

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO – UFPE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA – CTG
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRÁFIA – DOCEAN
CURSO DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRÁFIA**

SYUMARA QUEIROZ DE PAIVA E SILVA

**MODELAGEM MATEMÁTICA SEMI-LAGRANGEANA DE
DISPERSÃO DE ÓLEO EM REGIÕES TROPICAIS**

**RECIFE
2017**

SYUMARA QUEIROZ DE PAIVA E SILVA

**MODELAGEM MATEMÁTICA SEMI-LAGRANGEANA DE
DISPERSÃO DE ÓLEO EM REGIÕES TROPICAIS**

Trabalho de Monografia apresentado ao Departamento de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco como pré-requisito para a conclusão do curso de Bacharelado em Oceanografia.
Área de concentração: Oceanografia Física

Orientador: Prof. Dr. Marcus André Silva

RECIFE
2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicea Alves, CRB-4 / 1260

S586m Silva, Syumara Queiroz De Paiva.
Modelagem matemática semi-lagrangeana de dispersão de óleo em regiões tropicais / Syumara Queiroz De Paiva. - 2017.
95 folhas, Il., Tabs. Abr., Sigl. e Nom.

Orientador: Prof. Dr. Marcus André Silva.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Curso de Graduação em Oceanografia, 2017.
Inclui Referências e Anexos.

1. Oceanografia. 2. Atlântico Tropical. 3. Modelagem Matemática. 4. Derrame de óleo. 5. ROMS. 6. MEDSLIK-II. I. Silva, Marcus André. (Orientador). II. Título.

UFPE

551.46 CDD (22. ed.) BCTG/2017-13

SYUMARA QUEIROZ DE PAIVA E SILVA

**MODELAGEM MATEMÁTICA SEMI-LAGRANGEANA DE DISPERSÃO DE ÓLEO
EM REGIÕES TROPICAIS**

Trabalho de monografia apresentado ao departamento de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco como pré-requisito para a conclusão do curso de Bacharelado em Oceanografia.

Data de aprovação: 15/12/2017
Nota: 10,00

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcus André Silva (orientador)
Departamento de Oceanografia – UFPE

Ma. Ramilla Vieira de Assunção (titular)
Departamento de Oceanografia – UFPE

Prof. Dr. Moacyr Cunha de Araújo Filho (titular)
Departamento de Oceanografia – UFPE

Dra. Fabiana Soares Leite (suplente)
Departamento de Oceanografia – UFPE

Dedico este trabalho a minha mãe, que mesmo diante de todas as dificuldades que passou, nunca duvidou de quem era e de quem eu posso ser.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha mãe, por não ter me deserdado mesmo nos meus momentos de maior estresse e por encher minha garrafa d'água assim que ela ficava vazia.

Ao meu orientador (às vezes desorientador) pelo apoio, puxões de orelha, suporte e preciosos ensinamentos.

A Cris pelas inúmeras revisões e *feedbacks*, pelo ombro amigo sempre presente e pelos momentos de risadas gratuitos. A João pelos momentos de descanso (entre filmes, séries e lanches) e pelo apoio durante a turbulência dos últimos meses. A André por TUDO.

Aos Perdidos por terem me encontrado, me acolhido e por terem me aceitado como sou.

E finalmente, agradeço à Agência Nacional do Petróleo (ANP), Programa de Formação de Recursos Humanos para a E&P na margem Equatorial (PRH-47), FINEP e ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTI) pelo apoio financeiro.

*“A oceanografia fez de mim uma poliqueta:
me considero, agora, bem resistente aos
estresses impostos pela vida”*

(Sara Cavalcanti)

RESUMO

Derrames de petróleo, quando atingem as zonas costeiras implicam em prejuízos para a economia, turismo, comunidades pesqueiras e outras comunidades que dependem dos recursos obtidos no mar, além de consequências alarmantes para a biodiversidade e o equilíbrio ecossistêmico. A previsão do comportamento da pluma de um derrame representa um grande desafio devido ao fator de incerteza diante das condições físicas, químicas e dinâmicas na superfície e na coluna d'água, além da variabilidade associada à composição do óleo e aos processos de intemperismo associados. Diante do crescimento substancial nas últimas décadas da indústria de Exploração e Produção de petróleo no Brasil, principalmente tendo em vista os blocos exploratórios da nova fronteira denominada Margem Equatorial, novas ferramentas de modelagem computacional de derrames de óleo são necessárias. A Margem Equatorial Brasileira é uma região de importância econômica, elevada produtividade e riqueza em termos de biodiversidade. Neste trabalho foi realizado o acoplamento do modelo oceânico *Regional Ocean Modelling System* – ROMS com o modelo lagrangeano MEDSLIK-II, através da integração dos resultados da modelagem da circulação oceânica do ROMS, compatíveis com a dinâmica de baixa latitude, com o modelo de óleo que considera o transporte e os processos de intemperismo que atuam no derrame. Foram simulados seis cenários, com três pontos iniciais de derrame de óleo do lado leste do Arquipélago de Fernando de Noronha (T1, T2 e T3) e dois períodos considerados como de maior risco (março e julho). Para todos os cenários avaliados, apenas no cenário do ponto T3 (março) o óleo atingiu a costa da ilha; este ponto foi considerado como região crítica do derrame. Entre todos os períodos avaliados foram identificadas as tendências de taxas de evaporação iniciais maiores, intensificação dos processos de dispersão e de emulsificação para o período de julho, com relação a março. Este fato pode estar associado ao aumento da intensidade dos ventos e à maior intensidade do ramo central da Corrente Sul Equatorial para o mesmo período. Os resultados indicaram ainda que o processo de advecção, combinado com o tipo de óleo nos cenários avaliados, tem uma maior importância para o comportamento do derrame do que os processos de intemperismo. Outros cenários devem ser posteriormente avaliados para delimitar essa faixa crítica de risco ao longo do ano. A região da simulação onde o óleo atingiu a costa (cenário T3) faz parte da área do Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha. Os cenários avaliados ressaltam a necessidade de uma reavaliação dos riscos para a região e da consequente delimitação de uma região crítica proibitiva para o tráfego de grandes navios.

Palavras-chave: Atlântico Tropical. Modelagem Matemática. Derrame de óleo.

ROMS. MEDSLIK-II.

ABSTRACT

When oil spills hit coastal areas, it increases damages to the economy, tourism, fishing communities and other communities that rely on resources from sea, as well as alarming consequences for biodiversity and ecosystem balance. The prediction of the behavior of the boom of a spill represents a great challenge due to the uncertainty factor in the physical, chemical and dynamic conditions at the surface and the water column, besides the variability associated to the oil composition and associated weathering processes. Considering the substantial growth in the last decades of petroleum exploration and production industry in Brazil, especially considering the exploratory blocks of the New Frontier of the denominated Equatorial Margin, new computational modelling tools of oil spills are necessary. The Brazilian Equatorial Margin is a region of economic importance, high productivity and richness in terms of biodiversity. In this work the coupling of the Regional Ocean Modeling System - ROMS model with the lagrangean model MEDSLIK-II was carried out, by integrating the results of the ROMS oceanic circulation modelling, capable to simulate low latitude dynamics, with the oil model that considers the transport and the processes of weathering acting in the spill. Six scenarios were simulated, with three initial points on the east side of the Fernando de Noronha archipelago (T1, T2 and T3) of oil spill and two periods were considered to be the highest risk (March and July). For all the scenarios evaluated, only in the scenario of point T3 (March) the oil reached the coast of the island, this point was considered as critical region for spill scenarios. Among all the evaluated scenarios, the trends of higher initial evaporation rates, intensification of the dispersion and emulsification processes for the July period, in relation to March, were identified. This fact may be associated with the increase of the winds velocities and the higher intensity of the South Equatorial current central branch for the same period. The advection process associated with oil type at the scenarios evaluated had a greater importance if compared with weathering processes to the behavior of the spill. Other scenarios should be further evaluated to delimit this critical range of risk along the year. The simulation region where the oil reached the coast (scenario T3) is part of the Fernando de Noronha National Marine Park area. A review of the risks to this region and the consequent delimitation of a critical region prohibitive for the traffic of large ships is appropriate in view of the scenarios evaluated.

Keywords: Tropical Atlantic. Mathematical Modelling. Oil spill. ROMS. MEDSLIK-II.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Localização do Arquipélago de Fernando de Noronha	25
Figura 2.2 - Perfil vertical da secção longitudinal da temperatura da área de estudo entre os meses de (a) março-maio e (b) agosto-novembro	26
Figura 2.3 - Perfil vertical da secção longitudinal da salinidade da área de estudo entre os meses de (a) março-maio e (b) agosto-novembro	28
Figura 3.1 - Percentual do tipo de óleo da produção mensal do Brasil em 2017	36
Figura 3.2 - Processos de intemperismo de um derrame de óleo	37
Figura 3.3 - Tempo de início e importância relativa dos processos de intemperismo ao longo do tempo após um derrame na água	38
Figura 4.1 - Níveis computacionais verticais para a plataforma costeira da Califórnia na coordenadas-S	51
Figura 5.1 - Domínio computacional do ROMS (Latitude entre 3°S e 5.5°S; longitude entre 35°W e 31°W)	66
Figura 5.2 - Pontos de vazamento inicial do derrame (T1, T2 e T3)	67
Figura 6.1 - Direção da corrente superficial e intensidade da temperatura da superfície do mar (TSM) em °C para (a) março e (b) julho	69
Figura 6.2 - Direção e intensidade da velocidade do vento ($m.s^{-1}$) para (a) março e (b) julho	70
Figura 6.3 - Cenário T1 – março. Concentração do óleo ($ton.km^{-2}$) após (a) 6 horas, (b) 12 horas, (c) 18 horas, (d) 24 horas, (e) 30 horas, (f) 36 horas, (g) 42 horas e (h) 48 horas	71
Figura 6.4 - Cenário T1 – julho. Concentração do óleo ($ton.km^{-2}$) após (a) 6 horas, (b) 12 horas, (c) 18 horas, (d) 24 horas, (e) 30 horas, (f) 36 horas, (g) 42 horas e (h) 48 horas	72
Figura 6.5 - Cenário T2 – março. Concentração do óleo ($ton.km^{-2}$) após (a) 6 horas, (b) 12 horas, (c) 18 horas, (d) 24 horas, (e) 30 horas, (f) 36 horas, (g) 42 horas e (h) 48 horas	73
Figura 6.6 - Cenário T2 – julho. Concentração do óleo ($ton.km^{-2}$) após (a) 6 horas, (b) 12 horas, (c) 18 horas, (d) 24 horas, (e) 30 horas, (f) 36 horas, (g) 42 horas e (h) 48 horas	74

Figura 6.7 - Cenário T3 – março. Concentração do óleo na superfície (ton.km^{-2}) após (a) 6 horas, (b) 12 horas, (c) 18 horas, (d) 24 horas, (e) 30 horas, (f) 36 horas, (g) 42 horas, (h) 48 horas e (i) concentração na costa (ton.km^{-1}) após 48 horas 75

Figura 6.8 - Cenário T3 – julho. Concentração do óleo na superfície (ton.km^{-2}) após (a) 6 horas, (b) 12 horas, (c) 18 horas, (d) 24 horas, (e) 30 horas, (f) 36 horas, (g) 42 horas e (h) 48 horas 76

Figura 7.1 – Esquema simplificado da metodologia do modelo acoplado ROMS/MEDSLIK-II 79

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Número total de espécies e de espécies endêmicas de alguns grupos taxonômicos da biodiversidade marinha de Fernando de Noronha com base na literatura (SERAFINI; FRANÇA, 2010)	29
Tabela 3.1 - Algumas características dos compostos saturados presentes no petróleo quanto ao estado e a resistência a biodegradação (segundo: DOERFFER, 2013; LEE <i>et al.</i> , 2015)	32
Tabela 3.2 - Classificação do petróleo segundo Thomas (2001)	35
Tabela 4.1 - Comparação entre três técnicas de solução de problemas em dinâmica de fluidos e transporte de calor. Traduzido de Pletcher <i>et al.</i> (2012)	46
Tabela 4.2 - Variáveis de estado do modelo de óleo MEDSLIK-II (DE DOMINICIS <i>et al.</i> , 2013a)	55
Tabela 4.3 - Constantes utilizadas no cálculo dos processos de intemperismo do modelo de óleo MEDSLIK-II (DE DOMINICIS <i>et al.</i> , 2013a)	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°API	Classificação do óleo segundo o <i>American Petroleum Institute</i>
AFN	Arquipélago de Fernando de Noronha
AIS	<i>Automatic Identification System</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo
APA/FN	Área de Proteção Ambiental de Fernando de Noronha
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
BTEX	Benzeno, tolueno, etilbenzeno e os três isômeros de Xileno
cCSE	Ramo central da Corrente Sul Equatorial
CDB	Convenção sobre Diversidade Biológica
CFL	Critério de estabilidade de Courant-Friedrichs-Lewy
CNO Rio+20	Comitê Nacional de Organização da Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável
COADS	<i>Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set</i>
DFC	Dinâmica de Fluidos Computacional
DPC	Diretoria de Portos e Costas
DWH	Derrame do <i>Deepwater Horizon</i>
E&P	Exploração e Produção de Petróleo
EDPs	Equações diferenciais parciais
ET	Erro de truncamento
EVOS	Derrame do Exxon Valdez (<i>Exxon Valdez Oil Spill</i>)
FN	Fernando de Noronha
GEBCO	<i>Global Earth Bathymetric Chart of the Oceans</i>
GPU	Unidade de Processamento Gráfico (<i>Graphics Processing Unit</i>)
HMW	Alto peso molecular (<i>High Molecular Weight</i>)
HPAs	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
ICMBio	Instituto Chico Mendes para a Conservação da
IRD	<i>French Institut de Recherche pour le Développement</i>
JONSWAP	Parametrização para ondas do <i>Joint North Sea Wave Project</i>
KPP	<i>K-profile-paramaterization</i>
LMW	Baixo peso molecular (<i>Low Molecular Weight</i>)
MARPOL	Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios

MB	Marinha do Brasil
MEDSLIK-II	Modelo de dispersão de óleo
MICOM	<i>Miami Isopycnic Model</i>
MOM	<i>Modular Ocean Model</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NORMAN	Normas da Autoridade Marítima
PARNAMAR/FN	Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha
POM	<i>Princeton Ocean Model</i>
PSSA	<i>Particularly Sensitive Sea Área</i>
QuikscAT	<i>NASA Quick Scatterometer</i>
ROMS	<i>Regional Ocean Modelling System</i>
RSC	<i>Royal Society of Canada</i>
RSUP3	Esquema advectivo <i>Rotated Split UPstream-biased 3rd order</i>
SARA	Saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos
SCOW	<i>Scatterometer Climatology of Ocean Winds</i>
SCRUM	<i>S-coordinate Rutgers University Model</i>
sCSE	Sub Corrente Sul Equatorial
SPEM	<i>Semi-spectral Primitive Equation Model</i>
TK	Camada espessa do derrame (<i>thick</i>)
TN	Camada fina do derrame (<i>thin</i>)
TSM	Temperatura da superfície do mar
UCs	Unidades de Conservação
UME	Evento incomum de mortalidade (<i>Unusual Mortality Event</i>)
WOA	<i>World Ocean Atlas</i>
WOA	<i>World Ocean Database</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE NOMENCLATURAS

f	Parâmetro de Coriolis [$rad \cdot s^{-1}$]
g	Aceleração gravitacional [$m \cdot s^{-2}$]
h	Profundidade máxima [m]
K_M, K_C	Viscosidade turbulenta e difusividade vertical [$m^2 \cdot s^{-1}$]
P	Pressão total [$kg \cdot m^{-1} s^{-2}$]
ϕ	Pressão dinâmica [$m s^{-2}$]
ρ, ρ_0	Densidade local e de referência [$kg \cdot m^{-3}$]
S	Salinidade [PSU]
t	Tempo [s]
T	Temperatura potencial [$^{\circ}C$]
u, v, w	Componentes (x, y, z) do vetor velocidade \vec{v} [$m \cdot s^{-1}$]
x, y, z	Coordenadas horizontais e vertical [m]
ζ	Elevação da superfície [m]
τ^x, τ^y	Componentes zonal e meridional do cisalhamento [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$]
c_p	Calor específico à pressão constante [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
Q_t	Radiação de ondas longas líquida [$W \cdot m^{-2}$]
h_c	Constante escolhida para função <i>stretching</i>
θ_s, θ_b	Parâmetros de controle de superfície e fundo
r	Parâmetro de inclinação das camadas sigma
ρ, ρ_w	Densidade do óleo e da água [$kg \cdot m^{-3}$]
C_S, C_D, C_C	Concentração na superfície, disperso e na costa [$kg \cdot m^{-2}$]
V_S, V_D	Volume de óleo na superfície e na coluna d'água [m^3]
V^{TK}, V^{TN}	Volume de óleo na camada espessa e fina [m^3]
A^{TK}, A^{TN}	Área da camada espessa e fina do derrame [m^3]
T^{TK}, T^{TN}	Espessura da camada espessa e fina [m]
x_k, y_k, z_k	Coordenadas horizontais e vertical da partícula [m]
v_E, v_{NE}	Volume evaporativo e não evaporativo [m^3]
$\sigma(n_k, t)$	Índice do status da partícula
F	Fator padrão de área entre a camada fina e espessa
N	Número total de partículas liberadas no derrame
ϕ_{NE}	Percentual do componente não evaporativo

c	Taxa de variação da pressão de vapor [s^{-1}]
R	Constante dos gases [$bar \cdot m^3 \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$]
V_{MOL}	Volume molar [$mol \cdot m^{-3}$]
$C_1^{(E)}$	Taxa de evaporação [$m \cdot s^{-1}$]
γ	Expoente da velocidade do vento
W_0	Escala do vento [$m \cdot s^{-1}$]
$K^{(E)}$	Fração evaporada na viscosidade do óleo
v_s	Velocidade de subida da gota pequena [$m \cdot s^{-1}$]
u_m	Espessura da nuvem de gotículas [m]
$C_1^{(D)}$	Velocidade de difusão para baixo das gotas pequenas [$m \cdot s^{-1}$]
$C_3^{(D)}$	Taxa de dispersão de todas as gotas pelas ondas [s^{-1}]
$C_4^{(D)}$	Dispersão a partir da camada espessa
η_{EM0}	Escala da viscosidade da emulsão [$m^2 \cdot s^{-1}$]
$C_5^{(D)}$	Dispersão a partir da camada fina
τ	Tensão superficial da interface (óleo/água) [$kg \cdot s^{-2}$]
τ_0	Escala da tensão superficial da interface (óleo/água) [$kg \cdot s^{-2}$]
$C_1^{(M)}$	Fração de água na viscosidade da emulsão
$C_2^{(M)}$	Taxa de aumento da fração de água [s^{-1}]
$C_3^{(M)}$	Fração máxima da água recíproca
T_0^{TK}	Escala de espessura da camada espessa [m]
$C_1^{(S)}$	Taxa de espalhamento da camada fina [s^{-1}]
$C_2^{(S)}$	Taxa de espalhamento da camada espessa [s^{-1}]
$C_3^{(S)}$	Dependência do espalhamento da camada fina [m]
ϵ	Offset da espessura [m]
c_s	Fração de gotas pequenas
S_{TK}	Fração de gotas pequenas abaixo da camada espessa
S_{TN}	Fração de gotas pequenas abaixo da camada fina
η	Viscosidade do óleo [$m^2 \cdot s^{-1}$]
η_0	Viscosidade inicial do óleo [$m^2 \cdot s^{-1}$]
η_{EM}	Viscosidade do mousse no processo de emulsificação [$m^2 \cdot s^{-1}$]
r	Número real aleatório

K_h, K_v	Difusividade turbulenta horizontal e vertical [$m \cdot s^{-1}$]
\mathbf{U}_C	Vetor do campo de velocidade Euleriano [$m \cdot s^{-1}$]
\mathbf{U}_W	Vetor de correção de correntes geradas pelo vento [$m \cdot s^{-1}$]
\mathbf{U}_S	Vetor de correntes geradas por ondas [$m \cdot s^{-1}$]
ϑ	Direção do vento
D_S	Direção de propagação da onda
ω	Frequência angular [$rad \cdot s^{-1}$]
k	Número de onda [m^{-1}]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.2	Objetivos	22
1.2.1	Objetivos específicos	22
2	O ARQUIPÉLAGO DE FERNANDO DE NORONHA	24
2.1	Localização e origem	24
2.2	Clima e hidrodinâmica	24
2.3	Características biológicas	28
3	IMPACTOS DOS DERRAMES DE PETRÓLEO	31
3.1	Os componentes do petróleo	31
3.1.1	Saturados	32
3.1.2	Aromáticos	33
3.1.3	Resinas e Asfaltenos	34
3.2	Classificações do petróleo	35
3.3	Processos do intemperismo do óleo	36
3.4	Efeitos de derrames para a biota	41
4	CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS	46
4.1	Modelos de circulação oceânica	46
4.2	Regional Ocean Modelling System – ROMS	49
4.2.1	Características gerais	49
4.2.2	Solução numérica	49
4.2.3	Sistemas de Coordenadas	50
4.2.4	Discretização Temporal	52
4.2.5	Discretização espacial	53
4.2.6	Condições de Contorno	53
4.3	O modelo de óleo MEDSLIK-II	54
4.3.1	Variáveis de estado	55
4.3.2	Condições iniciais	56
4.3.3	Taxas de variação	57
4.3.4	Processos de Intemperismo do óleo	59
4.3.5	Transporte do óleo	63
5	METODOLOGIA	65

5.1	Configuração do ROMS	65
5.2	Configuração do MEDSLIK-II	66
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
6.1	Circulação oceânica	69
6.2	Evolução das plumas derramadas	70
7	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	79
	REFERÊNCIAS	81
	ANEXO 1 – EQUAÇÕES REGENTES DO ROMS	92
	ANEXO 2 – FLUXOGRAMA DE DEPENDÊNCIA MEDSLIK-II	95

1 INTRODUÇÃO

Desde a revolução industrial os combustíveis fósseis têm sido a base da sociedade contemporânea e moderna. Nos dados sobre a matriz energética mundial para 2015, o petróleo supriu representativos 32% da demanda energética global, seguido pelo carvão (28%), o gás natural (22%), a biomassa (10%) e a energia nuclear, hidroelétrica e outras fontes correspondendo ao percentual restante (OECD/IEA, 2017). O crescimento da demanda populacional por fontes de energia, produtos e serviços leva a expansão da Exploração e Produção de petróleo (E&P) e do número de embarcações circulando pelos oceanos transportando combustíveis e outros produtos e, conseqüentemente, do risco potencial de poluição por óleo no mar.

As fontes de óleo nos ecossistemas marinhos podem ser naturais, como os *seeps*, ou antropogênicas. Estas últimas incluem fontes terrestres (costeiras, carregadas pela chuva ou transportadas pelos rios), descargas de petroleiros e outros navios durante suas rotas, eventos acidentais como derrames de óleo e ruptura de oleodutos além de deposição atmosférica (GESAMP, 1993). Do óleo presente nos oceanos, estima-se que 41% sejam efluentes advindos de navios somados aos processos de exploração e produção *offshore* (E&P), 49% sejam provenientes de fontes naturais e 10% de instalações costeiras (GESAMP, 2007).

Os efluentes *offshore* acidentais, muitas vezes considerados pelo público como os principais causadores de poluição por óleo, representam apenas 4,1% da contribuição de navios e da E&P (GESAMP, 2007). Todavia, esses acidentes ainda apresentam risco elevado devido ao elevado potencial nocivo associada à perda massiva da biodiversidade local em um curto período de tempo, além dos efeitos crônicos de longo prazo, e da dificuldade de mitigação destes efeitos em mar aberto.

Os derrames de óleo a partir de navios são geralmente atribuídos a falhas mecânicas ou estruturais, usualmente provocadas por tempestades, que podem resultar na quebra ou no afundamento do navio, com vazamentos nos compartimentos de carga e/ou de combustível. Outras situações menos comuns são as colisões e os derrames propositais, por motivos de segurança, em ataques terroristas ou ações militares (e.g. Guerra do Golfo). Navios que afundam com os tanques cheios, representam um risco potencial pois estes tendem a se romper com o tempo e continuar liberando óleo (e.g. *Prestige*). As etapas de Perfuração e Produção em

plataformas de petróleo também apresentam elevados riscos de incidentes de vazamento, como por exemplo os *blowouts* (GESAMP, 2009).

Os *blowouts* caracterizam a ascensão do petróleo do assoalho oceânico até a superfície sem controle da elevada pressão, o que pode causar explosões e desestabilização da estrutura da plataforma de exploração. Como esse tipo de incidente está sujeito aos procedimentos de segurança adotados e ao erro humano é mais difícil estimar um padrão de repetição (JERNELÖV, 2010). O último grande incidente desse tipo envolveu a plataforma *Deepwater Horizon* no Golfo de México em 2010, considerado o maior acidente de derrame de óleo *offshore* da história.

Acidentes dentro de qualquer âmbito da indústria do petróleo, além de apresentar risco aos envolvidos, quando atingem as zonas costeiras implicam em prejuízos para a economia, turismo, comunidades pesqueiras e outras comunidades que dependem dos recursos obtidos no mar. Do ponto de vista ambiental, derrames de petróleo podem ter consequências alarmantes para a biodiversidade e para o equilíbrio ecossistêmico.

Sejam em grandes profundidades ou em superfície, os derrames representam um grande desafio devido à incerteza envolvendo o comportamento da pluma diante das condições físicas, químicas e dinâmicas da superfície e da coluna d'água, além da variabilidade associada à composição e às fases do fluido do vazamento. Fatores como o tipo de óleo derramado e os processos físico-químicos aos quais a pluma do derrame é exposta – em conjunto denominados como intemperismo do óleo – são fundamentais na determinação do destino do derrame (LEE *et al.*, 2015).

A gestão sustentável das zonas costeiras deve se beneficiar da implementação de sistemas com observações oceânicas precisas, em tempo real, que possibilite a previsão das trajetórias do petróleo no período posterior ao vazamento inicial, uma vez que o impacto geral de um derrame depende principalmente das condições ambientais do local do derrame (correntes, clima, ondas, etc.) e do tempo perdido até as operações mitigatórias (LEE *et al.*, 2015; MARTA-ALMEIDA *et al.*, 2013; NRC, 2003).

Na gestão de energias, o uso de tecnologias para evitar e conter danos maiores ao meio ambiente e às comunidades envolvidas e/ou próximas a atividades industriais, faz parte política nacional para o desenvolvimento sustentável estabelecida pelo Comitê Nacional de Organização da Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável – CNO Rio+20 (UN, 2012).

Dentro dessas tecnologias, a modelagem é uma ferramenta que utiliza parâmetros matemáticos e modelos computacionais para gerar cenários de acidentes em várias áreas da indústria. O resultado desses cenários permite uma maior eficácia na prevenção e contenção de acidentes, testando equipamentos ou provendo uma base para o desenvolvimento de tecnologias de contenção, em caso de acidente real, com uma boa margem de precisão e exatidão, para que sejam executadas as medidas mitigadoras previstas por lei (CONAMA, 2010). Tais técnicas podem ser utilizadas também na elaboração de estudos de impacto ambiental.

Diante do crescimento substancial nas últimas décadas da E&P no Brasil, principalmente tendo em vista os blocos exploratórios da denominada Margem Equatorial – que inclui as bacias sedimentares da Foz do Amazonas, Pará-Maranhão, Barreirinhas, Ceará e Potiguar (MOHRIAK, 2003) – novas ferramentas de modelagem computacional de derrames de óleo são necessárias.

A Margem Equatorial Brasileira trata-se de uma região que engloba as zonas costeiras, de plataforma e oceânicas adjacentes à região Norte e Nordeste do Brasil, se estendendo desde o Rio Grande do Norte ao Amapá. É uma região de importância econômica para a pesca artesanal e de expressiva riqueza em termos de biodiversidade. Nela podem ser encontrados ecossistemas únicos como os insulares, os corais da Amazônia recentemente descobertos, a própria foz do rio Amazonas e os extensos manguezais associados (LARA, 2003; MOURA *et al.*, 2016). Adicionalmente, o aporte de nutrientes da pluma do Amazonas, propicia uma elevada produtividade primária nas costas do Pará e do Amapá, o que se contrapõe a oligotrofia característica da borda oeste (REVIZEE, 2006).

Com relação aos processos dinâmicos, as características intrínsecas da região equatorial também devem ser levadas em conta, principalmente por apresentarem hidrodinâmica completamente distinta da região sul do país, cuja a E&P encontra-se consolidada. O baixo efeito de Coriolis verificado nas regiões de baixas latitudes faz com que a geostrofia seja pouco influente sobre a circulação. Como consequência, os modelos oceânicos que alimentam os modelos de dispersão de óleo para estas regiões devem ser ajustados para representarem bem esses processos.

Neste trabalho foi realizado o acoplamento do modelo oceânico *Regional Ocean Modelling System* – ROMS (SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2003, 2005) com o modelo lagrangeano MEDSLIK-II (DE DOMINICIS *et al.*, 2013a, 2013b), ambos de código aberto. Esse acoplamento permite integração dos resultados da modelagem

da circulação oceânica do ROMS, compatíveis com a dinâmica de baixa latitude, com um modelo de óleo lagrangeano que considera o transporte e os processos de intemperismo que atuam no derrame.

Para aplicação do modelo foi selecionada a região do Arquipélago de Fernando de Noronha (AFN), uma vez que embarcações com diversos tipos de produtos, incluindo petroleiros, circundam a região. Além disso, o arquipélago constitui um representante das áreas de proteção marinha, com importância econômica para turismo, biodiversidade e comunidades pesqueiras. A região sofre influência direta do sistema de correntes da região equatorial e para incorporar a sazonalidade desse sistema e sua influência no transporte de óleo foram analisados seis cenários, considerando a combinação de três pontos iniciais para a ocorrência do derrame (óleo característico de 26°API) e duas épocas do ano.

O próximo capítulo apresenta a área de estudo e suas características oceanográficas (Cap. 2). Os tipos de óleo e alguns efeitos para a biota e o meio físico, assim como os processos que alteram o destino final do derrame são apresentados no Cap. 3. Uma revisão das principais características de modelos oceânicos, a caracterização do ROMS, e do modelo de óleo MEDSLIK-II constam no Cap. 4. A metodologia utilizada e os cenários definidos para a simulação da circulação e do derrame são apresentadas no Cap. 5. O Cap. 6 traz os resultados e a discussão, com análise dos cenários. A conclusão dos estudos, perspectivas e recomendações são sintetizadas no Cap. 7.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia que possibilita a avaliação da dispersão de óleo decorrente de acidentes/vazamentos superficiais em regiões da Margem Equatorial Brasileira, e de como as condições ambientais características da região podem influenciar na dispersão do derrame.

1.2.1 Objetivos específicos

- Identificar uma região de importância ecológica, econômica e social localizada na Margem Equatorial Brasileira para a simulação de derrames de óleo nos seus entornos;
- Identificar as condições oceanográficas distintas a partir de dados de observação e resultados de simulação (modelo oceânico ROMS - *Regional*

Ocean Modelling System) que representem a vulnerabilidade diante da ocorrência de derrames;

- Acoplar o ROMS com o modelo de dispersão de óleo MEDSLIK-II, de forma que as saídas do primeiro sirvam como forçantes para o segundo;
- Avaliar os cenários obtidos a partir dos resultados da simulação com o sistema ROMS/MEDSLIK-II e as possíveis implicações/impactos para a região identificada.

2 O ARQUIPÉLAGO DE FERNANDO DE NORONHA

2.1 Localização e origem

O Arquipélago de Fernando de Noronha (AFN) está localizado entre as latitudes 03°45'S e 03°57'S e longitudes 32°19'W e 32°41'W (Fig. 2.1), no Atlântico Sul Equatorial ocidental e é constituído por 21 ilhas e ilhotas, com uma área total de 26 km², dos quais 17,017 km² pertencem à ilha principal (IBAMA, 2005). Duas Unidades de Conservação (UCs) Federais do Instituto Chico Mendes para a Conservação da Biodiversidade (ICMBio) estão localizadas no arquipélago: o Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha – PARNAMAR/FN (BRASIL, 1988) que é uma UC de proteção integral, e a Área de Proteção Ambiental de Fernando de Noronha – APA/FN (BRASIL, 1986) de uso sustentável.

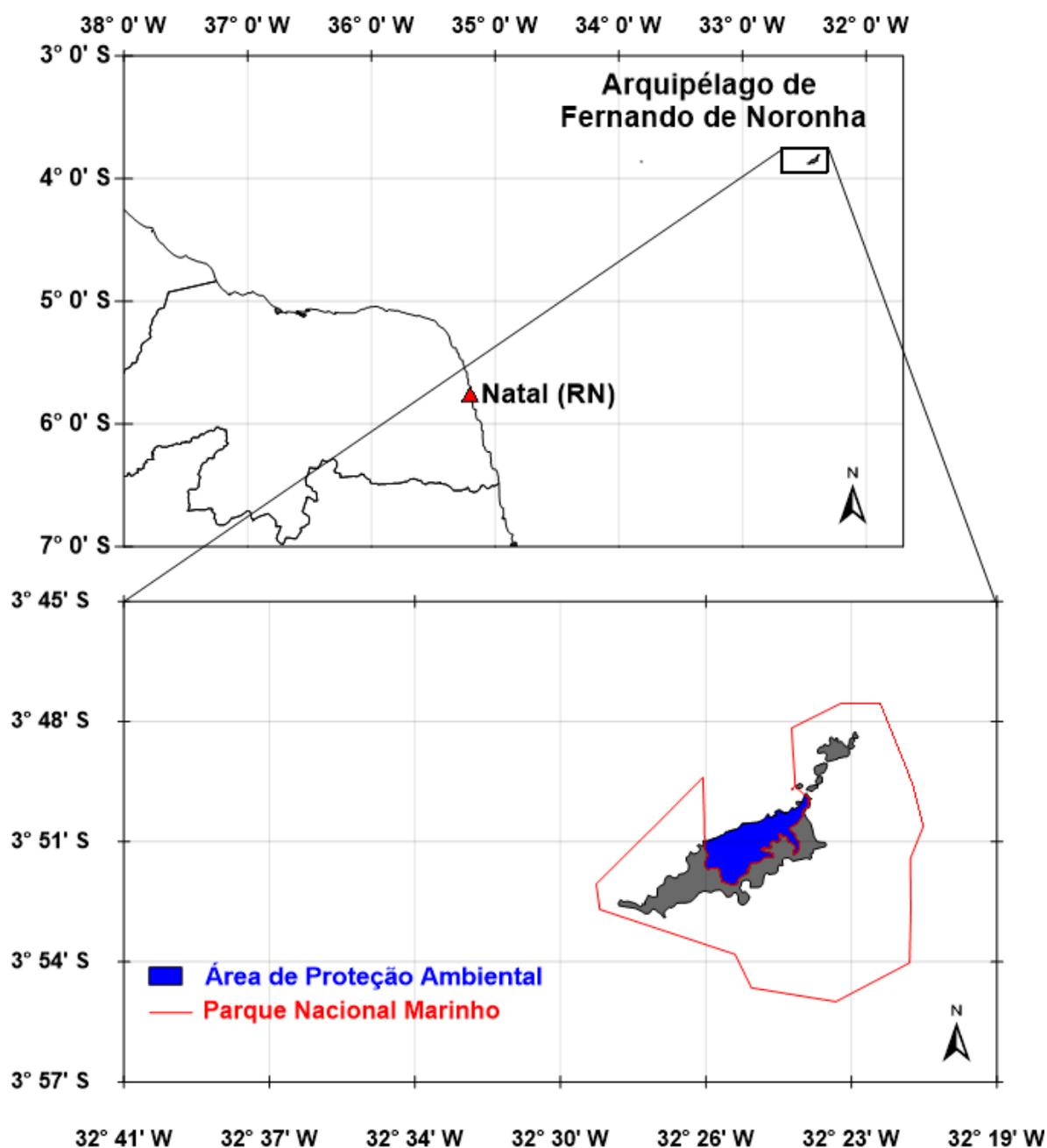
O Arquipélago, cujo vulcanismo teve fim por volta de 1,8 Ma, faz parte da porção extrema oriental de uma cadeia de montes vulcânicos submarinos que compõem a Cadeia de Fernando de Noronha, de orientação leste-oeste, na zona de fratura de Fernando de Noronha (ALMEIDA, 2002; CORDANI, 1970; GORINI; CARVALHO, 1984). A cadeia, por sua vez tem sua origem atrelada às zonas de fraturas reativadas no Eoceno médio e ao extravasamento do magma de *hotspots*, devido ao espalhamento da crosta oceânica e a consequente deriva da placa litosférica para oeste (DE ALMEIDA, 2006).

2.2 Clima e hidrodinâmica

A configuração e o posicionamento geográfico do Arquipélago de Fernando de Noronha fazem com que o lado oeste (mar de dentro) sofra menos influência das correntes e dos ventos do que o lado leste (mar de fora) (ASSUNÇÃO *et al.*, 2016).

O clima na região é tropical quente com temperatura média de 25°C e estações bem definidas de seca entre agosto e fevereiro e chuvosa entre março e julho, com a média anual de precipitação de 1400 mm (SERAFINI; FRANÇA, 2010). Os ventos predominantes são os alísios de sudeste, com maiores intensidades entre julho e agosto. A insolação média máxima ocorre no mês de novembro e mínima em abril (IBAMA, 2005).

Figura 2.1 - Localização do Arquipélago de Fernando de Noronha.

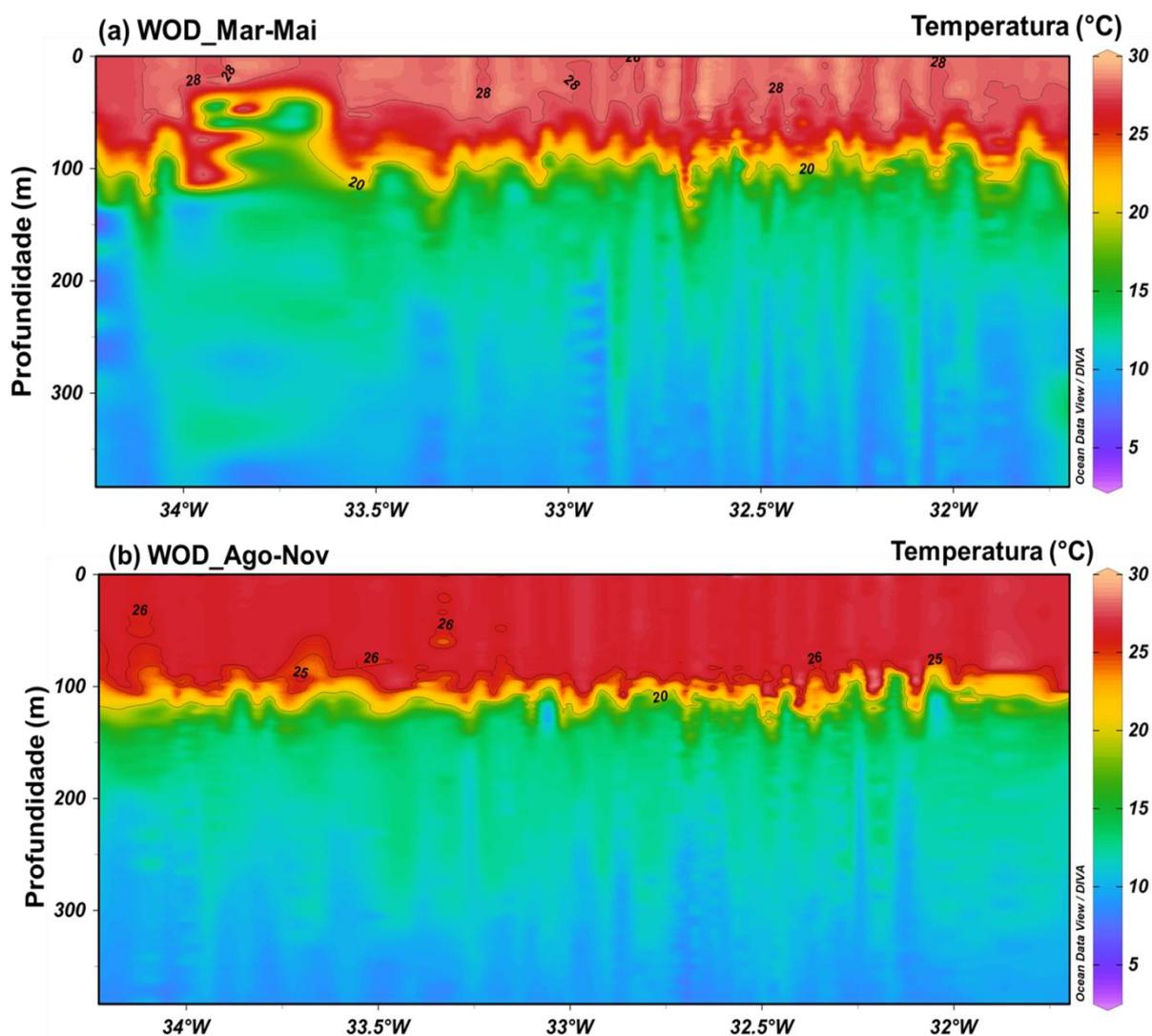


Localização do Arquipélago de Fernando de Noronha. A área delimitada em vermelho corresponde ao Parque Nacional Marinho (PARNAMAR) e em azul a Área de Proteção Ambiental (APA) de Fernando de Noronha. Fonte: Autoria própria

A sazonalidade da região está associada à Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que se encontra na sua posição mais ao Sul entre fevereiro e março (verão austral) (LUMPKIN; GARZOLI, 2005). A estação mais quente ocorre entre março e junho, quando a TSM alcança valores superiores a 28°C (Fig. 2.2.a). A estação mais fria ocorre entre agosto e novembro, com valores de TSM de aproximadamente

26,5°C (Fig. 2.2.b) (HOUNSOU-GBO *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2009a; TCHAMABI *et al.*, 2017).

Figura 2.2 - Perfil vertical da secção longitudinal da temperatura da área de estudo entre os meses de (a) março-maio e (b) agosto-novembro.



Perfil vertical até 400m da temperatura entre as longitudes de 34,25°W e 31,75°W entre os anos de 1914 e 2016 para os meses de (a) março a maio e (b) agosto a novembro. Dados da *World Ocean Database* (WOD) com a secção centrada em 3,9°S com largura de 100 km. Fonte: Autoria própria.

Superficialmente a região sofre influência do ramo central da Corrente Sul Equatorial (cCSE) que flui para oeste até encontrar com a Corrente Norte do Brasil próxima a costa. A cCSE apresenta variabilidade sazonal com diminuição da intensidade no início de abril e novembro e intensificação no meio de julho (LUMPKIN;

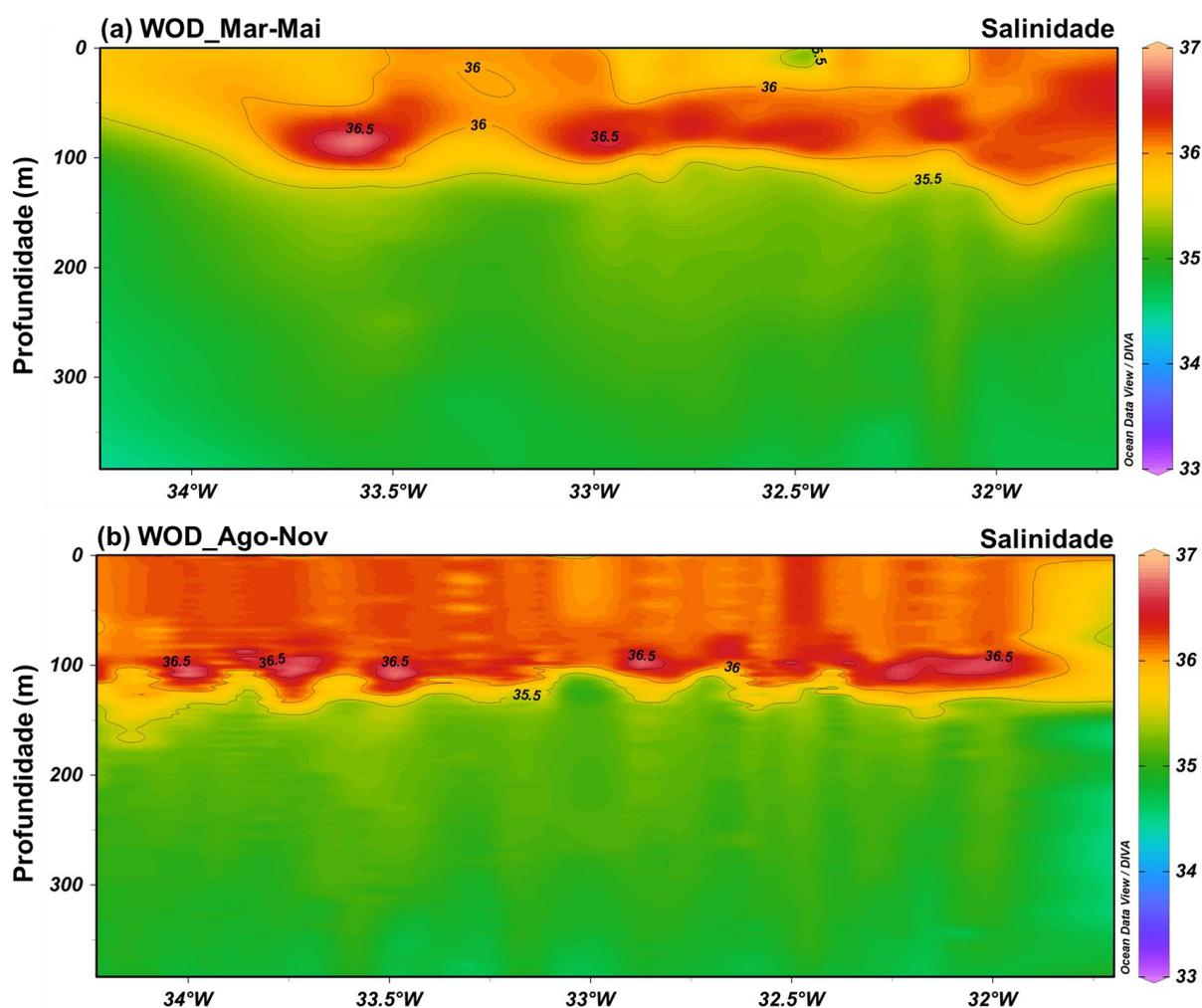
GARZOLI, 2005; MOLINARI, 1982). Tchamabi *et al.* (2017) distinguem para esta corrente dois períodos, o de forte incidência da corrente entre março e julho e o de fraca incidência entre agosto e fevereiro. Sub-superficialmente, em profundidades que variam entre 200-500 m, o arquipélago sofre influência da sub-Corrente Sul Equatorial (sCSE) no sentido oeste-leste que apresenta maiores intensidades na porção ocidental do Atlântico entre julho e setembro (REVERDIN *et al.*, 1991; SCHOTT; FISCHER; STRAMMA, 1998; STRAMMA; SCHOTT, 1999; SCHOTT *et al.*, 2003).

A média dos valores superficiais da salinidade tende a ser maior do que 36,5 entre agosto e novembro (Fig. 2.3.a), e menor do que 36 entre março e maio (Fig. 2.3.b). A profundidade média de máxima salinidade entre agosto e novembro corresponde à profundidade média da termoclina (~100m) que diminui entre março e maio.

Apesar de estarem localizados em águas oligotróficas, os bancos e ilhas oceânicas tropicais são geralmente caracterizadas por uma atividade pesqueira expressiva (HAZIN, 1993). Diversos autores notaram variações nas características hidrográficas e da produção em regiões adjacentes à Fernando de Noronha, Atol das Rocas e de São Pedro - São Paulo, e atribuíram esse fato às interações entre o fluxo e a topografia, que aumenta a disponibilidade de nutrientes em águas sub-superficiais, elevando conseqüentemente a produção primária (BECKER, 2001; CHAVES, 2006; EKAU; KNOPPERS, 1999; LEITAO *et al.*, 1999; SOUZA *et al.*, 2013; SOUZA, 2004; TAKAHASHI; BARTH, 1968; TRAVASSOS *et al.*, 1999).

Uma revisão mais recente dos processos dinâmicos com modelagem numérica por Tchamabi *et al.* (2017) demonstrou que dois mecanismos podem atuar nos entornos da Ilha de Fernando de Noronha. A presença da ilha bloqueia a atuação dos ventos nas águas do lado oeste, o que diminui a pista do vento e resulta em uma TSM 0,5°C mais quente do que no lado leste e; a interação da cSEC contra a cadeia de FN desvia o fluxo para norte, devido à conservação da vorticidade, formando vórtices anti-horários que reduzem a profundidade máxima da camada de mistura. Esta redução se mostra mais expressiva entre março e julho, que corresponde ao período de maior intensidade da cSEC, permitindo assim que os nutrientes alcancem mais facilmente a zona eufótica, aumentando por sua vez a produção primária e beneficiando os demais níveis tróficos.

Figura 2.3 - Perfil vertical da secção longitudinal da salinidade da área de estudo entre os meses de (a) março-maio e (b) agosto-novembro.



Perfil vertical até 400m da salinidade entre as longitudes de 34,25°W e 31,75°W entre os anos de 1914 e 2016 para os meses de (a) março a maio e (b) agosto a novembro. Dados da *World Ocean Database* (WOD) com a secção centrada em 3,9°S com largura de 100 km. Fonte: Autoria própria.

2.3 Características biológicas

De acordo com o Artigo 2 da Convenção sobre Diversidade Biológica (CDB) a biodiversidade ou “diversidade biológica” é definida como “a variabilidade de organismos vivos de todas as origens, compreendendo, dentre outros, os ecossistemas terrestres, marinhos e outros ecossistemas aquáticos e os complexos ecológicos de que fazem parte; compreendendo ainda a diversidade dentro de espécies, entre espécies e de ecossistemas” (MMA, 2000).

Geralmente, as ilhas oceânicas são pobres em número de espécies devido à pequena dimensão desses locais, mas são ricas em espécies endêmicas, e consideradas *hotspots* de biodiversidade. Adicionalmente, o isolamento geográfico faz com que essas ilhas sejam repositórios de espécies ameaçadas e áreas de prioridade nas decisões de conservação (GILLESPIE, 2007; GOVE *et al.*, 2016; WHITTAKER; FERNÁNDEZ-PALACIOS, 2007).

Dentre as ilhas oceânicas brasileiras, a Ilha de Fernando de Noronha é a mais bem estudada e com o maior número de espécies, tanto marinhas quanto terrestres, fato atribuído à sua extensão e à heterogeneidade de seus habitats. A Tabela 2.1 apresenta o número de espécies e de espécies endêmicas do AFN de acordo com a literatura até 2010 (SERAFINI; FRANÇA, 2010).

Tabela 2.1 - Número total de espécies e de espécies endêmicas de alguns grupos taxonômicos da biodiversidade marinha de Fernando de Noronha com base na literatura (SERAFINI; FRANÇA, 2010).

Grupo Taxonômico	Nº de espécies	Nº de espécies endêmicas	Referências
Peixes Recifais	196	10	(SAMPAIO, 2006)
Moluscos	218	3	(GOMES <i>et al.</i> , 2006)
Corais	11	0	(FLOETER <i>et al.</i> , 2001)
Cnidária	33	0	(AMARAL; HUDSON; SILVEIRA, 2002; MIGOTTO; MARQUES; MORANDINI, 2002)
Eponjas	77	1	(MORAES <i>et al.</i> , 2006)
Algas	171	-	(VILLAÇA <i>et al.</i> , 2006)

Das espécies conhecidas, seis espécies da Lista de Espécies Ameaçadas da APA/FN (*Bodianus insularis*, *Anthias salmopunctatus*, *Chelonia mydas*, *Phyllogorgia dilatata*, *Prognathodes obliquus*, *Stegastes sanctipauli*) e dezesseis do PARNAMAR/FN (*Caretta caretta*, *Chelonia mydas*, *Elaenia ridleyana*, *Echinaster (Othilia) guyanensis*, *Eucidaris tribuloides*, *Eretmochelys imbricata*, *Johngarthia lagostoma*, *Lepidochelys olivacea*, *Millepora alcicornis*, *Negaprion brevirostris*, *Phaethon aethereus*, *Percnon gibbesii*, *Phyllogorgia dilatata*, *Phaethon lepturus*,

Puffinus lherminieri, *Vireo gracilirostris*) encontram-se protegidas nestas Unidades de Conservação (ICMBIO, 2017).

O status de UC do AFN permite a possibilidade de recuperação da população dessas espécies ameaçadas, a proteção de espécies endêmicas e a manutenção de um ecossistema insular saudável. Entretanto, quando se trata de contaminantes lançados fora da área de proteção e transportados até a área protegida, não existe ainda nenhuma medida preventiva, como foi observado com os registros de pellets virgens advindos de fontes oceânicas (DO SUL; SPENGLER; COSTA, 2009)

Apesar do status relativamente recente de proteção, o arquipélago sofreu diversas modificações de suas características naturais da biota terrestre e marinha desde sua ocupação, e atualmente ainda sofre pressão antrópica pelo turismo, que é a base principal da economia da Ilha de Fernando de Noronha, e pela introdução de espécies exóticas (SERAFINI; FRANÇA, 2010; SILVA JR, 2003; SOTO, 2006, 2009).

O risco de exposição das ilhas oceânicas à derrames de óleo diante do número crescente de embarcações, incluindo os navios petroleiros, circulando ao redor do globo, adicionaria mais um estressor nesses ecossistemas altamente vulneráveis.

3 IMPACTOS DOS DERRAMES DE PETRÓLEO

Os impactos dos derrames de petróleo dependem intrinsecamente: (a) do tipo de óleo derramado (i.e. da sua composição química); (b) dos processos físicos, químicos e biológicos atuando na pluma desde o lançamento até o destino final; (c) do compartimento final e da resiliência do próprio ecossistema e; (d) das incertezas associadas aos componentes biológicos do sistema.

De forma a compreender como algumas dessas variáveis podem influenciar no comportamento e no impacto de um derrame, alguns conceitos fundamentais são abordados nos tópicos a seguir, desde a composição do petróleo, até alguns dos efeitos de curto e longo prazo na biota.

3.1 Os componentes do petróleo

O petróleo é definido como “todo e qualquer hidrocarboneto líquido em seu estado natural, a exemplo do óleo cru e condensado” (BRASIL, 1997), sendo comumente referido como óleo. Conhecer a composição química do petróleo é de extrema importância para entender a evolução de derrames de óleo em ambientes aquáticos, uma vez que sua composição determina as propriedades físicas, comportamento e impactos biológicos, assim como o destino final do mesmo no ambiente (LEE *et al.*, 2015).

A composição química do petróleo é uma combinação complexa de hidrocarbonetos (carbono e hidrogênio) em estado líquido nas condições ambientais de temperatura e pressão (SPEIGHT, 2014). Uma classificação bastante utilizada na petroquímica distingue os principais hidrocarbonetos do petróleo em dois grupos principais (THOMAS, 2001): os saturados e os aromáticos. Os hidrocarbonetos parcialmente saturados (olefinas) são raros ou ausentes no óleo cru (SPEIGHT, 2014).

Além dos hidrocarbonetos dominantes outros constituintes podem estar presentes em menor quantidade como compostos sulfurados, nitrogenados, oxigenados, resinas e asfaltenos, bem como os metálicos (ferro, zinco, cobre, etc.). Dentre esses compostos as resinas e os asfaltenos são os principais grupos de não-hidrocarbonetos presentes no petróleo (BRASIL, 2009; LEE *et al.*, 2015).

Algumas características dos saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos – do acrônimo SARA – serão discutidas nos tópicos seguintes. Em conjunto, essas frações

contribuem para as propriedades do petróleo como um todo, como a viscosidade, o peso específico, a susceptibilidade a biodegradação, etc.

3.1.1 Saturados

Essa classe representa tipicamente a fração dominante no petróleo e é constituída por hidrocarbonetos saturados de cadeia simples (parafinas ou n-alcanos) ou ramificada (isoalcanos ou isoparafinas); cíclicos (naftênicos, cicloparafinas ou cicloalcanos), possuindo um ou mais anéis saturados e; alifáticos com anéis fusionados, incluindo hopanos e esteranos, combinando estruturas naftênicas e parafínicas (LEE *et al.*, 2015).

A Tabela 3.1 apresenta algumas características desses compostos que influenciam no seu destino final no meio aquático, com relação ao seu estado físico e a tendência à biodegradação.

Tabela 3.1 - Algumas características dos compostos saturados presentes no petróleo quanto ao estado e a resistência a biodegradação (segundo: DOERFFER, 2013; LEE *et al.*, 2015)

	Nº de carbonos	Estado	Biodegradação
Parafinas	$< C_5$	Gasoso	Fuga para atmosfera
	C_5-C_{15}	Líquido	Biodegradáveis
	$> C_{15}$	Sólido (Cera cristalina)	Biodegradáveis
Isoparafinas	Variável	Muito variável	Resistentes à biodegradação
Cicloparafinas	$\leq C_6$	Gás	Resistentes à biodegradação
Alifáticos fusionados	Variável	Varia com a composição	Variam de biodegradáveis até resistentes à biodegradação

Os n-alcanos possuem a fórmula geral C_nH_{2n+2} e são os principais componentes do petróleo, podendo apresentar-se na forma gasosa ($n < 5$), líquida ($5 \leq n \leq 15$), ou no estado sólido ($n > 15$) na forma de ceras cristalinas (DOERFFER, 2013). De forma geral, os n-alcanos são biodegradáveis ou, no caso dos gases, tendem a escapar para a atmosfera, apresentando baixa persistência na coluna d'água. Todavia, a precipitação das ceras em temperaturas menores pode influenciar nos processos de interface na superfície do derrame, diminuindo a taxa de degradação das fases líquidas (FINGAS, 2014).

Os isoalcanos fazem parte de um grupo extremamente complexo e com propriedades variadas. Geralmente estão presentes como isômeros e séries homólogas e devido à sua resistência a biodegradação quando comparados aos n-alcanos de mesmo peso molecular. Alguns são utilizados como indicadores como, por exemplo, a razão pristano/fitano para avaliar a fonte de poluição de óleo como natural ou antropogênica (STEINHAUER; BOEHM, 1992).

Os cicloalcanos são caracterizados pela presença de anéis simples de cadeia fechada de átomos de carbono com a fórmula geral C_nH_{2n} . Apresentam-se geralmente na forma gasosa devido à elevada volatilidade e assim como os isoalcanos, são mais resistentes a biodegradação do que os alcanos análogos (LEE *et al.*, 2015).

Hidrocarbonetos alifáticos com anéis fusionados incluem os hopanoides e esteróis derivados de compostos presentes nas plantas. Eles apresentam uma gama de compostos de diferentes pesos moleculares e propriedades que variam de extremamente resistentes à biodegradação, como aqueles utilizados como bioindicadores (PETERS; WALTERS; MOLDOWAN, 2007), até os menos estáveis, como o colestano e possivelmente o hopano, que sofrem biodegradação lentamente (WANG; STOUT, 2010).

3.1.2 Aromáticos

Os hidrocarbonetos aromáticos são compostos cíclicos planares insaturados que incluem os monoaromáticos, com apenas um anel benzênico, e os policíclicos (HPAs – hidrocarbonetos policíclicos aromáticos) com dois ou mais anéis benzênicos fusionados, com ou sem ramificações de cadeias alifáticas (aromáticos alquilados).

Dentre os aromáticos, os monoaromáticos são os mais solúveis e os mais móveis na fase aquática por dissolução com capacidade de biodegradação intermediária. Os seus compostos alquilados mais comuns no petróleo são a série BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e os três isômeros de Xileno). Os três primeiros se encontram na lista de Poluentes Prioritários da Agência Ambiental Americana (US-EPA, 2014) e sua volatilidade faz com que apresentem risco para a respiração e de incêndio (DOERFFER, 2013; LEE *et al.*, 2015).

Os HPAs possuem uma ampla variação em termos de solubilidade em água e dos graus de tendência à biodegradação, atribuída a presença de séries homólogas com diferentes propriedades físico químicas (VARANASI, 1989; WANG *et al.*, 1998).

A quantidade de anéis benzênicos na estrutura dessas moléculas é diretamente proporcional à afinidade lipofílica e inversamente proporcional à solubilidade, o que faz com que os HPAs de alto peso molecular (≥ 4 anéis fundidos) tenham maior afinidade com o material particulado, que providencia uma maior resistência aos processos de biodegradação (BOULOU BASSI; SALIOT, 1993). Essa tendência à interação com o material particulado varia com a salinidade e com a temperatura (VARANASI, 1989).

Os HPAs de baixo peso molecular (2-3 anéis benzênicos fusionados), mais solúveis em água, correspondem a uma fração maior do petróleo e seus derivados, enquanto os de alto peso molecular estão presentes em menor quantidade, geralmente associados a processos de queima de combustíveis fósseis (WANG *et al.*, 1999).

3.1.3 Resinas e Asfaltenos

São representadas por moléculas grandes com alta relação C/H e presença de enxofre, oxigênio e nitrogênio com a estrutura básica constituída por 3 ou mais anéis, geralmente aromáticos. As resinas encontram-se solubilizadas no petróleo bruto enquanto os asfaltenos – componentes mais pesados e mais aromáticos, formados por uma mistura molecular complexa que resulta em um sólido friável e imiscível – encontram-se dispersos na forma coloidal (GROENZIN; MULLINS, 1999; THOMAS, 2001). São os mais pesados dos componentes do petróleo e apresentam uma elevada resistência à biodegradação.

Esses compostos, em oposição aos hidrocarbonetos que são classificados quanto a sua estrutura, são classificados em termos da sua solubilidade em solventes orgânicos. As resinas são solúveis em n-pentano ou n-heptano, mas são insolúveis em propano líquido enquanto os asfaltenos são insolúveis em n-alcanos, incluindo n-pentano e n-hexano, mas são solúveis em tolueno (LEE *et al.*, 2015; SPEIGHT, 2014).

A polaridade maior do que dos hidrocarbonetos, ocasionada pela presença de heteroátomos em diversas proporções nas resinas, faz com que esses compostos sejam mais solúveis e muitas vezes mais tóxicos no compartimento aquático (MELBYE *et al.*, 2009; SPEIGHT, 2014).

Devido ao alto peso molecular, complexidade, heterogeneidade e tendência a se associar com as resinas, a estrutura de moléculas individuais dos asfaltenos

permanecem não elucidadas (SPEIGHT, 2014). Recomendações sobre a necessidade de estudos acerca de suas propriedades e características toxicológicas foram feitas recentemente no relatório elaborado pela *Royal Society of Canada – RSC* (LEE *et al.*, 2015).

3.2 Classificações do petróleo

A classificação do petróleo de acordo com os seus constituintes predominantes está relacionada não só à gênese do depósito, mas também às possibilidades de produtos que podem ser obtidos após o refino. Uma das classificações utilizadas, encontra-se resumida na Tabela 3.2, e leva em consideração o teor dos componentes (parafinas, naftênicos, aromáticos, resinas e asfaltenos) presentes no óleo cru (THOMAS, 2001).

Tabela 3.2 - Classificação do petróleo segundo Thomas (2001).

Classe	Composição	Características	Exemplo
<i>Parafínica</i>	Parafinas $\geq 75\%$; resinas e asfaltenos $< 10\%$.	Óleos leves e geralmente de baixa viscosidade	Maior parte dos óleos produzidos no Nordeste do Brasil
<i>Parafino-naftênica</i>	Parafinas 50-70%; naftênicos $> 20\%$; resinas e asfaltenos 5-15%	Óleos de viscosidade e densidade moderadas	Maior parte dos óleos produzidos na Bacia de Campos
<i>Naftênica</i>	Naftênicos $> 70\%$	Originam-se da alteração bioquímica de óleos parafínicos e parafino-naftênicos	Alguns óleos da América do Sul, da Rússia e do Mar do Norte
<i>Aromática intermediária</i>	hidrocarbonetos aromáticos $> 50\%$; 10-30% de asfaltenos	Óleos pesados (densidade superior a 0,85)	Alguns óleos do Oriente Médio, África Ocidental, Venezuela e Mediterrâneo
<i>Aromático-naftênica</i>	Mais de naftênicos $> 35\%$; resinas e asfaltenos $> 25\%$	Originam-se de processos de degradação de óleos parafínicos e parafino-naftênicos	Alguns óleos da África Ocidental.
<i>Aromático-asfáltica</i>	Mais de 35% de asfaltenos e resinas	Também oriundos de processos de biodegradação, gerando óleos pesados	Encontrados no Canadá ocidental, Venezuela e sul da França

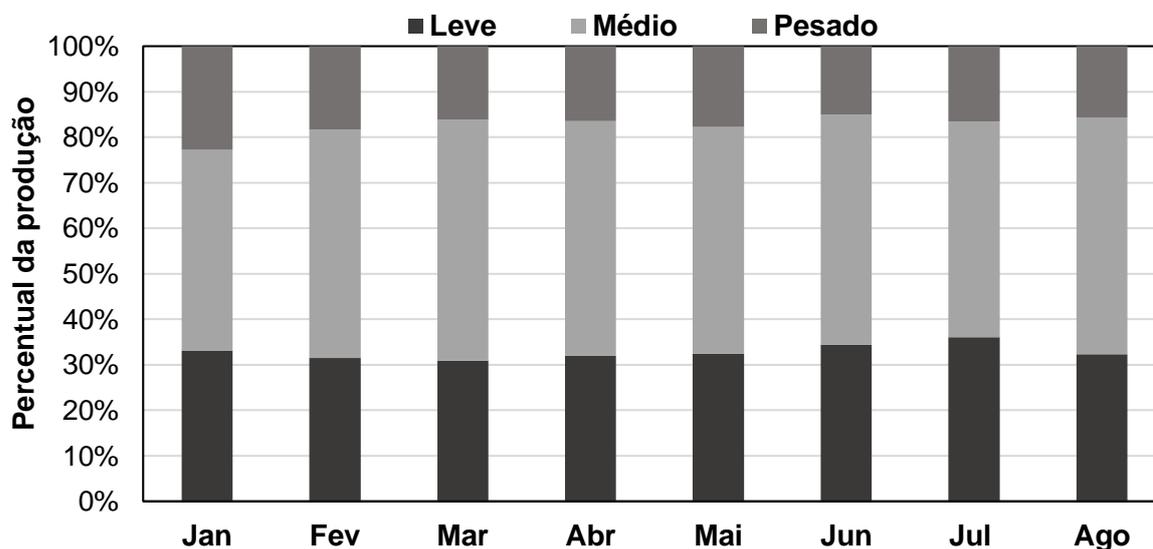
Outra classificação, adotada internacionalmente e implementada pelo *American Petroleum Institute* em conjunto com o *National Bureau of Standards* é o grau API ($^{\circ}$ API), um padrão adimensional determinado a partir do peso específico do óleo

– a densidade com relação à água – à 60°F (ou 15,55°C), que pode ser calculado de acordo com a equação (3.1) (UNITED STATES, 1936).

$$^{\circ}API = \left(\frac{141,5}{\text{peso específico}} \right) - 131,5 \quad (3.1)$$

Como o °API é inversamente proporcional à densidade do óleo – isso implica valores elevados para óleos mais leves – e determina o seu valor no mercado internacional, uma vez que para óleos mais leves o custo com processos posteriores de refino diminui. De acordo com as faixas de °API, o óleo pode ser classificado como leve ($\geq 31^{\circ}API$), médio ou intermediário ($\geq 22^{\circ}API$ e $< 31^{\circ}API$) e pesado ($< 22^{\circ}API$). De acordo com os relatórios mensais da Agência Nacional do Petróleo – ANP para 2017, o grau API médio até agosto foi de 26,5, com o maior percentual da produção mensal correspondendo ao óleo médio (Fig. 3.1).

Figura 3.1 - Percentual do tipo de óleo da produção mensal do Brasil em 2017.



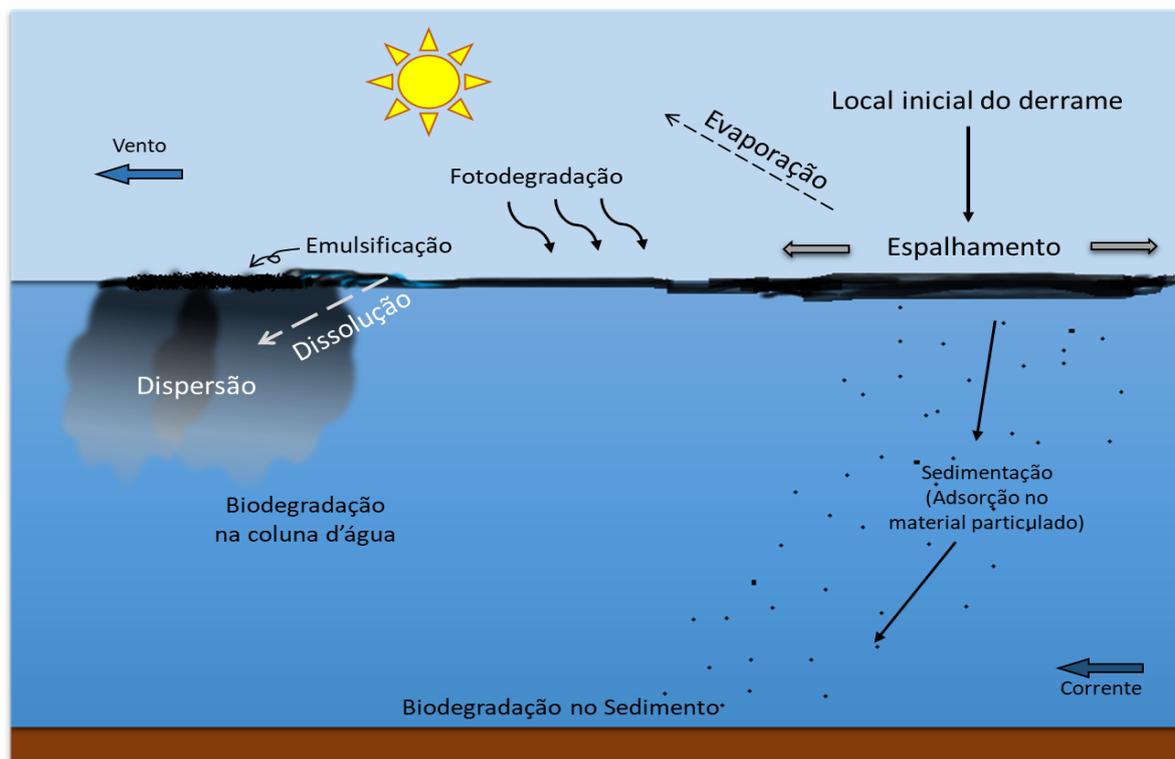
Contribuição mensal do tipo de óleo na produção total brasileira (terrestre e offshore) entre janeiro e agosto de 2017. As médias corresponderam a 32,8%, 49,8% e 17,3% para o óleo leve ($\geq 31^{\circ}API$), médio ($\geq 22^{\circ}API$ e $< 31^{\circ}API$) e pesado ($< 22^{\circ}API$), respectivamente, de acordo com os relatórios mensais da Produção de Petróleo e Gás Natural (ANP, 2017). Fonte: autoria própria.

3.3 Processos do intemperismo do óleo

O termo intemperismo é uma definição generalizada para as mudanças nas propriedades do óleo devido aos processos físicos, químicos e biológicos, quando o derrame é exposto às condições ambientais. Existem diversos processos e rotas pelos

quais o óleo pode passar até chegar no seu destino final, e como esses processos dependem de inúmeras variáveis, a predição do comportamento de um derrame é complicada e única para cada situação (LEE *et al.*, 2015).

Figura 3.2 - Processos de intemperismo de um derrame de óleo.



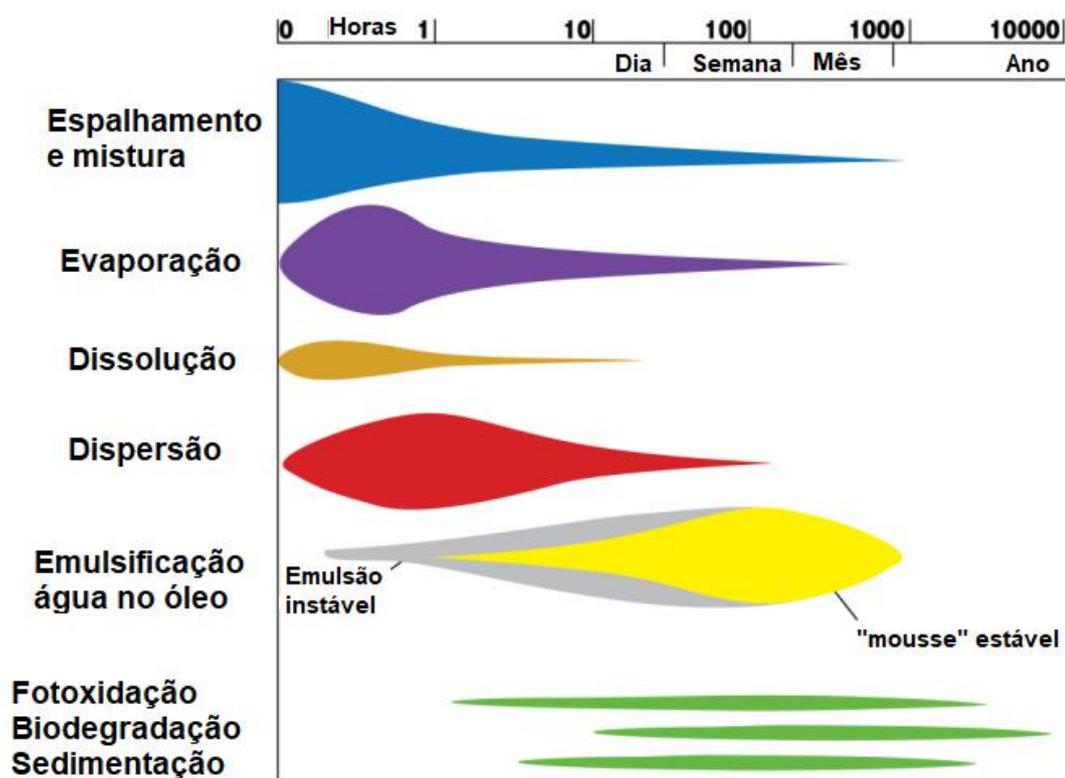
Alguns dos principais processos que podem afetar o destino de um derrame no meio aquático. Fonte: autoria própria.

Os processos de intemperismo do óleo podem ocorrer na superfície (espalhamento, evaporação, fotodegradação e emulsificação), na coluna d'água (dissolução, dispersão, adsorção ao material particulado, biodegradação) ou no sedimento (absorção, penetração, sequestro e biodegradação). Os principais processos de intemperismo são apresentados na Fig. 3.2, dos quais os processos na superfície e na coluna d'água (excetuando os processos de biodegradação de difícil previsão) são os mais importantes para a modelagem de dispersão de um derrame de óleo e serão discutidos a seguir.

Os processos ocorrem em diferentes taxas e com diferentes momentos de início, o que resulta em alterações progressivas da composição do óleo e seu comportamento após o derrame. A Fig. 3.3 apresenta um exemplo dos diferentes tempos para o início dos processos e as escalas de tempo em que eles ocorrem. Geralmente, os primeiros processos a ocorrer são a evaporação e o espalhamento,

em questões de horas, seguidos pelos processos de dissolução e dispersão e, por último, a emulsificação e a biodegradação. Deve-se levar em consideração, entretanto, que a escala temporal dos processos pode variar de acordo com o tipo óleo e em função de fatores chave como a temperatura, a ação de ondas (energia), luz solar, sedimento em suspensão e atividade microbiana.

Figura 3.3 - Tempo de início e importância relativa dos processos de intemperismo ao longo do tempo após um derrame na água.



Escalas temporais e intensidade dos processos principais processos de intemperismo do óleo. As escalas variam de horas até anos, mas grande parte dos processos se tem maior intensidade em uma curta escala de tempo logo após o derrame. Fonte: Lee *et al.* (2015).

O espalhamento do derrame se dá em primariamente função da diferença de densidade entre o óleo e a água, que tende a alcançar o equilíbrio hidrostático. Ele é influenciado pela viscosidade do óleo, temperatura do ar e da água e ação de correntes, ondas e ventos (LEE *et al.*, 2015). Esse processo aumenta a área do derrame e diminui a espessura média da camada de óleo (AOSRT, 2014). A irregularidade do espalhamento com formação de vórtices (células de Langmuir) dificulta a recuperação mecânica do óleo com o passar do tempo (LEHR; SIMECEK-BEATTY, 2000). Óleos com maiores quantidades de compostos de baixo peso

molecular (LMW) tendem a se espalhar mais rápido o que por sua vez aumenta a taxa do processo de evaporação dos compostos mais voláteis.

Durante o processo de evaporação são perdidos os compostos mais leves para a atmosfera, particularmente saturados $< C_{15}$ (BTEX) e alguns HPAs de LMW (AOSRT, 2014), o que aumenta a concentração de compostos de alto peso molecular (HMW) e conseqüentemente a viscosidade e a densidade do derrame. Em contrapartida, o aumento do peso diminui o espalhamento e pode desacelerar a evaporação dos outros compostos. Estima-se que óleos crus leves e intermediários podem perder de mais do que 30-50% dos seus compostos pelo processo de evaporação contra menos de 10% nos óleos pesados (NRC, 2003). A contribuição real da temperatura, vento e do espalhamento para esse processo ainda precisa ser compreendida, uma vez que os resultados de pesquisas diversas pesquisas acerca do tema divergem significativamente (e.g. FINGAS, 2015, 2004; GROS *et al.*, 2014).

A perda de compostos mais leves também leva à diminuição da toxicidade aguda para os organismos marinhos, mas aumenta a periculosidade para as equipes de contenção do dano devido à toxicidade na atmosfera e ao risco de incêndios. Também aumenta a toxicidade crônica devido à alta concentração HPAs alquilados de HMW na coluna d'água (LEE *et al.*, 2015).

A fotoxidação é um processo pouco compreendido que tende a formar radicais livres. Nesse processo os hidrocarbonetos aromáticos (particularmente HPAs incluindo heterocíclicos com oxigênio, nitrogênio e enxofre) e algumas resinas com nitrogênio ou enxofre reagem com o oxigênio na presença da luz solar gerando produtos oxigenados (YIM *et al.*, 2012). Esses produtos são mais resistentes à biodegradação e mais polares e, por conseqüência, mais solúveis em água (PAYNE; PHILLIPS, 1985). Como o potencial de fotoxidação dos HPAs é inversamente proporcional ao potencial de biodegradação, os HPAs com maior número de anéis são mais susceptíveis à fotoxidação e logo retirados do sistema, o que diminui a toxicidade crônica do derrame. Entretanto, a gama de produtos da reação não é totalmente conhecida, assim como seus efeitos na biota aquática (LEE *et al.*, 2015).

Apesar da fotoxidação não contribuir significativamente para a perda de massa do derrame, o processo pode influenciar de maneira significativa os processos posteriores de intemperismo, alterando a viscosidade, contribuindo para a emulsificação e para a formação de "crostas" na superfície do derrame, que por sua

vez diminuem o processo de evaporação (BOBRA, 1992; FINGAS, 2014; LEE *et al.*, 2015; PAYNE; PHILLIPS, 1985).

A emulsificação é o processo de formação de emulsões (de óleo em água ou de água em óleo) estáveis ou instáveis quando é aplicada energia suficiente na mistura de óleo e água (LEE *et al.*, 2015). Esse processo é extremamente importante, pois uma emulsão ou “mousse” estável com, por exemplo, 60-80% de água pode aumentar o volume do derrame em 2-5 vezes e a densidade em mais de 1000 vezes, diminuindo a evaporação e o espalhamento (FINGAS; FIELDHOUSE, 2014). Adicionalmente, óleos em emulsões são mais resistentes à biodegradação e a dispersão por produtos químicos, e a emulsão estável tende a submergir, fatores que dificultam processos de remediação e de recuperação do óleo (AOSRT, 2014). Frações de asfaltenos e ceras atuando sinergicamente com asfaltenos, resinas ou até mesmo células bacterianas podem contribuir para a estabilidade de algumas emulsões, que pode perdurar de meses a anos ou serem desestabilizadas por processos naturais (FINGAS; FIELDHOUSE, 2014; LEE *et al.*, 2015; SPIECKER *et al.*, 2003; YANG *et al.*, 2014, 2015).

No processo de dissolução os compostos mais solúveis em água, como monoaromáticos e os saturados mais leves, passam para a coluna d'água. Ambos os processos de evaporação e dissolução contribuem para a perda de massa e diminuição da toxicidade aguda do óleo residual, com maior contribuição da evaporação (LEE *et al.*, 2015). A contribuição do processo de dissolução passa a ser mais significativa em derrames subsuperficiais como o do *Deepwater Horizon* (FISG, 2010).

A Dispersão ocorre quando a ação mecânica de ondas ou turbulência separa gotículas de óleo do derrame central e força-as para a coluna d'água. Dependendo do tamanho da gotícula, da profundidade e da energia do sistema, ela pode permanecer dispersa ou pode retornar para a superfície com ou sem coalescência com outras gotículas. Esse processo também diminui a evaporação pela retirada do óleo da superfície e favorece a dissolução (LEE *et al.*, 2015).

Muitos micróbios são atraídos pela interface óleo-água onde podem produzir substâncias surfactantes que aumentam a formação de gotículas ou até estabilizam as gotículas impedindo a coalescência (ABBASNEZHAD; FOGHT; GRAY, 2011; ABBASNEZHAD; GRAY; FOGHT, 2011; DOROBANTU *et al.*, 2004; KANG *et al.*,

2008a, 2008b) e contribuindo para a dissolução. O menor tamanho das gotículas também contribui para a biodegradação (BRAKSTAD; NORDTUG; THRONE-HOLST, 2015). Venosa e Holder (2007) investigaram o efeito da temperatura na biodegradação do óleo e concluíram que a biodegradação tende a ser maior em maiores temperaturas.

Alguns dos processos descritos acima contribuem para a submersão, afundamento e sedimentação do óleo, como o aumento do peso devido a evaporação e/ou dissolução, emulsificação e a interação do óleo com o material particulado inorgânico e orgânico. Com isso, aumenta dificuldade de recuperação do óleo e à toxicidade potencial associada (LEE *et al.*, 2015). Um exemplo da persistência do óleo no sedimento foi observado em algumas praias do Golfo do Alasca depois de 16 anos do derrame do Exxon Valdez (SHORT *et al.*, 2007).

A persistência do óleo no ecossistema também será função da biodegradação que é bem menor em regiões oligotróficas por conta da baixa disponibilidade de nutrientes para o crescimento bacteriano. Em contrapartida, as elevadas temperaturas das regiões tropicais podem fazer o papel inverso, contribuindo para o rápido intemperismo do óleo. Em suma, fica clara a complexidade e inter-relação entre os processos de intemperismo do óleo e dentro deste contexto, a importância das ferramentas de previsão do comportamento aproximado de um derrame, uma vez que a incerteza dos processos posteriores, os danos ambientais, os gastos com contenção e remediação, o risco de associado a toxicidade crônica para os organismos aquáticos aumentam com o tempo de resposta dos órgãos competentes.

3.4 Efeitos de derrames para a biota

Diversos estudos foram realizados para avaliar o impacto dos derrames de petróleo nos ecossistemas marinhos, geralmente subsequentes aos acidentes visando analisar os efeitos a curto e a longo prazo. Os dois derrames com o maior número de estudos a curto e longo prazo, foram os derrames do navio petroleiro Exxon Valdez (EVOS) em 1989, no Alasca, e o *blowout* da plataforma *Deepwater Horizon* (DWH) em 2010, no Golfo do México. Por esse motivo grande parte dos efeitos conhecidos para a biota foram baseados nos estudos desses derrames.

Os efeitos da contaminação do petróleo nas comunidades marinhas são variados e complexos e podem ser classificados como agudos e diretos (por exemplo,

efeitos toxicológicos que causam ferimento grave ou morte imediata) ou crônico e indireto, incluindo consequências negativas para o crescimento, desenvolvimento e reprodução. Mesmo níveis baixos de contaminação podem ter consequências consideráveis nos organismos, como a morte de larvas, e causar efeitos crônicos (DOERFFER, 2013).

De forma geral, um derrame do óleo no meio aquático pode causar a morte em um curto prazo de tempo de diversos organismos. Um dos efeitos físicos imediatos do derrame pode ser caracterizado com o recobrimento de penas e pelos de aves marinhas e mamíferos, impedindo-os de fazer as trocas necessárias com o ambiente, como respiração, excreção e alimentação, podendo também prejudicar a locomoção e alterar a temperatura do corpo, levando-os à morte. Os vapores do óleo liberados por evaporação também podem ter efeitos letais, levando a asfixia da biota que precisa subir até a superfície para respirar como os mamíferos e as tartarugas marinhas.

A presença do óleo na água também inibe a eficiência da penetração da luz na coluna d'água, o que por sua vez acaba afetando os produtores primários e os níveis tróficos mais próximos, podendo também resultar na morte de peixes por falta de oxigênio. Esse efeito é particularmente acentuado em derrames que alcançam estuários. Nas plantas, ao chegar aos mangues, o óleo recobre suas raízes impedindo sua nutrição (LEE *et al.*, 2015).

Os alcanos com baixo número de carbonos podem causar efeitos anestésicos e narcóticos em baixas concentrações e em altas podem causar dano celular e morte em uma grande variedade de organismos. Geralmente alcanos com maior número de carbonos não são tóxicos, mas podem interferir com processos metabólicos e comunicação em algumas espécies (DOERFFER, 2013). Quando há a formação de hidratos de metano em derrames profundos a pluma pode demorar a chegar na superfície, mas quando alcança há riscos de explosões e incêndios (CHEN; YAPA, 2003; KESSLER *et al.*, 2011). Os cicloalcanos podem causar efeitos tóxicos pois participam em membranas biológicas (SIKKEMA; BONT; POOLMAN, 1995).

Os HPAs, encontrados em todos os tipos de óleo, possuem maior potencial tóxico à biota quando comparados aos hidrocarbonetos alifáticos, sendo alguns conhecidos devido aos efeitos carcinogênicos e mutagênicos (DOERFFER, 2013; NRC, 2003). A toxicidade crônica do óleo é atribuída primariamente aos HPAs com 3

a 5 anéis aromáticos. Os monoaromáticos podem causar toxicidade aguda e representam um grande risco para organismos aquáticos devido à elevada solubilidade e capacidade de particionar em moléculas biológicas (DOERFFER, 2013; LEE *et al.*, 2015).

Os HPAs causam efeitos profundos no desenvolvimento embrionário de peixes, que incluem deformações de cardíacas e craniofaciais, hemorragia e edema do pericárdio e do saco vitelino - resultando na distensão do saco vitelino, tornando a coloração levemente azulada, caracterizando a síndrome chamada de "doença do saco azul" (KLAASSEN; WATKINS III, 2009).

À longo prazo, os efeitos crônicos da exposição aos contaminantes mais tóxicos do petróleo, podem passar a ser mais relevantes do que a mortalidade nos primeiros dias do derrame. Este tipo de efeito pode desestabilizar as comunidades, principalmente para os organismos com longa história de vida, com diversas formas de manifestação de sintomas.

Como exemplo do DWH, a NOAA-Fisheries (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) apresentou as descobertas relativas à elevada mortalidade de cetáceos (baleias e golfinhos) no norte do Golfo do México após o derrame, nomeada como "Evento incomum de mortalidade" (*Unusual Mortality Event* – UME), e atribuiu a mortalidade e os encalhes ao DWH. Os sintomas observados foram doenças adrenais e pulmonares que contribuíram para a morte e perda fetal dos golfinhos residentes na região impactada. Enquanto o número de mortes de golfinhos na área diminuiu após o pico de março de 2010 - julho de 2014, ainda foram encontradas evidências de doença pulmonar crônica e comprometimento adrenal além de gestações malsucedidas em 2015 (NOAA FISHERIES, 2014).

Analogamente aos efeitos crônicos, que foram desconsiderados durante muitos anos, os efeitos indiretos amplamente reconhecidos em contextos de estudos ecológicos, foram ignorados em detrimento dos efeitos tóxicos agudos e posteriormente aos crônicos embasados em experimentos controlados. Apenas na última década, após diversas publicações que consideram os efeitos aditivos dos três componentes à longo prazo, esse tipo de abordagem passou a ser respeitada. Geralmente, os efeitos indiretos referem-se a alterações induzidas pelo derramamento de óleo ao meio ambiente que, por sua vez, têm consequências deletérias para a vida selvagem. Isso pode resultar de mudanças na disponibilidade de presas, abundância

de predadores ou de outros efeitos em cascata que ocorrem após a interrupção de teias tróficas complexas (PETERSON *et al.*, 2003). Alguns fatores como a composição específica (biodiversidade, endemismo, etc.), história de vida dos organismos (ciclo de vida, reprodução, etc.) e a resiliência do ecossistema podem ser extremamente relevantes para a capacidade de recuperação de uma comunidade após tais acidentes.

Um exemplo da relevância da história de vida de um organismo na avaliação dos impactos à longo prazo foi observado no caso da população de orcas (*Orcinus orca*) no Alasca, que devido às mortes sofridas em duas agregações por conta do EVOS, mesmo após décadas não foi capaz de voltar aos níveis pré-derrame (ESLER *et al.*, 2017). Esse efeito indireto pode ter sido intensificado com a remoção de espécies chaves como lontras marinhas e focas – por toxicidade letal ou por diminuição da população (por efeitos subletais) – que são presas importantes para as orcas (LOUGHLIN, 2013; PETERSON *et al.*, 2003).

Peterson *et al.* (2003) separou em três as principais rotas de indução os impactos de longo prazo para o EVOS – que podem ser consideradas em qualquer outro derrame – como (i) persistência crônica do óleo, exposição biológica, e impactos populacionais para as espécies associadas com sedimentos rasos; (ii) impactos populacionais posteriores por doses subletais comprometendo saúde crescimento e reprodução e; (iii) efeitos indiretos de interação trófica e em cascata, todos que transmitem impactos muito além da fase aguda de mortalidade.

Um exemplo de efeito na teia trófica foi observado após o DWH, onde a composição e estrutura de comunidades microbióticas bentônicas foi modificada, com a substituição da comunidade diversa de metazoários pré-derrame por comunidades com baixa diversidade, dominância de fungos e composição da população de nematoda com dominância de predadores e necrófagos (BIK *et al.*, 2012).

Existem controvérsias nos diferentes resultados obtidos em estudos em níveis de comunidades em locais afetados por derrames que provavelmente são consequências das inúmeras variáveis bióticas e abióticas além das características do derrame atuando simultaneamente. Um estudo por Shelton *et al.* (2017) concluiu que as áreas mais impactadas pelo EVOS têm mais tendências negativas na biomassa total de peixes demersais do que as áreas não impactadas e que esta

mudança é impulsionada principalmente por diminuições na abundância da guilda do predador de topo.

Em contrapartida, Fodrie *et al.* (2014) detectaram uma discrepância entre impactos negativos consistentes detectados entre os organismos individuais e a ausência de impactos negativos mensuráveis entre as populações de peixes estuarinos impactados pelo derrame de óleo de *Macondo* no Golfo do México. Para conciliar a aparente contradição eles consideraram duas classes de mecanismos: fatores que obscurecem os impactos negativos da população, apesar das conhecidas respostas dos organismos (e.g., alta variabilidade espaço-temporal, compensação de efeitos cascata da teia alimentar, diminuição da pesca, atrasos das respostas) e fatores amortecendo os custos à nível de população, apesar das conhecidas respostas de organismos (e.g., comportamento de evasão, múltiplas vias compensatórias). Esse tipo de raciocínio é extremamente importante quando se trata de impactos do petróleo, pois leva em consideração o que foi ensinado por outros derrames.

4 CARACTERIZAÇÃO DOS MODELOS

4.1 Modelos de circulação oceânica

Os processos de intemperismo e dispersão que atuam sobre um derrame de óleo dependem das propriedades físico-químicas e hidrodinâmicas da região de influência da pluma do derrame, que podem ser caracterizadas através de problemas relacionados com a dinâmica dos fluidos. A solução desses problemas pode ser dada pela experimentação (em laboratório ou *in situ*), analiticamente através de formulações teóricas ou pela técnica de soluções numéricas. A Tabela 4.1 apresenta as vantagens e desvantagens desses diferentes métodos.

Tabela 4.1 - Comparação entre três técnicas de solução de problemas em dinâmica de fluidos e transporte de calor. Traduzido de Pletcher, Tannehill e Aderson (2012).

Técnica	Vantagens	Desvantagens
Experimental	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade de ser mais realista 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessária obtenção de equipamento; • Problemas de escala; • Dificuldades de medição; • Elevado custo operacional.
Teórica (ou analítica)	<ul style="list-style-type: none"> • Mais geral (usualmente na forma de fórmula) 	<ul style="list-style-type: none"> • Restrita a geometrias e processos físicos simples; • Geralmente restrita a problemas lineares.
Numérica	<ul style="list-style-type: none"> • Não há restrição a linearidade; • Geometrias e processos complicados; • Evolução temporal do processo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Erros de truncamento; • Prescrição das condições de fronteira apropriadas; • Custos computacionais.

A extensão dos oceanos quando comparada a sua profundidade, faz com que seja quase impossível obter dados contínuos de suas propriedades dinâmicas e conservativas. Ainda que, com a evolução da tecnologia, seja possível a obtenção de dados de satélites de praticamente todo o oceano, o período orbital faz com que esses dados não sejam temporalmente contínuos, e as informações obtidas sejam restritas às camadas mais superficiais da coluna d'água.

As equações da mecânica de fluidos explicam com relativo sucesso o comportamento dos escoamentos laminares. Entretanto, a importância dos termos não lineares em escoamentos turbulentos impossibilita a resolução analítica das mesmas. Tendo em vista esta não linearidade e a inviabilidade de obter dados

contínuos *in situ* para faixas extensas do oceano, a Dinâmica de Fluidos Computacional (DFC) surge como uma ferramenta que busca resolver as equações por meio de métodos computacionais numéricos com o auxílio de aproximações matemáticas, como a discretização do contínuo espaço-tempo e parametrizações dos termos não lineares.

Os modelos oceânicos se baseiam na DFC e no conhecimento das características intrínsecas dos oceanos para prever ou analisar a circulação e o transporte de propriedades como sal e calor. O uso destes modelos economicamente viáveis, com a corroboração de dados *in situ* de menor frequência espacial e temporal, permite a elucidação de estruturas da circulação superficial e profunda em escalas de tempo curtas ou longas.

A formulação de um modelo oceânico pode variar de acordo com os pressupostos e as aproximações matemáticas utilizadas, fazendo com que sua escolha dependa das características particulares do problema a ser estudado (i. e. da escala espacial e temporal, processos que se deseja estudar, capacidade computacional, ordem de grandeza das variáveis estudadas, etc.). Eles podem ser classificados de acordo com diversos fatores, como por exemplo a aproximação superficial (superfície livre/ *rigid lid*), o sistema de coordenadas verticais, e o modo considerado (barotrópico/baroclínico) (FORTUNA, 2012; HAIDVOGEL; BECKMANN, 1999; KANTHA; CLAYSON, 2000).

A suposição *rigid lid* (“tampa rígida”) foi inicialmente formulada para evitar a limitação no passo de tempo decorrente das ondas de gravidade rápidas geradas a partir da deformação da superfície do mar sob influência do vento, aquecimento e das marés (BRYAN, 1969). Apesar de ser uma boa aproximação para escalas de tempo maiores (p. ex. a circulação termohalina), esse tipo de pressuposto faz com que sejam desconsiderados os processos superficiais. Em contrapartida, os modelos de superfície livre assumem que o oceano é livre para se deformar e o passo de tempo utilizado na discretização tem que ser menor para comportar os efeitos das ondas de gravidade mais rápidas. Neste tipo de modelo, quando a condição de estabilidade para convergência de equações diferenciais parciais – critério de CFL (COURANT; FRIEDRICHS; LEWY, 1967) – é satisfeita, isto é, quando a instabilidade numérica não é uma limitação, a utilização de um passo de tempo menor acarreta no maior gasto

computacional, o que deixa a análise sujeita a capacidade de processamento do equipamento disponível ou à delimitação de uma área de estudo menor.

O modo barotrópico e o baroclínico referem-se às aproximações no tratamento das variações de densidade ao longo da coluna d'água. No primeiro modo, a aproximação é simplesmente ignorar completamente as diferenças de densidade e tratar como se a densidade fosse uniforme, isto é, a densidade do fluido é apenas uma função da pressão e as superfícies isobáricas e as de densidade constante são paralelas entre si. No modo baroclínico a pressão não é constante em superfícies de densidade constante, a densidade é também função de outros parâmetros e varia horizontalmente com eles, isto é, as superfícies isobáricas podem estar inclinadas com relação às superfícies de densidade constante (GILL, 1982; POND; PICKARD, 2013).

Haidvogel e Beckmann (1999) discriminam os modelos oceânicos, de acordo o tipo de tratamento da coordenada vertical e a discretização espacial, em quatro classes: (i) modelo de nível fixo (coordenada-z), como o *Modular Ocean Model* – MOM; (ii) modelo *isopicnal*, como o *Miami Isopycnal Model* – MICOM; (iii) modelo de coordenadas sigma, como o *Princeton Ocean Model* – POM e; (iv) modelos semi-espectrais, como o *Semi-spectral Primitive Equation Model* – SPEM.

O *Regional Ocean Modelling System* – ROMS faz parte da classe de modelos semi-espectrais e sua origem está associada ao modelo SPEM (HAIDVOGEL; WILKIN; YOUNG, 1991), posteriormente aprimorado com o SCRUM (SONG; HAIDVOGEL, 1994). Esse modelo de código aberto foi projetado com algoritmos inovadores para advecção, mistura, gradiente de pressão, acoplamento do modo vertical e eficiência de passo de tempo (SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2003, 2005). Toda sua estrutura de entrada e saída de dados é realizada via NetCDF, o que facilita a troca de dados e permite o acoplamento com outras rotinas que utilizam do mesmo recurso. Além disso, o código do modelo permite computação em paralelo e pode ser adaptado para o uso de GPU (Unidade de Processamento Gráfico), que não exigem a mesma infraestrutura de refrigeração, e são menos custosas do que os Clusters, permitindo uma economia de tempo computacional e de capital.

O uso do ROMS no presente trabalho levou em consideração sua eficiência na modelagem em escalas regionais, a considerável estabilidade sobre topografia variável (com as devidas correções), a possibilidade do uso de diversos tipos de

parametrizações para o fechamento turbulento – necessário devido ao baixo Coriolis da região equatorial – e a boa representação dos processos hidrodinâmicos como foi observado por outros autores para esta região (ARAUJO; CINTRA, 2009; SILVA *et al.*, 2009a, 2009b; TCHAMABI *et al.*, 2017). Os tópicos seguintes abordam as considerações matemáticas desse modelo.

4.2 Regional ocean modelling system – ROMS

4.2.1 Características gerais

O sistema ROMS é um modelo oceânico numérico tridimensional, de superfície livre que resolve as equações primitivas de Navier-Stokes em uma Terra com rotação, considerando a aproximação de Boussinesq e o equilíbrio hidrostático. Neste modelo, os gradientes de pressão são resolvidos em um sistema acoplado barotrópico-baroclínico que recupera processos perdidos ou alterados pela suposição *rigid lid* (SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2003, 2005).

A versão do ROMS utilizada neste trabalho foi o ROMS_AGRIF/ROMSTOOLS desenvolvido pelo Instituto Francês de pesquisa para o Desenvolvimento – IRD (*French Institut de Recherche pour le Développement*) (PENVEN *et al.*, 2008). As principais equações do modelo ROMS são apresentadas no Anexo 1.

4.2.2 Solução numérica

O ROMS utiliza métodos numéricos (diferenças finitas) e parametrizações de fechamento turbulento para resolver os processos dinâmicos de interesse. Ele se destaca dos outros modelos devido ao aprimoramento das técnicas de discretização de 3ª ordem dos termos advectivos, o que permite uma diminuição nos erros de truncamento (ARAUJO; CINTRA, 2009). Apesar disso, no caso deste modelo e provavelmente de outros modelos sigma, o uso de esquemas advectivos de maior ordem pode gerar mistura diapicnal espúria. Para evitar esse tipo de erro pode-se adotar um esquema advectivo como o RSUP3 (*Rotated Split UPstream-biased 3rd order*), onde a difusão é separada da advecção e representada por um esquema de difusão biharmônico rotacionado com hiper-difusividade dependente do fluxo. Este esquema foi projetado para estabilidade numérica e é capaz de preservar as capacidades de baixa dispersão e difusão do esquema original *upwind* de 3ª ordem

enquanto preserva as características das massas d'água (LEMARIÉ *et al.*, 2012; MARCHESIELLO; DEBREU; COUVELARD, 2009).

4.2.3 Sistemas de Coordenadas

Os sistemas de coordenadas utilizados no ROMS são a coordenada vertical híbrida z-sigma, baseada no sistema de coordenadas-S e, na horizontal, o sistema de coordenadas curvilíneas ortogonais. Essas coordenadas são adequadas para fronteiras laterais irregulares como por exemplo, regiões costeiras, e permitem a formulação de malhas mais espaçadas no oceano profundo e mais coesas em regiões de menores profundidades dentro do domínio computacional (SONG; HAIDVOGEL, 1994). O sistema de coordenadas-S consiste em três termos:

$$z = \zeta(1 + s) + h_c s + (h - h_c)C(s), \quad -1 \leq s \leq 0 \quad (4.1)$$

onde h_c é uma constante escolhida como o mínima profundidade da batimetria ou a espessura de uma camada de superfície ou de fundo que se deseja ter maior resolução e $C(s)$ é a função de estiramento (*stretching*) originalmente definida pela equação (4.2), onde θ_s e θ_b são os parâmetros de controle de superfície e fundo com limites de $0 \leq \theta_s \leq 20$ e $0 \leq \theta_b \leq 1$, respectivamente.

$$C(s) = (1 - \theta_b) \frac{\sinh(\theta_s s)}{\sinh \theta_s} + \theta_b \frac{\tanh[\theta_s(s + 1/2)] - \tanh[(1/2)\theta_s]}{2 \tanh[(1/2)\theta_s]} \quad (4.2)$$

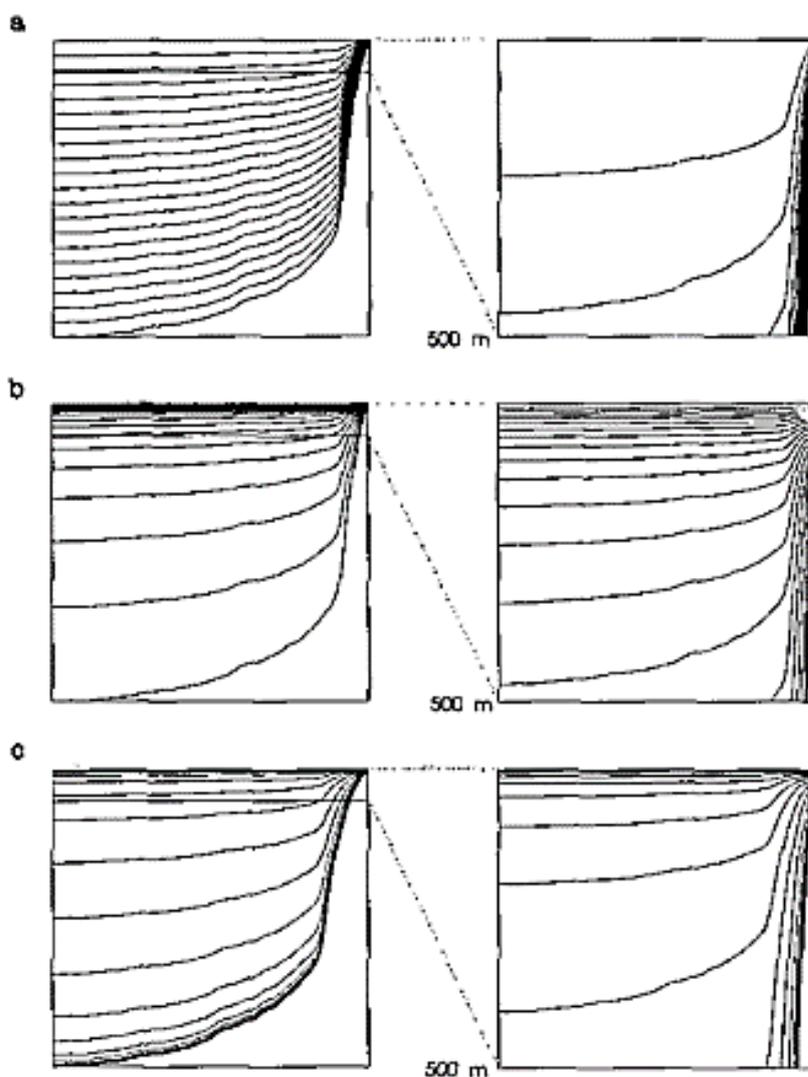
O primeiro termo $\zeta(1 + s)$ é utilizado para seguir a superfície livre $\zeta(x, y, t)$; o segundo termo $h_c s$ é escolhido para prevenir instabilidades e; $(h - h_c)C(s)$ estira as linhas de coordenadas interiores de forma a seguir o fundo $h(x, y)$.

A Fig. 4.1 exemplifica o perfil dos níveis verticais na coordenadas-S para uma região costeira da Califórnia com diferentes valores para os parâmetros de controle de superfície e fundo. Com os valores de $\theta_s = 0,0001$ (tendendo a zero) e $\theta_b = 0$, os níveis passam a corresponder aqueles na coordenada- σ (Fig. 4.1a); com valores crescentes de θ_s e $\theta_b = 0$, obtém-se maior resolução na superfície (Fig. 4.1b) e para valores $\theta_b > 0$ também é possível obter maior resolução no fundo (Fig. 4.1c).

O sistema de coordenadas-S é vantajoso quando comparado com o sistema de coordenadas-z pois consegue representar bem a topografia de fundo, especialmente em áreas de mudança abrupta de águas rasas para profundas. No

sistema de coordenadas-sigma a resolução das camadas depende da topografia, o que gera uma maior resolução em baixas profundidades e uma maior resolução em altas profundidades. Isso não ocorre para a coordenadas-S uma vez que nesse sistema a resolução escolhida independente da topografia e consegue capturar bem os processos de mistura que talvez fossem perdidos na superfície em águas profundas nas coordenadas-sigma. Além disso, o comportamento de $C(s)$ evita resolução excessiva em regiões mais rasas e as limitações de estabilidade de CFL associadas.

Fig. 4.1 - Níveis computacionais verticais para a plataforma costeira da Califórnia na coordenadas-S



A coluna da esquerda apresenta a profundidade total e a da direita os 500 m superiores: (a) $\theta_s = 0,0001$ e $\theta_b = 0$; (b) $\theta_s = 8$ e $\theta_b = 0$; (c) $\theta_s = 8$ e $\theta_b = 1$. Fonte: Song e Haidvogel (1994).

No ROMS duas equações de transformação de coordenadas (4.3) e (4.4) estão disponíveis, e a função de estiramento pode ser especificada no arquivo de entrada.

$$z(x, y, s, t) = \sigma(x, y, s) + \zeta(x, y, t) \left[1 + \frac{\sigma(x, y, s)}{h(x, y)} \right], \quad (4.3)$$

$$\sigma(x, y, s) = h_c s + [h(x, y) - h_c] C(s)$$

ou

$$z(x, y, s, t) = \zeta(x, y, t) + [\zeta(x, y, t) + h(x, y)] \sigma(x, y, s), \quad (4.4)$$

$$\sigma(x, y, s) = \frac{h_c s + h(x, y) C(s)}{h_c + h(x, y)}$$

Apesar das vantagens desse tipo de coordenada vertical, o não alinhamento das iso-superfícies das coordenadas com as superfícies geopotenciais ou isopicnais, dependendo do gradiente batimétrico e da resolução horizontal e vertical, pode gerar erros significativos no cálculo do gradiente de pressão (HAIDVOGEL; BECKMANN, 1999; HANEY, 1991). Para prevenir esse tipo de erro é necessário suavizar a topografia. Um parâmetro útil para determinar verificar a confiabilidade dos resultados é o valor de r (eq. 4.5) que mede a inclinação das camadas sigma (BECKMANN; HAIDVOGEL, 1993).

$$r = \frac{\Delta h}{2h} = \frac{h_{+1/2} - h_{-1/2}}{h_{+1/2} + h_{-1/2}} \quad (4.5)$$

Estudos empíricos demonstraram que resultados confiáveis podem ser obtidos se r não ultrapassar 0,2 (HAIDVOGEL; BECKMANN, 1999). O valor máximo desse parâmetro pode ser determinado no arquivo de configuração do ROMS.

4.2.4 Discretização Temporal

O ROMS utiliza um esquema de passo de tempo *split-explicit* para resolver as equações. O termo *explicit* implica que método das aproximações utilizadas na análise numérica para a obtenção de soluções dependentes do tempo das equações diferenciais parciais (EDPs) calcula de forma explícita o estado do sistema, isto é, em um tempo posterior ao estado atual do sistema. O termo *split* (“dividido”) refere-se à separação dos termos nos modos barotrópico (rápido) e baroclínico (lento) de forma que é utilizado um passo de tempo mais curto para avançar a elevação da superfície

e o momentum barotrópico e um passo de tempo maior para temperatura, salinidade e o momentum baroclínico.

Como a estabilidade numérica é um ponto crucial na formulação dos esquemas *split-explicit*, o ROMS possui um algoritmo preditor-corretor (*leap-frog*), que diminui os erros associados à separação dos modos. Ainda que o custo computacional desse algoritmo seja elevado, ele é mais do que compensado pela possibilidade do aumento do passo de tempo sem a diminuição concomitante da resolução e da estabilidade do modelo (PENVEN *et al.*, 2008; SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2003, 2005).

4.2.5 Discretização espacial

Na horizontal as equações governantes são discretizadas em uma malha encaixada nas fronteiras de coordenadas curvilíneas ortogonais. As variáveis de estado são escalonadas em um grid C-Arakawa (A. ARAKAWA; V. R. LAMB, 1977). A superfície livre, a densidade e os *tracers* ativos (temperatura potencial, salinidade) e passivos (sedimento, biológico) ficam localizados no centro da célula enquanto as componentes da velocidade horizontal u, v ficam nos limites oeste/leste e sul/norte da célula, respectivamente. Desta forma a densidade é determinada no centro e as velocidades nas laterais da célula.

Na vertical as equações governantes são discretizadas usando a coordenada vertical híbrida z-sigma o que, no caso de onde as variações de topografias são acentuadas, gera células da malha com diferentes volumes e espessuras verticais. As variáveis de estado do modelo são escalonadas com o momentum horizontal (u, v), a densidade e os *tracers* ativos e passivos no centro, a velocidade vertical (w) e variáveis de mistura na face superior e inferior da célula da malha (SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2003).

4.2.6 Condições de Contorno

O ROMS permite o uso de condição de contorno imposta (condição de Dirichlet), de fluxo (condição de Neumann) ou mista (condição de Robin) com ou sem o uso de uma *sponge layer* para amortecer a entrada do fluxo imposto. Adicionalmente pode ser ativada a função *Land Mask* para a representação de regiões emersas com ou sem a condição de escorregamento nas laterais.

4.3 O modelo de óleo MEDSLIK-II

O MEDSLIK-II é um modelo de óleo Lagrangeano que pode ser acoplado com modelos de circulação oceânica para solucionar os problemas do transporte, difusão e transformação do óleo na superfície do mar (DE DOMINICIS *et al.*, 2013a, 2013b).

O formalismo Lagrangeano é baseado em duas considerações primordiais. A primeira é que as partículas constituintes dos *tracers* não influenciam a hidrodinâmica e nem alteram os processos na água. A segunda considera que as partículas se movem com deslocamentos infinitesimais sem inércia e sem interagir umas com as outras.

A formula geral para a concentração de um *tracer*, $C(x, y, z, t)$, é dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla C = \nabla \cdot (\mathbf{K} \nabla C) + \sum_{j=1}^M r_j(x, C(x, t), t) \quad (4.6)$$

Aplicando o formalismo lagrangiano nesta equação, obtêm-se duas equações componentes para o *tracer* ativo (Eq. 4.7 e 4.8), onde C_1 é a concentração do óleo devido somente aos processos de intemperismo, e C é a taxa de variação final da concentração do óleo dada pela difusão e advecção agindo sobre C_1 .

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = \sum_{j=1}^M r_j(x, C(x, t), t) \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\mathbf{U} \cdot \nabla C_1 + \nabla \cdot (\mathbf{K} \nabla C_1) \quad (4.8)$$

No MEDSLIK-II, o derrame de óleo é representado pelas variáveis de estado denominadas “derrame”, “partícula” e “estrutural” (Tabela 4.2).

As variáveis de estado do tipo derrame são utilizadas para resolver a variação de concentração do óleo devido aos processos de intemperismo (evaporação, espalhamento, dispersão e adesão costeira) atuando no volume total do óleo. Esses processos são apresentados como relações empíricas entre o volume do derrame, o vento a 10 metros (W) e a temperatura da superfície do mar. Em seguida, são definidas as variáveis de estado do tipo partícula para resolver os processos advectivos-difusivos e para o posterior cálculo da concentração na superfície, na coluna d’água e na costa (variáveis do tipo estrutural).

Tabela 4.2 - Variáveis de estado do modelo de óleo MEDSLIK-II (DE DOMINICIS *et al.*, 2013a)

Tipo de Variável	Variável	Nome da variável	Unidade
Derrame	$V_s(x, y, t)$	Volume do derrame na superfície	m^3
	$V_D(x, y, t)$	Volume do derrame na sub-superfície (disperso)	m^3
	$V^{TK}(x, y, t)$	Volume da camada espessa do derrame superficial	m^3
	$V^{TN}(x, y, t)$	Volume da camada fina do derrame superficial	m^3
	A^{TK}	Área da camada espessa do derrame superficial	m^2
	A^{TN}	Área da camada fina do derrame superficial	m^2
	$T^{TK}(x, y, t)$	Espessura da camada espessa do derrame superficial	m
	$T^{TN}(x, y, t)$	Espessura da camada fina do derrame superficial	m
Partícula	$\mathbf{x}_k(t) = (x_k, y_k, z_k)$	Posição da partícula	m
	$v_{NE}(n_k, t)$	Volume não-evaporativo da partícula do derrame superficial	m^3
	$v_E(n_k, t)$	Volume evaporativo da partícula do derrame superficial	m^3
	$\sigma(n_k, t)$	Índice do status da partícula	-
Estrutural	$C_s(x, y, t)$	Concentração do óleo na superfície	$kg \cdot m^{-2}$
	$C_D(x, y, t)$	Concentração do óleo dispersa	$kg \cdot m^{-2}$
	$C_C(x, y, t)$	Concentração do óleo na costa	$kg \cdot m^{-1}$

A densidade do óleo, para o cálculo das variáveis tipo estrutural e para determinação dos processos de intemperismo, é dada pela equação (4.9) e computada de acordo com a densidade da água ($\rho_w = 1026 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) e com o grau API escolhido como parâmetro de entrada do modelo.

$$\rho = \left(\frac{141,5}{API + 131,5} \right) \rho_w \quad (4.9)$$

4.3.1 Variáveis de estado

▪ Variáveis de estado tipo derrame

O volume de óleo disperso em sub-superfície e o volume em superfície, são V_D e V_s , respectivamente e seus valores são atualizados após passarem pelos processos de intemperismo. O volume de óleo na superfície (V_s) é dividido em duas parcelas, o volume correspondente à uma camada de óleo espessa (V^{TK}) e o volume correspondente a uma camada fina (V^{TN}). Essa suposição é necessária para

aplicação dos algoritmos de transformação de (MACKAY; PATERSON; TRUDEL, 1980) de tal forma que o volume $V_s = V^{TK} + V^{TN}$.

O volume espesso (TK) e o volume fino (TN) são definidos como $V^{TK} = A^{TK}T^{TK}$ e $V^{TN} = A^{TN}T^{TN}$, respectivamente. Onde A^{TK} e A^{TN} são as áreas superficiais da camada espessa e fina do derrame e T^{TK} e T^{TN} são as espessuras da camada espessa e fina do derrame, respectivamente.

▪ Variáveis de estado tipo partícula

De forma a computar os processos de advecção e difusão, o volume óleo de superficial V_s é separado em N partículas constituintes caracterizadas por um volume $v(n_k, t)$, um índice de status $\sigma(n_k, t)$ e um vetor de posição $x_k(t) = (x_k(n_k, t), y_k(n_k, t), z_k(n_k, t))$.

O volume da partícula v é atualizado de acordo com a taxa de variação das variáveis de estado do tipo derrame devido ao intemperismo. Esse volume é descrito como a soma dos atributos “volume evaporativo” (v_E) e o “volume não evaporativo” (v_{NE}), segundo o modelo conceitual de Mackay *et al.* (1980).

O índice status da partícula pode assumir valores iguais a 0, 1, 2 ou menores do que 0 para partículas na superfície, dispersas, sedimentadas ou na costa, respectivamente.

▪ Variáveis de estado tipo estrutural

As variáveis do tipo estrutural são definidas como as concentrações na superfície (C_S), dispersa (C_D), na costa (C_C) ou no fundo (C_B), definidas pelas equações em (4.10), onde V_S e V_D são o volume superficial e o volume disperso, respectivamente, A é a unidade de área e L_C é um segmento de referência da costa ao qual o óleo pode ser adsorvido.

$$C_S = \frac{\rho}{A} V_S \quad (a) \qquad C_D = \frac{\rho}{A} V_D \quad (b) \qquad C_C = \frac{\rho}{L_C} V_C \quad (c) \qquad (4.10)$$

4.3.2 Condições iniciais

Como condição inicial no modelo é possível configurar um derrame instantâneo ou contínuo. No último, o volume total (V_s) do derrame é dividido em N_s sub-derrames liberados em cada intervalo de tempo T_C de forma que $V_s = R_C T_C$, onde R_C é a taxa de liberação do derrame em $m^3 \cdot s^{-1}$. O número de sub-derrames é dado pela razão entre a duração da liberação do óleo e o intervalo de tempo entre os derrames T_C .

Para o derrame contínuo, o volume inicial da partícula $v(n_k, t_0)$ é dado por V_S/N , onde N é o número de partículas liberadas no início do derrame.

Os volumes $v_E(n_k, t_0)$ e $v_{NE}(n_k, t_0)$ iniciais são dados pela eq. (4.11 b) e (4.11 b), onde φ_{NE} é o percentual do componente não evaporativo que depende do tipo de óleo escolhido na como parâmetro para o derrame.

$$v_E(n_k, t_0) = \left(1 - \frac{\varphi_{NE}}{100}\right) v(n_k, t_0) \quad (\mathbf{a}) \quad v_{NE}(n_k, t_0) = \left(1 - \frac{\varphi_{NE}}{100}\right) v(n_k, t_0) \quad (\mathbf{b}) \quad (\mathbf{4.11})$$

As áreas iniciais TK e TN superficiais do derrame são definidas pela eq. (4.12a) e (4.12b), respectivamente, onde F é um parâmetro que pode ser configurado para valores entre 1 e 1000, T^{TK} e T^{TN} podem assumir valores entre 1×10^{-4} - 0,02 m e 1×10^{-6} - 1×10^{-5} m, respectivamente. No modelo, por padrão, $F = 4$, $T^{TK} = 0,02$ e $T^{TN} = 1 \times 10^{-5}$. Esses valores são os recomendados para derrames pontuais.

$$A^{TK}(t_0) = V_S/(T^{TK} + FT^{TN}) \quad (\mathbf{a}) \quad A^{TN}(t_0) = FA^{TK} \quad (\mathbf{b}) \quad (\mathbf{4.12})$$

4.3.3 Taxas de variação

- **Variáveis de estado tipo estrutural**

Os processos de intemperismo são aplicados aos volumes V_S e V_D , principais variáveis tipo derrame. A taxa de variação da concentração para cada compartimento, que é uma forma da equação (4.7), é dada pela eq. (4.13).

$$\frac{dC_S}{dt} = \frac{\rho}{A} \frac{dV_S}{dt} \quad (\mathbf{a}) \quad \frac{dC_S}{dt} = \frac{\rho}{A} \frac{dV_S}{dt} \quad (\mathbf{b}) \quad (\mathbf{4.13})$$

- **Variáveis de estado tipo derrame**

A taxa de variação do volume do óleo na superfície é dada pela equação (4.14), onde V^{TK} e V^{TN} os volumes na camada TK e TN do derrame na superfície e variáveis do tipo derrame.

$$\frac{\partial V_S}{\partial t} = \frac{\partial V^{TK}}{\partial t} + \frac{\partial V^{TN}}{\partial t} \quad (\mathbf{4.14})$$

Os processos atuando no óleo são considerados separadamente para TK e TN de forma que a taxa de variação do volume total para essas camadas é dada pelas equações (4.15) e (4.16), onde os índices E, D e S computam os processos de evaporação, dispersão e espalhamento, respectivamente.

$$\frac{dV^{TK}}{dt} = \left. \frac{dV^{TK}}{dt} \right|_{(E)} + \left. \frac{dV^{TK}}{dt} \right|_{(D)} + \left. \frac{dV^{TK}}{dt} \right|_{(S)} \quad (4.15)$$

$$\frac{dV^{TN}}{dt} = \left. \frac{dV^{TN}}{dt} \right|_{(E)} + \left. \frac{dV^{TN}}{dt} \right|_{(D)} + \left. \frac{dV^{TN}}{dt} \right|_{(S)} \quad (4.16)$$

Adicionalmente, os algoritmos de transformação de Mackay *et al.* assumem que a espessura da camada TN é constante e a taxa de variação da área A^{TN} é calculada como na equação (4.17) com V^{TN} atualizado após os processos de intemperismo

$$\frac{dA^{TN}}{dt} = \frac{1}{T^{TN}} \frac{dV^{TN}}{dt} \quad (4.17)$$

Para a camada TK temos:

$$\frac{dV^{TK}}{dt} = T^{TK} \frac{dA^{TK}}{dt} + A^{TK} \frac{dT^{TK}}{dt} \quad (4.18)$$

Entretanto, A^{TK} para essa camada varia apenas devido ao processo de espalhamento do óleo, de forma que sua taxa de variação é dada pela equação (4.19), onde V^{TK} é atualizado de acordo com (4.18) e a variação da espessura é calculada por (4.20).

$$\frac{dA^{TK}}{dt} = \left. \frac{dA^{TK}}{dt} \right|_{(S)} \quad (4.19)$$

$$T^{TK} = \frac{V^{TK}}{A^{TK}} \quad (4.20)$$

▪ Variáveis de estado tipo partícula

Os volumes das partículas são alterados após os processos de transformação do óleo atuarem nas variáveis tipo derrame. A variação no volume evaporativo da partícula é dada empiricamente pela equação (4.21), onde $f^{(E)}$ é a fração de óleo evaporada definida pela por (4.22).

$$v_E(n_k, t_0) = \left[\left(1 - \frac{\varphi_{NE}}{100} \right) - f^{(E)}(\mathbf{x}_C, t) \right] v(n_k, t_0) \quad (4.21)$$

$$f^{(E)}(\mathbf{x}_C, t) = \frac{V^{TK}(\mathbf{x}_C, t)|_{(E)} + V^{TN}(\mathbf{x}_C, t)|_{(E)}}{V^{TK}(t_0) + V^{TN}(t_0)} \quad (4.22)$$

$V^{TK}(x_c, t)|_{(E)}$ e $V^{TN}(x_c, t)|_{(E)}$ são os volumes de óleo evaporados das camadas TK e TN, respectivamente, com x_c representando o vetor posição central do derrame.

O volume não evaporativo das partículas na superfície e na coluna d'água não variam. Todavia, na costa, uma fração desses volumes pode ser modificada devido aos processos de adsorção de acordo com (4.23).

$$v_{NE}(n_k, t) = v_{NE}(n_k, t_0^*) 0,5^{\frac{t-t_0^*}{T_s(L_i)}}, \quad \sigma(n_k, t) = -i \quad (4.23)$$

Nessa equação, t_0^* é o instante no qual o status da partícula é atualizado da superfície para a costa, $T_s(L_i)$ é um parâmetro que descreve a taxa de penetração (ou absorvência) do óleo em um determinado tipo de costa. O valor padrão para esse parâmetro é de 96 horas para uma linha de costa rochosa e de 24 horas para uma arenosa.

4.3.4 Processos de Intemperismo do óleo

Os processos de intemperismo computados no MEDSLIK-II são baseados em algoritmos de destino do derrame segundo (MACKAY; PATERSON; TRUDEL, 1980). Esses processos (evaporação, dispersão, emulsificação e espalhamento) determinam a taxa de variação das variáveis de estado do tipo derrame. Algumas constantes que são utilizadas nos processos de intemperismo, e os respectivos valores configurados como padrão no modelo, são apresentadas na Tabela 4.3.

- **Evaporação**

O processo de evaporação é o primeiro processo a ocorrer após o derrame. Para a camada TK, taxa de variação do volume devido à esse processo é dada pela equação (4.24), onde $\frac{df_{TK}}{dt}|_{(E)}$ é a variação da fração de óleo evaporada dada por (4.25).

$$\frac{dV^{TK}}{dt}|_{(E)} = \frac{df_{TK}}{dt}|_{(E)} [V^{TK}(t_0) + V^{TN}(t_0)] \quad (4.24)$$

$$\frac{df_{TK}}{dt}|_{(E)} = \frac{P_0 e^{-cf_{TK}t}}{P_{oil}} K_M \frac{A^{TK}}{V^{TK}} (1 - f_{TK}) \quad (4.25)$$

P_{oil} é a pressão de vapor do óleo dada por (4.26), P_0 é a pressão de vapor inicial do óleo que depende do tipo de óleo escolhido nas configurações iniciais, c é a

constante que mede a taxa de decrescimento da pressão de vapor com a fração já evaporada, K_M é a exposição evaporativa ao vento (4.27) e W/W_0 é o módulo adimensional da velocidade do vento a 10 m.

$$P_{oil} = \frac{RT}{V_{MOL}} \quad (4.26)$$

$$K_M = C_1^{(E)} \left(3,6 \frac{W}{W_0} \right)^\gamma \quad (4.27)$$

Tabela 4.3 - Constantes utilizadas no cálculo dos processos de intemperismo do modelo de óleo MEDSLIK-II (DE DOMINICIS *et al.*, 2013a)

Constante	Nome da variável	Valor padrão
c	Taxa de variação da pressão de vapor com a fração evaporada	$12,0 \text{ s}^{-1}$
R	Constante dos gases	$8,2 \times 10^{-5} \text{ bar m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
V_{MOL}	Volume molar	$2 \times 10^{-4} \text{ mol m}^{-3}$
$C_1^{(E)}$	Taxa de evaporação	$8 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$
γ	Expoente da velocidade do vento na taxa de evaporação	0,78
W_0	Escala do vento	1 m s^{-1}
$K^{(E)}$	Fração evaporada na viscosidade do óleo	4,0
v_s	Velocidade de subida da gota pequena	$0,0003 \text{ m s}^{-1}$
u_m	Espessura da nuvem de gotículas	0,5 m
$C_1^{(D)}$	Velocidade de difusão para baixo das gotas pequenas	$0,001 \text{ m s}^{-1}$
$C_3^{(D)}$	Taxa de dispersão de todas as gotas pelas ondas	$0,8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
$C_4^{(D)}$	Dispersão a partir da camada espessa	50,0
η_{EM0}	Escala da viscosidade da emulsão	$10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
$C_5^{(D)}$	Dispersão a partir da camada fina	2000
τ	Tensão superficial da interface (óleo/água)	24 kg s^{-2}
τ_0	Escala da tensão superficial da interface (óleo/água)	24 kg s^{-2}
$C_1^{(M)}$	Fração de água na viscosidade da emulsão	0,65
$C_2^{(M)}$	Taxa de aumento da fração de água	$1,6 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$
$C_3^{(M)}$	Fração máxima da água recíproca	1,333
T_0^{TK}	Escala de espessura da camada espessa	1 m
$C_1^{(S)}$	Taxa de espalhamento da camada fina	$1,0 \text{ s}^{-1}$
$C_2^{(S)}$	Taxa de espalhamento da camada espessa	$150,0 \text{ s}^{-1}$
$C_3^{(S)}$	Dependência do espalhamento da camada fina pela espessura	0,0015 m
ϵ	Offset da espessura	$1 \times 10^{-5} \text{ m}$

Para a camada TN de óleo a taxa de variação é dada por (4.28), onde $\left. \frac{df_{TN}}{dt} \right|_{(E)}$ é dada por (4.29), considerando-se que o componente evaporativo da camada TN desaparece imediatamente, mas o volume TN é alimentado pelo processo de espalhamento da camada TK que, em geral ainda tem um volume evaporativo. Em (4.29) e f_{MAX} é a fração inicial do componente evaporativo e $(f_{MAX} - f_{TK})$ é o valor máximo da fração evaporativa a que pode ser obtido.

$$\left. \frac{dV^{TN}}{dt} \right|_{(E)} = \left. \frac{df_{TN}}{dt} \right|_{(E)} [V^{TK}(t_0) + V^{TN}(t_0)] \quad (4.28)$$

$$\left. \frac{df_{TN}}{dt} \right|_{(E)} = \left. \frac{dV^{TN}}{dt} \right|_{(S)} \frac{(f_{MAX} - f_{TK})}{V^{TN}} \quad (4.29)$$

Uma consequência do processo evaporativo é o aumento exponencial da viscosidade do óleo, que é calculada por (4.30), onde η_0 é a viscosidade inicial do óleo que depende do tipo de óleo escolhido e $K^{(E)}$ determina o aumento da viscosidade com a evaporação.

$$\eta = \eta_0 e^{K^{(E)} f_{TK}} \quad (4.30)$$

▪ Dispersão

Sob a ação de ondas, o óleo tende a dispersar para a coluna d'água. Essa dispersão pode ser permanente ou temporária, quando as gotas coalescem e voltam para a superfície. Uma das considerações para uma gota permanentemente dispersa é que a velocidade de subida da gota devido as forças de empuxo é aproximadamente igual a velocidade de difusão.

A taxa de variação do volume da camada TK devido à dispersão é dada por (4.31), onde X_s é o volume de gotas pequenas dado por (4.32), c_s é a fração de gotas pequenas dado por (4.33), S_{TK} é a fração de gotas pequenas de óleo disperso abaixo da camada TK dado por (4.34).

$$\left. \frac{dV^{TK}}{dt} \right|_{(D)} = \frac{1}{2} (C_1^{(D)} - v_s) c_s A^{TK} + \frac{dX_s}{dt} \quad (4.31)$$

$$X_s = c_s u_m A^{TK} \quad (4.32)$$

$$c_s = \frac{2T^{TK} \left(\frac{W}{W_0} + 1\right)^2 T^{TK} S_{TK}}{v_s + C_1^{(D)}} \quad (4.33)$$

$$S^{TK} = \left[1 + C_4^{(D)} \left(\frac{\eta_{EM}}{\eta_{EM0}}\right)^{1/2} \left(\frac{T^{TK}}{10^{-3}T_0^{TK}}\right) \left(\frac{\tau}{\tau_0}\right) \right]^{-1} \quad (4.34)$$

η_{EM} em (4.34) é a viscosidade do mousse formado no processo de emulsificação definida no tópico seguinte.

Para a camada TN apenas a dispersão de gotas pequenas é considerada e essas gotas são perdidas da superfície do derrame em uma taxa dada por (4.35), onde S_{TN} é a fração de gotas pequenas dispersas abaixo de camada TN dada por (4.36).

$$\left. \frac{dV^{TN}}{dt} \right|_{(D)} = C_3^{(D)} \left(\frac{W}{W_0} + 1\right)^2 T^{TN} A^{TN} S_{TN} \quad (4.35)$$

$$S_{TN} = \left(1 + C_5^{(D)} \frac{\tau}{\tau_0} \right)^{-1} \quad (4.36)$$

▪ Emulsificação

O principal efeito do processo de emulsificação é a formação de um mousse de viscosidade η_{EM} dada por (4.37), onde f^W é a fração de água no mousse calculada por (4.38). Esse aumento na viscosidade influencia no processo de dispersão do óleo.

$$\eta_{EM} = \eta \exp \left[\frac{2,5f^W}{1 - C_1^{(M)} f^W} \right] \quad (4.37)$$

$$\left. \frac{df^W}{dt} \right|_{(M)} = C_2^{(M)} \left(\frac{W}{W_0} + 1\right)^2 \left[1 - C_3^{(M)} f^W \right] \quad (4.38)$$

▪ Espalhamento

A taxa de variação do volume para as camadas TK e TK é dada por (4.39) e (4.40), respectivamente, onde FG é o espalhamento devido à gravidade de Fay (AL-RABEH; LARDNER; GUNAY, 2000) dado por (4.41).

$$\left. \frac{dV^{TK}}{dt} \right|_{(S)} = - \left. \frac{dV^{TN}}{dt} \right|_{(S)} + T^{TK} FG \quad (4.39)$$

$$\left. \frac{dV^{TN}}{dt} \right|_{(S)} = T^{TK} \left. \frac{dA^{TN}}{dt} \right|_{(S)} \quad (4.40)$$

$$FG = C_2^{(S)} (A^{TK})^{\frac{1}{3}} (T^{TK})^{\frac{4}{3}} \quad (4.41)$$

O incremento da área da camada TN é dado por (4.42) e a taxa de variação da área na camada espessa devido ao espalhamento é dada por (4.43).

$$\left. \frac{dA^{TN}}{dt} \right|_{(S)} = C_1^{(S)} (A^{TN})^{\frac{1}{3}} (T_0^{TK})^{\frac{4}{3}} \exp\left(\frac{-C_3^{(S)}}{T^{TK} + \epsilon}\right) \quad (4.42)$$

$$\left. \frac{dA^{TK}}{dt} \right|_{(S)} = \frac{1}{T^{TK}} \left. \frac{dV^{TK}}{dt} \right|_{(S)} \quad (4.43)$$

4.3.5 Transporte do óleo

Modelos lagrangeanos são baseados na ideia que as partículas se movem devido a ação de correntes, ventos e efeitos de gravidade e turbulência. A distribuição final de muitas partículas resulta em uma estimativa estocástica do campo de concentração do óleo. A variação da posição das partículas é dada pelas equações desacopladas de Langevin (4.44), onde $\mathbf{A}(\mathbf{x}_k, t)$ é o tensor que representa a parte determinística do fluxo (campo médio das correntes), $\mathbf{B}(\mathbf{x}_k, t)$ é o tensor que caracteriza o movimento aleatório, e $\xi(t)$ é um fator aleatório.

$$\frac{d\mathbf{x}_k(t)}{dt} = \mathbf{A}(\mathbf{x}_k, t) + \mathbf{B}(\mathbf{x}_k, t)\xi(t) \quad (4.44)$$

No MEDSLIK-II a equação (4.44) assume a forma (4.45) para o deslocamento, segundo Risken (1989). Nessa equação \mathbf{A} é diagonal e igual as componentes do campo de velocidade Euleriano, \mathbf{B} é diagonal e igual aos coeficientes de difusão turbulenta K_x, K_y, K_z nas três direções e Z_1, Z_2, Z_3 são vetores de amplitude aleatória.

$$d\mathbf{x}_k(t) = \begin{pmatrix} U(\mathbf{x}_k, t) \\ V(\mathbf{x}_k, t) \\ W(\mathbf{x}_k, t) \end{pmatrix} dt + \begin{pmatrix} \sqrt{2K_x} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{2K_y} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2K_z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{pmatrix} \sqrt{dt} \quad (4.45)$$

Para as partículas na superfície e dispersas a equação (4.45) assume a forma (4.46).

$$d\mathbf{x}_k(t) = \begin{pmatrix} U(x_k, y_k, z_k, t) \\ V(x_k, y_k, z_k, t) \\ 0 \end{pmatrix} dt + \begin{pmatrix} dx'_k(t) \\ dy'_k(t) \\ dz'_k(t) \end{pmatrix} \quad (4.46)$$

$dx'_k(t), dy'_k(t), dz'_k(t)$ são os termos de transporte estocásticos escritos como (4.47. a, b, c), onde r é um número real aleatório com valores entre 0 e 1, K_h é a

difusividade turbulenta horizontal prescrita como 2 m s^{-1} e K_v é a difusividade turbulenta vertical prescrita como $0,01 \text{ m s}^{-1}$ dentro e $1 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ abaixo da camada de mistura.

$$dx'_k(t) = [2r - 1]\sqrt{6K_h dt} \quad (\mathbf{a})$$

$$dy'_k(t) = [2r - 1]\sqrt{6K_h dt} \quad (\mathbf{b}) \quad (\mathbf{4.47})$$

$$dz'_k(t) = [2r - 1]\sqrt{6K_h dt} \quad (\mathbf{c})$$

Os termos determinísticos na equação (4.46) são expandidos de forma a obter as diferentes componentes em (4.48) para a superfície ($\sigma = 0$) e para as partículas dispersas ($\sigma = 1$).

$$\begin{cases} \sigma = 0 & d\mathbf{x}_k(t) = [\mathbf{U}_C(x_k, y_k, 0, t) + \mathbf{U}_W(x_k, y_k, t) + \mathbf{U}_S(x_k, y_k, t)]dt + d\mathbf{x}'_k(t) \\ \sigma = 1 & d\mathbf{x}_k(t) = \mathbf{U}_C(x_k, y_k, z_k, t)dt + d\mathbf{x}'_k(t) \end{cases} \quad (\mathbf{4.48})$$

Nessa equação, \mathbf{U}_C é o termo do campo de velocidade Euleriano, \mathbf{U}_W é um termo de velocidade local de correntes geradas pelo vento (correntes de Ekman) e \mathbf{U}_S é o termo de correntes geradas por ondas ou pela deriva de Stokes. \mathbf{U}_C é obtido a partir da saída de modelos oceânicos, no caso do presente trabalho, a partir das saídas do ROMS. \mathbf{U}_W é uma correção para processos mal resolvidos na dinâmica superficial, que pode ser ativado ou desativado de acordo com a capacidade do modelo oceânico de resolver bem esses processos. \mathbf{U}_S é dado pela equação (4.49. a, b), onde $\vartheta = \arctan(\frac{W_x}{W_y})$ é a direção do vento de componentes zonal W_x e meridional W_y e D_S é a direção de propagação de onda dada por (4.50).

$$U_S = D_S \cos\vartheta \quad (\mathbf{a}) \quad V_S = D_S \sin\vartheta \quad (\mathbf{b}) \quad (\mathbf{4.49})$$

$$D_S(z = 0) = 2 \int_0^\infty \omega k(\omega) S(\omega) d\omega \quad (\mathbf{4.50})$$

Em (4.50) ω é a frequência angular, $k(\omega)$ é o número de onda e $S(\omega)$ é o espectro de onda obtido pela parametrização JONSWAP (HASSELMANN *et al.*, 1973) em função do vento e da pista de vento.

5 METODOLOGIA

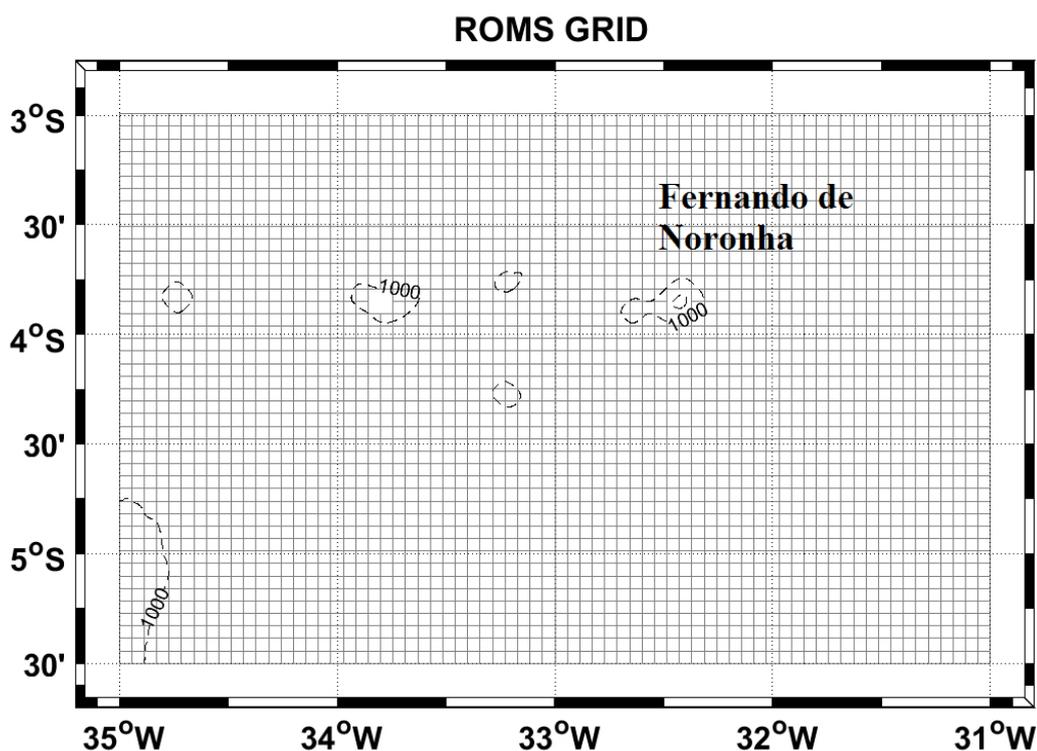
Para o acoplamento do ROMS com o MEDSLIK-II foram criadas sub-rotinas no código fonte e em alguns códigos secundários do MEDSLIK-II (*medslik_II.sh*, *Extract_II.for* e *medslik_II.for*). Estas novas rotinas são necessárias para que o mesmo reconheça os arquivos de saída do ROMS (no formato netCDF) como entrada das forçantes (TSM, correntes e ventos) para o MEDSLIK-II. O Anexo 2 apresenta o fluxograma com o esquema operacional do MEDSLIK-II e os arquivos nos quais as novas sub-rotinas foram adicionadas (em vermelho).

5.1 Configuração do ROMS

As configurações do modelo ROMS para a simulação da circulação foram baseadas nas configurações adotadas por Tchamabi *et al.* (2017), que são:

- *Limites da malha* - Latitude entre 3°S e 5,5°S; longitude entre 35°W e 31°W (Fig. 5.1).
- *Resolução horizontal* - 1/70° (~1,5 km)
- *Resolução vertical* - 40 níveis sigma e parâmetros de *stretching* escolhidos de forma a aumentar a resolução na superfície e no fundo com $\theta_s = 8$ e $\theta_b = 1$ (SONG; HAIDVOGEL, 1994).
- *Batimetria* - Dados de cartografia do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) mesclado com dados da base de dados GEBCO (*Global Earth Bathymetric Chart of the Oceans*, <http://www.gebco.net/>) com resolução de 0.5'. Após a interpolação a batimetria foi suavizada.
- *Esquema advectivo* - RSUP3 (LEMARIÉ *et al.*, 2012; MARCHESIELLO; DEBREU; COUVELARD, 2009).
- *Parametrização da mistura vertical* - Esquema não-local de camada planetária *K-profile-paramaterization* adotado para os processos não resolvidos de escala inferior ao grid (LARGE; MCWILLIAMS; DONEY, 1994).
- *Forçantes superficiais* - Entrada de fluxo de calor e água doce do *Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set* (COADS) com campos médios mensais com intervalo de grid a cada 0,5° (DA SILVA, 1994). Os cisalhamentos do vento foram derivados da climatologia mensal do *NASA Quick Scatterometer* (Quikscat), conhecido como SCOW (*Scatterometer Climatology of Ocean Winds*), com intervalos de grid de resolução 0,25 ° (RISIEN; CHELTON, 2008).

Figura 5.1 - Domínio computacional do ROMS (Latitude entre 3°S e 5,5°S; longitude entre 35°W e 31°W)



- *Condições de contorno Horizontais* - Aberta nas 4 fronteiras. Para melhorar a solução numérica, foram utilizados os dados de TSM de alta resolução (9,28 km) do *Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) - Pathfinder* para o cálculo do fluxo de calor (CASEY; CORNILLON, 1999).

- *Condições iniciais* – O modelo foi iniciado e forçada com as distribuições de temperatura e salinidade extraídas da climatologia mensal do *World Ocean Atlas 2013 (WOA)*, e as velocidades iniciais determinadas por geostrofia.

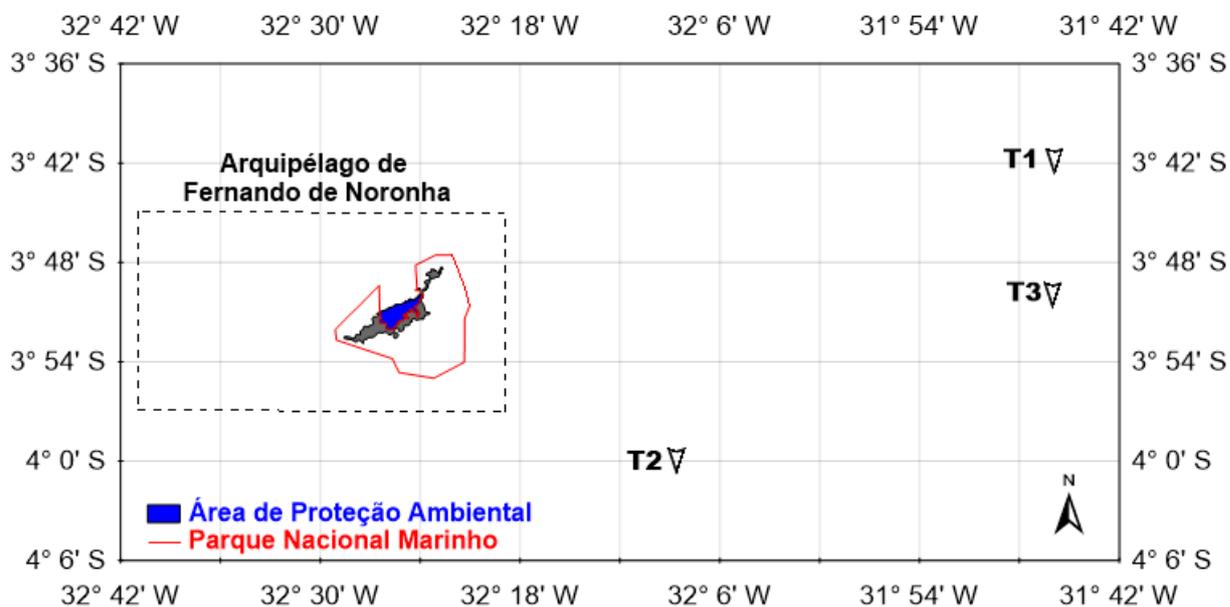
As simulações foram integradas por 10 anos com o passo de tempo mínimo de 4 minutos e a média das saídas a cada 2 dias.

5.2 Configuração do MEDSLIK-II

Como locais iniciais do derrame foram determinados três pontos – **T1** (3°41,9'S; 31°45,9'W), **T2** (4°00,0'S; 32°08,6'W) e **T3** (3°50,0'S; 31°46,0'W) do lado leste de da ilha de Fernando de Noronha (Fig. 5.2). Estes locais foram definidos com base nas posições de distâncias mínimas da rota de petroleiros com relação ao arquipélago, observadas no website *Marine Traffic* (MARINETRAFFIC, 2017) durante o mês de

abril de 2017. O *MarineTraffic* utiliza o sistema de identificação automático (Automatic Identification System - AIS) para rastreamento de embarcações e discrimina o tipo de embarcação como passeio, pesca, petroleiros e de carga.

Figura 5.2 - Pontos de vazamento inicial do derrame (T1, T2 e T3).



Pontos de vazamento iniciais **T1** (3°41.9'S, 31°45.9'W), **T2** (4°00.0'S, 32°08.6'W) e **T3** (3°50.0'S, 31°46.0'W) em relação ao Arquipélago de Fernando de Noronha. A Área de Proteção Ambiental (APA) e o Parque Nacional Marinho (PARNAMAR) de Fernando de Noronha são delimitados em azul e vermelho, respectivamente.

A escolha desses pontos apenas no lado leste da ilha levou em consideração o sentido da cSEC (leste-oeste) que atua contra FN e que teria um maior papel no transporte e dispersão do óleo para a costa. O °API considerado foi de 26, e sua escolha foi atribuída ao tipo de óleo – grau API médio entre 22 e 30 – produzido nos blocos exploratórios do Brasil. O volume de óleo derramado inicial foi definido como 60.000 toneladas o que corresponde à metade da capacidade do navio Suezmax da Transpetro.

Com o intuito de analisar o papel da variabilidade da corrente zonal, combinada com a ação do vento, sobre o transporte do óleo derramado foram escolhidos dois períodos de simulação para cada um dos três pontos, sendo um em março e outro em julho. Isto resulta no total de seis cenários avaliados, com saídas horárias e figuras a cada 6 horas, desde o início do derrame até 48 horas (limite de previsão do MEDSLIK-II). A escolha desses dois períodos para as simulações permite a análise do cenário

de maior risco com março e julho correspondendo, respectivamente ao início da intensificação da cSEC com uma menor intensidade de ventos e ao período de maior intensidade da cSEC com o aumento da intensidade dos ventos alísios de sudeste.

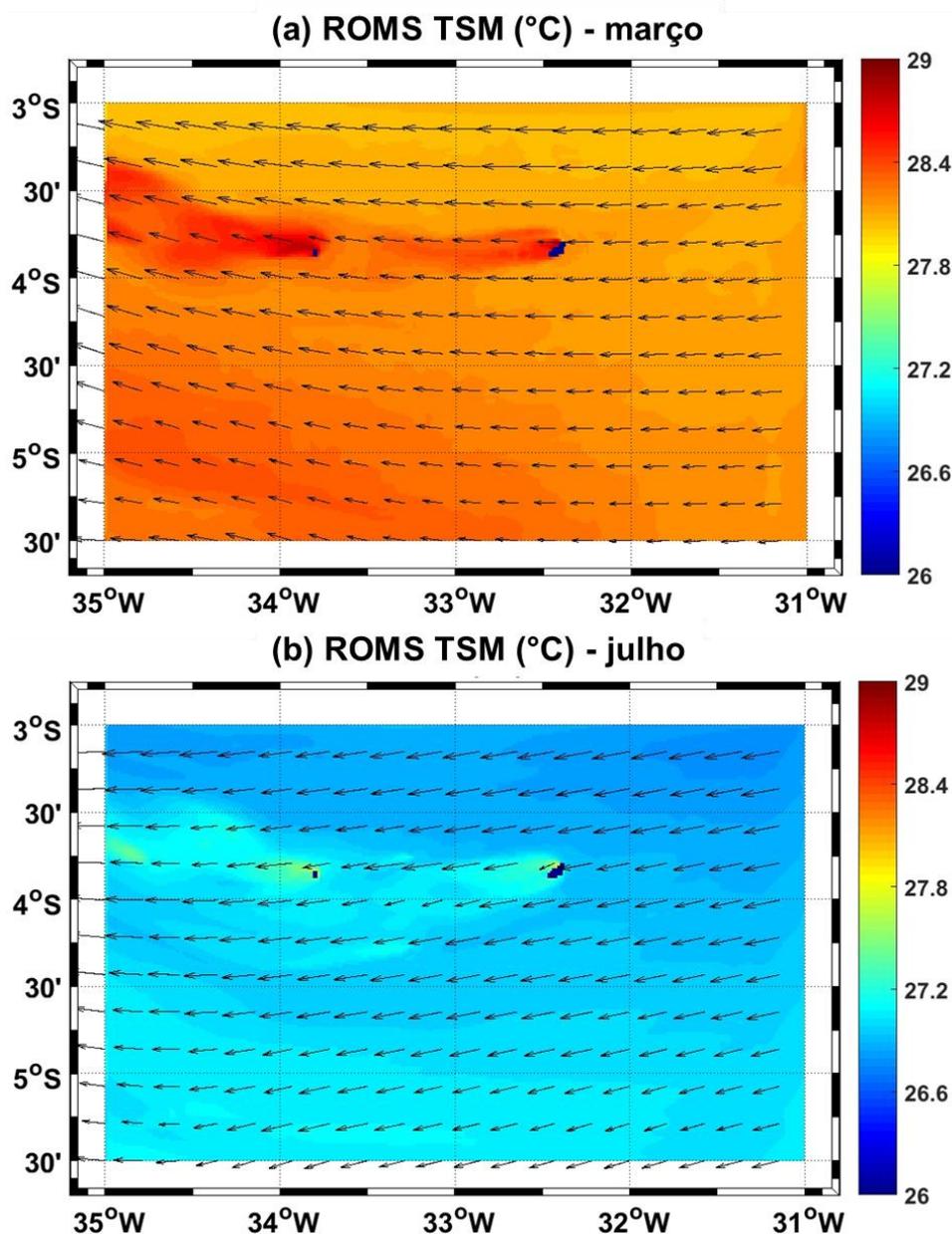
Todos os parâmetros e constantes do MEDSLIK-II foram utilizados de acordo com os valores padrão e a deriva de Stokes foi ativada como recomendado por De Dominicis *et al.* (2013a).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Circulação oceânica

A Figura 6.1 apresenta os resultados do ROMS para a direção da corrente superficial e temperatura da superfície do mar para março e julho. Os meses analisados estão compreendidos no período de maior temperatura do mar para a área de estudo. A TSM em março foi maior do que para julho, com valores médios de $28,26^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,10^{\circ}\text{C}$) e $26,85^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,09^{\circ}\text{C}$), respectivamente.

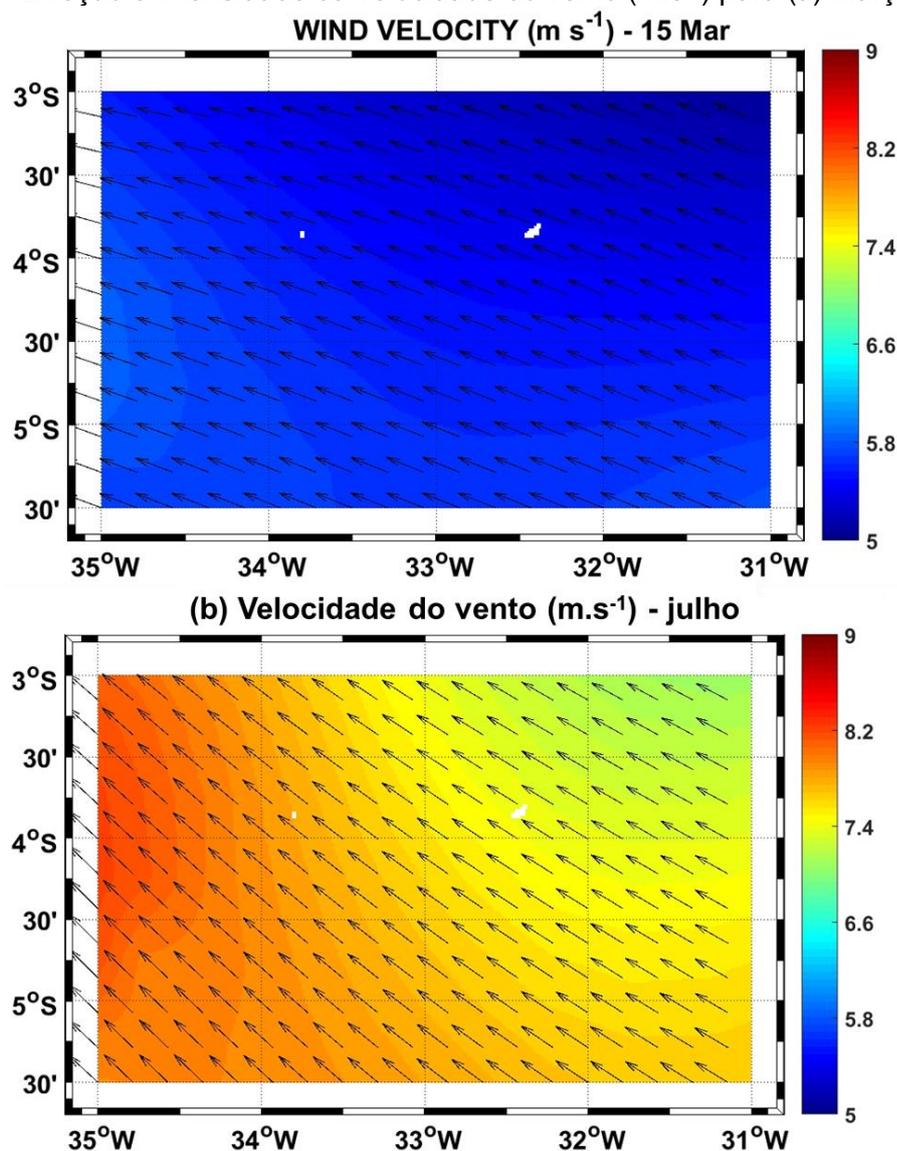
Figura 6.1 – Direção da corrente superficial e intensidade da temperatura da superfície do mar (TSM) em $^{\circ}\text{C}$ para (a) março e (b) julho.



A intensidade média da corrente superficial variou de $0,39 \text{ m.s}^{-1}$ ($\pm 0,06 \text{ m.s}^{-1}$) com predominância da componente zonal em março para $0,34 \text{ m.s}^{-1}$ ($\pm 0,04 \text{ m.s}^{-1}$) em julho, com um pequeno desvio para nordeste.

A Figura 6.2 apresenta a velocidade do vento utilizada como forçante para o ROMS, para março e julho. A velocidade do vento para o mês de março foi de $4,66 \text{ m.s}^{-1}$ ($\pm 0,14 \text{ m.s}^{-1}$) e de $7,08 \text{ m.s}^{-1}$ ($\pm 0,14 \text{ m.s}^{-1}$) para julho.

Figura 6.2 – Direção e intensidade da velocidade do vento (m.s^{-1}) para (a) março e (b) julho.

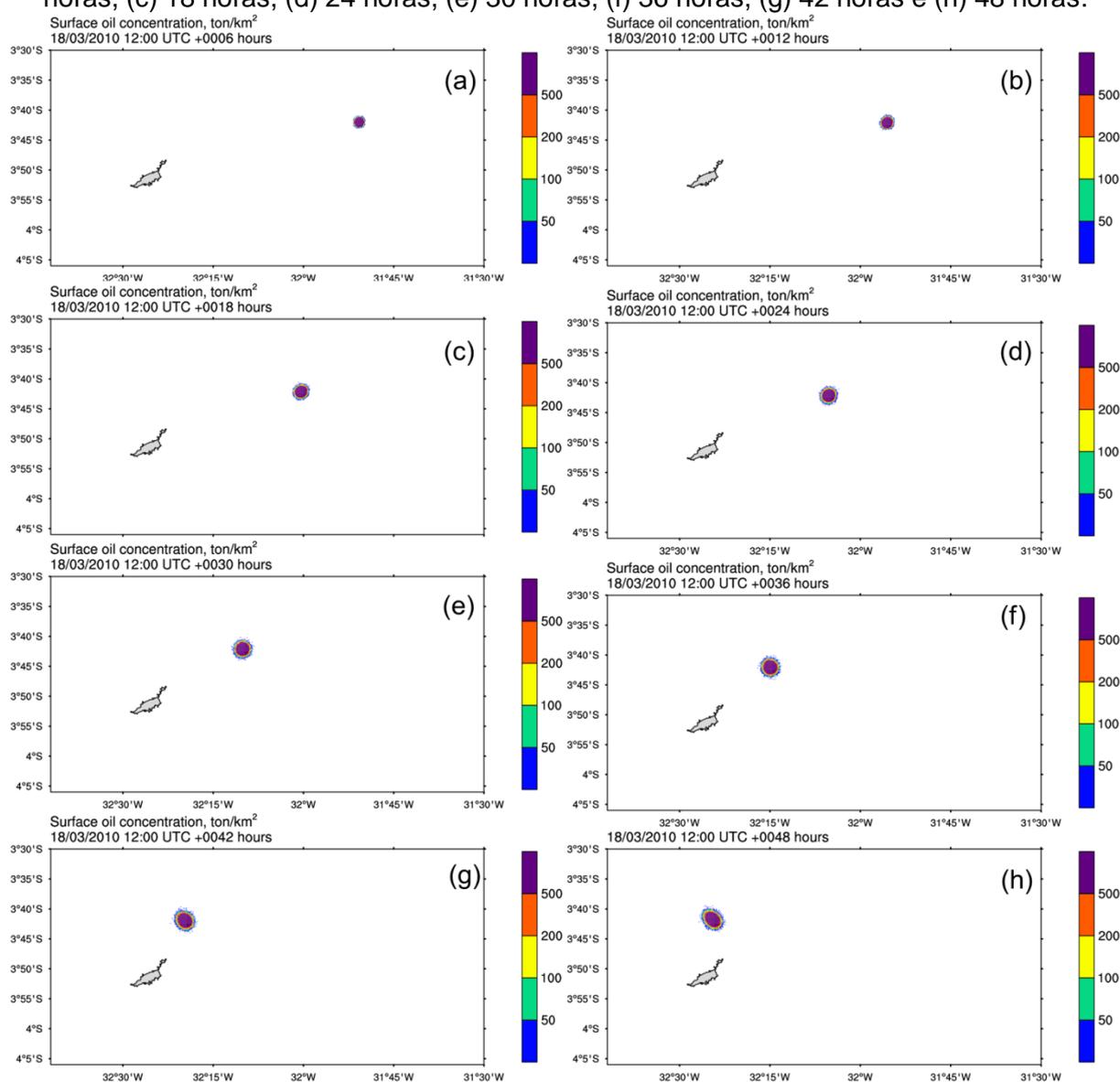


6.2 Evolução das plumas derramadas

As Figuras 6.3 e 6.4 apresentam as concentrações do óleo (ton.km^{-2}) para o derrame no cenário de T1 para março e julho, respectivamente.

Após meia hora do início do derrame em T1 o percentual de óleo evaporado foi de 1,91% e 2,54% para março e julho respectivamente. Após 1 hora e meia 24,45% do volume do óleo foi evaporado para ambos os períodos, o que corresponde ao percentual máximo da fração evaporativa do derrame definida pelo modelo. Após 48 horas, ainda restava 75,23% do derrame na superfície para março e 75,02% para julho. Essa pequena diferença se deu devido ao maior percentual de partículas dispersas na coluna d'água ao fim da simulação no mês de julho (0,52%) quando comparada com março (0,30%).

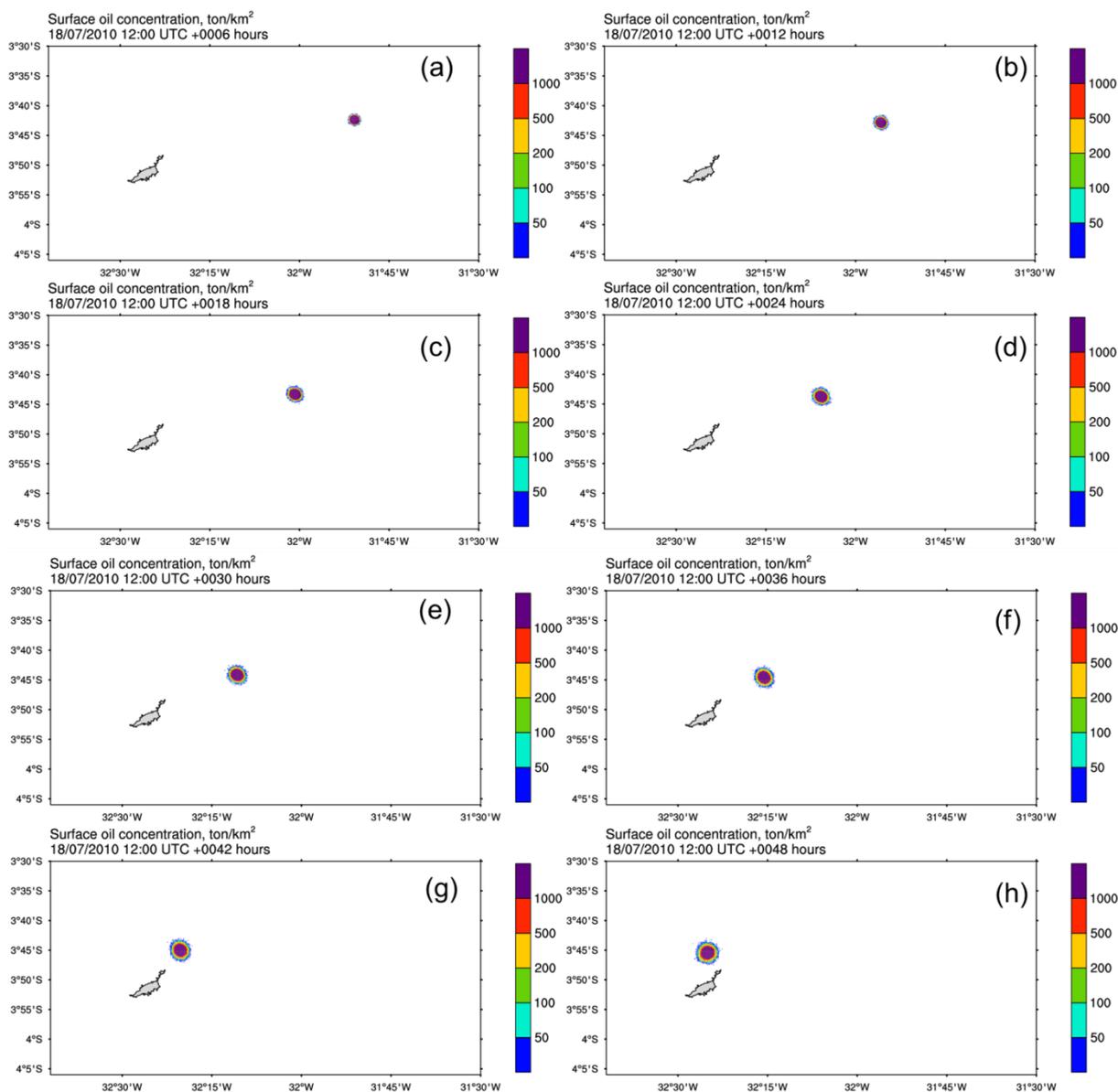
Figura 6.3 - Cenário T1 – março. Concentração do óleo ($\text{ton}\cdot\text{km}^{-2}$) após (a) 6 horas, (b) 12 horas, (c) 18 horas, (d) 24 horas, (e) 30 horas, (f) 36 horas, (g) 42 horas e (h) 48 horas.



Para março, a emulsão formada após 30 minutos sofreu um aumento de viscosidade de $58,37 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para $2466,48 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ sem estabilização após as 48 horas. Para julho a viscosidade inicial da emulsão foi de $79,48 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (30 min) com aumento e estabilização em 31 horas para $2668,16 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Para ambos os cenários de T1 o derrame não alcançou a costa de FN, entretanto o desvio para norte da ilha foi maior para março do que para julho. O derrame para este último às 48 horas se encontrava dentro da área do Arquipélago de Fernando de Noronha (Fig. 6.4h).

Figura 6.4 - Cenário T1 – julho. Concentração do óleo (ton.km^{-2}) após (a) 6 horas, (b) 12 horas, (c) 18 horas, (d) 24 horas, (e) 30 horas, (f) 36 horas, (g) 42 horas e (h) 48 horas.

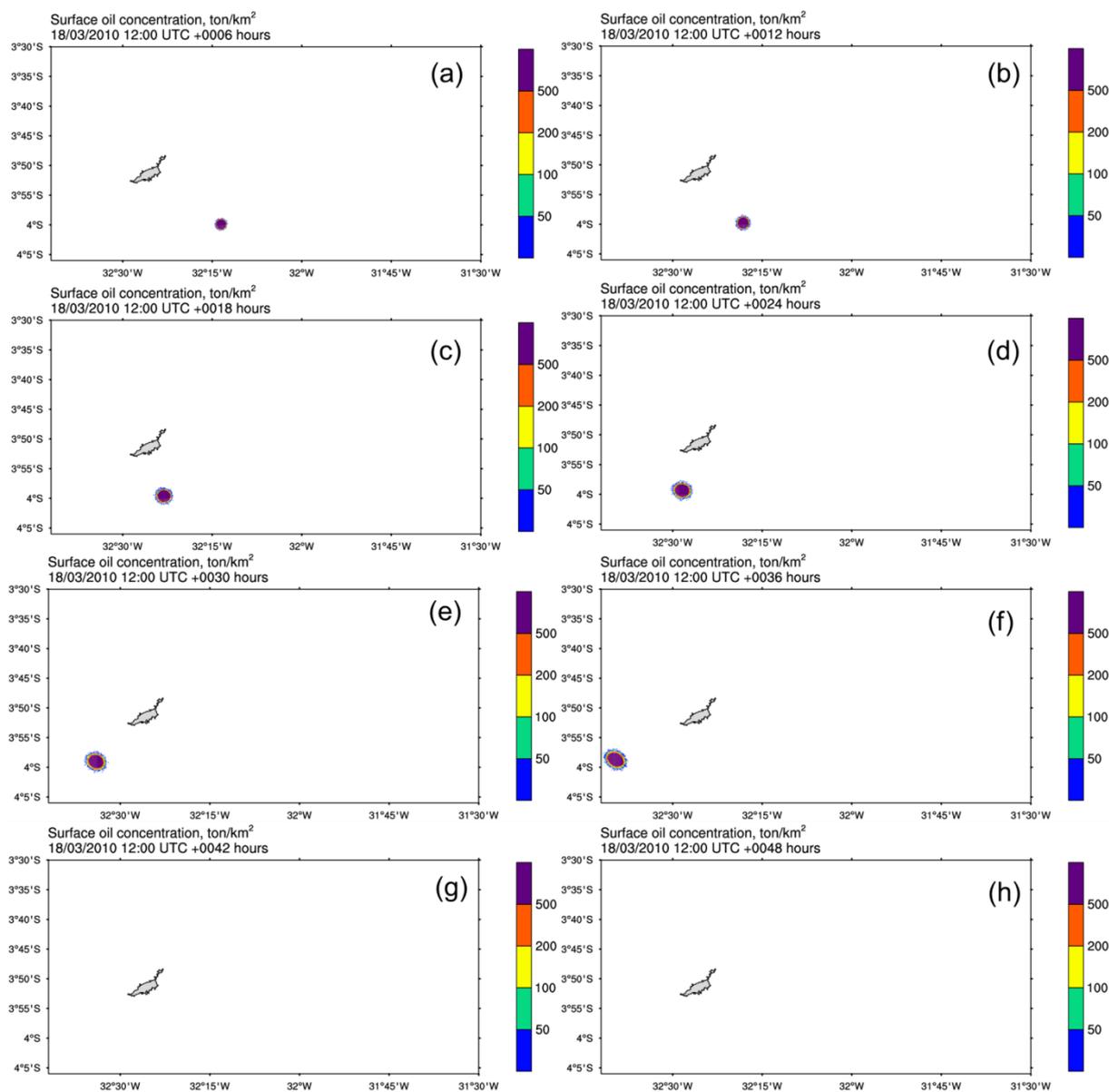


As Figuras 6.5 e 6.6 apresentam as concentrações do óleo ($\text{ton}\cdot\text{km}^{-2}$) para o derrame no cenário de T2 para março e julho, respectivamente.

Para T2 o percentual evaporado após 30 minutos foi de 1,94% para março e 2,55% para julho. O máximo do percentual evaporativo do derrame (24,45%) foi atingido após 1 hora e meia para março e 1 hora para julho.

O percentual do volume de óleo na superfície ao fim da simulação de T2 foi de 75,24% e 75,01%, com o percentual disperso final de 0,31% e 0,59% para março e julho, respectivamente.

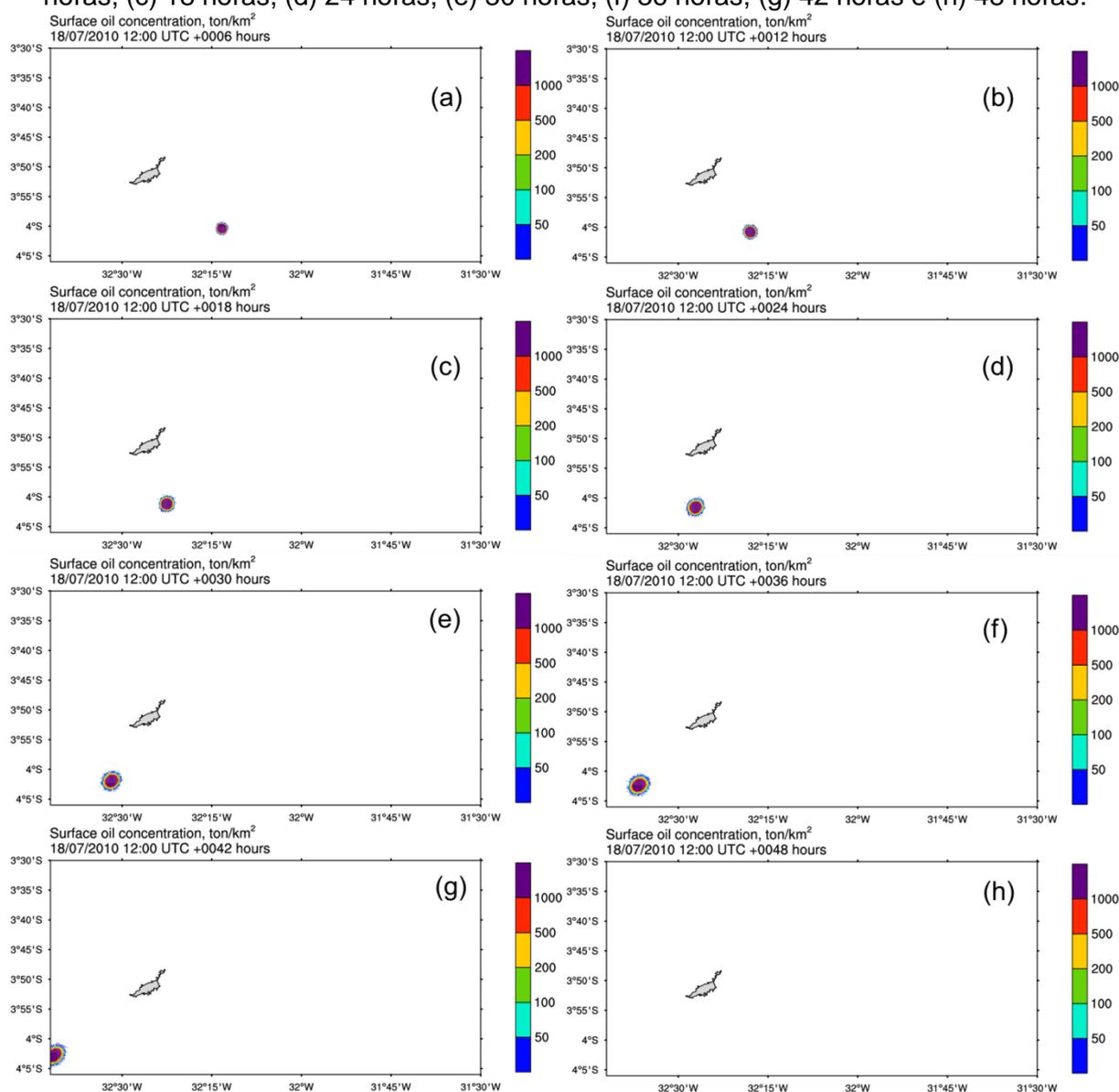
Figura 6.5 - Cenário T2 – março. Concentração do óleo ($\text{ton}\cdot\text{km}^{-2}$) após (a) 6 horas, (b) 12 horas, (c) 18 horas, (d) 24 horas, (e) 30 horas, (f) 36 horas, (g) 42 horas e (h) 48 horas.



A viscosidade da emulsão formada aos 30 minutos foi de $58,84 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e de $79,81 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para março e julho, respectivamente. A viscosidade da emulsão foi estabilizada após 19 horas para julho (em $2662,48 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) e não estabilizou para o cenário de março ($2463.76 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ após 48 horas).

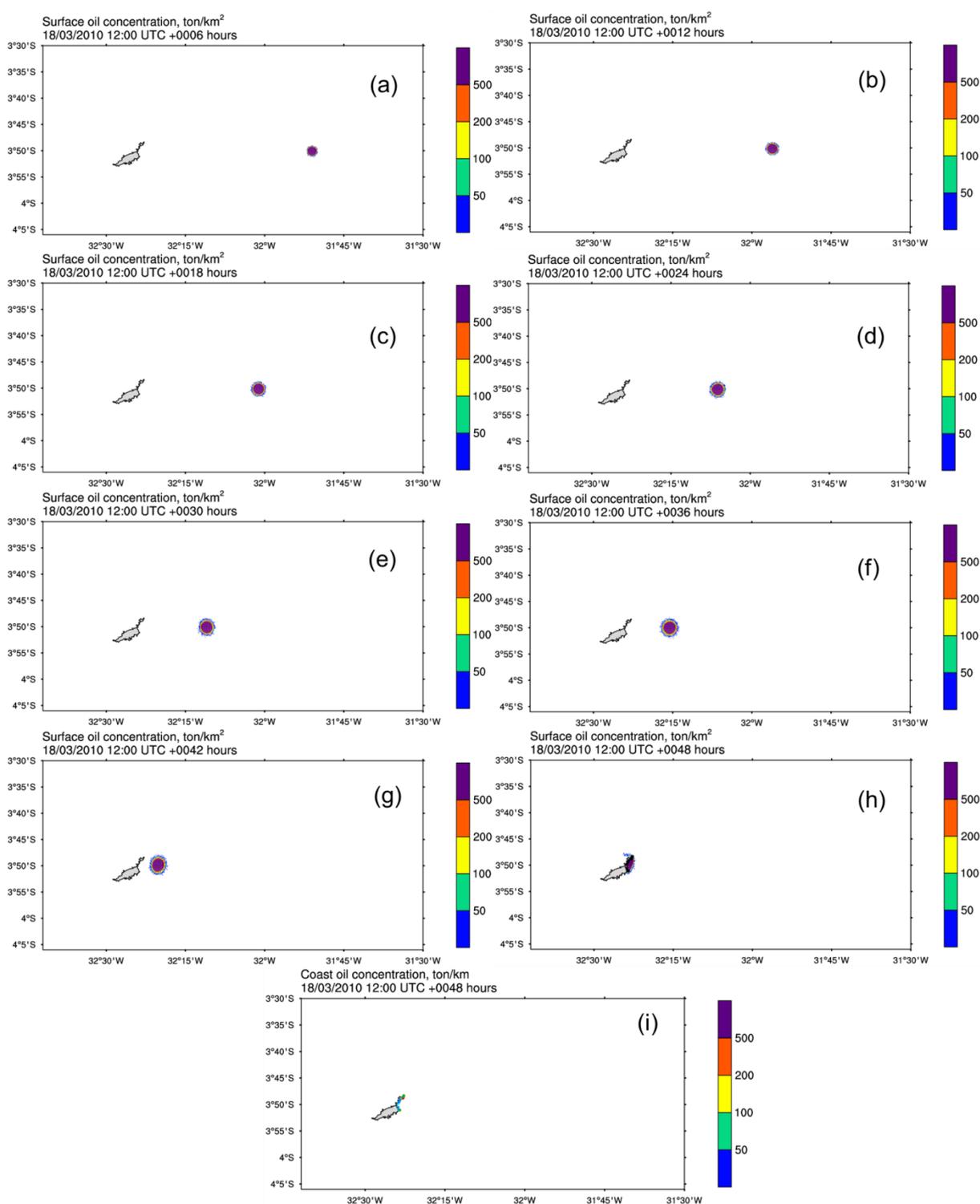
Assim como no cenário T1, no cenário T2 o derrame não alcançou a costa de FN, com a diferença residindo no desvio do derrame para sul da ilha e para fora do domínio após 39 horas.

Figura 6.6 - Cenário T2 – julho. Concentração do óleo (ton.km^{-2}) após (a) 6 horas, (b) 12 horas, (c) 18 horas, (d) 24 horas, (e) 30 horas, (f) 36 horas, (g) 42 horas e (h) 48 horas.



As Figuras 6.7 e 6.8 apresentam as concentrações do óleo (ton.km⁻²) para o derrame no cenário de T3 para março e julho, respectivamente. A Figura 6.5i representa a concentração de óleo na costa (ton.km⁻¹).

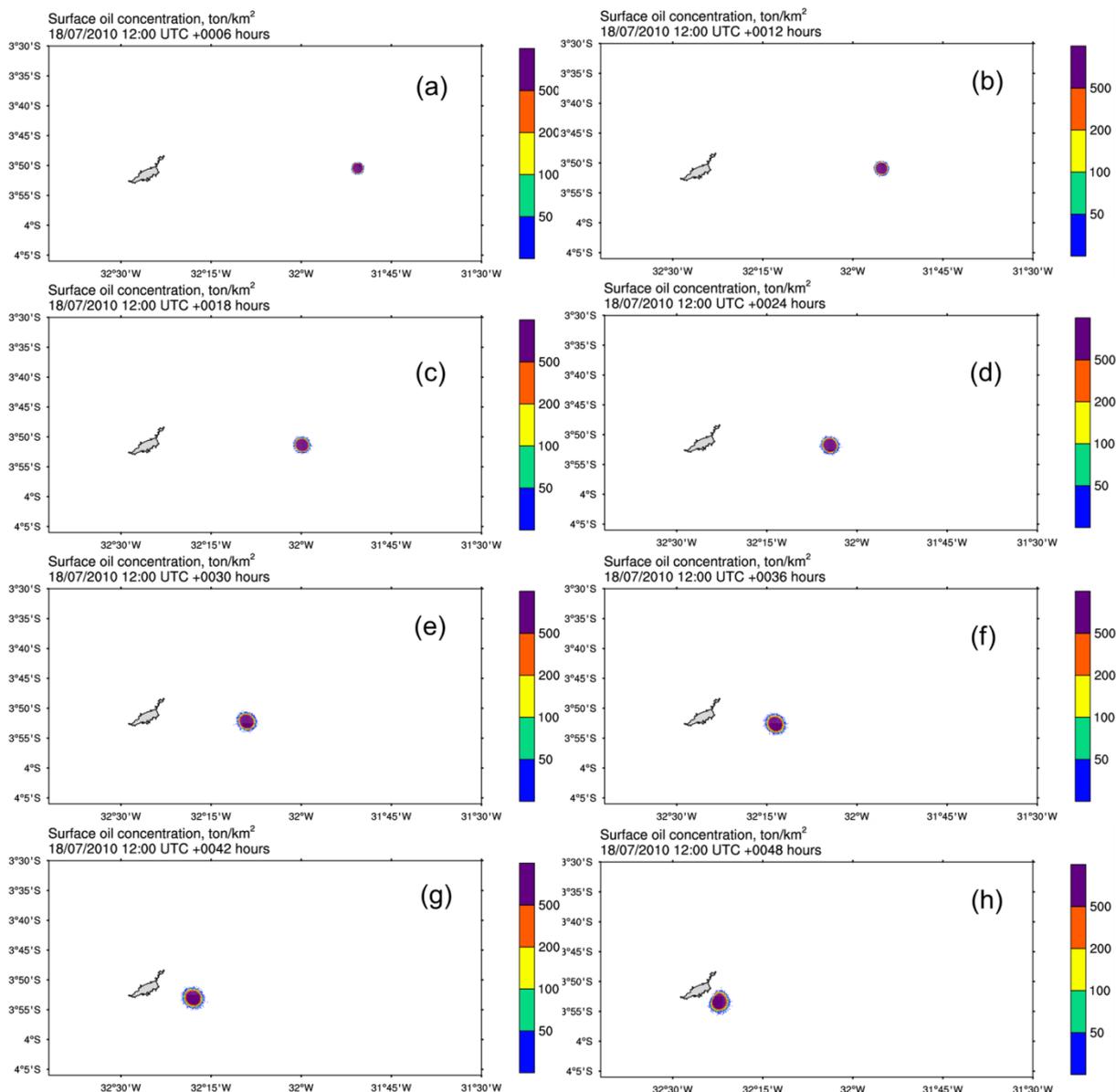
Figura 6.7 - Cenário T3 – março. Concentração do óleo na superfície (ton.km⁻²) após (a) 6 horas, (b) 12 horas, (c) 18 horas, (d) 24 horas, (e) 30 horas, (f) 36 horas, (g) 42 horas, (h) 48 horas e (i) concentração na costa (ton.km⁻¹) após 48 horas.



Para o cenário T3 o percentual de óleo evaporado nos primeiros 30 min foi de 1,97% para março e 2,54% julho com o volume máximo de evaporação atingido após 1 hora e meia do início do derrame. O percentual de óleo final na superfície foi de 73,01% e 74,98% e o percentual disperso foi de 0,28% e 0,58% para março e julho, respectivamente.

Analogamente aos cenários para T1 e T2, a viscosidade da emulsão para T3 foi maior para o mês de julho ($79,59 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) do que para o mês de março ($58,63 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), com a estabilização do mousse após 28 horas em $2663,97 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ em julho e viscosidade final de $2466,42 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ em março sem estabilização.

Figura 6.8 - Cenário T3 – julho. Concentração do óleo na superfície ($\text{ton} \cdot \text{km}^{-2}$) após (a) 6 horas, (b) 12 horas, (c) 18 horas, (d) 24 horas, (e) 30 horas, (f) 36 horas, (g) 42 horas e (h) 48 horas.



No cenário de março para T3, o derrame atingiu a costa após 45 horas com um volume 2,25% do derrame total aderido na costa, o que corresponde a aproximadamente 1350 toneladas de óleo. Com relação ao cenário de julho, é provável que o derrame teria alcançado a costa de FN, entretanto, devido à previsão de curto prazo (48 horas) utilizada nas simulações, não foi possível a visualização do momento de chegada nem da concentração na costa.

Diante dos resultados das simulações, verifica-se que o processo que mais contribui para o baixo espalhamento do derrame foi a emulsificação. Isto ocorre devido à elevada velocidade dos ventos, que fornece energia para a formação de um mousse estável e de alta viscosidade. Esse mousse inibe o espalhamento e conseqüentemente, pode contribuir para a diminuição da área superficial onde atuam os processos evaporativos. Adicionalmente, para o tipo de óleo avaliado e provavelmente devido as altas temperaturas da região, o processo de evaporação não foi inibido pela emulsificação. Em todos os cenários avaliados, o percentual de evaporação alcançou o máximo (definido de acordo com o tipo de óleo) dentro de 1 ou 1 hora e meia a partir do início do derrame. A evaporação contribuiu para o aumento da densidade do óleo; entretanto, o aumento da densidade não foi suficiente para aumentar o percentual de partículas atingindo a coluna d'água e o fundo.

Com relação à aos períodos avaliados foram identificadas as tendências de taxas de evaporação iniciais maiores, intensificação dos processos de dispersão e de emulsificação para o período de julho, com relação a março. Este fato pode estar associado ao aumento da intensidade dos ventos e à maior intensidade da corrente para o mesmo período.

O processo de advecção para o tipo de óleo e os cenários avaliados teve um maior significado do que os processos de intemperismo para o comportamento do derrame. Para os cenários T1 e T2 houve o maior desvio do derrame para norte que para sul de FN. Esta característica dever ser reavaliada quando a possibilidade de servir como uma proteção natural para a Ilha, frente a possíveis derrames nas latitudes investigadas. Com a ressalva de que, para T1 no mês de julho, a posição do derrame às 48 horas dentro da área do Arquipélago, faz com que esse cenário também ofereça riscos para a região.

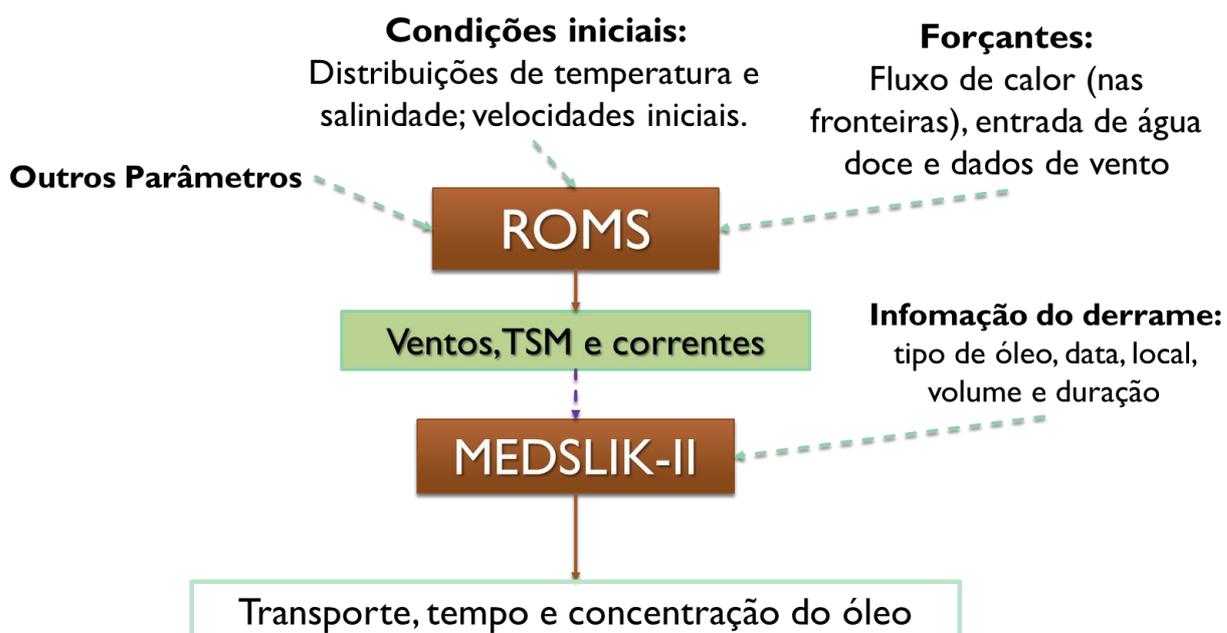
Quanto à localização dos pontos iniciais, existiu uma região crítica (entre T1 e T3) que apresentou um maior risco no caso de um derrame no lado leste de FN. A

região atingida pelo derrame pode ser mais ao norte de FN em março (mais próximo à ilha da Rata) ou mais para sul em julho (baía do Sueste). Outros cenários devem ser posteriormente avaliados para delimitar essa faixa crítica de risco ao longo do ano.

7 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

O presente trabalho fornece uma metodologia de aplicação de um modelo adaptado para a região equatorial que pode ser utilizado como uma ferramenta para mitigação e para formulação de planos de previsão no gerenciamento de riscos para regiões de interesse. O modelo acoplado ROMS/MEDSLIK-II permite o uso dos resultados de correntes, ventos e da temperatura da superfície do mar para o cálculo do transporte e da concentração do óleo, computando os processos de intemperismo, a partir de um derrame de óleo superficial (Fig. 7.1).

Figura 7.1 - Esquema simplificado da metodologia do modelo acoplado ROMS/MEDSLIK-II



A predominância das forçantes advectivas se contrapõem aos processos de intemperismo que tenderiam a diminuir o risco em regiões tropicais. A elevada velocidade de transporte do óleo diminui a janela de tempo para possíveis ações mitigatórias, o que faz com que ações preventivas sejam as opções mais viáveis diante de possíveis derrames.

Com a utilização dos mapas de rotas de navios em tempo real (*Marine Traffic*) foi possível se observar a presença de navios petroleiros dentro de um mínimo de 50 km do mar de fora à leste de FN. Se considerarmos o potencial aumento de eventos

extremos com as mudanças climáticas, teremos que considerar a possibilidade do aumento do risco de derrames de óleo para essa região.

Apesar de ser classificada como um Área Ecologicamente Sensível, de estar de acordo com os parâmetros estabelecidos para a designação de uma área particularmente sensível (*Particularly Sensitive Sea Area* – PSSA/ MARPOL), além de ser passível de proteção por apresentar risco potencial à poluição advinda do tráfego marítimo internacional, as restrições ao tráfego de embarcações nos entornos do AFN são mínimas. As principais legislações são voltadas para o tráfego no mar de dentro e restrições portuárias. Com relação ao tráfego internacional, a NORMAM 08/DPC (DPC-MB, 2013) reconhece o direito de passagem inocente de embarcações de qualquer nacionalidade no mar territorial brasileiro.

De acordo com os resultados da simulação, o local onde o óleo atingiu a costa (cenário T3) faz parte da área do Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha. Os cenários avaliados ressaltam a necessidade de uma reavaliação dos riscos para a região e da consequente delimitação de uma região crítica proibitiva para o tráfego de grandes navios.

Adicionalmente, novos cenários que contemplem diferentes tipos e volumes de óleo devem ser analisados de forma a melhor estudar os efeitos dessas propriedades para esta e outras áreas da Margem Equatorial.

REFERÊNCIAS

- ARAKAWA, A.; LAMB, V. R. Computational design of the basic dynamical process of the UCLA general circulation model. **Methods in Computational Physics**, v. 17, p. 173–265, 1977.
- ABBASNEZHAD, H.; FOGHT, J. M.; GRAY, M. R. Adhesion to the hydrocarbon phase increases phenanthrene degradation by *Pseudomonas fluorescens* LP6a. *Biodegradation*, v. 22, n. 3, p. 485-496, 2011.
- ABBASNEZHAD, H.; GRAY, M.; FOGHT, J. M. Influence of adhesion on aerobic biodegradation and bioremediation of liquid hydrocarbons. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 92, n. 4, p. 653, 2011.
- ALMEIDA, F. Arquipélago de Fernando de Noronha-Registro de monte vulcânico do Atlântico Sul. **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. 1ª ed., Brasília: DNPM/CPRM-Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP)**, p. 361–368, 2002.
- 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. D. *et al.* Cnidarians of Saint Peter and St. Paul Archipelago, Northeast Brazil. In: **Proceedings of 9th International Coral Reef Symposium**. 2002. p. 567-572.
- ANP. **Boletim Mensal da Produção de Petróleo e Gás Natural**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/publicacoes/boletins-anp/2395-boletim-mensal-da-producao-de-petroleo-e-gas-natural>>. Acesso em: 6 out. 2017.
- AOSRT. Arctic Oil Spill Response Joint Industry Programme. Environmental Impacts of Arctic Oil Spills and Arctic Spill Response Technologies. **Literature Review and Recommendations**, 2014. Disponível em: <<http://neba.arcticresponsetechnology.org/report>>. Acesso em: 6 out. 2017.
- ARAUJO, M.; CINTRA, M. Modelagem matemática da circulação oceânica na região equatorial do Arquipélago de São Pedro e São Paulo. **O Arquipélago de São Pedro e São Paulo**, v. 10, p. 107–114, 2009.
- 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, n. sp1, p. 512-516, 2016.
- BECKER, H. Hidrologia dos bancos e ilhas oceânicas do nordeste brasileiro. **Uma contribuição ao programa REVIZEE. Departamento de Oceanografia Física, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo**, p. 158, 2001.

BECKMANN, A.; HAIDVOGEL, D. B. Numerical Simulation of Flow around a Tall Isolated Seamount. Part I: Problem Formulation and Model Accuracy. **Journal of Physical Oceanography**, v. 23, n. 8, p. 1736–1753, 1993.

BIK, H. M. *et al.* Dramatic shifts in benthic microbial eukaryote communities following the Deepwater Horizon oil spill. **PLoS One**, v. 7, n. 6, p. e38550, 2012.

BOBRA, M. **Photolysis of petroleum**. Consulthem, 1992. Disponível em: <https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:25028279>.

BOULOUBASSI, I.; SALIOT, A. Investigation of anthropogenic and natural organic inputs in estuarine sediments using hydrocarbon markers (NAH, LAB, PAH). **Oceanologica Acta**, v. 16, n. 2, p. 145–161, 1993.

BRAKSTAD, O. G.; NORDTUG, T.; THRONE-HOLST, M. Biodegradation of dispersed Macondo oil in seawater at low temperature and different oil droplet sizes. **Marine Pollution Bulletin**, v. 93, n. 1, p. 144–152, 2015.

BRASIL, DNPM. **Economia Mineral do Brasil**. Brasília, DF, Brasil: Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM/MME, 2009.

BRASIL. Decreto n. 92.755 de 05 de junho de 1986. Declara Área de Proteção Ambiental o território federal de Fernando de Noronha, o Atol das Rocas e os Penedos de São Pedro e São Paulo, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 06 jun. 1986. p. 8218. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/1985-1987/d92755.htm>. Acesso em: nov. 2017.

BRASIL. Decreto n. 96.693 de 14 de setembro de 1988. Cria o Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 15 nov. 1988. p. 17698. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/d96693.htm>. Acesso em: nov. 2017.

BRASIL. Lei n. 9.478, de 6 de agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo (ANP) e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 6 ago. 1997. Seção I, p. 16925. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9478.htm>. Acesso em: nov. 2017

BRYAN, K. A numerical method for the study of the circulation of the world ocean. **Journal of Computational Physics**, v. 4, n. 3, p. 347–376, 1969.

CASEY, K. S.; CORNILLON, P. A comparison of satellite and in situ-based sea surface temperature climatologies. **Journal of Climate**, v. 12, n. 6, p. 1848–1863, 1999.

CHAVES, T. B. C. *et al.* Biomassa planctônica e hidrografia na Zona Econômica Exclusiva do nordeste do Brasil. **Tropical Oceanography**, v. 34, n. 1, p. 1–45, 2006.

CHEN, F.; YAPA, P. D. A model for simulating deep water oil and gas blowouts-Part II: Comparison of numerical simulations with “Deepspill” field experiments. **Journal of Hydraulic Research**, v. 41, n. 4, p. 353–365, 2003.

CONAMA. Resolução CONAMA nº 1, de 23 de janeiro de 1986. Publicada no DOU, de 17 de fevereiro de 1986, Seção I. **Licenciamento Ambiental - Normas e Procedimentos**, p. 636–639, 2010.

CORDANI, U. G. Idade do vulcanismo no oceano Atlântico Sul. **Boletim IGA**, v. 1, p. 09-75, 1970.

COURANT, R.; FRIEDRICHS, K.; LEWY, H. On the partial difference equations of mathematical physics. **IBM journal of Research and Development**, v. 11, n. 2, p. 215-234, 1967.

DA SILVA, A. M. Algorithms and procedures. Vol. 1, Atlas of surface marine data. **NOAA Atlas NESDIS**, v. 6, p. 74, 1994.

DE ALMEIDA, F. F. M. Ilhas oceânicas brasileiras e suas relações com a tectônica atlântica. **Terrae Didactica**, v. 2, n. 1, p. 3–18, 2006.

DE DOMINICIS, M. *et al.* Medslik-II, a Lagrangian marine surface oil spill model for short-term forecasting - Part 1: Theory. **Geosci. Model Dev**, 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.

DO SUL, J. A. I.; SPENGLER, A.; 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.

DOERFFER, Jerzy W. **Oil spill response in the marine environment**. Elsevier, 2013.

DOROBANTU, L. S. *et al.* Stabilization of Oil-Water Emulsions by Hydrophobic Bacteria. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 70, n. 10, p. 6333–6336, 1 out. 2004.

DPC-MB. Diretoria de Portos e costas – Marinha de Brasil. **NORMAM 08/DPC** - Tráfego e Permanência de Embarcações em Águas Jurisdicionais Brasileiras. 2013. Disponível em: <<https://www.dpc.mar.mil.br/sites/default/files/normam08.pdf>>. Acesso em: dez. 2017.

EKAU, W.; KNOPPERS, B. An introduction to the pelagic system of the North-East and East Brazilian shelf. **Archive of Fishery and Marine Research**, v. 47, n. 2/3, p. 113–132, 1999.

ESLER, D. *et al.* Timelines and mechanisms of wildlife population recovery following the Exxon Valdez oil spill. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, 2017.

FINGAS, M. (Ed.). **Handbook of oil spill science and technology**. John Wiley & Sons, 2014.

FINGAS, M. F. Modeling evaporation using models that are not boundary-layer regulated. **Journal of Hazardous Materials**, v. 107, n. 1, p. 27–36, 2004.

FINGAS, M. Review of The Properties and Behaviour of Diluted Bitumen. In: **Proc 38th AMOP Technical Seminar, Ottawa, Environment Canada**. 2015. p. 470-494.

FINGAS, M.; FIELDHOUSE, B. Water-in-Oil Emulsions. In: FINGAS, M. (Ed.). **Handbook of Oil Spill Science and Technology**. John Wiley & Sons. p. 225–270. 2014.

FISG. **Oil Budget Calculator: Deepwater Horizon**. Federal Interagency Solutions Group, Oil Budget Calculator Science and Engineering Team, 2010.

FLOETER, S. R. *et al.* Geographic variation in reef-fish assemblages along the Brazilian coast. **Global Ecology and Biogeography**, v. 10, n. 4, p. 423-431, 2001.

FODRIE, F. J. *et al.* Integrating organismal and population responses of estuarine fishes in Macondo spill research. **BioScience**, v. 64, n. 9, p. 778–788, 2014.

FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações**. 2ª Ed. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

GESAMP (IMO/FAO/UNESCO/WMO/WHO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution). Impact of oil and Related Chemicals and Wastes on the Marine Environment. **Rep. Stud.** GESAMP nº 50. 180p. 1993

GESAMP (IMO/FAO/UNESCO/WMO/WHO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution). Estimates of oil entering the marine environment from sea-based activities. **Rep. Stud.** GESAMP nº 75, 96 p. 2007

GESAMP (IMO/FAO/UNESCO/WMO/WHO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution). Pollution in the Open Ocean: A review of assessments and related studies. **Rep. Stud.** GESAMP nº79, 64 p. 2009

GILL, A. E. **Atmosphere-ocean dynamics**. Academic Press. Elsevier, 1982.

GILLESPIE, R. G. Oceanic islands: models of diversity. **Encyclopedia of biodiversity**, p. 1–13, 2007.

GOMES, R. dos S. *et al.* Moluscos das ilhas oceânicas brasileiras. **Ilhas Oceânicas Brasileiras—da Pesquisa ao Manejo**. Brasília-DF: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas, p. 180–198, 2006.

GORINI, M.; CARVALHO, J. de. Geologia da margem continental inferior brasileira e do fundo oceânico adjacente. **Geologia do Brasil**, p. 473–489, 1984.

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

GROENZIN, H.; MULLINS, O. C. Asphaltene molecular size and structure. **The Journal of Physical Chemistry A**, v. 103, n. 50, p. 11237–11245, 1999.

GROS, J. *et al.* First day of an oil spill on the open sea: Early mass transfers of hydrocarbons to air and water. **Environmental science & technology**, v. 48, n. 16, p. 9400–9411, 2014.

HAIKVOGEL, D. B.; BECKMANN, A. Numerical ocean circulation modeling. **Imperial College Press, London**, 1999.

HAIKVOGEL, D. B.; WILKIN, J. L.; YOUNG, R. A semi-spectral primitive equation ocean circulation model using vertical sigma and orthogonal curvilinear horizontal coordinates. **Journal of Computational Physics**, v. 94, n. 1, p. 151–185, maio 1991.

HANEY, R. L. On the Pressure Gradient Force over Steep Topography in Sigma Coordinate Ocean Models. **Journal of Physical Oceanography**, v. 21, n. 4, p. 610–619, 1 abr. 1991.

HASSELMANN, K. *et al.* Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). **Deut. Hydrogr. Z.**, v. 8, p. 1–95, 1 jan. 1973.

HAZIN, F. Fisheries-oceanographical study on tunas, billfishes and sharks in the southwestern equatorial Atlantic Ocean. **University of Fisheries, Tokyo**, 1993.

HOUNSOU-GBO, G. A. *et al.* Tropical Atlantic contributions to strong rainfall variability along the Northeast Brazilian coast. **Advances in meteorology**, v. 2015, 2015.

IBAMA. **Plano de Manejo da APA Fernando de Noronha – Rocas – São Pedro e São Paulo: Resumo Executivo**. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, 2005. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/imgs-unidades-coservacao/Resumo%20Executivo_f.pdf>. Acesso em: 9 set. 2017.

ICMBIO. **Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - Busca - Unidades de Conservação**. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/portal/unidades-de-conservacao>>. Acesso em: 10 set. 2017.

JERNELÖV, A.. The threats from oil spills: Now, then, and in the future. **AMBIO: A Journal of the Human Environment**, v. 39, n. 6, p. 353-366, 2010.

KANG, Z. *et al.* Hydrophobic bacteria at the hexadecane–water interface: Examination of micrometre-scale interfacial properties. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 67, n. 1, p. 59–66, 15 nov. 2008b.

KANG, Z. *et al.* Mechanical properties of hexadecane–water interfaces with adsorbed hydrophobic bacteria. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 62, n. 2, p. 273–279, 1 abr. 2008a.

KANTHA, L.; CLAYSON, C. **Numerical Models of Oceans and Oceanic Processes**. Academic Press, 2000.

KESSLER, J. D. *et al.* A persistent oxygen anomaly reveals the fate of spilled methane in the deep Gulf of Mexico. **Science**, v. 331, n. 6015, p. 312–315, 2011.

KLAASSEN, C. D.; WATKINS III, J. B. **Fundamentos em Toxicologia de Casarett e Doull (Lange)**. AMGH Editora, 2009.

LARA, R. J. Amazonian mangroves—a multidisciplinary case study in Pará State, North Brazil: Introduction. **Wetlands ecology and management**, v. 11, n. 4, p. 217–221, 2003.

LARGE, W. G.; MCWILLIAMS, J. C.; DONEY, S. C. Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. **Reviews of Geophysics**, v. 32, n. 4, p. 363–403, 1994.

LEE, Kenneth *et al.* The Behaviour and Environmental Impacts of Crude Oil Released into Aqueous Environments. **The Royal Society of Canada, Ottawa**, 2015.

LEHR, W. J.; SIMECEK-BEATTY, D. The relation of Langmuir circulation processes to the standard oil spill spreading, dispersion, and transport algorithms. **Spill Science & Technology Bulletin**, v. 6, n. 3, p. 247–253, 2000.

LEITAO, S. N. *et al.* **Mesozooplankton biomass and diversity in coastal and oceanic waters off North-Eastern Brazil**. *Archive of Fishery and Marine Research* 47(2):153-165. 1999.

LEMARIÉ, F. *et al.* On the stability and accuracy of the harmonic and biharmonic isoneutral mixing operators in ocean models. **Ocean Modelling**, v. 52, p. 9-35, 2012.

LOUGHLIN, T. R. **Marine mammals and the Exxon Valdez**. Academic Press, 2013.

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.

MACKAY, D.; PATERSON, S.; TRUDEL, K. A mathematical model of oil spill behaviour. Report to Research and Development Division, Environment Emergency Branch, Environmental Impact Control Directorate. **Environmental Protection Service, Environment Canada, Ottawa**, 1980.

MARCHESIELLO, P.; MCWILLIAMS, J. C.; SHCHEPETKIN, A. Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models. **Ocean Modelling**, v. 3, n. 1, p. 1–20, 2001.

MARCHESIELLO, P.; DEBREU, L.; COUVELARD, X. Spurious diapycnal mixing in terrain-following coordinate models: The problem and a solution. **Ocean Modelling**, v. 26, n. 3, p. 156-169, 2009.

MARINETRAFFIC. **MarineTraffic: Global Ship Tracking Intelligence | AIS Marine Traffic**. Disponível em: <<http://www.marinetraffic.com/>>. Acesso em: 1 out. 2017.

MARTA-ALMEIDA, M. *et al.* Efficient tools for marine operational forecast and oil spill tracking. **Marine pollution bulletin**, v. 71, n. 1, p. 139-151, 2013.

MELBYE, A. G. *et al.* Chemical and toxicological characterization of an unresolved complex mixture-rich biodegraded crude oil. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 28, n. 9, p. 1815-1824, 2009.

MIGOTTO, A. E. *et al.* Checklist of the cnidaria medusozoa of Brazil. **Biota Neotropica**, v. 2, n. 1, p. 1-31, 2002.

MMA. **A Convenção sobre Diversidade Biológica-CDB**, 2000. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_dpg/_arquivos/cdbport.pdf>. Acesso em: 9 set. 2017

MOHRIAK, W. U. Bacias sedimentares da margem continental Brasileira. **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**, v. 3, p. 87e165, 2003.

MOLINARI, R. L. Observations of eastward currents in the tropical South Atlantic Ocean: 1978–1980. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 87, n. C12, p. 9707-9714, 1982.

MORAES, F. C. *et al.* Biodiversidade de esponjas das ilhas oceânicas brasileiras. **Ilhas Oceânicas Brasileiras—da pesquisa ao manejo. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas, Brasília**, p. 147-178, 2006.

MOURA, R. L. *et al.* An extensive reef system at the Amazon River mouth. **Science advances**, v. 2, n. 4, p. e1501252, 2016.

NOAA FISHERIES. **Cetacean Unusual Mortality Event in Northern Gulf of Mexico (2010-2014): CLOSED**. NOAA Fisheries. Disponível em: <http://www.nmfs.noaa.gov/pr/health/mmume/cetacean_gulfofmexico.htm#map>. Acesso em: 10 out. 2017.

NRC. **Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects**. Washington, DC: The National Academies Press, 2003.

OECD/IEA. **World Energy Balances: Overview (2017 edition)**. International Energy Agency, 2017. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/>>

publication/world-energy-balances---2017-edition---overview.html>. Acesso em: 7 mai. 2017.

PAYNE, J. R.; PHILLIPS, C. R. Photochemistry of petroleum in water. **Environmental science & technology**, v. 19, n. 7, p. 569-579, 1985.

PENVEN, Pierrick *et al.* Software tools for pre-and post-processing of oceanic regional simulations. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, n. 5, p. 660-662, 2008.

PETERS, K. E.; WALTERS, C. C.; MOLDOWAN, J. M. **The biomarker guide: Volume 2, Biomarkers and isotopes in petroleum systems and earth history**. Cambridge University Press, 2007.

PETERSON, C. H. *et al.* Long-term ecosystem response to the Exxon Valdez oil spill. **Science**, v. 302, n. 5653, p. 2082–2086, 2003.

PLETCHER, R. H.; TANNEHILL, J. C.; ANDERSON, D. **Computational fluid mechanics and heat transfer**. CRC Press, 2012.

POND, S.; PICKARD, G. L. **Introductory dynamical oceanography**. Elsevier, 2013.

REVERDIN, G. *et al.* Vertical structure of the seasonal cycle in the central equatorial Atlantic Ocean: XBT sections from 1980 to 1988. **Journal of Physical Oceanography**, v. 21, n. 2, p. 277-291, 1991.

REVIZEE, Programa. Avaliação do potencial sustentável de recursos vivos na zona econômica exclusiva. **Relatório Executivo. Programa REVIZEE. Avaliação do Potencial Sustentável dos Recursos Vivos da Zona Econômica Exclusiva**, 2006. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/revizee/_arquivos/rel_executivo_revizee.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2017.

RISIEN, C. M.; CHELTON, D. B. A global climatology of surface wind and wind stress fields from eight years of QuikSCAT scatterometer data. **Journal of Physical Oceanography**, v. 38, n. 11, p. 2379-2413, 2008.

SAMPAIO, C. L. S. *et al.* Peixes recifais endêmicos e ameaçados das Ilhas Oceânicas Brasileiras e do Complexo Recifal de Abrolhos. **Ilhas Oceânicas Brasileiras—da Pesquisa ao Manejo**, p. 217-234, 2006.

SCHOTT, F. A. *et al.* The zonal currents and transports at 35°W in the tropical Atlantic. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 7, p. 1349, 2003.

SCHOTT, F. A.; FISCHER, J.; STRAMMA, L. Transports and pathways of the upper-layer circulation in the western tropical Atlantic. **Journal of Physical Oceanography**, v. 28, n. 10, p. 1904-1928, 1998.

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, 2010.

SHCHEPETKIN, A. F.; MCWILLIAMS, J. C. A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. C3, p. 3090, 2003.

SHCHEPETKIN, A. F.; MCWILLIAMS, J. C. The regional oceanic modeling system (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. **Ocean Modelling**, v. 9, n. 4, p. 347–404, 2005.

SHELTON, A. O. *et al.* Spatio-temporal models reveal subtle changes to demersal communities following the Exxon Valdez oil spill. **ICES Journal of Marine Science**, p. fsx079, 2017.

SHORT, J. W. *et al.* Slightly weathered Exxon Valdez oil persists in Gulf of Alaska beach sediments after 16 years. **Environmental Science & Technology**, v. 41, n. 4, p. 1245–1250, 2007.

SIKKEMA, J.; BONT, J. A. DE; POOLMAN, B. Mechanisms of membrane toxicity of hydrocarbons. **Microbiological Reviews**, v. 59, n. 2, p. 201–222, 1995.

SILVA JR, J. M. da. Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha: uso público, importância econômica e proposta de manejo. **2º Simpósio de Áreas Protegidas-Conservação no Âmbito do Cone Sul**, 2003.

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, 2009b.

SILVA, M. *et al.* High-resolution regional ocean dynamics simulation in the southwestern tropical Atlantic. **Ocean Modelling**, v. 30, n. 4, p. 256–269, 2009a.

SONG, Y.; HAIDVOGEL, D. A Semi-implicit Ocean Circulation Model Using a Generalized Topography-Following Coordinate System. **Journal of Computational Physics**, v. 115, n. 1, p. 228–244, 1994.

SOTO, J. M. R. A fauna terrestre exótica do Arquipélago Fernando de Noronha – colonização natural e intervenção antrópica. In: **Ilhas oceânicas brasileiras: da pesquisa ao manejo**. Brasília, DF, Brasil: Alves, R. J. V. & Castro, J. W. de A. (orgs.), 2006. v. I. p. 296–298.

SOTO, J. M. R. Ações antrópicas negativas nas ilhas oceânicas brasileiras. Capítulo 13. In: **Ilhas Oceânicas Brasileiras – da pesquisa ao manejo**. Brasília, DF, Brasil: Mohr, L. V. M., Castro, J. W. A., Costa, P. M. S., Válka, R. (Org.), 2009. v. II.

SOUZA, C. de *et al.* Chlorophyll a and nutrient distribution around seamounts and islands of the tropical south-western Atlantic. **Marine and Freshwater Research**, v. 64, n. 2, p. 168–184, 2013.

SOUZA, P. M. M. **Distribuição e Abundância do Ictioplâncton associadas às condições oceanográficas na ZEE do Nordeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Biomonitoramento) - Salvador: Instituto de Biologia, Universidade Federal da Bahia, 2004.

SPEIGHT, J. G. **The chemistry and technology of petroleum**. CRC press, 2014.

SPIECKER, P. M. *et al.* Effects of petroleum resins on asphaltene aggregation and water-in-oil emulsion formation. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 220, n. 1, p. 9–27, 2003.

STEINHAEUER, M. S.; BOEHM, P. D. The composition and distribution of saturated and aromatic hydrocarbons in nearshore sediments, river sediments, and coastal peat of the Alaskan Beaufort Sea: Implications for detecting anthropogenic hydrocarbon inputs. **Marine Environmental Research**, v. 33, n. 4, p. 223–253, 1992.

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, p. 279-303, 1999.

TAKAHASHI, A. T.; BARTH, R. Estudos sobre produtividade primária em nanoplâncton por ¹⁴C na Corrente do Brasil. **IPqM** v. 10, p. 1–12, 1968.

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.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência/PETROBRÁS, 2001.

TRAVASSOS, P. *et al.* Thermohaline structure around seamounts and islands off North-Eastern Brazil. **Archive of Fishery and Marine Research**, v. 47, n. 2-3, p. 211-222, 1999.

RIO+20, UNITED NATIONS CONFERENCE ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Rio de Janeiro, 20-22 June 2012. The Future we want. **Outcome of the Conference**, 2012. Disponível em: <http://www.rio20.gov.br/documentos/documentos-da-conferencia/o-futuro-que-queremos/at_download/the-future-we-want.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2017

UNITED STATES. **National standard petroleum oil tables**. Washington: U.S. Govt. Print. Off., 1936.

US-EPA. **Toxic and Priority Pollutants Under the Clean Water Act**. Priority Pollutant List. United States Environmental Protection Agency, 2014. Disponível em: <<https://www.epa.gov/eg/toxic-and-priority-pollutants-under-clean-water-act>>. Acesso em: 6 out. 2017.

VARANASI, U. **Metabolism of polycyclic aromatic hydrocarbons in the aquatic environment**. CRC Press, 1989.

VENOSA, A. D.; HOLDER, E. L. Biodegradability of dispersed crude oil at two different temperatures. **Marine Pollution Bulletin**, v. 54, n. 5, p. 545–553, 2007.

VILLAÇA, R. *et al.* Flora marinha bentônica das ilhas oceânicas brasileiras. **Ilhas oceânicas brasileiras: da pesquisa ao manejo**, p. 105-146, 2006.

WANG, Z. *et al.* Comparison of oil composition changes due to biodegradation and physical weathering in different oils. **Journal of Chromatography A**, v. 809, n. 1, p. 89–107, 1998.

WANG, Z. *et al.* Quantitative characterization of PAHs in burn residue and soot samples and differentiation of pyrogenic PAHs from petrogenic PAHs- The 1994 mobile burn study. **Environmental science & technology**, v. 33, n. 18, p. 3100–3109, 1999.

WANG, Z.; STOUT, S. **Oil spill environmental forensics: fingerprinting and source identification**. Academic Press, 2010.

WHITTAKER, R. J.; FERNÁNDEZ-PALACIOS, J. M. **Island biogeography: ecology, evolution, and conservation**. 2^a ed. Great Britain: Oxford University Press, 2007.

YANG, F. *et al.* Asphaltene Subfractions Responsible for Stabilizing Water-in-Crude Oil Emulsions. Part 1: Interfacial Behaviors. **Energy & Fuels**, v. 28, n. 11, p. 6897–6904, 2014.

YANG, F. *et al.* Asphaltene Subfractions Responsible for Stabilizing Water-in-Crude Oil Emulsions. Part 2: Molecular Representations and Molecular Dynamics Simulations. **Energy & Fuels**, v. 29, n. 8, p. 4783–4794, 2015.

YIM, U. H. *et al.* **Oil spill environmental forensics: the Hebei Spirit oil spill case**. ACS Publications, 2012.

ANEXO 1 – EQUAÇÕES REGENTES DO ROMS

As equações básicas do modelo em coordenadas cartesianas são apresentadas a seguir:

- Equação da continuidade para um fluido incompressível:

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

- Conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla u - fv = -\frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{u'w'} - v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u + D_u \quad (\text{A.2})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla v + fu = -\frac{\partial \phi}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{v'w'} - v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v + D_v \quad (\text{A.3})$$

No oceano, as variações de densidade são pequenas quando comparadas com o seu valor médio, de forma que é apropriada a substituição de $\rho(x, y, z, t)$ pelo valor de referência ρ_0 para todos os casos, exceto quando as forças gravitacionais ou as variações espaciais e temporais na densidade são essenciais (HAIDVOGEL; BECKMANN, 1999). Isto é, na aproximação de Boussinesq, as variações de densidade nas equações do momento podem ser ignoradas, exceto na componente vertical da equação da conservação do movimento. Ainda, de acordo com a aproximação hidrostática, o gradiente de pressão vertical se equilibra com o empuxo:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{\rho g}{\rho_0} \quad (\text{A.4})$$

- Equação advectiva-difusiva – Controla a evolução ao longo do tempo de um campo escalar de concentração $C(x, y, z, t)$:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla C = -\frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{C'w'} - v_\theta \frac{\partial C}{\partial z} \right) + F_c + D_c \quad (\text{A.5})$$

Os estresses de Reynolds $\overline{u'w'}$, $\overline{v'w'}$ e o fluxo turbulento dos *tracers* $\overline{C'w'}$ nas equações (A.2), (A.3) e (A.5) são parametrizados como:

$$\overline{u'w'} = -K_M \frac{\partial u}{\partial z} \quad (\text{A.6})$$

$$\overline{v'w'} = -K_M \frac{\partial v}{\partial z} \quad (\text{A.7})$$

$$\overline{C'w'} = -K_C \frac{\partial C}{\partial z} \quad (\text{A.8})$$

- Equação de estado:

$$\rho = \rho(T, S, P) \quad (\text{A.9})$$

As variáveis apresentadas são definidas como:

- D_u, D_v, D_c – Termos difusivos
- F_u, F_v, F_c – Termos forçantes
- $f(x, y)$ – Parâmetro de Coriolis
- g – Aceleração gravitacional
- $h(x, y)$ – Profundidade do fundo
- ν, ν_θ – Viscosidade molecular e difusividade
- K_M, K_C – Viscosidade turbulenta e difusividade vertical
- P – Pressão total $P \approx -\rho_0 g z$
- $\phi(x, y, z, t)$ – Pressão dinâmica $\phi = (P/\rho_0)$
- $\rho_0 + \rho(x, y, z, t)$ – Densidade total *in situ*
- $S(x, y, z, t)$ – Salinidade
- t – Tempo
- $T(x, y, z, t)$ – Temperatura potencial
- u, v, w – Componentes (x, y, z) do vetor velocidade \vec{v}
- x, y – Coordenadas horizontais
- z – Coordenada vertical

As condições de contorno verticais predefinidas no ROMS para a superfície e para o fundo são as forçantes externas utilizadas para impulsionar o modelo KPP (*K-profile-paramaterization*), que é uma parametrização para a camada de mistura oceânica superficial (LARGE; MCWILLIAMS; DONEY, 1994) e sua adaptação para a camada de fundo:

- Superfície $z = \zeta(x, y, t)$:

$$K_M \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_s^x(x, y, t)$$

$$K_M \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_s^y(x, y, t) \quad (\text{A.10})$$

$$K_c \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{Q_t}{\rho_0 c_p}$$

- Fundo $z = -h(x, y)$

$$K_M \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_b^x(x, y, t)$$

$$K_M \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_b^y(x, y, t) \quad (\text{A.11})$$

$$K_c \frac{\partial C}{\partial z} = 0$$

$$-w + \vec{v} \cdot \nabla h = 0$$

As novas variáveis τ^x, τ^y são as componentes zonal e meridional do cisalhamento da superfície (vento) ou do fundo, c_p é o calor específico à pressão constante da superfície do mar e Q_t é a radiação de ondas longas líquida.

ANEXO 2 – FLUXOGRAMA DE DEPENDÊNCIA MEDSLIK-II

