

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA

ESTUDO NUMÉRICO DE DERRAMES DE ÓLEO NA REGIÃO DO SUPER PORTO DE RIO
GRANDE-RS

Por

Bruno Vasconcellos Lopes

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Orientador: Prof. Dr. Wiliam Correa Marques

Rio Grande, Agosto, 2018

ESTUDO NUMÉRICO DE DERRAMES DE ÓLEO NA REGIÃO DO SUPER PORTO DE RIO
GRANDE-RS

Por

Bruno Vasconcellos Lopes

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Área de Concentração: Engenharia Costeira

Orientador: Prof. Dr. Wiliam Correa Marques

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Robson Andreazza	PPGCA/UFPEL
Prof. Dr. Liércio André Isoldi	PPGEO/FURG
Prof. Dr ^a . Juliana Costi	PPGMC / FURG
Dr. Eduardo de Paula Kirinus	PPGEO/FURG

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Rio Grande, 03, Agosto, 2018

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Rodinei e Margarete, pelo amor incondicional, apoio e confiança depositada em mim ao longo de minha formação pessoal e profissional.

Ao meu orientador professor Dr. Wiliam Correa Marques pelo auxílio e contribuições ao longo do trabalho e da vida acadêmica.

Agradeço aos colegas do LANSO Phelype, Caroline, Eduardo, Douglas, Juliana, Thaísa, Thailita e André por toda ajuda e amizade.

Aos meus irmãos, Júnior e Bernardo pelo apoio incondicional. Agradeço, a minha Irmã, Caroline, pelo carinho em todos os momentos desta caminhada na universidade.

Aos meus amigos e colegas da FURG que de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste trabalho e da minha formação acadêmica.

A todos professores do PPGE, pela dedicação e aprendizado ao longo de minha formação, em especial aos professores Elizaldo e Liércio por toda dedicação dada ao programa PPGE.

RESUMO

A impossibilidade de eliminar riscos de acidentes envolvendo o derramamento de óleo, principalmente em zonas portuárias, ressalta a importância de estabelecer protocolos para uma rápida ação contra estes eventuais desastres. Neste estudo foram simulados sessenta cenários de eventos de derrame de óleo com diferentes condições ambientais na região portuária da cidade de Rio Grande – RS, modelados pelo sistema numérico Telemac-3D + ECOS. O período da simulação hidrodinâmica foi de 365 dias, sendo este equivalente às médias diárias calculadas entre os anos de 2003 a 2015. Os resultados para a validação da hidrodinâmica, realizada no mês de janeiro de 2011, mostraram-se satisfatórios. As simulações dos vazamentos escolhidas, ao longo dos 365 dias, foram utilizadas para a identificação das principais forçantes que controlam o movimento das partículas de óleo, assim como, o seu destino final. A tendência do deslocamento das partículas de óleo é devido a combinação dos efeitos dos ventos, correntes e descarga dos afluentes da Lagoa dos Patos. Durante o período de verão e primavera, os ventos de Nordeste são de maior frequência e a descarga dos afluentes é baixa. Neste caso, observou-se que em 100% das simulações, uma porção das partículas de óleo chegam na encosta da região do Super Porto (R1), e que, em 17,9% das simulações, uma porção das partículas de óleo chegam à encosta da enseada do Saco da Mangueira (R10). No outono e no inverno, os ventos possuem maior variabilidade em todas as direções e são combinados com as maiores descargas dos afluentes. Nestes cenários observou-se que em 60% das simulações, uma porção de partículas de óleo chegam à encosta da região do Super Porto (R1), 40% chegam na região de Marismas (R6), 30% atingem a região dos Molhes da Barra (R3) e, em 16,7% das simulações, as partículas de óleo saem para fora da região do Estuário (R12). As correntes tem maior influência nos deslocamentos das partículas quando os afluentes possuem maiores vazões ou quando ocorre baixa intensidade dos ventos. A ação dos ventos é a principal contribuinte para que as partículas de óleo cheguem nas encostas da região estuarina. As regiões com maiores concentrações por vazamentos de óleo são: à encosta do Super Porto (R1), Barra nova (R2) e ponta da Q. Secção (R5), assim como nas duas extremidades da região de Marismas (R6) e São José do Norte (R7). No intemperismo, a resposta da emulsificação do óleo apresentou-se de forma adequada, porém para as respostas de evaporação, o modelo superestimou os resultados. Para os cenários, os diferentes regimes de enchentes, vazantes e condições de ventos podem criar distintas interações nos efeitos sobre as trajetórias das partículas de óleo, podendo intensificar ou retardar a velocidade de deslocamento das partículas de óleo. Por fim, o modelo ECOS mostrou-se eficaz na simulação do deslocamento da mancha de óleo, ao fornecer os resultados de suscetibilidade ao toque do óleo na costa. Os locais da Q. Secção (R5) e Marismas (R6) são os pontos de chegada óleo mais preocupantes, pois além de apresentarem grandes concentrações de óleo vazado eles possuem o maior índice de sensibilidade litoral (ISL 10). Sendo assim, os resultados do estudo também podem ser utilizados para subsidiar ações em caso de acidentes que envolvam vazamentos de óleo no Super Porto.

Palavras-chave: Telemac-3d, ECOS, Óleo, Lagoa dos Patos

ABSTRACT

The impossibility of eliminating risks of accidents involving oil spills stresses the importance in establishing fast action protocols against these eventual disasters, mainly in harbor zones. In this study sixty simulations with different scenarios for oil spill events were simulated in different environmental conditions at the harbor zone of the city of Rio Grande - RS. The simulations were made using the numerical system Telemac-3D + ECOS. The hydrodynamic simulation period was of 365 days corresponding to the daily means calculated for the period between the years of 2003 and 2015. The hydrodynamic validation for the month of January of 2011 showed satisfactory results. The means were used in order to simulate the main processes in the hydrodynamic circulation. The oil spill simulations, spaced over 365 days, were used to identify the main forces controlling the oil particles movement and its final destination. The trend of the movement of oil particles is due the combination of winds, currents and water discharge from the Patos lagoon tributary rivers. During summer and spring with predominant Northeast winds and low river discharges, 100% of the simulations showed that a fraction of the oil particles reaches the Super Porto zone (R1). In 17.9% of the simulations, a fraction of the oil particles reaches the Saco da Mangueira (R10). Moreover, during autumn and winter when winds vary in direction and river discharges are maximum, 60% of simulations showed that oil particles reach the R1 zone; 40% suggest they reach the salt marshes region (R6); 30% reach the inlet groins (R3) and 16.7% suggest the oil particles leaved the estuarine domain (R12). With high river discharge or low wind intensity, the current have great influence percentage ratio in the oil particles displacement. The wind action is main force for the oil particles to reach the estuarine shore because of the varying directions of it, while the current have dominance at the access channel to the Patos lagoon in a longitudinal orientation. The regions R1, Barra Nova (R2), and the tip of regions Q. section (R5), R6 and São José do Norte (R7) showed high contamination by oil spills. In weathering, the oil emulsification response showed great results however, the evaporation process were super estimated by the model. The different scenarios of flood/ebb regime and different direction and intensity of winds generate distinct interactions over the oil particles trajectories that can intensify or slow down the displacement velocity of the particles. Lastly, the ECOS model showed satisfactory results for the oil spill displacement providing the results of susceptibility to touch of oil at the estuarine shore. The regions R5 and R6 are the reach points of oil spills that present great oil concentration and the most dangerous scenarios. presenting a high sensitivity index (ISL 10). Therefore, this study results can support actions in case of accidents involving oil spills at the Super Porto region.

Keywords: Telemac-3d, ECOS, Oil, Patos Lagoon

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Características da Região de Estudo	16
1.2	ESTADO DA ARTE	18
1.2.1	Estudos globais de Simulações de Derrames de Óleo	18
1.2.2	Estudos de Vazamento de Óleo realizados na região Sul do Brasil	21
1.3	Objetivos	23
1.3.1	Objetivos Específicos	23
2	METODOLOGIA	24
2.1	Modelo Telemac-3D	24
2.1.1	Aproximações e Linearização	24
2.1.2	Aproximação de Boussinesq	25
2.1.3	Termos Fonte	26
2.1.4	Equação de estado da água do mar	27
2.1.5	Traçadores	27
2.1.6	Modelo de Turbulência	28
2.2	Modelo ECOS	29
2.2.1	Advecção	30
2.2.2	Espalhamento	32
2.2.3	Difusão turbulenta	32
2.2.4	Evaporação	33
2.2.5	Emulsificação	33
2.2.6	Massa Específica do Óleo	34
2.2.7	API	34
2.3	Malha computacional	34
2.3.1	Estrutura da Malha Batimétrica	35
2.3.2	Discretização Vertical da Malha	35
2.3.3	Transformação Sigma	35
2.4	Condições Iniciais e de Contorno	36
2.5	Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL)	40
2.6	Período das simulações	41
2.6.1	Abordagens e justificativas do estudo	42
3	CALIBRAÇÃO DOS RESULTADOS HIDRODINÂMICOS	43

4	RESULTADOS	46
4.1	Padrões de Ventos	46
4.2	Hidrodinâmica	47
4.2.1	Elevação do Nível	47
4.2.2	Correntes e Salinidade	47
4.3	Derrames de óleo	48
4.3.1	Relação entre ano simulado com os dias utilizados na simulação de vazamentos de óleo	48
4.3.2	Deslocamento das partículas de óleo de todos os vazamentos	51
4.3.3	Concentração dos derrames e tempo de chegadas das partículas de óleo	57
4.4	Intemperismo	62
4.4.1	Emulsificação	62
4.4.2	Evaporação	63
4.5	Cenários de derrames	66
4.5.1	Cenário 1	66
4.5.2	Cenário 2	69
4.5.3	Cenário 3	72
4.5.4	Cenário 4	74
4.5.5	Cenário 5	77
4.5.6	Cenário 6	79
4.6	CONCLUSÃO	82
4.7	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	84
5	Referências	85

LISTA DE FIGURAS

1.1	Localização global da área de estudo (A), representação batimétrica da área costeira e da Lagoa dos Patos, com as cores representando a profundidade em metros (B), sobreposta da Google maps, Lansdsat / Copernicus, data 2017. A ponto 1 representa o principal ponto de desembarque e embarque de óleo (terminal da Transpetro) e ponto 2 local de coleta de dados da praticagem, imagem (C) na região de estudo. A figura C está sobreposta da Google Maps, DigitalGLOBE CNES / Airbus, data 2017.	17
2.1	Processos ocorrendo durante um derrame de óleo em ambientes marinhos. Adaptado de Bollmann et al. (2010).	30
2.2	Forças advectivas em um elemento genérico. Vetores azuis indicam contribuição do vento e vetores em vermelho indica contribuição da corrente; o caminho final de cada partícula é interpolação algébrica deste forças, adaptado de Stringari (2014).	31
2.3	A figura representa os limites do domínio (A), a malha no formato bidimensional (B), a integração dos dados batimétricos com a malha (imagens C sobreposta da Google maps, lansdsat / Copernicus, data 2017) e um detalhe na área de vazamento de óleo (imagens D sobreposta da Google Maps, DigitalGLOBE CNES / Airbus, data 2017). .	36
2.4	Malha tridimensional obtida pela superposição da malha bi-dimensional de elementos triangulares (modificado de Hervouet (2007))	37
2.5	Condições iniciais e de contorno utilizadas (imagens sobreposta da Google maps, lansdsat / Copernicus, data 2017)	38
2.6	O fluxo de informações do sistema de modelagem, cujas etapas são ilustrados de forma simplificada.	39
2.7	Mapa do Índice de Sensibilidade do Litoral ajustado para região do Porto de Rio Grande. Fonte: Adaptado de Nicolodi (2016).	40
3.1	Comparação da velocidade meridional (A) e da salinidade (B). Em preto são representados os dados observados (D.O) e colorido são apresentados os dados calculados pelo modelo (V1F4, V1F5, V5F5 e V5F4).	44
4.1	Padrões de ventos, resultado da direção e intensidade que atuam na simulação. O ponto vermelho indica o local de extração das series temporais.	46
4.2	Média temporal (A) e valores máximos (B) da elevação da superfície livre na Lagoa dos Patos. O mapa de cores representa o valor da elevação, em metros.	48
4.3	(A) Campo de salinidade média do fundo, (B) transecto transversal ao canal e (C) transecto longitudinal ao canal de navegação com vetores representando a direção média das correntes.	49

4.4	(A) e (B) indicam os cenários de máxima de salinidade. (C) e (D) indicam os cenários de mínima salinidade.	50
4.5	Comparação entre os as correntes para os 365 dias de simulação (A) e para os 60 dias de vazamento de óleo (B).	50
4.6	Comparação entre os ventos para os 365 dias de simulação (A) e para os 60 dias de vazamento de óleo (B).	51
4.7	Resultados das 60 simulações de vazamento de óleo, as imagens ilustram o deslocamento das partículas no tempo.	52
4.8	Locais com características similares, relacionadas com os pontos de chegada do óleo.	53
4.9	Análise da influência da corrente e vento no deslocamento para todas as simulações. .	56
4.10	Análise da influência das correntes e ventos no deslocamento para todas as simulações.	57
4.11	Todas as simulações representando a concentração em litros dos vazamentos	58
4.12	A imagem (A) todas as simulações na hora 24, imagem (B) o tempo de chegada do óleo na encosta do estuário.	59
4.13	Porcentagem de emulsificação das partículas de todas as simulações (linhas coloridas) e médias dos cenários (linha preta).	63
4.14	Porcentagem de evaporação de todas as simulações (linhas coloridas) e médias dos cenários (linha preta).	64
4.15	Simulação 9, cenário 1, tempo de simulação de 4 h, atingindo o Super Porto (R1). . .	67
4.16	Relação da porcentagem de influencia do vento e corrente nas partículas de óleo. . .	67
4.17	Porcentagem de evaporação e porcentagem de emulsificação.	68
4.18	Simulação 20, cenário 2, tempo de vazamento do óleo de 24 h.	69
4.19	Relação da média de porcentagem de influência do vento e corrente nas partículas de óleo.	71
4.20	Porcentagem do balanço de massa e porcentagem de emulsificação.	71
4.21	Simulação 15, cenário 3, tempo de simulação de 24 h.	72
4.22	Relação da média porcentagem de influência do vento e corrente nas partículas de óleo.	73
4.23	Porcentagem de evaporação e porcentagem de emulsificação.	74
4.24	Simulação 33, cenário 4, tempo de deslocamento das partículas de óleo de 9 h.	75
4.25	Relação da porcentagem média de influência do vento e corrente nas partículas de óleo.	76
4.26	Porcentagem do balanço de massa e porcentagem de emulsificação.	76
4.27	Simulação 6, cenário 5, tempo de simulação de 24 h	77
4.28	Relação da porcentagem de influência do vento e corrente nas partículas de óleo. . .	78
4.29	Porcentagem de evaporação e porcentagem de emulsificação.	79
4.30	Simulação 28, cenário 6, tempo de simulação de 24 h.	80
4.31	Relação da porcentagem de influência do vento e corrente nas partículas de óleo. . .	81
4.32	Porcentagem de evaporação e porcentagem de emulsificação.	81

LISTA DE TABELAS

2.1	Características dos ISL's da região de estudo.	41
2.2	Características físicas utilizadas nas simulações numéricas.	42
3.1	Tabela das constantes modificadas	43
3.2	Estatísticas da velocidade de corrente das simulações hidrodinâmica	44
3.3	Estatísticas salinidade das simulações hidrodinâmica	44
4.1	Deslocamento e localização das regiões contaminadas pelo óleo, durante o período de verão e primavera	54
4.2	Deslocamento e localização das regiões contaminadas pelo óleo, durante o período de outono e inverno	55

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolos da Seção do ECOS (2.2)

Δ_S	Máxima distância que uma partícula pode viajar [m].
ρ_o	Massa específica do óleo [kg m^{-3}].
ρ_t	Massa específica do óleo no tempo [kg m^{-3}].
ρ_w	Massa específica da água [kg m^{-3}].
ρ_w	Massa específica referencial da água do mar [kg m^{-3}].
ρ_{ww}	Altura de onda, constante.
σ_w	Período de onda, constante.
ν_w	Viscosidade cinemática da água salgada adimensional.
A_s	Área atingida por óleo [m].
C_{DE} e C_{DT}	Coefficientes empíricos da massa específica.
D_x	Coefficiente de espalhamento em x.
D_y	Coefficiente de espalhamento em y.
F_{wv}	Constante da emulsificação.
g	Aceleração da gravidade [m s^{-1}].
i	Representa o índice, para cada partícula e varia de 1 ao 40.000.
K_2	Constante adimensional empírica com valor de 0,725.
k_c	Coefficiente de transporte por corrente [m s^{-1}].
K_w	constante da emulsificação.
k_w	Coefficiente de transporte pelo vento [m s^{-1}].
K_e	coeficiente de influência do vento $0,0025 * (W)^{0,78}$.
R_{t1} e R_{t2}	Números aleatórios distribuídos entre o intervalo uniformemente de 0 e 1..
t_0	Temperatura de referência do óleo [C].
U_c	Componente meridional de transporte pelas correntes [m s^{-1}].
U_i	Componente meridional da velocidade das partículas [m s^{-1}].
U_w	Componente de transporte pelo vento [m s^{-1}].
U_{si}	Velocidade de espalhamento em x.
V	Volume total do derrame [m^3].
V_c	Componente zonal de transporte pelas correntes [m s^{-1}].
V_i	Componente zonal da velocidade das partículas [m s^{-1}].
V_w	Componente de transporte pelo vento [m s^{-1}].
V_{si}	Velocidade de espalhamento em y.
W_c	Componente vertical de transporte pelas correntes [m s^{-1}].
W_i	Componente vertical da velocidade das partículas [m s^{-1}].
A	coeficientes adimensionais valores de 0 a 1.
B	coeficientes adimensionais valores de 0 a 1.

d_i	Diâmetro das partículas [mm].
$[-U_r, +U_r]$	Raio de ação de espalhamento em x.
$[-V_r, +V_r]$	Raio de ação de espalhamento em y.

Símbolos da Seção do Telemac-3D (2.1)

$C_{3\epsilon}$	constantes do modelo k- ϵ .
α_s	Coefficiente de contração salina.
α_t	Coefficiente de expansão térmica.
$\Delta\rho$	Variação da densidade [kg m ⁻³].
ϵ	Dissipação turbulenta.
κ	Coefficiente dinâmico de condução de calor.
$\vec{\tau}_b$	Tensão de cisalhamento no Fundo [Pa].
ν	Viscosidade cinemática.
$\nu \frac{\partial \vec{v}}{\partial n}$	Gradiente de velocidade horizontal na superfície.
ω	Velocidade angular de rotação da Terra (7.292x10 ⁵ rad/s).
ϕ	Latitude em graus.
ρ	Massa específica de referência [kg m ⁻³].
ρ_0	Densidade de referência [kg m ⁻³].
ρ_{ar}	Massa específica do Ar [kg m ⁻³].
ρS	Massa de sal [kg m ⁻³].
σ_ϵ	constantes do modelo k- ϵ .
σ_k	constantes do modelo k- ϵ .
ν	Coefficiente de viscosidade cinemática [m s ⁻¹].
A	Coefficiente de troca de calor (W m ⁻² °C ⁻¹).
C_f	Coefficiente de fricção adimensional.
C_p	Calor específico da água.
$C_{1\epsilon}$	constantes do modelo k- ϵ .
$C_{2\epsilon}$	constantes do modelo k- ϵ .
f	Coefficiente de coriolis.
F_x	Termo fonte da quantidade de movimento da equação u.
F_y	Termo fonte da quantidade de movimento da equação v.
g	Aceleração da gravidade [m s ⁻¹].
H	altura da superfície [m].
h	Batimetria [m].
$k - \epsilon$	Modelo de turbulência.
k_{dc}	Coefficiente de difusão de calor.
k_{ds}	Coefficiente de difusão salina turbulento.
m	Coefficiente de Manning.
p	Pressão Pa.

p_{atm}	Campo de pressão atmosférico Pa .
P_{rt}	Número de Prandtl.
S	Salinidade [$kg\ m^{-3}$].
T	Temperatura[C].
t	tempo [s].
T_0	Temperatura inicial [C].
T_{ar}	Temperatura do ar [C].
U	componente da velocidade u [$m\ s^{-1}$].
V	componente da velocidade v [$m\ s^{-1}$].
W	componente da velocidade w [$m\ s^{-1}$].
z	profundidade de uma camada [m].
∂	Derivada parcial.

LISTA DE ABREVIATURAS

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler.
ADIOS2	Automated Data Inquiry for Oil Spills.
ANA	Agência Nacional de Águas.
ASA	Applied Science Associates.
CCM	Complexos Convectivos de Meso Escala.
CT	Sensor de Condutividade e Temperatura.
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação.
ECOM	Princeton Ocean Model, Finite Volume Community Ocean Model.
FEPEAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - RS.
GNOME	General NOAA Operational Modeling Environment.
HYCOM	Hybrid Coordinate Ocean Model.
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.
LEPLAC	Levantamento da Plataforma Continental Brasileira.
MMA	Ministério do Meio Ambiente.
MOHID	Water Modelling System.
MOTHY	Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbures.
NOAA	National Oceanic Atmospheric Administration.
OD3D	Oil Drift 3-Dimensional numerical model system.
OILMAP	Oil Spill Model and Response System.
OSCAR	Oil Spill Contingency and Response.
PTOSM	Particle Tracking Oil Spill Model.
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul.
SINTEF	Stiftelsen for industriell og teknisk forskning.
BR	Brasil.
ECOS	Easy Coupling Oil System.
ENSO	El Niño Oscilação Sul.
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial.
LANSD	Laboratório de Análise Numérica e Sistemas Dinâmicos.
SUPRG	Superintendência do Porto de Rio Grande.

1. INTRODUÇÃO

O crescente uso das áreas costeiras para os mais diversos fins econômicos é responsável pelo aumento da poluição por hidrocarbonetos no meio marinho (Gurjar et al., 2015). Como consequência desta exploração, ocorrem os acidentes na extração, transporte e armazenamento dos combustíveis, fato que ocasiona uma intensa degradação ambiental capaz de afetar a população e a sustentabilidade presente na região atingida (Brakstad, 2017).

Os óleos de combustíveis fósseis são constituídos por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's), e também por vários metais pesados, no qual possuem efeitos tóxicos aos seres vivos, devido às suas características carcinogênicas, mutagênicas, teratogênicas e elevada capacidade de bioacumulação ao longo dos diferentes níveis de cadeias tróficas (Chapman et al., 2007) e (Almada e Bernardino, 2017). A preocupação não se dá apenas nos momentos e locais atingidos, pois a poluição causada pelos acidentes persiste por várias décadas (Culbertson et al., 2008) e (Moreno et al., 2011).

Os acidentes ambientais relacionados ao petróleo são comuns e globais. Neste contexto, pode ser destacado o acidente ocorrido em abril de 2010 na plataforma *Deepwater Horizon* localizada no Golfo do México, e que foi responsável pelo vazamento de cerca de 5 milhões de barris de petróleo no mar (Melvin et al., 2016). Os efeitos deste vazamento ainda são observados em compostos químicos do petróleo encontrados em animais, inclusive, em ovos de pássaros que se alimentam na região. Há também impactos socioeconômicos como a perda de dezenas de bilhões de dólares das indústrias da pesca e do turismo na costa sul dos Estados Unidos (Boehm et al., 2016).

No Brasil, podem ser citados alguns exemplos, como o causado pela empresa petroleira Chevron, em novembro de 2011, na Bacia de Campos paralelamente à costa do Rio de Janeiro, sendo considerado como um dos maiores vazamentos de óleo do Brasil (Freitas, 2012). Um vazamento de proporções regionais ocorreu no ano de 2012, e atingiu a orla do município de Tramandaí, no estado do Rio Grande do Sul o vazamento ocorreu devido à falha de um navio ao descarregar óleo na monoboia, localizada à aproximadamente 6 km da orla (Marques et al., 2017). Outros dois acidentes similares ocorreram no ano de 2014 Farina (2014) e 2016 (Terceiro et al., 2016) também na monoboia de Tramandaí.

Devido a fatores de variabilidade e dificuldade de tratamento de áreas contaminadas, os impactos ambientais decorrentes destes acidentes afetam direta e indiretamente a qualidade de vida das populações inseridas nestas áreas de risco (Dupuis e Ucan-Marin, 2015). A legislação ambiental brasileira preconiza que as atividades e empreendimentos que envolvam a produção e a distribuição de petróleo e seus derivados devem ser fundamentadas por simulações numéricas de cenários de derrames de hidrocarbonetos no mar. As simulações são necessárias à definição da área de influência direta e indireta das atividades, e cenários de provável ocorrência de contaminação, compondo o Plano de Emergência Individual (PEI), e corroborando para a mitigação dos danos ambientais (IBAMA, 2002).

Estima-se que aproximadamente 5,72 milhões de toneladas de petróleo foram derramados no oceano como resultado de incidentes envolvendo navios-tanque, de 1970 a 2015 (ITOPF, 2016). Atu-

almente, na região portuária do município de Rio Grande, no estado do Rio Grande do Sul, de acordo com a base de dados de atracções da *Superintendência do Porto de Rio Grande* (SUPRG), no ano de 2016, o Porto do Rio Grande, incluindo os Terminais de Uso Privado (TUPs) situados na área do porto organizado, movimentaram 38.223.751 toneladas de carga, sendo 4.602.636 toneladas de graneis líquidos, onde a principal forma de desembarque e embarque é de petróleo (SUPRG, 2017).

Neste âmbito, dados os potenciais riscos envolvendo a região sul do Brasil, o presente trabalho tem como contribuição principal a simulação de eventos de derrame de óleo com diferentes condições ambientais realizadas pelo acoplamento entre o módulo hidrodinâmico tridimensional Telemac-3D do Sistema TELEMAR (www.opentelemar.org) e o modelo de óleo ECOS (*Easy Coupling Oil System*) (www.lansd.furg.br). Desta forma, serão identificadas as principais contribuintes oceanográficas e meteorológicas que determinam o movimento e o intemperismo do óleo, assim como as áreas de maior suscetibilidade à contaminação pelo óleo vazado.

1.1. Características da Região de Estudo

A região de estudo na qual o trabalho foi desenvolvido é localizada na costa sul do Brasil entre 30 °S e 32 °S, compreende a Lagoa dos Patos e a área costeira adjacente. O foco do estudo se dá na região portuária de Rio Grande, mais precisamente no Super Porto conforme a Fig. 1.1. O local foi escolhido devido ao transporte e desembarque de petróleo, além de seu potencial risco ambiental.

Kjerfve (1986) definiu a Lagoa dos Patos como uma das maiores lagunas estrangulada do mundo, possuindo uma extensão aproximada de 250 km, uma largura média de 40 km e apresentando uma área de aproximadamente 10,360 km². Pode ser classificada como uma laguna rasa, já que sua profundidade média é de 5 m. A topografia do corpo lagunar principal é caracterizada por canais naturais e artificiais 8 m – 18 m, amplas áreas adjacentes (< 5 m) e sacos marginais rasos, de forma que a sua descarga para o oceano ocorre entre as cidades de Rio Grande e São José do Norte (Fernandes et al., 2007).

A região adjacente da Lagoa dos Patos é também caracterizada por ser uma área de grande interesse econômico, devido à movimentação de cargas, em função dos Portos de Rio Grande, Montevideu e Buenos Aires, e também pela intensa atividade pesqueira, onde são capturados alguns dos principais recursos pesqueiros do litoral brasileiro (Hartmann, 1996). Isto, em parte, é devido à alta biomassa fitoplancônica sustentada pela descarga da Lagoa dos Patos, pela pluma do Rio da Prata, e pela ressurgência na quebra da plataforma (Ciotti et al., 1995).

A região Sul do Brasil é considerada por Reboita et al. (2010) como de clima temperado, sendo constantemente afetada pela passagem de sistemas meteorológicos, como Sistemas Frontais, Ciclones extratropicais, Complexos Convectivos de Meso Escala (CCM), entre outros que afetam diretamente seu clima.

O escoamento dos ventos na costa do Rio Grande do sul é fortemente afetado pelos sistemas meteorológicos atuantes. Em sua maioria é controlado pelo sistema da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), provocando ventos predominantes de nordeste (NE), (Vera et al., 2006). Frentes meteorológicas de origem polar e Ciclones transientes, também afetam a região, fazendo com que

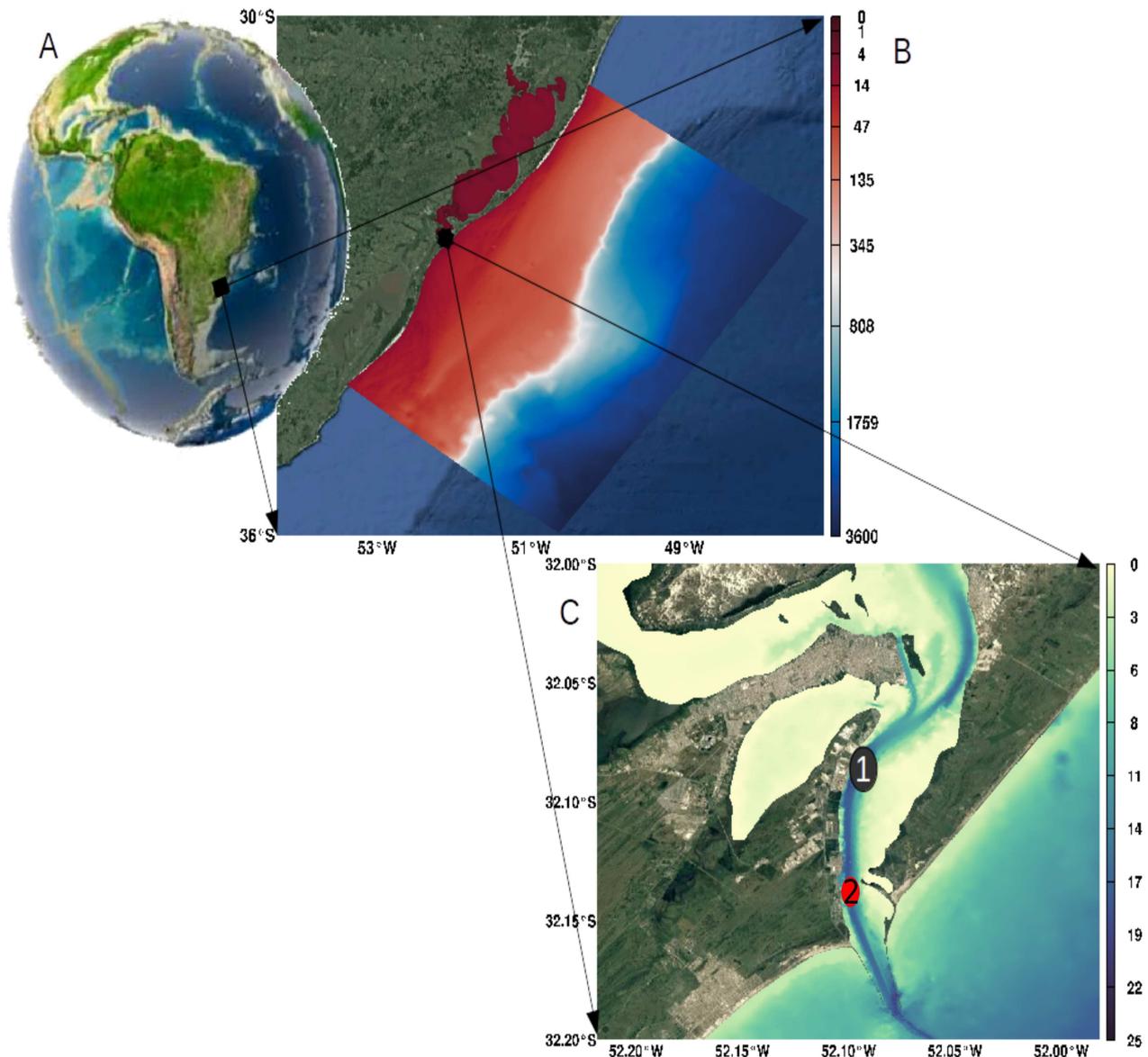


Figura 1.1 – Localização global da área de estudo (A), representação batimétrica da área costeira e da Lagoa dos Patos, com as cores representando a profundidade em metros (B), sobreposta da Google maps, Lansdsat / Copernicus, data 2017. A ponto 1 representa o principal ponto de desembarque e embarque de óleo (terminal da Transpetro) e ponto 2 local de coleta de dados da praticagem, imagem (C) na região de estudo. A figura C está sobreposta da Google Maps, DigitalGLOBE CNES / Airbus, data 2017.

transcorram ventos do quadrante sul (Reboita et al., 2010).

Os gradientes de temperatura entre o continente e o oceano, são um dos mecanismos que controlam o regime de precipitação sobre a região, criando situações favoráveis à formação de ciclones extratropicais (Gan e Rao, 1991). Sistemas de Brisas também são estabelecidos entre o oceano e a zona costeira, devido ao gradiente de temperatura.

Durante o dia, como o continente é mais aquecido do que o oceano, o gradiente de temperatura faz com que o escoamento seja do continente para mar, caracterizado a ocorrência de uma brisa terrestre. Durante a noite, o perfil termodinâmico se inverte, tornando assim o oceano mais aque-

cido e forçando o gradiente de temperatura a criar um escoamento de vento do mar para o continente, resultando assim no sistema de brisa marítima (Reboita et al., 2010).

O estuário da Lagoa dos Patos é controlado principalmente por dois mecanismos, os ventos e a descarga fluvial (Möller Jr. e Castaing, 1999). O vento local e vento não-local atuam de diferentes modos. O vento local atua diretamente na superfície de dentro da laguna, através da transferência de quantidade de movimento pela fricção, gerando um mecanismo de rebaixamento e elevação nas extremidades da Lagoa dos Patos, que depende da direção e intensidade dos ventos (Marques et al., 2009). O efeito não-local dos ventos se manifesta na porção costeira, causando um efeito de aumento de nível na costa, transversalmente à direção do vento (Moller et al., 1996), (Moller et al., 2001) e (Fernandes, 2001a).

A interação dos mecanismos de ventos local, não-local e descarga fluvial são os que controlam a hidrodinâmica do ambiente. O estuário predominantemente atua em eventos de vazante, principalmente devido aos efeitos dos ventos de quadrante norte e à constante descarga dos afluentes que abastecem a Lagoa dos Patos, resultando em uma corrente estuarina que avança em direção ao oceano (Marques et al., 2010). As condições de enchente, que estão associadas aos ventos do quadrante sul, promovem os efeitos secundários, e o sentido resultante da corrente segue do oceano para interior do estuário (Marques et al., 2011).

Além dos eventos sazonais e anuais citados, o clima da região sofre ação de eventos interanuais como o El Niño Oscilação Sul (ENSO), afetando diretamente os volumes fluviométricos dos afluentes da Lagoa dos Patos (Marques et al., 2014). Em cenários de La Niña, devido ao escoamento atmosférico, ocorrem situações de seca sobre o sul do país, todavia, em episódios de El Niño, o escoamento atmosférico favorece a precipitação sobre a região (Reboita et al., 2010) (Marques et al., 2014).

1.2. ESTADO DA ARTE

1.2.1. Estudos globais de Simulações de Derrames de Óleo

Elliott (1986) realizou experimentos, no qual liberava quantidades controladas de óleo ao Sul do Mar do Norte. Este autor observou a lâmina de óleo durante 6 h após a liberação, possibilitando uma comparação, com os resultados de um modelo numérico. O modelo numérico incluiu o cisalhamento lateral e vertical associado a maré meteorológica, o cisalhamento vertical, devido a deriva de Stokes e o perfil logarítmico da velocidade do vento. Uma porção de óleo foi modelado, como uma distribuição de gotículas, cujas flutuações individuais dependem do tamanho das gotículas e da turbulência na coluna de água.

Os resultados numéricos deste autor mostraram que a orientação das lâminas de óleo previstas estavam de acordo com as observações, sugerindo que o cisalhamento vertical próximo à superfície é dominante. Elliott (1986) verificou que a flutuabilidade das gotículas limita a profundidade através da qual o óleo pode se misturar, e conseqüentemente o óleo se espalha de uma maneira que representa uma combinação de processos de difusão. Este autor conclui que o modelo previu corretamente a ocorrência de óleo mais espesso em direção ao bordo dianteiro da lâmina de óleo, além do alinhamento

das lâminas na direção do vento.

Al-Rabeh et al. (1989) descreveram um modelo estocástico formulado para simular o destino e o transporte de derramamentos de óleo. O modelo consiste em um conjunto de algoritmos que descrevem os processos de advecção, difusão turbulenta, espalhamento de superfície, dispersão mecânica vertical, emulsificação e evaporação. Cada algoritmo é desenvolvido separadamente e está vinculado a processos relacionados e a parâmetros ambientais e físico-químicos do óleo.

O modelo de Al-Rabeh et al. (1989) requer como entrada, o campo de velocidade do ambiente simulado. Isto pode ser obtido a partir de um modelo hidrodinâmico tridimensional para correntes de maré e ventos para a região de interesse. O modelo de transporte foi usado para simular um derramamento de óleo superficial na região de Abu Ali, no lado oeste do Golfo Árabe. Os resultados da simulação indicaram que o modelo pode prever o destino e o transporte de manchas de óleo com precisão razoável.

Proctor et al. (1994b) desenvolveram um modelo de previsão de marés e tempestades, capaz de prever a chegada, com aproximadamente 5 dias de antecedência. Após a descarga de óleo de Mina Al Ahmadi, no Golfo, em janeiro de 1991, um modelo de derramamento de óleo foi conectado ao modelo de marés e ondas, fornecendo previsões do movimento e espalhamento das lâminas de óleo. O modelo de derramamento de óleo usou um algoritmo de rastreamento de partículas tridimensional, para modelar a dispersão do óleo de modo que as concentrações superficiais e sub-superficiais pudessem ser determinadas. Os efeitos da evaporação da superfície e da emulsificação do óleo foram incluídos no modelo, de forma que foi avaliado como um modelo eficiente pelos autores.

Sebastião e Soares (1995) realizaram uma revisão da modelagem dos processos de degradação físico-química (espalhamento, evaporação, dispersão na coluna de água, emulsificação e mudança de viscosidade e massa específica) de um derramamento de óleo no mar. Estes processos dependem um do outro e são descritos por um conjunto de equações diferenciais, resolvido pelo método Runge-Kutta de quarta ordem. Foram apresentados exemplos numéricos, a fim de testar os resultados obtidos com dados experimentais disponíveis na literatura.

O modelo prevê a variação da incorporação de água, massa específica e viscosidade, mas parece superestimar a fração evaporada. Desta forma, Sebastião e Soares (1995) salientaram a necessidade de mais dados experimentais para calibrar e validar o modelo, uma vez que foram observadas diferenças na composição do óleo simulado e nas amostras experimentais. Porém, os autores concluíram que o modelo é adequado para a predição da trajetória do derramamento por advecção devido aos ventos, correntes e o transporte sub-superficial.

Zhang et al. (1997) apresentaram um procedimento para a simulação de derrames de óleo em zonas costeiras, no qual utiliza o método de partículas aleatórias, com ponderação gaussiana para simular o movimento do óleo na água. Este procedimento permite simular os derrames de óleo costeiros, com rapidez e precisão, e realiza cálculos em limites fechados, como, locais rasos e pântanos abrigados. A concentração do derrame pode ser calculada em qualquer ponto de um domínio numérico e o método aplicado, junto com a equação de conservação da massa, permite o cálculo da concentração de óleo em qualquer ponto, diminuindo os erros causados pela discretização das manchas em partículas, considerando vazamentos pontuais ou contínuos.

Reed et al. (1999) realizaram uma revisão do estado da arte da modelagem de óleo, entre os anos de 1990 e 1999. Estes autores apresentam um estudo dos avanços nas áreas de advecção, espalhamento, evaporação, dispersão, emulsão e interações com gelo e costas, salientando a importância dos dados de entrada dos modelos, e das propriedades do óleo a serem analisados, para melhoria do desempenho dos modelos.

Fernandes (2001b) desenvolveu um trabalho na região de Portugal usando simulações de vazamento de óleo, também integradas com algumas técnicas de combate à poluição, utilizando métodos alternativos para a previsão de alguns processos, como o espalhamento, evaporação, dispersão e emulsificação do óleo.

O módulo do petróleo é acoplado a um sistema de modelos integrados chamado MOHID 2000 *Water Modelling System* (<http://www.mohid.com/>) recorrendo essencialmente aos seus módulos hidrodinâmico e de transporte Lagrangeano. As trajetórias do petróleo são calculadas a partir do pressuposto que o petróleo pode ser idealizado como sendo um grande número de partículas que se movimentam na água. Foram desenvolvidos testes para vários tipos de óleos, volumes e condições ambientais. Segundo Fernandes (2001b), os resultados obtidos foram comparados a dados experimentais, e com as previsões feitas com o modelo ADIOS2 *Automated Data Inquiry for Oil Spills* (<https://response.restoration.noaa.gov/adios>), de forma que foram obtidos resultados satisfatórios para a grande maioria das formulações introduzidas no modelo.

Atualmente existem poucos modelos de sistemas operacionais de previsão do comportamento de vazamento do óleo, em ambiente *offshore*, e alguns destes modelos são de uso comercial utilizado por empresas, para realização de consultorias ambientais. Assim o número de documentos públicos, para auxiliar a pesquisa são limitados, porém alguns modelos de previsão do deslocamento da mancha de óleo utilizados em trabalhos públicos são citados abaixo:

- OD3D - *Oil Drift 3-Dimensional numerical model system* foi desenvolvido pelo *Norwegian Meteorological Institute Oil Spill Forecast System* juntamente com a empresa *Stiftelsen for industriell og teknisk forskning (SINTEF)*, que foi criado para atuação no Mar do Norte (Hackett et al., 2009).
- MOTHY - *Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbures* foi criado pelo *Oil Spill Forecast System at Météo-France* sendo um modelo desenvolvido para aplicação operacional nas águas do Mar do Norte (Hackett et al., 2009).
- OSCAR - *Oil Spill Contingency and Response* foi desenvolvido pela empresa SINTEF Aamo et al. (1997). Este modelo é utilizado por empresas privadas e públicas no Brasil para simular cenários de vazamento de óleo no litoral brasileiro.
- GNOME - *General NOAA Operational Modeling Environment* é um modelo criado pela NOAA (*National Oceanic Atmospheric Administration*), sendo este modelo gratuito e podendo ser adaptado para a região de interesse (García-Garrido et al., 2016).
- OILMAP - (*Oil Spill Model and Response System*) (<http://www.asascience.com>) desenvolvido pela *Applied Science Associates (ASA)* é um modelo tridimensional abrangente, que rastreia vários componentes de hidrocarbonetos na superfície da água, na coluna de água e no ar. A primeira versão do OILMAP foi entregue há mais de 20 anos e agora é usada globalmente por

grandes companhias de petróleo. Este modelo é utilizado para suportar a resposta, planejamento e permissão de derramamento em 100 países.

- Startmap é um modelo tridimensional desenvolvido para atuação no Mar do Norte, na Noruega. Este modelo é derivado do modelo estocástico Slikmap, utilizado para oferecer a estatística sobre a distribuição espacial de derrames de óleo, como concentração de óleo vazado (Skognes e Johansen, 2004).
- PTOSM - (*Particle Tracking Oil Spill Model*) modelo utilizado nos mares da Turquia, segundo Bozkurtoğlu (2017) é um modelo de resposta rápida utilizado para determinar a direção e o intemperismo de vazamentos possibilitando a resposta a emergências de forma eficiente.

García-Garrido et al. (2016) apresentaram a interação de imagens de radar de abertura sintética, com do modelo GNOME, para encontrar padrões comuns entre dados coletados e dados simulados. Estes autores discutiram o uso combinado de ferramentas da teoria dos sistemas dinâmicos e técnicas de sensoriamento remoto, mostrando como eles são instrumentos eficazes que podem contribuir muito para os protocolos de tomada de decisão e para o gerenciamento em tempo real dos derrames de petróleo. Este trabalho apresenta a interação bem sucedida destas técnicas para uma situação recente, o naufrágio do navio de pesca *Oleg Naydenov* que ocorreu na Espanha, perto das Ilhas Canárias, em abril de 2015.

Liu et al. (2016) utilizaram uma série de programas para simular cenários de vazamento de óleo, na Bacia de Bohai, localizado no nordeste da China, utilizando o modelo ECOM (*Princeton Ocean Model, Finite Volume Community Ocean Model*) e o modelo OILMAP. Os resultados encontrados se mostraram satisfatórios para encontrar as regiões mais suscetíveis a contaminação de óleo, em caso de vazamento dentro da Bacia de Bohai.

Jones et al. (2016) utilizaram o OPENOIL para calibração em um vazamento no Mar do Norte, a atuação deste modelo é representativa para a dispersão vertical e o modelo representa de forma realista os dados laboratoriais, indicando que quanto menor o tamanho da gotícula de óleo mais rápido o transporte vertical ocorre.

O trabalho realizado por Bozkurtoğlu (2017) fez 112 simulações de vazamento de óleo no estreito de Bosphorus na Turquia, utilizando um a modelo hidrodinâmico 2D de velocidade de corrente e vento devidamente calibrado para alimentar o modelo de vazamento PTOSM, foi definido 14 pontos mais provável de acidentes ao longo do canal, como conclusão foi definido os locais e o tempo mais prováveis de contato do óleo no estreito de Bosphorus.

1.2.2. Estudos de Vazamento de Óleo realizados na região Sul do Brasil

Lages (2003) realizou um estudo com o modelo de óleo ADIOS2 e analisou diferentes cenários com eventos de ventos, campos de temperatura, mudanças de viscosidade e densidade do óleo. Este autor verificou que o aumento da velocidade do vento diminui o tempo necessário para a estabilização do campo de massa. O tempo de estabilização variou de 2 h, para o ventos de 5 m s^{-1} e 10 h para o ventos de 24 m s^{-1} , com pouca variação associada as variações no campo de temperatura.

Pereira (2005) classificou as praias do Rio Grande do Sul conforme a vulnerabilidade a eventua-

ais derrames de óleo, em cada região. Os fatores envolvidos são aspectos morfodinâmicos, suscetibilidade do ambiente, a sensibilidade dos organismos ao óleo e os fatores relacionados à capacidade de recuperação. Ao não considerar as áreas urbanizadas, a região de abrangência dos Concheiros e planícies arenosas, próximas a Lagoa do Peixe, foram consideradas zonas de alta vulnerabilidade, enquanto as áreas do entorno da desembocadura da Lagoa dos Patos foram consideradas menos vulneráveis.

Alves (2006) simulou derrames de óleo na região do baixo e do médio estuário da Lagoa dos Patos, nos pontos da enseada do Saco da Mangueira e do Porto Velho, utilizando o modelo hidrodinâmico bidimensional MOHID. Para os derrames do óleo foi utilizado o modelo ADIOS2. O trabalho se concentrou em forçar o modelo, com as descargas do Guaíba e ventos do NOAA, apresentando resultados que indicam que o deslocamento da mancha de óleo é controlado pela descarga, quando maior que $5,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, caso contrário, o vento é o principal influenciador do deslocamento da mancha de óleo.

Stringari et al. (2012b) apresentaram estudos de derramamento de petróleo utilizando simulações numéricas, com o acoplamento dos modelos Telemac-3D + ECOS para simulações hipotéticas de um vazamento de óleo na região oceânica do Sul do Brasil. Os resultados mostraram que o vazamento responde às condições de circulação da região e o deslocamento médio da mancha de óleo foi estimado em cerca de 9,4 km em 36 h com uma velocidade média de deslocamento de aproximadamente $0,07 \text{ m s}^{-1}$, onde suas maiores velocidades e deslocamentos foram encontradas, quando há variações na direção e intensidade do vento.

Stringari et al. (2013a) utilizando uma metodologia similar a Stringari et al. (2012b), com outra abordagem na região da desembocadura do canal do porto de Rio Grande, observaram que o vento local é o principal influenciador no deslocamento da mancha de óleo. Este efeito responde por mais de 6% da variabilidade do derrame de óleo quando comparado com as correntes oceânicas, que controlam entre 20 e 40%, sendo estas últimas as mais importantes no transporte vertical.

Nicolodi (2016) realizou um mapa com os índices de sensibilidade litoral (ISL) na região da Lagoa dos Patos e zona costeira adjacente, obtendo assim quais locais são mais sensíveis à contaminação do óleo.

Marques et al. (2017) investigaram o derramamento de óleo corrido na monoboia de transbordo de petróleo localizada paralelamente à praia de Tramandaí, litoral do Rio Grande do Sul, no ano de 2012. Estes autores utilizaram o sistema de modelagem Telemac-3d + ECOS e os resultados foram comparados com as observações do relatório de uma agência ambiental brasileira. Os resultados representaram visivelmente a posição final, a extensão do derramamento e o tempo necessário que a mancha de óleo demorou para atingir o litoral. Estes autores concluíram que os ventos e as correntes foram as forçantes físicas mais importantes no deslocamento do derrame de óleo, e as propriedades de emulsificação e evaporação tiveram grande importância no intemperismo do óleo.

Diversos autores discutiram sobre trabalhos relacionando as simulações de vazamento de óleo no Litoral Sul do Brasil. Contudo, nenhum destes trabalhos abordou uma quantidade expressiva de vazamentos, no ponto do terminal da Transpetro, local de transbordo de óleo do porto Rio Grande, sendo este o local mais provável de falhas humanas e/ou técnicas, que poderiam acarretar incidentes com vazamentos de óleo na região.

1.3. Objetivos

O objetivo é investigar o comportamento e o destino final de manchas de óleo, além de criar uma imagem de suscetibilidade ao vazamento do óleo na região.

1.3.1. Objetivos Específicos

- Identificar a contribuição das principais forçantes que controlam o deslocamento dos derrames de óleo;
- Analisar o comportamento médio e o destino do óleo de acordo com as condições ambientais dominantes da região;
- Realizar a análise do intemperismo do óleo durante as primeiras 12 *h* de simulação, posteriores ao evento de vazamento;
- Localizar as regiões mais suscetíveis ao vazamento de óleo e
- Identificar o menor tempo de contato das partículas de óleo na encosta da região de estudo.

2. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido através da utilização da modelagem numérica tridimensional. O sistema de modelagem numérica utilizado é o TELEMAC (www.opentelemac.org), através do módulo hidrodinâmico Telemac-3D desenvolvido dentro do consórcio open TELEMAC-Mascaret. Este módulo é utilizado para estudos de aspectos relacionados à hidrodinâmica tridimensional de fluxos com superfícies livres de rios, estuários, regiões costeiras e/ou oceânicas.

Para descrever os processos do óleo no meio marinho foi utilizado o modelo ECOS (*Easy Coupling Oil System*) desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande - FURG, e que já vem sendo utilizado na realização de diversos trabalhos como: Stringari et al. (2012b), Stringari et al. (2013b), Stringari et al. (2013a), Stringari (2014), Marques et al. (2017) e Monteiro et al. (2017).

2.1. Modelo Telemac-3D

Na análise dos processos hidrodinâmicos foi utilizado o módulo hidrodinâmico Telemac-3D. O modelo utiliza a técnica de elementos finitos, juntamente com os níveis verticais sigma para resolver as equações de Navier-Stokes, considerando a aproximação de Boussinesq para a resolução das equações de conservação da quantidade de movimento e massa. Uma descrição completa sobre o modelo e a técnica dos elementos finitos aplicadas ao Telemac-3D pode ser encontrada em Hervouet (2007), porém nesta seção serão apresentadas as informações mais importantes sobre a descrição matemática do modelo, obtidas do livro deste autor.

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

Equações de conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + u \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial U}{\partial y} + w \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla^2(vu) + F_x \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nabla^2(vv) + F_y \quad (2.3)$$

Onde, U , V e W são as componentes do vetor de velocidade \vec{V} , x , y e z são as direções do plano cartesiano, t o tempo, ν o coeficiente cinemático de viscosidade, p a pressão, g a aceleração da gravidade, ρ massa específica e F_x e F_y os termos fonte, respectivamente.

2.1.1. Aproximações e Linearização

Aproximação hidrostática é obtida por se desconsiderar a difusão, os termos fonte e a aceleração na equação de movimento na vertical. Neste sentido, a massa específica (ρ) pode ser escrita como

a soma de um valor médio com uma variação (Eq. (2.5)).

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (2.4)$$

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho \quad (2.5)$$

Substituindo a Eq. (2.5) na Eq. (2.4) onde ρ_0 massa específica de referencia, $\Delta\rho$ variação da massa específica reescrevendo pode ser obtido Eq. (2.6):

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_0 g \left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right) \quad (2.6)$$

Considerando o fundo como h e a superfície H pode ser descrita a equação que controla a pressão sobre uma porção da água em qualquer profundidade na Eq. (2.7):

$$p = p_{atm} + \rho_0 g (H - h) + \rho_0 g \int_h^H \frac{\Delta\rho}{\rho_0} dz \quad (2.7)$$

Onde, o p_{atm} representa a contribuição do campo de pressão atmosférica, o segundo termo no lado direito se refere ao peso da coluna de água e o terceiro termo representa a contribuição da distribuição de massa ao longo da coluna de água para o campo de pressão.

2.1.2. Aproximação de Boussinesq

Esta aproximação considera que as variações da massa específica podem ser desprezadas quando são pequenas comparadas com o valor de referência, a não ser que a massa específica esteja acompanhada da aceleração da gravidade. Desta forma, o termo do gradiente de pressão pode ser expandido nas equações em primeira ordem como:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \cong -\frac{1}{\rho_0} \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right) \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.8)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \cong -\frac{1}{\rho_0} \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right) \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2.9)$$

Substituindo a Eq. (2.7) nas Eq. (2.8) e Eq. (2.9) podem ser obtidas as seguintes equações:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \cong -\frac{1}{\rho_0} \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right) \frac{\partial p_{atm}}{\partial x} - g \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right) \frac{\partial H}{\partial x} - g \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_h^H \frac{\Delta\rho}{\rho_0} dz \right) \quad (2.10)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \cong -\frac{1}{\rho_0} \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right) \frac{\partial p_{atm}}{\partial y} - g \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right) \frac{\partial H}{\partial y} - g \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_h^H \frac{\Delta\rho}{\rho_0} dz \right) \quad (2.11)$$

Os primeiros termos do lado direito da Eq. (2.10) e Eq. (2.11) representam os gradientes da pressão atmosférica sobre a superfície livre e são incorporados no modelo como termos fonte. As

variações barotrópicas, que são resultado do gradiente de pressão causado pela elevação da superfície livre, são representados pelo segundo termo do lado direito das equações, e são incorporados diretamente nas equações do movimento.

Por fim, os termos de variações baroclínicas, que representam as variações do campo de massa específica devido às variações associadas aos traçadores, são inseridos como termos fonte nas equações de conservação de quantidade de movimento.

2.1.3. Termos Fonte

Os principais termos fontes utilizados no trabalho são a fricção com o fundo, a tensão de cisalhamento do vento na superfície e as trocas de calor com a atmosfera, que são inseridas diretamente nos termos F_x e F_y .

- Fricção com o fundo

A tensão de cisalhamento no fundo $\vec{\tau}_b$ é caracterizada como a ação do fundo em relação à velocidade de corrente, portanto, qualquer modelo irá fornecer uma fórmula para a estimativa desta tensão baseada no conhecimento da rugosidade do fundo e do fluxo na vizinhança da barreira sólida, sendo apresentado inicialmente pela Eq. (2.12):

$$\vec{\tau}_b = -\rho\nu\frac{\partial\vec{V}}{\partial n} \quad (2.12)$$

Para realização do cálculo de $\vec{\tau}_b$, é utilizado um modelo de turbulência para estimar a velocidade de corrente no fundo. Através de uma análise dimensional, pode ser obtida a seguinte equação:

$$\vec{\tau}_b = -\frac{1}{2}\rho C_f \vec{V} \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2.13)$$

Combinando as Eq. (2.12) e Eq. (2.13), pode ser encontrada a relação na Eq. (2.14):

$$\nu\frac{\partial\vec{V}}{\partial n} = -\frac{1}{2}C_f\vec{V}\sqrt{u^2 + v^2} \quad (2.14)$$

Os modelos de turbulência buscam resolver por métodos algébricos ou variacionais a tensão $\nu\frac{\partial\vec{V}}{\partial n}$. O coeficiente de fricção C_f pode ser obtido por diversas formulações. Nesse trabalho será utilizada a formulação de Manning na qual é apresentado em Eq. (2.15):

$$C_f = \frac{2gm^2}{h^{1/3}} \quad (2.15)$$

- Influência do vento

A influência do vento depende da intensidade e direção do vento, e da rugosidade da superfície do oceano. A tensão de cisalhamento gerada pelo vento pode então ser descrita como:

$$\nu\frac{\partial\vec{v}}{\partial n} = \alpha\frac{\rho_{ar}}{\rho}\vec{V}_w|\vec{V}_w| \quad (2.16)$$

Onde, $\nu\frac{\partial\vec{v}}{\partial n}$ representa o gradiente de velocidade horizontal na superfície, α é o coeficiente

de influência do vento, ρ_{ar} representa a massa específica do ar, e neste trabalho é considerada constante e igual a $1,29 \text{ kg m}^{-3}$. \vec{V}_w e $|\vec{V}_w|$ representam a intensidade e o módulo da intensidade do vento, respectivamente. O campo de ventos, no entanto, varia temporal e espacialmente de acordo com os dados utilizados como condições iniciais e de contorno.

- Trocas de calor

As trocas de calor do oceano com a atmosfera são proporcionais às diferenças de temperatura do ar e da água. O fluxo de energia entre as interfaces pode ser escrito como:

$$P = A(T - T_{ar}) \quad (2.17)$$

Com, A sendo um coeficiente de troca de calor dado em $(W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1})$. Desta forma, o modelo Telemac-3D utiliza a Eq. (2.18) para representar as trocas de calor com a atmosfera.

$$\nu_t \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{A}{\rho C_p}(T - T_{ar}) \quad (2.18)$$

Sendo que, A é calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$A = (4,48 + 0,049T) + 6.0645(1 + V_w)(1,12 + 0.018T + 0.00158T^2) \quad (2.19)$$

2.1.4. Equação de estado da água do mar

O modelo Telemac-3D considera as variações no campo de massa específica de acordo com uma equação de estado que é função dos traçadores ativos considerados. Neste trabalho será utilizada a equação:

$$\rho = \rho_0(1 - \alpha_t T(T - T_0)^2 + \alpha_s S) \quad (2.20)$$

onde, T_0 é a temperatura de referência ($4^{\circ}C$) e α_t é o coeficiente de expansão térmica, α_s é o coeficiente de contração salina e a massa específica de referência ρ_0 é igual a 1.025 kg m^{-3} .

2.1.5. Traçadores

O traçador pode ser considerado como qualquer substância transportada juntamente com a massa de água. Os traçadores mais utilizados são a temperatura, salinidade e os sedimentos em suspensão. Os traçadores são divididos em duas grandes categorias: aqueles ativos que modificam diretamente o campo de massa específica da água do mar e aqueles inativos, que não alteram o campo de massa específica.

Neste trabalho, foram considerados como traçadores ativos, a temperatura e a salinidade. Embora o óleo seja considerado na natureza como um traçador ativo, tais efeitos ainda precisam ser incorporados nos algoritmos utilizados neste trabalho, portando o mesmo foi tratado do ponto de vista hidrodinâmico como um traçador inativo. De fato, a influencia do óleo foi incorporada somente em uma via: as variações de massa específica da água alteram a massa específica do óleo, mas o contrário não acontece.

As equações de conservação para os traçadores são expressas da seguinte maneira:

- Temperatura

Considerando que a quantidade de calor de um corpo pode ser expressa como $\rho C_p T$. Onde C_p é o calor específico da água e T é a temperatura, o fluxo de calor em um elemento é expresso da seguinte forma:

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} = -\nabla \cdot (\vec{V} \rho C_p T) \quad (2.21)$$

Considerando que existem trocas de calor devido a processos moleculares e gradientes de temperatura, com um coeficiente de difusão de calor k_{dc} constante:

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V} \rho C_p T) = k_{dc} \nabla^2 \rho C_p T \quad (2.22)$$

onde, a Eq. (2.22) representa a conservação do calor para um elemento de volume constante, sendo também uma das formas de se expressar a primeira lei da termodinâmica. Finalmente, assumindo que a massa específica e o calor específico da água são constantes, a equação assume a seguinte forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla T \vec{V} = \kappa \nabla^2 T \quad (2.23)$$

onde, κ é o coeficiente dinâmico de condução de calor.

- Salinidade

Considerando que a massa de sal em um elemento pode ser expressa por ρS e que o fluxo de sal em um elemento de volume constante é conservado, então a equação que rege o fluxo pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\frac{\partial \rho S}{\partial t} = -\nabla \cdot (\vec{V} \rho S) \quad (2.24)$$

na qual, S é a salinidade expressa em kg m^{-3} . Na Eq. (2.24) o primeiro termo expressa a variação local da salinidade e o segundo a advecção pelas faces do elemento de forma que a variação interna seja constante. O fluxo de sal no elemento por processos difusivos não pode ser ignorado, então pode ser incluído na equação, o coeficiente de difusão salina, que considerado constante resulta em:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \nabla S \vec{V} = k_{ds} \nabla^2 S \quad (2.25)$$

A equação 2.25 representa a conservação de sal para um elemento de volume constante com k_{ds} representando o coeficiente de difusão salina turbulento.

2.1.6. Modelo de Turbulência

O módulo de turbulência utilizado no trabalho é o $k - \epsilon$. Este modelo resulta do acoplamento das equações do balanço para k (energia turbulenta) e ϵ (dissipação turbulenta) representados nas 2.26

e 2.27:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} + W \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P - G - \epsilon \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + W \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) +$$

$$C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} [P + (1 - C_{3\epsilon})G] - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.27)$$

Onde, $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ representa a energia cinética turbulenta do fluido, $\epsilon = v \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}$ representa

a dissipação da energia cinética turbulenta, $P = v_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$ é o termo de produção da energia

turbulenta, $G = -\frac{v_t}{Pr_t} \frac{g}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$ é o termo fonte devido a forças gravitacionais, sendo Pr_t o Número de

Prandtl e v_T verifica a igualdade: $v_T = C_\eta \frac{k^2}{\epsilon}$. Os valores: $C_\eta, Pr_t, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ são constantes do modelo k- ϵ .

2.2. Modelo ECOS

Para descrever os processos associados a dinâmica do óleo no meio marinho foi utilizado o modelo ECOS (*Easy Coupling Oil System*) que vem sendo desenvolvido na FURG, desde o ano de 2010. Este modelo se encontra em estágio avançado de desenvolvimento e registrado no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) sob número BR 51 2013 00013 (Marques et al., 2013). O ECOS manipula o óleo como partículas discretas usando a aproximação Lagrangeana para descrever a variação das propriedades de advecção, espalhamento e turbulência.

O deslocamento é avaliado considerando uma mancha de óleo não-homogênea e as propriedades do intemperismo são calculadas usando condições homogêneas, conforme em Marques et al. (2017). A posição final das partículas de óleo é dependente de quatro fatores diferentes: velocidade de corrente, velocidade do vento, efeito do espalhamento e difusão turbulenta.

O modelo também é capaz de descrever os processos de intemperismo com equações diferenciais variando no tempo. As propriedades de intemperismo são: evaporação, massa específica e emulsificação. A Fig. 2.1 descreve os processos como um todo e vale ressaltar que os processos relacionados à degradação biológica e fotólise não estão implementados no modelo. Nesta seção será descrito o equacionamento matemático do modelo ECOS e maiores informações podem ser obtidas em Marques et al. (2013) e Marques et al. (2017).

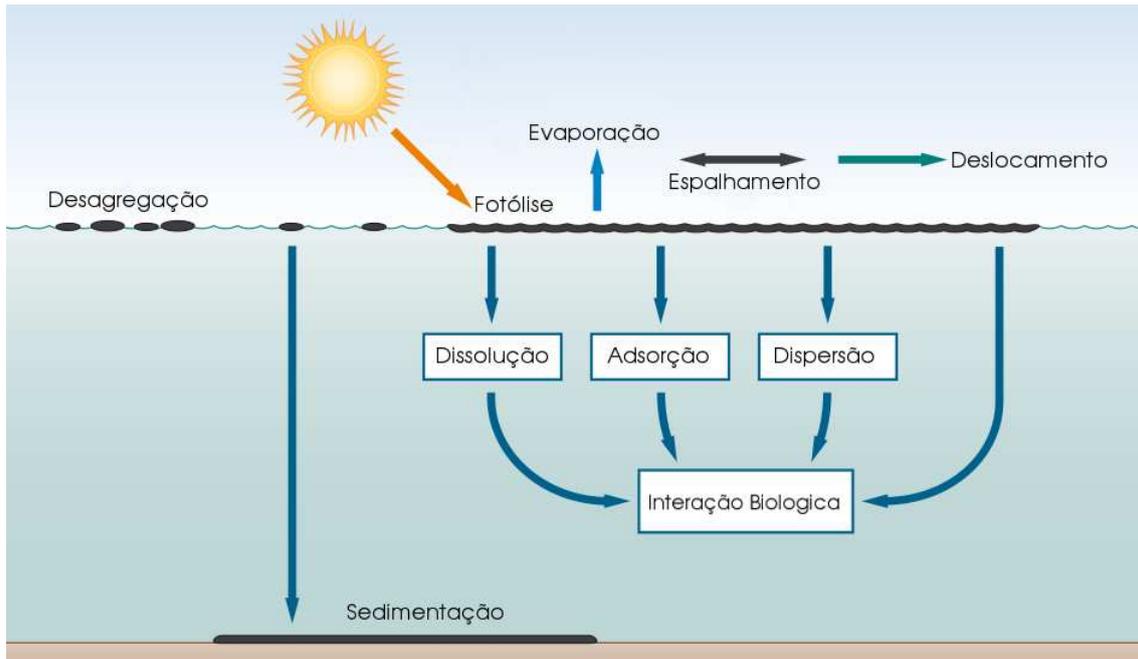


Figura 2.1 – Processos ocorrendo durante um derrame de óleo em ambientes marinhos. Adaptado de Bollmann et al. (2010).

2.2.1. Advecção

O fenômeno de advecção se refere às trajetórias das partículas de óleo que são calculadas a partir das contribuintes de velocidade e direção do vento, velocidade e direção das correntes, velocidade de espalhamento e velocidade por efeitos da difusão turbulenta (Fig. 2.2).

As componentes meridionais, zonais e verticais das velocidades advectivas são calculadas de acordo com as 2.28, 2.29 e 2.30, respectivamente.

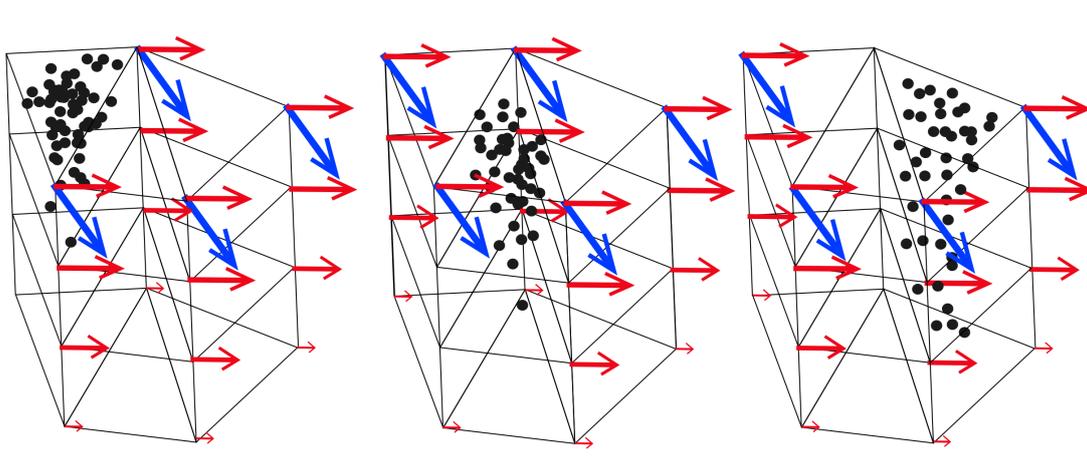


Figura 2.2 – Forças advectivas em um elemento genérico. Vetores azuis indicam contribuição do vento e vetores em vermelho indica contribuição da corrente; o caminho final de cada partícula é interpolação algébrica deste forças, adaptado de Stringari (2014).

$$U_i = k_c U_c + k_w U_v \quad (2.28)$$

$$V_i = k_c V_c + k_w V_v \quad (2.29)$$

$$W_i = k_c W_c + w_i \quad (2.30)$$

Onde, i representa o índice para cada partícula e varia de 1 ao número máximo de traçadores 40.000. U_i , V_i e W_i são as componentes meridional, zonal e vertical da velocidade das partículas, respectivamente. U_c , V_c e W_c são as componentes de transporte pelas correntes. U_v , V_v são as componentes de transporte pelo vento e k_c e k_w são os coeficientes de transporte pela corrente e pelo vento, respectivamente.

O modelo ECOS utiliza da proposta dos autores French-McCay (2004) no cálculo da componente de fluatibilidade da partícula w_i , utilizando a equação:

$$w_i = \frac{d_i^2 g \left(1 - \frac{\rho_o}{\rho_w}\right)}{18 \nu_w} \quad (2.31)$$

Sendo, d_i o diâmetro da gota de óleo, g a aceleração da gravidade, ρ_o a massa específica do óleo, ρ_w a massa específica da água, ν_w a viscosidade cinemática da água salgada, onde $18\nu_w$ é uma constante no valor de 10^{-6} retirada de French-McCay (2004).

O diâmetro da gotícula é obtido através da média aritmética, entre o tamanho máximo e mínimo, para uma gotícula de óleo conforme descrito em French-McCay (2004). A equação para o calculo do diâmetro da partícula de óleo e descrita em 2.32.

$$d_i = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{12\sigma_w}{g(\rho_{ww} - \rho_o)}} + \frac{0,12\sigma_w^{3/5}\omega^{2/5}}{\rho_{ww}^{3/5}g^{4/5}} \right] \quad (2.32)$$

Os parâmetros σ e w representam o período e altura de onda, porém neste trabalho são considerados constantes e iguais a 10 s e 1,5 m, respectivamente.

2.2.2. Espalhamento

Este é um fenômeno de expansão horizontal da mancha de óleo é devido às diferenças entre as tensões superficiais na interface da água com o óleo. Desta forma, o espalhamento representa o balanço de forças entre a ação da força gravitacional, forças inerciais, viscosidade e tensões superficiais. Atualmente, o modelo utiliza a clássica formulação proposta por Fay (1969) para calcular as velocidades de espalhamento. A formulação final do processo foi utilizada por Sebastião e Soares (1995) e Flores et al. (1998).

Proctor et al. (1994a) O fenômeno é calculado em três etapas: primeiro são calculados os coeficientes de espalhamento D_x e D_y para as direções x e y utilizando a equação 2.33, o segundo passo é o raio de ação de espalhamento $[-U_r, +U_r]$ $[-V_r, +V_r]$, sendo calculado pelas equações 2.34 e 2.35 e finalmente, as velocidades de espalhamento U_{s_i} e V_{s_i} são calculadas pelas equações 2.36 e 2.37.

Sendo definidos os coeficientes de espalhamento, são determinados os máximos raios de espalhamento, de forma que podem ser estimadas as velocidades.

$$D_x = D_y = \frac{\pi k_2^2}{16} \left(\frac{\Delta g V^2}{v_w^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (2.33)$$

Nesta equação, V é volume total do derrame, t é o tempo decorrido desde o início do derrame e k_2 é uma constante adimensional empírica com valor de 0,725 (Fay, 1969).

$$U_r = \sqrt{\frac{2D_x}{\Delta t}} \quad (2.34)$$

$$V_r = \sqrt{\frac{2D_y}{\Delta t}} \quad (2.35)$$

As velocidades da partículas auxiliam para a estimativa das velocidades de espalhamento e são determinadas através das equações proposta por Proctor et al. (1994a), descritas na Eq. (2.36) e Eq. (2.37). Onde, R_1 e R_2 números aleatórios distribuídos entre o intervalo uniformemente de 0 e 1.

$$U_{s_i} = R_1 \cos(2\pi R_2) \cdot U_r \quad (2.36)$$

$$V_{s_i} = R_1 \sin(2\pi R_2) \cdot V_r \quad (2.37)$$

2.2.3. Difusão turbulenta

O modelo ECOS utiliza um modelo de comprimento de mistura modificado para o óleo descrito em Al-Rabeh et al. (1989). Inicialmente é definida a máxima distância (Δ_S) que uma partícula pode

viajar durante um passo de tempo (Δ_t). A seguir, as componentes de velocidade ao longo de x e y são calculadas pelas Eq. (2.39) e Eq. (2.40), respectivamente.

$$\Delta_S = R_1 \sqrt{(0,0012\Delta_t)} \quad (2.38)$$

$$U_{d_i} = \Delta_S \cos(2\pi R_2) \quad (2.39)$$

$$V_{d_i} = \Delta_S \sin(2\pi R_2) \quad (2.40)$$

Após todas as propriedades das contribuintes no transporte terem sido calculadas, a posição final de cada traçador é integrado no tempo usando o método de Euler.

2.2.4. Evaporação

O fenômeno de evaporação é extremamente complexo devido a heterogeneidade dos compostos do óleo. Estes componentes tem diferentes temperaturas de evaporação assim como diferentes graus de solubilidade e saturação no ar, fato que torna difícil um tratamento detalhado deste fenômeno. A evaporação representa uma das maiores perdas de massa durante um derrame de óleo, o modelo ECOS utiliza do algoritmo de Stiver e Mackey (1984) em função da temperatura, volume de óleo, área atingida, intensidade do vento e grau API.

$$\frac{dF_e}{dt} = \frac{K_e}{V_0} A_s \exp\left(A - \frac{B}{T}(T_0 + T_g F_e)\right) \quad (2.41)$$

$$T_0 = 532,98 - 3,12895(API); \quad T_g = 985,62 - 13,597(API)$$

$$K_e = 0,0025 * (W)^{0,78}$$

sendo, K_e o coeficiente de influência do vento, A_s a área atingida pelo óleo, V o volume do derrame e a A e B os coeficientes adimensionais e empíricos utilizados de acordo com (Stiver e Mackey, 1984).

2.2.5. Emulsificação

A emulsificação é o processo de incorporação de água no derrame de óleo, neste processo, o óleo atinge uma aspecto comumente chamado de “mousse de chocolate”. Os mecanismos de controle da emulsificação são o resultado entre um balanço de processos de turbulência e de mistura (Langevin et al., 2004).

O algoritmo atualmente implementado utiliza o trabalho de Mackay et al. (1980) para o cálculo da emulsificação. Basicamente, o processo é governado por uma equação diferencial de primeira ordem como função da intensidade do vento.

$$\frac{dF_{wv}}{dt} = K_w(1 + W)^2 \left(1 - \frac{F_{wv}^i}{F_{wv}^f} \right) \quad (2.42)$$

na qual:

$$F_{wv}^i = 0, 0; F_{wv}^f = 0, 8; K_w = 2 \cdot 10^6$$

Contudo Langevin et al. (2004) e Fingas e Fieldhouse (2004) afirmaram que são necessários mais estudos para melhor compreender o processo de emulsificação.

2.2.6. Massa Específica do Óleo

De modo geral os óleos derivados de petróleo apresentam massa específica menor do que a água. Contudo, óleos muito intemperizados sofrem um aumento de massa específica, sendo influenciados diretamente pela temperatura e aumento da emulsificação (Lehr et al., 2002).

O modelo utiliza da Eq. (2.43) descrita pelos autores Buchanan e Hurford (1988)

$$\rho_t = F_{wv}\rho_w + \rho_o(1 - F_{wv})(1 + C_{DE}F_v)[1 - C_{DT}(T - T_o)] \quad (2.43)$$

Onde, ρ_t é a massa específica em cada passo de tempo, ρ_w é massa específica referencial da água do mar, ρ_o é a massa específica referencial do óleo, T é a temperatura e T_o é uma temperatura de referência para o óleo (20 °C). C_{DE} e C_{DT} são coeficientes empíricos adotados de acordo com Lehr et al. (2002) que assume valores de 0,18 e $8,0 \times 10^{-4}$, respectivamente.

2.2.7. API

A gravidade API foi estabelecida por *American Petroleum Institute Gravity*. Esta variável relaciona a massa específica do óleo com a massa específica da água. Óleos leves, com API maiores, têm maior fluabilidade, e portanto, são mais influenciados por forças superficiais no comportamento final da mancha de óleo. A equação 2.44 calcula a variação da gravidade API com o tempo sendo ρ_o/ρ_w a densidade específica do óleo a 15,5 °C.

$$API = \frac{141.5}{\rho_o/\rho_w} - 135 \quad (2.44)$$

2.3. Malha computacional

A construção da malha computacional que representara o ambiente em questão foi gerada usando o *software Blue Kenue* que foi desenvolvido pelo CHC (*Canadian Hydraulic Centre*). Inicialmente são definidos os limites das bordas estuarina, costeira e oceânica, que constituem toda a extensão da Lagoa dos Patos e zona costeira adjacente. Posteriormente é gerada uma grade com polígonos de forma triangular. A variação no tamanho dos triângulos no domínio é de 11,000 m na zona

oceânica a 30 m no ponto de lançamento do vazamento do óleo, de forma que a malha possui um total de 93.050 nós.

2.3.1. Estrutura da Malha Batimétrica

A qualidade dos resultados calculados pelo modelo está diretamente relacionada aos dados batimétricos utilizados para a geração da grade numérica. Desta forma, para obter a melhor representação possível das características batimétricas da Lagoa dos Patos, seu estuário e da região costeira adjacente, foi necessário combinar dados batimétricos de diferentes fontes.

Diferentes combinações de conjuntos batimétricos foram utilizados na criação da grade batimétrica para a realização deste trabalho.

- Foram utilizadas cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) para a extração dos dados batimétricos da região estuarina:
 - N°2140: Lagoa dos Patos;
 - N°2350: Pinhal a Rio Grande
 - N°2112: Rio Grande ao Arroi Chui
- Os dados das cartas batimétricas na região costeira foram complementados com um levantamento batimétrico realizado pela Marinha do Brasil como parte do projeto Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC).

A integralização dos dados batimétricos combinados foi realizada no *software Blue Kenue* e interpolados em todos os 93.050 nós da malha. A Fig. 2.3 demonstra a evolução da construção da malha.

2.3.2. Discretização Vertical da Malha

A projeção horizontal bidimensional é constituída de elementos finitos triangulares com interpolação linear, de forma que é possível construir uma malha tridimensional duplicando os triângulos no domínio Ω quantas vezes se fizer necessário. A discretização espacial utilizada para descrever os fenômenos na vertical está baseada no método de elementos finitos, replicando os triângulos na forma de prismas com seis nós com lados quadrangulares. Para construir o domínio prismático tridimensional, basta realizar a repetição do domínio bidimensional ao longo da vertical em camadas superpostas.

2.3.3. Transformação Sigma

A transformação sigma clássica utilizada neste trabalho é representada pela relação abaixo:

$$z^* = \frac{z - z_f}{z_s - z_f} \quad (2.45)$$

onde, z_f representa a profundidade local medida na malha e z_s a elevação da superfície livre. Esta transformação é realizada nas equações do movimento e de concentração de traçadores para que

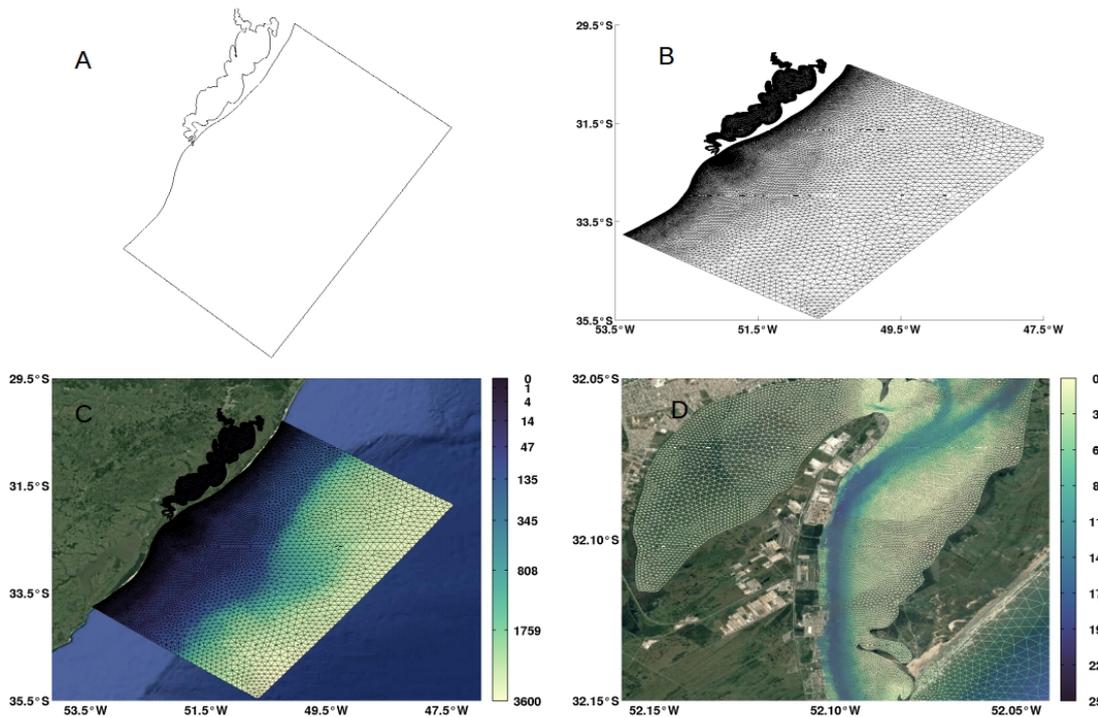


Figura 2.3 – A figura representa os limites do domínio (A), a malha no formato bidimensional (B), a integração dos dados batimétricos com a malha (imagens C sobreposta da Google maps, landsat / Copernicus, data 2017) e um detalhe na área de vazamento de óleo (imagens D sobreposta da Google Maps, DigitalGLOBE CNES / Airbus, data 2017).

seja feita a troca de um sistema de coordenadas (x, y, z) para o sistema de coordenadas (x, y, σ) , que permite acompanhar os limites superficiais e de fundo.

Neste trabalho, são utilizados 15 níveis sigma para a geração de condições iniciais e de contorno, sendo que estes níveis foram distribuídos de forma a fornecer uma melhor resolução das camadas superficiais e de fundo. A Fig. 2.4 mostra uma visão esquemática da distribuição de 5 níveis sigma ao longo de uma seção transversal de uma malha de altura variando de 0,4 m a $-0,2$ m.

2.4. Condições Iniciais e de Contorno

Além de condições iniciais pré-definidas através do uso de parâmetros e campos de propriedades, o modelo numérico necessita de condições de contorno para realizar a solução das fórmulas citadas na sessão de equacionamento do modelo Telemac-3d.

O modelo Telemac-3d considera três tipos de condição de contorno:

- Contornos da descarga fluvial, neste trabalho os principais afluentes da lagoa dos patos, Rio Guaíba, Rio Camaquã e do Canal São Gonçalo foram utilizados, sendo prescritas séries temporais de descarga fluvial;
- Contornos de fronteira oceânica, onde é prescrita a maré astronômica, as velocidades de correntes, a salinidade e a temperatura;

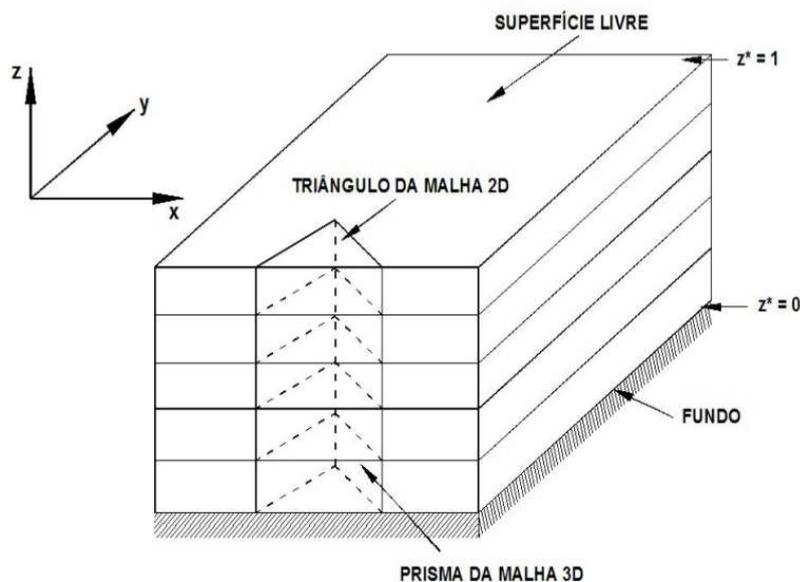


Figura 2.4 – Malha tridimensional obtida pela superposição da malha bi-dimensional de elementos triangulares (modificado de Hervouet (2007))

- Contornos Sólidos, referente ao fim do domínio da malha, basicamente na região costeira.

Os dados utilizados como condições iniciais e de contorno foram extraídos de diferentes fontes para o domínio do modelo, e depois interpolados e prescritos para cada ponto da malha de elementos finitos.

As séries de descargas fluviais do rio Guaíba e do rio Camaquã (Fig. 2.5) foram extraídas da página da Agência Nacional de Águas - ANA (www.ana.gov.br) nos anos de 2003 a 2015. Com estes dados foram feitas médias diárias formando uma série temporal de um ano.

Os dados foram obtidos para estações fluviométricas destes rios na forma de medidas diárias, e interpolados linearmente para cada passo de tempo do modelo. Os dados de descarga do Canal São Gonçalo foram considerados constantes em $390 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ durante toda a simulação, devido à falta de séries temporais de Oliveira (2012).

A partir do modelo HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*), foram obtidos os dados oceanográficos, representados pelas componentes da velocidade da corrente, salinidade e temperatura da água do mar representados em vermelho na Fig. 2.5. Para este modelo de reanálise, foi calculada a média diária dos anos de 2003 a 2015 formando um ano de médias diárias. A resolução espacial dos dados que estão sendo utilizados no trabalho é de $0,08^\circ$ de latitude e longitude, com escala temporal é de 24 h.

Os dados meteorológicos representam as condições superficiais, utilizando o banco de dados do NOAA (*National Oceanic Atmospheric Administration*), representados por velocidade de vento, temperatura do ar e pressão atmosférica representados em azul na Fig. 2.5. A resolução espacial dos dados utilizados no trabalho é de $2,5^\circ$, com escala temporal de 6 h. Neste caso também foram utilizadas as médias na escala temporal, formando um ano de médias interpolados entre os anos de

2003 e 2015.

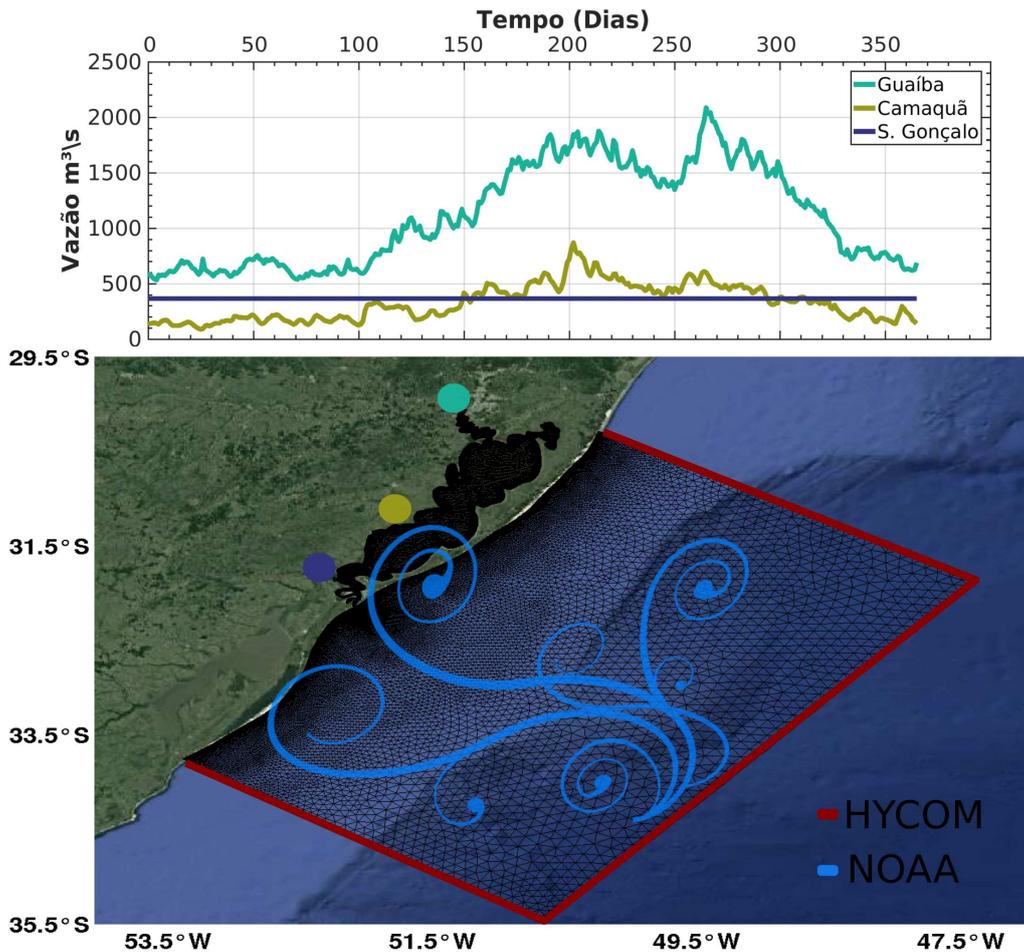


Figura 2.5 – Condições iniciais e de contorno utilizadas (imagens sobreposta da Google maps, landsat / Copernicus, data 2017) .

Desta forma, os resultados obtidos formam um conjunto de condições de contorno anuais com dados médios diários (vazão de afluentes e do modelo HYCOM) e médias 6 h x 6 h (NOAA). Com o uso deste banco de dados, é possível reproduzir os principais ciclos de variabilidade sazonal da região de estudo. A partir destes conjuntos de dados, foram construídas condições iniciais e de contorno para as variáveis utilizadas como forçantes do modelo numérico (Fig. 2.5).

Acoplamento dos Modelos Telemac-3D X ECOS

O fluxograma representado na (Fig. 2.6) apresenta o sistema na ordem das etapas para realização do trabalho. O acoplamento dos dois modelos foi realizado através da utilização da linguagem de programação FORTRAN95.

O modelo Telemac-3D utiliza os bancos de dados (HYCOM, ANA e NOAA) para realizar os cálculos de condições de velocidade de corrente e e elevação da superfície livre do mar. De posse destas variáveis, o modelo ECOS calcula as velocidades de espalhamento, advecção e difusão turbulenta do óleo. Desta forma, o modelo define a posição final das partículas de óleo vazado.

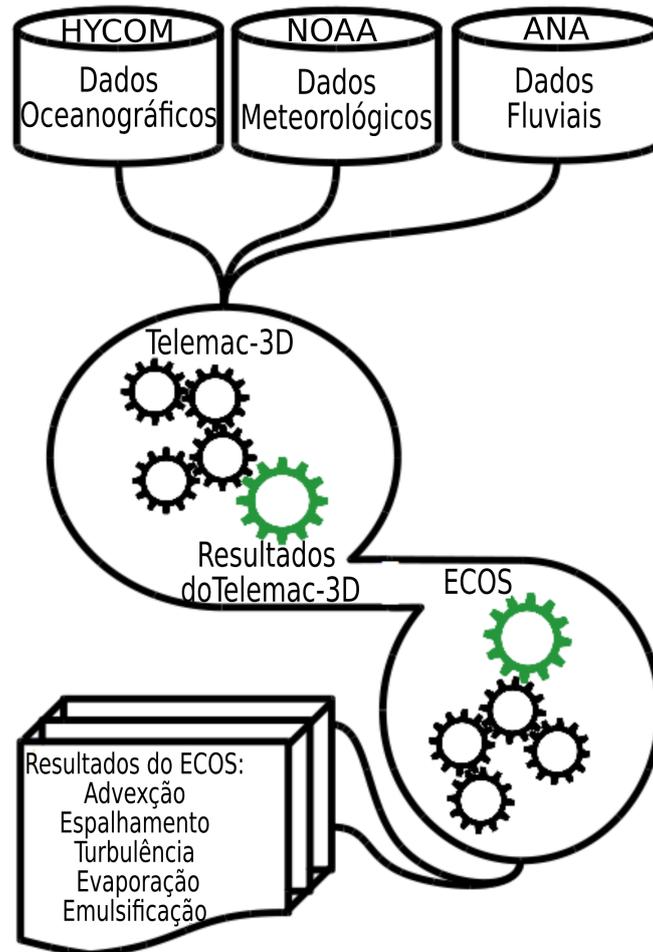


Figura 2.6 – O fluxo de informações do sistema de modelagem, cujas etapas são ilustrados de forma simplificada.

As informações de temperatura, salinidade, massa específica da água do mar, a velocidade dos ventos e API são passadas para o módulo de intemperismo que inicialmente faz uma interpolação e uma média das propriedades mais próximas para cada traçador. Com todas as informações necessárias disponíveis, os processos de emulsificação, evaporação são calculados.

Após todas as variáveis terem sido calculadas, o programa salva os resultados a cada passo de salvamento do modelo ECOS, sendo salvo as informações em dois arquivos. O primeiro arquivo guarda as posições x , y , z do derrame e o segundo arquivo guarda o valor das propriedades de intemperismo.

2.5. Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL)

Para identificação da problemática associada à chegada do óleo na costa, foi utilizado o ISL (Fig. 2.7) para a região de estudo. O ISL é uma ferramenta amplamente utilizada para o planejamento de contingência, e para a implementação de ações de resposta a incidentes de poluição por óleo (Freire, 2006), (Castanedo et al., 2009) e (Nicolodi, 2016). A Fig. 2.7 mostra a classificação do ISL para o

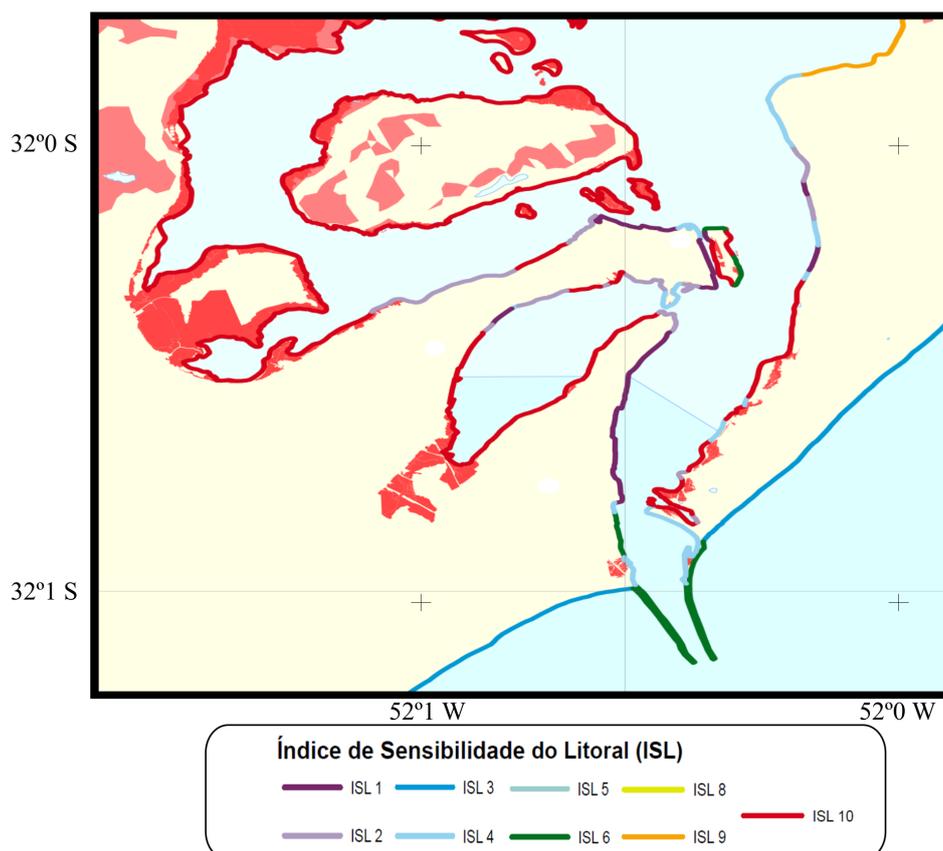


Figura 2.7 – Mapa do Índice de Sensibilidade do Litoral ajustado para região do Porto de Rio Grande. Fonte: Adaptado de Nicolodi (2016).

estuário da Lagoa dos Patos, que é baseada no parâmetro que inicia em 1, para ambientes menos sensíveis, variando até 10 para os setores da costa mais vulneráveis MMA (2007).

O ISL possui um sistema de hierarquização que integra os fatores de exposição relativa do ambiente à energia das ondas e marés, à declividade da praia, ao tipo de substrato e sensibilidade, e à produtividade da biota (MMA, 2007) e (Nicolodi, 2016). As características físicas dos ISL's da região onde a chegada de partículas de óleo simuladas podem ser visualizadas na Tab. 2.1.

Tabela 2.1 – Características dos ISL's da região de estudo.

Índice	Tipos de Costas
ILS 1	<ul style="list-style-type: none"> – Costões rochosos lisos, de alta declividade, expostos – falésias em rochas sedimentares, expostas – Estruturas artificiais lisas (paredões marítimos artificiais), expostos
ILS 2	<ul style="list-style-type: none"> – Costões rochosos lisos, de declividade média a baixa, expostos – Terraços ou substratos de declividade média, expostos
ILS 4	<ul style="list-style-type: none"> – Praias de areia grossa – Praias intermediárias de areia fina a média, expostas – Praias de areia fina a média, abrigadas
ILS 6	<ul style="list-style-type: none"> – Praias de cascalho (seixos e calhaus) – Costas de detritos calcários – Depósito de tálus – enrocamentos (guia corrente e quebra-mar) expostos – Plataforma ou terraço exumado recoberto por concreções lateríticas
ILS 10	<ul style="list-style-type: none"> – Deltas e barras de rio vegetadas – Terraços alagadiços, banhados, brejos, margens de rios e lagoas – Brejo salobro ou de água salgada, com vegetação adaptada ao meio salobro ou salgado, apicum – Marismas

Tabela adaptada de Nicolodi (2016).

2.6. Período das simulações

O período da simulação hidrodinâmica foi dividido em 3 etapas. Na primeira foi realizada a verificação da qualidade dos resultados hidrodinâmicos, onde foram realizadas 4 simulações por 105 dias, entre o período de 01/11/2010 e 15/02/2011. As informações obtidas foram utilizadas para validação dos resultados do modelo, a partir da comparação com dados de correntes e salinidade, observados em campo, na região da Praticagem de Rio Grande Fig. 1.1.

Na segunda etapa foi realizada uma simulação hidrodinâmica de 365 dias, sendo esta equivalente às médias diárias dos dados atmosféricos e oceanográficos calculadas entre os anos de 2003 e 2015. Os resultados da simulação hidrodinâmica, equivalente a 1 ano médio, foram comparados com estudos já realizadas na região para identificar as principais características hidrodinâmicas da região de estudo.

Na terceira etapa foram realizadas as simulações de vazamentos de óleo. Essas simulações foram realizadas de 6 em 6 dias, com a duração do evento de vazamento de 24 h e com passo de salvamento de 1 h. No total foram realizadas 60 simulações divididas igualmente no tempo, durante os 365 dias da simulação hidrodinâmica média.

2.6.1. Abordagens e justificativas do estudo

As informações do óleo utilizadas no modelo ECOS foram obtidas no relatório técnico da Autoridade Ambiental do Rio Grande do Sul-FEPAM¹, Ministério do Meio Ambiente-MMA², Marinha do Brasil³, e da Agência Nacional do Petróleo-ANP. As principais características físicas de inicialização do modelo são apresentadas na Tab. 2.2.

Tabela 2.2 – Características físicas utilizadas nas simulações numéricas.

Tipo de Óleo	Petróleo (A)
Volume Inicial de Óleo	20 m ³
Densidade da Água do Mar	1025 kg m ⁻³
Densidade do Óleo	800 kg m ⁻³
°API	44,5
Viscosidade Água Salgada	0,893 × 10 ⁻³ m ² s
Volume das Partículas	0,05 m ³

A escolha hipotética de 20 m³ de volume de óleo derramado segue a norma de “Modelagem e Derramamento de Óleo no Mar” 023/2002, do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis-IBAMA, que registrou o pior cenário na região de estudo, com o vazamento de aproximadamente de 13 e 20 m³ na monoboia de Tramandaí, localizada no litoral norte do estado do Rio Grande do Sul.

A utilização de um óleo com característica leve (800 kg m⁻³), foi devido a tabela fornecida pela empresa Petróleo Brasileiro S.A. onde apresenta os quartos principais óleos transportados no porto de Rio Grande, o de menor densidade possui a menor capacidade de emulsificação, logo, menor modificação de suas características após o derrame quando comparado com os demais óleos da tabela. O ponto inicial de derrame do óleo simulado está localizado no terminal portuário da Transpetro (ponto 1 da Fig. 1.1), sendo as coordenadas do ponto 32°04'37,2" S e 53°05'27,6".

¹<https://www.marinha.mil.br/>

²<http://www.mma.gov.br/>

³<http://www.fepam.rs.gov.br/>

3. CALIBRAÇÃO DOS RESULTADOS HIDRODINÂMICOS

A simulações hidrodinâmicas utilizadas para a calibração dos resultados foram conduzidas por 105 dias, de 01/11/2010 a 15/02/2011. Estas informações foram utilizadas para analisar os resultados do modelo a partir da comparação com dados observados em campo que foram coletadas no mês de janeiro de 2011.

Para realização do estudo com o modelo hidrodinâmico, o Telemac-3D foi calibrado usando quatro parametrizações, modificando duas variáveis: o coeficiente de influência do vento e o coeficiente de fricção com o fundo.

As modificações se deram da seguinte forma, conforme apresentado na tabela Tab. 3.1

Tabela 3.1 – Tabela das constantes modificadas

Simulações	Coeficiente de atrito do vento	Coeficiente de fricção do fundo
V1F4	$1. 10^{-5}$	0,04
V1F5	$1. 10^{-5}$	0,05
V5F5	$5. 10^{-6}$	0,05
V5F4	$5. 10^{-6}$	0,04

Para verificar a reprodutibilidade do modelo, o resultado hidrodinâmico da simulação foi comparado com as observações de correntes e salinidade medidas no canal de acesso a Lagoa dos Patos (Estação da Praticagem) no período de 05/01/2011 a 30/01/2011.

Os dados de corrente foram obtidos com um *Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)* posicionado no canal de navegação, em uma profundidade de 14 m. Para melhorar a comparação entre as séries temporais, foi utilizado um filtro cossenoidal tipo Lanczos para remover as oscilações de alta frequência (períodos inferiores a 12 h das séries temporais). Os dados de salinidade foram obtidos utilizando um sensor de Condutividade e Temperatura (CT) posicionado no mesmo ponto do canal de navegação, em uma profundidade de 3 m.

A Fig. 3.1 mostra a comparação das séries temporais observadas (pontos pretos) com o resultado de quatro simulações com diferentes configurações (linhas cinzas). As configurações diferem quanto aos valores do coeficiente do vento e de atrito de fundo, que foram calibrados de forma a reduzir a diferença entre os valores observados e simulados.

O modelo demonstrou boa reprodução das tendências observadas de corrente e salinidade, sendo que o modelo subestima ambos os valores. A performance das simulações foram quantificadas utilizando os mesmos métodos utilizados por Sutherland e Wallingford (2001); Marques et al. (2017) e Oleinik et al. (2017), com o cálculo da média, erro absoluto, erro quadrático médio (RMSE) e o coeficiente de correlação (R), que são apresentados na Tab. 3.3 Tab. 3.2.

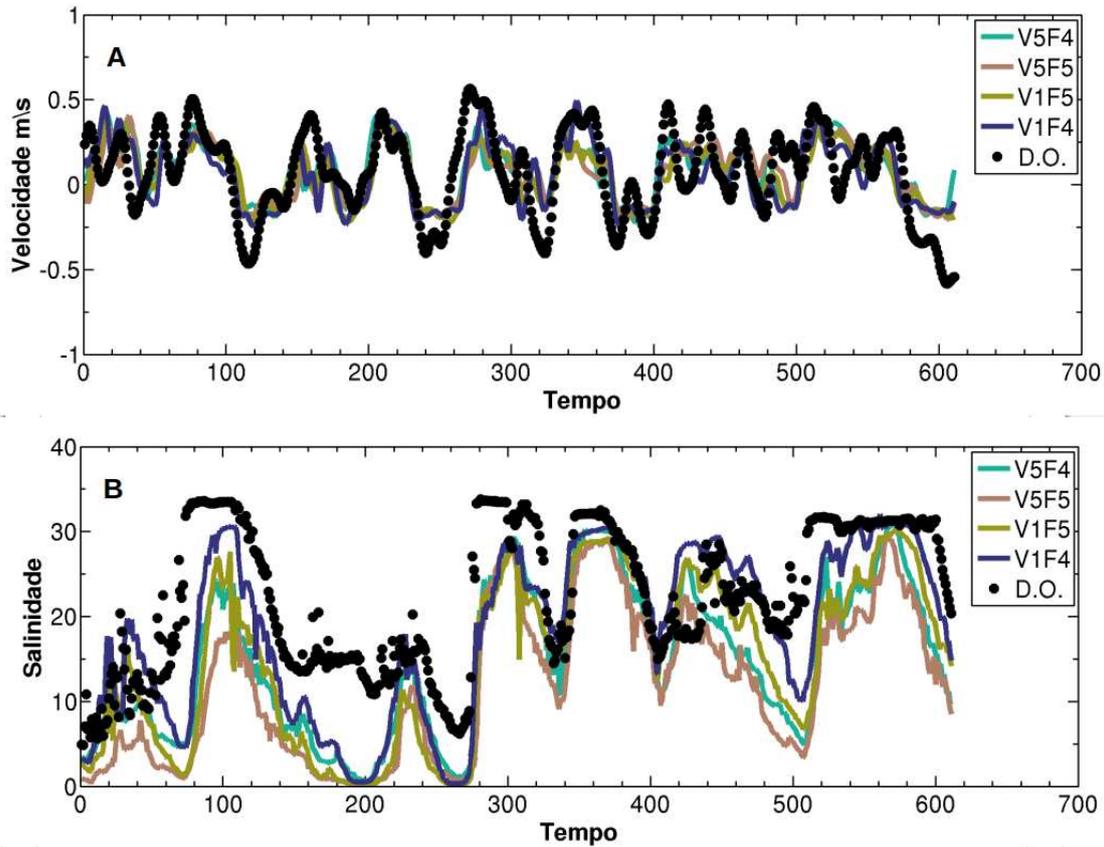


Figura 3.1 – Comparação da velocidade meridional (A) e da salinidade (B). Em preto são representados os dados observados (D.O) e colorido são apresentados os dados calculados pelo modelo (V1F4, V1F5, V5F5 e V5F4).

Tabela 3.2 – Estatísticas da velocidade de corrente das simulações hidrodinâmica

Parametros	V1F4	V1F5	V5F4	V5F5
Média	0,066	0,056	0,082	0,080
Erro absoluto	0,155	0,161	0,158	0,159
Erro quadrático médio	0,193	0,195	0,195	0,196
Coefficiente de correlação	0,661	0,648	0,652	0,645

Média do dado coletado 0,074.

Tabela 3.3 – Estatísticas salinidade das simulações hidrodinâmica

Parametros	V1F4	V1F5	V5F4	V5F5
Média	18,450	14,949	14,754	11,856
Erro absoluto	5,740	8,019	7,976	10,622
Erro quadrático médio	7,466	9,864	9,525	12,109
Coefficiente de correlação	0,768	0,750	0,766	0,757

Média da salinidade dado coletado 22,357.

A simulação V1F4 (linha azul) apresentou a melhor performance, quando comparada com as demais, conforme apresentado na Tab. 3.2 e na Tab. 3.3. A subestimação dos resultados numéricos podem estar relacionadas ao uso de um coeficiente constante de influência do vento ou ausência de energia das ondas geradas pelo vento na hidrodinâmica. Pois estes são fatores que na realidade apresentam variabilidade espacial na região estudada, mas sua implementação requereria informações não disponíveis ou o acoplamento de outros módulos ao sistema de modelagem utilizado (Marques et al., 2017). Outro fator seria a baixa resolução dos dados de reanálise conforme estudado pelos autores (Sutherland e Wallingford, 2001).

Simionato et al. (2006) realizaram simulações numéricas da hidrodinâmica para a região do Rio da Prata utilizando dados de reanálise do NOAA, com o objetivo de comparar a confiabilidade dos dados de vento calculados e observados. Estes autores concluíram que os eventos de alta intensidade foram subestimados em até 50% quando comparado com dados de campo, porém mesmo que eles tendem a subestimar a velocidade, a direção e a variação do vento parecem estar devidamente representados, nas escalas atmosféricas sinóticas e intra-sazonais.

A verificação dos resultados indica que mesmo com a limitação dos dados usados para forçar o modelo, a simulação reproduz a tendência das observações no canal estuarino da Lagoa dos Patos. Assim é possível utilizar a simulação para avaliar prováveis cenários de derramamento de óleo na região do estudo.

4. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados hidrodinâmicos da simulação de 365 dias, com passo de salvamento diário, utilizando dados médios da região da Lagoa dos Patos e da Plataforma Continental Sul Brasileira como forçantes do sistema de modelagem.

4.1. Padrões de Ventos

Para os resultados de padrões de ventos da simulação hidrodinâmica foi utilizado o método de análise com rosas dos ventos (Fig. 4.1). Os dados foram separados em faixas de frequência e intensidade durante o período analisado, e também divididos nas estações do ano para detectar padrões sazonais. Observa-se que os padrões de ventos encontrados na região de estudo apresentaram similaridade com outros estudos já realizados na região, como por exemplo, os trabalhos realizados por Moller et al. (2001), Machado et al. (2010), e por Back et al. (2014).

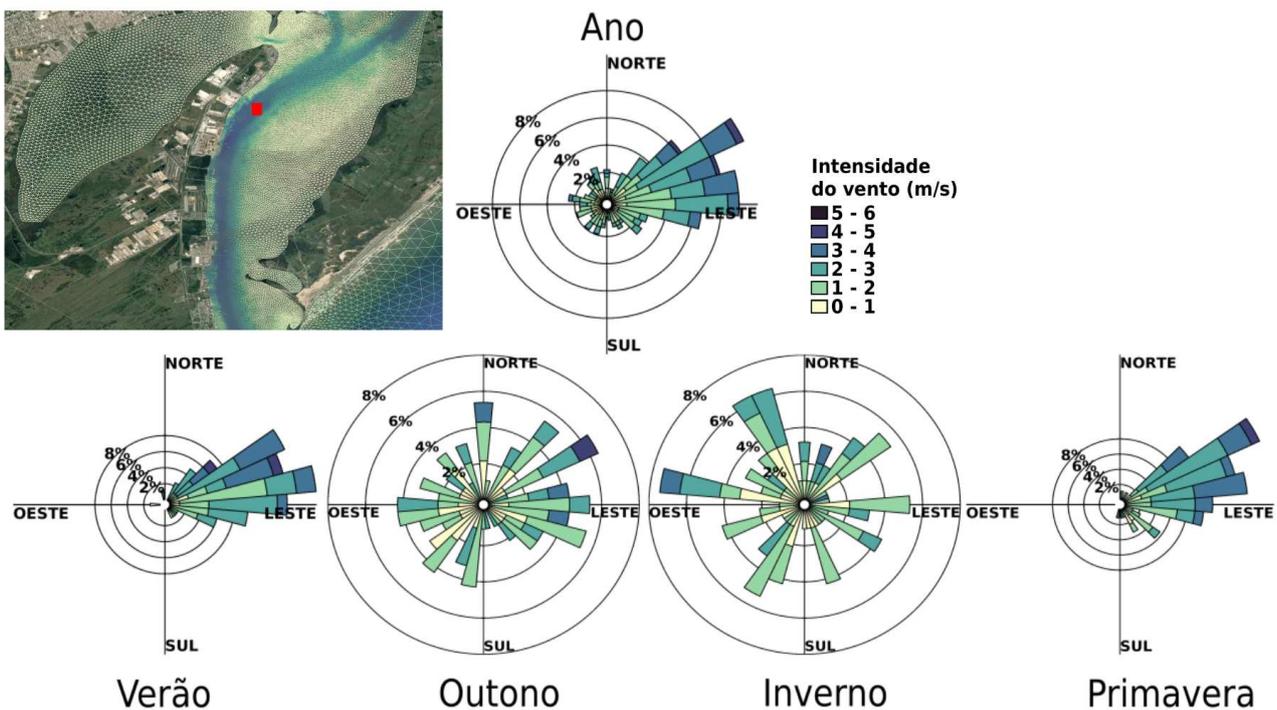


Figura 4.1 – Padrões de ventos, resultado da direção e intensidade que atuam na simulação. O ponto vermelho indica o local de extração das series temporais.

A utilização dos dados médios tem como consequência uma certa redução da intensidade do vento. Outro ponto que deve ser levado em consideração é a utilização do banco de dados de vento do NOAA, que de acordo com Simionato et al. (2006), podem mostrar uma diferença de até 50% entre os dados de campo e os dados utilizados na representação de eventos extremos de vento.

Os padrões apresentados nas condições de sazonalidade são representativos para a direção dos ventos, como pode ser comparado ao gráfico de padrões de ventos no trabalho de Back et al.

(2014). Nas estações de verão e primavera pode-se observar maior frequência de ventos de Nordeste, e para as estações mais frias (outono e inverno) há maior variabilidade na direção dos ventos. Esse comportamento ocorre, segundo Machado et al. (2010), na região do sul do Rio Grande do Sul devido à sua posição geográfica localizada em uma zona de transição climatológica, onde os principais sistemas globais impactantes são os extratropicais e intertropicais.

4.2. Hidrodinâmica

Serão abordados nesta seção, os estudos das condições hidrodinâmicas de nível do mar, salinidade, o padrão de correntes para a região de estudo. Essa análise visa contribuir com o entendimento dos padrões de interação das forçantes físicas nos efeitos hidrodinâmicos na região estuarina da Lagoa dos Patos. Inicialmente os resultados serão comparados com trabalhos de referência da região, a fim de demonstrar a confiabilidade na utilização dos resultados dos 365 dias para analisar as tendências de comportamento médio para o ambiente estudado.

4.2.1. Elevação do Nível

No primeiro momento, são apresentadas as variações de elevação para a região do estudo. A escala de cores representa a variação de nível em metros, onde os tons em azul indicam os valores mais baixos, e os tons de vermelho indicam os valores mais elevados, conforme observado na Fig. 4.2.

O resultado da figura Fig. 4.2(A) mostra a elevação média, sendo os maiores valores de elevação na região do médio estuário, situado entre a cidade de Pelotas e a Ponta da Feitoria. Já na região da desembocadura, na região norte da Lagoa dos Patos e zona costeira adjacente, são observados os menores valores de elevação do nível.

Möller Jr. e Castaing (1999), utilizando dados observados no verão e um modelo barotrópico, encontraram cenários semelhantes ao da Fig. 4.2, e concluíram que este padrão resulta principalmente devido à ação local dos ventos predominantemente atuando de Nordeste, também devido à contribuição dos rios Guaíba e Camaquã, que são importantes afluentes da Lagoa dos Patos.

Analisando o padrão de máxima elevação (Fig. 4.2B), observa-se as maiores elevações na região sul (Ponta da Feitoria e cidade de Pelotas) e na região norte da Lagoa dos Patos, como resultado da combinação dos efeitos do vento e da descarga fluvial.

De acordo com Moller et al. (2001), Castelão e Moller Jr (2003) e Marques et al. (2009), o fenômeno de elevação do nível máximo da região norte da Lagoa dos Patos está relacionado à passagem de sistemas meteorológicos extratropicais, com ventos do quadrante sul, fazendo com que o nível ao norte da laguna se eleve.

4.2.2. Correntes e Salinidade

A Fig. 4.3(A) apresenta os campos médios de salinidade na camada de fundo do modelo. A Fig. 4.3(A) também mostra os locais onde foram retirados os transectos 1 e 2. Os resultados mostram os padrões de salinidade e a interação da descarga da Lagoa dos Patos com o oceano costeiro adjacente.

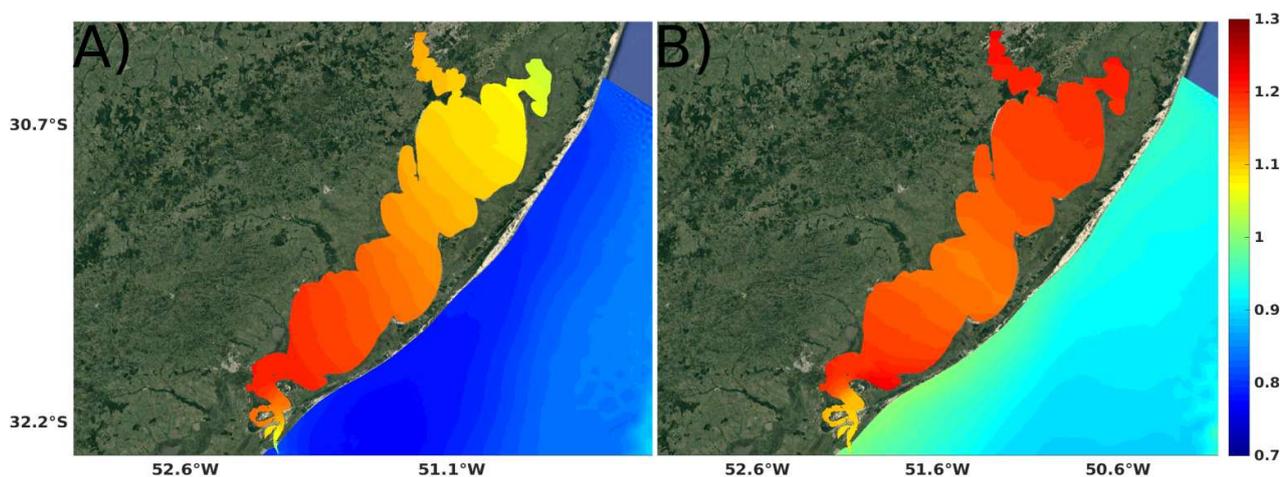


Figura 4.2 – Média temporal (A) e valores máximos (B) da elevação da superfície livre na Lagoa dos Patos. O mapa de cores representa o valor da elevação, em metros.

Em média, os resultados apresentam pouca entrada de sal no estuário, como consequência da dominância de eventos de vazante durante a simulação. Resultados similares dos padrões de salinidade foram observados em outros estudos como em Moller et al. (2001), Marques et al. (2009), Marques et al. (2010), Marques et al. (2011) e Marques et al. (2014).

A escala das Figs. 4.3(B) e (C) foi ajustada para representar melhor as mudanças de salinidade na região. A Fig. 4.3(B) mostra o transecto transversal ao canal contendo concentração de salinidade entre 0 e 7, com as maiores concentrações de sal localizadas fundo. A maior massa específica das águas costeiras, causada pela maior concentração de sal faz com que as maiores salinidades ocorram no fundo do canal do porto de Rio Grande.

A Fig. 4.3(C) mostra a média de salinidade ao longo da coluna de água para o canal do porto de Rio Grande. A Fig. 4.3(C) apresenta também os vetores com as direções das correntes, indicando o sentido médio das correntes no estuário em direção ao oceano. Nessa região, próximo a desembocadura do estuário, as correntes próximas do fundo são direcionadas para a desembocadura provocando a entrada de água salgada para dentro da região estuarina, de forma similar ao verificado nos trabalhos de Moller et al. (2001), Marques et al. (2011), e Marques et al. (2014).

A Fig. 4.4 apresenta os casos de máximos e mínimos de salinidade. A linha em vermelho na Fig. 4.4(C) indica a posição dos transectos mostrados à direita, nas Figs. 4.4(B) e (D). O campo de salinidade máxima permite observar o alcance da influência da água do mar no estuário. As Figs. 4.4(C) e (D) mostram a mínima de salinidade da região de estudo, para identificar a maior abrangência da pluma da Lagoa dos Patos que avança superficialmente em direção ao mar.

4.3. Derrames de óleo

4.3.1. Relação entre ano simulado com os dias utilizados na simulação de vazamentos de óleo

Para demonstrar a representatividade do uso de 60 simulações de vazamento de óleo, com intervalos de 6 dias na simulação hidrodinâmica de 365 dias, foi realizada a comparação das correntes

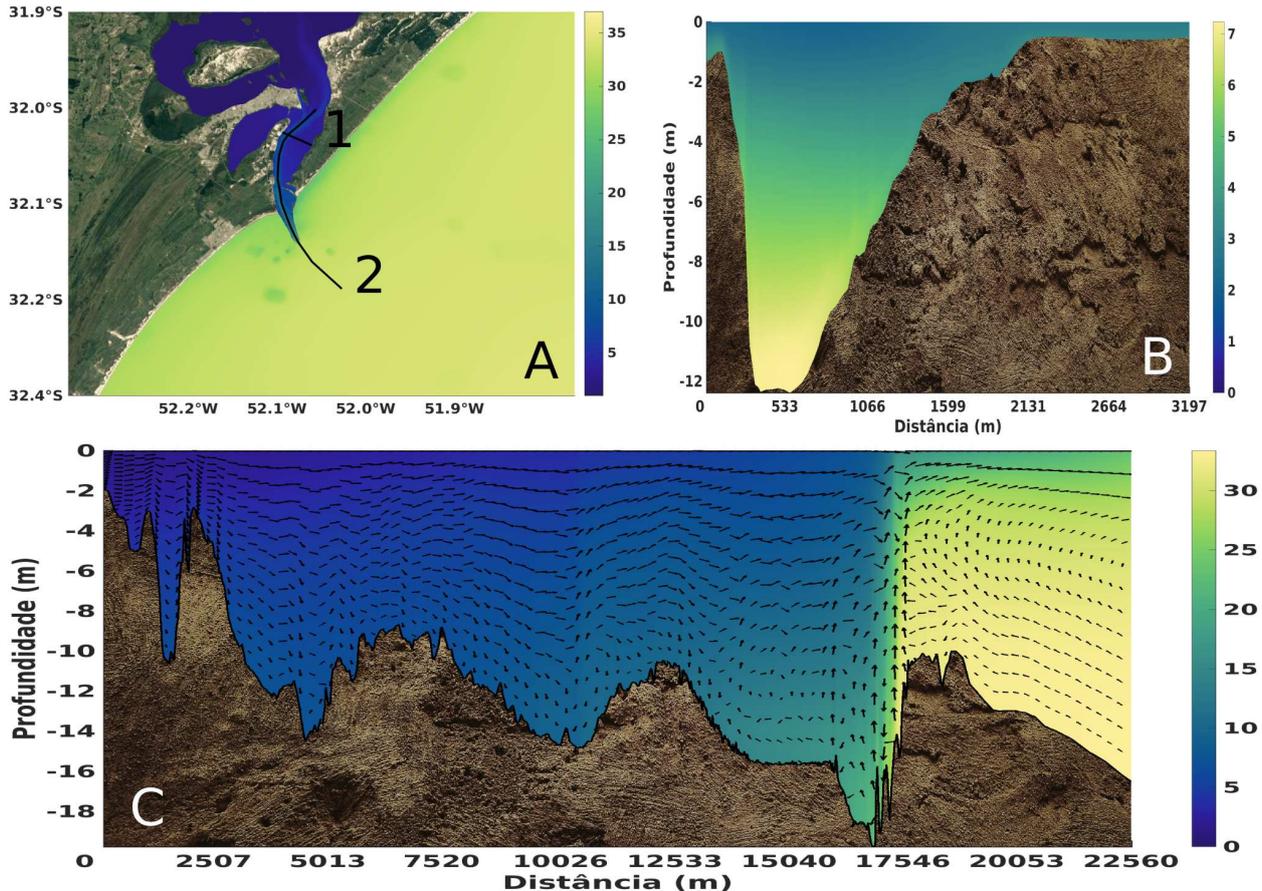


Figura 4.3 – (A) Campo de salinidade média do fundo, (B) transecto transversal ao canal e (C) transecto longitudinal ao canal de navegação com vetores representando a direção média das correntes.

e ventos no ponto inicial do vazamento do óleo, visto que essas duas são as principais componentes que influenciam o deslocamento do óleo dentro do estuário.

Comparando as correntes do período total de 365 dias (Fig. 4.5 (A)) com as correntes dos eventos selecionados para os vazamentos do óleo (Fig. 4.5 (B)), pode-se observar uma grande correlação. As duas situações mostram ocorrências próximas de 90% para sudoeste, representando uma dominância de eventos de vazante no estuário. Outra característica muito similar são as intensidades de corrente que também foram encontrados com resultados semelhantes nos estudos de Möller Jr. e Castaing (1999), Marques et al. (2010) e Marques et al. (2011). Esses autores também identificaram que em média, ocorre a dominância de eventos de vazante na região de estudo.

Os resultados dos ventos para os 365 dias (Fig. 4.6(A)) comparado com os resultados dos ventos para os 60 dias de simulação de vazamento de óleo (Fig. 4.6(B)) apresentaram maior variação de direção e intensidade quando comparado a velocidade de corrente. As principais características dos ventos são similares, o vento predominante é de Nordeste e Leste, e também apresenta uma variação considerável dos ventos de outros quadrantes. Desta forma, existe uma relação dos ventos entre o ano simulado e os ventos nos dias de vazamento do óleo. Um contraste é que os 60 dias simulados de vazamento de óleo não apresentaram os maiores picos de intensidade de vento de Nordeste, como

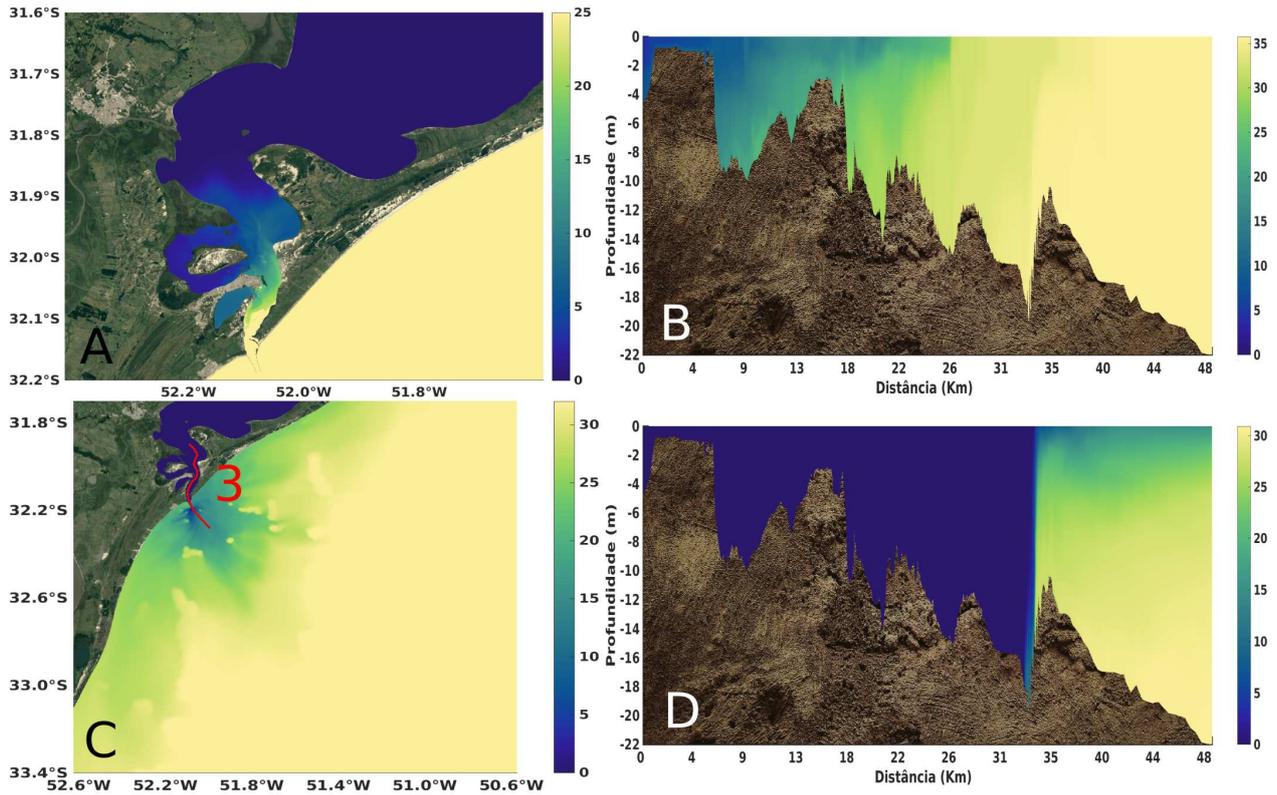


Figura 4.4 – (A) e (B) indicam os cenários de máxima de salinidade. (C) e (D) indicam os cenários de mínima salinidade.

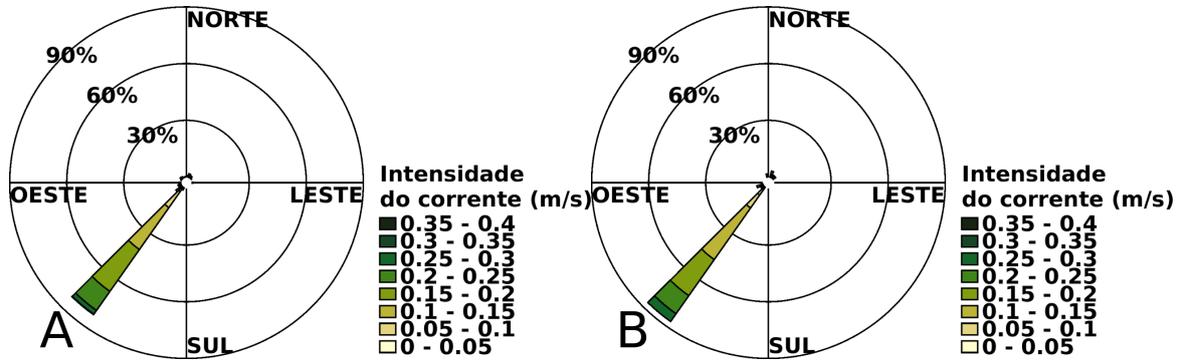


Figura 4.5 – Comparação entre os as correntes para os 365 dias de simulação (A) e para os 60 dias de vazamento de óleo (B).

todo o período de 365 dias de simulação.

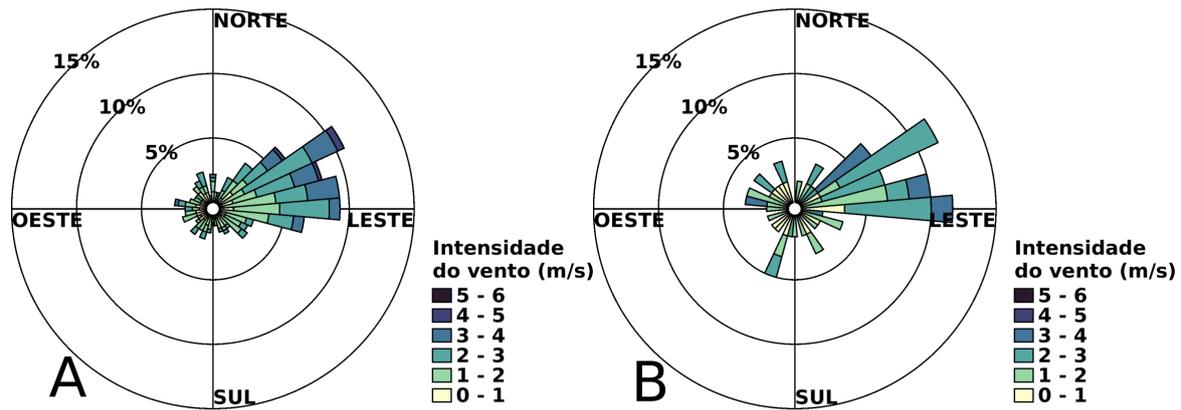


Figura 4.6 – Comparação entre os ventos para os 365 dias de simulação (A) e para os 60 dias de vazamento de óleo (B).

4.3.2. Deslocamento das partículas de óleo de todos os vazamentos

A Fig. 4.7 apresenta todas as 60 simulações dos vazamentos de óleo, em um quadro temporal, onde cada cor representa um vazamento. Nesta figura observa-se as possibilidades para o deslocamento das partículas de óleo, no médio e baixo estuário da Lagoa dos Patos, em vazamentos com períodos de 24 h.

Na Fig. 4.7 observa-se a tendência do deslocamento das partículas de óleo devido a combinação dos efeitos dos ventos e da descarga dos afluentes da Lagoa dos Patos. Durante o período de verão e primavera, os ventos de Nordeste são de maior frequência e a descarga dos afluentes é baixa. Enquanto no outono e inverno, os ventos possuem maior variabilidade em todas as direções, que são combinadas com as maiores descarga dos afluentes.

Moller et al. (2001), Machado et al. (2010), Marques et al. (2011) e Marques et al. (2014) também observaram a diferença do comportamento da corrente dominando nas diferentes estações do ano, influenciadas principalmente por ventos e descarga dos rios dentro do estuário da Lagoa dos Patos.

Neste contexto é possível perceber que as partículas de óleo ocupam uma porção da região portuária de Rio Grande e São José do Norte. Para melhor entendimento deste estudo, a Fig. 4.8 identifica os locais de chegada das partículas de óleo relacionando as regiões nas tabelas 4.1 e 4.2.

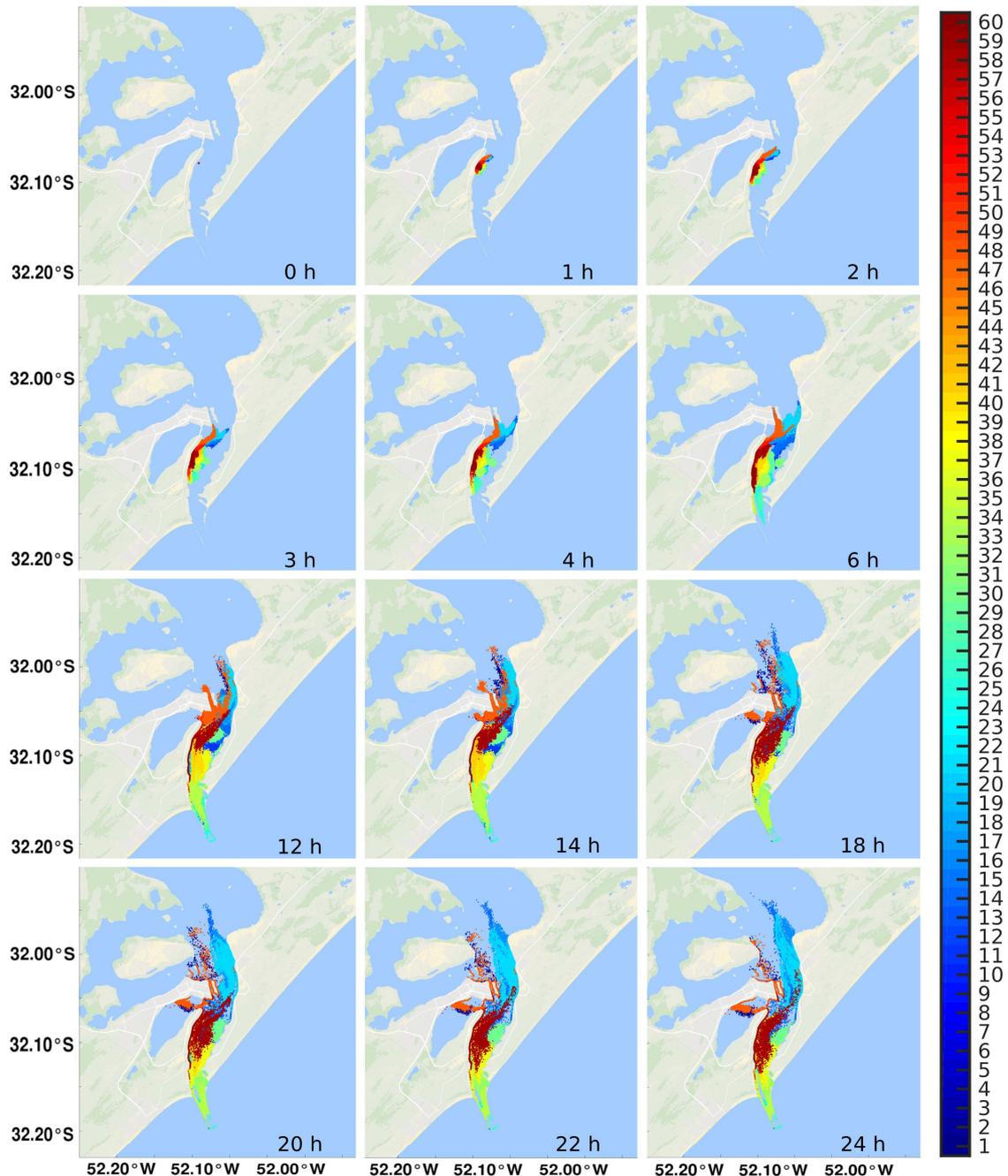


Figura 4.7 – Resultados das 60 simulações de vazamento de óleo, as imagens ilustram o deslocamento das partículas no tempo.

No verão (simulação 1 a 14 na Tab. 4.1 e cor azul escuro na Fig. 4.7), e primavera (simulações 45 a 60 na Tab. 4.1 e cor vermelho na Fig. 4.7) possui pouca variabilidade nos padrões dos ventos, com sentido de nordeste, e por consequência, as correntes contribuem para o transporte do óleo no sentido de vazante.

Nas estações de verão e primavera são observados que em 100% das simulações uma porção das partículas de óleo chega na encosta da região do Super Porto (R1). Nestas estações, existe a probabilidade de que em 17,9% das simulações, uma porção das partículas de óleo chegue a encosta da enseada do Saco da Mangueira (R10). Nenhuma das simulações nos períodos de verão e primavera

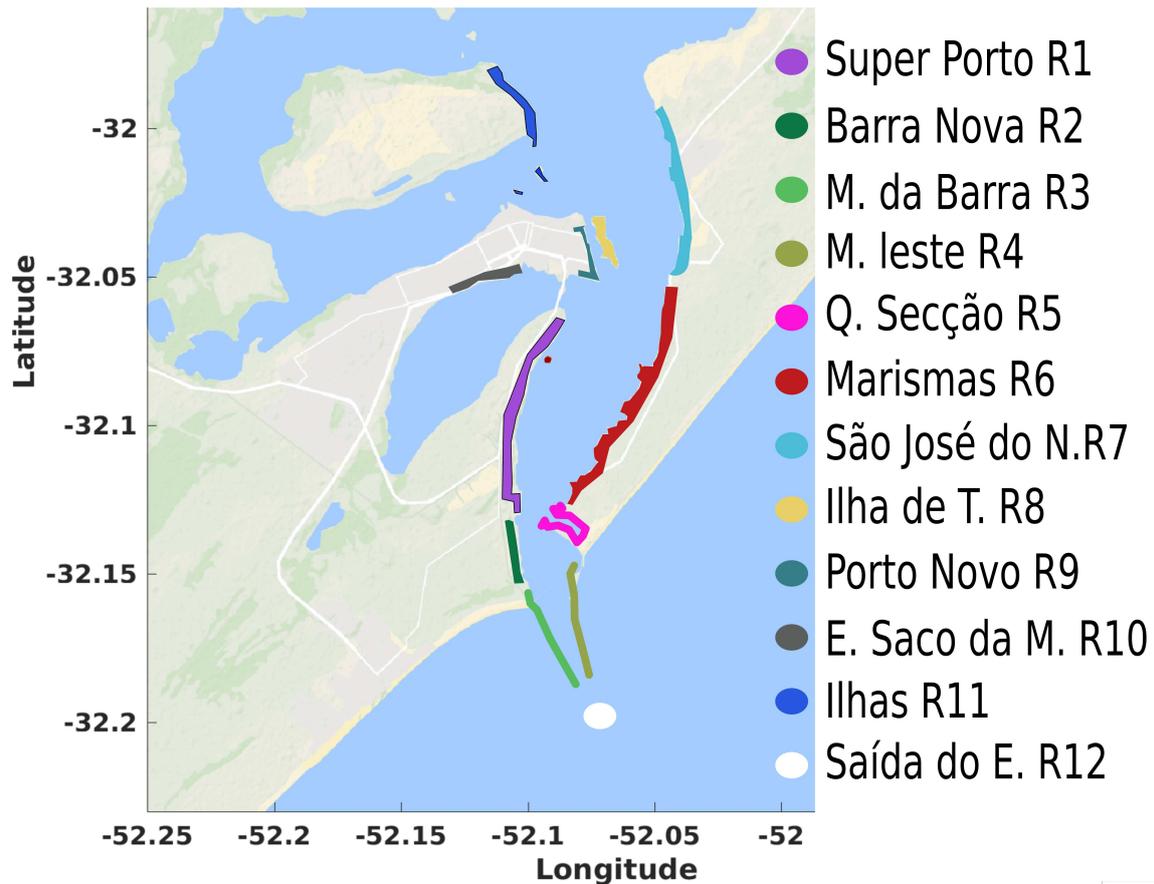


Figura 4.8 – Locais com características similares, relacionadas com os pontos de chegada do óleo.

chegam a região do Molhes da Barra (R3), Molhes Leste (R4), Q.Secção (R5) e Marismas (R6).

No verão, apenas as simulações 6 e 11 possuem características de enchente. Na simulação 6 as partículas de óleo chegaram à encosta da cidade de São José do Norte (R7), Ilha de Terraplina (R8), Ilhas dos Marinheiros e Ilha da Pólvora (R11). Nas simulações 6 e 11, as partículas de óleo atingiram à encosta do Porto Novo (R9) e enseada do Saco da Mangueira (R10).

Para a primavera, os resultados foram parecidos com as simulações anteriores (6 e 11) induzido pelo fenômeno de enchente. As três simulações deste período (49, 53 e 58) chegaram ao Super Porto (R1) e enseada do Saco da Mangueira (R10). A simulação 49 chega na encosta do Super Porto (R1), Porto Novo (R8), Ilha de terraplina (R9), Ilhas dos Marinheiros e Ilha da Polvora (R11).

No outono (simulações 15 a 28 na Tab. 4.2) nas cores azul e azul celeste na Fig. 4.7, e no inverno (simulações 29 a 44 na Tab. 4.2 nas cores verde, amarelo e laranja na Fig. 4.7) a variação da direção dos ventos e a vazão acumulada dos rios induzem as correntes a variar o sentido, e por conseguinte, observa-se a chegada das partículas de óleo em vários locais, conforme a Tab. 4.2.

Tabela 4.1 – Deslocamento e localização das regiões contaminadas pelo óleo, durante o período de verão e primavera

Simulação	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
1	x											
2	x											
3	x											
4	x											
5	x											
6	x						x	x	x	x	x	
7	x											
8	x											
9	x											
10	x											
11	x								x	x		
12	x											
13	x											
14	x											
45	x	x										
46	x											
47	x											
48	x											
49	x							x	x	x	x	
50	x											
51	x											
52	x											
53	x									x		
54	x											
55	x											
56	x											
57	x											
58	x									x		
59	x	x										
60	x											
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
%	100	7,8	0	0	0	0	3,6	7,8	10,7	17,8	7,8	0

Nas estações de outono e inverno são observados que em aproximadamente 60% das simulações uma porção de partículas de óleo chegam à encosta da região do Super Porto (R1), 40% chegam na região de Marismas (R6) e 30% atingem a região dos Molhes da Barra (R3). A probabilidade das partículas de óleo saírem para fora da região do Estuário (R12) é de 16,7% considerando os cenários estudados. Nestas simulações, as partículas de óleo não chegaram a região do Saco da Mangueira (R10), Ilha dos Marinheiros e Ilha da Pólvora (R11).

No outono (simulações 15 a 28 na Tab. 4.2) ocorre a variação da direção e intensidade da velocidade de corrente e ventos (alternada por fenômenos de vazante e enchente) no baixo estuário. Nos cenários 15, 17, 18, 19, 20 e 24, a corrente é orientada pelo fenômeno de enchente, assim as

Tabela 4.2 – Deslocamento e localização das regiões contaminadas pelo óleo, durante o período de outono e inverno

Simulação	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
15	x					x	x	x	x			
16						x						
17	x	x	x			x	x	x	x			x
18	x						x	x	x			
19	x						x	x	x			
20	x						x	x	x			
21	x											
22	x	x	x									x
23						x						
24	x						x	x	x			
25						x						
26			x	x	x	x						
27	x	x	x									
28				x	x							x
29	x	x	x									
30			x	x	x							x
31						x						
32						x						
33						x						
34				x	x							
35					x	x						
36	x	x	x	x								x
37	x	x	x									
38	x	x	x			x						
39					x	x						
40	x											
41	x											
42	x											
43	x											
44	x											
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
%	60	23,3	30	16,7	20	40	20	20	20	0	0	16,7

partículas de óleo deslocam-se para a região de São José do Norte (R7), Ilha de Terraplina (R8) e Porto Novo (R9). Outra característica é a influência do vento no quadrante Sul, pois 6 simulações (15, 16, 17, 23, 25 e 26 Tab. 4.2) atingiram região de Marismas (R6).

A simulação 18, durante o outono, influenciada pelo fenômeno de enchente, apresentou a maior distância percorrida pelas partículas de 17 000 m durante 24 h, com a velocidade a média de $0,19 \text{ m s}^{-1}$ e com as partículas mais distantes deslocando-se para dentro do estuário.

A simulação 28, que é influenciada pelo fenômeno de vazante, apresentou uma distância percorrida de 13 000 m durante 8 h, com maior velocidade média de $0,41 \text{ m s}^{-1}$ e com as partículas mais distantes deslocando-se para fora do estuário.

No inverno (simulações 28 a 44 Tab. 4.2) assim, como no outono, existem variações na direção dos ventos e ocorrem os dois maiores picos de vazão acumulada dos afluentes (Fig. 4.9). Devido as elevadas vazões associadas aos fenômenos de vazante, as partículas de óleo são deslocadas pela corrente atingindo a região do Super Porto (R1), Barra Nova (R2), Molhes da Barra (R3), Molhes Leste (R4), Q. Secção (R5) e Marismas (R6).

Os pontos de chegada das partículas de óleo em algumas regiões (R1, R2, R4, R5, R6, R7, R8, R9 e R10) localizados na encosta do baixo estuário da Lagoa dos Patos, estão de acordo com os resultados encontrados em Lopes et al. (2017), que realizaram 8 simulações, na região do Super Porto em Rio Grande, utilizando dados médios de fenômenos de enchente e vazante, para identificar as regiões de chegada de partículas de óleo.

Alguns trabalhos buscaram identificar a variabilidade do deslocamento das partículas de óleo utilizando simulações numéricas de vazamento, como Bozkurtoğlu (2017) que fez simulações de vazamento de óleo na região do estreito de Bosphorus, na Turquia. Como conclusão deste estudo, foram definidos os locais e o tempo de chegada do óleo na encosta da região do estreito de Bosphorus.

Liu et al. (2016) utilizaram alguns programas para simular cenários de vazamento de óleo, na Bacia de Bohai, localizado no nordeste da China. Os resultados encontrados se mostraram satisfatórios para encontrar as regiões mais suscetíveis a contaminação de óleo. Alves et al. (2014) realizaram simulações numéricas de vazamentos de óleo na região de Creta localizada no Mediterrâneo Oriental, e como resposta criaram um mapa de risco para o local.

Alves et al. (2014), Lopes et al. (2017), Bozkurtoğlu (2017) e Liu et al. (2016) auxiliaram na importância de estimar tempo e o destino das partículas de óleo, a fim de desenvolver uma resposta à contaminação, assim possibilitando a geração de planos de contingência, com eficiência diferenciada, em caso de acidentes com derrames de óleo.

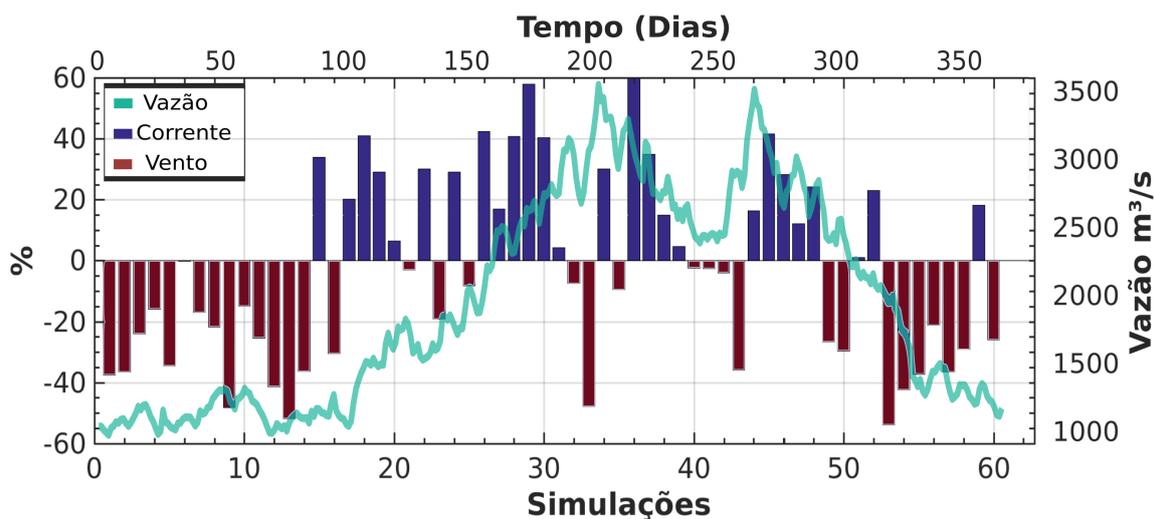


Figura 4.9 – Análise da influência da corrente e vento no deslocamento para todas as simulações.

A Fig. 4.9 apresenta uma análise do percentual de influência das forçantes (corrente e ventos) para o deslocamento das partículas de óleo. Essa análise do percentual foi realizada através da subtração da média das forçantes em cada simulação.

As simulações com intervalo de tempo de até 5 h possuem maior influência do vento. Os ventos são normalmente de Nordeste e auxiliam no deslocamento das partículas de óleo para a região do Super Porto (R1). As correntes são dominantes quando os afluentes possuem maiores vazões, durante o outono e inverno ou quando diminui a intensidade dos ventos. A Fig. 4.10 apresenta a média das interações de ventos e correntes nas partículas de óleo, em cada passo de tempo para um intervalo de 24 h, para todas as simulações. O vento possui maior influência no deslocamento médio das partículas de óleo nas primeiras 5 h, pois os vazamentos com maiores ocorrências duram até 6 h quando as partículas chegam à encosta do Super Porto (R1). Outra hipótese seria que o início vazamento de óleo ocorre na superfície.

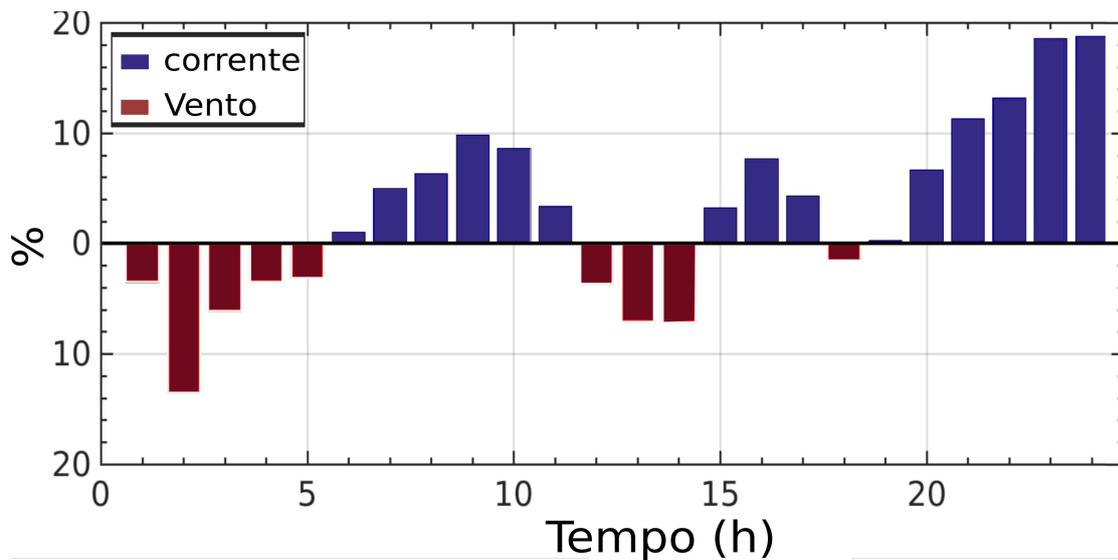


Figura 4.10 – Análise da influência das correntes e ventos no deslocamento para todas as simulações.

Outra consideração da Fig. 4.10 é que no intervalo de tempo de 18 h a 24 h possui maior influência de correntes, pois nas simulações em que o óleo persiste por intervalos de tempo maiores que 18 h, as partículas são deslocadas pelas correntes e estas correntes são alternadas pelos fenômenos de enchente e vazante. A ação dos ventos é a principal contribuinte para as partículas de óleo chegarem nas encostas da região estuarina (Fig. 4.8), pois o vento assume diversas direções, enquanto as correntes tem dominância no sentido longitudinal do canal de acesso à Lagoa dos Patos.

4.3.3. Concentração dos derrames e tempo de chegadas das partículas de óleo

A Fig. 4.11 apresenta o volume de todos os vazamentos de óleo. A importância de apresentar a concentração dos vazamentos encontra-se em identificar os pontos de maior contaminação na regiões, conforme a Fig. 4.8, representado nas cores escuras. As maiores concentrações de óleo ocorrem na encosta do Super Porto (R1), Barra nova (R2) e ponta da Q. secção (R5), assim como nas duas extremidades da região de Marisma (R6) e São José do Norte (R7).

A Fig. 4.12 identifica a chegada das partículas de óleo na encosta da região de estudo, para o intervalo de 24 h, servindo assim como suporte para tomada de decisão no caso da ocorrência de

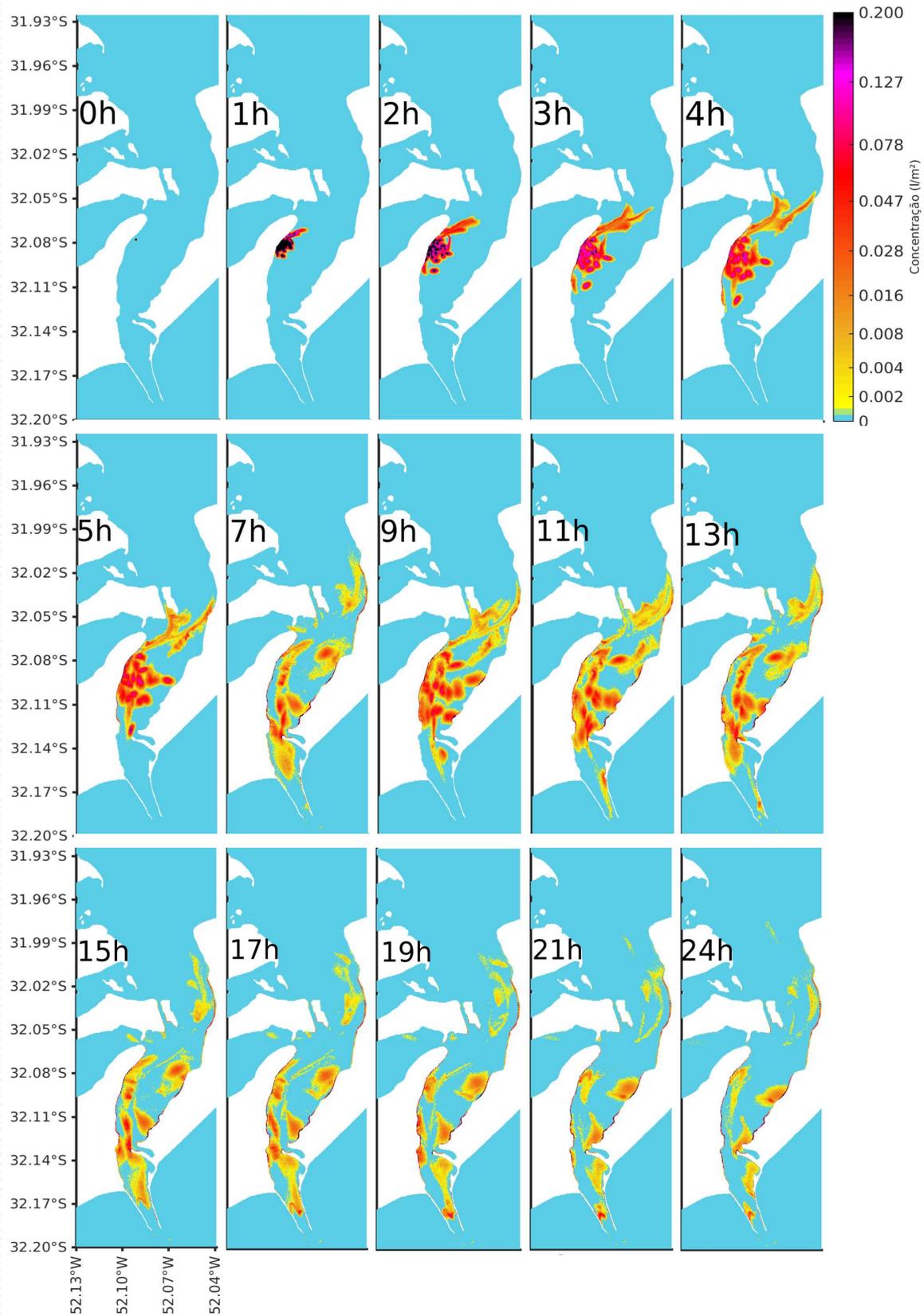


Figura 4.11 – Todas as simulações representando a concentração em litros dos vazamentos

vazamentos de óleo.

Em caso de ocorrência de vazamento no transbordo do terminal da Transpetro, as partículas

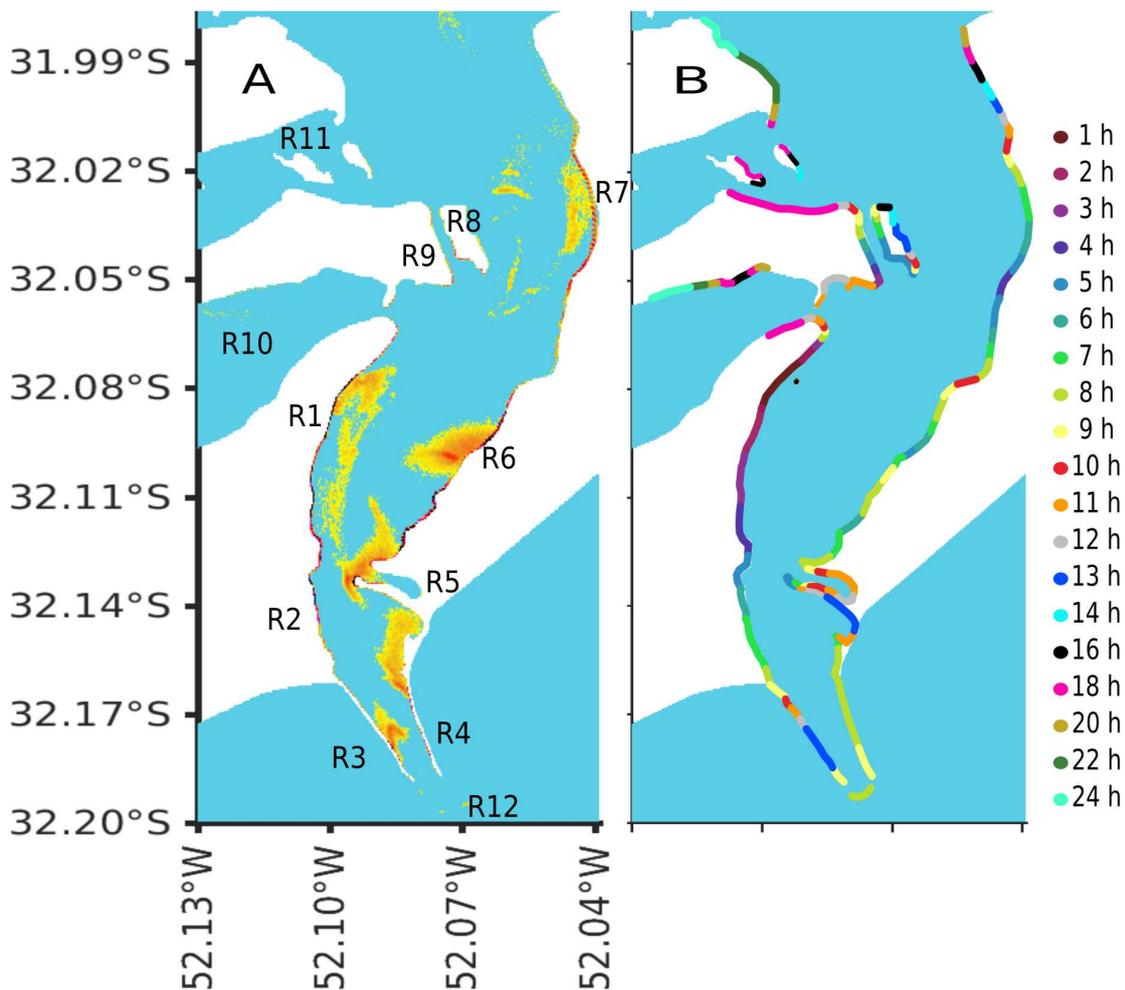


Figura 4.12 – A imagem (A) todas as simulações na hora 24, imagem (B) o tempo de chegada do óleo na encosta do estuário.

de óleo podem atingir a região do Super porto (R1) em menos de 1 h, conforme Fig. 4.12, podendo espalhar-se pelas bordas da região em aproximadamente 5 h, com porção considerável de óleo derramado. De acordo com Nicolodi (2016), essa região, quanto à sensibilidade ao óleo, apresenta menor índice (ISL 1), por possuir estruturas artificiais lisas e expostas (paredões marítimos artificiais), assim um vazamento de óleo nesta região ocasionaria transtornos econômicos e ambientais.

As partículas de óleo atingem a região de Barra Nova (R2) de 5 a 7 h, após do derrame. A contaminação desta região causaria impacto na comunidade local que sobrevive da pesca. De acordo com Nicolodi (2016), o local possui o índice de sensibilidade de ISL 4 à ISL 6. Para as regiões dos molhes da Barra (R3) e Molhes Leste (R4), o intervalo de tempo da chegada das partículas de óleo foi de 8 a 13 h. De acordo com Nicolodi (2016) essa região tem o índice de sensibilidade de ISL 6, pois é uma região de enrocamento. Os molhes possuem características sensíveis, pois trata-se de locais de turismo, pesca recreativa, unidade de conservação (Molhes Leste) e recursos biológicos (Freire, 2006).

Os locais da Q. Secção (R5) e Marismas (R6) possuem características semelhantes conforme observado no mapa PEL-115 de Nicolodi (2016). A região da Q. Secção (R5) inicia sua contaminação,

por partículas de óleo, na entrada da enseada de 5 a 12 h. Dentro da região Q. Secção (R5) possui uma concentração de pescadores e terminal de desembarque de pescado. Uma porção considerável da região apresenta o índice de sensibilidade ISL 10, e uma restrita porção com índice de ISL 2 (Nicolodi, 2016).

Para a região de Marismas (R6), o pior cenário registrado para a chegada do óleo é de 5 a 10 h e esta região possui três índices de sensibilidade. De acordo com Nicolodi (2016), a região é caracterizada como zonas de marismas e brejo, com vegetação ao meio salobro ou salgado, e índice de sensibilidade de ISL 10. Nesta mesma região são apresentadas praias expostas, com sedimentos inconsolidados, de tamanho de areia fina a média e índice de sensibilidade de ISL 4. A região também possui concentração de pescadores e o terminal de desembarque de pescado, com índice de sensibilidade de ISL 2. As partículas de óleo atingem esta encosta de 6 a 7 h.

Nogueira e Costa (2003) realizaram um estudo de identificação dos marismas na região de R5 e R6, os canais e os marismas estão sujeitos a serem cobertos pelo nível da laguna, por qualquer material em suspensão que esteja a deriva, isso pode representar grande dificuldade de limpeza, tratando-se de derrame de óleo. Portanto, caso as correntes e os ventos favoreçam o transporte do óleo para esta região, que possuem características sensíveis, é importante que os responsáveis desenvolvam plano ação de contingência em tempo inferior a 5 h, a fim de evitar a chegada das partículas de óleo nas zonas de marismas.

A região de São José do Norte (R7) é caracterizada por ser urbanizada em relação as demais regiões citadas, e possui 3 índices de sensibilidade diferentes como observado no mapa operacional PEL-114 de Nicolodi (2016). Na região com o ISL 1, as partículas de óleo atingem a encosta em aproximadamente 4 a 6 h. Para a porção com ISL 2, as partículas atingem no intervalo de tempo de 7 a 13 h, e para a porção da região com o ISL 4, o tempo de chegada das partículas é de 6 a 20 h.

Na Ilha de Terraplina (R8), o vazamento pode chegar a contaminar a encosta em 6 h na região mais sensível, conforme no mapa PEL-114. As demais regiões da ilha o óleo atinge encosta de 7 a 16 h.

Na região do Saco da Mangueira (R10), a chegada das partículas de óleo ocorre em aproximadamente 16 h, e segue paralelamente à encosta até 24 h. A região, de acordo com a Fig. 4.12(A), não apresenta grandes concentrações de óleo devido a estreita entrada da enseada do Saco da Mangueira, fato que causa uma barreira física, impedindo a entrada de grandes quantidades de óleo. Os índices de sensibilidade do óleo na região afetada são ISL 10 e ISL 2 (Nicolodi, 2016).

Na enseada do Saco da Mangueira são realizadas várias atividades econômicas para suporte ao parque industrial da cidade de Rio Grande, relacionadas com a pesca artesanal de camarão rosa e atividades de lazer (Monteiro et al., 2006). A Ilha dos Marinheiros e Ilha da Pólvora (R11) apresentam a menor concentração de óleo, pois apenas duas simulações apontam a chegada das partículas de óleo ao local, devido as características dos ventos e velocidade de correntes. O óleo atinge essa região de 14 a 24 h. A área atingida possui ISL 10, conforme Nicolodi (2016).

Mediante aos impactos ambientais negativos decorrentes dos eventos de vazamento de óleo, somado ao baixo grau de reversibilidade e às propriedades acumulativas e sinérgicas características das poluições, e ainda, em função do considerável nível de sensibilidade ambiental das áreas passíveis

de serem atingidas por tais tipos de eventos, é esperada uma significativa distribuição dos passivos ambientais para a comunidade do local de estudo.

Não obstante, os efeitos diretos em caso de vazamentos de óleo chegarem as encostas, e as consequências crônicas de uma contaminação na água, poderiam influenciar na ocorrência das espécies na área estuarina, no potencial pesqueiro da região, assim como na saúde, na segurança e no bem estar da população, pois o petróleo possui em suas composições, componentes altamente tóxicos aos seres vivos, e também possui a capacidade de causar bioacumulação nas diferentes cadeias alimentares, ocasionando uma notável perda de biodiversidade ao tratar-se de uma área estuarina.

Nicolodi (2016) apresentaram em seu trabalho quais recursos biológicos possuem ocorrência na região estuarina, dentre eles alguns que valem ser citados são os crustáceos (camarões), peixes (pelágicos e demersais), aves (aquáticas, de rapina, limícolas e marinhas) e pinípedes (Leão marinho e lobo marinho).

A partir do estudo da interferência das variáveis hidrodinâmicas no destino de comportamento das manchas de óleo é possível potencializar os efeitos das ações de respostas a serem definidas na fase de previsão dos cenários de derrames de óleo. Tal medida poderia colaborar com uma maior eficiência das ações táticas e técnicas de atuação emergencial, definidas em conformidade com a Resolução Conama nº 398, de 11 de junho de 2008 e contidas nos Planos de Emergência Individuais. É importante que a aplicação destas técnicas de intervenção emergencial seja devidamente embasada no conhecimento do regime hidrodinâmico, como também nos seus efeitos sobre a dispersão do óleo respeitando as características socio-ambientais das regiões com alto potencial de serem afetadas por derrames de óleo.

Grubestic et al. (2017) realizaram um trabalho no Golfo do México, que abordou simulações de óleo para identificar os pontos mais suscetíveis a chegada do óleo e também utilizaram um modelo numérico para otimizar a alocação de equipamentos de limpeza para derrames. Para trabalhos futuros na região de estudo é recomendado que pesquisas semelhantes de alocação dos equipamentos de limpeza sejam realizados.

4.4. Intemperismo

Após o vazamento de óleo ocorrem alterações físico-químicas e biológicas que modificam as suas características iniciais em determinados intervalos de tempo. Este conjunto de alterações denomina-se intemperismo do óleo, e o entendimento dos processos de intemperismo são importantes para que ações de contenção de óleo derramado em água sejam tomadas de forma adequada (Bollmann et al., 2010).

As alterações do intemperismo no óleo estão diretamente relacionadas às condições ambientais locais como: a velocidade do vento, a temperatura da água, a altura das ondas, salinidade, misturas turbulentas, características físico-químicas do óleo e volume vazado (Lehr et al., 2002; Fingas e Fieldhouse, 2004; Langevin et al., 2004; Fingas e Fieldhouse, 2015; Brakstad, 2017).

Neste trabalho, para analisar o intemperismo das 60 simulações, foram utilizados dois parâmetros: emulsificação e evaporação, conforme Stringari et al. (2012a), Mello (2013) Stringari et al. (2013a), Mishra e Kumar (2015) e Marques et al. (2017).

O tempo de análise dos resultados, para cada uma das 60 simulações, ficou limitado as primeiras 12 h, de um total de 24 h de simulação, uma vez que após 12 h de simulação, normalmente o óleo chega à linha de costa na região estuarina.

4.4.1. Emulsificação

A emulsificação é caracterizada pela dispersão coloidal entre dois líquidos imiscíveis, onde as gotículas de uma fase (dispersa) estarão suspensas na outra fase (contínua). Neste caso, o tipo de emulsão é o óleo em água, devido a influência da velocidade dos ventos na região de estudo, esta contribuição vai configurar esta situação como fase dispersa, ou seja, a água estará suspensa na fase contínua representada pelo óleo.

O modelo ECOS utiliza o algoritmo implementado e proposto por Mackay et al. (1980), para estimar a variação temporal da emulsificação. O processo é governado por uma equação diferencial de primeira ordem, como função da intensidade do vento, volume de óleo derramado e do tipo de óleo.

Na Fig. 4.13 são apresentados todos os resultados em porcentagem de emulsificação das 60 simulações (linhas coloridas). A linha em preto representa a média dos cenários considerando às características dos ventos e do óleo de baixa massa específica para a realização do estudo. Nestes resultados pode-se observar a porcentagem média de 20% de incorporação de água no óleo em 12 h.

Os valores de porcentagem variaram de 15% a 51% em 12 h, porém, conforme mencionado na metodologia, a emulsificação é calculada considerando o derrame de óleo de forma homogênea e torna-se constante quando toca a linha de costa. Assim, o valor de menor porcentagem de emulsificação são aqueles que o óleo encosta rapidamente nas bordas sólidas e com menor intensidade de vento.

Pode-se também observar nos resultados, que os eventos que obtiveram maior porcentagem de emulsificação foram os de maior intensidade de vento, juntamente com os óleos que permaneceram com maior número de partículas se deslocando na água. Neste caso, a simulação 33 apresentou o maior percentual (51%), com vento a $2,07 \text{ m s}^{-1}$, ou seja, representando a incorporação de 51% de água na mancha de óleo.

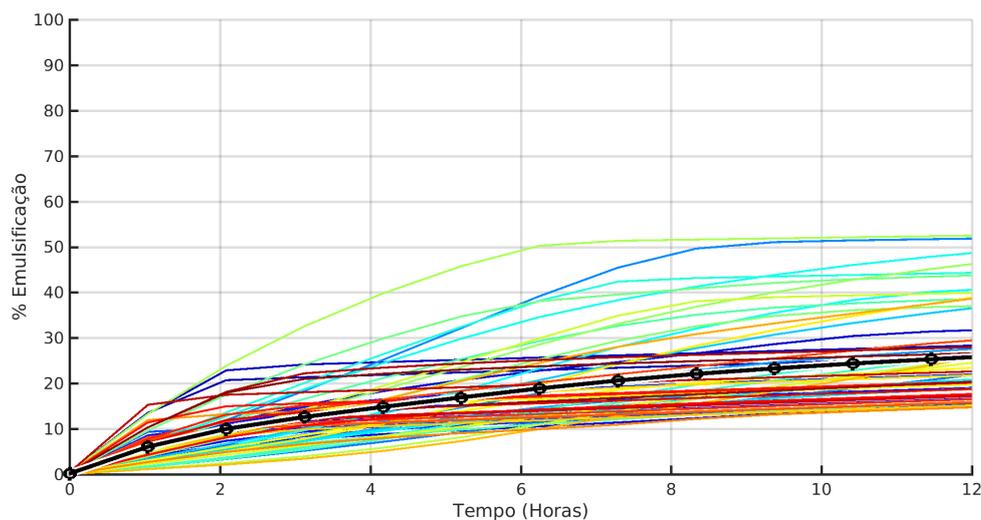


Figura 4.13 – Porcentagem de emulsificação das partículas de todas as simulações (linhas coloridas) e médias dos cenários (linha preta).

Mishra e Kumar (2015) realizaram simulações de emulsificação com 3 diferentes massas específicas de óleo, e ventos com velocidade constante de 5 m s^{-1} . Esses autores encontraram um percentual de 60% de teor de água na mancha de óleo após 24 h, para um valor de massa específica de óleo de 834 kg m^{-3} .

Os estudos de Fingas e Fieldhouse (2015) concluíram que a emulsificação pode alcançar de 60% a 80% na mancha de óleo, expandindo a mancha de 2 a 5 vezes com relação ao seu volume original. Os principais influenciadores na emulsificação do óleo são a turbulência e a quantidade de compostos dos grupo asfaltenos e resina.

Fingas e Fieldhouse (2004) e Fingas e Fieldhouse (2015) sugeriram que tanto a formação quanto as características das emulsões poderiam ser previstas usando dados empíricos, desde que estes fossem os mesmos testados em laboratórios. No entanto, devido à falta de dados laboratoriais relacionados ao tipo de óleo e às características da região, utiliza-se a fórmula empírica de Mackay et al. (1980).

Stringari et al. (2013a) realizaram um estudo utilizando o mesmo modelo, e uma simulação na região próxima à desembocadura da Lagoa dos Patos. Estes autores encontraram valores próximos a 70% de emulsificação em 12 h, ao atingir 20 h de simulação a emulsificação se estabilizou em 80%.

De modo geral, a resposta dada pelo modelo em relação à emulsificação é boa, levando em consideração a massa específica do óleo utilizada no trabalho, visto que os óleos permaneceram por mais tempo na água e as condições de vento eram de menor intensidade quando comparadas aos estudos de Stringari et al. (2013a), Mishra e Kumar (2015) e (Marques et al., 2017).

4.4.2. Evaporação

A evaporação é o principal mecanismo de remoção de óleo da superfície da água, extraindo a maioria das frações voláteis do petróleo bruto dentro de poucas horas após o derramamento. A massa

específica e a viscosidade da mancha de óleo são significativamente modificadas devido à evaporação (Fingas, 1999; Lopes et al., 2007).

Vários estudos propuseram inúmeras equações para a evaporação do óleo em casos de vazamento em ambientes marinhos. No entanto, a maioria deles não apresentou bons resultados quando comparados com dados experimentais (Fingas, 1999; Berry et al., 2012; Marques et al., 2017). A taxa de evaporação foi calculada usando a equação analítica proposta por Mackay et al. (1980), assumindo que a mancha de óleo é homogênea.

Este trabalho utiliza as suposições feitas por Mackay et al. (1980), nas quais a evaporação do óleo é definida por uma equação diferencial de primeira ordem em função da temperatura média da água, volume de óleo, área de derramamento, intensidade de vento e API de óleo.

Na Fig. 4.14 são apresentados todos os resultados de porcentagem de evaporação das 60 simulações (linhas coloridas), e a linha em preto representa a média dos cenários devido às características de temperatura, vento e área do derrame. O óleo de baixa massa específica utilizado neste estudo é um dos principais responsáveis para que a porcentagem média de evaporação tenha ficado em 50,08% após 12 h.

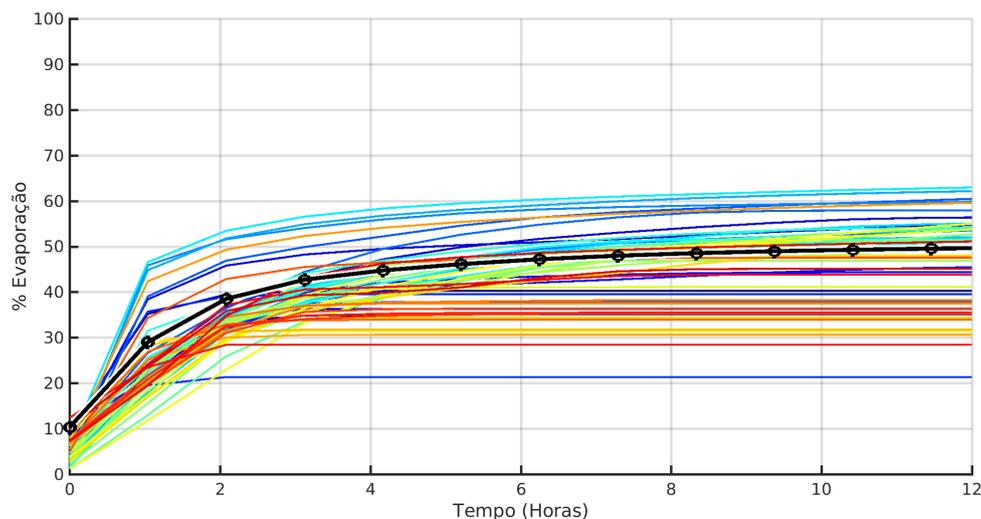


Figura 4.14 – Porcentagem de evaporação de todas as simulações (linhas coloridas) e médias dos cenários (linha preta).

Os valores de porcentagem variaram de 21% a 61% após 12 h. A evaporação no modelo ECOS torna-se constante quando encosta na linha de costa, logo, os valores de menor porcentagem de evaporação são aqueles em que o óleo encosta rapidamente nas bordas, com menor temperatura da água, menor intensidade dos ventos e menor expansão da mancha.

Marques et al. (2017) utilizaram o mesmo modelo, com óleo de massa específica de 919 kg m^{-3} , e com outras condições ambientais na região de Tramandaí, situada ao Sul do Brasil. Estes autores encontraram valores de 15% de evaporação após 10 h de simulação.

Stringari et al. (2012a) encontraram uma evaporação de aproximadamente 30% em 20 h, enquanto Mishra e Kumar (2015) obtiveram uma evaporação de 25% em 24 h para um óleo pesado,

sendo que metade do volume de óleo leve evaporou em 24 h. O fato de que os óleos pesados apresentam menor taxa de evaporação, ocorre porque compreendem principalmente componentes não voláteis que são incapazes de evaporar na mesma proporção dos óleos leves.

Os resultados deste estudo demonstram que os eventos que tiveram maior porcentagem de evaporação foram os de maior tempo de permanência na água. Neste caso, a simulação 19 apresentou o maior percentual (61%), com o vento a $2,07 \text{ m s}^{-1}$, temperatura a 17°C e com uma grande área de ocupação da mancha simulação 19.

Fingas (1999) identificaram que os primeiros minutos do contato do óleo com o ambiente são os mais importantes para o processo de evaporação dos compostos voláteis, sendo responsável por uma grande porcentagem de evaporação nos instantes iniciais. Os resultados apresentados nesse trabalho foram gerados após a primeira hora de simulação, fato que explica a evaporação inicial de aproximadamente 10%.

No geral os resultados apresentados para a evaporação apresentam-se superestimados, quando comparados a com os trabalho de Stringari et al. (2012a), Mishra e Kumar (2015) e Marques et al. (2017), logo são indicadas melhorias no equacionamento do cálculo da área e ocupação do derrame e testes de sensibilidade das constantes utilizadas no modelo de evaporação.

4.5. Cenários de derrames

Nesta seção foram selecionados 6 cenários, com diferentes condicionantes ambientais, para explicar o intemperismo e o deslocamento das partículas de óleo, considerando as diferentes forçantes que foram contabilizadas no estudo realizado. Os pontos de contato de óleo na encosta do estuário foram identificados considerando o tempo de chegada das partículas de óleo e o ISL (Índice de Sensibilidade Litoral).

A seleção dos 6 cenários está vinculada às condições observadas em 60 cenários de vazamentos simulados. Entre as condições escolhidas para a seleção dos cenários pode-se mencionar às vazantes com ventos de Nordeste (cenário 1), as condições de enchente com ventos do quadrante Sul (cenário 2), a inversão da condição de enchente para vazante (cenário 3), velocidades de correntes com baixa intensidade e deslocamento do óleo para Leste (cenário 4), o deslocamento do óleo para o interior do Saco da Mangueira (cenário 5) e o deslocamento das partículas em direção à saída do estuário (cenário 6).

4.5.1. Cenário 1

O cenário 1 (Fig. 4.15 referente a simulação 9) indica que 50% das simulações possuem características semelhantes, pois as partículas de óleo atingem à região do Super Porto (R1). A chegada das partículas de óleo na R1 está relacionada com o fenômeno de vazante no estuário, e o vento de Nordeste. Esse comportamento hidrodinâmico é dominante na região conforme Moller et al. (1996), Moller et al. (2001) e Marques et al. (2011). Lopes et al. (2017) nos seus resultados de vazamentos de óleo também encontraram respostas de deslocamento das partículas de óleo muito semelhantes as observadas no cenário 1.

O resultado da interação entre os ventos e as correntes desloca o óleo rapidamente para a região do Super Porto (R1), paralelamente a região do terminal da Transpetro, onde o vazamento de óleo se inicia. As primeiras partículas de óleo atingem a região do Super Porto em tempo inferior a 1 h, a velocidade média do vento é $2,86 \text{ m s}^{-1}$ de Nordeste e a velocidade das correntes no canal é de $0,35 \text{ m s}^{-1}$.

Na Fig. 4.16 observa-se que o evento persistiu por 4 h, a influência do vento no deslocamento das partículas de óleo chega a 75%, durante este período. As 14 primeiras simulações possuem maior influência da ação local dos ventos, de forma que este evento está diretamente relacionado com a baixa vazão acumulada dos principais afluentes da Lagoa dos Patos.

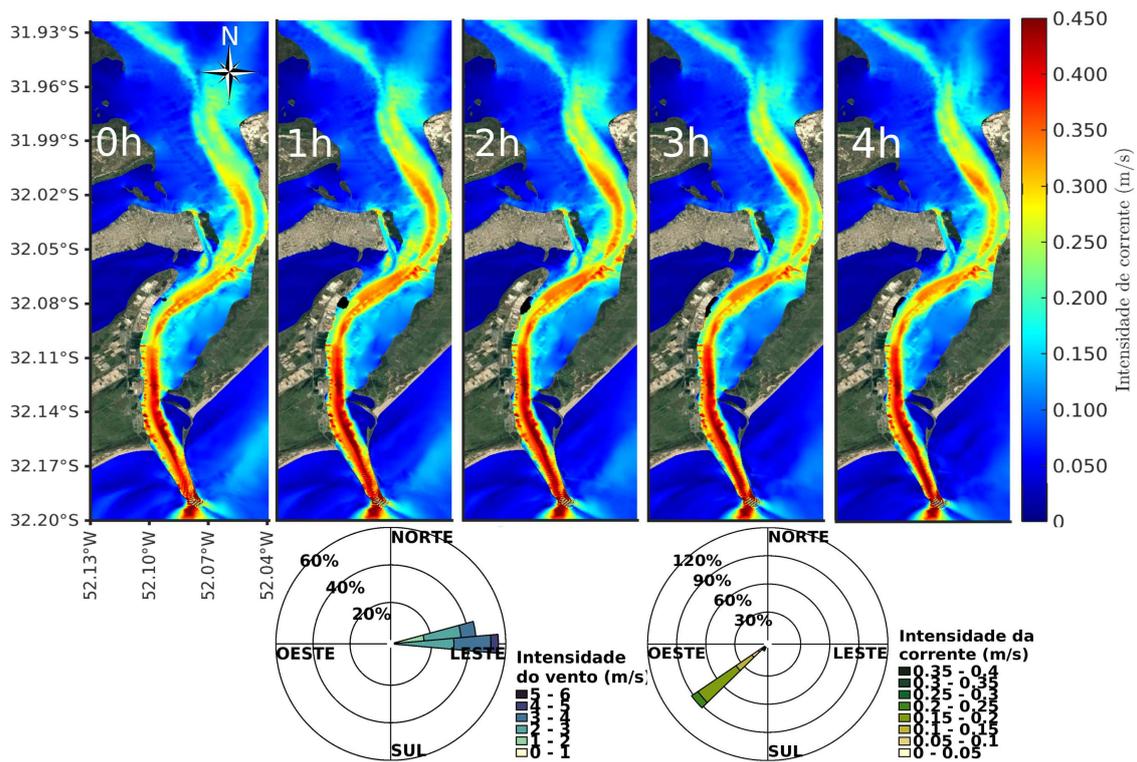


Figura 4.15 – Simulação 9, cenário 1, tempo de simulação de 4 h, atingindo o Super Porto (R1).

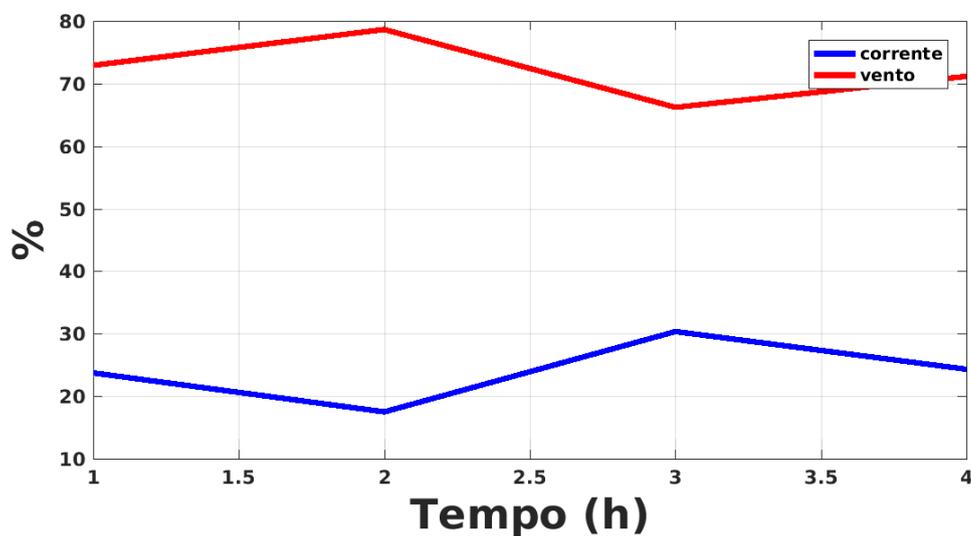


Figura 4.16 – Relação da porcentagem de influencia do vento e corrente nas partículas de óleo.

A área atingida possui pouca sensibilidade ao óleo, pois trata-se de uma região composta por estruturas artificiais lisas com ISL 1 (Nicolodi, 2016). O maior problema desta região são os transtornos econômicos devido à movimentação de cargas e a problemática ambiental devido a contaminação da água.

A Fig. 4.17 que representa o cenário 1, resultou na evaporação de 36% em 4h. Marques et al. (2017) encontraram valores de 15% em 10h para a evaporação. Os valores de evaporação

apresentam-se superestimados devido a alta taxa de evaporação que está relacionada com a simplificação do modelo de dimensionar a área de ocupação do derrame, e com a utilização de um óleo de massa específica baixa. Segundo Mishra e Kumar (2015), óleos com massa específica menor possuem maior concentração de compostos voláteis.

Na Fig. 4.17 do cenário 1, a emulsificação tem seu maior aumento em 1 h. Após 4 h, a emulsificação chega a 11%, de forma que ocorreu uma incorporação de 11% das partículas de água na mancha de óleo. Marques et al. (2017) encontraram em seus resultados uma emulsificação de 40% em 4 h. Os valores de porcentagem de emulsificação neste caso estão subestimados quando comparados a estudos semelhantes como de Stringari et al. (2013a), Mishra e Kumar (2015) e Marques et al. (2017).

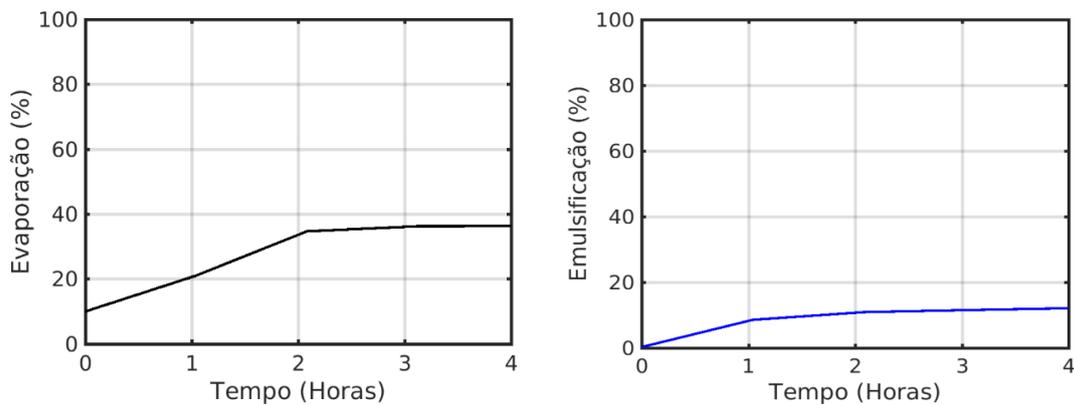


Figura 4.17 – Porcentagem de evaporação e porcentagem de emulsificação.

4.5.2. Cenário 2

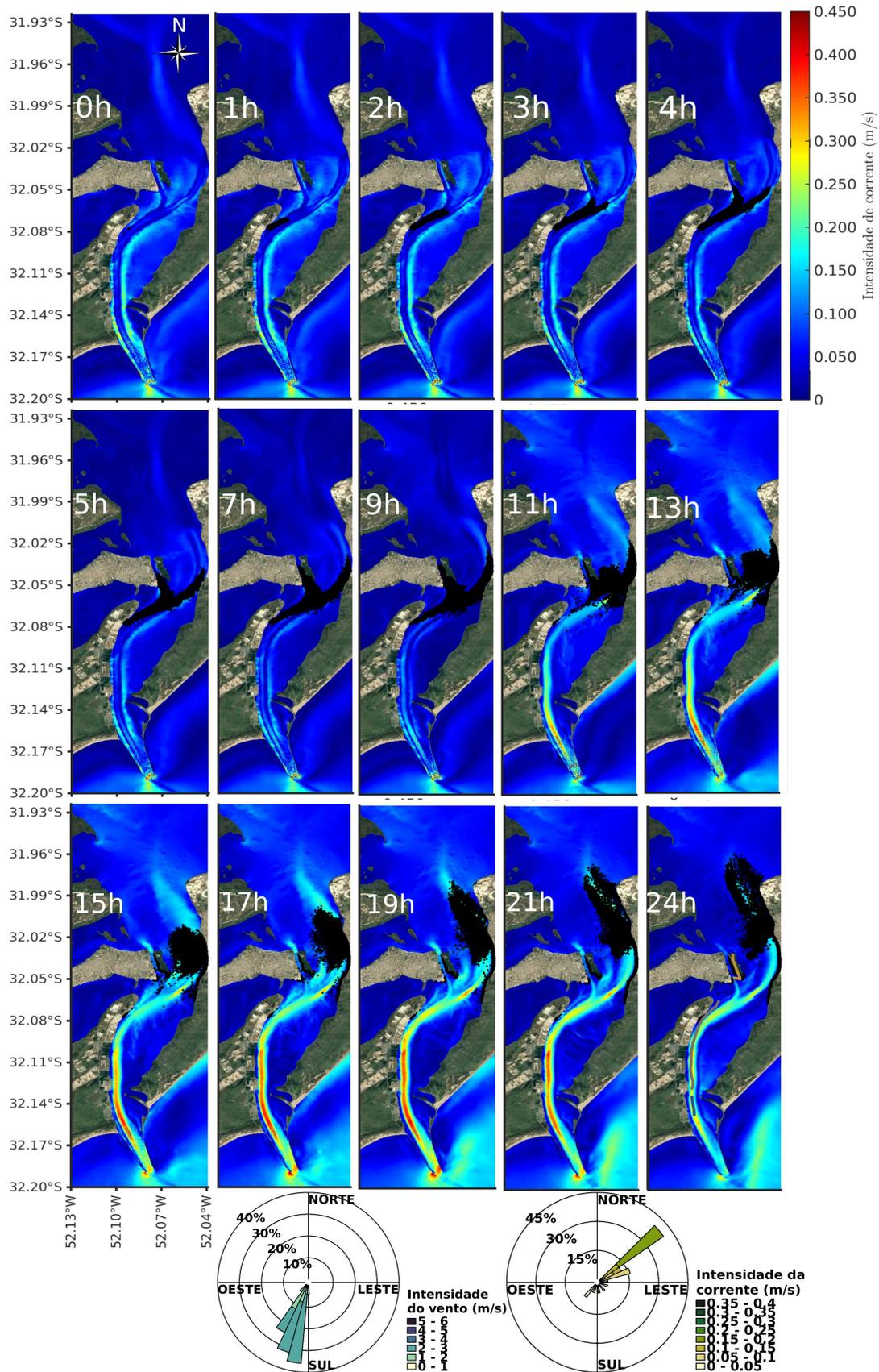


Figura 4.18 – Simulação 20, cenário 2, tempo de vazamento do óleo de 24 h.

O cenário 2 (Fig. 4.18) representa um caso típico de evento de condição predominantemente de enchente, onde o espalhamento das partículas de óleo avançam em direção ao interior do estuário, seguindo a velocidade das correntes no canal de acesso à Lagoa dos Patos. Aproximadamente 11,6% das simulações apresentaram características físicas semelhantes, com condição de enchente e ventos do quadrante Sul.

De acordo com Moller et al. (1996), Moller et al. (2001) e Marques et al. (2010), os fenômenos de enchente são tipicamente caracterizados pela entrada de água oceânica através da combinação do efeito local e remoto do vento. Marques et al. (2014) destacaram a importância das baixas descargas dos principais afluentes da Lagoa dos Patos para intensificação das correntes, em condições de enchente.

Na Fig. 4.18 observa-se que após 4 h de simulação ocorre uma separação da mancha de óleo, onde parte das partículas se direciona para a região de São José do Norte (R7) e outra se direciona para o Porto Novo (R9). Esse direcionamento bifurcado das partículas de óleo é devido a interação das características morfológicas e hidrodinâmicas do canal de acesso à Lagoa dos Patos.

O cenário 2 (Fig. 4.18) apresenta-se em condições de enchente, e o deslocamento das partículas de óleo segue para o interior da Lagoa dos Patos. Sob condições de ventos predominantemente incidentes no quadrante Sul (Sudoeste) as primeiras partículas chegam a região de São José do Norte (R7) após 4 h, e no Porto Novo (R9) e Ilha de Terraplena (R8) após 5 h. Com o decorrer do tempo, o óleo continua se deslocando para dentro do estuário, atingindo as demais regiões. Neste cenário a velocidade média do vento é de $2,4 \text{ m s}^{-1}$, enquanto a velocidade da corrente em alguns pontos pode chegar a $0,3 \text{ m s}^{-1}$.

Para o cenário 2, analisando o ISL da região (Nicolodi, 2016), pode-se observar que as partículas de óleo deslocam-se para o interior da Lagoa dos Patos e tem como destino final a Ilha do Terraplano (R8), com ISL 6 e ISL 10, o Porto Novo (R9), com ISL 1, e a região de São José do Norte, com ISL 1, ISL 2 e ISL 4.

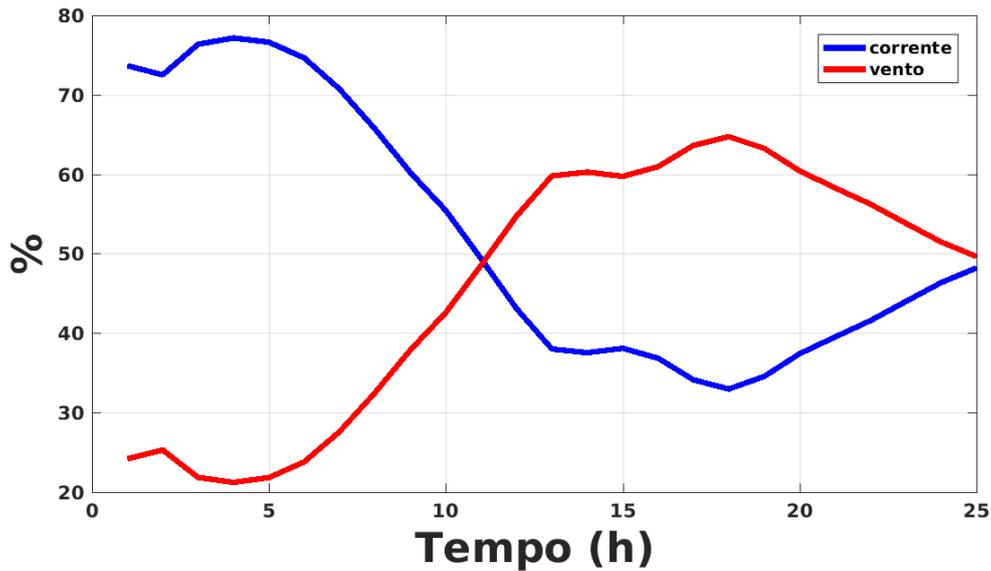


Figura 4.19 – Relação da média de porcentagem de influência do vento e corrente nas partículas de óleo.

Conforme a Fig. 4.19, o evento durou 24 h, os ventos e as correntes estão na mesma direção, porém as correntes tiveram maior influência no deslocamento do óleo até as 11 h, pois a maior concentração das partículas de óleo estão no canal, e este local possui as maiores velocidades de corrente. Após o intervalo de 11 h, as partículas estão mais espalhadas, para regiões que possuem menores velocidades de corrente, assim o vento controla o deslocamento das partículas.

No cenário 2 (Fig. 4.20), a evaporação chegou a 64% em 24 h também apresentando resultados superestimados quando comparados aos resultados dos trabalhos Stringari et al. (2012a) que verificaram evaporação de 30% e Mishra e Kumar (2015) que obtiveram uma evaporação de 25% em 24 h. A emulsificação é de aproximadamente 52% após 24 h, e este valor de emulsificação está relacionado a intensidade dos ventos (média de $2,04 \text{ m s}^{-1}$). Stringari et al. (2013a) apresentaram um vazamento de óleo na região adjacente ao Porto de Rio Grande, e em 24 h, o óleo se emulsificou aproximadamente 70%. Quanto mais emulsificado o óleo, mais misturado ao meio ele se apresenta, dificultando a sua limpeza (Lopes et al., 2007).

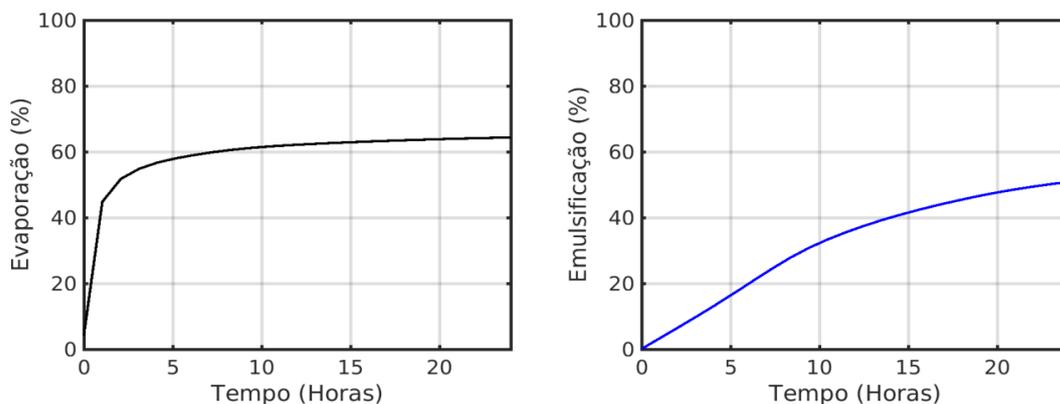


Figura 4.20 – Porcentagem do balanço de massa e porcentagem de emulsificação.

4.5.3. Cenário 3

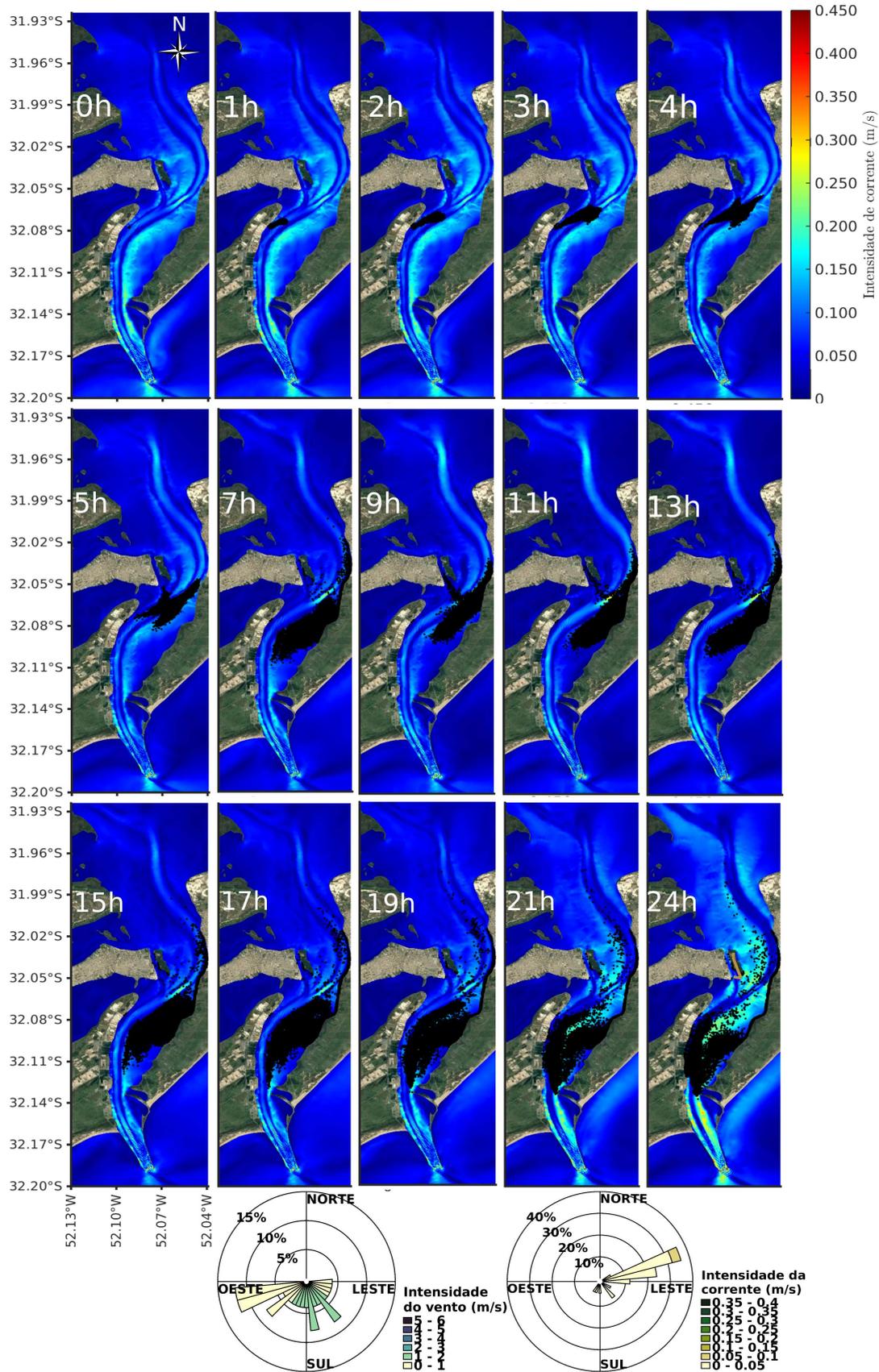


Figura 4.21 – Simulação 15, cenário 3, tempo de simulação de 24 h.

O cenário 3 (Fig. 4.21) inicialmente apresenta-se sob condições de enchente. Após 5 h de simulação, o sentido das correntes inverte, e a condição de vazante permanece até as 24 h. Neste cenário, aproximadamente 4 simulações possuem características semelhantes de inversão de condições de enchente para vazante.

O derrame de óleo ocorre no final da passagem de um sistema meteorológico, com a direção inicial dos ventos de Sudoeste que ao final do evento mudam de direção para Leste. Nas primeiras 5 h após o início do derrame, o óleo se direciona para dentro do estuário, durante um fenômeno de enchente influenciado pelo vento de Sudoeste. Após da passagem do sistema meteorológico, o deslocamento das partículas é influenciado por ventos de Leste e as descargas dos afluentes contribuem para inversão em condição de vazante. De acordo com Moller et al. (1996), Machado et al. (2010) e Marques et al. (2014), as características hidrodinâmicas da região estão sujeitas a mudanças com a passagem de sistemas meteorológicos em escalas de poucos dias a semanas.

O resultado dessas interações no cenário 3 abrange uma grande área. Nas horas iniciais, sob efeito das condições de enchente, as correntes transportam as partículas de óleo para a região de São José do Norte (R7), e de 5 h até 17 h, o óleo desloca-se paralelamente no sentido Norte à encosta de R7, e no sentido Sul à região de Marismas (R6). Adicionalmente, uma pequena porção de partículas atinge a Ilha de Terraplena (R8) após 8 h.

A partir de 10 h de simulação, as partículas de óleo são influenciadas pelos ventos de Leste, deslocando-se para encosta da região do Super Porto (R1). Durante este evento a velocidade média do vento é de $1,06 \text{ m s}^{-1}$ e da corrente em alguns pontos chega a $0,20 \text{ m s}^{-1}$. A rápida ação de contenção do óleo neste cenário deveria ser adotada em um intervalo de tempo inferior a 7 h, evitando o contato do óleo nas regiões vulneráveis, conforme sinalizadas por Nicolodi (2016), localizadas na região de Marismas (R6) e Ilha de Terraplena (R8) com o ISL 10.

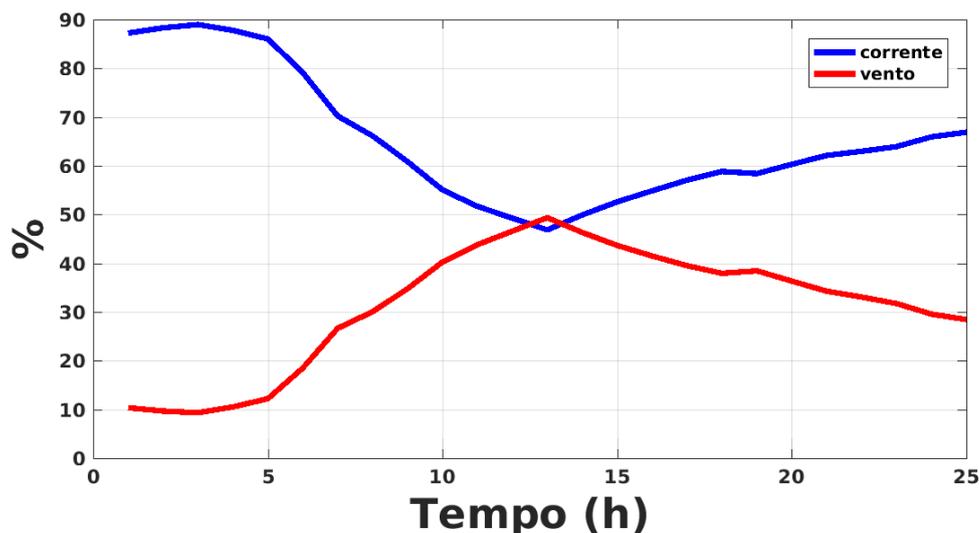


Figura 4.22 – Relação da média porcentagem de influência do vento e corrente nas partículas de óleo.

A Fig. 4.22 apresenta uma relação dos efeitos do vento e corrente para o deslocamento das partículas de óleo no período de 24 h, a corrente tem mais influência no deslocamento das partículas,

porém pode-se ressaltar a baixa vazão dos afluentes, por este motivo as partículas seguem a direção da corrente que é influenciada pelo vento.

A evaporação (Fig. 4.23) apresenta um percentual de aproximadamente 64% após 24 h. Na emulsificação, o valor atingiu 38% em 24 h, de forma que este valor está diretamente relacionado à intensidade dos ventos, que tem valores médios de $1,06 \text{ m s}^{-1}$.

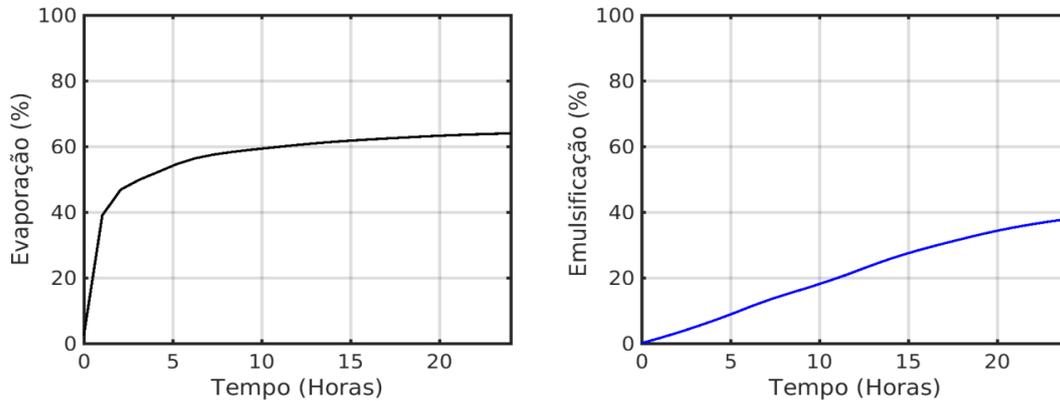


Figura 4.23 – Percentagem de evaporação e percentagem de emulsificação.

4.5.4. Cenário 4

Com relação ao cenário 4 (Fig. 4.24), 8 simulações possuem características semelhantes. O vento é predominantemente de Oeste, com poucas variações para outras direções, e as correntes possuem baixas intensidades. A ação dos ventos faz as partículas de óleo deslocarem-se paralelamente ao ponto de início do vazamento para a região de Marismas (R6), chegando na encosta após 6 h.

Este cenário apresenta características distintas quando comparado à outros cenários apresentados nesta seção, devido ao fato da velocidade de corrente ser baixa na condição de vazante, e a orientação dos ventos ser de Oeste e de intensidade média de $3,14 \text{ m s}^{-1}$. Essas condições favorecem o deslocamento das partículas de óleo seguindo a mesma direção dos ventos.

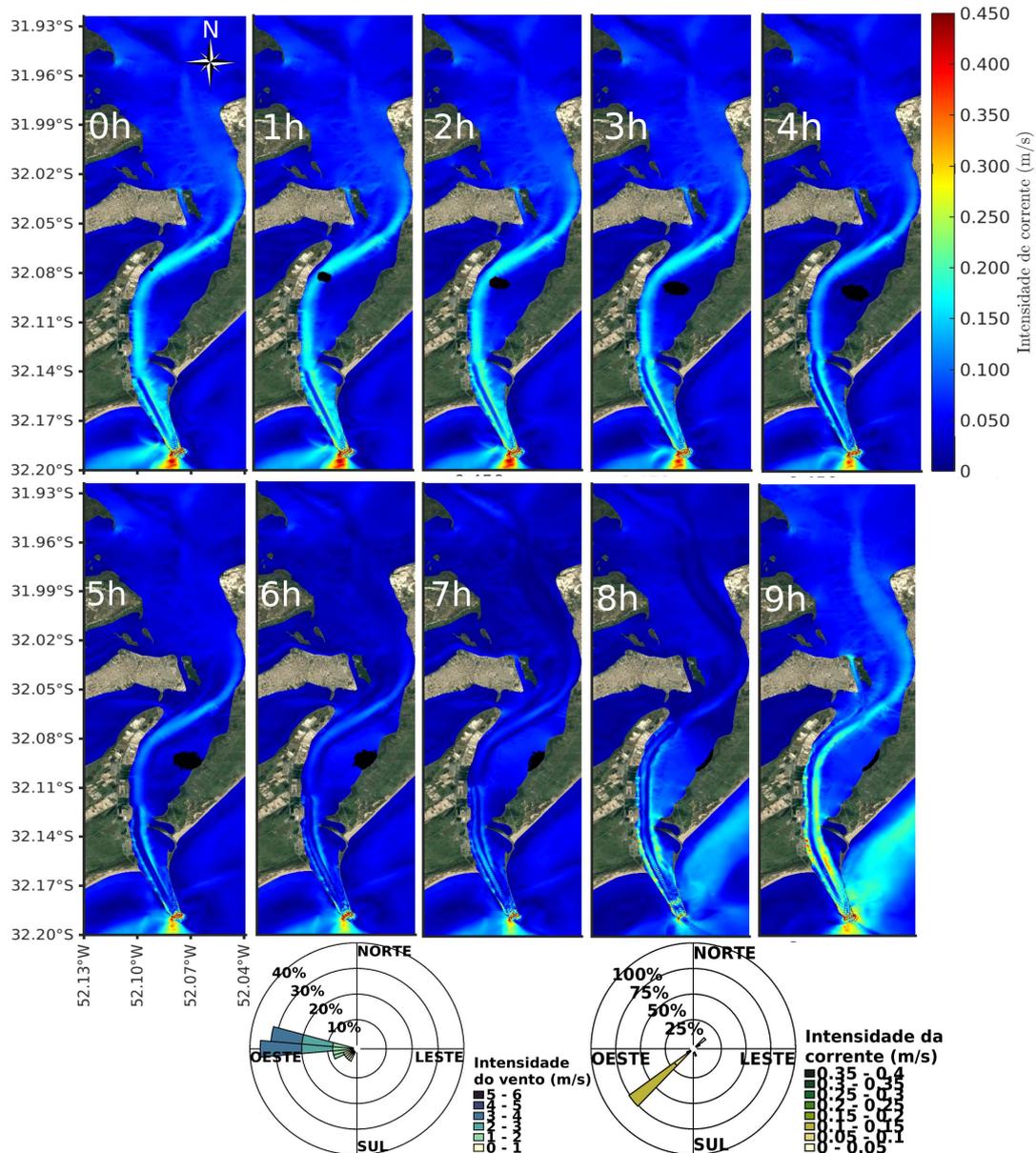


Figura 4.24 – Simulação 33, cenário 4, tempo de deslocamento das partículas de óleo de 9 h.

As partículas do óleo atingem a região de Marisma (R6), que é uma região com o ISL 10 e ISL 4. O padrão de deslocamento foi classificado como de alto potencial de comprometimento da qualidade ambiental nas localidades de banhados e marismas, na margem leste da Lagoa dos Patos (Nicolodi, 2016). De acordo com Lopes et al. (2007), os marismas estão entre os ecossistemas mais sensíveis à derrames de óleo, e devem ser considerados prioridades para proteção e limpeza.

Na Fig. 4.25 pode-se observar que o evento perdurou por 9 h e que o vento foi o maior influenciador no deslocamento das partículas do óleo. Para eventos de derrames de óleo em litorais e oceanos profundos já é conhecido que o vento tem maior influência no deslocamento das manchas de óleo, conforme observado nos trabalhos de Stringari et al. (2012a), Stringari et al. (2013a), García-Garrido et al. (2016) e Marques et al. (2017).

A evaporação do cenário 4 (Fig. 4.26), chegou a 49% em 9 h. A evaporação do óleo está associada a concentração de compostos voláteis, além de também ser afetado pela temperatura da

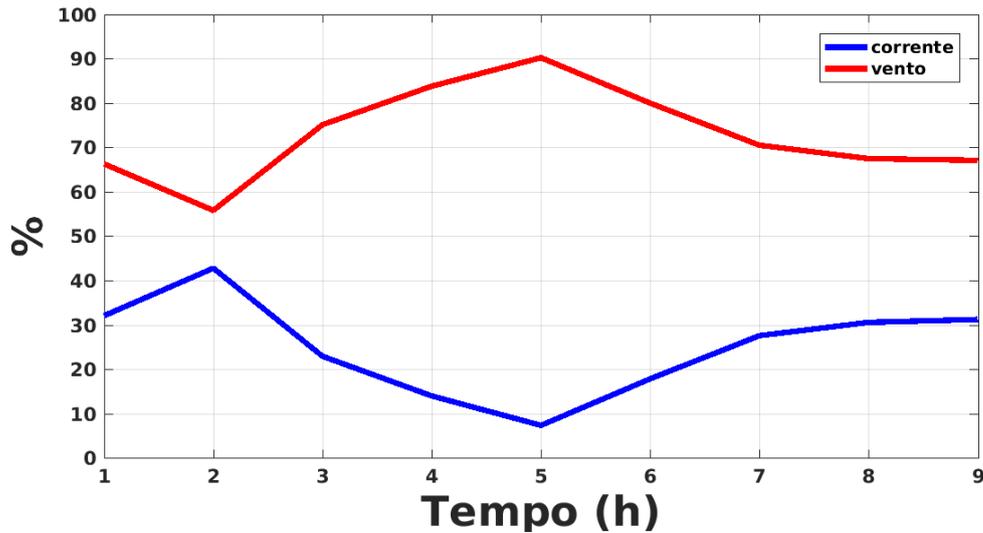


Figura 4.25 – Relação da porcentagem média de influência do vento e corrente nas partículas de óleo.

água, intensidade do vento, tipo de óleo e da área do derrame de óleo (Marques et al., 2017).

A emulsificação possui maiores valores quando comparado aos outros cenários desta seção, chegando a 57% em 9 h. A aumento da emulsificação esta relacionado a intensidade dos ventos (média de $3,14 \text{ m s}^{-1}$). Marques et al. (2017) realizaram uma simulação de vazamento de óleo no litoral Sul do Brasil, onde devido a intensidade dos ventos e a massa específica do óleo, foram encontrados elevados valores de emulsificação, de aproximadamente 69% em 10 h.

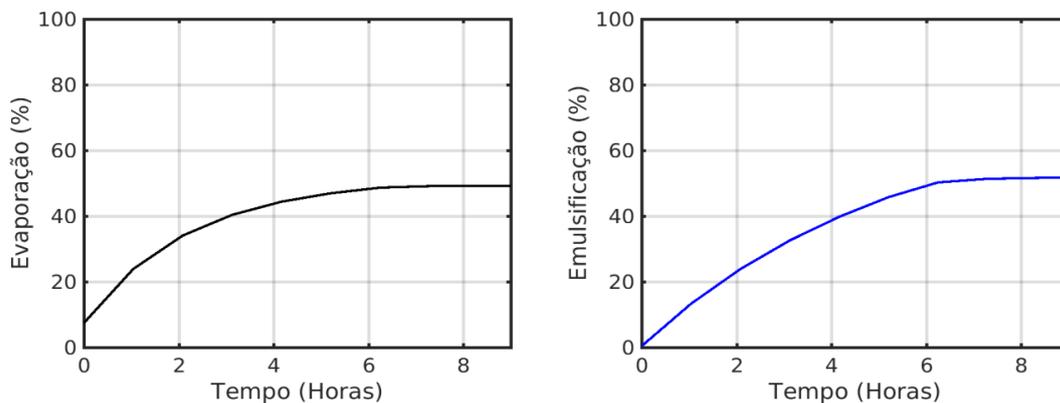


Figura 4.26 – Porcentagem do balanço de massa e porcentagem de emulsificação.

4.5.5. Cenário 5

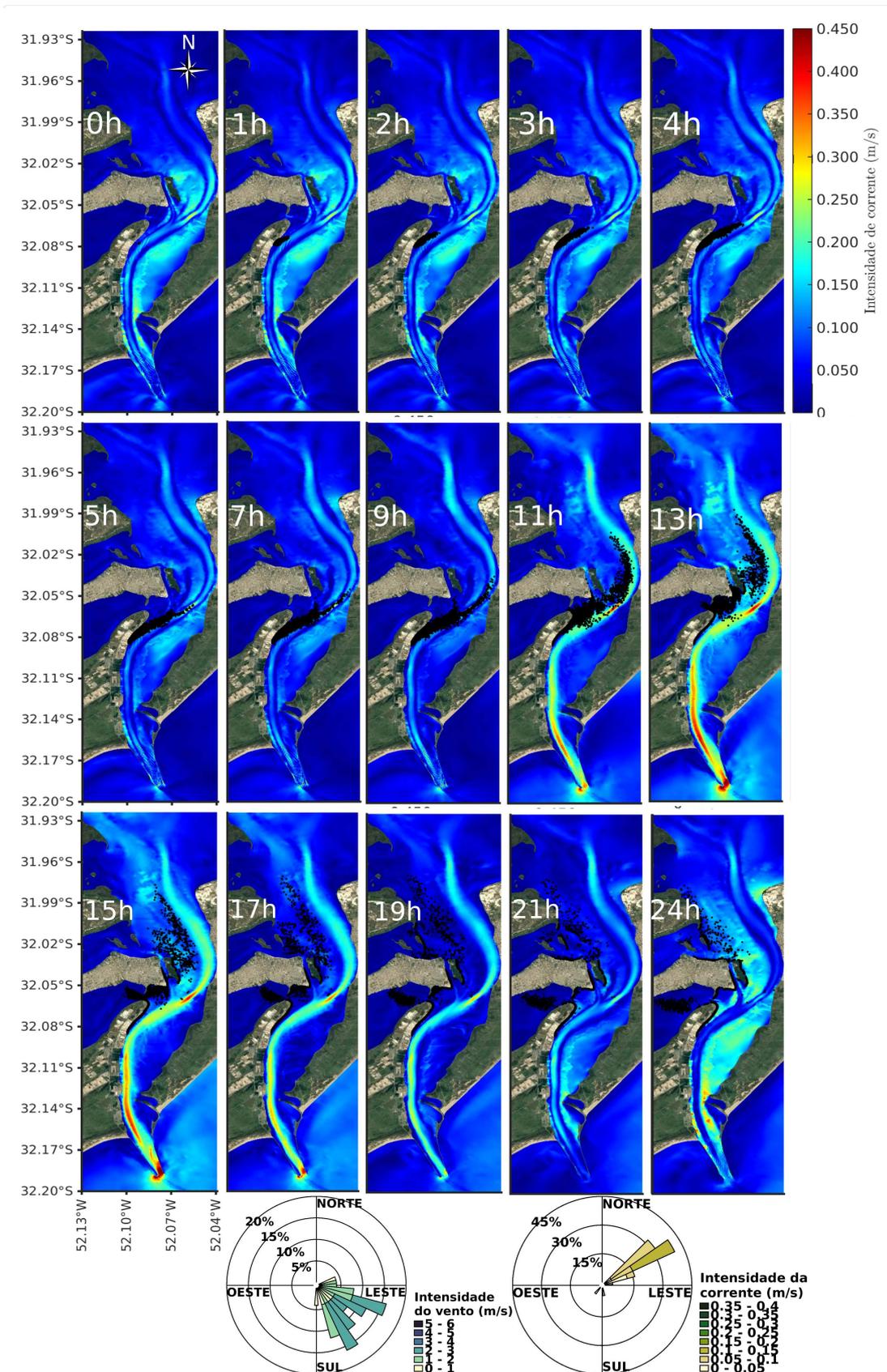


Figura 4.27 – Simulação 6, cenário 5, tempo de simulação de 24 h

O cenário 5 (Fig. 4.27) apresenta-se em condições de enchente e possui a ação dos ventos atuando do quadrante Sul, onde a intensidade média é de $1,70 \text{ m s}^{-1}$, com direção que inicia de Sudoeste e se altera para Leste. A condição de enchente auxilia as correntes no deslocamento das partículas de óleo, seguindo o canal de navegação até as 9 h. Após esse período, as correntes diminuem sua intensidade e os ventos de leste controlam o deslocamento das partículas de óleo para o lado oeste do estuário.

As partículas de óleo atingem uma grande área, em menos de 1 h, chegando a encosta do Super Porto (R1), a Ilha de Terraplena (R8) e o Porto Novo (R9) em 7 h. Além disso, o óleo chega ao Saco da Mangueira (R10) em 17 h e a Ilha dos Marinheiros e Ilha da Pólvora após 19 h. Os locais que possuem maiores ISL são o Saco da Mangueira (R10), uma porção da Ilha de Terraplena (R8), a Ilha dos Marinheiros e a Ilha da Pólvora (R11).

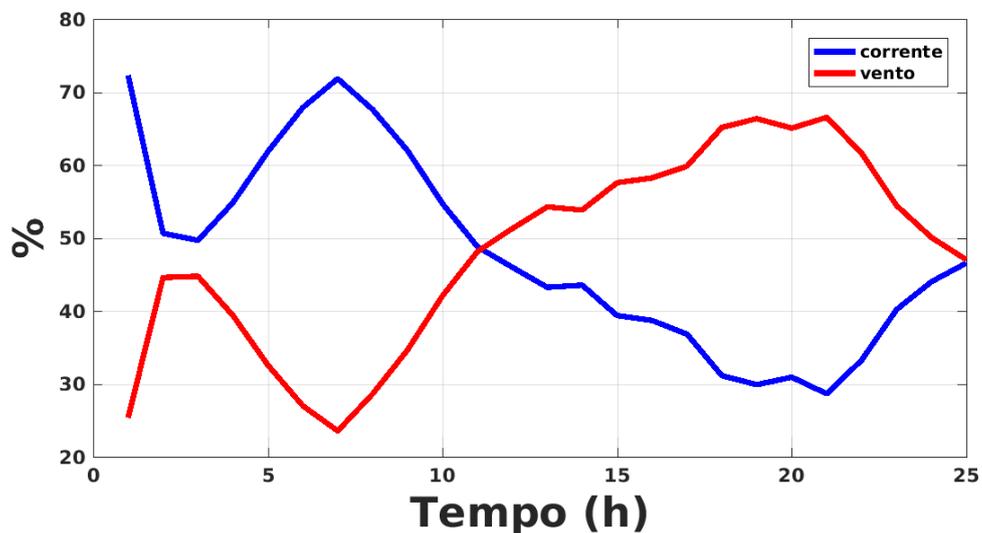


Figura 4.28 – Relação da porcentagem de influência do vento e corrente nas partículas de óleo.

A Fig. 4.28 apresenta a influência das forçantes de correntes e ventos no cenário 5, para o período de 24 h. A corrente tem maior influência nas partículas do óleo até as 11 h, após esse período, o vento de leste controla o deslocamento das partículas, justificando a chegada do óleo nas região atingidas.

Com relação ao intemperismo do cenário 5 (Fig. 4.17), a porcentagem do evaporação atinge 57% em 24 h. A taxa de emulsificação ficou em 44% em 24 h.

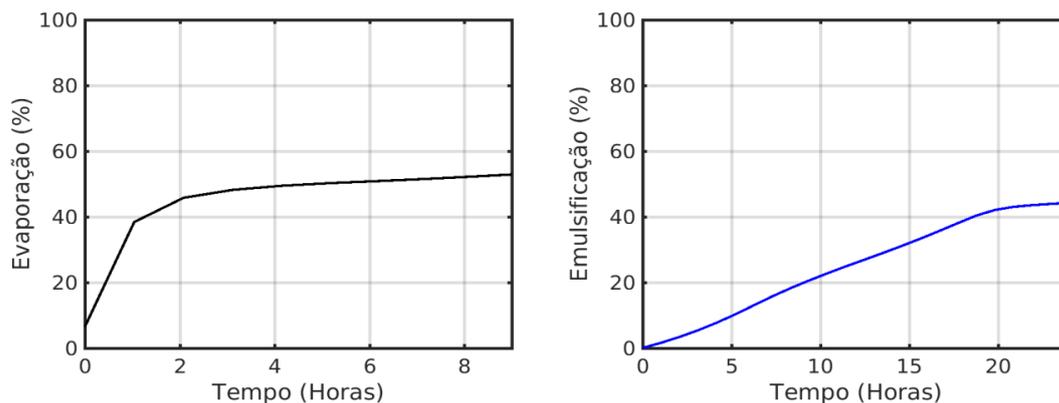


Figura 4.29 – Porcentagem de evaporação e porcentagem de emulsificação.

4.5.6. Cenário 6

A Fig. 4.30 que representa o cenário 6, apresenta uma forte corrente no canal de navegação (condição de vazante). O vento tem início na direção Norte, fato que intensifica o deslocamento das partículas de óleo para a saída do estuário e em menos de 8 h algumas partículas cruzam o limite do Molhes da Barra e Molhes Leste, com o passar do tempo a direção do vento orienta-se para sudoeste influenciando as partículas de óleo para direção da região do Molhe Leste.

A média da intensidade do vento é de $1,40 \text{ m s}^{-1}$ e a média da velocidade da corrente no canal é de $0,28 \text{ m s}^{-1}$, podendo chegar em alguns pontos a $0,47 \text{ m s}^{-1}$.

As partículas de óleo no cenário 6 atingem diversos locais a encosta do Super Porto (R1) ISL 1, ponta da Q.Sessão (R5) de ISL 10, Molhe da Barra (R3) e quase a totalidade das partículas atinge a região dos Molhe Leste (R4). A região do Molhe leste é considerada uma região sensível por tratar-se de uma unidade de conservação onde destaca-se a espécie de pinípede (leão marinho) onde a maioria dos indivíduos observados são machos subadultos e adultos. Além disso, a região também apresenta potencialidades para atividades turísticas e pesca recreativa.

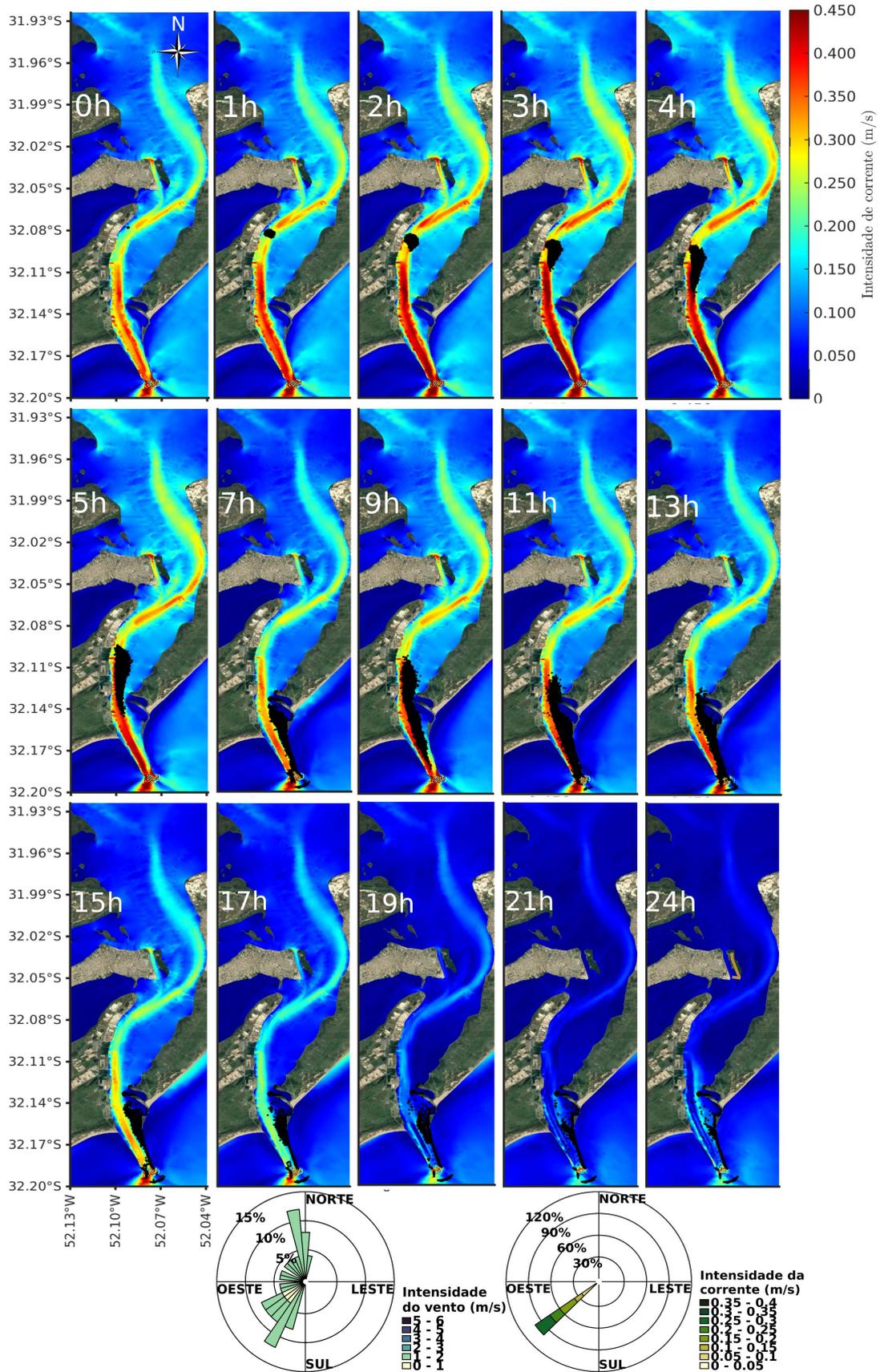


Figura 4.30 – Simulação 28, cenário 6, tempo de simulação de 24 h.

Na Fig. 4.31 observa-se que o evento persistiu por 24 h, sendo a influência do vento mais marcante nas primeiras 3 h, e após esse período a corrente passa a ser o fator dominante do deslocamento das partículas de óleo.

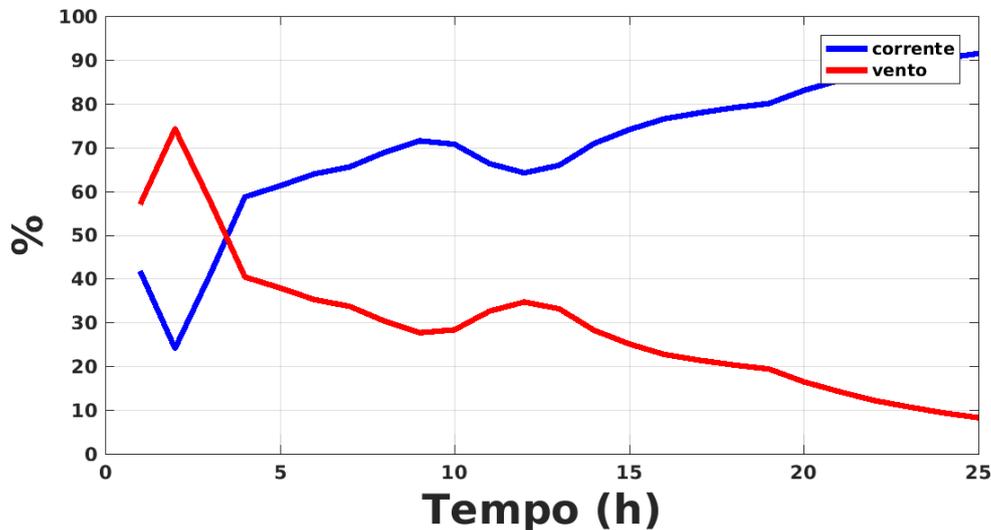


Figura 4.31 – Relação da porcentagem de influência do vento e corrente nas partículas de óleo.

Após as 24 h, as perdas por evaporação situaram-se na faixa dos 60% (Fig. 4.23). As taxas de evaporação obtidas para tal caso, mostraram-se superestimadas quando comparadas com os trabalhos já realizados por Stringari et al. (2013a), Mishra e Kumar (2015) e Marques et al. (2017). As perdas por emulsificação atingiram a faixa dos 43% em 24 h, de forma que tal valor está diretamente relacionado à intensidade dos ventos com valores médios de $1,40 \text{ m s}^{-1}$.

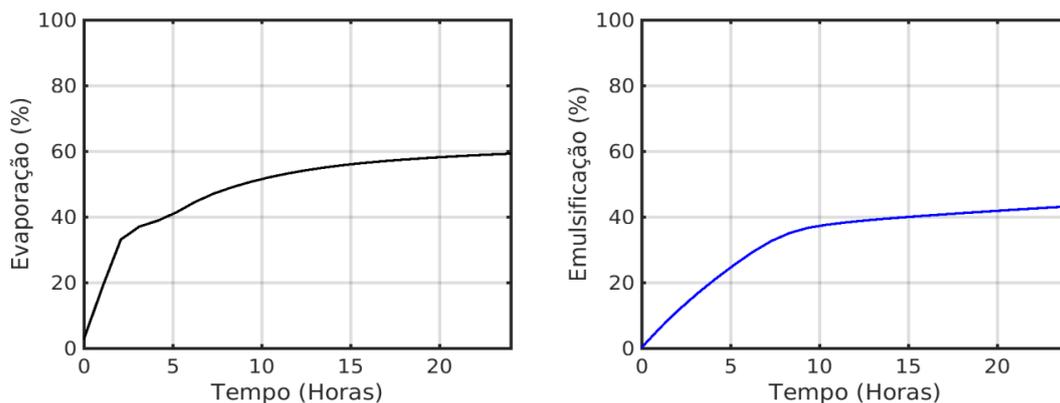


Figura 4.32 – Porcentagem de evaporação e porcentagem de emulsificação.

A seção de cenários, constata que o estudo de regimes de enchentes e vazantes, e diferentes direções e intensidades de ventos e correntes nos seus efeitos sobre as trajetórias das partículas de óleo, podem tanto intensificar ou retardar a velocidade de deslocamento das partículas de óleo. As partículas podem também ser mais influenciadas pelos ventos como no cenário 1 e 4, ou podem ser mais influenciadas pelas correntes como no cenário 6, assim como serem conjuntamente forçadas pelo efeito dos ventos e das correntes (cenários 2, 3 e 5).

Os resultados representam informações cientificamente confiáveis para a orientação dos procedimentos de resposta, em caso de vazamento de óleo no ponto de transbordo de carga líquida do Porto de Rio Grande. Conseqüentemente, os impactos ambientais negativos para a sociedade e para os componentes dos compartimentos ambientais físicos e bióticos seriam atenuados, mesmo que inseridos na zona de influência direta ou indireta dos empreendimentos com riscos de derrames de óleo.

4.6. CONCLUSÃO

O modelo hidrodinâmico Telemac-3D mostrou-se capaz de simular corretamente a tendência do movimento da corrente e da salinidade dentro do canal de acesso ao Porto do Rio Grande, sendo, portanto, utilizado para gerar os resultados que puderam ser acoplados ao modelo ECOS na simulação do deslocamento das manchas de óleo.

Os resultados hidrodinâmicos médios dos 365 dias estudados, quando comparados aos trabalhos já realizados na região, apresentaram-se satisfatórios dentro das suas limitações. Os resultados de hidrodinâmica média representam os principais fenômenos e eventos que ocorrem na região de estudo, em contrapartida, a representação de valores extremos de correntes e ventos é prejudicada.

Pode-se indicar como principais conclusões das simulações dos vazamentos de óleo no ponto de vazamento do terminal da Transpetro:

- A comparação da direção e da intensidade do vento e da corrente entre as 60 simulações de vazamento de óleo escolhidas e a simulação hidrodinâmica média de 365 dias demonstrou-se representativa, visto que as condições observadas são bem correlacionadas do ponto de vista das forçantes que influenciam o deslocamento do óleo dentro do estuário;
- A tendência de deslocamento das partículas de óleo ocorre devido a combinação dos efeitos dos ventos e da descarga dos afluentes da Lagoa dos Patos. Durante o período de verão e primavera, os ventos de Nordeste são de maior frequência e a descarga dos afluentes é baixa. Enquanto no outono e inverno, os ventos possuem maior variabilidade em todas as direções, que são combinadas com as maiores descargas dos afluentes;
- Nas estações de verão e primavera são observados que em 100% das simulações uma porção das partículas de óleo chegam na encosta da região do Super Porto (R1). Nestas estações, existe a probabilidade de que em 17,9% das simulações, uma porção das partículas de óleo cheguem à encosta da enseada do Saco da Mangueira (R10). Não tiveram ocorrências de chegada de partículas de óleo nas regiões do Molhes da Barra (R3), Molhes Leste (R4), Q.Secção (R5) e Marismas (R6);
- Nas estações de outono e inverno são observados que em 60% das simulações uma porção de partículas de óleo chegam à encosta da região do Super Porto (R1), 40% chegam na região de Marismas (R6) e 30% atingem a região dos Molhes da Barra (R3). A probabilidade das partículas de óleo saírem para fora da região do Estuário (R12) é de 16,7% e nestas simulações, as partículas de óleo não chegaram a região do Saco da Mangueira (R10), Ilha dos Marinheiros e Ilha da Pólvora (R11);
- As correntes tem maior influência nos deslocamentos das partículas quando os afluentes pos-

suem maiores vazões, durante o outono e inverno, ou quando diminui a intensidade dos ventos. Por outro lado, os ventos tem maior influência nos deslocamentos quando a intensidade do vento esta acima de 3 m s^{-1} e as correntes tem baixa intensidade;

- O vento possui maior influencia no deslocamento médio das partículas de óleo nas primeiras 5 h, pois os vazamentos com maiores ocorrências duram até 6 h quando as partículas chegam à encosta do Super Porto (R1), devido a maior ocorrência de ventos de Nordeste. No intervalo de tempo de 18 h a 24 h, as correntes possuem maior influência, pois as partículas são deslocadas seguindo o fluxo no canal de acesso ao estuário;
- A ação dos ventos é a principal contribuinte para as partículas de óleo chegarem nas encostas da região estuarina, pois o vento assume diversas direções, enquanto as correntes tem dominância no sentido longitudinal do canal de acesso à Lagoa dos Patos;
- As regiões com maiores concentrações de óleo, ou seja, com maior contaminação são: à encosta do Super Porto (R1), Barra nova (R2) e ponta da Q. secção (R5), assim como nas duas extremidades da região de Marisma (R6) e São José do Norte (R7);
- Os locais da Q. Secção (R5) e Marismas (R6) são os pontos de chegada óleo mais preocupantes, pois além de apresentarem grandes concentrações de óleo vazado eles possuem o maior índice de sensibilidade litoral (ISL 10);
- A contaminação da água e os efeitos diretos e indiretos, poderiam influenciar na ocorrência das especies na área estuarina, no potencial pesqueiro da região, assim como na saúde, na segurança e no bem estar da população, pois o petróleo possui em suas composições, componentes altamente tóxicas aos seres vivos;
- No intemperismo a resposta da emulsificação do óleo apresenta-se boa, porém para as respostas de evaporação, o modelo superestimou os resultados em aproximadamente 50%;
- Para os cenários, os diferentes regimes de enchentes, vazantes e direções e intensidades de ventos podem gerar distintas interações nos efeitos sobre as trajetórias das partículas de óleo podendo tanto intensificar ou retardar a velocidade de deslocamento. As partículas podem também ser mais influenciadas pelos ventos como no cenário 1 e 4, ou podem ser mais influenciadas pelas correntes, como no cenário 6, assim como serem conjuntamente forçadas pelo efeito dos ventos e das correntes (cenários 2, 3 e 5).

4.7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A realização do deste estudo pôde esclarecer alguns aspectos que não poderiam ser investigados sem a utilização da modelagem numérica, porém outros aspectos ainda devem ser melhorados, e desta forma, para a realização de trabalhos futuros são sugeridos:

- Utilização de dados de oceanográficos, atmosféricos e vazão dos principais afluentes em períodos normais ou de eventos extremos;
- Acoplamento com o modelo de ondas, visto que exercem um papel importante no espalhamento, transporte e mistura das manchas de óleo;
- Análise de um maior número de simulações para que a análise de suscetibilidade seja mais confiável do ponto de vista estatístico;
- Investigação de um maior número de pontos de vazamento de óleo na região do canal navegável localizado no estuário da Lagos dos Patos;
- Calibração e validação do modelo ECOS para deslocamento da mancha de óleo;
- Expansão do estudo numérico na questão de manejo de equipamentos pós vazamento e para custo de limpeza;
- Testes de sensibilidade para o módulo de intemperismo do óleo, principalmente na questões de evaporação;
- Implementação de processos biológicos para o módulo de intemperismo;
- Utilização de outros tipos de óleos com diferentes massas específicas;
- Realização da estimativa de riscos ambientais associados aos vazamentos de óleo, fundamentada em um número robusto de simulações de derrames;
- Investigação da dispersão da mancha de óleo ao longo da coluna de água.

5. REFERÊNCIAS

- AAMO, O. M., REED, M., E LEWIS, A. Regional contingency planning using the OSCAR oil spill contingency and response model. **Arctic and Marine Oil spill Program Technical Seminar**, v. 1, p. 289–308, 1997.
- AL-RABEH, A. H., CEKIRGE, H. M., E WATER, N. G. A stochastic simulation model of oil spill fate and transport. **Applied Mathematical Modelling**, v. 13, p. 322–329, 1989.
- ALMADA, G. V. D. M. B. E BERNARDINO, A. F. Conservation of deep-sea ecosystems within offshore oil fields on the Brazilian margin, SW Atlantic. **Biological Conservation**, v. 206, p. 92–101, 2017.
- ALVES, F. N. A., 2006. **Estudo do transporte de manchas de óleo por um modelo lagrangeano de partículas na Bacia de Pelotas**. Tese, Universidade Federal do Rio Grande.
- ALVES, T. M., KOKINOU, E., E ZODIATIS, G. A three-step model to assess shoreline and offshore susceptibility to oil spills: The South Aegean (Crete) as an analogue for confined marine basins. **Marine Pollution Bulletin**, v. 86, n. 1-2, p. 443–457, 2014.
- BACK, A. C., DA SILVA, F. D. J. L., CATANI, F., ESTANTE, F. E. D. C., LIMA, G. G., DO AMARANTE, O. A. C., DE ANDRADE, P. E. P., E DE FREITAS, R. M. **Atlas do Potencial Eólico: Rio Grande do Sul. Brasil**. Porto Alegre: SDTI, Porto Alegre - RS, 2014.
- BERRY, A., DABROWSKI, T., E LYONS, K. The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea. **Marine Pollution Bulletin**, v. 64, n. 11, p. 2489–2501, 2012.
- BOEHM, P. D., MURRAY, K. J., E COOK, L. L. Distribution and Attenuation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Gulf of Mexico Seawater from the Deepwater Horizon Oil Accident. **Environmental Science and Technology**, v. 50, n. 2, p. 584–592, 2016.
- BOLLMANN, M., BOSCH, T., COLIJN, F., EBINGHAUS, R., FROESE, R., GUESSOW, K., KHALILIAN, S., KRASTEL, S., NGER, A. K., LAGENBUCH, M., LATIF, M., MATTHIESSEN, B., MELZNER, F., E OSCHLIES, A. **World ocean review 2010: living with the oceans**. Maribus Hamburg, 1ª edição, 2010.
- BOZKURTOĞLU, □. N. E. Modeling oil spill trajectory in Bosphorus for contingency planning. **Marine Pollution Bulletin**, v. 123, n. 1-2, p. 57–72, 2017.
- BRAKSTAD, O. G. **Biodegradation of Petroleum Oil in Cold Marine Environments**. Psychrophiles: From Biodiversity to Biotechnology, 2017.
- BUCHANAN, I. E HURFORD, N. Methods for predicting the physical changes in oil spilt at sea. **Oil and Chemical Pollution**, v. 4, n. 4, p. 311–328, 1988.

- CASTANEDO, S., JUANES, J. A., MEDINA, R., PUENTE, A., FERNANDEZ, F., OLABARRIETA, M., E POMBO, C. Oil spill vulnerability assessment integrating physical, biological and socio-economical aspects: Application to the Cantabrian coast (Bay of Biscay, Spain). **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 1, p. 149–159, 2009.
- CASTELÃO, R. M. E MOLLER JR, O. O. Sobre a circulação tridimensional forçada por ventos na lagoa dos patos. **Revista Atlantica**, v. 25, n. 2001, p. 91–106, 2003.
- CHAPMAN, H., PURNELL, K., LAW, R. J., E KIRBY, M. F. The use of chemical dispersants to combat oil spills at sea: A review of practice and research needs in Europe. **Marine Pollution Bulletin**, v. 54, n. 7, p. 827–838, 2007.
- CIOTTI, Á. M., ODEBRECHT, C., FILLMANN, G., E MOLLER, O. O. Freshwater outflow and Subtropical Convergence influence on phytoplankton biomass on the southern Brazilian continental shelf. **Continental Shelf Research**, v. 15, n. 14, p. 1737–1756, 1995.
- CULBERTSON, J. B., VALIELA, I., PICKART, M., PEACOCK, E. E., E REDDY, C. M. Long-term consequences of residual petroleum on salt marsh grass. **Journal of Applied Ecology**, v. 45, n. 4, p. 1284–1292, 2008.
- DE OLIVEIRA, H. A., 2012. **Estudo Do Comportamento Hidrodinâmico Da Lagoa Mirim E Dos**. Tese, Universidade Federal do Rio Grande.
- DUPUIS, A. E UCAN-MARIN, F. A literature review on the aquatic toxicology of petroleum oil: an overview of oil properties and effects to aquatic biota. **DFO Canadian Science Advisory Secretariat Research Document**, v. 2015/007, n. April, p. 51, 2015.
- ELLIOTT, A. J. Shear diffusion and the spread of oil in the surface layers of the North Sea. **Deutsche Hydrographische Zeitschrift**, v. 39, n. 3, p. 113–137, 1986.
- FARINA, J. Vazamento de óleo atinge Tramandaí, no Litoral Norte. **Gaúcha**, pp. 1–2, 2014.
- FAY, J. A. **The Spread of Oil Slicks on a Calm Sea**. M.I.T. Fluid Mechanics Laboratory, 1969.
- FERNANDES, E. H., 2001a. **Modelling the Hydrodynamics of the Patos Lagoon, Brazil**. Tese, University of Plymouth.
- FERNANDES, E. H. L., CECÍLIO, R. O., E SCHILLER, R. V. Estudo da influência da obra de convergência dos Molhes da Barra de Rio Grande sobre a circulação hidrodinâmica do Estuário da Lagoa dos Patos. **VETOR- Revista de Ciências Exatas e Engenharias**, v. 15, n. 2, p. 49–57, 2007.
- FERNANDES, R., 2001b. **Modelação de derrames de Hidrocarbonetos**. Tese, Instituto Superior Técnico.

- FINGAS, M. E FIELDHOUSE, B. Formation of water-in-oil emulsions and application to oil spill modelling. **Journal of Hazardous Materials**, v. 107, n. 1-2, p. 37–50, 2004.
- FINGAS, M. E FIELDHOUSE, B. Water-in-Oil Emulsions: Formation and Prediction. **Handbook of Oil Spill Science and Technology**, v. 3, n. 1, p. 225–270, 2015.
- FINGAS, M. F. The evaporation of oil spill: development and implementation of new prediction methodology. **International Oil Spill Conference Proceedings**, v. 1999, n. 1, p. 281–287, 1999.
- FLORES, H., ANDREATTA, A., LLONA, G., E SAAVEDRA, I. Measurements of oil spill spreading in a wave tank using digital image processing. **Transactions on Ecology and the Environment**, v. 20, 1998.
- FREIRE, I. D., 2006. **Mapeamento de sensibilidade ambiental para derrames de óleo da porção da costa do Rio Grande do Sul**. Tese, Universidade Federal do Rio Grande.
- FREITAS, L. B., 2012. **Detecção de feições oceanográficas, filmes minerais e biogênicos via imagens MODIS na condição SUNGLIT**. Tese, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais(dissertação).
- FRENCH-MCCAY, D. Oil spill impact modeling: Development and validation. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 23, n. 10, p. 2441–2456, 2004.
- GAN, M. A. E RAO, V. B. Surface Cyclogenesis over South America, 1991.
- GARCÍA-GARRIDO, V. J., RAMOS, A., MANCHO, A. M., COCA, J., E WIGGINS, S. A dynamical systems perspective for a real-time response to a marine oil spill. **Marine Pollution Bulletin**, v. 112, n. 1-2, p. 201–210, 2016.
- GRUBESIC, T. H., WEI, R., E NELSON, J. Optimizing oil spill cleanup efforts: A tactical approach and evaluation framework. **Marine Pollution Bulletin**, v. 125, n. 1-2, p. 318–329, 2017.
- GURJAR, B. R., SHARMA, R. K., GHUGE, S. P., WATE, S. R., E AGRAWAL, R. Individual and Societal Risk Assessment for a Petroleum Oil Storage Terminal. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 19, n. 4, p. 4015003, 2015.
- HACKETT, B., ERIC, C., D., P., E ICHIKAWA, H. Marine Oil Pollution Prediction. **Oceanography**, v. 22, n. 3, p. 2009, 2009.
- HARTMANN, C., 1996. **Dinâmica, distribuição e composição do material em suspensão na região sul da Laguna dos Patos, RS**. Tese, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- HERVOUET, J. M. **Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method**. John Wiley & Sons, Wiley, 2007.
- IBAMA. Informação Técnica ELPN/IBAMA N 023/02 - Modelagem de Derramamento de óleo no mar, 2002.

- ITOPF. Oil Tanker Spill Statistics 2015. The International Tanker Owners Pollution Federation Limited, 2016.
- JONES, C. E., DAGESTAD, K. F., BREIVIK, Ø., HOLT, B., RÖHRS, J., CHRISTENSEN, K. H., ESPESETH, M., BREKKE, C., E SKRUNES, S. Measurement and modeling of oil slick transport. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 121, n. 10, p. 7759–7775, 2016.
- KJERFVE, B. C. **Comparative oceanography of coastal lagoons**. Estuarine variability, Wolfe, D.A., (Ed.). Orlando, Florida: Academic Press., 1986.
- LAGES, R. D. S., 2003. **Padrão de ventos no extremo sul: análise do período de 2000 a 2003 e aplicação à dispersão de Poluentes**. Tese, Universidade Federal do Rio Grande.
- LANGEVIN, D., POTEAU, S., HÉNAUT, I., E ARGILLIER, J. F. Crude Oil Emulsion Properties and Their Application to Heavy Oil Transportation. **Oil & Gas Science and Technology**, v. 59, n. 5, p. 511–521, 2004.
- LEHR, W., JONES, R., EVANS, M., SIMECEK-BEATTY, D., E OVERSTREET, R. Revisions of the ADIOS oil spill model. **Environmental Modelling & Software**, v. 17, n. 2, p. 189–197, 2002.
- LIU, X., GUO, M., WANG, Y., YU, X., GUO, J., TANG, C., HU, X., WANG, C., E LI, B. Assessing pollution-related effects of oil spills from ships in the Chinese Bohai Sea. **Marine Pollution Bulletin**, v. 110, n. 1, p. 194–202, 2016.
- LOPES, B. V., OLEINIK, P. H., MONTEIRO, C. B., DA SILVA, D. V., MARQUES, W. C., GUIMARÃES, R. C., E TROMBETTA, T. B. Numerical Study of Oil Spill in the Patos Lagoon Under Flood and Ebb Conditions. **Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**, v. 38, n. January, 2017.
- LOPES, C. F., MILANELLI, J. C. C., E POFFO, I. R. F. **Ambientes costeiros contaminados por óleo : procedimentos de limpeza – manual de orientação**. Secretaria de Estado do Meio, São Paulo, 2007.
- MACHADO, A. A., CALLIARI, L. J., MELO, E., E KLEIN, A. H. F. Historical assessment of extreme coastal sea state conditions in southern Brazil and their relation to erosion episodes. **Journal of Aquatic Sciences**, v. 5, p. 277–286, 2010.
- MACKAY, D., TRUDEL, B. K., PATERSON, S., DIRECTORATE, C. E. I. C., RESEARCH, C. E. E. B., E DIVISION, D. **A Mathematical Model of Oil Spill Behaviour**. Research and Development Division, Environmental Emergency Branch, 1980.
- MARQUES, W. C., FERNANDES, E. H., MOLLER JR, O. O., MORAES, B. C., E MALCHEREK, A. Dynamics of the Patos Lagoon coastal plume and its contribution to the deposition pattern of the southern Brazilian inner shelf. **Journal of Geophysical Research**, 2010.

- MARQUES, W. C., FERNANDES, E. H., MONTEIRO, I. O., E MÖLLER, O. O. Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. **Continental Shelf Research**, v. 29, n. 3, p. 556–571, 2009.
- MARQUES, W. C., FERNANDES, E. H. L., E ROCHA, L. A. O. Straining and advection contributions to the mixing process in the Patos Lagoon estuary, Brazil. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 116, n. 3, p. 1–23, 2011.
- MARQUES, W. C., STRINGARI, C. E., E EIDT, R. T. The Exchange Processes of the Patos Lagoon Estuary – Brazil: A Typical El Niño Year versus a Normal Meteorological Conditions Year. **Advances in Water Resource and Protection**, v. 2, p. 11–20, 2014.
- MARQUES, W. C., STRINGARI, C. E., KIRINUS, E. P., MÖLLER JR, O. O., TOLDO JR, E. E., E ANDRADE, M. M. Numerical modeling of the Tramandaí beach oil spill, Brazil—Case study for January 2012 event. **Applied Ocean Research**, v. 65, p. 178–191, 2017.
- MARQUES, W. C., STRINGARI, C. E., E MELLO, L. F. ECOS - Easy Coupling Oil System. Patente: Programa de Computador. título: "ECOS - Easy Coupling Oil System", 2013.
- MELLO, L. F., 2013. **Desenvolvimento de um modelo de óleo baseado na visão lagrangeana de partículas**. Tese, Universidade Federal do Rio Grande.
- MELVIN, A. T., THIBODEAUX, L. J., PARSONS, A. R., OVERTON, E., VALSARAJ, K. T., E NANDAKUMAR, K. Oil-material fractionation in Gulf deep water horizontal intrusion layer: Field data analysis with chemodynamic fate model for Macondo 252 oil spill. **Marine Pollution Bulletin**, v. 105, n. 1, p. 110–119, 2016.
- MISHRA, A. K. E KUMAR, G. S. Weathering of Oil Spill: Modeling and Analysis. **Aquatic Procedia**, v. 4, n. Icwrcoc, p. 435–442, 2015.
- MMA, M. D. M. A. **Especificações e Normas Técnicas para Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para Derramamentos de Óleo**. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental, 2007.
- MOLLER, O. O., CASTAING, P., SALOMON, J.-C., E LAZURE, P. The Influence of Local and Non-Local Forcing Effects on the Subtidal Circulation of Patos Lagoon. **Estuaries**, v. 24, n. 2, p. 297, 2001.
- MOLLER, O. O., LORENZZENTTI, J. A., STECH, J., E MATH, M. M. The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 3, p. 335–351, 1996.
- MÖLLER JR., O. E CASTAING, P. Hydrographical characteristics of the estuarine area of Patos Lagoon (30°S, Brazil). **Estuaries of South America-Their Geomorphology and Dynamics**, pp. 83–100, 1999.

- MONTEIRO, C. B., KIRINUS, E. D. P., MARQUES, W. C., OLEINIK, P. H., E COSTI, J. Analysis of Two Oil Spills in the Southern Brazilian Shelf, in the Years of 2012 and 2014. **Defect and Diffusion Forum**, v. 372, p. 70–80, 2017.
- MONTEIRO, I. O., PEARSON, M., MÖLLER, O. O., E FERNANDES, E. H. L. Hidrodinâmica do Saco da Mangueira: mecanismos que controlam as trocas com o estuário da Lagoa dos Patos. **Atlântica (Rio Grande)**, v. 27, n. 2, p. 8–101, 2006.
- MORENO, R., JOVER, L., DIEZ, C., E SANPERA, C. Seabird feathers as monitors of the levels and persistence of heavy metal pollution after the Prestige oil spill. **Environmental Pollution**, v. 159, n. 10, p. 2454–2460, 2011.
- NICOLODI, J. L. **Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da Bacia Marítima de Pelotas**. Porto Alegre: Panorama Critico, 2016.
- NOGUEIRA, R. X. D. S. E COSTA, C. S. B. Sigmar: aplicação e análise de sensibilidade das marismas a derrames de óleo. r. In **XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte**, pp. 1617–1619, 2003.
- OLEINIK, P. H., MARQUES, W. C., E KIRINUS, E. D. P. Estimate of the Wave Climate on the Most Energetic Locations of the South-Southeastern Brazilian Shelf. **Defect and Diffusion Forum**, v. 370, p. 130–140, 2017.
- PEREIRA, P. D. S., 2005. **Variabilidade da orla oceânica do Rio Grande do Sul e suas implicações na elaboração de planos de contingência: aspectos morfodinâmicos, sedimentológicos e geomorfológicos**. Tese, Universidade Federal do Rio Grande.
- PROCTOR, R., ELLIOT, A. J., E FLATHER, R. A. Forecast and hindcast simulations of the Braer oil spill. **Marine Pollution Bulletin**, v. 28, n. 4, p. 219–229, 1994a.
- PROCTOR, R., FLATHER, R. A., E ELLIOTT, A. J. Modelling tides and surface drift in the Arabian Gulf-application to the Gulf oil spill. **Continental Shelf Research**, v. 14, n. 5, p. 531–545, 1994b.
- REBOITA, M. S., GAN, M. A., ROCHA, R. P., E AMBRIZZI, T. **Regimes De Precipitação Na América Do Sul: Uma Revisão Bibliográfica**, volume 25. Revista Brasileira de Meteorologia, 2010.
- REED, M., JOHANSEN, Ø., BRANDVIK, P. J., DALING, P., LEWIS, A., FIOCCO, R., MACKAY, D., E PRENTKI, R. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: Overview of the state of the art. **Spill Science and Technology Bulletin**, v. 5, n. 1, p. 3–16, 1999.
- SEBASTIÃO, P. E SOARES, C. G. Modeling the Fate of Oil Spills at Sea. **Spill Science & Technology Bulletin**, v. 2, p. 121–131, 1995.

- SIMIONATO, C. G., MECCIA, V. L., DRAGANI, W. C., E NUÑEZ, M. N. On the use of the NCEP/NCAR surface winds for modeling barotropic circulation in the Rio de la Plata Estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 70, n. 1-2, p. 195–206, 2006.
- SKOGNES, K. E JOHANSEN, Ø. Statmap - A 3-dimensional model for oil spill risk assessment. **Environmental Modelling and Software**, v. 19, n. 7-8, p. 727–737, 2004.
- STIVER, W. E MACKAY, D. Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures. **Environmental science & technology**, v. 18, p. 834–840, 1984.
- STRINGARI, C. E., 2014. **Desenvolvimento de uma estrutura de previsão do comportamento de derrames de óleo para Bacia de Pelotas**. Tese, Universidade Federal do Rio Grande.
- STRINGARI, C. E., CORREA MARQUES, W., EIDT, R. T., E MELLO, L. F. Modeling an Oil Spill along the Southern Brazilian Shelf: Forcing Characterization and Its Influence on the Oil Fate. **International Journal of Geosciences**, v. 4, n. March, p. 397–407, 2013a.
- STRINGARI, C. E., MARQUES, W. C., MELLO, L. F., E EDIT, R. T. Modeling the Wind Influence in an Oil Spill Along the Southern Brazilian Shelf. **Science Engenharia Térmica (Thermal Engineering) Engenharia Térmica (Thermal Engineering)**, v. 100, n. 12, p. 100–109, 2012a.
- STRINGARI, C. E., MARQUES, W. C., MELLO, L. F., E EIDT, R. T. Modeling the Wind Influence in an Oil Spill Along the Southern Brazilian Shelf. **Engenharia Térmica (Thermal Engineering)**, v. 11, n. 1, p. 100–109, 2013b.
- STRINGARI, C. E., MELLO, L. F., EIDT, R. T., E MARQUES, W. C. Numerical Study of Oil Spill in the Southern Brazilian Shelf. In **2012 International Conference on Offshore and Marine Technology: Science and Innovation**, pp. 38–41, 2012b.
- SUPRG. Superintendência do Porto de Rio Grande. Movimentação por segmento de carga ano 2016, 2017.
- SUTHERLAND, J. E WALLINGFORD, H. R. Cosmos modelling and The development of model performance statistics. **TR121-EC MAST Project n° MAS3-CT97-0086, HR Wallingford, UK**, pp. 1–4, 2001.
- TERCEIRO, A. M., SOARES, M. M., PEREIRA, L. A. V., KRACK, A. C., E WALTER, T. Cartas de sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo - cartas SAO: Levantamento das informações da componente socioeconômica em tramandaí e imbé - Rio Grande Do Sul. **Anuario do Instituto de Geociencias**, v. 39, n. 3, p. 48–54, 2016.
- VERA, C., BAEZ, J., DOUGLAS, M., EMMANUEL, C. B., MARENGO, J., MEITIN, J., NICOLINI, M., NOGUES-PAEGLE, J., PAEGLE, J., PENALBA, O., SALIO, P., SAULO, C., SILVA DIAS, M. A., SILVA DIAS, P., E ZIPSER, E. The South American low-level jet experiment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 87, n. 1, p. 63–77, 2006.

ZHANG, D. F., EASTON, A. K., E STEINER, J. M. Simulation of coastal oil spills using the random walk particle method with Gaussian kernel weighting. **Spill Science and Technology Bulletin**, v. 4, n. 2, p. 71–88, 1997.