muito maior (DE DOMINICIS et al., 2013a).

A taxa de variação temporal do volume da mancha espessa devido à dispersão de minúsculas gotículas na coluna de água é dada pela fórmula de Mackay (MACKAY et al., 1979):

$$\left. \frac{dV^{TK}}{dt} \right|_{(D)} = \frac{1}{2} \left(C_1^{(D)} - v_s \right) C_S A^{TK} + \frac{dX_S}{dt} \quad (3.22)$$

Onde $C_1^{(D)}$ e v_s correspondem às velocidades difusiva de descida e subida, respectivamente, das gotículas de óleo. C_S é a fração de gotículas de óleo, enquanto X_S é o volume de gotículas abaixo da mancha espessa, que corresponde a:

$$X_S = C_S u_m A^{TK} \quad (3.23)$$

Onde u_m (m) é a espessura vertical da nuvem de gotículas. As gotículas largas não são consideradas como partículas dispersas, uma vez que estas eventualmente recoalecem com a mancha. A fração de gotículas é calculada utilizando a expressão:

$$C_S = \frac{2C_3^{(D)} \left(\frac{W}{W_0} + 1 \right)^2 T^{TK} S_{TK}}{v_s + C_1^{(D)}} \quad (3.24)$$

Onde $C_3^{(D)}$ é uma constante que controla a taxa de dispersão de todas as partículas através de ondas, e S_{TK} é a fração de gotículas contidas no volume de óleo disperso abaixo da mancha espessa, dada por:

$$S_{TK} = \left[1 + C_4^{(D)} \left(\frac{\eta_{EM}}{\eta_{EM0}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{T^{TK}}{1e^{-3T_0^{TK}}} \right) \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right) \right]^{-1} \quad (3.25)$$

Onde $C_4^{(D)}$ controla a fração de gotículas abaixo de um tamanho crítico; τ ($kg\ s^{-2}$) é a tensão superficial interfacial entre o óleo e η_{EM} é a viscosidade do óleo emulsificado. A emulsificação influencia a viscosidade da *mousse* que, por sua vez, afeta a dispersão. τ_0 e η_{EM0} correspondem à escala de tensão superficial interfacial e à escala de viscosidade do óleo emulsionado, respectivamente.

Para a dispersão da mancha delgada, apenas pequenas gotas são consideradas. Supõe-se que essas gotículas são todas perdidas do derramamento de superfície na taxa:

$$\left. \frac{dV^{TN}}{dt} \right|_{(D)} = C_3^{(D)} \left(\frac{W}{W_0} + 1 \right)^2 T^{TN} A^{TN} S_{TN} \quad (3.26)$$

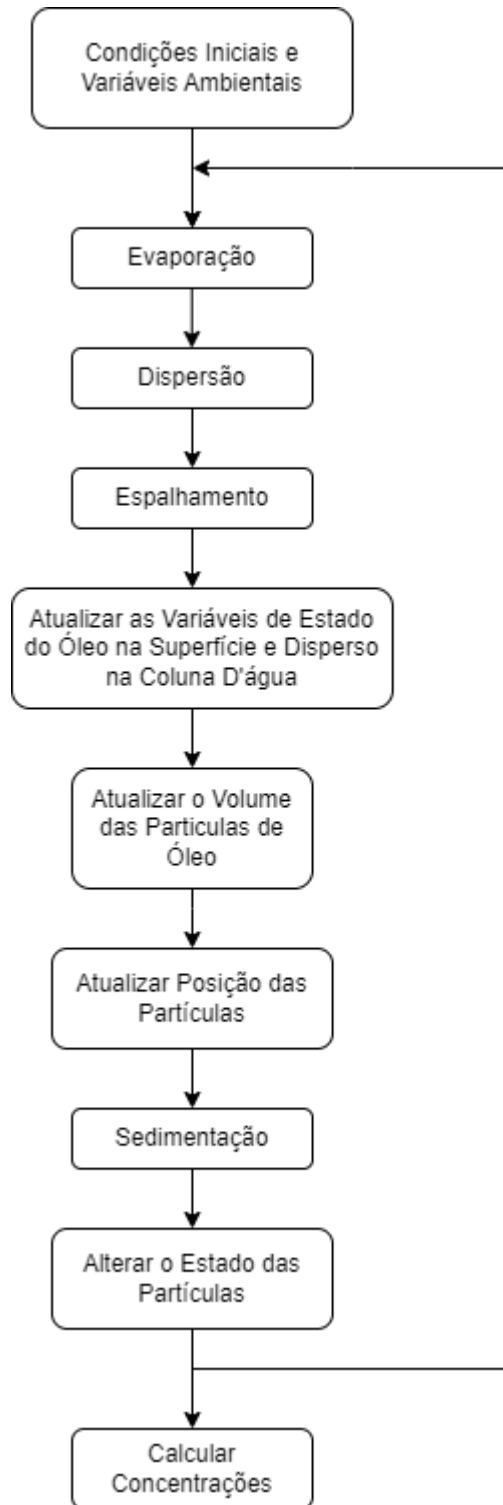
$$S_{TN} = \left(1 + C_5^{(D)} \frac{\tau}{\tau_0} \right)^{-1} \quad (3.27)$$

Onde $C_5^{(D)}$ controla da dispersão da mancha delgada e S_{TN} é a fração de gotículas no óleo disperso abaixo da mancha delgada.

3.1.3 Metodologia de Simulação

Para resolver de forma coerente as equações de intemperismo e advecção-difusão, um algoritmo, que liga a mancha de óleo e as variáveis de estado da partícula por um método de solução sequencial é aplicado (Figura 6) é necessário. O método é aplicado considerando uma liberação de óleo de superfície no ambiente marinho, que pode ser instantânea ou contínua. No primeiro caso, todo o óleo é derramado instantaneamente, enquanto no último, o vazamento pode durar várias horas ou até meses. A liberação contínua de derramamento de óleo é modelada dividindo o total de óleo derramado em vários derramamentos parciais, consistindo em uma determinada parte do óleo liberado no local do derramamento durante o cálculo prescrito intervalo de tempo. À medida que cada parcela se afasta da fonte, o derramamento total torna-se uma cadeia de subderramamentos. Na liberação contínua, uma determinada fração da quantidade total de partículas usadas na simulação é liberada com cada subderramamento.

Figura 6. Metodologia do procedimento de solução do modelo MEDSLIK-II.



Fonte: Adaptado de DE DOMINICIS et al., 2013a, 2013b.

No MEDSLIK-II, o derramamento de óleo é representado pelas variáveis de estado denominadas "derramamento", "partícula" e "estrutural". As variáveis de estado do tipo de derramamento são usadas para resolver a variação na concentração de óleo devido a processos

de intemperismo (i.e., evaporação, espalhamento, dispersão, emulsificação) e aderência costeira atuando no volume total de óleo. Esses processos são apresentados como relações empíricas entre o volume do derramamento, o vento (W) e a TSM. Em seguida, o derramamento é dividido em N partículas de volume definido e as variáveis de estado “partícula” são definidas para resolver processos difusivos advectivos e para o posterior cálculo da concentração na superfície, coluna d’água e costa (i.e., variáveis de tipo estrutural) (DE DOMINICIS et al., 2013a, 2013b).

No caso de liberação instantânea, no início da simulação, todo o óleo é liberado na superfície do mar no local do derramamento e todas as partículas são liberadas instantaneamente. Cada fonte de derramamento de óleo é descrita por um conjunto de pontos geográficos que identificam uma curva de nível. Os dados necessários para definir a condição inicial de derramamento de óleo são:

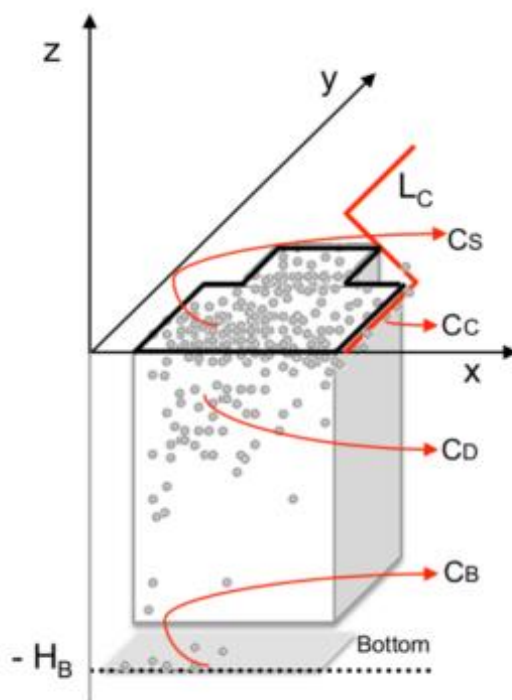
- Localização: as coordenadas geográficas da localização da fonte de petróleo;
- Volume: a quantidade total de óleo liberada em um derramamento ou a quantidade total de óleo detectada na mancha;
- Duração: duração do derramamento (para manchas instantâneas, é zero);

Um esquema progressivo de Euler é utilizado para a solução numérica da equação de transporte. O campo lagrangiano de velocidade no passo de tempo atual na posição da partícula é calculado realizando uma interpolação linear no tempo entre campos de velocidade de entrada sucessivos, uma interpolação bilinear na horizontal espaço usando os quatro pontos de grade de campo externo do campo do modelo Euleriano mais próximo da posição da partícula e uma interpolação vertical linear entre os dois campos em os níveis do modelo euleriano mais próximos da profundidade da partícula (DE DOMINICIS et al., 2013a, 2013b).

3.1.4 Principais Resultados do MEDSLIK-II

A resposta final da simulação é a concentração final de cada parcela de óleo que sofreu os efeitos das intempéries. Estas concentrações são calculadas reunindo as partículas com suas propriedades associadas, representadas em quatro variáveis de estado: C_S , C_D , C_C , C_B , respectivamente, concentração do óleo na superfície oceânica, disperso na coluna d’água, sedimentado na costa e no substrato oceânico (Figura 7).

Figura 7. Representação esquemática das classes de concentração de óleo (as esferas cinzas representam as partículas de óleo e LC - o litoral).



Fonte: DE DOMINICIS et al., 2013a.

3.2 Análise Quantitativa de Risco Ecológico

De forma sucinta, Avaliação Quantitativa de Risco Ecológico (AQRE) é um processo formal de estimar a probabilidade de efeitos adversos em um ecossistema (e.g., ambiente marinho), decorrentes da exposição deste a um ou mais estressores (e.g., petróleo) a curto e longo prazo (EPA, 1998). AQREs podem ser baseadas em modelos matemáticos capazes de fornecer riscos quantitativos.

Os resultados da AQRE podem auxiliar a tomada de decisão em aplicações reais, como programas de regulamentação de pesticidas, descargas de água, medidas de mitigação para tratar áreas contaminadas (AKÇAKAYA et al., 2004; BARTELL et al., 1999; CHEN, 2005; NAITO et al., 2002; PAUWELS, 2002). No contexto brasileiro, AQREs podem ser requeridos quando há um bem ecológico a ser protegido de estressores (e.g., químicos, físicos ou biológicos), no licenciamento ambiental, introdução de espécies exóticas e avaliação de áreas contaminadas ou fontes existentes de poluição (CETESB, 2020). É benéfico que indústrias e governos forneçam informações necessárias para licenciamento, gerenciamento de riscos e ambiental.

Ao aplicar o AQRE no contexto de derramamento de óleo, os riscos são estimados considerando uma avaliação de exposição e os efeitos (CETESB, 2020). Ao avaliar os efeitos, recomenda-se o uso de testes e experimentos de laboratório (ou de campo), simulando

cenários de exposição. No entanto, essa abordagem não é suficiente para fornecer informações úteis ao determinar os riscos no AQRE. Esta informação apenas indica se são esperados efeitos individuais (i.e., probabilidade de morte de um único indivíduo) e carece de impactos a longo prazo a nível populacional.

Assim, para superar tais limitações, é importante aplicar um modelo de avaliação de risco que se concentre nos efeitos adversos na população da espécie a longo prazo. Para tal, é necessário integrar diferentes modelos, que consideram:

- Um modelo de avaliação de frequências que contabiliza as taxas de acidentes que originam derrames de hidrocarbonetos;
- Um modelo de análise de consequências, através de uma rotina computacional para simular o transporte e transformação de petróleo no oceano;
- Um modelo ecotoxicológicos que aborda os efeitos em nível individual devido à exposição ao óleo;
- Um modelo ecológico probabilístico que pode considerar incertezas e variabilidade nos parâmetros e descrever os impactos da poluição em nível populacional.

O esquema simplificado do modelo foi apresentado na Figura 3.

3.3 Regulamentação e Legislação

De acordo com o Código de Normas Internacionais e Práticas Recomendadas para uma Investigação de Segurança dos Acidentes e Incidentes Marítimos (Código de Investigação de Acidentes - CIA), aprovado pela Resolução MSC.255 (84) da IMO, o termo “Acidente Marítimo” compreende todo acontecimento que possa resultar em qualquer das ocorrências com envolvimento relacionado à operação de um navio:

- Morte ou ferimentos graves de uma pessoa;
- Perda de uma pessoa do navio;
- Perda, suposta perda ou abandono do navio;
- Encalhe, incapacidade de um navio ou envolvimento em uma colisão;
- Dano material a um navio;
- Prejuízo material à infraestrutura de um navio, que possa colocar em perigo a segurança do próprio navio, de outro navio ou ainda de uma pessoa;
- Danos graves, ou a possibilidade de ocorrência ao meio ambiente provocado pelos danos causados a um ou mais navios.

A NORMAM-09/DPC (2003a), dentre outros propósitos, esclarece o entendimento dos termos caracterizados como acidentes e fatos de navegação. De acordo com o Capítulo 1, item 0106, são definidos os tipos de acidentes de navegação, descritos na Tabela 4.

Tabela 4. Acidentes de Navegação.

Acidente	Definição
Naufrágio	Afundamento total ou parcial da embarcação por perda de flutuabilidade, decorrente de embarque de água em seus espaços internos devido a adernamento, emborcamento ou alagamento
Encalhe	Contato das chamadas obras vivas da embarcação com o fundo, provocando resistências externas que dificultam ou impedem a movimentação da embarcação
Colisão	Choque mecânico da embarcação e/ou seus apêndices e acessórios, contra qualquer objeto que não seja outra embarcação ou, ainda, contra pessoa (banhista, mergulhador etc). Assim, haverá colisão se a embarcação se chocar com um corpo fixo ou flutuante insusceptível de navegar ou manobrar, tal como: recife, cais, casco soçobrado, boia, cabo submarino etc
Abalroação ou Abalroamento	Choque mecânico entre embarcações ou seus pertences e acessórios
Água Aberta	Ocorrência de abertura nas obras vivas que permita o ingresso descontrolado de água nos espaços internos, ou a descarga de líquidos dos tanques, por rombo no chapeamento, falhas no calafeto, ou nas costuras, por válvulas de fundo abertas ou mal vedadas, por defeitos nos engaxetamentos dos eixos, ou qualquer falha ou avaria que comprometa a estanqueidade da embarcação
Explosão	Combustão brusca provocando a deflagração de ondas de pressão de grande intensidade
Incêndio	Destruição provocada pela ação do fogo por: combustão dos materiais de bordo, ou sobre as águas, em decorrência de derramamento de combustível ou inflamável, curto-circuito elétrico, guarda ou manuseio incorretos de material inflamável ou explosivo
Varaço	Ato deliberado de fazer encalhar ou por em seco a embarcação, para evitar que evento mais danoso sobrevenha
Arribada	Fazer entrar a embarcação num porto ou lugar não previsto para a presente travessia, isto é, que não seja o porto ou local de escala programada ou de destino
Alijamento	Ato deliberado de lançar n'água, no todo ou em parte, carga ou outros bens existentes a bordo, com a finalidade de salvar a embarcação, parte da carga ou outros bens

Fonte: Adaptado da NORMAM-09/DPC (2005).

Também é importante definir o conceito de avaria, que corresponde defeito no navio ou nas suas instalações (aparelhos, equipamentos, peças, acessórios e materiais de bordo), que

ponha em risco a embarcação, as vidas e fazendas de bordo (NORMAM-09/DPC, 2003a). Ainda é válido notar, que de acordo com o estabelecido no Capítulo 1, item 0106 da NORMAM- 09/DPC (2003a), os fatos de navegação são definidos como:

- a. O mau aparelhamento ou a impropriedade da embarcação para o serviço em que é utilizada e a deficiência da equipagem:
 - i. Mau aparelhamento da embarcação: a falta ou a impropriedade de aparelhos, equipamentos, peças sobressalentes, acessórios e materiais, quando em desacordo com o projeto aprovado, as exigências da boa técnica marinha e demais normas e padrões técnicos recomendados;
 - ii. Impropriedade da embarcação para o serviço ou local em que é utilizada: utilização da embarcação em desacordo com sua destinação, área de navegação ou atividade estabelecida em seu Título de Inscrição; e
 - iii. Deficiência de equipagem: falta ou deficiência quanto à quantidade e à qualificação de tripulantes, em desacordo com as exigências regulamentares, como a do cumprimento do cartão da tripulação de segurança da embarcação;
- b. Alteração da rota: desvio da derrota inicialmente programada e para a qual o navio estava aprestado, pondo em risco a expedição ou gerando prejuízos;
- c. Má estivação da carga, que sujeite a risco a segurança da expedição - má peação, colocação em local inadequado ou a má arrumação no porão, no convés ou mesmo no interior do container, quer no granel, quer na carga geral, sem observar, ainda, a adequabilidade da embalagem, pondo em risco a estabilidade do navio, a integridade da própria carga e das pessoas de bordo;
- d. Recusa injustificada de socorro à embarcação ou a náufragos em perigo;
- e. Todos os fatos que prejudiquem ou ponham em risco a incolumidade e segurança da embarcação, as vidas e fazendas de bordo (como o caso da presença de clandestino a bordo); e
- f. Emprego da embarcação, no todo ou em parte, na prática de atos ilícitos, previstos em lei como crime ou contravenção penal, ou lesivos à Fazenda Nacional (como o caso de contrabando ou descaminho).

De acordo com a NORMAM-08, capítulo 1, item 0132, pode ser definido o conceito de Passagem Inocente, que corresponde à passagem efetuada sem prejuízo à paz, à boa ordem ou à segurança do Estado, devendo, ainda, ser feita em conformidade com a Convenção das

Nações Unidas sobre o Direito do Mar e com as demais normas de direito internacional. A norma estabelece que a passagem de um navio estrangeiro será considerada prejudicial à paz, à boa ordem ou à segurança do Estado costeiro se esse navio realizar, no mar territorial, alguma das seguintes atividades (NORMAM-08/DPC, 2013):

- a. Qualquer ameaça ou uso da força contra a soberania, a integridade territorial ou a independência política do Estado, ou qualquer outra ação em violação dos princípios de direito internacional enunciados na Carta das Nações Unidas;
- b. Qualquer exercício ou manobra com armas de qualquer tipo;
- c. Qualquer ato destinado a obter informações em prejuízo da defesa ou da segurança do Estado;
- d. Qualquer ato de propaganda destinado a atentar contra a defesa ou a segurança do Estado;
- e. Lançamento, pouso ou recebimento a bordo de qualquer aeronave ou dispositivo militar;
- f. O embarque ou desembarque de qualquer material, moeda, animal, vegetal ou pessoa, com violação das leis e regulamentos aduaneiros, fiscais, de imigração, ambientais ou sanitários do Estado;
- g. Qualquer ato intencional e grave de poluição;
- h. Pesca;
- i. Investigação ou levantamento hidrográfico;
- j. Qualquer ato destinado a perturbar quaisquer sistemas de comunicação ou quaisquer outros serviços ou instalações do Estado; e
- k. Qualquer outra atividade que não esteja diretamente relacionada com a passagem.

4 METODOLOGIA

Algumas metodologias são necessárias para definir o modelo adequado para o desenvolvimento de simulações de vazamento de óleo no oceano. O procedimento proposto neste trabalho envolve as seguintes etapas, definidas como procedimentos gerais para a simulação de vazamentos de óleo em ilhas oceânicas. Desta forma, de acordo com os objetivos apresentados na Introdução, as etapas são: a) Identificar possíveis cenários de vazamento, considerando as condições meteoceanográficas do local e as rotas de navios mais perigosas para definir os pontos nos quais os vazamentos ocorrem; b) Definir o método de obtenção dos dados Meteoceanográficos; e c) Conceituar a Metodologia geral de simulação de vazamentos, considerando o modelo escolhido.

4.1 IDENTIFICAR POSSÍVEIS CENÁRIOS DE VAZAMENTO

Os possíveis cenários de vazamento são definidos como uma combinação de dois fatores, sendo estes: a) as condições meteoceanográficas; e b) os fatores que possibilitam um acidente no local. As forças primárias que atuam no derramamento de óleo são as correntes e os ventos (LUMPKIN; GARZOLI, 2005). Neste contexto, para definir os casos nos quais há maior possibilidade de um vazamento atingir a costa do local escolhido, deve-se escolher o período do ano onde os ventos e correntes de superfície são mais intensas e estão direcionados para o local.

Analogamente, as condições que possibilitam um vazamento na região estão conectadas com a periculosidade da região, i.e., associada à intensidade de tráfego marítimo. Assim, para definir localidade dos acidentes que originam o vazamento, é necessário encontrar as principais rotas de navios nas proximidades do local de estudo e selecionar, dentre elas, a mais perigosa, com base nas características de navegabilidade de cada uma. Uma técnica importante para essa identificação é análise preliminar de perigos (APP) (ERICSON et al., 2005).

Para definir onde os pontos de vazamento estão localizados, é necessário identificar os locais com maior possibilidade de ocorrência de um vazamento. Neste contexto, considerando a definição das características meteoceanográficas do local e as rotas mais perigosas, os pontos de vazamento são definidos como uma combinação destes dois fatores com a densidade de tráfego nesta rota. Assim, os pontos de liberação foram selecionados com base na densidade de tráfego da rota do arquipélago das consideradas como a mais perigosa

registradas no site Marine Traffic, nos meses do ano onde a intensidade dos ventos e das correntes superficiais é maior (MARINETRAFFIC, 2017; QUEIROZ et al., 2019).

Os casos de derramamento de óleo foram simulados considerando as condições meteoceanográficas de cada mês em cada ponto de lançamento, resultando em seis cenários. As condições gerais de cada vazamento, como requeridas pelo MEDSLIK-II, incluem:

- O volume de óleo vazado, definido com base na capacidade do tanque do navio brasileiro que navega pela região; e
- O tipo do óleo, definido considerando o tipo de óleo mais utilizados em atividades exploratórias;

4.2 DADOS METEOCEANOGRÁFICOS

Os dados de batimetria global utilizados foram fornecidos pelo GEBCO, que é um modelo de elevação (tridimensional) digital para oceano e terra, fornecendo dados de elevação (em metros) em uma grade de intervalo de 15 segundos de arco (GEBCO, 2021). Os dados da costa são baseados na Geografia Hierárquica de Alta Resolução Autoconsistente Global (GSHHG) da Administração Atmosférica Oceânica Nacional (NOAA) (NOAA, 2018).

As entradas oceanográficas globais são da Análise e Previsão Física do Oceano Global $1/12^\circ$ fornecida pelo CMEMS que inclui dados sobre TSM, salinidade, correntes, nível do mar, profundidade da camada mista e parâmetros de gelo do topo ao fundo ao longo do oceano global (CMEMS, 2021). Para este estudo, apenas os dados de TSM e correntes foram recuperados. Os dados atmosféricos (i.e., velocidades do vento) foram recuperados dos campos atmosféricos ERA-Interim, fornecidos pelo ECMWF (BERRISFORD et al., 2011; ECMWF, 2019).

Os dados são posteriormente plotados com um código em linguagem Python, desenvolvido pelo autor.

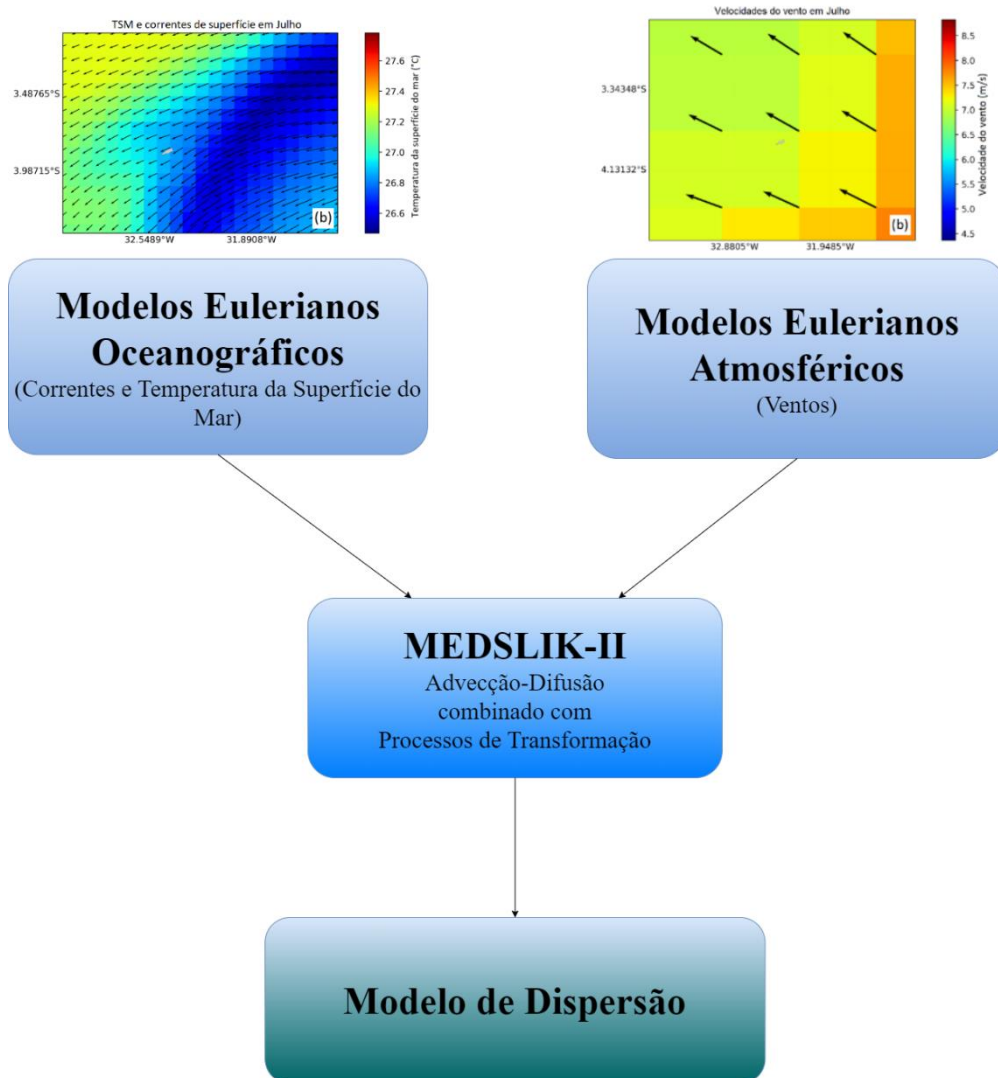
4.3 SIMULAÇÕES DE VAZAMENTO

A simulação da dinâmica espaço-temporal dos vazamentos de óleo no oceano é realizada com o modelo de dispersão Lagrangiano MEDSLIK-II (DE DOMINICIS et al., 2013a, 2013b), com o intuito de simular a dispersão de manchas de óleo no oceano circunvizinho à região. O modelo utiliza os dados de entrada dos modelos oceanográficos (i.e., correntes e TSM) e Eulerianos atmosféricos (i.e., vento), a fim de resolver as equações que descrevem os processos de advecção-difusão e intemperismo. É um modelo que requer

sólidos conhecimentos de mecânica dos fluidos e de suas equações governantes. Além disso, o modelo requer informações referentes às condições iniciais do vazamento (i.e., localização, volume, duração, tipo de óleo) que precisam ser definidas a priori.

Após a resolução das equações de advecção-difusão e intemperismos, o modelo retorna as concentrações das parcelas de óleo que sofreram as intempéries e sua posição a cada uma hora. O esquema simplificado do modelo, que foi descrito por completo na seção 3.1, é ilustrado na Figura 8.

Figura 8. Esquema simplificado do MEDSLIK-II com as entradas (modelos oceanográficos e atmosféricos Eulerianos) e as saídas (modelo de destino e transporte do derramamento de óleo).



Fonte: Adaptado de DE DOMINICIS et al., 2013a, 2013b.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Seção 4 foi descrito um procedimento padrão para definição dos parâmetros de simulação para um vazamento de óleo na região de uma ilha oceânica. Na presente seção serão apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta, acompanhada de comentários sobre os resultados obtidos.

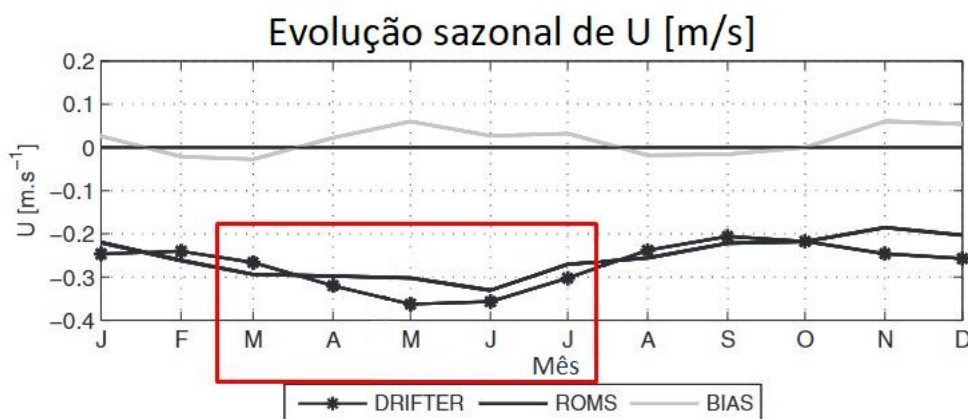
5.1 CENÁRIOS ACIDENTAIS DE VAZAMENTO

Os resultados referentes à aplicação da metodologia utilizada para identificar os possíveis pontos de vazamento são apresentados a seguir.

5.1.1 Definição das Rotas

Considerando a análise das condições meteoceanográficas da região do AFN, foram escolhidas as médias mensais das correntes e ventos para março e julho, com base no modelo ROMS, como descritos na Figura 9, devido a sua maior intensidade em março, porém com menor velocidade do vento, atingindo sua maior intensidade em julho, havendo também a intensificação dos ventos alísios de sudeste (LUMPKIN; GARZOLI, 2005; MOLINARI, 1982).

Figura 9. Evolução mensal das velocidades dos ventos no AFN.



Fonte: Adaptado de TCHAMABI, et al., 2017.

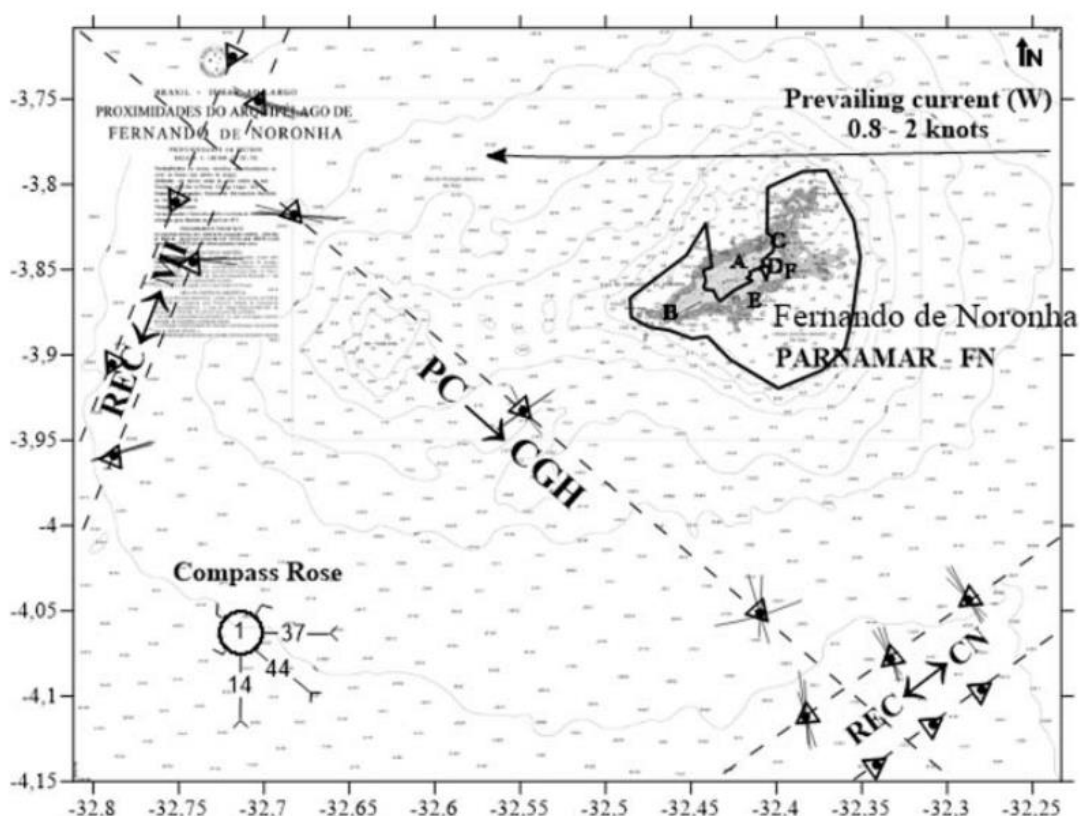
As rotas foram identificadas por (DUARTE; DROGUETT, 2015) nas Cartas Piloto, como citado na Seção 4.1, que mostram as rotas mais recomendadas para navegação. Estas rotas são definidas utilizando como critério a navegabilidade, de forma que as embarcações nessas rotas aproveitem melhor as correntes, ventos e possíveis pontos de referência para ajudar a determinar a posição do navio, para cada mês do ano, com base em dados

meteoceanográficos coletados pela Marinha do Brasil de 1951 a 1972 (BRASIL, 1993). As rotas são apresentadas na Figura 10, sendo elas:

- Ponce e Cólón – Cabo da Boa Esperança (PC-CGH – novembro – ida), distância mínima até a AFN: 4,96 milhas náuticas (mn)
- Recife – Ilha da Madeira (REC – MI – agosto – ida e volta), distância mínima até AFN: 16,38 mn;
- Recife – Cabo Noaudhibou (REC – CN – março – ida e volta), distância mínima até AFN: 12,58 mn;

No contexto do AFN, a rota que possui perigo significativo é a REC – CN, que passa de sul para leste da AFN (DUARTE; DROGUETT, 2015). Portanto, é conceitualmente possível que um derramamento de óleo nesta rota seja transportado para a costa do arquipélago devido aos ventos e correntes predominantes. Não foram definidas as causas que deram origem ao vazamento.

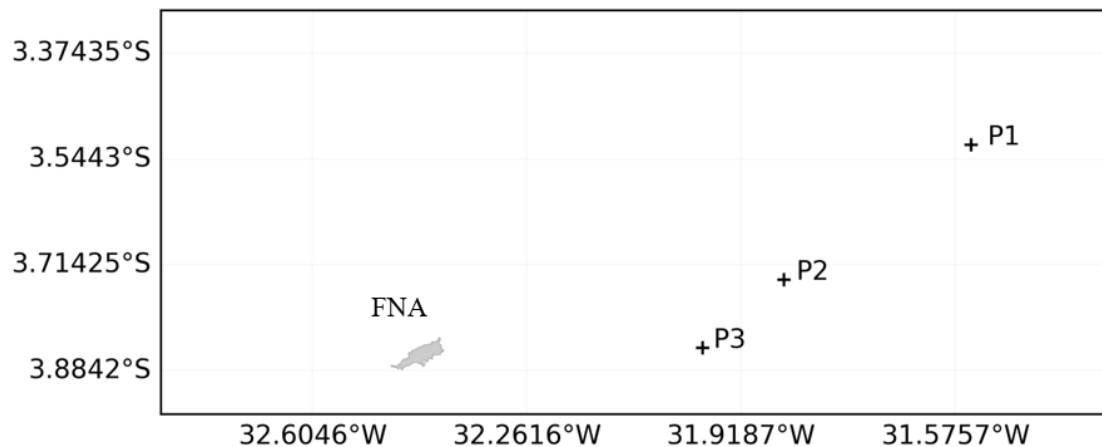
Figura 10. Principais rotas junto à AFN: Ponce e Colón – Cabo da Boa Esperança (PC – CGH, ida); Recife – Ilha da Madeira (Rec – MI, ida e volta); Recife – Cabo Noaudhibou (REC – CN, ida e volta). Seis marcos estão representados na figura: (A) Colina do Pico; (B) Farol FN; (C) Igreja de São Pedro; (D) Antena; (E) Ilha do Ovo; (F) Pontinha. Escala 1:4222.



5.1.2 Pontos de Vazamento

Foram definidos três pontos iniciais de liberação de derramamento na rota determinada como mais perigosa, na seção 4.1. Esses pontos foram determinados no lado leste do AFN, voltado para o mar aberto e onde o mar está mais exposto à ação dos ventos e correntes oceânicas (ASSUNÇÃO et al., 2016; IVAR DO SUL; SPENGLER; COSTA, 2009). Os pontos são: *P1* ($3^{\circ}31.3'S$; $31^{\circ}33'W$), *P2* ($3^{\circ}44.3'S$; $31^{\circ}51'W$) e *P3* ($3^{\circ}50.87'S$; $31^{\circ}58.8'W$) (Figura 11).

Figura 11. Localização do AFN e coordenadas dos pontos de liberação P1, P2 e P3 para as simulações de derramamento de óleo



Fonte: O Autor, 2022.

5.1.3 Consolidação dos Cenários de Vazamento

Definidos os pontos de lançamento, foram definidas as características do vazamento, considerando:

- Um volume instantâneo de óleo derramado igual a 9,100 toneladas, com base na capacidade de um único tanque de carga Suezmax típico (IMO, 2008);
- O óleo utilizado nas simulações é o 28° API (tipo de óleo intermediário, densidade aproximada de 886.6 kg/m^3), o mais utilizado nas atividades exploratórias brasileiras de petróleo e gás (ANP, 2021); A dispersão do óleo foi simulada durante 48h e os principais resultados foram armazenados a cada meia hora.

Os nomes dos cenários resultam da combinação do ponto de vazamento e do mês, resumidos na Tabela 5. Os parâmetros gerais da simulação podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 5. Resumo dos cenários de simulação de derramamento de óleo.

	Pontos de Vazamento		
	P1	P2	P3
Março	P1M	P2M	P3M
Julho	P1J	P2J	P3J

Fonte: O Autor, 2022.

Tabela 6. Parâmetros do modelo de dispersão

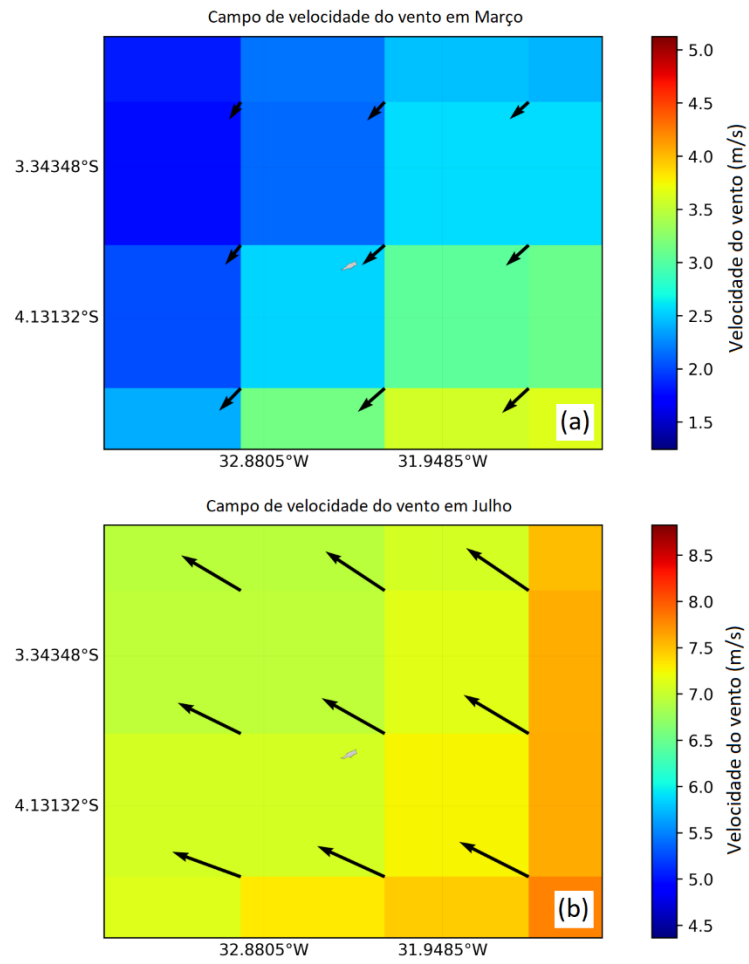
Variável do modelo	Valor
Número de partículas lançadas (valor padrão do modelo)	9000
Datas de início	24/03/2021; 24/07/2021
Resolução espacial da malha do rastreador do óleo (valor padrão do modelo)	150
Difusividade Horizontal (valor padrão do modelo)	2 m/s ²
Difusividade Vertical (valor padrão do modelo) (acima e abaixo de 30m de profundidade)	0.01 m/s; 0.0001 m/s
Duração da simulação (fornecido pelo usuário)	48h
Duração do vazamento (fornecido pelo usuário)	00h (instantâneo)
API do óleo (fornecido pelo usuário)	28.4
Densidade do óleo (fornecido pelo usuário)	885 kg/m ³
Viscosidade (fornecido pelo usuário)	14.10 m ² /s
Pressão de vapor do óleo (fornecido pelo usuário)	0.366 bar
Volume vazado (fornecido pelo usuário)	9810 ton

Fonte: O Autor, 2022.

5.2 RESULTADOS OCEANOGRÁFICOS E ATMOSFÉRICOS

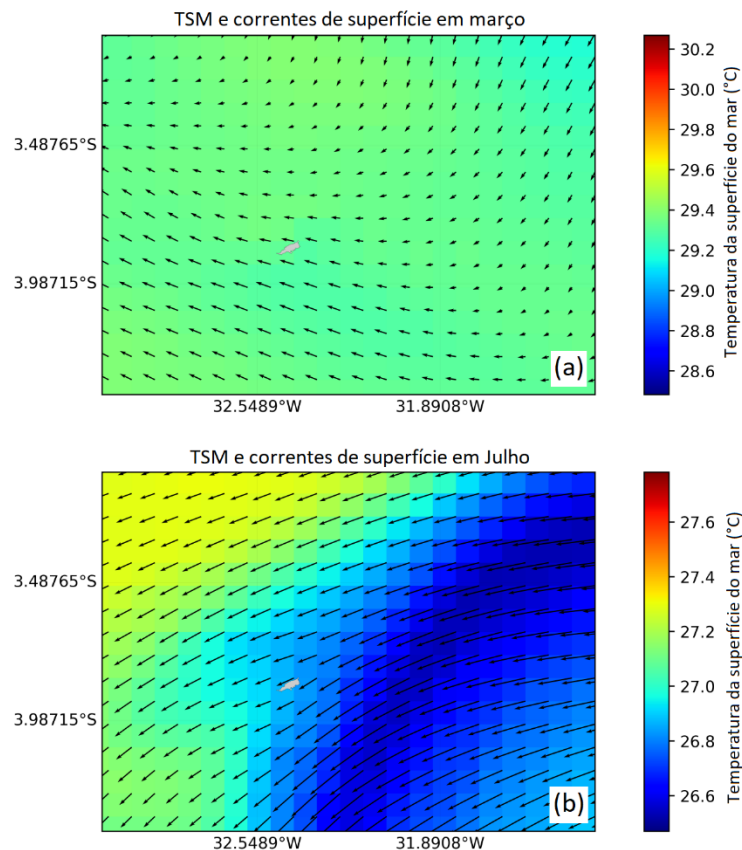
Os resultados meteoceanográficos são fundamentais para descrever o transporte do petróleo no oceano. A velocidade média do vento é de 2.86 m/s na direção sudoeste em março e 7.52 m/s na direção noroeste em julho (Figura 12). A TSM média foi maior em julho, com média de 29.3 °C, enquanto em março a temperatura média foi de 27.01 °C (Figura 13). Em relação à corrente de superfície, a mais intensa ocorreu em julho, com média de 0.54 m/s para sudoeste. Em março, a corrente apresenta um pequeno desvio para nordeste, com intensidade média correspondente a 0.17 m/s (Figura 13a). O transporte de petróleo se deu principalmente para o oeste devido à direção da corrente de superfície. A influência do vento afeta a direção do transporte de petróleo. Portanto, a direção nordeste combinada com a maior intensidade em julho contribuíram para transportar a pluma de óleo para o AFN.

Figura 12. Distribuição média da velocidade do vento (cores, m/s) e direção (setas) para março (a) e julho (b).



Fonte: O Autor, 2022.

Figura 13. Distribuição média da TSM (cores, °C) e direção das correntes de superfície (setas) para março (a) e julho (b).



Fonte: O Autor, 2022.

5.3 SIMULAÇÕES DE VAZAMENTO

Os resultados primários da simulação para cada cenário são as porcentagens do volume original de óleo que: evaporou, permaneceu na superfície, dispersou nas colunas de água e sedimentou no fundo do mar e na costa. Esses resultados para o passo de tempo final da simulação estão resumidos na Tabela 7. Em março, foi observado que o percentual máximo de evaporação foi atingido após 5.5 horas, enquanto em julho o máximo foi alcançado em 3 horas. Além disso, a taxa máxima de óleo evaporado foi semelhante em cada mês: aproximadamente 35.84% em março e 35.83% em julho (Tabela 7).

O aumento de densidade e viscosidade se deve à emulsificação da água no óleo. Para os derramamentos simulados em março, a densidade e a viscosidade da emulsão água-óleo não se estabilizaram até o final da simulação. As viscosidades começaram em 220.02 Pa.s e aumentaram para 2306.57 Pa.s para P_1 , 2301.39 Pa.s para P_2 e 2296.82 Pa.s para P_3 . Analogamente para a densidade da emulsão, que passou de 885 kg/m³ para 996.65 kg/m³ para os lançamentos originados nos pontos P_1 e P_2 e 996.68 kg/m³ para P_3 . Nenhum dos vazamentos simulados em março atingiu o AFN.

Para as simulações de julho, a densidade se estabilizou em torno de 22 horas após o início da simulação, sendo o valor final de 996.75 kg/m^3 e se manteve constante até o final da simulação para os lançamentos originados nos três pontos. À semelhança do ocorrido em março, a variação da viscosidade atingiu um valor estável simultaneamente com a densidade. As viscosidades máximas da emulsão são 2727.4 Pa.s para P_1 , 2721.91 Pa.s para P_2 e 2714 Pa.s para P_3 . Ao fim do processo de evaporação, cerca de 64.17% do óleo permanece na superfície. As porcentagens dispersas finais podem ser vistas na Tabela 7.

Tabela 7. Resumo, para cada cenário, da porcentagem de óleo que evaporou, permaneceu na superfície do mar, disperso na coluna de água e fixado na costa e no fundo do mar.

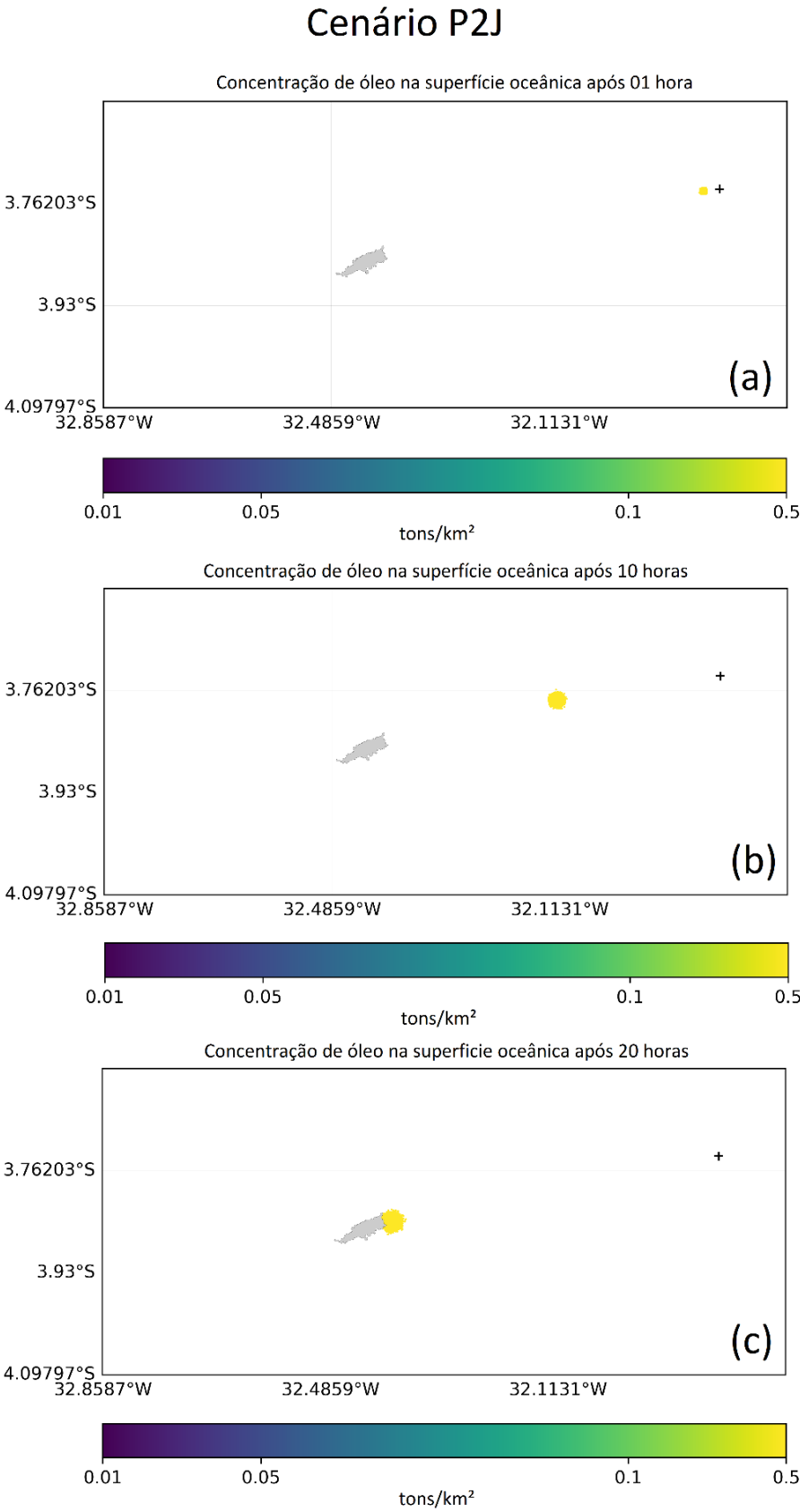
Cenário	Evaporado (%)	Na superfície do mar (%)	Disperso na coluna d'água (%)	Sedimentado na costa ou substrato (%)
<i>P1M</i>	35.84	63.89	0.27	0
<i>P2M</i>	35.84	63.90	0.26	0
<i>P3M</i>	35.84	63.90	0.26	0
<i>P1J</i>	35.83	63.18	0.93	0.06
<i>P2J</i>	35.83	0.02	0.21	63.94
<i>P3J</i>	35.83	63.29	0.88	0

Fonte: O Autor, 2022.

O óleo atingiu a costa em dois dos cenários de derramamento em julho: *P1J* e *P2J*. No cenário *P1J*, uma pequena quantidade de óleo que se espalhou da mancha atingiu o AFN. A quantidade final de óleo na costa e no fundo do mar após 48 horas foi equivalente a 0.06% do volume inicial do derramamento ($\sim 5.46 \text{ ton}$). Para o cenário *P2J*, o óleo atingiu a costa após 20 horas, inicialmente com 0.5% ($\sim 45.5 \text{ ton}$) do volume total derramado. Ao final do tempo de simulação de 48h, o óleo total fixado na costa e no fundo do mar é de aproximadamente 63.94% ($\sim 5,819 \text{ ton}$). Essa porção de óleo é uma quantidade substancial que pode causar graves danos ecológicos e exigir esforços de limpeza em grande escala.

A trajetória e as concentrações do derramamento de óleo na superfície do mar para o ponto de liberação *P2J*, no início do lançamento e após 07, 14 e 21 horas são apresentadas na Figura 14. Esta ilustração é útil para observar o comportamento e a trajetória da mancha de óleo no oceano devido à influência das condições meteoceanográficas. Imagens referentes aos demais cenários de vazamentos simulados se encontram nos APÊNDICE A., APÊNDICE B., APÊNDICE C., APÊNDICE D., APÊNDICE E., que apresentam a concentração de óleo na água para o cenário (ton/km²) após (a) 01 hora; (b) 10 horas; e (c) 20 horas, para os cenários *P1M*, *P1J*, *P2M*, *P3M* e *P3J*, respectivamente.

Figura 14. Concentração de óleo na água para o cenário P2J (ton/km²) após (a) 01 hora; (b) 10 horas; e (c) 20 horas. As cruzes representam o ponto de liberação do derramamento de óleo.



Fonte: O Autor, 2022.

5.4 DISCUSSÕES

A taxa de evaporação de óleo no MEDSLIK-II depende das propriedades físico-químicas do óleo, taxa de espalhamento, TSM e intensidade dos ventos (DE DOMINICIS et al., 2013a; SEBASTIÃO; GUEDES SOARES, 1995). Os resultados das simulações realizadas mostraram que mais de um terço do volume derramado evapora nas primeiras horas após o derramamento, ou seja, 5.5h para os derramamentos ocorridos em março e 3h para os de julho (Tabela 7). A formação da emulsificação variou com o mês e ocorreu após a porção evaporada atingir seu máximo. Como os ventos são mais potentes em julho (Figura 12), a emulsificação ocorre mais rapidamente (em $\sim 22h$), pois fornecem energia para a emulsificação, mas não o suficiente para dispersá-la novamente (LEE et al, 2015). Em março, a intensidade do vento foi menor e a viscosidade da emulsão ainda estava aumentando dentro do tempo de simulação. Ainda assim, o óleo formou uma emulsão estável e de alta viscosidade que impediu o espalhamento do óleo.

Para óleos mais leves ($API > 30^\circ$), a evaporação é mais significativa, logo, conceitualmente, os impactos de um derramamento em um ecossistema seriam reduzidos. Por outro lado, óleos mais pesados ($API < 22^\circ$), ricos em asfaltenos e ceras, formariam *mousses* mais estáveis e com baixa taxa de evaporação, evitando assim o espalhamento. Em relação aos tipos de óleo intermediários, como o simulado, a perda por evaporação não foi significativa, pois um volume considerável de óleo atingiu o AFN em *P2J* ($\sim 5,819 ton$). Além disso, a baixa porcentagem de óleo disperso e sedimentado indica que os efeitos dos processos advectivos são mais consideráveis do que os efeitos de empuxo.

A dispersão natural reduz o volume da mancha na superfície e reduz a perda por evaporação; entretanto, não altera as propriedades físico-químicas do óleo (SEBASTIÃO; GUEDES SOARES, 1995). A velocidade do vento e a viscosidade impactam diretamente no percentual disperso nas colunas d'água, ou seja, quanto maior a velocidade do vento e a densidade do óleo, mais óleo será incorporado à coluna d'água. A densidade do óleo não variou significativamente nos dois meses, sendo que a velocidade média do vento em julho ($7.52 m/s$) é maior que em março ($2.86 m/s$); assim, o óleo dispersado em julho também é maior, i.e., 0.93% ($\sim 8.43 ton$) em julho contra 0.27% ($\sim 2.46 ton$). A quantidade de óleo dispersa na água traz sérias consequências ao meio ambiente, uma vez que componentes tóxicos para a vida marinha são misturados na água (e.g., benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno) (LEWIS; PRYOR, 2013).

A combinação da direção da corrente e do vento no sentido oeste é problemática para o caso de ocorrência de um derramamento de óleo no lado leste do AFN. A corrente de oeste e o vento predominante de nordeste em julho intensificam o transporte de petróleo em direção ao AFN (Figura 13). É importante notar que o vento ditou a direção da trajetória da pluma enquanto a corrente dominou o fluxo. A direção sudeste dos ventos em março impediu que o óleo chegasse ao arquipélago. Ainda assim, o processo advectivo predomina sobre os efeitos de degradação (e.g., evaporação) em todos os cenários. Assim, os derrames de petróleo ocorridos em julho são preocupantes, devido ao potencial catastrófico de poluição no arquipélago.

As condições meteoceanográficas e os processos físico-químicos trouxeram uma elevada parcela do óleo que primeiro chega ao AFN em 20h. Uma quantidade total de cerca de 63.95% do petróleo (~5,819 ton) está na costa do arquipélago ou sedimentado nas águas rasas até o final da simulação. Isso é ilustrado na Figura 12c, quando ainda está sendo transportado óleo em pouca quantidade. O transporte advectivo torna a janela de tempo para uma resposta efetiva muito estreita (i.e., ~20h), potencialmente intensificando os impactos.

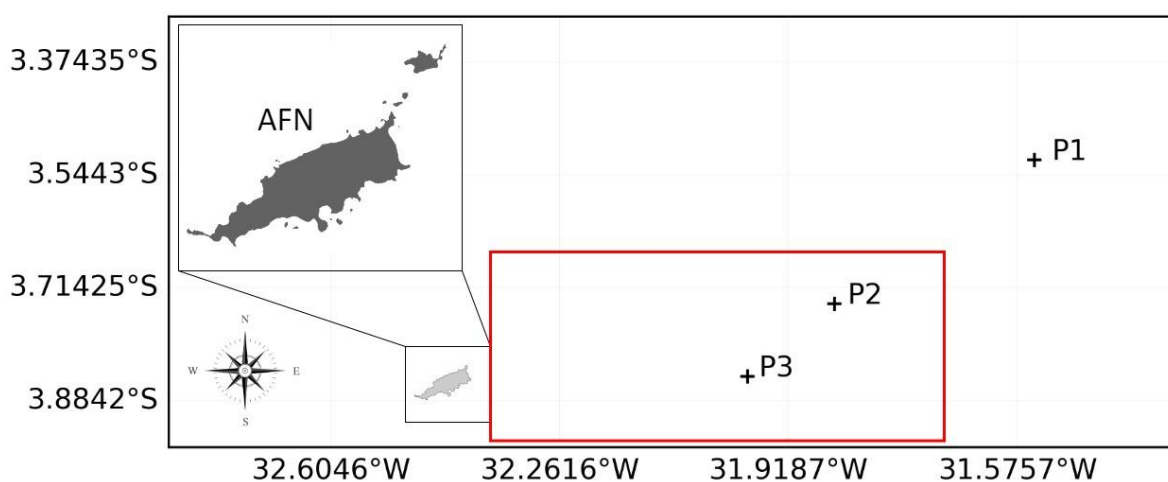
Uma mancha de óleo altamente uniforme atinge o AFN, com pouco espalhamento e 0.5 ton/km^2 de concentração de óleo. As regiões afetadas compreendem a ilha da Rata até a baía do Sueste. Estas são áreas suscetíveis, com ecossistemas importantes. Por exemplo, os recifes de coral do AFN são de fundamental importância para o arquipélago, que são sésseis e sensíveis a poluentes. Corais servem de alimento e abrigo para diversos tipos de animais como vermes, crustáceos, esponjas, ouriços-do-mar e muitos peixes (YENDER et al., 2010). A perda de corais causaria um desequilíbrio ecológico, que afetaria negativamente tanto os seres humanos quanto os organismos marinhos e terrestres, uma vez que estes protegem a costa, apoiam o turismo e contribuem para a pesca.

Adicionalmente, estas áreas são habitats de algumas espécies essenciais para o turismo ecológico, como tubarões, tartarugas marinhas e o golfinho-rotador (*Stenella longirostris*) (QUEIROZ et al., 2019). Além disso, o AFN apresenta várias espécies de peixes ameaçadas, o que justifica a necessidade de maiores esforços de conservação. Uma avaliação recente revelou que 17% de todas as espécies de peixes registradas do arquipélago estão ameaçadas ou quase ameaçadas, de acordo com o status de conservação da União Internacional para a Conservação da Natureza (IUNC) e do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) (SCHMID et al., 2020). Os danos causados à vida marinha e terrestre por derramamentos de óleo podem impactar o ecossistema e também os aspectos socioeconômicos do AFN, impossibilitando atividades de grande importância econômica,

como o turismo ecológico e a pesca nacional, colocando os moradores do AFN em situação crítica.

Ações de mitigação emergenciais, como o uso de dispersantes e queima *in situ*, são muito tóxicas ao meio ambiente (SHAFIR; VAN-RIJN; RINKEVICH, 2007). Este fato mostra que ações preventivas, como a restrição de áreas de tráfego de navios tanque, devem ser priorizadas ao invés de ações de mitigação. Assim, com uma fiscalização adequada, seria possível garantir o tráfego fora de uma região delimitada, uma vez que, a direção dos ventos e das correntes destinariam a pluma para uma região fora do Arquipélago (QUEIROZ et al., 2019). A Figura 15 apresenta uma sugestão de região que pode ser delimitada para restrição de tráfego de embarcações. A região está situada à direita do arquipélago, incorporando a região do ponto 2 (P2) considerado na simulação, que, conceitualmente, tem maior possibilidade de ocorrência de um acidente no qual a mancha de óleo decorrente atinja o AFN. Ainda é válido salientar que a implantação desta medida implicaria na necessidade de definição de novas rotas de navegação para os navios que precisam pela região, visto que o tráfego dentro desta ficaria restringido. Além disso, mesmo havendo necessidade de emprego de estratégias de mitigação, deve-se sempre focar em estratégias de limpeza e remoção de óleo não destrutivas, como o emprego de *Booms*, *Skimmers* e materiais sorventes (e.g., esponjas de nanotubo de carbono) (ZHONG et al., 2011; LI et al., 2015; KUKKAR et al., 2020).

Figura 15. Sugestão de delimitação de região para limitação de tráfego no AFN. P1, P2 e P3 representam os pontos de vazamento considerados nas simulações.

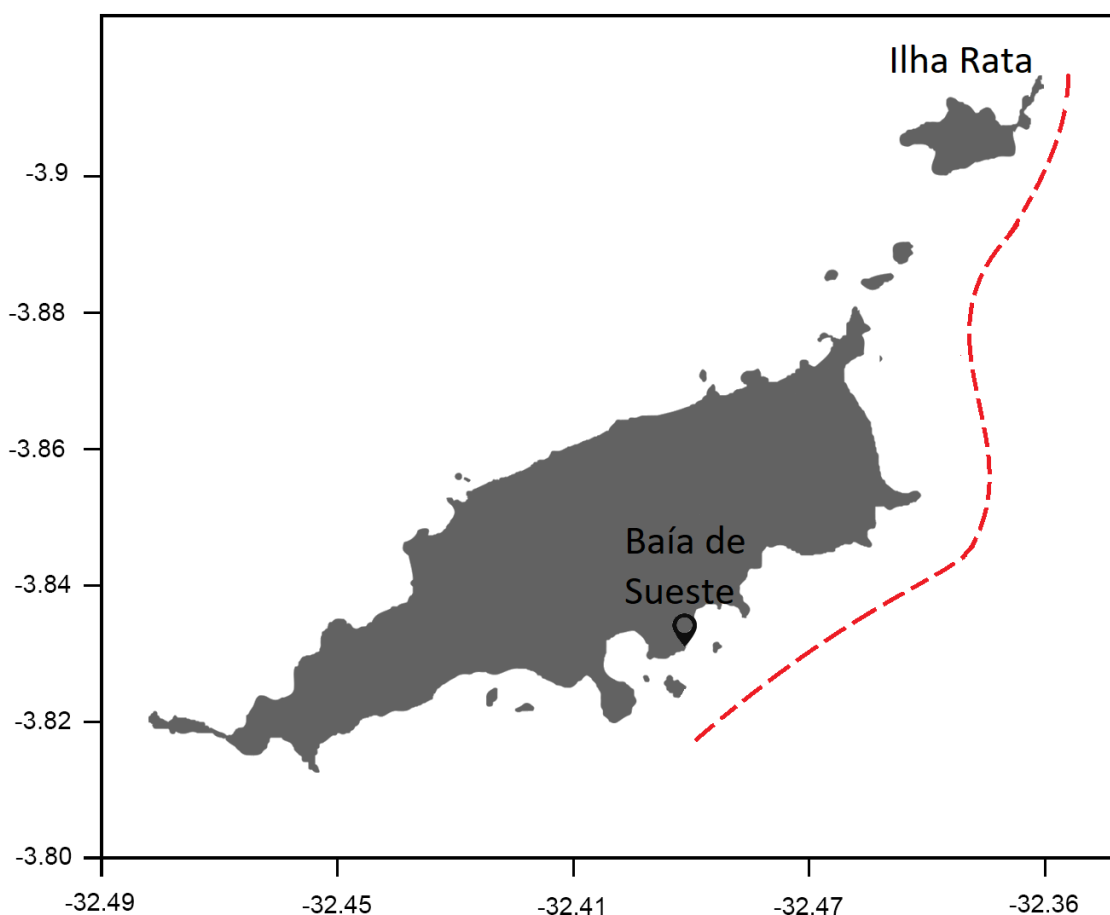


Fonte: O Autor, 2022.

Também é importante destacar a necessidade de desenvolvimento de um plano de emergência, que consistiria da instalação de boias de contenção na região oceânica que

compreende o perímetro da Ilha Rata à Baía de Sueste. Esta sugestão, apresentada na Figura 16, mostra a proposta de instalação das boias. Dados os resultados da simulação do cenário *P2J* (Figura 14), é possível identificar a pluma atingindo o arquipélago diretamente na região que compreende o perímetro citado. Logo, este plano consistiria na utilização de boias de contenção para impedir a chegada do óleo à costa do AFN, na ocorrência de um vazamento. Entretanto, para a aplicação desta medida é preciso realizar um estudo de viabilidade, considerando os custos para instalação destas boias e a disponibilidade de recursos para realização da operação (e.g., embarcações, recursos humanos, equipamentos). Adicionalmente, o plano deve conter medidas referentes ao descarte adequado do óleo retido nas boias, considerando as formas de limpeza e remoção menos prejudiciais ao ecossistema.

Figura 16. Sugestão de perímetro de instalação de boias de contenção para plano emergencial.



Fonte: O Autor, 2022.

Apesar de não estar inserida no escopo deste trabalho, é importante citar também a medida preventiva de construção de navios de casco duplo, adotada na conferência internacional, MARPOL 1992. A medida teve como objetivo tornar obrigatório que navios

petroleiros acima de 5.000 DWT, sejam equipados com cascos duplo. Analogamente, os países membros da IMO discutiram propostas para acelerar a eliminação dos petroleiros de casco simples, como conversão dos navios de casco simples em casco duplo, ou retirados de serviço (IMO, 1992). Estas medidas são importantes, pois visam aumentar a segurança do transporte através da adoção de tecnologias com foco em melhorias de resistência estrutural e da renovação das frotas de navios em operação.

5.4.1 Vantagens e Limitações

Os resultados obtidos a partir das simulações podem ser integrados a uma metodologia de avaliação de risco para quantificar os riscos ecológicos de derramamentos de óleo. Dessa forma, os decisores podem ter informações valiosas sobre os riscos ao meio ambiente, na eventualidade de um derramamento, e tomar decisões informadas para desenvolver as estratégias de prevenção, baseadas no *framework* de risco, e mitigação mais viáveis na região do AFN. Dada a baixa quantidade de trabalhos referentes a AQREs na região do AFN, este fato se configura como uma das vantagens deste trabalho, pois propõe informações valiosas para a aplicação da metodologia e compreensão do comportamento de uma pluma de óleo na região. Além disso, o modelo utiliza do formalismo Lagrangiano para descrever o movimento de uma pluma de óleo no oceano, reescrevendo as equações que dominam o destino de uma pluma de óleo no oceano e incorporando componentes determinísticos e probabilísticos na modelagem (i.e., correntes de alta frequência, correntes induzidas por ondas e as correções dos campos de vento), utilizadas para a descrever o movimento advectivo (DE DOMINICIS et al., 2013a, 2013b). Ainda é válido notar que o modelo desenvolvido é um código *open source* disponibilizado de forma gratuita, o que possibilita a adaptação e replicação para quaisquer propósitos. Neste contexto, este trabalho tem a vantagem de utilizar um modelo que pode ser replicado no próprio contexto do AFN considerando, por exemplo, outras características na modelagem.

Em contrapartida, o modelo possui limitações no contexto das simulações. Pode-se citar inicialmente as características gerais do vazamento, que são definidas baseadas no navio de bandeira brasileira (i.e., Suezmax) que navega na região. Assim, as características gerais do vazamento (i.e., tipo e volume de óleo vazado) são definidas apenas para uma situação, o que reduz as possibilidades de analisar as consequências para volumes maiores e outros tipos de óleo. De forma similar, no modelo executado, foram considerados apenas dois meses do ano (i.e., março e julho), o que restringe o conhecimento em relação ao comportamento do óleo em outras épocas ou estações do ano. Ainda é válido considerar que o modelo não inclui

a modelagem tridimensional dos processos físico-químicos (DE DOMINICIS et al., 2013a, 2013b), o que limita a análise, uma vez que, apesar de menos intensa, a dispersão também ocorre direção vertical. Entretanto, dado que a análise realizada neste trabalho teve foco em vazamentos decorrentes de petroleiros, cuja dispersão ocorre na superfície oceânica, o modelo escolhido serviu o propósito.

6 CONCLUSÕES

A modelagem de dispersão de óleo é de extrema importância em uma avaliação de risco para derramamentos de óleo. Este trabalho simulou derramamentos de óleo em potencial decorrentes de petroleiros que navegam ao largo do AFN. É importante notar que, apesar da baixa frequência de acidentes com petroleiros, ainda é possível destacar a possibilidade de ocorrência de vazamentos, devido ao considerável tráfego desses navios nas proximidades do AFN, o que conceitualmente aumenta os riscos de vazamento. Além disso, mesmo sendo este um evento infrequente, as consequências ao meio ambiente são severas, o que chama a atenção para esse tipo de acidente.

O intuito das simulações realizadas foi identificar qual dos vazamentos em potencial afetaria a costa do AFN em diferentes épocas do ano. Com este propósito, foram propostos seis cenários distintos considerando: três pontos de largada definidos ao longo de uma das rotas das embarcações que passam próximas ao arquipélago; e os meses de março e julho, quando a TSM, a velocidade do vento e a intensidade das correntes são mais fortes. O modelo simulou a trajetória do óleo, os processos de intemperismo (i.e., evaporação, espalhamento, dispersão, emulsificação) e aderência costeira que atuam sobre a pluma, apresentando como resultados as frações de óleo afetadas por cada um dos processos citados e as porções que aderiram na costa e à superfície do mar.

As simulações mostraram que apenas em um dos seis cenários, o ponto dois no mês de julho (i.e., *P2J*), o óleo chegou à costa. As condições de vento e corrente neste mês são mais fortes e, assim, favoráveis ao transporte da pluma em direção ao arquipélago. Adicionalmente, as correntes possuem direção favorável à chegada da mancha ao AFN, i.e., direção oeste. As simulações mostraram que na ocorrência de um vazamento, um grande volume de óleo (i.e., ~5,819 ton) atingiria o AFN, na região que compreende o perímetro da Ilha Rata até a Baía de Sueste, podendo causar danos consideráveis ao meio ambiente e atividades econômicas da comunidade do arquipélago, como a pesca e o turismo.

As forças advectivas dominam os processos de intemperismo, o que significa que a mancha de óleo atinge o AFN em uma janela de tempo de 20 horas. Portanto, na ausência de um plano de contingência eficiente, há possibilidade de ocorrer emprego de métodos de limpeza prejudiciais (i.e., dispersantes ou queima *in situ*), que são muito letais para a vida marinha. Neste contexto, a simulação reforça a necessidade de medidas preventivas diante de possíveis derramamentos de óleo (e.g., restrição de tráfego na região suscetível). No intuito de propor uma medida preventiva, foi sugerido restringir o tráfego de embarcações na região a

leste do AFN (Figura 16). Foi sugerida, também, a criação de um plano de emergencial que consiste no uso de boias de contenção para impedir o óleo de chegar à costa do AFN. Apesar de este trabalho sugerir onde essas boias deveriam ser posicionadas, este plano necessitaria de uma avaliação de viabilidade e de custo, o que foge do escopo deste trabalho.

Os consequentes danos ambientais não foram quantificados neste trabalho, apenas discutidos qualitativamente. No entanto, os resultados de volume e concentração resultante do vazamento que podem chegar ao arquipélago servem como informação crucial a respeito da urgência de prevenção deste tipo de acidente e para uma avaliação mais aprofundada das consequências, que irão complementar uma AQRE para poder quantificar os riscos de tais acidentes. Com os resultados da AQRE, será possível fornecer informações melhor fundamentadas no contexto de riscos ao meio ambiente, na eventualidade de um derramamento, e auxiliar na tomada de decisões referentes ao desenvolvimento de estratégias de prevenção, baseadas no *framework* de risco, e mitigação mais viáveis na região do AFN, tanto técnica quanto financeiramente.

Este trabalho possui as vantagens de trazer informações referentes às consequências de um vazamento de óleo na região do AFN, que é uma região suscetível à influência de tais eventos. Além disso, o modelo utiliza do formalismo Lagrangiano para descrever o movimento de uma pluma de óleo no oceano e incorpora componentes determinísticos e probabilísticos na modelagem. Ainda é válido notar que o modelo desenvolvido é um código aberto disponibilizado de forma gratuita, o que possibilita a adaptação e replicação para quaisquer propósitos. Em contrapartida, o modelo possui limitações no contexto das simulações, sendo estas: a consideração de apenas um tipo de navio de onde originam os vazamentos; e apenas dois meses do ano. Ainda é válido considerar que o modelo não inclui a modelagem tridimensional dos processos físico-químicos.

Apesar do grande número de navios de bandeiras internacionais que trafegam próximo ao arquipélago, os casos simulados neste trabalho consideraram apenas o petroleiro de bandeira brasileira mais comum que navega na região da AFN (i.e., Suezmax), assumindo o volume derramado de apenas um tanque deste navio (i.e., 9100 tons). Esta se configura como uma das limitações do trabalho, já que desconsidera outros volumes de vazamentos e tipos de óleo. Dessa forma, como proposta para trabalhos futuros, tem-se: realizar novas simulações considerando petroleiros estrangeiros, com características diferentes (e.g., volume dos tanques, tipo de óleo), que navegam nas proximidades do AFN. Adicionalmente, as simulações foram realizadas considerando apenas os meses de março e julho, o que configura outra limitação do trabalho. Uma proposta análoga seria simular os vazamentos em: a) outros

meses; b) considerando os períodos das estações do ano; ou ainda c) considerando todos os meses do ano. Dessa forma, seria possível observar o comportamento da pluma submetida a outras condições meteoceanográficas (i.e., ventos, correntes, TSM). Ambas propostas forneceriam informações mais concretas a respeito da etapa de avaliação de consequências para uma AQRE no AFN.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIANEH, O.S. et al. Modelling of evaporation and dissolution of multicomponent oil droplet in shallow water. **Adv. Comput. Methods exp. Heat transf.** v. 12, p. 231, 2012.
- AL-RABEH, A. H.; LARDNER, R. W.; GUNAY, N. Gulfspill Version 2.0: a software package for oil spills in the Arabian Gulf. **Environmental Modelling & Software**, v. 15, n. 4, p. 425–442, 2000.
- AMARAL, F. M. D. et al. Checklist and morphometry of benthic cnidarians from the Fernando de Noronha archipelago, Pernambuco, Brazil. **Cah. Biol. Mar.**, v. 50, n. 3, p. 227–290, 2009.
- AMBJORN, C. **Seatrack Web, forecasts of oil spills, a new version**. IEEE US/EU Baltic International Symposium. **Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers**, 2006 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7266187>>
- 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.
- AMIR-HEIDARI, P.; RAIE, M. Probabilistic risk assessment of oil spill from offshore oil wells in Persian Gulf. **Marine Pollution Bulletin**, v. 136, p. 291–299, 2018.
- ANNIKA, P. et al. The Poseidon Operational Tool for the Prediction of Floating Pollutant Transport. **Marine Pollution Bulletin**, v. 43, n. 7–12, p. 270–278, jul. 2001.
- ANP. **Boletim Mensal da Produção de Petróleo e Gás Natural**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/publicacoes/boletins-anp/2395-boletim_mensalda-producao-de-petroleo-e-gas-natural>.
- ASSUNÇÃO, R. V. et al. Spatial-Temporal Variability of the Thermohaline Properties in the Coastal Region of Fernando de Noronha Archipelago, Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 75, p. 512–516, 2016.
- BERRISFORD, P. et al. **The ERA-Interim archive Version 2.0**. Shinfield Park. Disponível em: <<http://www.ecmwf.int/en/elibrary/8174-era-interim-archive-version-20>>.
- BERRY, A.; DABROWSKI, T.; LYONS, K. The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea. **Marine Pollution Bulletin**, v. 64, n. 11, p. 2489–2501, 2012.
- BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 104, n. C4, p. 7649–7666, 1999.
- BRASIL. **Atlas de Cartas Piloto: Oceano Atlântico - De Trinidad ao Rio da Prata**. 2ª edição ed. Rio de Janeiro: DHN, 1993.
- BRASIL. **Lei Nº9.985, de 18 de Julho de 2000**, 2000.
- CARRACEDO, P. et al. Improvement of pollutant drift forecast system applied to the Prestige oil spills in Galicia Coast (NW of Spain): Development of an operational system. **Marine**

Pollution Bulletin, v. 53, n. 5–7, p. 350–360, 2006.

CHEN, J. et al. Oil spills from global tankers: Status review and future governance. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 20–32, 2019.

CINTRA, M. M. et al. Physical processes that drive the seasonal evolution of the Southwestern Tropical Atlantic Warm Pool. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 72, p. 1–11, 2015.

CMEMS. **Global Ocean 1/12° Physics Analysis and Forecast updated Daily**. Disponível em: https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024/INFORMATION>. Acesso em: 25 ago. 2021.

DANIEL, P. et al. Improvement of Drift Calculation in Mothy Operational Oil Spill Prediction System. **International Oil Spill Conference Proceedings**, v. 2003 (1), n. 1, p. 1067–1072, 2003.

DE DOMINICIS, M. et al. MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting – Part 1: Theory. **Geoscientific Model Development**, v. 6, n. 6, p. 1851–1869, 2013a.

DE DOMINICIS, M. et al. MEDSLIK-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting – Part 2: Numerical simulations and validations. **Geoscientific Model Development**, v. 6, n. 6, p. 1871–1888, 2013b.

DE DOMINICIS, M. et al. A relocatable ocean model in support of environmental emergencies. **Ocean Dyn.** v. 64, p. 667–688, 2014.

DE DOMINICIS, M. et al. A multi-model assessment of the impact of currents, waves and wind in modelling surface drifters and oil spill. **Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.** v. 133, p. 21–38, 2016.

DIRETORIA DE PORTOS E COSTAS – DPC-a. **NORMAS DA AUTORIDADE MARÍTIMA PARA TRÁFEGO E PERMANÊNCIA DE EMBARCAÇÕES EM ÁGUAS JURISDICIONAIS BRASILEIRAS**. NORMAM 08/DPC, 2013. Aprovada pela Portaria 306/DPC, de 30 de outubro de 2017.

DIRETORIA DE PORTOS E COSTAS – DPC-a. **Normas da Autoridade Marítima para Inquéritos Administrativos sobre Acidentes e Fatos da Navegação (IAFN) e para Investigação de Segurança dos Acidentes e Incidentes Marítimos (ISAIM)**. NORMAM 09/DPC, 2003. Aprovada pela Portaria 107/DPC, de 16 dez. 2003.

DUARTE, H. O. et al. Quantitative Ecological Risk Assessment of Industrial Accidents: The Case of Oil Ship Transportation in the Coastal Tropical Area of Northeastern Brazil. **Human and Ecological Risk Assessment**, v. 19, n. 6, p. 1457–1476, 2013.

DUARTE, H. O. et al. A novel quantitative ecological and microbial risk assessment methodology: theory and practice. **Human and Ecological Risk Assessment**, p. 1–24, 2019.

DUARTE, H. O.; DROGUETT, E. L. Quantitative Ecological Risk Assessment of accidental oil spills on ship routes nearby a marine national park in Brazil. **Human and Ecological Risk**

Assessment: An International Journal, p. 0, 2015.

ECMWF. **ERA Interim, Daily.** Disponível em: <<https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>>. Acesso em: 25 ago. 2021.

ERICSON, A. C. **Hazard Analysis Techniques for System Safety**. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2005.

FERREIRA, B. P.; MAIDA, M. **Monitoramento dos Recifes de Coral do Brasil: Situação Atual e Perspectivas**. Brasília: MMA, v. 1, 2006.

FOX, R. W. et al. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Minas Gerais: LTC, 2014.

GARLA, R. C. **Ecologia e conservação dos tubarões do Arquipélago de Fernando de Noronha, com ênfase no tubarão-cabeça-de-cesto *Carcharhinus perezi* (Poey, 1876) (*Carcharhiniformes, Carcharhinidae*)**. Rio Claro: Programa de Pós-Graduação de Ciências Biológicas da UNESP - Tese de doutorado em Zoologia, 2004.

GEBCO. **Gridded Bathymetry Data.** Disponível em: <https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/>. Acesso em: 25 ago. 2021.

GILLESPIE, R. G. Oceanic Islands: Models of Diversity. **Enciclopedia of Biodiversity**, p. 1–13, 2001.

GONG, Y. et al. A review of oil, dispersed oil and sediment interactions in the aquatic environment: Influence on the fate, transport and remediation of oil spills. **Mar. Pollut. Bull.** v. 79, p. 16–33, 2014.

GOVE, J. M. et al. Near-island biological hotspots in barren ocean basins. **Nature Communications**, v. 7, n. 1, p. 10581, 2016.

GUO, W. Development of a statistical oil spill model for risk assessment. **Environmental Pollution**, v. 230, p. 945–953, 2017.

HACKETT, B.; BREIVIK, Ø.; WETTRE, C. Forecasting the Drift of Objects and Substances in the Ocean. In: **Ocean Weather Forecasting**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, p. 507–523, 2006.

HOUNSOU-GBO, G. A. et al. Tropical Atlantic Contributions to Strong Rainfall Variability Along the Northeast Brazilian Coast. **Advances in Meteorology**, v. 2015, p. 1–13, 2015.

IBAMA. **Plano de Manejo da APA Fernando de Noronha - Rocas - São Pedro e São Paulo: Resumo Executivo.** Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/imgs-unidadescoservacao/ResumoExecutivo_f.pdf>.

ICMBIO. **PARNAMAR - Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha**, 2013. Disponível em: <<http://www.parnanoronha.com.br/paginas/91-o-parque.aspx>>

ICMBIO. **Operação Emergencial ao Aporte Atípico de Fragmentos de Óleo e Lixo**

Marinho nas Localidades do Mar de Fora de Fernando de Noronha.

IMO. **Formal Safety Assessment FSA-Crude Oil Tankers**. London: International Maritime Organization, 2008.

IMO. **IMO helping to mitigate the impacts of MV Wakashio oil spill in Mauritius**. 2020. 1 fotografia. 1023x682 pixels. Disponível em: <https://www.imo.org/fr/MediaCentre/PressBriefings/pages/24-MV-Wakashio-oil-spill-response-Mauritius.aspx>. Acesso em: 09 de dezembro de 2022.

IMO. **International Maritime Organization**. 1992, *MARPOL 73/78: articles, protocols, annexes, unified interpretations of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto*. IMO, London.

ITOPF. **Oil Spill Tanker Statistics 2022**. London, UK.

IUCN. **Brazilian Atlantic Islands: Fernando de Noronha and Atol das Rocas Reserves - 2020 Conservation Outlook Assessment** **World Heritage Outlook**. Disponível em: <<https://worldheritageoutlook.iucn.org/>>.

IVAR DO SUL, J. A.; SPENGLER, Â.; COSTA, M. F. Here, there and everywhere. Small plastic fragments and pellets on beaches of Fernando de Noronha (Equatorial Western Atlantic). **Marine Pollution Bulletin**, v. 58, n. 8, p. 1236–1238, 2009.

JABEER, Jumana. The Environmental Impact of MV Wakashio oil spill on Mauritius. **The Diplomatic Affairs**. Acesso em 06 de janeiro de 2023. Disponível em: <<https://www.thediplomaticaffairs.com/2020/08/31/the-environmental-impact-of-mv-wakashio-oil-spill-on-mauritius/>>

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.

KUEFFER, C.; KINNEY, K. What is the importance of islands to environmental conservation? **Environmental Conservation**, v. 44, n. 4, p. 311–322, 2017.

KUKKAR, D., RANI, A., KUMAR, V., YOUNIS, S. A., ZHANG, M., LEE, S. KIM, K. Recent advances in carbon nanotube sponge–based sorption technologies for mitigation of marine oil spills. **Journal Of Colloid and Interface Science**. v. 570, p. 411-422, 2020.

LARDNER, R. et al. **An operational oil spill model for the Levantine Basin (Eastern Mediterranean Sea)**. International Symposium on Marine Pollution. **Anais...European Communities**, 2006

LEE, K. et al. **The Behaviour and Environmental Impacts of Crude Oil Released into Aqueous Environments**. Ottawa ed. [s.l.] The Royal Society of Canada, 2015.

LEHR, W. et al. Revisions of the ADIOS oil spill model. **Environmental Modelling & Software**, v. 17, n. 2, p. 189–197, 2002.

LEWIS, M.; PRYOR, R. Toxicities of oils, dispersants and dispersed oils to algae and aquatic plants: Review and database value to resource sustainability. **Environmental Pollution**, v.

180, p. 345–367, 2013.

LI, P.; CAI, Q.; LIN, W.; CHEN, B.; ZHANG, B. Offshore oil spill response practices and emerging challenges. **Marine Pollution Bulletin**, 110(1), p. 6–27, 2016.

LIRA, S. M. A.; AMARAL, F. M. D.; FARRAPEIRA, C. M. R. Population growth by the white sea-urchin *Tripneustes ventricosus* (Lamarck, 1816) (Echinodermata) at the Fernando de Noronha Archipelago Brazil. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 4, p. 1–2, 2009.

LIUBARTSEVA, S. et al. Decision support system for emergency management of oil spill accidents in the Mediterranean Sea. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v. 16, p. 2009–2020, 2016.

LIUBARTSEVA, S. et al. Model-based reconstruction of the Ulysse-Virginia oil spill, October–November 2018. **Mar. Pollut. Bull.**, v. 154, 2020.

LUMPKIN, R.; GARZOLI, S. L. Near-surface circulation in the Tropical Atlantic Ocean. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 52, n. 3, p. 495–518, 2005.

LUMPKIN, R.; JOHNSON, G. C. Global ocean surface velocities from drifters: Mean, variance, El Niño–Southern Oscillation response, and seasonal cycle. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 118, n. 6, p. 2992–3006, 2013.

MAIDA, M.; FERREIRA, B. P. Preliminary evaluation of Suest Bay reef, Fernando de Noronha, with emphasis on the scleractinian corals. **Boletim Técnico Científico do CEPENE**, v. 3, n. 1, p. 37–47, 1995.

MARINETRAFFIC. **MarineTraffic: Global Ship Tracking Intelligence | AIS Marine Traffic**. Disponível em: <<http://www.marinetraffic.com>>.

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.

MEDEIROS, R. C. **O Arquipélago de Fernando de Noronha e a presença militar naval: uma condicionante Estratégia (I)**Sagres, , 2009. Disponível em: <http://www.sagres.org.br/artigos/marinha_afn.pdf>

MOLINARI, R. L. Observations of eastward currents in the tropical South Atlantic Ocean: 1978–1980. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, n. C12, p. 9707, 1982.

NITTIS, K. et al. Operational monitoring and forecasting for marine environmental applications in the Aegean Sea. **Environmental Modelling & Software**, v. 21, n. 2, p. 243–257, 2006.

NOAA. **Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Geography, GSHHG**. Disponível em: <<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/data/gshhg/latest/>>. Acesso em: 25 ago. 2021.

NRC. **Oil in the Sea III: Inputs, Fates and Effects**. Washing, DC.

QUEIROZ, S. et al. Simulation of Oil Spills Near a Tropical Island in the Equatorial Southwest Atlantic. **Tropical Oceanography**, v. 47, n. 1, p. 17–37, 2019.

REED, M.; AAMO, O. M.; DALING, P. S. Quantitative analysis of alternate oil spill response strategies using OSCAR. **Spill Science & Technology Bulletin**, v. 2, n. 1, p. 67–74, mar. 1995.

REED, M.; GUNDLACH, E.; KANA, T. A coastal zone oil spill model: Development and sensitivity studies. **Oil and Chemical Pollution**, v. 5, n. 6, p. 411–449, 1989.

RÖHRS, J. et al. The effect of vertical mixing on the horizontal drift of oil spills. **Ocean Sci.** v. 14, p. 1581–1601, 2018.

RUTHERFORD, R. et al. CranSLIK v2. 0: Improving the stochastic prediction of oil spill transport and fate using approximation methods. **Geosci. Model Dev.**, v. 8, p. 3365–3377, 2015.

SEBASTIÃO, P.; GUEDES SOARES, C. Modeling the Fate of Oil Spills at Sea. **Spill Science & Technology Bulletin**, v. 2, n. 2/3, p. 121–131, 1995.

SEPP NEVES AA, Pinardi N, Navarra A and Trotta F (2020) A General Methodology for Beached Oil Spill Hazard Mapping. February. **Front. Mar. Sci.** 7:65. 2020. doi: 10.3389/fmars.2020.00065

SERAFINI, T. Z.; FRANÇA, G. Ilhas oceânicas brasileiras: biodiversidade conhecida e sua relação com o histórico de uso e ocupação humana. **Revista de Gestão Costeira Integrada / Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 10, n. 3, p. 281–301, 2010.

SERAPIÃO, Fábio. Peritos da PF calculam em R\$ 525 milhões os danos por vazamento de óleo de 2019. **Folha de S. Paulo**, São Paulo, 3 de junho de 2022. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/ambiente/2022/06/peritos-da-pf-calculam-em-r-525-milhoes-os-danos-por-vazamento-de-oleo-de-2019.shtml>>. Acesso em: 09 de dezembro de 2022.

SHAFIR, A.; VAN-RIJN, J.; RINKEVICH, B. Short and long term toxicity of crude oil and oil dispersants to two representative coral species. **Environ. Sci. Technol.**, v. 41, p. 5571–5574, 2007.

SILVA, J. M. **The Dolphins of Noronha**. São Paulo: Bambu, 2010.

SILVA, M. et al. Circulation and heat budget in a regional climatological simulation of the Southwestern Tropical Atlantic. **Tropical Oceanography**, v. 37, n. 1–2, 2009.

SIQUEIRA, P.G.S.C. et al. Quantitative ecological risk assessment of oil spills near an island in the Atlantic. In: Carlos Guedes Soares; Tiago A. Santos. (Org.). **Developments in Maritime Technology and Engineering**. 1ed.London: CRC Press, v. 1, p. 1-9, 2021.

SIQUEIRA, P.G.S.C. et al. Numerical simulations of potential oil spills near Fernando de Noronha archipelago. In: Carlos Guedes Soares; Tiago A. Santos. (Org.). **Trends in Maritime Technology and Engineering**. 1ed.London: CRC Press, v. 2, p. 1-10, 2022.

SIQUEIRA, P.G.S.C. et al. **STOCHASTIC MODEL FOR QUANTITATIVE ECOLOGICAL RISK ASSESSMENT OF OIL SPILLS NEAR FERNANDO DE NORONHA ARCHIPELAGO**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) – Universidade Federal de Pernambuco. Pernambuco, p. 15, 2022.

SPAULDING, M. L. et al. Application of three-dimensional oil spill model (WOSM/OILMAP) to Hindcast the Braer spill. **Spill Science & Technology Bulletin**, v. 1, n. 1, p. 23–35, 1994.

SPAULDING, M. L. State of the art review and future directions in oil spill modeling. **Marine Pollution Bulletin**, v. 115, n. 1–2, p. 7–19, 2017.

STRAMMA, L.; SCHOTT, F. The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 46, n. 1–2, p. 279–303, 1999.

TAMAR. **Life in the deep blue**. 1. ed. São Paulo: Bambu, 2006.

TCHAMABI, C. C. et al. A study of the Brazilian Fernando de Noronha island and Rocas atoll wakes in the tropical Atlantic. **Ocean Modelling**, v. 111, p. 9–18, 2017.

TRB; NRC. **Responding to Oil Spills in the U.S. Arctic Marine Environment**. Washington, D.C.: National Academies Press, 2014.

UNG, S.-T. Evaluation of human error contribution to oil tanker collision using fault tree analysis and modified fuzzy Bayesian Network based CREAM. **Ocean Engineering**, v. 179, p. 159–172, 2019.

WHITTAKER, R. J.; FERNÁNDEZ-PALACIOS, J. M. **Island Biogeography: Ecology, Evolution and Conservation**. 2nd. ed. Great Britain: Oxford University Press, 2007.

YENDER, R. A. et al. **Oil Spills in Coral Reef: Planning and Response Considerations**. Florida: National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA, 2010.

ZACHARIAS, D. et al. A. Mysterious oil spill on the Brazilian coast – Part 2: A probabilistic approach to fill gaps of uncertainties. **Marine Pollution Bulletin**. v. 173, 2021.

ZELENKE, B. et al. **General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) technical documentation** (N. O. S. United States Office of Response and Restoration, Ed.): NOAA technical memorandum NOS-OR&R 40.U.S. Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Office of Response & Restoration, 2012. Disponível em: <<https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/2620>>

ZHANG, Y.; BAPTISTA, A. M. SELFIE: A semi-implicit Eulerian–Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. **Ocean Modelling**, v. 21, n. 3–4, p. 71–96, 2008.

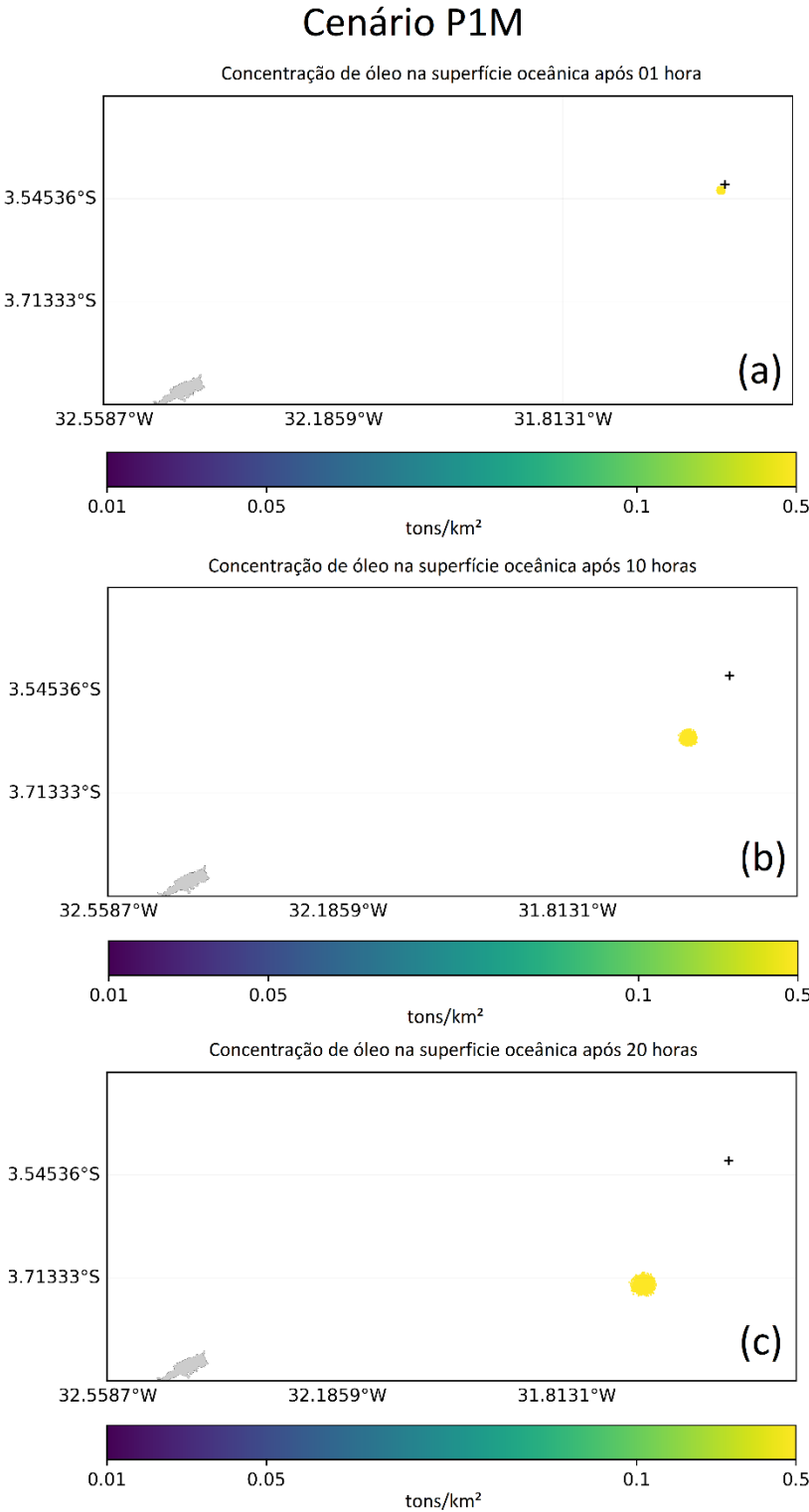
ZHONG, Z., & YOU, F. Oil spill response planning with consideration of physicochemical evolution of the oil slick: A multiobjective optimization approach. **Computers & Chemical Engineering**, 35(8), p. 1614–1630, 2011

ZODIATIS, G. et al. **The Mediterranean oil spill and trajectory prediction model in assisting the EU responde agency**. Congreso Nacional de Salvamento en la Mar. **Anais...**Cadiz: 2008.

APÊNDICES

APÊNDICE A.

Concentração de óleo na água (ton/km²) no cenário P1M (a) inicial; após (b) 07 horas, (c) 14 horas e (d) 21 horas. As cruzes representam o ponto de liberação do derramamento de óleo.

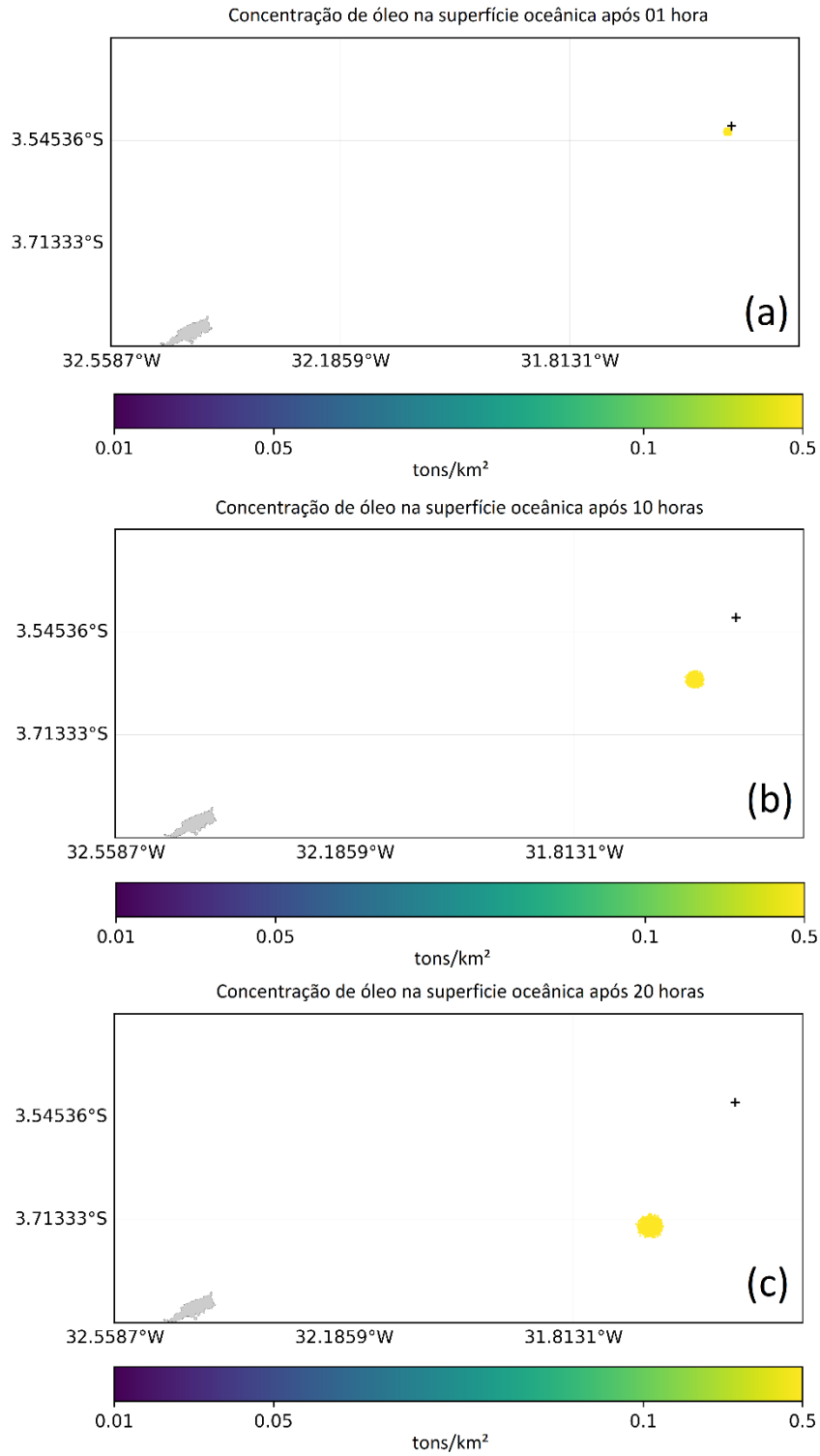


Fonte: O Autor, 2022.

APÊNDICE B.

Concentração de óleo na água (ton/km²) no cenário P1M (a) inicial; após (b) 07 horas, (c) 14 horas e (d) 21 horas. As cruzes representam o ponto de liberação do derramamento de óleo.

Cenário P1M

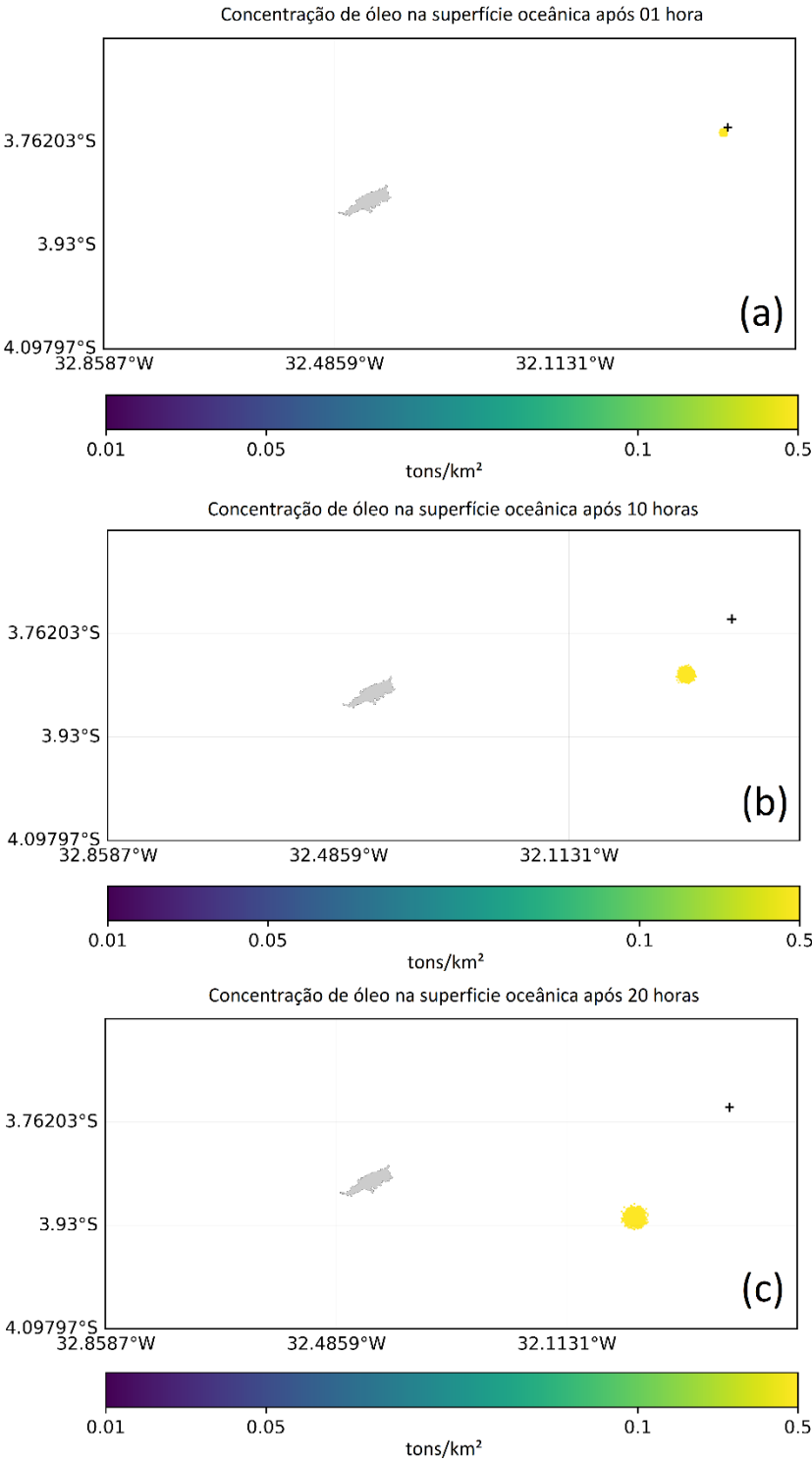


Fonte: O Autor, 2022.

APÊNDICE C.

Concentração de óleo na água (ton/km²) no cenário P2M (a) inicial; após (b) 07 horas, (c) 14 horas e (d) 21 horas. As cruzes representam o ponto de liberação do derramamento de óleo.

Cenário P2M

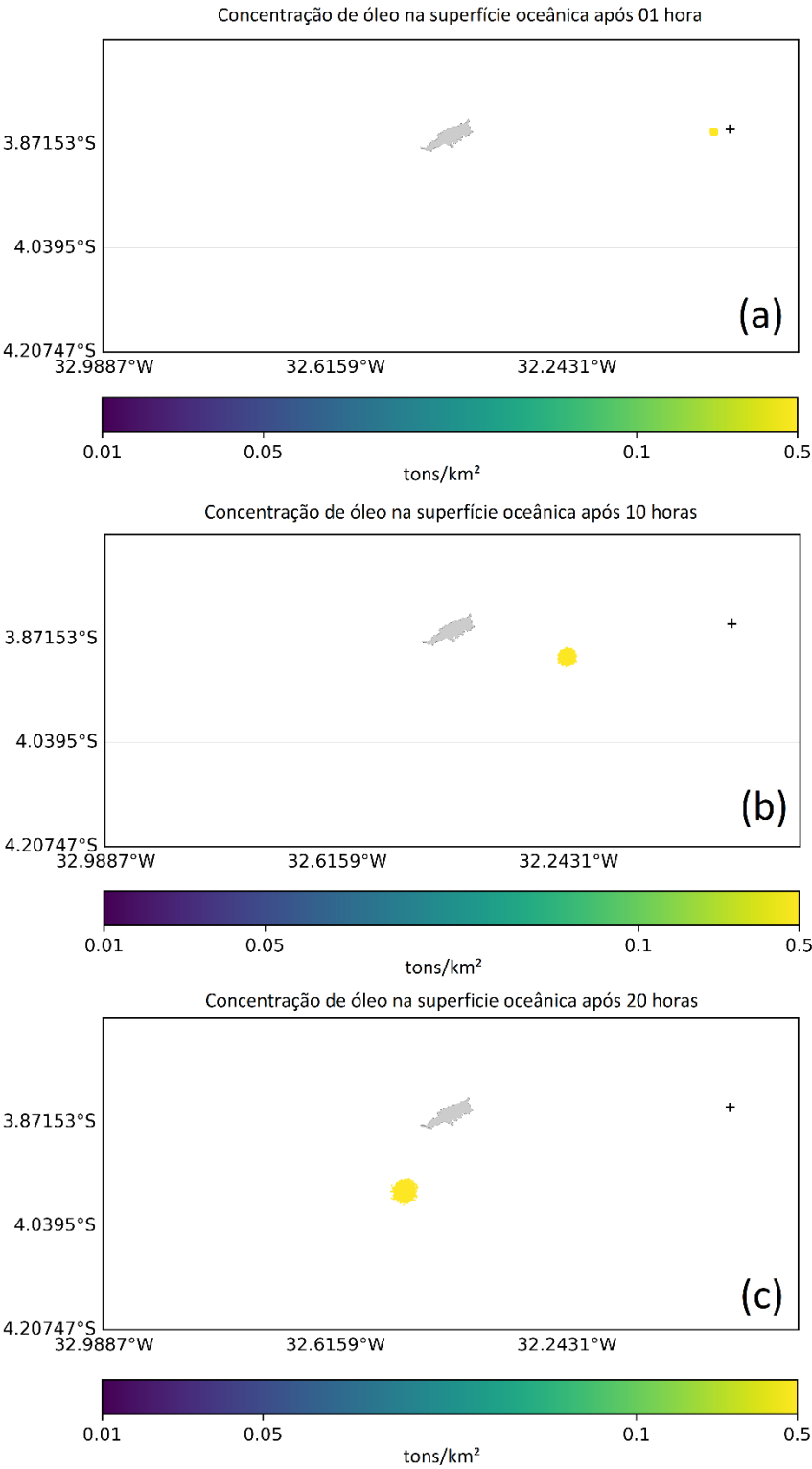


Fonte: O Autor, 2022.

APÊNDICE D.

Concentração de óleo na água (ton/km²) no cenário P3J (a) inicial; após (b) 07 horas, (c) 14 horas e (d) 21 horas. As cruzes representam o ponto de liberação do derramamento de óleo.

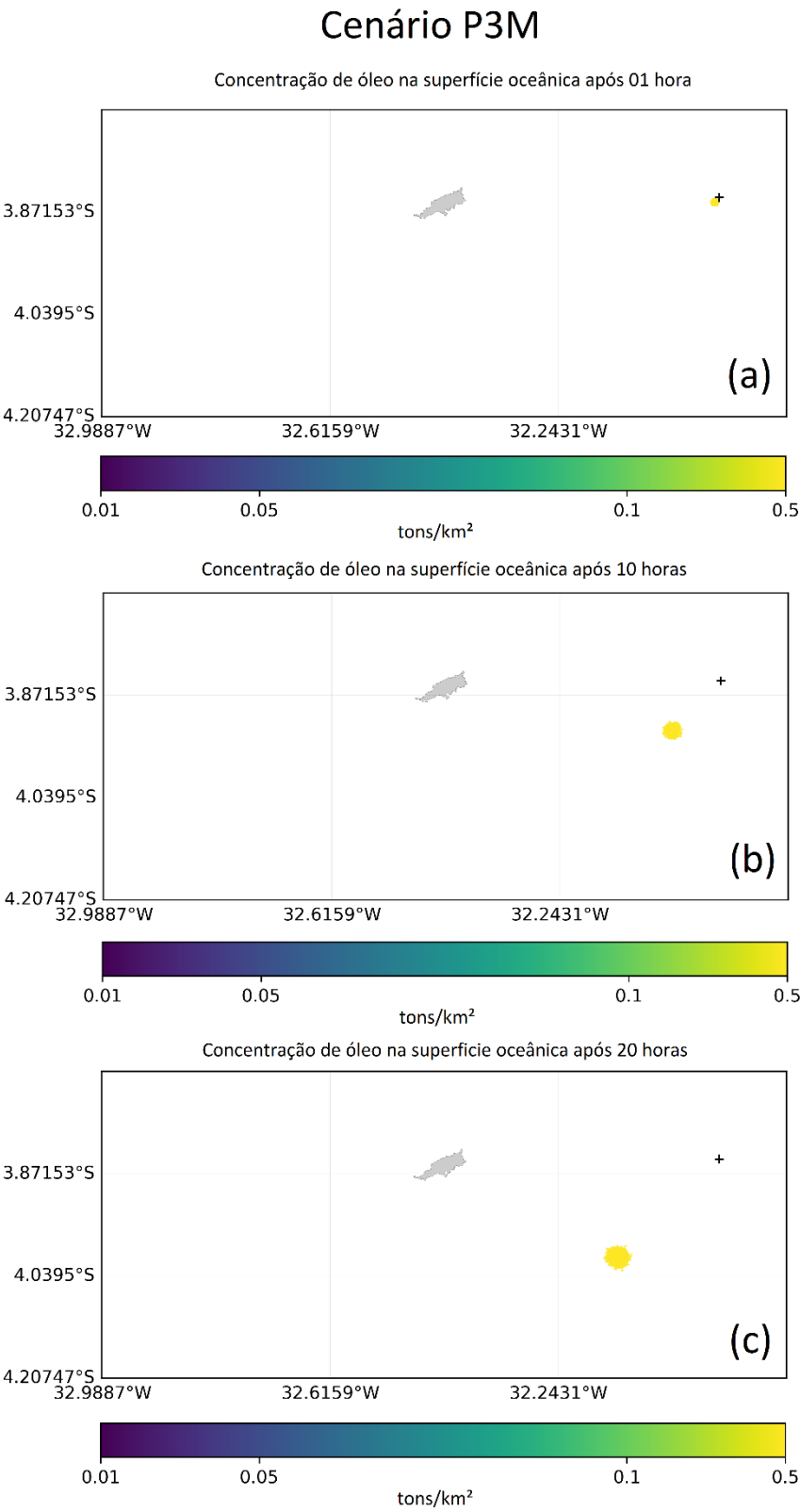
Cenário P3J



Fonte: O Autor, 2022.

APÊNDICE E.

Concentração de óleo na água (ton/km²) no cenário P3M (a) 01 hora; (b) 10 horas; e (c) 20 horas. As cruzes representam o ponto de liberação do derramamento de óleo.



Fonte: O Autor, 2022.