



Universidade Federal do Rio Grande

_____ Escola de Engenharia _____

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Estudo Numérico de Vazamentos de Óleo e suas
Relações com a Sensibilidade Ambiental e os
Processos Hidrodinâmicos do Estuário da Lagoa dos
Patos (RS)

Dissertação de:

Thalita Fagundes Leal

Orientador:

Wiliam Correa Marques

Março de 2019

Estudo Numérico de Vazamentos de Óleo e suas Relações com a Sensibilidade Ambiental e os Processos
Hidrodinâmicos do Estuário da Lagoa dos Patos (RS)

Thalita Fagundes Leal
Engenheira de Petróleo

.....
Prof. Dr. Wiliam Correa Marques Orientador

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.

Banca examinadora:

.....
Dr. Eduardo de Paula Kirinus PPGEO/FURG

.....
Prof. Dr. Liércio André Isoldi PPGEO/FURG

.....
Prof. Dr. Valmir Francisco Risso CEng/UFPEL

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

Rio Grande, 29 de Março de 2019

Leal, Thalita Fagundes

Estudo Numérico de Vazamentos de Óleo e suas Relações com a Sensibilidade Ambiental e os Processos Hidrodinâmicos do Estuário da Lagoa dos Patos (RS) / Thalita Fagundes Leal – Rio Grande: FURG / EE, 2019.

VII, 111 p.

Orientador: Wiliam Correa Marques

Dissertação (mestrado) / FURG / EE / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, 2019.

Referências: p. 91 – 101.

1. Modelagem numérica. 2. TELEMAC-3D. 3. ECOS.

I. Leal, Thalita Fagundes. II. Universidade Federal do Rio Grande, FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica. III. Estudo Numérico de Vazamentos de Óleo e suas Relações com a Sensibilidade Ambiental e os Processos Hidrodinâmicos do Estuário da Lagoa dos Patos (RS).

Resumo

Thalita Fagundes Leal

ESTUDO NUMÉRICO DE VAZAMENTOS DE ÓLEO E SUAS RELAÇÕES COM A SENSIBILIDADE AMBIENTAL E OS PROCESSOS HIDRODINÂMICOS DO ESTUÁRIO DA LAGOA DOS PATOS (RS)

O padrão de consumo da população mundial apoia-se fundamentalmente nos derivados de petróleo. Embora contribuam para melhoria da qualidade de vida, possuem aspectos negativos principalmente no âmbito ambiental. O número de vazamentos de óleo no ambiente marinho e costeiro aumentou significativamente nos últimos anos. Considerando a complexidade do ambiente marinho e costeiro, o presente trabalho tem como objetivo aplicar um sistema de modelagem numérica e avaliar a dispersão de óleo na região estuarina da Lagoa dos Patos—RS, de forma a produzir resultados que possam posteriormente auxiliar na criação de um plano de contenção à contaminação, caso ocorra um acidente de vazamento de óleo. Uma estrutura de dados de circulação atmosférica e oceânica, durante o período de 2010 a 2013, foi organizada e inserida no acoplamento entre o modelo hidrodinâmico TELEMAT-3D e o modelo de óleo ECOS, contabilizando um total de 22 simulações de óleo. Estas simulações foram utilizadas para identificar as principais forçantes que controlam a dispersão e o deslocamento final das partículas de óleo. O deslocamento das partículas de óleo ocorre devido à combinação da intensidade de ventos, correntes e da descarga dos afluentes da Lagoa dos Patos. Durante o verão e a primavera, os ventos de nordeste têm maior frequência e a descarga dos afluentes é baixa. No outono e o inverno, os ventos possuem maior variabilidade em todas as direções, que são combinadas com as maiores descargas dos afluentes. De acordo com os resultados das simulações nos períodos de verão e primavera existem a probabilidade de que 30% das partículas de óleo chegaram ao Saco da Mangueira (R3). Ainda neste período, 23,3% chegaram à região do Super Porto (R4) e 10% à Ilha de Terrapleno (R1) e Barra Nova (R5). Nos períodos de outono e inverno existem a probabilidade de que 47,2% das partículas de óleo chegaram ao Saco da Mangueira (R3). Ainda neste período 14,7% das partículas de óleo chegaram à região do Super Porto (R4). As regiões afetadas pelas maiores concentrações de óleo são: o interior do Saco da Mangueira (R3), Marismas (R9), e as praias de São José do Norte (R10). A contaminação nestas regiões são graves, pois apresentam concentrações significativas de óleo vazado e possuem o maior índice de sensibilidade do litoral (ISL 10). A porcentagem média de emulsificação é de 70% e a evaporação é de 0,28%. O acoplamento destes modelos mostraram-se eficientes produzindo resultados que podem posteriormente ser utilizados em estudos de impacto ambiental ou na geração de planos de contingência na região do estuário da Lagoa dos Patos.

Palavras-chave: Modelagem numérica. TELEMAT-3D. ECOS.

Abstract

Thalita Fagundes Leal

NUMERICAL STUDY OF OIL SPILLS AND THEIR RELATIONSHIPS WITH THE ENVIRONMENTAL SENSITIVITY AND HYDRODYNAMIC PROCESSES OF THE PATOS LAGOON ESTUARY (RS)

The consumption pattern of the world population is mainly based on petroleum products. Although they contribute to improving the quality of life, they have negative aspects mainly in the environmental field. The number of oil spills in the marine and coastal environment has increased significantly in recent years. Considering the complexity of the marine and coastal environment, the present work aims to apply a numerical modeling system and to evaluate the dispersion of oil in the estuary region of the Patos Lagoon-RS, in order to produce results that may later help in the creation of a containment plan in the event of an oil leak. A data structure of atmospheric and oceanic circulation during the period from 2010 to 2013 was organized and inserted in the coupling between the hydrodynamic model TELEMAC-3D and the ECOS oil model, counting a total of 22 oil simulations. These simulations were used to identify the main forcing agents that control the dispersion and final displacement of the oil particles. The displacement of the oil particles occurs due to the combination of the intensity of winds, currents and the discharge of the tributaries of the Patos Lagoon. During the summer and spring, the northeast winds are more frequent and the discharge of the tributaries is low. In autumn and winter, the winds have greater variability in all directions, which are combined with higher discharges from the affluents. According to the results of the simulations in the summer and spring periods there is a probability that 30% of the oil particles have reached the Mangureira Bay (R3). Also in this period, 23,3% arrived in the Super Harbor region (R4) and 10% in Terraplano Island (R1) and Barra Nova (R5). During the fall and winter periods there is a probability that 47,2% of the oil particles have reached the Mangureira Bay (R3). Also in this period 14,7% of the oil particles arrived in the region of the Super Harbor (R4). The regions affected by the highest concentrations of oil are: the interior Mangureira Bay (R3), Marismas (R9), and the beaches of São José do Norte (R10). Contamination in these regions is serious, since they have significant concentrations of oil leaked and have the highest sensitivity index of the coast (ISL 10). The average emulsification percentage is 70% and the evaporation is 0,28%. The coupling of these models were efficient producing results that can later be used in environmental impact studies or in the generation of contingency plans in the Patos Lagoon estuary region.

Keywords: Numerical modeling. TELEMAC-3D. ECOS.

Sumário

	Página
1 • Introdução	1
1.1 • Localização e características da região de estudo	4
1.2 • Motivação	7
1.3 • Objetivo	7
1.3.1 • Objetivos Específicos	8
2 • Estado da arte para estudos de vazamento de óleo mundial	9
2.1 • Estado da arte para estudos de vazamentos de óleo no Brasil	15
2.2 • Softwares utilizados para simulações de vazamentos de óleo	17
3 • Materiais e Métodos	19
3.1 • Módulo Hidrodinâmico—TELEMAC-3D	20
3.1.1 • Fundamentação Teórica do TELEMAC-3D	20
3.1.2 • Equação de Estado da Água do Mar	25
3.1.3 • Traçadores	25
3.1.4 • Modelo de Turbulência	26
3.2 • Processo de Mistura no Estuário	27
3.2.1 • Número de Richardson	27
3.3 • Brunt-Väisälä	28
3.4 • Modelo ECOS	29
3.4.1 • Fundamentação Teórica do Modelo ECOS	30
3.4.2 • Advecção	30
3.4.3 • Espalhamento	31
3.4.4 • Difusão turbulenta	32
3.4.5 • Evaporação	32
3.4.6 • Emulsificação	33
3.4.7 • Massa Específica do Óleo	34
3.4.8 • °API do óleo	34
3.5 • Acoplamento dos Modelos TELEMAC-3D e ECOS	34
3.6 • Geração Malha Computacional	35
3.7 • Discretização vertical da malha	36
3.8 • Banco de Dados para as Condições Iniciais e de Contorno	37
3.8.1 • Dados Globais e de Circulação Oceânica—HYCOM	37
3.8.2 • Dados Globais e de Circulação Atmosférica—ERA-Interim	37
3.9 • Condições Iniciais e de Contorno	38
3.9.1 • Condições de Contorno	38

3.9.2 • Condições Iniciais	39
3.10 • Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL)	41
4 • Validação dos resultados hidrodinâmicos	46
5 • Resultados	51
5.1 • Hidrodinâmica	51
5.1.1 • Mecanismo de oscilação do saco da Mangueira	51
5.1.2 • Relação entre vazão de água e concentração de sal no estuário	53
5.1.3 • Velocidade de correntes e salinidade	55
5.1.4 • Processos de mistura e flutuabilidade	57
5.2 • Deslocamento das partículas de óleo para todos os vazamentos	58
5.3 • Concentração dos vazamentos e tempo de chegada das partículas de óleo.	65
5.4 • Intemperismo	70
5.4.1 • Emulsificação	70
5.4.2 • Evaporação	73
5.5 • Cenários de vazamentos de óleo	75
5.5.1 • Cenário 1	75
5.5.2 • Cenário 2	79
5.5.3 • Cenário 3	79
5.5.4 • Cenário 4	82
6 • Conclusão	87
7 • Sugestões para trabalhos futuros	90
• Referências	91
• Lista de Símbolos	102
• Lista de Siglas	105
• Lista de Figuras	108
• Lista de Tabelas	111

I | Introdução

O padrão de consumo da população mundial apoia-se fundamentalmente nos derivados de petróleo. Embora contribuam para melhoria da qualidade de vida, possuem aspectos negativos principalmente no âmbito ambiental (Bilgen, 2014). O número de vazamentos de óleo no ambiente marinho aumentou significativamente nos últimos anos (Li, 2017). A exploração, produção, transporte e processamento de petróleo no ambiente marinho é a principal fonte de acidentes, conforme Bilgen (2014), Abas *et al.* (2015), Banks (2017) e Brakstad (2017).

O petróleo é constituído por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's), e também por vários metais pesados, que 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 (Furtado, 2018 e Wu e Xu, 2018). Assim, o petróleo é considerado uma substância tóxica, e neste sentido, um acidente com esta substância pode devastar uma área e até mesmo desestabilizar um ecossistema (Mendizábal *et al.*, 2012).

A poluição do oceano e região costeira por óleo é um grande problema ambiental (Jackson e Apel, 2004). Navios petroleiros e as tubulações submersas no ambiente marinho transportam enormes quantidades de óleo (Verma, 2010). De acordo com Brekke e Solberg (2005), anualmente, a poluição por óleo nos oceanos é de aproximadamente 48% por óleo combustível diesel e aproximadamente 29% por óleo cru.

De acordo com a *International Tanker Owners Pollution Federation* (ITOPF¹), no período de 1970 a 2018, as maiores fontes de vazamentos de óleo, seguindo em ordem decrescente, foram de navios petroleiros, plataformas e tanques de armazenamentos. Ainda durante este período a estatística aponta que 58% dos vazamentos ocorreram por intermédio de navios petroleiros navegando em regiões de águas costeiras ou restritas, portos e docas.

No período de 2010 a 2018, ocorreram cerca de 59 vazamentos, resultando em 163.000 t de óleo derramado, onde 92% desse montante foi derramado em apenas 10 incidentes, e apenas um destes incidentes foi responsável por aproximadamente 70% da quantidade de óleo derramado neste mesmo período. Em 2018 o volume total registrado de petróleo perdido para o meio ambiente foi de aproximadamente 113.000 t, no incidente envolvendo o navio petroleiro SANCHI que ocorreu no mar da China Oriental. Esta foi a maior quantidade registrada ao longo dos últimos 24 anos de monitoramento (ITOPF).

Ocorreram vários acidentes com vazamento de óleo em água, de proporções mundiais, nacionais e regionais. Alguns destes foram de extensões gigantescas, onde o impacto causado no meio ambiente repercute até os dias atuais. Entre estes eventos, pode-se enumerar os acidentes na Tab. 1.1, onde constam: o *Atlantic Empress* (Burgherr, 2007), Castillo de Bellver (Altwegg *et al.*, 2008), Golfo do México (McCrea-Strub *et al.*, 2011), Khark 5 (Sebastião e Guedes Soares, 2007), Exxon Valdez (Atlas e Bragg, 2009), ABT *Summer* (Afenyo *et al.*, 2016), *Sea Empress* (Klemas, 2010), Erika (Fattal *et al.*, 2010), Baía de Guana-

¹<https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/>

bara (Millioli *et al.*, 2002), Bacia do Rio Iguaçu (Meniconi *et al.*, 2002), Prestige (Abascal *et al.*, 2009), *Hebei Spirit* (Yim *et al.*, 2012), Chevron no Campo de Frade (Navarro, 2018), Tramandaí (Marques *et al.*, 2017, e Monteiro *et al.*, 2018) e Sanchi (Wang *et al.*, 2018).

Tabela 1.1: Acidentes envolvendo vazamentos de óleo.

Nome	Local	Ano	Vazamento (t)
<i>Atlantic Empress</i>	Tobago—West Indies	1979	160 000
Castillo de Bellver	Saldanha Bay—South Africa	1983	252 000
Golfo do México	EUA	1984	779 000
Khark 5	Atlantic Cost—Marrocos	1989	80 000
Exxon Valdez	Alasca—USA	1989	38 000
ABT <i>Summer</i>	Angola	1991	260 000
Sea Empress	Milford Haven—UK	1996	72 000
Erika	França	1999	20 000
Baía de Guanabara	Brasil	2000	1300
Bacia do Rio Iguaçu	Brasil	2000	13 000
Prestige	Galícia	2002	77 000
<i>Hebei Spirit</i>	Coreia do Sul	2007	10 000
Chevron no Campo de Frade	Brasil	2011	6000
Tramandaí	Brasil	2012	2,5
Sanchi	China	2018	113 000

Fonte: Adaptado de ITOPF, 2019.

No Brasil ocorreram vários acidentes de vazamentos de óleo, porém entre os que causaram maiores impactos destacam-se: o da Baía de Guanabara (RJ) e o da Bacia do Rio Iguaçu (Paraná), em 2000. Ambos os acidentes foram causados devido ao colapso de oleodutos (Meniconi *et al.*, 2002, e Millioli *et al.*, 2002). Também pode-se destacar o acidente de Tramandaí, ao Sul do Brasil, em 2012, que ocorreu por uma falha no navio ao descarregar óleo na monoboia, vazando aproximadamente 2.5 t de óleo no litoral gaúcho (Marques *et al.*, 2017, e Monteiro *et al.*, 2018).

Os contaminantes em oceanos e ambientes costeiros são transportados por uma combinação dos fenômenos de correntes marítimas, ventos e ondas. O óleo na superfície do mar se movimenta entre 1% e 5% da velocidade do vento (Elliott, 1991, e Smith *et al.*, 2012). Portanto, em um vento moderado (velocidade de 10 m s^{-1}) a velocidade de flutuação do vazamento é de aproximadamente $0,3 \text{ m s}^{-1}$ (Jones, 1999).

A modelagem de vazamentos de óleo é uma tarefa muito complexa, onde participam vários fatores interativos. A trajetória de um vazamento é de fundamental importância, uma vez que a partir do rastreamento da pluma de óleo é possível determinar o impacto do óleo nas áreas costeiras e em outros ecossistemas sensíveis. Além disso, a previsão da localização da pluma de óleo pode ajudar a gerenciar ações de resposta adequadas (García-Martínez *et al.*, 1999).

A preocupação com o meio ambiente, com relação aos vazamentos de óleo, levou ao desenvolvimento de sistemas numéricos, que simulam o transporte e o destino das plumas de óleo em oceanos, estuários e rios. Apesar de mais de 50 modelos terem sido desenvolvidos na última década (Li, 2017, e Spaulding, 2017), apenas alguns são usados extensivamente nos dias de hoje. Esses modelos auxiliam na obtenção de respostas de vazamento de óleo durante e após acidentes, avaliando o impacto ambiental para a criação

de um plano de contingência e até mesmo planejamento.

Os objetivos dos modelos são diversos, alguns foram desenvolvidos para previsão tática à curto prazo e ajudam a tomar decisões para conter, controlar e limpar vazamentos acidentais. Outros modelos foram desenvolvidos para danos a longo prazo com avaliação posterior (Spaulding, 2017). O destino e o transporte de óleo derramado são regidos por processos físico-químicos complexos inter-relacionados, que dependem das propriedades do óleo e das condições hidrodinâmicas (Mehrabian *et al.*, 2018).

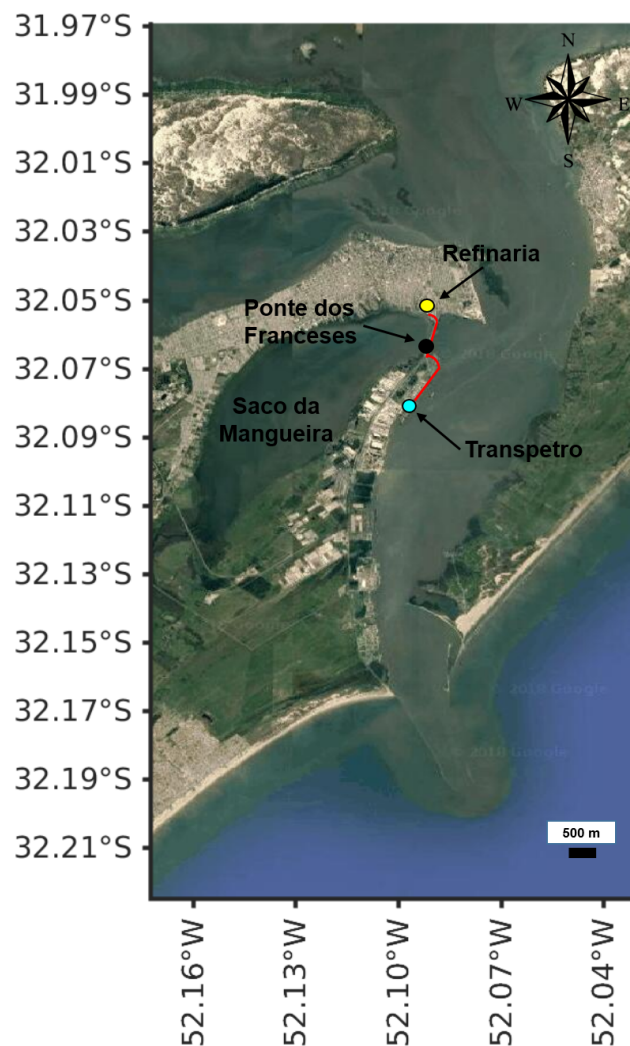


Figura 1.1: Distância percorrida pelo óleo, desde o recebimento no terminal da Transpetro até o interior da refinaria (representado pelo segmento em vermelho).

A legislação ambiental brasileira, dentro do escopo do sistema de gestão ambiental, utiliza a modelagem numérica como ferramenta para a avaliação de possíveis acidentes envolvendo atividades petrolíferas. A legislação exige a modelagem do vazamento de óleo para demarcação da região de influência direta e indireta da atividade, onde também é utilizada para a elaboração de Planos Nacionais de Contingência e Planos de Emergência Individuais.

O Plano de Emergência Individual (PEI) da Resolução da Conama² número 398, dispõe sobre o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional, originados em portos organizados, instalações portuárias, terminais, dutos, sondas terrestres, plataformas e suas instalações de apoio, refinarias, estaleiros, marinas, clubes náuticos e instalações similares, e orienta para a sua elaboração através da modelagem numérica.

A área do Porto de Rio Grande é o centro de várias atividades petroquímicas, como a Refinaria de Petróleo Riograndense³ (RPR), situada nos limites do estuário da Lagoa dos Patos. O corredor marítimo estabelecido representa um risco de poluição por óleo para todas as atividades costeiras (pesca, turismo e lazer) e para o ecossistema local (marismas e manguezais que circundam a encosta da Lagoa dos Patos).

A RPR tem sede em Rio Grande—RS, ao Sul do Brasil, onde ocupa uma área de 40 hectares. A matéria-prima da RPR, o petróleo cru, é recebida através de navios no píer petroleiro localizado próximo à empresa (terminal da Transpetro, conforme a Fig. 1.1). Através dos navios petroleiros atracados no píer, o óleo é conduzido para o interior refinaria por meio de um oleoduto de aproximadamente 4 km de comprimento, sendo armazenado em seis tanques, com capacidade total de 100.000 m³ de matéria-prima (Janeiro *et al.*, 2008). O Terminal da refinaria está localizado dentro da planta industrial, próximo ao Porto do Rio Grande, e dispõe de oleodutos de 10" e 16", para recebimento e carregamento via aquaviário. Estes oleodutos saem do píer petroleiro, atravessam a Ponte dos Franceses e chegam ao interior da refinaria, conforme a Fig. 1.1.

Neste contexto, dados os potenciais riscos de vazamentos de óleo na vizinhança da Ponte dos Franceses, localizada entre o Saco da Mangueira e o baixo estuário da Lagoa dos Patos, ao sul do Brasil, este trabalho tem como contribuição a aplicação de um modelo determinístico, capaz de simular cenários hipotéticos de vazamento de óleo cru na região, pois acidentes deste tipo já ocorreram duas vezes no litoral brasileiro, como o acidente do Foz do Rio Iguaçu (2000) e Baía de Guanabara (2000), que foram causados por colapsos em seus oleodutos.

1.1 Localização e características da região de estudo

A região de estudo está localizada no interior do estuário da Lagoa dos Patos, especificamente na vizinhança da Ponte dos Franceses, nas coordenadas 32°S e 52°W, conforme a Fig. 1.2, no estreito que conecta o Saco da Mangueira ao baixo estuário da Lagoa dos Patos.

A Lagoa dos Patos está localizada na região sul do Brasil, entre as coordenadas 30°–32°S e 50°–52°W, sendo conectada ao Oceano Atlântico Sul através de um canal sustentado pelos Molhes da Barra e Leste (Marques *et al.*, 2010b). A lagoa possui área superficial de 10.360 km² e profundidade média de aproximadamente 5 m (Marques *et al.*, 2009), sendo assim classificada como uma lagoa costeira rasa (Calliari *et al.*, 2009).

A topografia do corpo lagunar é caracterizada por canais naturais e artificiais (8–9 m) e amplas áreas adjacentes (< 5 m). A porção lagunar corresponde aproximadamente a 90% de sua área superficial e a região estuarina compreende os outros 10% da área total da

²Publicado no Diário Oficial da União nº 111, de 12 de junho de 2008, Seção 1, páginas 101-104

³<http://www.refinariariograndense.com.br/site/>

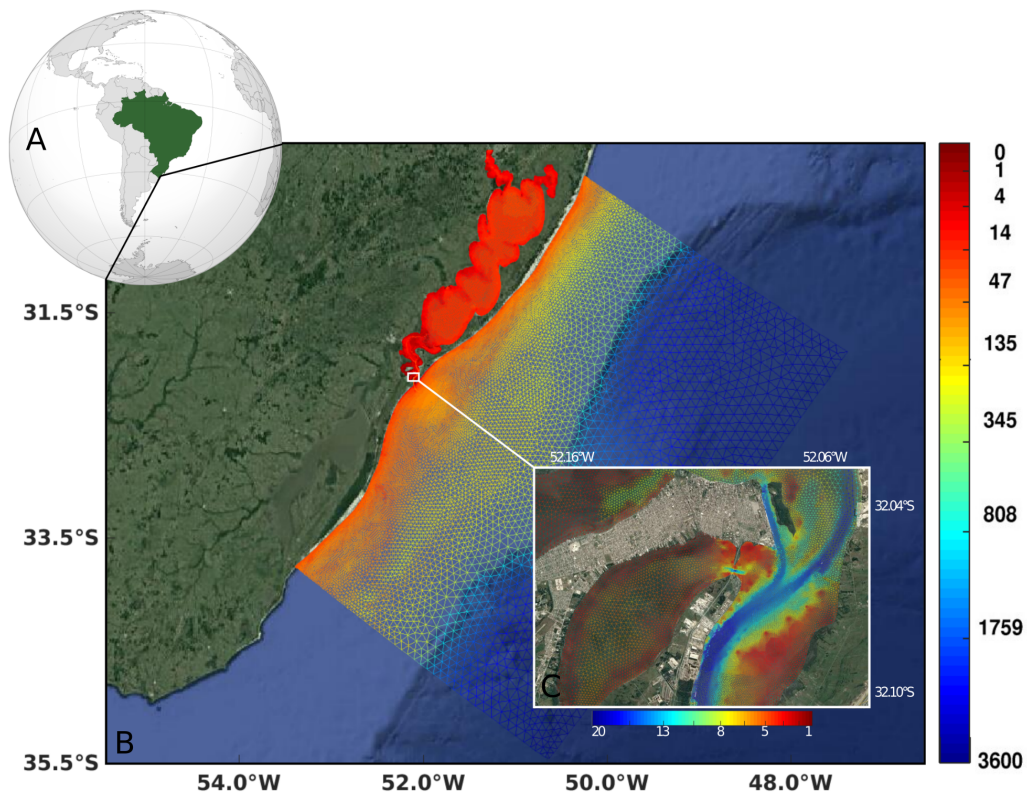


Figura 1.2: Localização global da região de estudo (A), representação batimétrica da linha costeira e da Lagoa dos Patos, com cores representando a profundidade em metros (B), sobreposta da Google maps, landsat / Copernicus, data: 2018. A zona destacada é o estreito que conecta o Saco da Mangueira ao baixo estuário da Lagoa dos Patos (C), localização exata da região de estudo. A figura C está sobreposta da Google Maps, Digital GLOBE CNES / Airbus, data: 2018.

Lagoa dos Patos, e estas regiões são separadas pelos bancos de areia na ponta da Feitoria (Marques e Möller, 2008).

As características morfológicas da Lagoa dos Patos incluem a predominância de sedimentos grosseiros nas áreas rasas e grãos finos nas partes mais profundas, especialmente na zona estuarina. Na zona estuarina da lagoa, predomina areia fina nas áreas rasas expostas à ação das ondas, enquanto a lama e a argila prevalecem nos canais profundos e nas áreas protegidas da ação das ondas (Toldo *et al.*, 1991).

A Lagoa dos Patos é caracterizada pela presença de enseadas rasas denominadas sacos marginais, que são definidos como corpos de água delimitados por barreiras arenosas. A Lagoa possui vários sacos marginais, porém neste estudo, devido à sua localização, o Saco da Mangueira é o mais relevante. A enseada possui profundidade média de 1 m, conectado ao baixo estuário da Lagoa dos Patos por um canal de acesso com 240 m de largura. Esse sistema possui uma área de 227 km² e recebe pequenas descargas de água doce provenientes dos arroios Vieira e Simão (Monteiro *et al.*, 2006).

No Saco da Mangueira são realizadas várias atividades econômicas de suporte ao parque industrial da cidade de Rio Grande, além da pesca artesanal de camarão e atividades de lazer. A hidrodinâmica nesta região é importante, pois a circulação do fluxo de água

entre a enseada e o estuário promovem a entrada de nutrientes e evitam condições anóxicas no ambiente, conforme Monteiro *et al.* (2006) e Barros *et al.* (2014). Além disso a dinâmica do Saco da Mangueira está fortemente relacionada com a dinâmica do estuário, sendo controlada pelo efeito não-local do vento (Monteiro *et al.*, 2006).

Wang e Elliott (1978) e Wang (1979) observaram nas lagoas costeiras que a importância do vento na circulação do sistema aumenta à medida que a amplitude das marés diminui. Knoppers e Kjerfve (1999) afirmaram que esta condição ocorre pois a amplitude das marés é atenuada pela tensão de cisalhamento criada no estreito canal de acesso. Marques e Möller (2008) verificou a mesma ocorrência deste processo no sistema da Lagoa dos Patos, onde a dinâmica depende essencialmente do vento e da descarga de água doce.

Alguns experimentos numéricos realizados por Möller (1996), Marques e Möller (2008), e Möller *et al.* (2001) demonstraram que a dinâmica da Lagoa dos patos é dominada pela ação de ventos em escalas temporais associadas à passagem de sistemas frontais, sobre a região. O vento atuando localmente sobre o corpo da lagoa produz uma configuração no padrão de circulação (*set—up/set—down*) durante os períodos de ventos de Nordeste—Sudoeste, enquanto as oscilações de períodos mais longos, geradas na região costeira por ação remota dos ventos são atenuadas à medida que se propagam para o interior da lagoa, conforme Möller (1996), Möller *et al.* (2001), Fernandes *et al.* (2002) e Janeiro *et al.* (2008). A combinação da ação local e remota dos ventos é o principal mecanismo que controla a introdução de sal na região estuarina, conforme Hartmann e Schettini (1991) e Möller *et al.* (2001).

Camargo *et al.* (2002) desenvolveram o mapa eólico para o Estado do Rio Grande do Sul usando medições de anemômetros e dados de reanálise para o período de 15 anos. Os resultados mostraram que nas estações mais ao norte, ventos de nordeste e de leste são dominantes e de maior intensidade. Porém, na região de Mostardas, mais ao sul do Estado do Rio Grande do Sul, a frequência e a intensidade dos ventos de nordeste diminuem e as componentes de sudeste e sul apresentam maior influência.

Os principais afluentes localizam-se ao norte da lagoa e apresentam um padrão de descarga típico de regiões temperadas, com valores máximos do inverno para a primavera, e modulação em escalas de tempo interanuais e interdecadais para processos de ordem climática, conforme Marques e Möller (2008) e Marques *et al.* (2010a). A região Sul do Brasil possui 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 e contribuem para a variabilidade espacial da circulação dos ventos e da descarga dos afluentes na região, conforme Marques *et al.* (2009) e Reboita *et al.* (2010).

Além dos eventos sazonais e anuais, o clima da região possui ação de eventos interanuais do *El Niño* Oscilação Sul (ENOS), afetando diretamente os volumes fluviométricos dos afluentes da Lagoa dos Patos (Marques *et al.*, 2014). Em situações de *La Niña*, devido à circulação atmosférica, ocorrem períodos de seca no sul do país. Por outro lado, em episódios de *El Niño*, a circulação atmosférica favorece a precipitação sobre a região.

As tábuas de maré da Diretoria de Hidrografia e Navegação do Ministério da Marinha do Brasil apontam a amplitude média da maré astronômica no Rio Grande do Sul com valor aproximado de 0,5 m. Os efeitos das marés estão restritos à zona costeira e à região estuarina da Lagoa dos Patos, conforme Möller *et al.* (2001) e Fernandes *et al.* (2005). As trocas de marés entre a lagoa e a planície costeira são impulsionadas pelo gradiente de

pressão, resultante dos efeitos de (*set—up/set—down*) local, combinados com os ventos Nordeste—Sudoeste, que geram fluxos marítimos—terrestres (Möller *et al.*, 2001).

1.2 Motivação

A produção de petróleo no Brasil cresceu de 4 mil barris por dia (bpd) na época da criação da Petrobras para mais de 2,03 milhões de barris por dia (bpd) no final de 2018, devido aos avanços tecnológicos de perfuração e produção na plataforma continental Brasileira (Petrobras⁴). A maioria das reservas de petróleo Brasileiras estão na plataforma continental sob lâmina de água, que são classificadas em: águas rasas, entre 0 e 300 m, águas profundas, entre 300 e 1500 m, e águas ultra-profundas, acima de 1500 m (Petrobras⁵).

A responsável pela exploração das reservas Brasileiras é a Petrobras, empresa na qual o governo Brasileiro é o principal acionista e controlador, sendo esta pioneira em exploração de petróleo em lâmina de água, e aproximadamente 75% das reservas de petróleo Brasileiras estão nessas regiões (Petrobras⁶), onde existem um grande número de plataformas, com sistemas flutuantes, como as plataformas semi-submersíveis e os navios FPSO'S (*Floating Production Storage and Offloading*).

O impacto ambiental resultante do vazamento de óleo no oceano e ambiente costeiro não depende apenas do volume e composição físico-química do óleo despejado, mas também de uma série de variáveis biológicas, oceanográficas e meteorológicas, entre outras, envolvidas neste processo. Um estudo prévio de vazamento no local onde ocorre a exploração, produção, transporte e processamento deste óleo é decisivo na determinação de um plano emergencial para contenção do danos ambientais. Pois, caso haja algum acidente posteriormente, a identificação do vazamento de óleo em tempo hábil minimiza efeitos nocivos à biodiversidade, que os cenários de exploração, produção, transporte e processamento de óleo estão inseridos.

Os fatos apresentados motivam o estudo de um vazamento hipotético de óleo na região da Refinaria de Petróleo Riograndense (RPR), devido à sua localização no estuário da Lagoa dos Patos, com vazamentos hipotéticos de óleo despejados em quantidades representativas, para que posteriormente, caso ocorra um acidente, possa ser organizado um plano de contenção em tempo hábil a fim de minimizar os efeitos nocivos. A motivação deste trabalho advém da necessidade de preservação dos cenários, no qual a exploração, produção, processamento e transporte do petróleo brasileiro está contido, além da biodiversidade marinha, que se encontra no local de estudo.

1.3 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é aplicar um sistema de modelagem numérica de vazamentos de óleo na superfície da água de maneira que os resultados obtidos possam, posteriormente,

⁴<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/>

⁵<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/bacias/>

⁶<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/bacias/>

determinar as regiões prejudicadas.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Analisar o comportamento das variáveis hidrodinâmicas, para um período de 4 anos;
- Investigar o comportamento do vazamento de óleo considerando as principais variáveis hidrodinâmicas da região;
- Analisar o intemperismo do óleo durante as simulações dos cenários escolhidos;
- Localizar as regiões mais suscetíveis ao vazamento de óleo e identificar o tempo de contato das partículas de óleo na encosta da região.

2 Estado da arte para estudos de vazamento de óleo mundial

Nesta seção serão apresentados alguns trabalhos internacionais de incidentes de vazamento de óleo, reais ou hipotéticos, mostrando os diversos métodos de simulações numéricas para dispersão da pluma de óleo no ambiente marinho e suas principais diferenças.

Os modelos de vazamento de óleo estão sendo desenvolvidos desde o início da década de 1960 (Bozkurtoğlu, 2017). A finalidade dos modelos são: simular o deslocamento do óleo na superfície ou fundo marinho, a fim de desenvolver uma resposta à contaminação, assim possibilitando uma avaliação do impacto ambiental para a criação de um plano de contingência e até mesmo planejamento, com eficiência diferenciada. O deslocamento das partículas de óleo na superfície da água são um ponto significativo de pesquisa (Bozkurtoğlu, 2017), resultando em modelos bidimensionais e tridimensionais pelo processo de advecção, espalhamento, entre outros.

Elliott (1986) realizou experimentos nos quais liberava quantidades controladas de óleo e corante ao Sul do Mar do Norte. O autor observou a pluma de óleo durante 6 h após a liberação, possibilitando uma comparação dos resultados com o modelo numérico. O modelo numérico incluía o deslocamento lateral e vertical do óleo associado à maré meteorológica, o deslocamento vertical do óleo devido à deriva de Stokes, e o perfil logarítmico da velocidade do vento. O óleo foi modelado como distribuição de gotículas, cujas flutuações individuais dependiam do tamanho das gotículas e da dispersão na coluna de água. O autor verificou que a flutuabilidade das gotículas limita a profundidade através da qual o óleo pode se misturar, consequentemente o óleo se espalha de uma maneira que representa uma combinação dos processos de difusão e advecção. Os resultados numéricos mostraram que o maior eixo de uma mancha de óleo deve alongar linearmente com o tempo, enquanto a largura de uma pluma crescerá a $t^{0,5}$. O modelo previu corretamente a ocorrência de óleo mais espesso em direção à borda dianteira da pluma de óleo e o alinhamento das lâminas de óleo na direção do vento.

Al-Rabeh *et al.* (1989) descreveram um modelo estocástico equacionado para simular o destino e o transporte da pluma de óleo. O modelo consiste em um conjunto de algoritmos que descrevem os processos de intemperismo do óleo. Cada algoritmo foi desenvolvido separadamente e está vinculado a processos ambientais e físico-químicos. O modelo desenvolvido requer como entrada, o campo de velocidade de corrente, obtido de um modelo hidrodinâmico tridimensional na região de interesse. O modelo de destino e transporte da pluma de óleo foi utilizado para simular um vazamento hipotético na região de Abu Ali, no lado oeste do Golfo Árabe. Os resultados da simulação indicaram que o modelo pôde prever o destino e o transporte de manchas de óleo com excelente precisão.

Proctor *et al.* (1994) desenvolveram um modelo de previsão de marés e tempestades, capaz de prever a chegada de tempestade com aproximadamente 5 dias de antecedência. Após o vazamento de óleo em Mina Al Ahmadi, no Golfo, em 1991, um modelo de vazamento de óleo foi acoplado ao modelo de marés e ondas, fornecendo previsões do

movimento e espalhamento de óleo. O modelo de derrame 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 de superfície e da emulsificação de óleo foram incluídos no modelo. A validação dos cálculos do modelo foi gerada por comparação com imagens de satélite e os resultados do modelo de óleo foram comparados com levantamentos aéreos ao longo dos 32 dias de simulação, apresentando uma ampla concordância.

García-Martínez *et al.* (1999) propuseram um modelo numérico para estimar a trajetória das partículas de óleo. O método de Euler e Runge-Kutta de ordem quatro foram utilizados para calcular a trajetória das partículas de óleo, a fim de fornecer soluções adequadas em oceano aberto. Ambos algoritmos foram implementados no modelo *OilTrack*, no entanto, de acordo com os resultados, o método de Euler não pôde prever com precisão a trajetória das partículas de óleo em altas velocidades (não-uniformes), próximo a zonas costeiras ou regiões de descargas fluviais, pois introduz dispersão numérica levando à superestimação das áreas contaminadas pela mancha de óleo. Os métodos Runge-Kutta de ordem quatro apresentou-se computacionalmente mais eficiente que o método de Euler fornecendo uma boa previsão da trajetória da mancha de óleo. Os resultados do modelo foram comparados com dados reais obtidos no vazamento acidental de "Nissos Amorgos" no Golfo da Venezuela, em 1997. Os resultados de 32 dias de simulação do modelo de óleo foram comparados com levantamentos aéreos e apresentaram boa concordância.

Chao *et al.* (2001) desenvolveram um modelo bidimensional e tridimensional para prever o comportamento da trajetória e destino das partículas de óleo em águas rasas. No modelo bidimensional, a mancha de óleo é dividida em um número pequeno de *grids* e as propriedades de intemperismo do óleo em cada *grid* foram estudadas. O modelo tridimensional foi desenvolvido baseado na equação de transporte de massa, para modelar a distribuição de óleo na coluna de água. O acidente ocorrido no estreito de Singapura com o petroleiro *Evoikos*, em 1997, forneceu à base de dados para comparação com o modelo numérico, apresentando boa conformidade com os dados observados.

Taylor *et al.* (2003) apresentaram um modelo multifásico de derrame de óleo desenvolvido para simular as consequências de vazamentos acidentais de óleo no ambiente marinho. As variáveis de estado são computadas simultaneamente: a espessura de óleo na superfície da água, concentração das fases de óleo dissolvido, óleo emulsionado na coluna de água, e a concentração de fases de óleo dissolvido nos sedimentos de fundo. Os autores aplicaram uma abordagem Euleriana em todo o modelo. A espessura da mancha de óleo foi calculada usando as equações de Navier-Stokes e para o transporte das fases de óleo na coluna de água foi empregada a equação de advecção-difusão. De acordo com os resultados, o modelo é vantajoso para previsões de curtos e longos períodos de tempo na modelagem dinâmica de óleo derramado em ambientes marinhos.

Papadimitrakakis *et al.* (2006) apresentaram um modelo matemático determinístico, que simula a dinâmica de derrame de óleo, dependente do tempo. O modelo resolveu um conjunto completo de equações diferenciais parciais que governam o fluxo transiente, bifásico, turbulento e fenômenos de transferência de calor/massa. O modelo foi usado para prever as consequências de vazamentos hipotéticos de óleo na região turística próximo à ilha de Lesbos, na Grécia. O modelo gerou um campo hidrodinâmico tridimensional, sob a influência de forças atmosféricas e/ou outras forças externas, por sua vez, simulou um derrame hipotético de óleo no mar. Este modelo incorporou alguns mecanismos de

intemperismo para determinar o destino do vazamento de óleo e os resultados obtidos foram que a previsão do comportamento do óleo em ambientes costeiros depende do tempo de vazamento.

Jorda *et al.* (2007) apresentaram um sistema de previsão de derrames de óleo, que o tempo de resposta do modelo é de 6 a 12 h. Este sistema incluiu uma avaliação do impacto de erros dos forçantes em suas previsões. O sistema é formado por vários módulos independentes que fornecem previsões de ventos, correntes e ondas para um módulo de vazamento de óleo, que prevê a evolução do derrame. A ideia dos autores é transpor uma atenção especial a uma caracterização realística dos erros relacionados às forçantes. O procedimento é automatizado, os dados observados são vinculados, em tempo quase real ao módulo de previsão numérica que prevê o campo de corrente. No caso da ocorrência de um vazamento de óleo, um módulo de intemperismo é incluído para avaliar o comportamento do poluente. Os resultados sugerem que os erros associados ao vento são o principal fator limitante para a qualidade das previsões de vazamento de óleo.

Wang *et al.* (2008) desenvolveram um modelo de ondas não—estruturado de volumes finitos, que oferece grande flexibilidade para modelar o fluxo em ambientes com geometria complexa. Comparações detalhadas de simulações com soluções analíticas e simulações numéricas feitas com o modelo de diferenças finitas *Regional Ocean Modeling System* (ROMS) foi aplicado a um caso de vazamento de óleo em uma plataforma continental idealizada, com um litoral curvado, impulsionado pela descarga de água doce. Em contraste com os resultados do ROMS, os parâmetros previstos pelo módulo de fluxo atual mostraram uma boa concordância com as soluções analíticas, independentemente da fase e da amplitude de onda. As simulações numéricas mostraram que a trajetória do óleo depende tanto da resolução horizontal quanto da precisão da correspondência com a geometria. Também foi observado que uma resolução vertical mais precisa é desejada à medida que a resolução horizontal aumenta.

Guo e Wang (2009) apresentaram um modelo de rastreamento de partículas híbridas por aproximação Euler-Lagrange, para a simulação de derrames de óleo em águas rasas. O modelo de rastreamento de partículas híbridas é acoplado ao modelo hidrodinâmico de superfície livre *Princeton Ocean Model* (POM) e ao modelo de ondas de terceira geração *Simulating Waves Nearshore* (SWAN). O modelo de óleo considerou os processos de intemperismo e deposição de sedimentos no litoral, e com estes processos o modelo previu o movimento horizontal de óleo, a distribuição vertical das partículas de óleo, a concentração de óleo na coluna de água, e o balanço de massa do óleo derramado. Um volume hipotético de óleo foi derramado próximo às águas costeiras de Dalian, província de Liaoning ao sul da China. Comparando as imagens de satélite das manchas de óleo na superfície com os resultados numéricos obtidos na modelagem da região de Dalian, o modelo indicou uma precisão razoável.

Abascal *et al.* (2010) apresentaram um modelo estatístico com a finalidade de obter respostas mediante um vazamento de óleo. Este modelo foi desenvolvido e validado por meio de observações reais de manchas de óleo relatadas durante o acidente de Prestige. O modelo de óleo baseia-se na análise de cenários hipotéticos de vazamentos de óleo, simulados por meio de um modelo de transporte Lagrangeano. Para realizarem as simulações, foram usados dados de reanálise de ventos, ondas e correntes para 44 anos. O número de cenários necessários para obter resultados estatisticamente confiáveis foi investigado, constatando que 200 cenários fornecem um equilíbrio ideal entre a precisão

dos resultados e o esforço computacional. O acordo encontrado entre os dados reais e numéricos mostraram que o modelo estatístico de vazamento de óleo desenvolvido é uma ferramenta valiosa para apoiar o planejamento de resposta à acidentes.

Aghajanloo e Pirooz (2011) utilizaram um modelo numérico bidimensional para simular o espalhamento da mancha de óleo usando a abordagem de volumes finitos e um modelo de intemperismo de óleo (OWM—*oil weathering model*), para considerar os processos de transferência de massa. Foram calculadas as alterações das propriedades do óleo durante processos de intemperismo. Como a deficiência de dados é o problema mais importante na preparação dos OWMs, as medições experimentais e os resultados das equações semi-empíricas foram utilizados para avaliar a validação do modelo matemático. Os resultados indicaram que as taxas de perda de massa de óleo dependem significativamente do tipo de óleo (propriedades químicas e físicas), das condições climáticas (velocidade e direção do vento, ondas e temperatura) e das propriedades da água do mar (salinidade e temperatura).

Cheng *et al.* (2011) apresentaram uma simulação da trajetória do vazamento de óleo, lançado através de um oleoduto, no Golfo do México, utilizando o modelo *General NOAA Operational Modeling Environment* (GNOME). Além disso, o *Texture-Classifying Neural Network Algorithm* (TCNNA) foi usado para delimitar manchas de óleo no oceano observadas no Radar de Abertura Sintética (SAR). Durante a simulação, as correntes oceânicas de saídas obtidas do *Navy Coastal Ocean Model* (NCOM) e os dados do vento de superfície medidos por uma boia do *National Data Buoy Center* (NDBC) foram usados para auxiliar o modelo GNOME. Os resultados mostraram um bom acordo entre a trajetória simulada do derrame de óleo e as observações síncronas do radar europeu *Advanced Synthetic Aperture Radar* (ENVISAT ASAR) e as imagens japonesas do *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS) e *Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR). Em comparação com outros fatores meteorológicos e oceanográficos, os campos de correntes oceânicas desempenham o papel mais importante na condução do movimento do derrame de óleo. Para obter resultados de simulação mais precisos do modelo GNOME, os efeitos da incerteza nas correntes oceânicas e do coeficiente de difusão foram analisados. Depois de considerar os fatores de incerteza, chegou-se a conclusão que as áreas poluídas simuladas com o modelo GNOME concordaram com as medições.

Cucco *et al.* (2012) utilizaram o modelo *Bonifacio Oil-spill Operational Model* (BOOM) para prever a dispersão de derrames de óleo. O modelo BOOM é uma ferramenta numérica integrada, cujo núcleo é organizado num conjunto de modelos numéricos de alta resolução totalmente acoplados, baseado no método dos elementos finitos. O modelo inclui um módulo hidrodinâmico-3D e um módulo de ondas geradas por vento (SHYFEM3D-WWM), um modelo de trajetória lagrangeana e um módulo para reproduzir os principais processos de intemperismo que afetam a mancha de óleo. Os autores aplicaram os modelos para auxiliar na previsão da dispersão de derrames de óleo na área costeira do Estreito de Bonifácio, entre a Córsega e a Sardenha. Um conjunto de dados experimentais, incluindo as medições de corrente foram usados para avaliar a precisão deste sistema. Uma comparação entre os resultados da simulação e os dados experimentais revelou que tanto a circulação quanto os processos de transporte de superfície são reproduzidos com precisão pelo modelo.

Dominicis *et al.* (2013) utilizaram o modelo MEDSLIK-II para simular o transporte e os processos de transformação de óleos. O modelo utiliza dados de correntes, ventos e

dados de sensoriamento remoto para inicialização. Os resultados foram validados usando flutuadores de superfície, imagens de radar de abertura sintética e imagens de satélite óptico em diferentes regiões do Mar Mediterrâneo. Os autores verificaram que a habilidade de previsão das trajetórias lagrangeanas depende em grande parte da precisão das correntes oceânicas Eulerianas, pois os modelos operacionais fornecem estimativas úteis de correntes, mas é necessária alta frequência, alta resolução espacial, e informações da velocidade de deriva de Stokes, especialmente para águas rasas.

Janeiro *et al.* (2008) apresentaram um método de resposta na administração aos derrames de óleo no arquipélago da Toscana, através de modelagem operacional. Os modelos tridimensionais de hidrodinâmica, turbulência e transporte de óleo foram acoplados ao mesmo sistema, compartilhando o mesmo código, trocando informações em tempo real e melhorando sua capacidade de reproduzir corretamente o derrame. Os resultados obtidos destacaram o bom desempenho do sistema e sua capacidade de ser aplicada para previsões de derrames de óleo.

Kim *et al.* (2014) investigaram o efeito de deriva do vento, para o acidente “Hebei Spirit”, sob condições de marés. Os autores descobriram que o fator de deriva ideal é de primeira ordem, linearmente proporcional à velocidade do vento. Assim propuseram uma equação empírica modificada e usaram esta equação para recalcular o movimento de manchas de óleo. O novo modelo melhorou a precisão em 9%, sob forte velocidade de vento e condições de maré alta, em comparação ao modelo convencional.

Liu e Sheng (2014) apresentaram um modelo de derrame de óleo *Storm Surge Modeling System* (CH3D) acoplado ao modelo de ondas SWAN, para simular o transporte de óleo. Foram simulados cenários hipotéticos de derrame de óleo próximo à planície costeira da Virgínia, durante o período de percurso do furacão Isabel e Irene, para avaliar o papel das ondas de tempestade durante o derrame de óleo. De acordo com os resultados as ondas aumentam significativamente a dispersão de derramamento de óleo.

Mohan *et al.* (2014) apresentaram um modelo hidrodinâmico que foi calibrado usando o nível médio da água, nos limites costeiros de Chennai, na planície leste da Índia. O modelo foi utilizado para gerar o padrão de circulação e a trajetória mensal de derrames de óleo. O derrame de óleo foi simulado por 48 h de duração para cada mês e estação do ano. A simulação do modelo revelou que o óleo derramado tinha tendência a se mover em direção ao sudoeste para alcançar o limite costeiro arenoso, em menos de 4 h, após o derrame no oceano durante a monção de nordeste.

Alves *et al.* (2015) propuseram um modelo de vazamentos de óleo combinando bancos de dados batimétricos, meteorológicos, oceanográficos e geomorfológicos para modelar uma série de acidentes hipotéticos no mar Mediterrâneo Oriental. Os dados de velocidades de corrente e temperatura, entre outros, fornecidos pela *Cyprus Coastal Ocean Forecasting and Observing System* (CYCOFOS) foram utilizados no modelo de previsão de vazamento de óleo MEDSLIK. As simulações foram compiladas para as quatro estações de cada ano, no período de 2010 a 2013. O volume total de óleo liberado foi de 55,8 mil barris e um total de 104 simulações de derrame de óleo foram calculadas para 11 locais diferentes na Bacia Levantine, mostrando a chegada do óleo ao litoral do Cyprus, entre 4 e 7 dias nas condições de verão. Nestas condições, a trajetória do óleo foi controlada pelos ventos predominantes e pela turbulência costeira.

Mishra e Kumar (2015) modelaram e analisaram os efeitos das propriedades iniciais do óleo e seu comportamento após um vazamento. Para este propósito foram utilizados

três óleos brutos diferentes: pesado, médio e leve. O método de Runge-Kutta de ordem quatro foi usado para resolver o espalhamento, evaporação, dissolução e emulsificação simultaneamente. Os resultados indicaram que o óleo leve e intermediário absorvem mais água do que o óleo pesado com o passar do tempo.

García-Garrido *et al.* (2016) apresentaram modelagem de sistemas dinâmicos, a fim de obter uma resposta em tempo real, para vazamento de óleo em águas rasas. Os autores utilizaram a interação de imagens SAR com do modelo GNOME, para encontrar padrões comuns entre dados coletados e dados simulados. O uso combinado de ferramentas de sistemas dinâmicos e técnicas de sensoriamento remoto mostraram-se instrumentos eficazes e podem contribuir para os protocolos de tomada de decisão, serviços de emergência e gerenciamento em tempo real, para derrames de óleo. Os resultados das interações mostraram-se eficientes para uma situação recente envolvendo o naufrágio do navio de pesca *Oleg Naydenov* ocorrido na Espanha, próximo às Ilhas Canárias, em 2015.

Liu *et al.* (2016) desenvolveram um modelo tridimensional de propagação de óleo, em lâmina de água. Este modelo foi aplicado para vazamentos hipotéticos de óleo na região do estreito de Bohai, no mar Chinês. O modelo proposto foi executado 90 vezes, com duração 15 dias, para simular os processos de propagação e intemperismo do óleo, para cada um dos quatro locais de potencial derrame de óleo, que representam locais de potencial de colisão de navios. A estatística das simulações mostraram que os derrames no inverno eram severos, ao contrário do verão.

Asl *et al.* (2017) propuseram um método para estimar o tempo de permanência de derrames de óleo na superfície e assim determinar a importância das correntes na trajetória e destino do óleo. O derrame de óleo cru foi simulado na região *Green Canyon* 600, no Golfo do México. Um algoritmo *Texture Classifying Neural Network* foi usado para delinear polígonos para manchas de óleo de 41 imagens de SAR. As trajetórias das partículas de óleo foram investigadas empregando um modelo de rastreamento Lagrangeano. Os resultados indicaram que as correntes superficiais são de fato responsáveis pelo estiramento das manchas de óleo e que os ventos de superfície são os principais responsáveis pelo desaparecimento das manchas de óleo da superfície do mar. Sob condições de vento fraco e corrente forte, vazamentos naturais podem produzir manchas de óleo maiores que 20 km e persistir por um período de 48 h.

Bozkurtoglu (2017) apresentou um modelo de trajetória de derrame de óleo, com a finalidade investigar os riscos de potenciais acidentes na região de Bosphorus, na Turquia, pois é uma rota marítima internacional entre o Mar Negro e o Mar de Mármara, navegada por navios petroleiros. O modelo de trajetória de derrames de óleo proposto combina os dados de velocidade de corrente obtidos de um modelo hidrodinâmico calibrado com os processos de advecção, espalhamento, e evaporação. As simulações indicaram que o óleo derramado atinge o litoral, em ambos os lados do Bosphorus, em menos de 4 h após o derrame.

Li (2017) desenvolveram um modelo matemático transiente-3D para estimar a taxa de liberação de óleo e simular a dispersão. O método de Euler foi usado para estimar a taxa de liberação de óleo no ambiente marinho, enquanto o método Euler-Lagrange é empregado para rastrear a trajetória das gotículas de óleo. O modelo explica o efeito quantitativo da taxa de liberação de óleo, densidade do óleo, velocidade de dispersão, profundidade da água e posição de vazamento de óleo. Os resultados da avaliação fornecem uma boa orientação para a detectar a posição do vazamento em tempo hábil.

Amir-Heidari e Raie (2018) apresentaram uma avaliação probabilística de risco de vazamento de óleo em poços na região *offshore*. O estudo foi realizado no Golfo Pérsico para quantificar o risco representado por 357 poços. Foram definidos cenários hipotéticos de vazamento de diferentes volumes, e simulados usando um modelo de rastreamento de partículas Lagrangeana. Assim, o resultado das simulações foram processados estatisticamente para gerar os mapas de riscos ambientais. O resultado da pesquisa esclareceu a importância do padrão dos elementos de forçamento ambiental e a avaliação do risco de vazamento de óleo.

Wu e Xu (2018) examinaram a influência da turbulência induzida pela chuva no tamanho das gotículas de óleo e na dispersão de vazamento de óleo no Canal de Douglas, na Colúmbia Britânica, Canadá, usando dados atmosféricos horários entre 2011 a 2013. Foram examinados três tipos de óleos: um óleo leve (*Cold Lake Diluent*—CLD) e dois óleos pesados (*Cold Lake Blent*—CLB e *Access Western Blent*—AWB). Os autores descobriram que a taxa de dissipação de energia turbulenta produzida pelas chuvas é comparável a taxa de energia produzida pela quebra de onda induzida pelo vento na região de estudo. Com o uso de dispersantes químicos, os resultados indicaram que uma chuva forte (precipitação $> 20 \text{ mm h}^{-1}$) pode produzir o tamanho máximo de $300 \mu\text{m}$ para óleo leve e $1000 \mu\text{m}$ para óleo pesados, e pode dispersar o óleo leve com fração de 22% a 45%, e óleos pesados de 8 a 13%, respectivamente.

2.1 Estado da arte para estudos de vazamentos de óleo no Brasil

Nesta seção serão apresentados alguns trabalhos nacionais de incidentes de vazamento de óleo, reais ou hipotéticos, mostrando os diversos métodos de simulações numéricas para dispersão da pluma de óleo no ambiente marinho e costeiro brasileiro e suas principais diferenças. Embora existam vários trabalhos de vazamentos de óleo na região do litoral brasileiro apenas alguns poucos são de domínio público. Os demais trabalhos de modelagem numérica pertencem a empresas privadas brasileiras e estrangeiras e os resultados de simulações e modelos utilizados não estão divulgados e são abertos ao público somente quando o campo de petróleo é abandonado, devido à inviabilidade econômica.

Pereira (2005) apresentou um estudo detalhado da morfodinâmica dos diferentes sistemas praias, agregando a permeabilidade e variáveis geomorfológicas, na análise da vulnerabilidade costeira, frente a eventuais derrames de óleo. A vulnerabilidade foi determinada através do uso de ferramentas de geoprocessamento integrando variáveis geomorfológicas com áreas urbanizadas. A integração das variáveis geomorfológicas indicou as áreas de maior e menor vulnerabilidade à eventuais derrames de óleo, respectivamente, a área da região dos Concheiros e as praias adjacentes ao estuário da Lagoa dos Patos. A integração desses resultados com as áreas urbanas mudou esse panorama inicial, conferindo ao litoral norte a maior vulnerabilidade. Os mapas de vulnerabilidade gerados, podem ser interpretados, como mapas de prioridades de medidas emergenciais em caso de eventuais derrames de óleo, tornando-se ferramentas fundamentais na elaboração e execução de planos de contingência.

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. Para reproduzir a hidrodinâmica da região foi utilizado o modelo MOHID e para o derrame

de óleo o modelo ADIOS2. O modelo hidrodinâmico foi forçado com a descarga do rio Guaíba e ventos do banco de dados do NOAA. O deslocamento da pluma de óleo é controlado pela descarga, quando superior a $5.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, pois caso contrário, o vento atua como principal influenciador do deslocamento da pluma de óleo.

Janeiro *et al.* (2008) utilizaram um modelo Lagrangeano para simular um derrame de óleo hipotético no estuário da Lagoa dos Patos. Para reproduzir a hidrodinâmica da região de estudo foi utilizado o modelo MOHID. Os parâmetros hidrodinâmicos foram validados e usados para forçar o modelo de óleo, e os resultados mostraram que a hidrodinâmica do sistema é controlada principalmente pelo vento e pela descarga de água doce. A dispersão e a espessura da mancha de óleo no primeiro dia após o derrame é determinada pelo equilíbrio entre esses dois fatores. O fluxo de água doce controla a dispersão de óleo para descargas superiores a $5.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, enquanto o vento assume o controle para menores descargas.

Stringari *et al.* (2012) utilizaram um sistema de simulação numérica de óleo acoplado ao modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D, para criar um sistema operacional de previsão do comportamento de derrames de óleo na área de atuação da plataforma continental ao Sul do Brasil. Os resultados indicaram um deslocamento em torno de 9.5 km, com uma estimativa velocidade média em torno de 0.07 m s^{-1} , consistente com a circulação padrão média desta região. A área do óleo derramado aumentou uma ordem de grandeza após 32 h de simulação. A evaporação e a emulsificação contribuíram para um rápido aumento da massa específica do óleo de 980 kg m^{-3} para 1015 kg m^{-3} , sugerindo que uma parcela do óleo derramado começou a se dispersar.

Stringari (2014) utilizando a metodologia de Stringari *et al.* (2012), com abordagem na região da desembocadura do canal do porto de Rio Grande, observaram que o efeito local do vento é o principal influenciador no deslocamento da mancha de óleo. Este efeito responde por mais de 60% 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.

Marques *et al.* (2017) investigaram o derrame de óleo ocorrido na monoboia de transbordo de petróleo localizada paralelamente à praia de Tramandaí, no Rio Grande do Sul, em 2012. Os autores utilizaram o acoplamento do modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D e o modelo ECOS (*Easy Coupling Oil System*), e os resultados foram comparados com as observações do relatório de uma agência ambiental brasileira. Os resultados representaram a posição final, a extensão do derrame e o tempo necessário que a mancha de óleo demorou para atingir o litoral. Os ventos e as correntes foram as forças mais importantes no deslocamento do derrame de óleo, e as propriedades de emulsificação e evaporação foram importantes no processo de intemperismo do óleo.

Paiva *et al.* (2017) apresentaram um estudo de caso, onde utilizaram o software MOHID para simular a dispersão de óleo na região da Bacia de Campos, Brasil. Os resultados Lagrangeanos dos vazamentos de óleo foram confrontados com cenários *blowout* em diferentes condições de profundidade, sazonalidade (verão e inverno) e uso de dispersantes na fonte do vazamento. Os resultados da pesquisa reforçaram a importância da abordagem tridimensional para cenários de águas profundas e ultraprofundas, especialmente os casos, onde foram consideradas a injeção de dispersantes na fonte do vazamento.

2.2 Softwares utilizados para simulações de vazamentos de óleo

A maioria dos modelos numéricos possui uma estrutura básica que é essencialmente equacionada usando métodos Lagrangeanos para os processos de transporte (advecção—dispersão) e algoritmos individuais para os processos de destino da mancha de óleo. Entre os modelos pode-se citar:

- GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment) é a ferramenta de modelagem usada pela *Office of Response and Restoration's (OR and R) Emergency Response Division* para prever a trajetória que um poluente pode seguir na água, como um vazamento de óleo. O modelo é de livre acesso e pode ser facilmente adaptado à qualquer região de estudo (Zelenke *et al.*, 2012).
- OSCAR (*Oil Spill Contingency and Response Model*) foi desenvolvido pela empresa *Applied research, technology and innovation* (SINTEF) é utilizado no setor privado. O modelo é atualizado para permitir a especificação de óleo por múltiplos componentes separados ou pseudo-componentes, que são transportados por todos os compartimentos ambientais (Reed *et al.*, 2000).
- OILMAP (*Oil Spill Model and Response System*) desenvolvido pela *Applied Science Associates* (ASA) é um modelo 3D abrangente que rastreia vários componentes de hidrocarbonetos na superfície e no fundo da água. A primeira versão do OILMAP foi entregue há mais de 20 anos e agora é usada globalmente por empresas de petróleo nacional e internacional (Spaulding, 2017).
- OILMAP v7 sofreu grandes atualizações para incluir novos algoritmos, integrando anos de pesquisa aplicada e consolidando a experiência de eventos reais, como o vazamento de petróleo da *Deep Water Horizon* no Golfo do México. Os cientistas e pesquisadores da ASA incorporaram lições aprendidas e novas tecnologias na última geração do OILMAP.
- SIMAP (*Integrated Oil Spill Impact Model System*) desenvolvido pela ASA fornece previsões detalhadas da trajetória tridimensional do destino e efeitos biológicos, entre outros impactos, do óleo e dos combustíveis vazados (French-McCay, 2004).
- LTRANS (*Larval TRANSport model system*) é um modelo de rastreamento de partículas que é executado com as previsões armazenadas de um modelo hidrodinâmico 3D, especificamente o ROMS (*Regional Ocean Modeling System*). Embora o LTRANS tenha sido construído para simular larvas de ostras, pode ser facilmente adaptado para simular partículas passivas, como vazamento de óleo e outros organismos planctônicos (North *et al.*, 2008).

- OD3D (*Oil Drift 3-Dimensional numerical model system*) foi desenvolvido pelo *Norwegian Meteorological Institute Oil Spill Focast System* juntamente com a empresa SINTEF. O OD3D é baseado em rastreamento de partículas forçado pelo vento, ondas, correntes oceânicas e estratificação. A química do óleo depende da temperatura da água, velocidade do vento e da altura significativa das ondas (Broström *et al.*, 2011).
- ECOS (*Easy Copling Oil System*) vem sendo desenvolvido no Laboratório de Análise Numérica de Sistemas Dinâmicos (LANSD) desde 2010, e descreve o comportamento de deslocamento da pluma de óleo através do equacionamento Lagrangeano.

Para modelos de vazamento de óleo na superfície da água, as partículas são tratadas como uma porção de elementos Lagrangeanos (LE), que são rastreados no espaço—tempo, através do tamanho e deslocamento das gotículas de óleo. Os algoritmos que descrevem o deslocamento e o destino das partículas de óleo baseiam-se em princípios fundamentais subjacentes e são calibrados e/ou validados por observações laboratoriais e/ou de campo e estão minuciosamente revisados em Spaulding (2017) e Reed *et al.* (2000).

3 | Materiais e Métodos

A metodologia deste trabalho consiste na aplicação de modelagem numérica tridimensional e análise direta dos resultados obtidos com a utilização do sistema de modelagem numérica *open* TELEMAC—MASCARET¹. Neste trabalho foi utilizada a versão v6p3 do sistema TELEMAC. Este sistema de modelagem utiliza uma abordagem modular e, neste trabalho, foi utilizado o módulo hidrodinâmico tridimensional TELEMAC-3D. Estudos pioneiros da hidrodinâmica da Lagoa dos Patos com este sistema de modelagem foram realizados por Marques e Möller (2008), Marques *et al.* (2009), Marques *et al.* (2010b), Marques *et al.* (2010a), Marques (2012), Kirinus (2013), Barros *et al.* (2014) e Marques *et al.* (2014).

Na realização da simulação do transporte e destino das partículas de óleo foi utilizado o modelo numérico ECOS (*Easy Coupling Oil System*) desenvolvido no Laboratório de Análise Numérica e Sistemas Dinâmicos (LANSD), que foi utilizado na realização de diversos trabalhos, conforme: Stringari *et al.* (2012), Mello (2013), Stringari (2014), Marques *et al.* (2017), Monteiro *et al.* (2018) e Lopes *et al.* (2019).

As etapas da metodologia são apresentadas no fluxograma explicativo da Fig. 3.1. Primeiramente foi gerada uma malha computacional de elementos finitos no software Blue Kenue, com a finalidade de interpolar as variáveis hidrodinâmicas e de vazamento de óleo, para a região de estudo. Assim, ambos os modelos são inicializados com as condições iniciais e de contorno, em um esforço computacional que utiliza super-computadores para o processo de modelagem numérica.

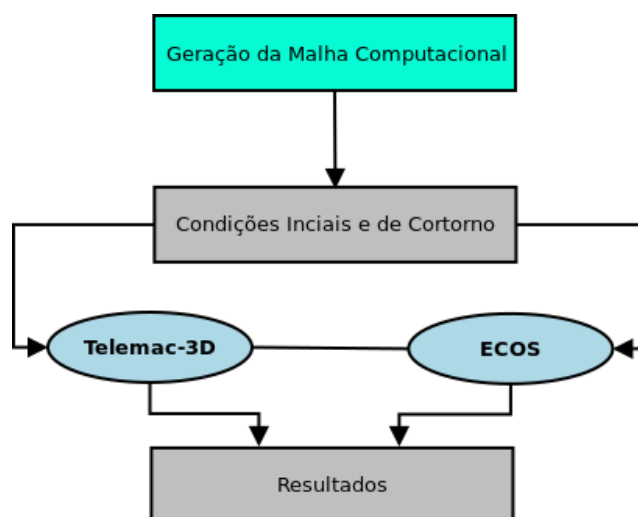


Figura 3.1: Fluxograma explicativo das etapas realizadas na metodologia, para a obtenção dos resultados.

¹<http://www.opentelemac.org>

3.1 Módulo Hidrodinâmico—TELEMAC-3D

O sistema Telemac é formado por um conjunto de módulos, em duas ou três dimensões, que são utilizados para estudos hidrodinâmicos, transporte de sedimentos em regiões costeiras e ondas geradas por ventos em regiões costeiras e oceânicas. O TELEMAC-3D é um módulo do sistema Telemac que resolve as equações de Navier—Stokes assumindo ou não condições de pressão hidrostática. O modelo considera a evolução da superfície livre como função do tempo, e utiliza as equações de advecção—difusão para a simulação de propriedades da água como a salinidade e temperatura (Hervouet, 2007).

O módulo TELEMAC-3D é usado para estudos relacionados à hidrodinâmica tridimensional de fluxos em superfície livre de rios, estuários, regiões costeiras e oceânicas. O TELEMAC-3D resolve as equações diferenciais operando em malhas de elementos finitos, com base triangular, para discretização espacial, e com discretização vertical, usando o sistema de coordenadas sigma, que acompanham os limites superficiais e de fundo (Hervouet, 2007).

O método de elementos finitos permite o controle da distribuição de elementos na malha computacional estabelecendo boa resolução em regiões costeiras com morfologia complexa, como o estuário da Lagoa dos Patos e a plataforma continental adjacente. Este método permite uma boa representação dos acentuados gradientes batimétricos, da discretização detalhada do estuário, e aplicação de refinamentos na malha computacional, assim otimizando os resultados e tempo computacional, conforme Kirinus (2013), Marques *et al.* (2017), Monteiro *et al.* (2018) e Lopes *et al.* (2019). Desta forma é possível calcular a elevação da superfície livre, componentes das velocidades de correntes e as concentrações dos traçadores para cada ponto do domínio computacional.

Os principais resultados obtidos para cada ponto da malha computacional são: velocidade nas três direções, a elevação da superfície livre e a concentração de quantidades transportadas (Hervouet, 2007).

3.1.1 Fundamentação Teórica do TELEMAC-3D

O equacionamento do modelo TELEMAC-3D foi elaborado por Jean—Michel Hervouet e colaboradores, que desenvolveram o sistema de modelagem hidrodinâmica em 1987, no Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia Elétrica Francesa (R&D—EDF). Informações detalhadas do equacionamento podem ser encontradas em Hervouet (2007) e Phan e Joly (2016). Porém à descrição das equações deste estudo advém de Hervouet (2007).

A equação da continuidade, Eq. (3.1), e as equações da conservação de quantidade de movimento, Eq. (3.2), Eq. (3.3) e Eq. (3.4), são obtidas das relações da dinâmica dos fluidos geofísicos e representadas no sistema cartesiano. No módulo tridimensional, o modelo TELEMAC-3D considera as aproximações hidrostáticas e de Boussinesq para resolver as equações de Navier—Stokes, além de solucionar o problema utilizando o método de elementos finitos para a discretização espacial, e considerar a discretização vertical em coordenadas sigma, acompanhando os limites superficiais e de fundo (Hervouet, 2007).

As equações podem ser descritas no sistema de coordenadas cartesiano, conforme a Eq. (3.1), Eq. (3.2), Eq. (3.3) e a Eq. (3.4).

- Equação da Continuidade:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

- Equação da conservação de quantidade de movimento:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta (U) + F_x \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \Delta (V) + F_y \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \nu \Delta (W) + F_z \quad (3.4)$$

onde, U , V e W são as componentes da velocidade, 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 a massa específica e F_x e F_y os termos fonte, respectivamente.

Aproximações e Linearização

A aproximação hidrostática considera a simplificação dos termos da velocidade vertical W , pois possui escalas pequenas quando comparada às velocidades de U e V , desprezando assim a difusão, termos fontes e a aceleração na vertical, conforme a Eq. (3.5).

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (3.5)$$

Portanto, os termos que consideram as variações da pressão hidrostática e da gravidade são considerados na equação vertical da quantidade movimento, de maneira que, a pressão em um ponto qualquer depende apenas da pressão atmosférica na superfície e do peso da coluna de água sobre o fluido. Desta forma, a massa específica é descrita através de uma soma entre a variação do parâmetro de massa específica $\Delta\rho$ e um valor de referência ρ_0 , conforme a Eq.3.6.

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho \quad (3.6)$$

Substituindo a Eq. (3.5) na Eq. (3.6) é obtido o resultado descrito na Eq. (3.7).

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_0 g \left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \right) \quad (3.7)$$

Considerando o fundo h e a altura da coluna de água como H . Assim, H pode ser descrito como a equação que controla a pressão, sobre uma porção de água numa profundidade qualquer, conforme a Eq.3.8.

$$p = p_{atm} + \rho_0 g (H - h) + \rho_0 g \int_h^H \frac{\Delta\rho}{\rho_0} dz \quad (3.8)$$

onde, p_{atm} representa o campo de pressão atmosférica, $\rho_0 g(H - h)$ representa o peso da coluna de água e $\rho_0 g \int_h^H \frac{\Delta\rho}{\rho_0} dz$ representa a distribuição de massa na extensão da coluna de água para o campo de pressão.

Aproximação de Boussinesq

A aproximação de Boussinesq considera constante todas as propriedades do fluido, exceto a massa específica no termo fonte da equação de conservação da quantidade de movimento, quando acompanhada da aceleração da gravidade. Logo, pode-se expandir o gradiente de pressão em primeira ordem, assumindo a relação linear entre a massa específica e o gradiente de pressão, conforme a Eq. (3.9) e da Eq. (3.10).

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \cong -\frac{1}{\rho_0} \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right) \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.9)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \cong -\frac{1}{\rho_0} \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right) \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3.10)$$

onde, os termos $-\frac{1}{\rho_0} \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right) \frac{\partial p}{\partial x}$ e $-\frac{1}{\rho_0} \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right) \frac{\partial p}{\partial y}$ representam os gradientes de pressão atmosférica que são incorporados no modelo como termos fonte.

Substituindo a Eq. (3.8) na Eq. (3.9) e Eq. (3.10) é obtida a Eq. (3.11) e Eq. (3.12).

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \cong -\frac{1}{\rho_0} \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right) \frac{\partial p_{atm}}{\partial x} - g \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right) \frac{\partial H}{\partial x} - g \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_h^H \frac{\Delta\rho}{\rho_0} dz \right) \quad (3.11)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \cong -\frac{1}{\rho_0} \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right) \frac{\partial p_{atm}}{\partial y} - g \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right) \frac{\partial H}{\partial y} - g \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_h^H \frac{\Delta\rho}{\rho_0} dz \right) \quad (3.12)$$

onde, os termos $g \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right) \frac{\partial H}{\partial x}$ e $g \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right) \frac{\partial H}{\partial y}$ representam variações barotrópicas. Estas variações são resultados do gradiente de pressão, onde o principal fator é a elevação da superfície livre.

Os termos $g \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_h^H \frac{\Delta\rho}{\rho_0} dz \right)$ e $g \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_h^H \frac{\Delta\rho}{\rho_0} dz \right)$ representam as variações baroclínicas, que consistem na variação da massa específica, devido às alterações no campo de temperatura, salinidade e sedimentos em suspensão.

Termos Fonte das Equações de Quantidade de Movimento

Os principais termos fonte utilizados no TELEMAC-3D são a fricção com o fundo, a tensão de cisalhamento do vento na superfície livre e as trocas de calor com a atmosfera.

- Fricção com o fundo

A tensão de cisalhamento é caracterizada pela ação do fundo marinho em relação à velocidade de corrente. Existem várias equações para descreverem a tensão de cisalhamento,

porém todas as equações oferecem apenas uma estimativa desta tensão fundamentada no conhecimento da rugosidade do fundo oceânico e do fluxo na vizinhança da barreira sólida. A tensão de cisalhamento é equacionada em relação ao vetor normal $\vec{n}$, conforme a Eq. (3.13).

$$\vec{\tau}_b = -\rho v \frac{\partial \vec{V}}{\partial n} \quad (3.13)$$

O conhecimento da tensão de cisalhamento é possível a partir da compreensão do comportamento de fluxo. Modelos de turbulência podem fornecer uma estimativa fundamentada no conhecimento da velocidade de corrente próximo ao fundo, conforme a Eq. (3.14).

$$\vec{\tau}_b = -\frac{1}{2} \rho C_f \vec{V} \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3.14)$$

onde, C_f representa o coeficiente de fricção.

A Eq. (3.14) determina a tensão de cisalhamento obtida longe de uma barreira sólida. Juntando a Eq. (3.13) e Eq. (3.14), pode ser obtida a Eq. (3.15).

$$v \frac{\partial \vec{V}}{\partial n} = -\frac{1}{2} C_f \vec{V} \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3.15)$$

onde, a relação $\frac{\partial \vec{V}}{\partial n}$ representa a variação da tensão de cisalhamento. A relação de tensão $\frac{\partial \vec{V}}{\partial n}$ é obtida no equacionamento variacional dos termos de difusão em elementos finitos.

Vários modelos de turbulência determinam o coeficiente de fricção C_f . Porém, neste trabalho será utilizada a formulação de Manning, conforme a Eq. (3.16).

$$C_f = \frac{2gm^2}{h^{1/3}} \quad (3.16)$$

onde, m é o coeficiente de Manning e h é a profundidade local.

- Influência do vento

A influência dos ventos é considerada no modelo numérico como uma condição bidimensional no contorno superficial. A tensão de cisalhamento superficial gerada pelo vento é descrita na Eq. (3.17).

$$v \frac{\partial \vec{v}}{\partial n} = \alpha \frac{\rho_{ar}}{\rho} \vec{V}_w |\vec{V}_w| \quad (3.17)$$

onde, a relação $v \frac{\partial \vec{v}}{\partial n}$ representa o gradiente de velocidade horizontal na superfície livre, α o coeficiente de influência do vento, ρ_{ar} a massa específica do ar e os vetores $\vec{V}_w$ e $|\vec{V}_w|$ representam a intensidade e o módulo da intensidade do vento, respectivamente. A variável ρ_{ar} é definida como $\rho_{ar} = 1,29 \text{ kg m}^{-3}$.

A intensidade do campo gerado pelos ventos variam no tempo e espaço, e depende das condições iniciais e de contorno. A Eq. (3.18) descreve o cálculo do coeficiente de influência do vento.

$$a_{\text{vento}} = \begin{cases} 0.656 \times 10^{-3} & \text{se } |\vec{X}| \leq 5 \text{ m s}^{-1} \\ (-0.12 + 0.137|\vec{X}|) \times 10^{-3} & \text{se } 5 \text{ m s}^{-1} \leq |\vec{X}| \leq 19.22 \text{ m s}^{-1} \\ 2.513 \times 10^{-3} & \text{se } |\vec{X}| \geq 19.22 \text{ m s}^{-1} \end{cases} \quad (3.18)$$

A influência do vento é um fenômeno complexo dependente da rugosidade da superfície livre, intensidade do vento e da distância na qual a observação é executada a partir da superfície livre.

- Força de Coriolis

A força de Coriolis surge devido ao movimento de rotação da Terra ao redor do seu eixo. Esta força é somada às equações do movimento em referenciais inerciais na forma de um termo fonte. A aceleração de Coriolis numa latitude θ é representada pela Eq. (3.19) e Eq. (3.20), para as componentes de velocidade u e v .

$$f_v = 2\omega \cdot v \cdot \sin\theta \quad (3.19)$$

$$f_u = 2\omega \cdot u \cdot \sin\theta \quad (3.20)$$

onde, a relação $\omega = \frac{2\pi}{86164}$ representa a velocidade de rotação da terra, π o período denotado por um dia sideral terrestre (Hervouet, 2007).

- Trocas de calor com a atmosfera

As trocas de calor do oceano com a atmosfera são proporcionais às diferenças de temperatura do ar e da água. A potência térmica liberada pela atmosfera P por unidade de área é diretamente proporcional a $(T - T_{ar})$. O fluxo de energia entre as interfaces é calculado na Eq. (3.21).

$$P = A(T - T_{ar}) \quad (3.21)$$

onde, A representa o coeficiente de troca de calor, T temperatura da água e T_{ar} temperatura do ar, respectivamente.

Porém, o TELEMAC-3D utiliza a Eq. (3.22) para representar as trocas de calor na atmosfera.

$$v_t \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{A}{\rho C_p} (T - T_{ar}) \quad (3.22)$$

onde, A é calculado de acordo com a Eq. (3.23).

$$A = (4,48 + 0,049T) + 6,0645(1 + V_w)(1,12 + 0,018T + 0,00158T^2) \quad (3.23)$$

3.1.2 Equação de Estado da Água do Mar

O modelo TELEMAT-3D considera as variações no campo de massa específica de acordo com a equação de estado da água do mar, que é uma função dos traçadores ativos considerados, conforme a Eq. (3.24).

$$\rho = \rho_0(1 - \alpha_t T(T - T_0)^2 + \alpha_s S) \quad (3.24)$$

onde, T_0 representa a temperatura de referência (4 °C), α_t o coeficiente de expansão térmica, α_s o coeficiente de contração salina e ρ_0 a massa específica de referência, respectivamente. A variável ρ_0 é definida como $\rho_0 = 1.025 \text{ kg m}^{-3}$.

3.1.3 Traçadores

O traçador é qualquer substância ou partícula introduzida no ambiente marinho, para acompanhar sua trajetória juntamente com a massa de água. São classificados em dois grupos, ativos e passivos. Os ativos alteram a massa específica da água do mar e os passivos não alteram a massa específica.

O modelo TELEMAT-3D considera traçadores ativos e passivos. Entre os traçadores ativos utilizados pelo modelo encontram-se a temperatura e a salinidade. O equacionamento de evolução dos traçadores é descrito na Eq. (3.25).

$$\begin{aligned} & \frac{\partial T_r}{\partial t} + U \frac{\partial T_r}{\partial x} + V \frac{\partial T_r}{\partial y} + W \frac{\partial T_r}{\partial z} = \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{T_r} \frac{\partial T_r}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{T_r} \frac{\partial T_r}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{T_r} \frac{\partial T_r}{\partial z} \right) + Q \end{aligned} \quad (3.25)$$

- Temperatura

A quantidade de calor de um corpo é equacionada como $\rho C_p T$ e a característica do fluxo de calor dos elementos é descrita na Eq. (3.26).

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} = -\nabla \cdot (\vec{V} \rho C_p T) \quad (3.26)$$

onde, C_p representa o calor específico da água e T a temperatura, respectivamente.

Porém, existem as trocas de calor devido aos processos moleculares e o gradiente de temperatura. Considerando o coeficiente de difusão de calor k_{dc} constante, obtêm-se a Eq. (3.27).

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V} \rho C_p T) = k_{dc} \nabla^2 \rho C_p T \quad (3.27)$$

Assumindo que a massa específica e o calor específico da água são constantes a Eq. 3.27 é reescrita na Eq. (3.28).

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla T \cdot \vec{V} = \kappa \nabla^2 T \quad (3.28)$$

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

- Salinidade

A quantidade de sal de um corpo é equacionada como ρS e o fluxo de sal em um elemento de volume constante é conservado, assim a salinidade pode ser representada pela Eq. (3.29).

$$\frac{\partial \rho S}{\partial t} = -\nabla \vec{V} \rho S \quad (3.29)$$

onde, S representa a salinidade, respectivamente.

Na Eq.3.29 a relação $\frac{\partial \rho S}{\partial t}$ representa a variação local da salinidade no tempo e a relação $-\nabla \vec{V} \rho S$ representa a advecção pelas faces do elemento, onde a variação interna é constante.

O fluxo de salinidade no elemento por processos difusivos devem ser considerados no equacionamento, assim o coeficiente de difusão salina é descrito na Eq. (3.30).

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \nabla S \vec{V} = k_{ds} \nabla^2 S \quad (3.30)$$

A Eq. (3.30) representa a conservação de salinidade para o elemento de volume constante, onde k_{ds} é o coeficiente de difusão salina turbulento.

3.1.4 Modelo de Turbulência

As simulações na embocadura de estuários e plataformas continentais possuem o número de Reynolds excessivamente grande e correspondem a escoamentos turbulentos. Desta forma o TELEMAC-3D oferece ao usuário várias opções para a modelagem da turbulência vertical e horizontal, que são aplicados aos cálculos das velocidades e dos traçadores.

Neste trabalho foi utilizado o modelo $k-\epsilon$ que resulta do acoplamento da solução das equações do balanço para K (energia turbulenta na Eq. (3.31) e para ϵ (dissipação turbulenta na Eq.3.32). A aplicação do modelo $k-\epsilon$ requer o uso da malha computacional bidimensional mais refinada do que as malhas em que os outros modelos de turbulência trabalham, aumentando o tempo computacional.

O modelo de turbulência é representado pelo seguinte equacionamento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} + W \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) \\ + P - G - \epsilon \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + W \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) \\ + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} [P + (1 - C_{3\epsilon})G] - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (3.32)$$

onde, $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ representa a energia cinética turbulenta do fluido e $\epsilon = \nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}$ representa a dissipação da energia cinética turbulenta.

A variável P representa a energia gerada por turbulência, que é calculada de acordo com a Eq. (3.33), G representa o termo fonte devido às forças gravitacionais e é calculado de acordo com a Eq. (3.34), sendo Pr_t o número de Prandtl e ν_T verifica a igualdade: $\nu_T = C_\eta \frac{k^2}{\epsilon}$. Os valores C_η , Pr_t , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$, σ_k e σ_ϵ são constantes do modelo $k-\epsilon$. A energia gerada por turbulência P e o termo fonte G são calculados de acordo com a Eq. (3.33) e Eq. (3.34).

$$P = \nu_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (3.33)$$

$$G = - \frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (3.34)$$

Para maiores informações sobre o equacionamento do TELEMAC-3D e suas aplicações e/ou variações, consultar o livro, conforme Hervouet (2007) ou manual, conforme Phan e Joly (2016).

3.2 Processo de Mistura no Estuário

No estuário a intensidade da mistura depende da estabilidade vertical na interface das camadas estratificadas em movimento. O balanço entre a estratificação vertical e a mistura desempenha um papel crucial para dinâmica dos fluidos no estuário, pois se o gradiente vertical de densidade (salinidade) opõem-se as trocas de quantidade de movimento por turbulência, um cisalhamento de velocidade extra é necessário para causar a mistura (Dyer, 1991). Assim, a simulação tridimensional do sistema TELEMAC-3D oferece os dados necessários para estimar a intensidade de mistura e o grau de estratificação pelo número adimensional de Richardson (Ri) e Brunt-Väisälä (N^2).

3.2.1 Número de Richardson

A característica dos fluidos estratificados podem serem analisados pelo número de Richardson (Ri) que é a comparação entre a capacidade estabilizadora do gradiente vertical de densidade ($\frac{\partial \rho}{\partial z}$) e o cisalhamento de velocidade ($\frac{\partial u}{\partial z}$), onde é um bom indicador de turbulência, conforme a Eq. (3.35).

$$Ri = \frac{\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}}{(\frac{\partial u}{\partial z})^2} \quad (3.35)$$

onde, o sinal deste número adimensional depende da orientação do eixo vertical O_z no local orientado positivamente no sentido da aceleração da gravidade.

O número de Richardson foi desenvolvido para previsão de movimentos turbulentos na atmosfera, mas assumindo que ρ é a massa de água estuarina e utilizando a equação linear de estado da água do mar, conforme Eq. (3.36), o número de Richardson pode ser definido para o processo turbulento de mistura através da Eq. (3.37):

$$\rho = \rho_0(1 + \beta S) \quad (3.36)$$

$$Ri = \frac{g\beta \frac{\partial S}{\partial z}}{(\frac{\partial u}{\partial z})^2} \quad (3.37)$$

onde, $\frac{\rho}{\rho_0} \approx 1$. Considerando a orientação do eixo O_z verifica-se que os valores negativos do gradiente vertical de velocidade $\frac{\partial \rho}{\partial z} < 0$ ou salinidade $\frac{\partial S}{\partial z} < 0$, ou seja, valores crescentes de ρ ou S com a profundidade indicam estratificação estável de massa ($Ri > 0$). A transição do regime laminar para turbulento ocorre para $Ri = 0,25$ e para $Ri < 0,25$ a turbulência sobrepuja a estratificação de densidade gerando o processo de mistura vertical.

3.3 Brunt-Väisälä

A estabilidade da coluna de água pode ser testada considerando a troca de duas parcelas de fluido em diferentes níveis de estratificação. A estabilidade é calculada pela frequência Brunt-Väisälä (N^2) também conhecido como frequência de estabilidade. No estuário o N^2 pode ser determinado em termos dos perfis verticais de temperatura e salinidade, conforme a Eq. (3.38).

$$N^2(T, S) = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \approx (g \propto \frac{\partial T}{\partial z} - g\beta \frac{\partial S}{\partial z}) \quad (3.38)$$

onde,

$$N_T^2(T, S) = g \propto \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.39)$$

$$N_T^2(T, S) = N^2(T, S) - N_S^2(T, S) \quad (3.40)$$

$$\propto = -\rho^{-1} \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad (3.41)$$

$$\beta = -\rho^{-1} \frac{\partial \rho}{\partial S} \quad (3.42)$$

onde β é coeficiente de contração salina, $\propto$ é o coeficiente de expansão térmica g é a gravidade, ρ é a densidade, T é a temperatura, S é a salinidade e z é a profundidade. Por conveniência podemos simplificar a equação:

$$N_T^2(T, S) \longrightarrow N^2(T) \quad (3.43)$$

$$N_S^2(T, S) \longrightarrow N^2(S) \quad (3.44)$$

3.4 Modelo ECOS

O modelo ECOS encontra-se em estágio de desenvolvimento no Laboratório de Análise Numérica e Sistemas Dinâmicos² (LANSD) desde o ano de 2010. Este modelo possui registro no Instituto Nacional da Propriedade Industrial³ (INPI), sob o número BR 51201300013.

A evolução da estrutura do código do modelo ECOS pode ser verificada em diversos trabalhos: Stringari *et al.* (2012), Mello (2013), Stringari (2014), Marques *et al.* (2017), Monteiro *et al.* (2018) e Lopes *et al.* (2019). O maior detalhamento do código do modelo e seu funcionamento pode ser verificada em: Mello (2013) e Stringari (2014), pois nesta seção será apresentada de maneira resumida.

O vazamento hipotético de óleo é realizado na superfície da água, e os processos envolvidos no destino e transporte do óleo, e que são considerados neste trabalho são: dispersão, evaporação, emulsificação, conforme a Fig.3.2, pois os processos de dissolução, biodegradação, foto-oxidação e interação do óleo com os sedimentos, atualmente, não estão implementados no modelo.

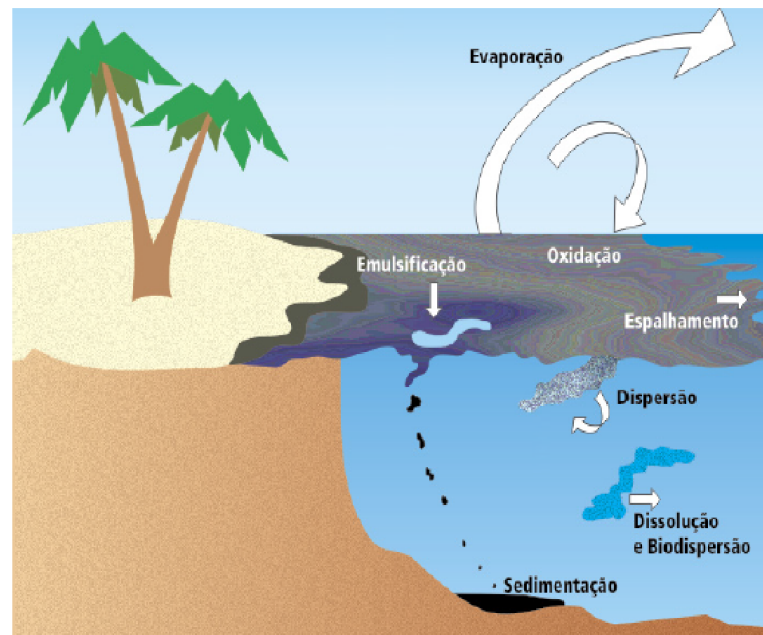


Figura 3.2: Processos que controlam a dinâmica óleo ao longo da coluna de água.

Fonte: Bollmann *et al.* (2010).

O modelo utiliza a estratégia baseada em simulação de partículas Lagrangeanas para representar o transporte e o destino do óleo na água. Isso permite que o modelo seja responsável pela liberação, transporte e o destino das partículas de óleo. As características físico—químicas do óleo também são rastreadas para estimar o balanço de massa do óleo.

²<http://lansd.furg.br>

³<http://www.inpi.gov.br/>

3.4.1 Fundamentação Teórica do Modelo ECOS

O transporte do óleo é modelado com base no equacionamento Lagrangeano, onde as velocidades de correntes são representadas pelos fluxos de larga escala, correntes induzidas pelo vento e dispersão turbulenta.

Os dados de entrada para as correntes de superfície são fornecidos pelo modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D. O transporte induzido pelo vento na superfície é modelado usando um algoritmo desenvolvido para estimar a porcentagem de deriva do óleo na superfície associada a influência do vento. A dispersão é modelada através da consideração de componentes randômicas de velocidade e os coeficientes de difusão especificados pelo usuário, conforme: Stringari *et al.* (2012), Mello (2013), Stringari (2014), Marques *et al.* (2017), Monteiro *et al.* (2018) e Lopes *et al.* (2019).

3.4.2 Advecção

A advecção é um processo físico, onde todas as propriedades contribuem para o transporte da pluma de óleo, exceto às propriedades físico-químicas. Neste trabalho, a advecção é realizada pela contribuição das correntes e do transporte superficial devido aos ventos. O transporte vertical associado à diferença de massa específica entre o óleo e a água também é considerado, conforme Lopes *et al.* (2019), Monteiro *et al.* (2018), Marques *et al.* (2017), Wang *et al.* (2005) e Reed *et al.* (2000). As componentes meridionais, zonais e verticais das velocidades advectivas são calculadas através da Eq.3.45, Eq.3.46 e Eq.3.47.

$$U_i = k_c U_c + k_w U_v \quad (3.45)$$

$$V_i = k_c V_c + k_w V_v \quad (3.46)$$

$$W_i = k_c W_c + w_i \quad (3.47)$$

onde, i representa o índice para cada partícula. As variáveis U_i , V_i e W_i são as componentes meridional, zonal e vertical da velocidade das partículas, U_c , V_c e W_c são as componentes de transporte pelas correntes. As variáveis U_v e V_v são as componentes de transporte pelo vento. As variáveis k_c e k_w são os coeficientes de transporte de corrente e de vento, respectivamente.

A velocidade de flutuabilidade de cada partícula W_i é calculada usando a Lei de Stokes modificada para vazamentos de óleo, proposta por French-McCay (2004), conforme a Eq.3.48.

$$w_i = \frac{d_i^2 g (1 - \frac{\rho_o}{\rho_w})}{18 \nu_w} \quad (3.48)$$

onde, d_i representa 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 e ν_w a viscosidade cinemática da água salgada, respectivamente. O modelo ECOS utiliza valores médios constantes para esses parâmetros, conforme: Marques *et al.* (2017).

O diâmetro da gotícula de óleo é obtido através da média aritmética, entre os máximos

e mínimos possíveis entre as gotículas, sendo calculado pela formulação proposta por Al-Rabeh *et al.* (1989), conforme a Eq.3.49.

$$d_i = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{12\sigma_w}{g(\rho_{ww} - \rho)}} + \frac{0.12\sigma_w^{3/5}\omega^{2/5}}{\rho_w^{3/5}g^{4/5}} \right] \quad (3.49)$$

onde, σ e w representam o período e altura de onda, que neste trabalho são considerados constantes e iguais a 10 s e 1.5 m, respectivamente.

3.4.3 Espalhamento

O espalhamento consiste na expansão horizontal da pluma de óleo devido às diferenças entre as tensões superficiais na interface da água com o óleo. Assim, o espalhamento representa o balanço entre forças como: a gravitacional, inercial, viscosa e as tensões superficiais. O cálculo para o processo de espalhamento é realizado em três etapas.

- A primeira etapa calcula os coeficientes de velocidade de espalhamento D_x e D_y para as direções x e y , utilizando o equacionamento empírico proposto por Fay (1969), conforme a Eq.3.50.

$$D_x = D_y = \frac{\pi k_2^2}{16} \left(\frac{\Delta g V^2}{v_w^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (3.50)$$

onde, V representa volume total de óleo derramado, v_w a viscosidade cinemática da água, t o tempo decorrido desde o início do derrame. O valor k_2 é uma constante empírica com valor de 0,725, calculada conforme a metodologia proposta por H. e Flores (1998).

- Os intervalos de flutuação $[-U_r, +U_r]$ e $[-V_r, +V_r]$ são calculados de acordo com a Eq.3.51 e Eq.3.52, conforme Leitão (1996).

$$U_r = \sqrt{\frac{2D_x}{\Delta t}} \quad (3.51)$$

$$V_r = \sqrt{\frac{2D_y}{\Delta t}} \quad (3.52)$$

- As velocidades das partículas auxiliam para a estimativa das velocidades de espalhamento, que são determinadas através da equação Eq.3.53 e Eq.3.54, conforme Al-Rabeh *et al.* (1989).

$$Us_i = R_1 \cos(2\pi R_2) \cdot Ur \quad (3.53)$$

$$Vs_i = R_1 \sin(2\pi R_2) \cdot Vr \quad (3.54)$$

onde, R_1 e R_2 são números aleatórios uniformemente distribuídos entre o intervalo de 0 e 1.

O espalhamento cessa quando todas as frações voláteis de óleo evaporam, ou quando o vazamento atinge a espessura mínima definida pelo modelo ECOS. A principal crítica de Fay (1969), com relação a Eq.3.50, é que o vazamento é sempre previsto com geometria circular e espessura constante, não importando as condições dos ventos e das ondas de superfície, visto que os vazamentos são geralmente mais espessos na extremidade, na direção do vento, e as lâminas de óleo possuem geometria mais alongadas, conforme Elliott (1986) e Reed *et al.* (2000). O modelo ECOS é um dos modelos que preveem o espalhamento de óleo em águas abertas, conforme o estudo de modelos realizado por Spaulding (2017).

3.4.4 Difusão turbulenta

A difusão turbulenta é avaliada usando o método de velocidades randômicas (velocidade das partículas de óleo). O ECOS usa o modelo de comprimento de mistura modificado para vazamentos de óleo, conforme Al-Rabeh *et al.* (1989). Inicialmente é definida a máxima distância (ΔS) que uma partícula de óleo pode deslocar-se durante um determinado passo de tempo (Δt), conforme Eq.3.55. As componentes de velocidades em x e y são calculadas pelas Eqs.3.56 e 3.57.

$$\Delta S = R_1 \sqrt{(12D_h \Delta t)} \quad (3.55)$$

$$U = \Delta S \cos(2\pi R_2) \quad (3.56)$$

$$V = \Delta S \sin(2\pi R_2) \quad (3.57)$$

onde, ΔS representa o deslocamento da partícula e Δt o intervalo de tempo, respectivamente.

Após calcular todas as propriedades das contribuintes no transporte do óleo, a posição final de cada partícula é integrada no tempo, utilizando o método de Euler.

3.4.5 Evaporação

A evaporação é o processo de eliminação dos componentes mais voláteis de óleo em conformidade com um algoritmo de exposição evaporativa. A fração dos elementos perdidos para a atmosfera é específico segundo o volume molar do componente, pressão de vapor e peso molecular ao ponto de ebulição.

De acordo com Fingas (1999) as taxas de evaporação do óleo não dependem da velocidade do vento, níveis de turbulência, da espessura ou da área do vazamento, de forma que depende apenas da temperatura e do tempo. O modelo ECOS utiliza do algoritmo de Stiver e Mackay (1984), onde a evaporação do óleo é definida por uma equação diferencial de primeira ordem em função das variáveis de temperatura, volume de óleo, área atingida pelo vazamento, tensão de cisalhamento do vento (medido à 10 m de altura da superfície do oceano (Marques *et al.*, 2017)) e °API.

A Eq.3.58 descreve o cálculo da fração de óleo evaporada, conforme Stiver e Mackay (1984).

$$\frac{dF_e}{dt} = \frac{K_e}{V_0} A_s \exp \left(A - \frac{B}{T} (T_0 + T_g F_e) \right) \quad (3.58)$$

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

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

onde, K_e é o coeficiente de influência do vento, A_s a área atingida pelo óleo, V_0 o volume de óleo derramado, A e B são coeficientes adimensionais e empíricos, conforme Stiver e Mackay (1984), F_e a fração de óleo evaporada, W a intensidade do vento, T_0 a temperatura no instante inicial (20°C) e T_g a temperatura da emulsão no instante de tempo t , respectivamente.

3.4.6 Emulsificação

A emulsificação é o processo de incorporação de água no óleo formando mistelas, que têm aspecto de "mousse". Wang e Elliott (1978) propuseram que o mecanismo formador da emulsão é controlado por forçantes de turbulência e processos de mistura. Porém, Bobra (1992) considerou o processo de emulsificação como o resultado devido às componentes polares e asfálticas do óleo. Marques *et al.* (2017) sugeriram que um estudo dos processos de reologia seja necessário para entender o processo de emulsão, pois embora haja vários estudos sobre emulsões realizados em laboratórios, para elucidar os processos envolvidos em emulsificação, faltam dados confiáveis sobre a emulsão de óleo em ambientes estuarinos, particularmente durante as primeiras horas após o vazamento de óleo.

De acordo Souza (2007) este processo, embora não seja considerado nos modelos de trajetória, devido a sua alta complexidade, repercute fortemente na hidrodinâmica dos vazamentos, pelo fato de modificar de forma considerável às propriedades do óleo como a massa específica e viscosidade. Além disso, este processo pode aumentar até 5 vezes a massa final em relação à massa inicial do vazamento de óleo, repercutindo no balanço global. Contudo Mackay e Patterson (1980) afirma que é necessário mais estudos compreender melhor o processo de emulsificação.

O ECOS utiliza o algoritmo proposto por Mackay e Patterson (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, conforme a Eq.3.59.

$$\frac{dF_{wv}}{dt} = K_{fw} (1 + W)^2 \left(1 - \frac{F_{wv}^i}{F_{wv}^f} \right) \quad (3.59)$$

onde, F_{wv}^i representa a emulsificação no instante inicial, F_{wv}^f a emulsificação no instante final e K_{fw} a constante adimensional de emulsificação, onde os valores considerados são $F_{wv}^i = 0$, $F_{wv}^f = 0,7$ e $K_{fw} = 2,5 \cdot 10^{-5}$.

3.4.7 Massa Específica do Óleo

Os óleos derivados de petróleo apresentam massa específica menor que a água. De acordo com Lehr *et al.* (2002) óleos muito intemperizados aumentam sua massa específica, sendo influenciados pela temperatura e o aumento da emulsificação.

A equação da massa específica para óleos provenientes de petróleo é proposta por Buchanan e Hurford (1988), conforme a Eq.3.60.

$$\rho_t = F_{wv}\rho_w + \rho_o(1 - F_{wv})(1 + C_{DE}F_v)[1 - C_{DT}(T - T_o)] \quad (3.60)$$

onde, ρ_t representa a massa específica em cada passo de tempo, ρ_w a massa específica referencial da água do mar, ρ_o a massa específica do óleo, T a temperatura e T_o a temperatura de referência para o óleo (20 °C). Enfim, C_{DE} e C_{DT} são coeficientes empíricos adotados de acordo com Lehr *et al.* (2002), cujos os valores são de 0.18 e 8×10^{-4} .

3.4.8 °API do óleo

A densidade específica em um líquido ou numa mistura líquida pode ser descrita em °API (*American Petroleum Institute*), que consiste na relação da massa específica do óleo com a massa específica da água, usada na indústria do petróleo e gás natural, conforme a Eq.3.61.

$$API = \frac{141.5}{\rho_o / \rho_w} - 135 \quad (3.61)$$

A Eq.3.61 calcula a variação do °API com o tempo, sendo ρ_o / ρ_w a densidade específica do óleo a 15,5 °C. Os óleos leves, com °API maiores, têm maior flutuabilidade, portanto são mais influenciados por forçantes superficiais no comportamento final da pluma de óleo.

3.5 Acoplamento dos Modelos TELEMAT-3D e ECOS

O modelo ECOS teve seu código acoplado no TELEMAT-3D, uma vez que ambos os programas estão escritos em FORTRAN 95 (*FORMula TRANslation*). A hidrodinâmica dentro do TELEMAT-3D é calculada em uma estrutura de repetição temporal tornando possível o acoplamento, usando um intervalo de tempo de 60 s. A Fig.3.3 apresenta um fluxograma explicativo das etapas realizadas.

As velocidade de corrente e dos ventos são passadas para o módulo *Drift* através do módulo *Environment*. Para este mesmo módulo são passadas as velocidades de espalhamento e difusão turbulenta do óleo, que são calculadas pelas respectivas sub—rotinas.

O modelo de óleo integra as posições de acordo com o método de integração escolhido dentro do sub—módulo *Lagrangian*. A posição final dos traçadores é passada para o módulo *Drift* que calcula a área do vazamento.

As informações de temperatura, salinidade e massa específica da água do mar são passadas para o módulo *Environment* que inicialmente faz uma interpolação e uma média das propriedades próximas a cada traçador.

A velocidade dos ventos e a área atingida pelo vazamento são passada para o módulo *Weathering*, com as informações necessárias disponíveis, e os processos de emulsificação,

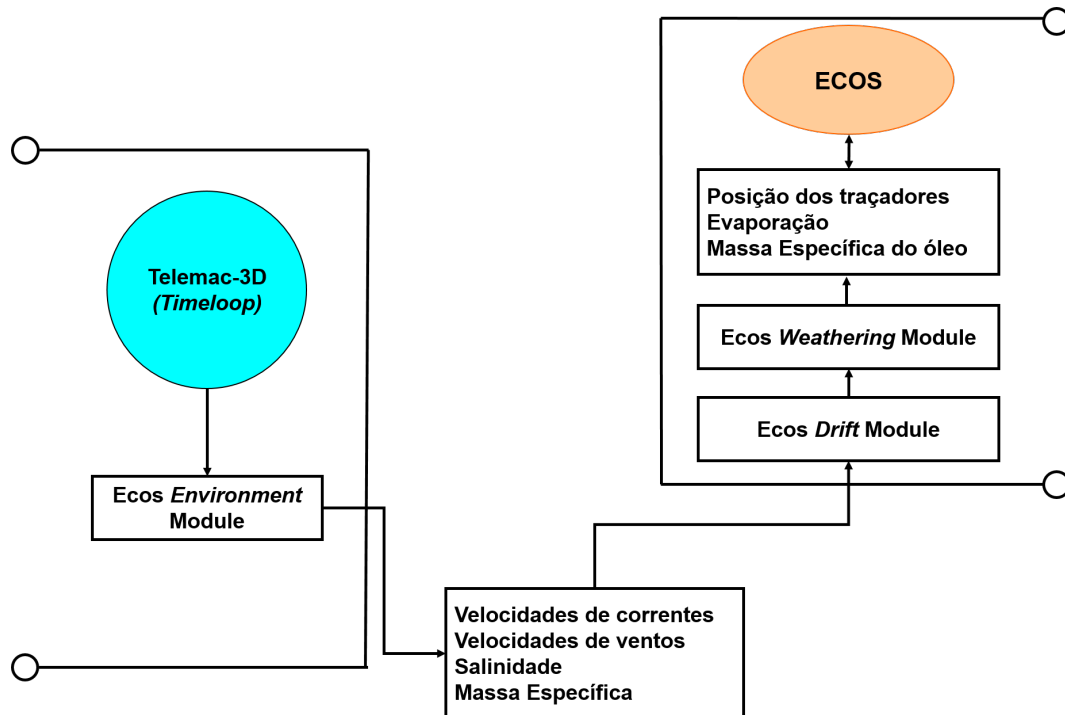


Figura 3.3: Fluxograma explicativo das etapas realizadas.

evaporação e massa específica do óleo são calculados.

Após todas as variáveis calculadas, o programa salva os resultados em dois tipos de arquivos distintos. Um dos arquivos armazena as posições x , y e z do vazamento e outro com os valores das propriedades de *Weathering*.

3.6 Geração Malha Computacional

A malha computacional foi gerada através do software *Blue Kenue* desenvolvido pelo *Canadian Hydraulic Centre*⁴ (CHC).

Inicialmente, com o auxílio do Quantum—GIS (QGis) define-se os limites da Lagoa dos Patos e da plataforma continental. Assim, com a região de estudo delimitada é gerada uma malha computacional, com polígonos de forma triangular. A triangulação é usada para formar uma malha de elementos finitos não estruturados, com a intenção de capturar a geometria da região de estudo.

A variação no tamanho dos triângulos no domínio é de 11.000 m, na zona oceânica, 300 m na Lagoa dos Patos, 100 m da embocadura da Lagoa dos Patos e 30 m na região de lançamento do vazamento de óleo, de forma que a malha possui um total de 93.050 nós, conforme a Fig.3.4. Estes valores de refinamento da malha computacional foram selecionados de acordo com trabalhos realizados na região de estudo, conforme Lopes *et al.* (2019), Stringari *et al.* (2012) e Stringari (2014), onde o tempo de elaboração foi de 4 meses.

Os dados de batimetria da região de estudo foram extraídos e digitalizados a partir

⁴www.ic.gc.ca/eic/site/054.nsf/eng/00092.html

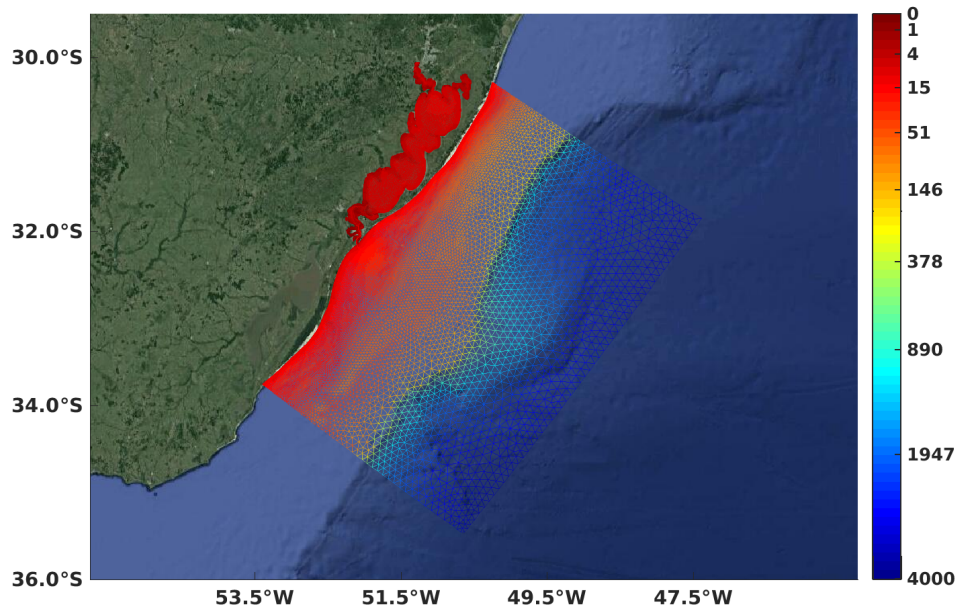


Figura 3.4: Malha batimétrica utilizada no estudo.

das cartas náuticas cedidas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação ⁵ (DNH). As cartas utilizadas foram a número 2140 (Lagoa dos Patos), número 2350 (Pinhal ao Rio Grande) e número 2112 (Rio Grande ao Arroio Chuí).

3.7 Discretização vertical da malha

Para a discretização vertical ou transformação sigma da malha computacional o TELEMAC-3D aplica a Eq.3.62:

$$z^* = \frac{z - z_f}{z_s - z_f} \quad (3.62)$$

onde, z_f representa a profundidade local medida na malha e z_s a elevação da superfície livre.

A discretização vertical da malha é realizada nas equações do movimento e de concentração de traçadores para fazer a troca do sistema de coordenadas (x, y, z) , para o sistema de coordenadas (x, y, σ) , que permite acompanhar os limites superficiais e de fundo. Estas características são apresentadas na Fig.3.5, que mostra um esquema de distribuição de 5 níveis sigma numa seção transversal, com altura variando de 0.4 m a -0.2 m.

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.

⁵<https://www.marinha.mil.br/dhn/>

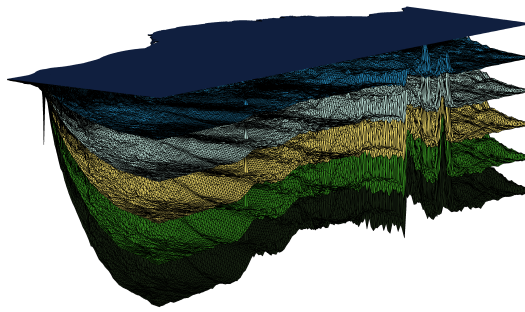


Figura 3.5: Malha tridimensional obtida pela superposição da malha bi-dimensional de elementos triangulares. Fonte: Kirinus (2013).

3.8 Banco de Dados para as Condições Iniciais e de Contorno

A elaboração da condições iniciais e de contorno, provém de três bancos de dados distintos: Dados globais de circulação oceânica do modelo HYCOM⁶ (*HYbrid Coordinate Ocean Model*), dados globais e de circulação atmosférica do banco de dados de reanálise do ERA-Interim⁷, e dados de descargas fluviais do rio Guaíba, rio Camaquã e Canal São Gonçalo fornecidos pela Agência Nacional de Águas⁸ (ANA).

3.8.1 Dados Globais e de Circulação Oceânica—HYCOM

O modelo HYCOM é o conjunto de esforços multi—institucionais patrocinado pelo *National Ocean Partnership Program* (NOPP), como parte do *Global Ocean Data Assimilation Experiment* (GODAE), para desenvolver e avaliar o método de assimilação híbrida *isopycnal—sigma—pressure*.

O HYCOM é um modelo numérico de equações primitivas equacionado em grade do tipo *Arakawa C* e com integração no tempo realizada por diferenças finitas *leap-frog* (Lima, 2012). O HYCOM é projetado para fornecer uma significativa melhoria em relação aos modelos operacionais tradicionais existentes, pois supera as limitações na estrutura dos sistemas atuais e na discretização vertical (Chassignet *et al.*, 2007). Apenas um único tipo de coordenada vertical não pode representar todos os processos oceânicos, assim diferenciando o HYCOM dos demais sistemas operacionais.

A resolução horizontal do HYCOM é de 0,083° (7 km de latitude) e os resultados fazem parte de um sistema operacional assimilativo de previsão (*nowcast/forecast*) chamado *Navy Coupled Ocean Data Assimilation* (NCODA).

3.8.2 Dados Globais e de Circulação Atmosférica—ERA-Interim

O ERA—Interim (*Global Atmospheric Reanalysis*) que contém banco de dados desde 1979 até o presente foi desenvolvido pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecast*

⁶<https://hycom.org/>

⁷<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>

⁸www.ana.gov.br

(ECMWF) que disponibiliza dados meteorológicos de análise e previsão, atualizados em tempo real.

Os sistemas de assimilação de dados utilizam observações medidas *in situ*, em estações terrestres, marítimas, a bordo de aviões, sondas, foguetes, e satélites, sendo a maioria dos dados obtidos por satélites. Estas observações são combinadas com os modelos de previsão, através de sistemas de assimilação de dados, a fim de fornecer vários parâmetros meteorológicos.

A resolução espacial do conjunto de dados é de aproximadamente $0,025^\circ$ (T255 *spectral*) em 60 níveis verticais da superfície até 0.1 hPa (ERA—Interim⁹). O sistema de assimilação de dados do ERA-Interim, de acordo com Quadro *et al.* (2012) melhoram o desempenho da previsão, principalmente no hemisfério Sul.

Os avanços nas equações aliadas à implementação de uma rede maior de dados observacionais e o aumento na resolução horizontal tornam a reanálise do ERA—Interim confiável em relação à reanálise anteriores do ECMWF (ERA—15 e ERA—40).

3.9 Condições Iniciais e de Contorno

As condições iniciais e de contorno são necessárias para resolver as equações hidrodinâmicas do TELEMAC-3D. Os dados foram extraídos de diferentes fontes para o domínio do modelo, assim interpolados e prescritos, para cada ponto da malha de elementos finitos. O modelo foi executado para uma simulação de 4 anos (2010 a 2013).

3.9.1 Condições de Contorno

O TELEMAC-3D possui três tipos de condições de contorno: contorno de descarga fluvial, contorno oceânico e contorno sólido. O contorno de descarga fluvial provém dos afluentes que desembocam na Lagoa dos Patos, onde os principais rios que possuem contribuições mais significativas são o Rio Guaíba, Rio Camaquã, e Canal São Gonçalo. O contorno oceânico contabiliza dados de maré astronômica, velocidades de correntes, salinidade, temperatura da água do mar, e elevação da superfície livre. O contorno sólido remete ao fim do domínio da malha computacional, basicamente na região da planície costeira, parte da plataforma continental adjacente, e o fundo oceânico.

A Fig.3.6 representa as condições de contorno implementadas no TELEMAC-3D. A partir do banco de dados do HYCOM foram obtidos os dados oceanográficos (representado na Fig.3.6 pela cor vermelho) para forçar os limites da malha computacional. Além disso, o forçamento do limite superficial e de fundo utiliza o banco de dados do ERA—Interim (representado na Fig.3.6 pelo diagrama azul) e para a descarga fluvial (representado na Fig.3.6 em branco) o banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA¹⁰).

As três principais descargas fluviais do rio Guaíba e do rio Camaquã (Fig.3.7) foram extraídas do banco de dados da ANA nos anos de 2010 a 2013. Os dados de descarga destes rios foram obtidos de estações fluviométricas na forma de medidas diárias, e interpolados

⁹<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>

¹⁰<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>

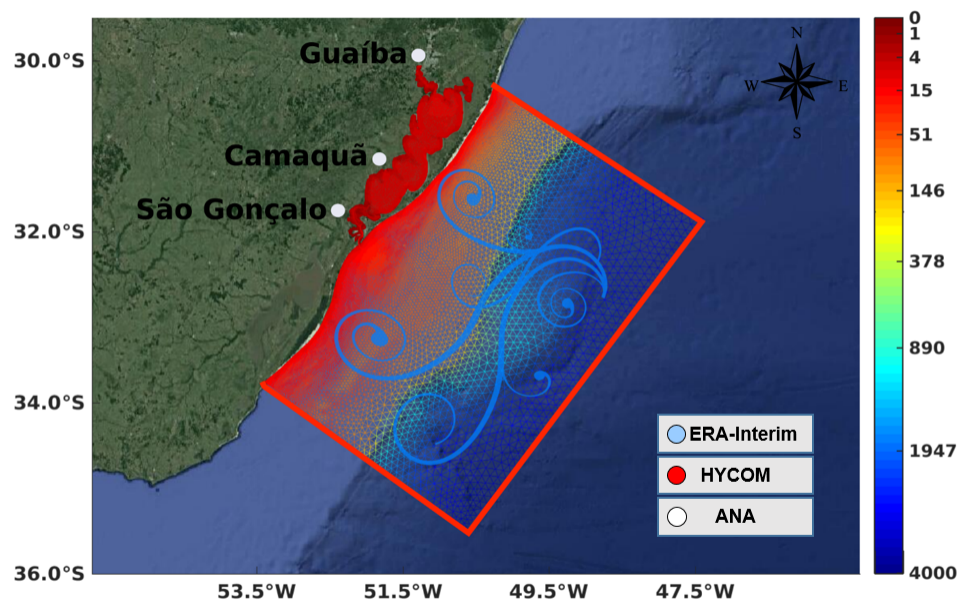


Figura 3.6: Mapa ilustrativo das condições de contorno implementadas no TELEMAC-3D.

linearmente para cada passo de tempo do modelo. Os dados de descarga do Canal São Gonçalo foram considerados constantes em $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durante toda a simulação, devido à falta de séries temporais (de Oliveira e de Oliveira, 2012).

A partir do modelo HYCOM, foram obtidos os dados oceanográficos, representados pelas componentes da velocidade de corrente, salinidade e temperatura da água do mar (representados em vermelho na Fig.3.6). 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 ERA—Interim, representados pelas componentes de velocidade de vento, temperatura do ar e pressão atmosférica (representados pelo diagrama azul na Fig.3.6). A resolução espacial dos dados utilizados no trabalho é de $2,5^\circ$, com escala temporal de 6 h.

A partir destes conjuntos de dados, foram construídas condições iniciais e de contorno para as variáveis utilizadas como forçantes dos limites superficiais e de fundo do modelo numérico (Fig.3.6).

3.9.2 Condições Iniciais

As simulações hidrodinâmicas utilizadas para avaliação da qualidade dos resultados abrangem um período de 4 anos, que compreende 2010 a 2013. Os principais parâmetros utilizados nas simulações numéricas são apresentados na Tab. 3.1, e seus valores estão em concordância com a calibração e validação do modelo TELEMAC-3D, conforme Marques *et al.* (2009), Marques (2012), Marques *et al.* (2014) e Marques *et al.* (2017).

O modelo ECOS considera o derrame de óleo pontual assumindo uma geometria circular quando derramado na água. A área inicial é calculada de acordo com Fay (1969)

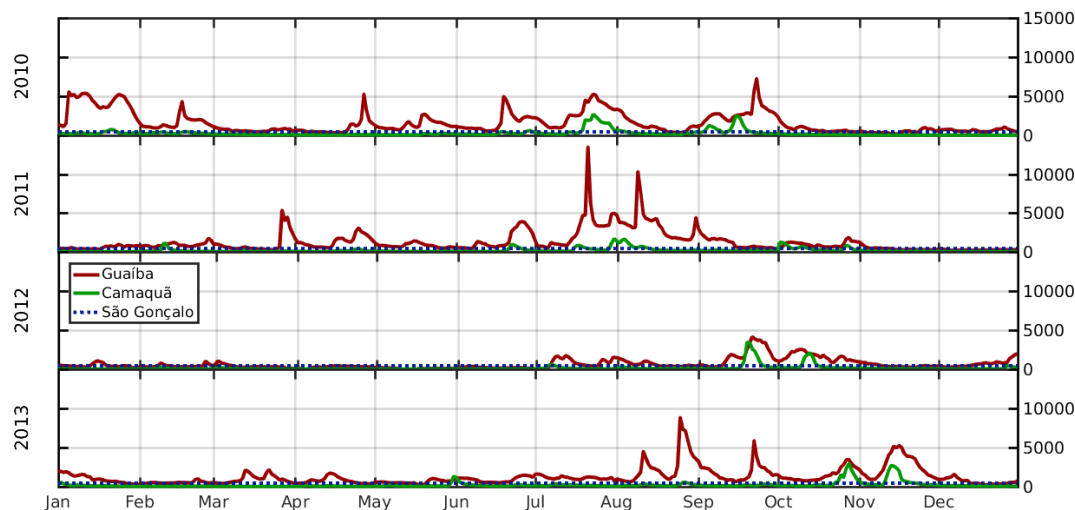


Figura 3.7: Vazão dos principais afluentes da Lagoa dos Patos, onde a linha vermelho representa a vazão do rio Guaíba, em verde a vazão do rio Camaquã e os pontos em azul representa a vazão constante do canal São Gonçalo

Tabela 3.1: Parâmetros utilizados na simulação numérica

Parâmetros	Dados
Passo de tempo	60 s
Tempo de simulação	4 anos
Número de passo de tempo	3191040
Modelo de turbulência horizontal	k - ϵ
Modelo de turbulência vertical	k - ϵ
Coefficiente de coriolis	-7,770.10 ⁻⁵ Nm ⁻¹ s ⁻¹
Lei de atrito com o fundo	Manning
Coefficiente de atrito com o fundo	4.10 ⁻²
Coefficiente de atrito com o vento	1.10 ⁻⁵

e a fase inicial de espalhamento é rápida. Esta aproximação é válida considerando que à fase inercial-viscosa inicial é breve. Assumindo que a fase inicial do espalhamento é breve, a área inicial do vazamento de óleo é calculada quando o espalhamento termina e o processo gravitacional-viscoso inicia. Este equacionamento depende do volume de óleo inicial vazado, °API e as diferenças entre as massas específicas da água e óleo, conforme H. e Flores (1998) e Marques *et al.* (2017).

As informações do óleo utilizadas no modelo ECOS foram obtidas nos seguintes relatórios técnicos: Autoridade Ambiental do Rio Grande do Sul¹¹ (FEPAM), Ministério do Meio Ambiente¹² (MMA), Marinha do Brasil¹³ e da Agência Nacional do Petróleo¹⁴ (ANP). As características do óleo são apresentadas na Tab.3.2.

Assim, com os dados hidrodinâmicos para um período de 4 anos simulados foram desenvolvidas estratégias de vazamentos hipotéticos de óleo na região de estudo. Neste

¹¹<https://www.marinha.mil.br/>

¹²<http://www.mma.gov.br/>

¹³<http://www.fepam.rs.gov.br/>

¹⁴<http://www.anp.gov.br/>

Tabela 3.2: Características do óleo utilizado nas simulações numéricas

Tipo de Óleo	Marine Fuel 380 (MF-380)
Volume Inicial de Óleo	13 m ³
Massa Específica da Água do Mar	1025 kg m ⁻³
Densidade do Óleo	980 kg m ⁻³
°API	28
Viscosidade Água Salgada	$0.893 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}$

contexto à estratégia inicial foi vaziar hipoteticamente um volume de 13 m³, para períodos que envolvem às condições de enchente e vazante mais críticas no estuário da Lagoa dos Patos, durante o período que compreende os anos de 2010 a 2013.

A escolha do vazamento hipotético de óleo 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 próximo à região de estudo, com o vazamento de aproximadamente 13 m³ na monoboia de Tramandaí localizada ao Sul do Brasil.

A utilização deste óleo classificado como médio (980 kg m⁻³), foi devido às características da Tab.3.2, fornecida pela ANP, que apresenta o tipo de óleo processado pela Refinaria de Petróleo Riograndense. As características deste óleo são de maiores probabilidades de emulsão e menores probabilidades de evaporação quando comparado com os demais óleos transportados no porto de Rio Grande. O ponto inicial do vazamento do óleo simulado está localizado no canal que conecta o Saco da Mangueira ao baixo estuário da Lagoa dos Patos, na Ponte dos Franceses nas coordenadas 32°S e 52°W.

3.10 Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL)

A identificação do Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL) é uma ferramenta amplamente utilizada para o planejamento de contingência, e para a implementação de ações de resposta à vazamentos de óleo, conforme Castanedo *et al.* (2009), Fattal *et al.* (2010), Nicolodi (2016) e Shami *et al.* (2017). A Fig.3.8 mostra a classificação do ISL para o estuário da Lagoa dos Patos, que é baseada no parâmetro que inicia em 1, para ambientes menos vulneráveis, variando até 10 para regiões mais vulneráveis, conforme a classificação de Nicolodi (2016) para a região Sul do Brasil.

De acordo com Nicolodi (2016) a classificação do índice de sensibilidade é estabelecida considerando os seguintes fatores: grau de exposição à energia de ondas e marés, declividade do litoral e tipo do substrato rochoso. Para a classificação da sensibilidade na planície costeira e estuário é fundamental o entendimento das inter—relações entre os processos físicos, os tipos de substratos rochosos e a biota associada, assim como dos padrões previsíveis de comportamento do óleo, de transporte de sedimentos e impactos biológicos. As características físicas dos ISLs da região onde às de partículas de óleo simuladas chegam são indicadas na Tab.3.3.

Neste estudo adotou-se uma abordagem para examinar os riscos colocados por po-

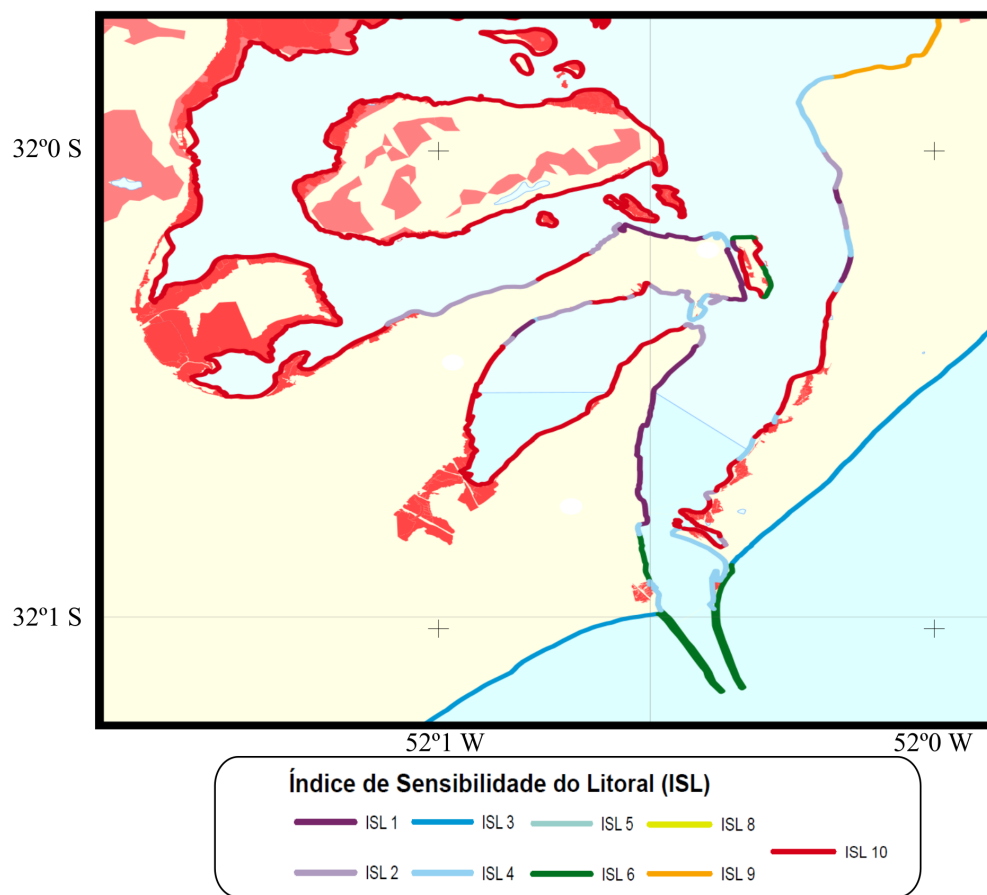


Figura 3.8: Mapa do Índice de Sensibilidade do Litoral ajustado para região do Porto de Rio Grande. Fonte: Nicolodi (2016) e Lopes *et al.* (2019).

tenciais vazamentos de óleo no estuário da Lagoa dos Patos, quantificando os perigos associados ao vazamento e considerando a sensibilidade da região. Vários ISL's são avaliados, conforme a Tab.3.3, incluindo a probabilidade de contato com óleo na encosta do estuário e regiões adjacentes, as concentrações médias de óleo, e o tempo médio de escoamento de óleo para região de interesse.

As diferenças na caracterização do risco utilizando nesta abordagem então avaliadas e vinculadas às características geomorfológicas do estuário. Para este propósito, vários cenários cobrindo uma gama de condições de vazamento, linhas costeiras e condições de intemperismo, foram testados na vizinhança da Ponte dos Franceses.

Tabela 3.3: Características das ISL's da região de estudo.

Índice	Tipo de Substrato
ISL 1	• Costões rochosos lisos, alta declividade e expostos; • Falésias em rochas sedimentares e expostas; • Estruturas artificiais lisas (paredões marítimos artificiais) e expostas
ISL 2	• Costões rochosos lisos, declividade média à baixa e expostos; • Terraços ou substratos de declividade média e expostos (terraço ou plataforma de abrasão, terraço arenítico exumado bem consolidado...)
ISL 3	• Praias dissipativas de sedimentos tamanho areia média à fina e expostas; • Faixas arenosas contíguas à praia, não vegetadas, sujeitas à ação de ressacas (restingas isoladas ou múltiplas, feixes alongados de restingas tipo “<i>long beach</i>”); • Escarpas e taludes íngremes (formações do grupo Barreiras e Tabuleiros Litorâneos) expostos; • Campos de dunas expostas
ISL 4	• Praias de sedimentos tamanho areia grossa; • Praias intermediárias de sedimentos tamanho areia fina à média e expostas; • Praias de sedimentos areia fina à média e abrigadas
<i>continua na próxima página</i>	

Índice	Tipo de Substrato
ISL 5	• Praias mistas de areia e cascalho ou conchas e fragmentos de corais; • Terraço ou plataforma de abrasão de superfície irregular ou recoberta de vegetação; • Recifes areníticos em franja
ISL 6	• Praias de cascalho (seixos e calhaus); • Planícies de detritos calcários; • Depósito de tálus; • Enrocamentos ("rip-rap", guia corrente, quebra-mar) e expostos; • Plataforma ou terraço exumado recoberto por concreções lateríticas (disformes e porosas)
ISL 7	• Planície de maré arenosa e exposta; • Terraço de baixa mar
ISL 8	• Escarpa/encosta de rocha lisa e abrigada; • Escarpa/encosta de rocha rugosa e abrigada; • Escarpas e taludes íngremes de sedimentos inconsolidados e abrigados; • Enrocamentos ("rip-rap" e outras estruturas artificiais rugosas) e abrigados
ISL 9	• Planície de maré arenosa/lamosa abrigada e outras áreas úmidas costeiras não vegetadas; • Terraço de baixa mar lamoso e abrigado; • Recifes areníticos servindo de suporte para colônias de corais
<i>continua na próxima página</i>	

Índice	Tipo de Substrato
ISL 10	• Deltas e inlets vegetados; • Terraços alagadiços, banhados, brejos, margens de rios e lagoas; • Brejo salobro ou de água salgada, com vegetação adaptada ao meio salobro ou salgado; • Marismas; • Manguezal (mangues frontais e mangues de estuários)
Tabela adaptada de Nicolodi (2016).	

4 | Validação dos resultados hidrodinâmicos

O modelo TELEMAC-3D foi validado para a investigação dos processos hidrodinâmicos, conforme Marques e Möller (2008), Marques *et al.* (2009), Marques *et al.* (2010b), Marques *et al.* (2010a), Kirinus *et al.* (2012), Marques (2012), Kirinus (2013), Barros *et al.* (2014), Marques *et al.* (2014), Marques *et al.* (2017), Oleinik *et al.* (2017), Monteiro *et al.* (2018) e Lopes *et al.* (2019). Neste estudo foi utilizada uma parametrização semelhante para realizar a validação das simulações numéricas tridimensionais.

A simulação hidrodinâmica utilizada para avaliação da qualidade dos resultados foi conduzida para o período de 31/12/2010 a 31/01/2011. Estas informações foram utilizadas para validar os resultados do modelo hidrodinâmico, a partir da comparação com séries temporais observadas em campo. Neste caso, o resultado hidrodinâmico da simulação foi comparado com as observações das velocidades de corrente e salinidade medidas no canal de acesso a Lagoa dos Patos, na Estação da Praticagem.

Os dados de corrente foram obtidos com um *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) posicionado no canal de navegação, conforme Fig. 4.1, fundeado a uma profundidade de 12 m. Para melhorar a comparação entre as séries temporais, foi utilizado um filtro cossenoidal 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. 4.2 e a Fig. 4.3 apresentam as comparações entre as séries temporais com dados observados (representado pelos pontos na cor preto) e os dados calculados (representado pela linha na cor verde), obtidos através da simulação numérica. A performance das simulações foi quantificada pelo método, conforme Marques e Möller (2008), Marques *et al.* (2009), Marques *et al.* (2010b), Marques *et al.* (2010a), Kirinus *et al.* (2012), Marques (2012), Kirinus (2013), Barros *et al.* (2014), Marques *et al.* (2014), Marques *et al.* (2017), Monteiro *et al.* (2018) e Lopes *et al.* (2019).

A comparação entre as séries temporais de velocidade de corrente calculada indicam que o modelo pode reproduzir as tendências da serie temporal de velocidade de corrente, no canal de acesso a Lagoa de Patos. As principais diferenças, conforme apresentado na Fig. 4.2, aparecem no período de 12 a 14 de Janeiro e no período de 17 a 22 de Janeiro, onde os dados calculados estão subestimados com relação aos dados observados.

Da mesma forma, a comparação entre as séries temporais de salinidade calculada e observada, também indicam que o modelo pode reproduzir as tendências do campo de salinidade no canal de acesso ao estuário. Porém, a Fig. 4.3 mostra que os dados calculados estão superestimados na maior parte do tempo, quando comparados com os dados observados.

De acordo com Marques *et al.* (2017) a subestimação e superestimação das séries temporais calculadas, com relação às observadas em campo, podem estar relacionadas ao uso de um coeficiente de influência constante para o vento, ausência de ondas geradas pelo vento na hidrodinâmica, ou devido ao uso de conjuntos de dados de baixa resolução

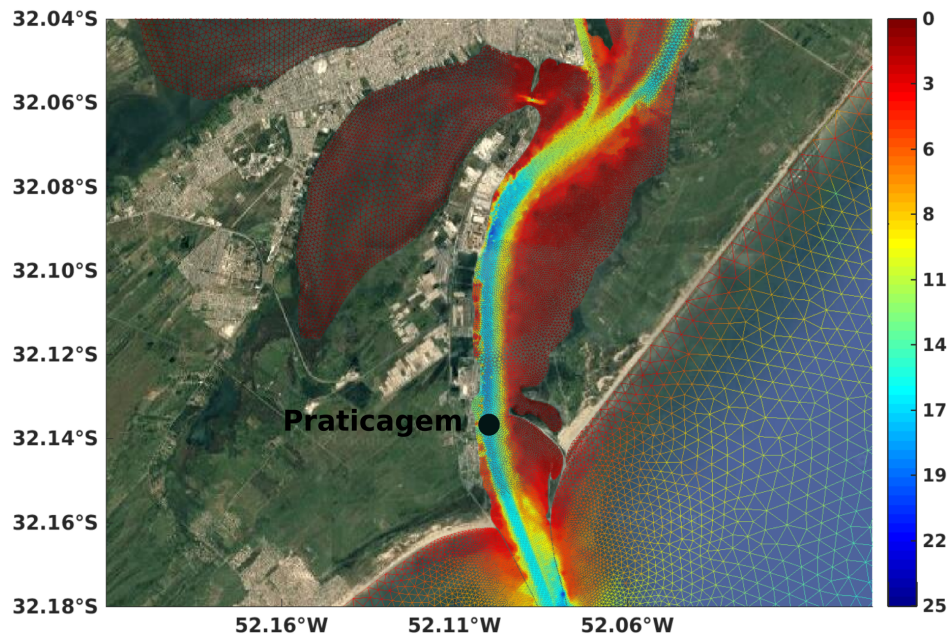


Figura 4.1: Posição do Equipamento: Ponto preto indica a posição do ADCP no canal de acesso a Lagoa dos Patos nas coordenadas $32^{\circ}8'12''$ S/ $52^{\circ}6'9''$ W.

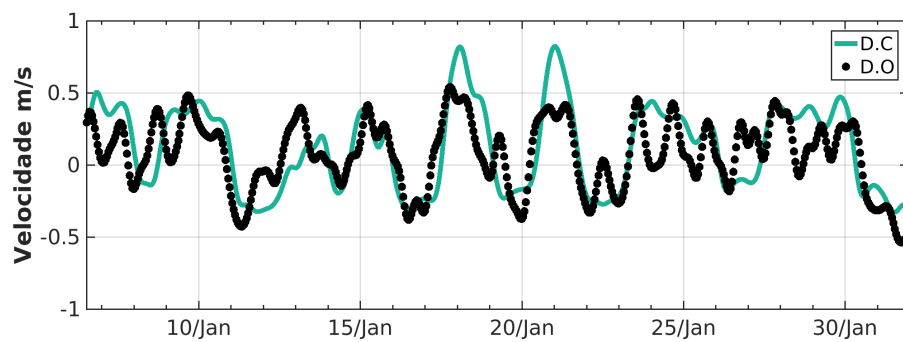


Figura 4.2: Velocidade meridional, onde os pontos em preto representam os dados observados (D.O), e a linha verde representam os dados calculados pelo modelo (D.C).

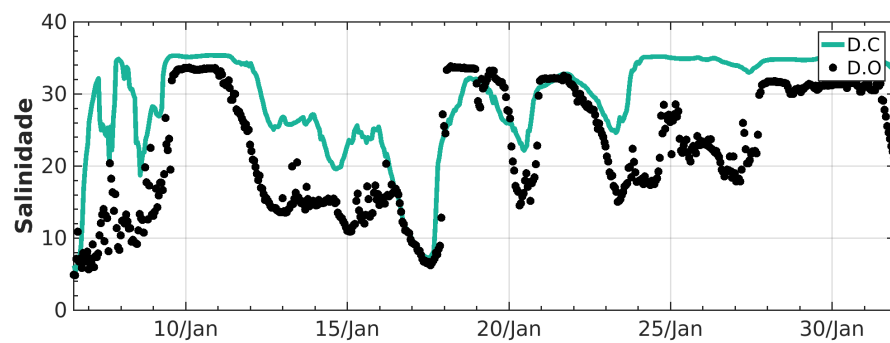


Figura 4.3: Salinidade, onde os pontos em preto representam os dados observados (D.O), e a linha verde representam os dados calculados pelo modelo (D.C).

Tabela 4.1: Indicador de Performance. n : Quantidade de dados observados, obs : Dado Observado, mod : Dado do modelo.

Indicador de Performance	Resultado Desejado
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (obs - mod)^2}{n}}$	Menor valor maior à concordância DC e DO
$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n obs - mod }{n}$	Menor valor maior à concordância DC e DO
$DP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - MA)^2}{n}}$	Menor valor maior à concordância DC e DO

espaço—temporal.

Zhang *et al.* (2017) avaliaram a hidrodinâmica do Lago Poyang mostrando que a subestimação e superestimação das séries temporais calculadas, com relação às observadas em campo, podem estar relacionadas à oscilação da elevação, alternado por períodos de enchente e vazante, transformando o lago em um rio durante períodos de vazante, e o contrário durante os períodos de enchente, fato que dificulta a modelagem precisa.

Para avaliar as comparações apresentadas, foram utilizados indicadores de performance, conforme Sutherland e Wallingford (1993), Hallak e Filho (2011), Teegavarapu e Chandramouli (2005), Marques *et al.* (2017) e Oleinik *et al.* (2017). As equações são apresentadas na Tab. 4.1, onde consta os principais erros e índices estatísticos. Zhang *et al.* (2017) apresentaram uma discussão sobre os erros e índices estatísticos, e suas utilidades ao relacionar modelos e métodos. Os indicadores de performance utilizados são:

- Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE): usada para expressar a precisão dos resultados numéricos, onde o RMSE apresenta valores do erro nas mesmas dimensões das variáveis analisadas (Hallak e Filho, 2011).
- Erro Médio Absoluto (MAE): por ser menos afetado por pontos com valores anormalmente extremos (*outliers*), o MAE é considerado preciso e robusto como medida da habilidade de modelos numéricos em reproduzir a realidade (Hallak e Filho, 2011).
- Desvio Padrão: O desvio padrão é uma medida que expressa o grau de dispersão dos dados, ou seja, o desvio padrão indica o quanto um conjunto de dados é uniforme. (Hallak e Filho, 2011).

O RMSE calculado para velocidade de corrente e salinidade é apresentado na Tab. 4.2. O RMSE associado à velocidade de corrente é de $0,21 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente. Por outro lado, a salinidade calculada apresentou um RMSE inferior a 8. Os resultados indicam que ocorre maior erro para os componentes superficiais norte/sul da velocidade da corrente, conforme apresentado na Fig. 4.2 e Fig. 4.3. O MAE para o componente da superfície é $0,173 \text{ m s}^{-1}$ e a salinidade apresentou um MAE inferior a 6 na região de estudo.

Marques *et al.* (2017) encontraram valores de RMSE associado à velocidade de corrente de aproximadamente $0,2 \text{ m s}^{-1}$, e para salinidade calculada o valor inferior a 5 psu no baixo estuário da Lagoa dos Patos.

Lopes *et al.* (2019) encontraram valores de RMSE associado à velocidade de corrente

Tabela 4.2: Estatística das Simulações

Corrente	MAE	(m s^{-1})	0.173
	RMSE	(m s^{-1})	0.211
	Desvio padrão do dado real	(m s^{-1})	0.238
	Desvio padrão da simulação	(m s^{-1})	0.294
	Erro absoluto	(m s^{-1})	0.174
	Vies	(m s^{-1})	0.059
Salinidade	MAE	(PSU)	5.679
	RMSE	(PSU)	7.164
	Desvio padrão do dado real	(PSU)	8.456
	Desvio padrão da simulação	(PSU)	6.885
	Erro Absoluto	(PSU)	7.426
	Vies	(PSU)	6.875

de aproximadamente $0,196 \text{ ms}^{-1}$ e erro absoluto de $0,161 \text{ ms}^{-1}$ e para a salinidade calculada o valor inferior a 8 psu e erro absoluto inferior a 9 psu no baixo estuário da Lagoa dos Patos.

Os resultados indicam que apesar das limitações nos dados utilizados, para forçar e validar o modelo numérico, a série temporal de velocidade de corrente e salinidade calculada, representa as tendências dos dados medidos no canal de acesso a Lagoa dos Patos, conforme Marques *et al.* (2017), Monteiro *et al.* (2018) e Lopes *et al.* (2019). Para ambas as séries, as correlações foram consideradas estatisticamente significativas, demonstrando uma performance satisfatória ao modelar dados forçados com dados hidrodinâmicos na região de estudo.

5 | Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados do deslocamento e destino da pluma de óleo na região do estuário da Lagoa dos Patos, para 22 cenários distintos em um período de 4 anos (2010—2013), que foram investigados numericamente utilizando o acoplamento do modelo numérico ECOS ao TELEMAT-3D. As propriedades de intemperismo do óleo também foram avaliadas. Além do deslocamento do óleo também são apresentados os resultados hidrodinâmicos tridimensionais, utilizando dados médios do estuário e de uma porção da Plataforma Continental adjacente.

O uso de simulações numéricas tridimensionais são importantes devido à dificuldade de visualização e interpretação de dados na região de estudo (Kirinus *et al.*, 2012), que possui uma grande variabilidade espaço-temporal das características físicas em termos de fatores externos (Barros *et al.*, 2014), como a intensidade de ventos e descarga dos afluentes da Lagoa dos Patos, que influenciam em fatores, como elevação, salinidade, processo de mistura e também contribuem no deslocamento e destino final da pluma de óleo.

5.1 Hidrodinâmica

Nesta seção serão abordados os resultados das condições hidrodinâmicas do estuário da Lagoa dos Patos e Plataforma continental Sul Brasileira. Essa análise contribui com o entendimento dos padrões de interação das forçantes físicas nos efeitos hidrodinâmicos da 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 da simulação numérica.

5.1.1 Mecanismo de oscilação do saco da Mangueira

O padrão de circulação na região de estudo foi analisado através de séries temporais de elevação de três pontos distintos para o período de 4 anos (2010—2013). O Ponto 1 (linha verde na Fig. 5.1) está localizado no interior do Saco da Mangueira, o Ponto 2 (linha azul na Fig. 5.1) está localizado no canal de acesso do estuário, nas proximidades da cidade de Rio Grande e o Ponto 3 (linha vermelha na Fig. 5.1) está localizado na saída dos Molhes da Barra e Leste. O local onde foram extraídas as séries temporais estão representados na Fig. 5.1.

O padrão de oscilação da superfície livre pode ser analisado na Fig. 5.2, onde a elevação nos Pontos 1 (interior do Saco da Mangueira) e 2 (estuário da Lagoa dos Patos) são superiores a elevação no Ponto 3 (Molhes da Barra), sugerindo a ocorrência de condições de vazante na região, com o fluxo de água saindo da Lagoa dos Patos em direção ao Oceano Atlântico. O inverso ocorre quando a elevação do Ponto 3 é superior a elevação nos Pontos 1 e 2. As séries temporais extraídas nos Pontos 1 e 2 demonstram uma forte relação entre a elevação na enseada (Saco da Mangueira) e a elevação no estuário (Monteiro *et al.*, 2006). O padrão de oscilação da superfície livre na região do estuário da Lagoa dos Patos e no saco

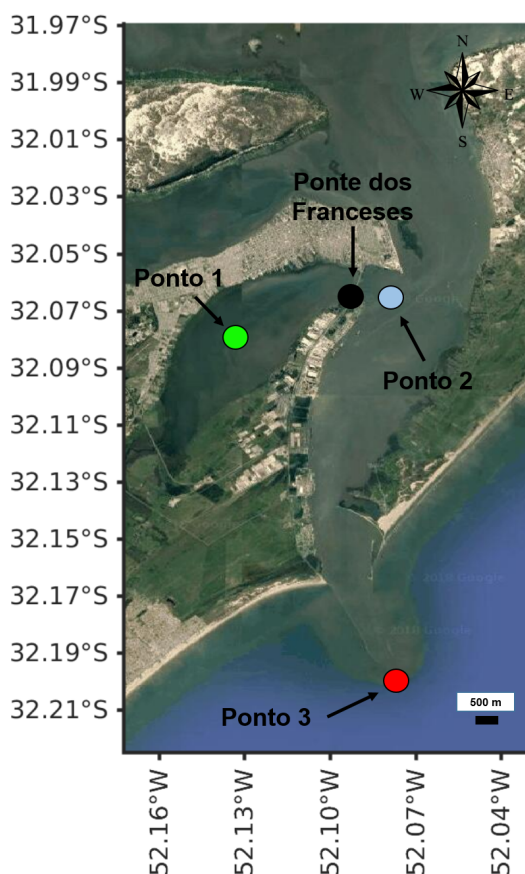


Figura 5.1: Locais onde foram extraídas as séries temporais de elevação. O Ponto 1 (interior do Saco da Mangueira) é representado pela cor verde, o Ponto 2 (baixo estuário) é representado pela cor azul e o Ponto 3 (saída dos Molhes da Barra) é representado pela cor vermelho.

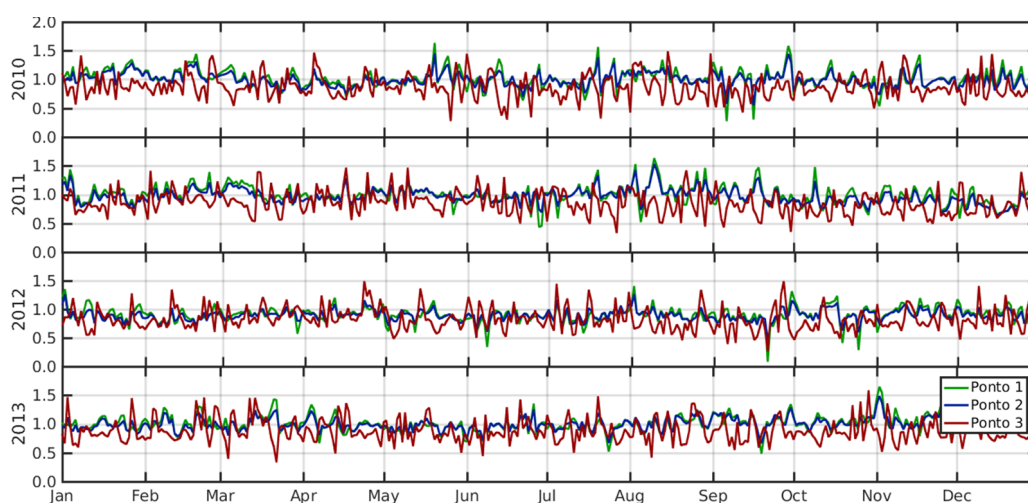


Figura 5.2: Séries Temporais de Elevação. O Ponto 1 (interior do Saco da Mangueira) é representado pela cor verde, o Ponto 2 (baixo estuário) é representado pela cor azul e o Ponto 3 (saída dos Molhes da Barra) é representado pela cor vermelha.

da Mangueira mostra um comportamento similar ao padrão de *set-up/set-down* descrito por Moller *et al.* (1996) e Fernandes *et al.* (2002).

5.1.2 Relação entre vazão de água e concentração de sal no estuário

Nesta seção será apresentada a relação entre vazão de água doce e a concentração de sal no estuário, influenciada pela descarga dos afluentes da Lagoa dos Patos, através de séries temporais. Para analisar a relação foram extraídas três séries temporais, através de transsectos (linhas verticais na Fig. 5.3 (A)). A série temporal de vazão foi extraída do médio estuário próximo ao canal São Gonçalo, e as séries temporais de concentração de sal do canal de entrada do Saco da Mangueira e do baixo estuário, conforme a Fig. 5.3 (A).

A vazão e a concentração de sal foram calculadas somando os valores diários ao longo de 122 dias de simulação, durante o intervalo de novembro e dezembro de 2010 e janeiro de 2011, pois neste período os dados hidrodinâmicos estão validados. A vazão e a concentração de sal consideram as quantidades de águas que entram e saem do estuário, onde os valores positivos indicam condições de enchente, e os valores negativos indicam condições de vazante, conforme a Fig. 5.3 (B), Fig. 5.3 (C) e Fig. 5.3 (D). O cálculo da vazão de água doce considera a concentração que atravessa a área do transecto em um intervalo de tempo. A concentração de sal é calculado considerando massa de sal que flui na área do transecto em um intervalo de tempo.

A Fig. 5.3 (B) mostra a série temporal de vazão, que apresenta o valor máximo de $12.500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, para condição de enchente em 14/11/210 (região delimitada pela cor vermelho), e o valor de $14.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para período de vazante em 26/01/2011 (região delimitada pela cor preto). A Fig. 5.3 (C) Fig. 5.3 (D) apresentam séries temporais de concentração de sal. A utilização destas séries permite estabelecer uma relação entre as concentrações de sal e a vazão no estuário.

O evento de vazão de $12.500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ é influenciado pela condição de enchente em 14/11/210 (região delimitada pela cor vermelho). Nesta condição, a concentração de sal que entra no Saco da Mangueira é de 1.10^6 gs^{-1} e no estuário, próximo aos Molhes da Barra e Leste é de $2,250.10^8 \text{ gs}^{-1}$. Para o evento de vazão de $14.500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em condição de vazante, em 26/01/2011 (região delimitada pela cor preto), a concentração de sal saindo no Saco da Mangueira é de 3.10^5 gs^{-1} e no estuário é de $1,9.10^8 \text{ gs}^{-1}$. Como está ocorrendo condição de vazante a concentração de sal diminui no interior do estuário, com relação a condição de enchente.

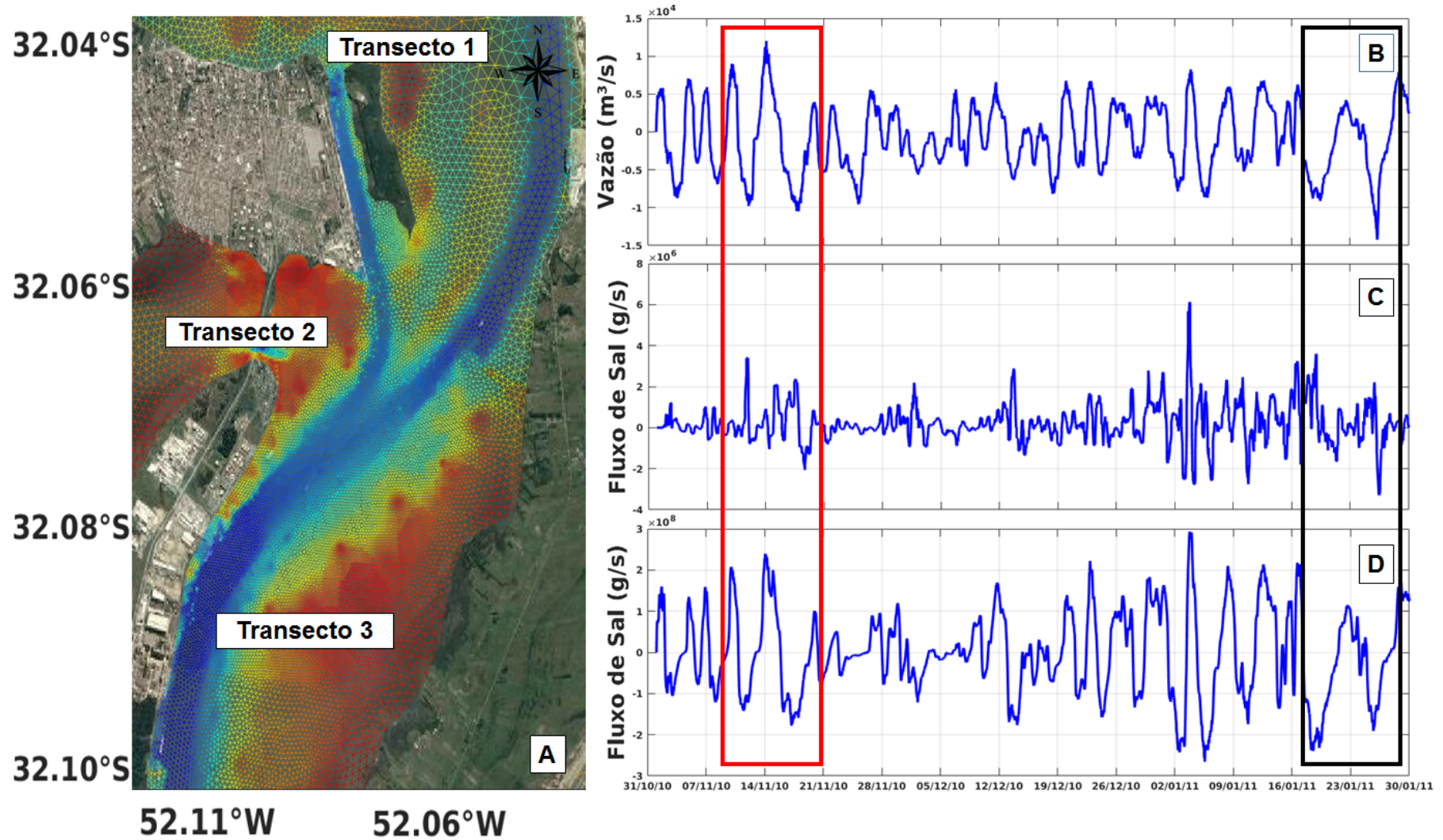


Figura 5.3: Séries temporais de vazão de água doce ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) e concentração de sal (g s^{-1}). Em (A) uma representação ampliada da região de estudo, com os locais de retida dos transectos. Em (B) a série temporal de vazão extraída através de um transecto transversal (Transecto 1) próximo ao São Gonçalo, (C) série temporal de concentração de sal extraída através do transecto longitudinal (Transecto 2) no canal que conecta o Saco da Mangueira ao estuário e (D) transecto transversal (Transecto 3) extraído no estuário da Lagoa dos Patos.

Na comparação entre a série de vazão e as séries temporais de concentração de sal observa-se que para os valores positivos de vazão, em condições de enchente, a concentração de sal é introduzido no interior do estuário. Para valores negativos, em condição de vazante, a concentração de sal diminui dentro do estuário. A entrada de concentração de sal na região do Saco da Mangueira é restrita, pois a entrada é obstruída por uma ponte (Ponte dos Franceses). De acordo com Monteiro *et al.* (2006) e Barros *et al.* (2014), a construção desta ponte reduziu a circulação nesta região, diminuindo os processos de troca de águas principalmente em condições vazante, aumentando o tempo de permanência da água salgada dentro da enseada (Saco da Mangueira).

De acordo com Marques *et al.* (2011) a descarga de água doce é importante para criar estratificação durante períodos de intensidade moderada, e dificultam a introdução de águas costeiras em períodos com maior descarga de água doce (normalmente do inverno austral até a primavera). Os eventos mais intensos de enchente ocorrem durante períodos de baixa descarga continental e ventos de maior intensidade. Embora, a intensidade dos ventos seja um dos fatores mais importantes na dinâmica do estuário, Barros *et al.* (2014) afirmou que em escalas de tempo mais longas (meses, anos, etc.), a descarga de água doce torna-se extremamente importante.

Möller *et al.* (2001), Fernandes *et al.* (2006), Marques e Möller (2008) e Marques *et al.* (2014) verificaram que o estuário da Lagoa dos Patos, em escalas de tempo sinóticas, tem seu padrão de circulação residual favorável às condições de vazante independente da descarga de água doce, enquanto a estratificação média ao longo do estuário é controlada pela intensidade da descarga de água doce. Marques *et al.* (2014) afirmaram que em condições meteorológicas normais, os eventos de enchente ocorrem periodicamente durante todo o ano, assim a intrusão de sal, está diretamente relacionada à intensidade da vazão de água doce dos rios afluentes da Lagoa dos Patos.

5.1.3 Velocidade de correntes e salinidade

A Fig. 5.4 mostra a região de estudo, com a batimetria local, indicando os transectos (com dois cortes verticais e um horizontal) onde foram obtidos campos médios de salinidade. Para a análise dos padrões de correntes e ventos da simulação hidrodinâmica foram utilizadas rosas dos ventos, onde os dados foram separados em faixas de frequência e intensidade durante o intervalo de tempo analisado.

Considerando o cálculo da média para o ano de 2011, os resultados apresentam pouca entrada de sal no estuário, como consequência da dominância de eventos de vazante. Este comportamento também é identificado nas séries temporais de elevação da Fig. 5.2. Resultados similares dos padrões de salinidade foram observados em outros estudos, conforme Marques *et al.* (2009), Marques *et al.* (2010b), Marques *et al.* (2010a), Möller *et al.* (2001), Marques *et al.* (2011) e Marques *et al.* (2014).

A Fig. 5.4 (A) mostra o transecto longitudinal do interior da enseada contendo concentrações de salinidade entre 9,4 e 9,8 psu. De acordo com Niencheski e Baumgarten (2000), a enseada possui salinidade intermediária (entre 5 e 27 psu), pois assim é possível a remineralização de sedimentos e a entrada de nutrientes inorgânicos dissolvidos, que garantem as condições de sobrevivência de crustáceos e peixes no ambiente. A intensidade de corrente (ponto amarelo na Fig. 5.4) é considerada baixa, com correntes do quadrante nordeste e sudoeste, variando de $0,04 \text{ m s}^{-1}$ a $0,050 \text{ m s}^{-1}$.

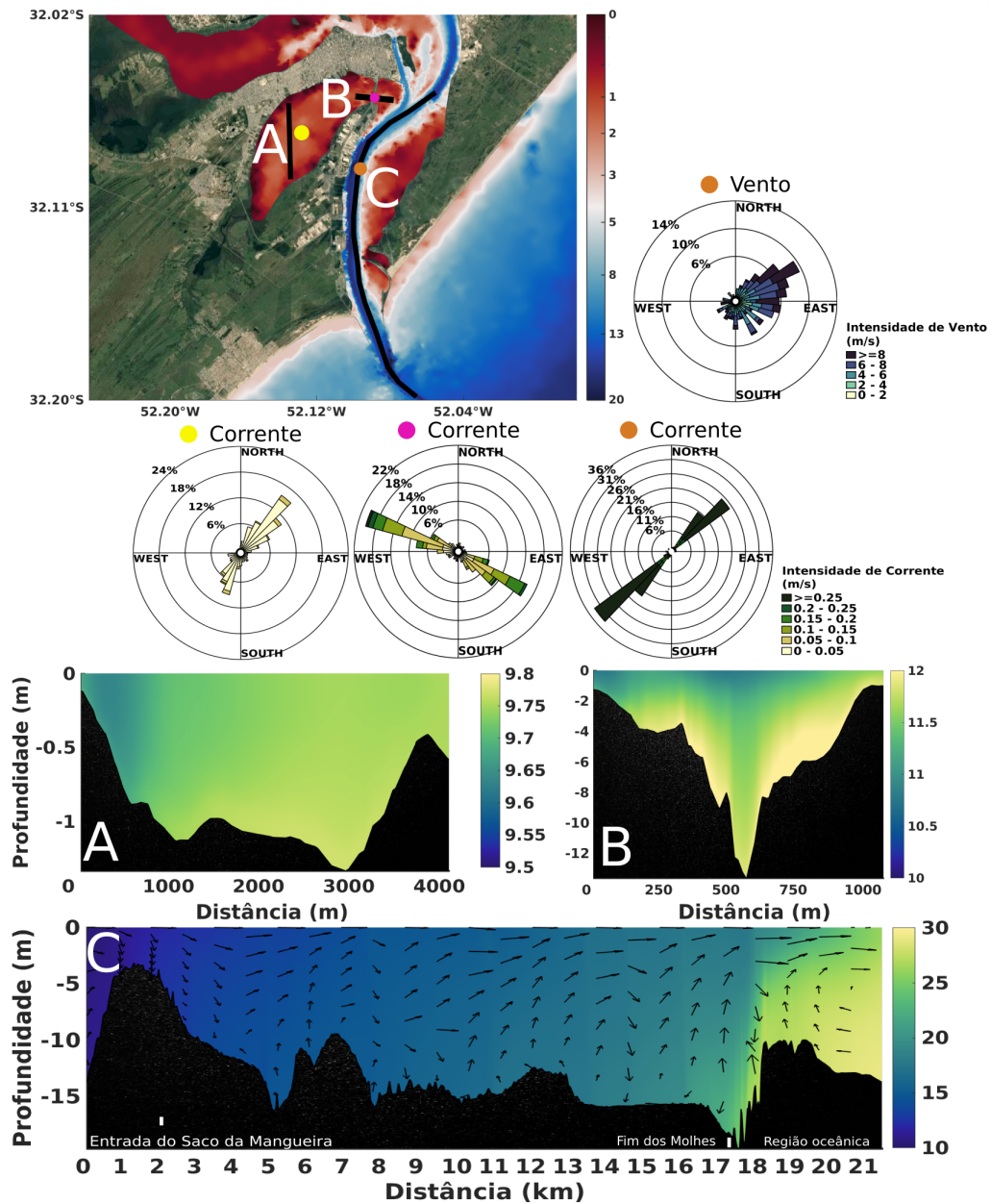


Figura 5.4: A figura mostra a região de estudo, com a integração de dados batimétricos, sobreposta da Google Maps, Digital GLOBE—CNES/Airbus, data: 2019. As linhas em preto indicam os locais de retirada dos transectos, no Saco da Mangueira, canal de acesso ao estuário e o estuário da Lagoa dos Patos. Ainda nesta região foi retirado uma média escalar de vento, resultado da direção e intensidade que atuam na simulação (representado pelo ponto na cor laranja dentro do estuário) e médias escalares de velocidades de correntes (representado pelos pontos na cor laranja dentro do estuário, magenta no canal de acesso ao Saco da Mangueira e amarelo dentro da enseada). Em (A) o transecto longitudinal do campo de salinidade média do fundo da enseada, (B) transecto transversal ao canal que conecta a enseada ao estuário e (C) transecto transversal ao canal de navegação com vetores representando a direção média das correntes.

A Fig. 5.4 (B) mostra o transecto transversal do canal, que conecta o Saco da Mangueira ao baixo estuário, contendo concentração de salinidade entre 10 e 12 psu. A construção da Ponte dos Franceses obstruiu o canal, assim restringindo a comunicação das águas, entre a enseada e o estuário, e também a entrada e o tempo de permanência do sal (Monteiro *et al.*, 2006). A intensidade de corrente (ponto magenta na Fig. 5.4) é moderada, variando de $0,11 \text{ m s}^{-1}$ a $0,51 \text{ m s}^{-1}$.

A Fig. 5.4 (C) mostra o transecto transversal no estuário com concentração de salinidade entre 10 e 30 psu. A maior massa específica das águas costeiras, causada pela maior concentração de sal, faz com que as maiores salinidades ocorram no fundo do estuário. A intensidade de corrente (ponto laranja na Fig. 5.4) no estuário é alta variando de $0,59 \text{ m s}^{-1}$ a $2,25 \text{ m s}^{-1}$. A Fig. 5.4 (C) mostra os vetores com as direções das correntes, indicando o sentido médio do fluxo de vazante no estuário. Porém, próximo aos Molhes na região oceânica, as correntes de fundo são direcionadas para o interior estuário resultando na entrada de água salgada.

O ponto representado pela cor laranja na Fig. 5.4 apresenta a intensidade e direção de vento na região, com mínima de $0,2 \text{ m s}^{-1}$ e máxima 8 m s^{-1} variando as direções em todos os quadrantes. Machado *et al.* (2010) explicam a variabilidade da direção dos ventos em todos os quadrantes na região Sul do Brasil devido à sua posição geográfica, localizada em zona de transição climatológica, a variabilidade dos ventos está associada aos sistemas de ciclones extratropicais e intertropicais.

As variações de salinidade de 2 psu pode afetar a circulação de nutrientes inorgânicos dissolvidos. Os nutrientes são a principal fonte de energia para as macroalgas e microalgas no ecossistema da Lagoa dos Patos. Para salinidades inferiores a 5 psu, os nutrientes são ressuspensos pelos processos e para salinidades intermediárias, de 5 a 27 psu, o processo dominante é a remineralização de sedimentos. Para salinidades maiores que 27 psu ocorrem mudanças nas concentrações de nutrientes, devido aos processos de mistura de diferentes massas de água (Niencheski e Baumgarten, 2000)

Os resultados mostram pouca entrada de sal no estuário, como consequência da dominância de eventos de vazante. Como a hidrodinâmica do estuário afeta diretamente a enseada, esta condição restringe a entrada de sal no Saco da Mangueira. Alguns estudos apresentaram os mesmos padrões de salinidade observados neste estudo, como: Möller *et al.* (2001), Marques *et al.* (2009), Marques *et al.* (2010b), Marques *et al.* (2011) e Marques *et al.* (2014).

5.1.4 Processos de mistura e flutuabilidade

Os ventos de quadrante sul tendem a forçar a intrusão e a acumulação de água salgada no estuário (Fernandes *et al.*, 2002). Para períodos de descarga fluvial superior a $5000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a ação dos ventos é restrita, quando os gradientes de pressão barotrópicos gerados pelo vento podem ser equilibrados pelo gradiente de pressão gerado pela descarga fluvial, reduzindo e até impedindo a intrusão de sal no estuário (Marques e Möller, 2008). A interação entre o gradiente de pressão gerado pelo vento, e o gradiente de pressão forçado pela descarga fluvial, é responsável pelo fluxo e distribuição de salinidade no estuário, conforme Moller *et al.* (1996) e Fernandes *et al.* (2006).

O estudo de Dyer (1991) explicou o processo de mistura de águas em estuários, onde a intensidade da mistura depende da estabilidade vertical na interface das camadas estratifi-

cadadas em movimento. O balanço entre a estratificação vertical e a mistura desempenha um papel essencial para dinâmica do estuário, pois caso o gradiente vertical de densidade (salinidade) sejam opostos as trocas associadas ao movimento turbulento, um cisalhamento de velocidade extra é necessário para causar a mistura.

No estuário da Lagoa dos Patos, a alta descarga dos afluentes combinada com a ação de ventos de quadrante norte, favorecem a formação de uma camada superficial de água doce no estuário. A camada de água doce estende-se na direção da plataforma continental adjacente sobre uma camada inferior de maior salinidade. Para ventos dominantes de quadrante sul, o efeito dos ventos tende a forçar a intrusão e a acumulação de água salgada no estuário sob uma camada de água doce.

A modelagem da distribuição de salinidade no estuário oferece a opção de estimar qualitativamente a intensidade da mistura que ocorre no estuário, pela utilização do número de Richardson (Fernandes *et al.*, 2002, e Kirinus *et al.*, 2012). Através do número de Richardson (Ri), foi possível demonstrar o processo de mistura produzido pela ação dos ventos e da descarga dos afluentes como geradores de turbulência. A estabilidade (padrão de flutuabilidade) é calculada pela frequência Brunt-Väisälä (N^2), onde no estuário, pode ser determinado através de perfis verticais de salinidade.

Atualmente existem muitos estudos teóricos e laboratoriais sobre os mecanismos de formação e crescimento de instabilidades dentro de uma interface estratificada, e a transição de fluxo laminar para turbulento geralmente é capaz de ocorrer com $Ri = 0,25$ ou $Ri > 0,25$, conforme Dyer (1991), Fernandes *et al.* (2002), Kirinus *et al.* (2012), Marques *et al.* (2010b) e Bernardes *et al.* (2018). Acima deste valor, o fluxo torna-se instável, ocorrem perturbações na interface, ruptura da camada, onde a mistura predomina, conforme Fernandes *et al.* (2002), Kirinus *et al.* (2012) e Marques *et al.* (2010b).

A análise realizada na região de conexão entre o Saco da Mangueira e o baixo estuário da Lagoa dos Patos, mostra os processos de mistura, conforme a Fig. 5.5. O diagrama Hovmöller (Fig. 5.5) apresenta a variação do número de Richardson durante 6 meses dos anos de 2010 e 2011. Neste intervalo de tempo, os valores de $Ri = 0,25$ ou $Ri > 0,25$ estão contornados na cor magenta, representando o predomínio de processos de mistura. No período de março a abril de 2011, pode-se observar a intensificação no processo de mistura, pois este intervalo é controlado por processos alternantes de condição de enchente e vazante, intensificando o predomínio de processo de mistura.

Ainda neste período, Ri varia de 0,25 a 7 no fundo, demonstrando a presença da camada limite de fundo, que influencia nos processos de mistura através da profundidade de não-movimento ou inversão de fluxo (Kundu *et al.*, 2012). Na superfície, os mesmos valores são observados, devido a presença da camada estratificada superficial, causada pela presença de água doce. Esta análise é confirmada pela frequência Brunt-Väisälä (N^2), demonstrando que o intervalo analisado possui N^2 menor que 1. Este resultado indica a presença de camadas menos estratificadas, e resultam no predomínio dos processos de mistura entre as camadas superficial e de fundo.

5.2 Deslocamento das partículas de óleo para todos os vazamentos

A Fig. 5.6 apresenta todas as 22 simulações dos vazamentos de óleo, em um quadro temporal, onde cada cor representa um vazamento. Nesta figura observa-se as possibilidades para

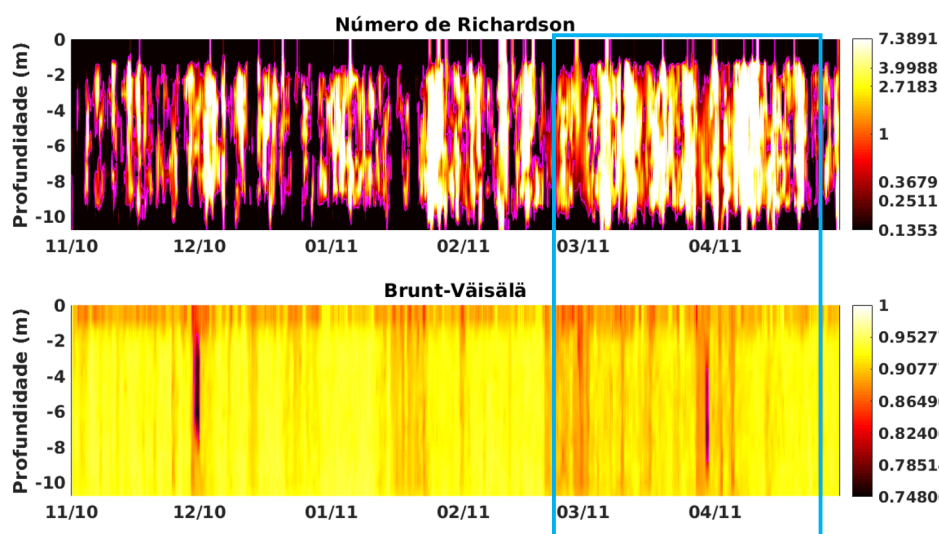


Figura 5.5: Diagramas de Hovmöller contendo os números de Richardson (Ri) e Brunt-Väisälä (N^2)

o destino da mancha de óleo, nas regiões do baixo e médio estuário da Lagoa dos Patos. As partículas são rastreadas por um período de 24 h.

O modelo numérico mostra que o vazamento de óleo espalha-se com geometria circular na superfície da água e espessura uniforme. A pluma de óleo está submetida a ação da intensidade dos ventos e das correntes. De acordo com Spaulding (2017) a intensidade dos ventos alonga a pluma de óleo, e a combinação entre a intensidade de ventos e correntes tornam as camadas espessas e orientam a pluma na direção predominante do vento. Este fato resulta em vazamentos que estendem-se por vários metros a partir da origem do vazamento.

Além da influencia da intensidade dos ventos e correntes, o estuário da Lagoa dos Patos possui outra consideração importante como a descarga dos afluentes (Guaíba, Camaquã e canal São Gonçalo). Durante o período de verão e primavera, os ventos de quadrante nordeste (NE) são de maior frequência e a descarga dos afluentes é mais baixa. No período de outono e inverno, os ventos possuem maior variabilidade em todas as direções, que são combinadas com as maiores descarga dos afluentes. Estas condições foram observadas em experimentos e simulações realizadas por: Machado *et al.* (2010), Marques *et al.* (2011), Marques *et al.* (2014) e Barros *et al.* (2014).

Neste contexto, as simulações de deslocamento das partículas de óleo foram separadas por estações, para avaliar a intensidade das principais forçantes no deslocamento associado às regiões preferenciais e de destino final do óleo. A Fig. 5.6 mostra o deslocamento das partículas de óleo relacionando às simulações na Tab. 5.1 (Primavera e Verão) e Tab. 5.2 (Outono e Inverno). O deslocamento preferencial das partículas de óleo é para a região do Saco da Mangueira (R3), seja em condições de enchente ou condições de vazante. A Fig. 5.7 identifica os locais de chegada do óleo, relacionando às regiões nas Tab. 5.1 e Tab. 5.2.

Nas estações de verão e primavera observa-se que 30,0% das partículas de óleo chegaram ao interior do Saco da Mangueira (R3). Ainda nestas estações, existe a probabilidade de que 23,3% das partículas de óleo cheguem à região do Super Porto (R4), e outros 10,0%

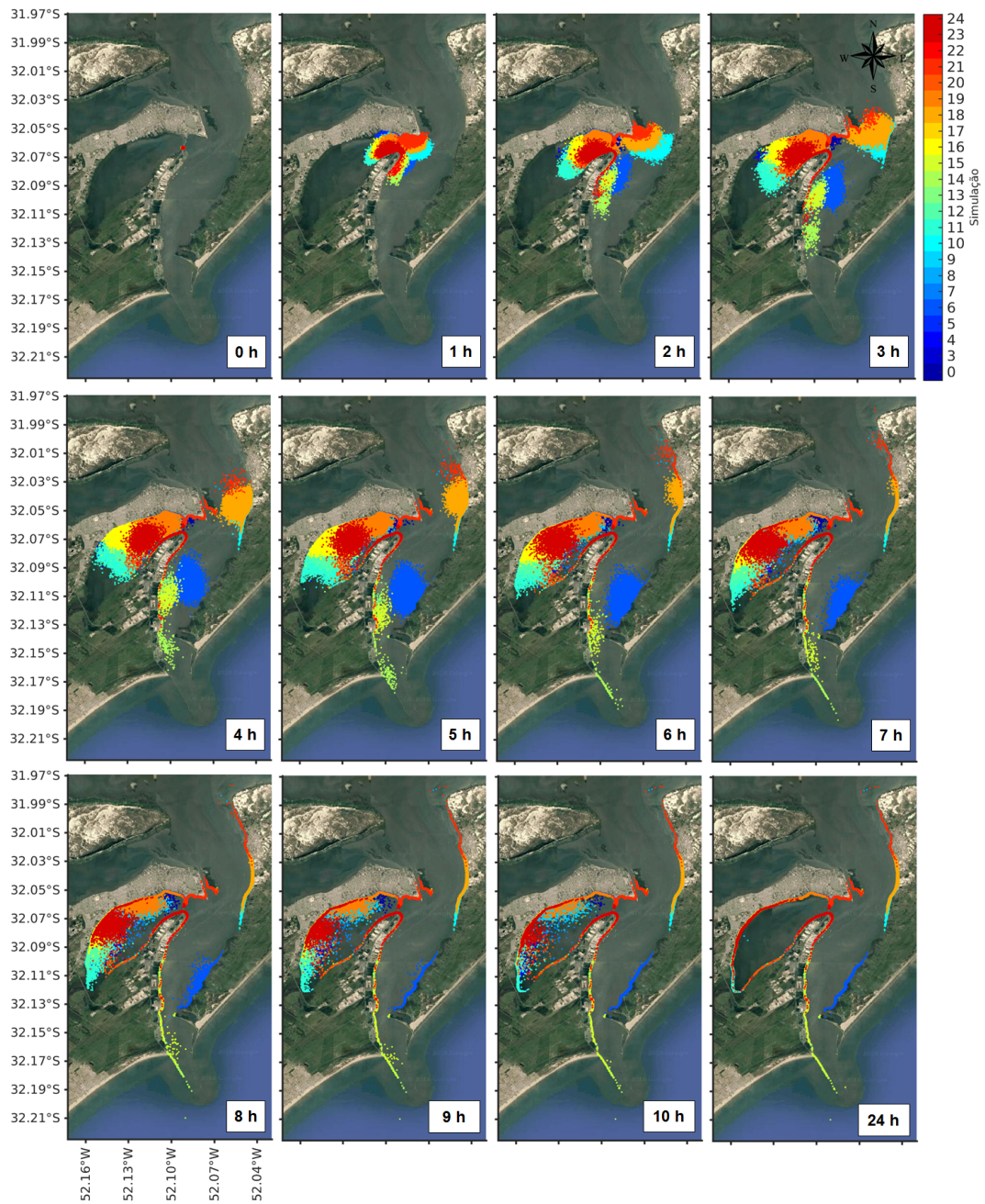


Figura 5.6: Resultados das 22 simulações de vazamento de óleo, as imagens ilustram o deslocamento e o destino final das partículas no tempo (h).

Tabela 5.1: Deslocamento e localização das regiões contaminadas pelo óleo, durante o período de verão e primavera.

Simulação	Data	Estação	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
1	27/02/2010	Verão	X		X								
5	30/09/2010	Primavera				X				X	X		
6	12/12/2010	Verão			X	X	X						
7	15/03/2011	Verão	X	X	X							X	
11	19/11/2011	Primavera			X								
12	10/01/2012	Verão			X	X							
13	15/03/2012	Verão			X	X	X	X		X			
16	22/10/2012	Primavera			X	X	X						
17	19/02/2013	Verão	X	X								X	
20	10/10/2013	Primavera			X	X							
22	19/12/2013	Primavera			X	X							
			R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
			(%)	10,0	6,7	30,0	23,3	10,0	3,3	0	6,7	3,3	6,7

Tabela 5.2: Deslocamento e localização das regiões contaminadas pelo óleo, durante o período de outono e inverno.

Simulação	Data	Estação	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
2	06/04/2010	Outono			X							
3	24/05/2010	Outono			X							
4	18/07/2010	Inverno			X							
8	18/05/2011	Outono			X							
9	04/08/2011	Inverno	X	X								X
10	16/09/2011	Inverno			X							
14	13/06/2012	Outono			X	X	X	X	X	X		
15	14/07/2012	Inverno			X							
18	10/04/2013	Outono			X							
19	19/06/2013	Outono			X	X						
21	20/08/2013	Inverno				X						
			R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
			(%)	5,3	5,3	47,2	15,7	5,3	5,3	5,3	0	5,3

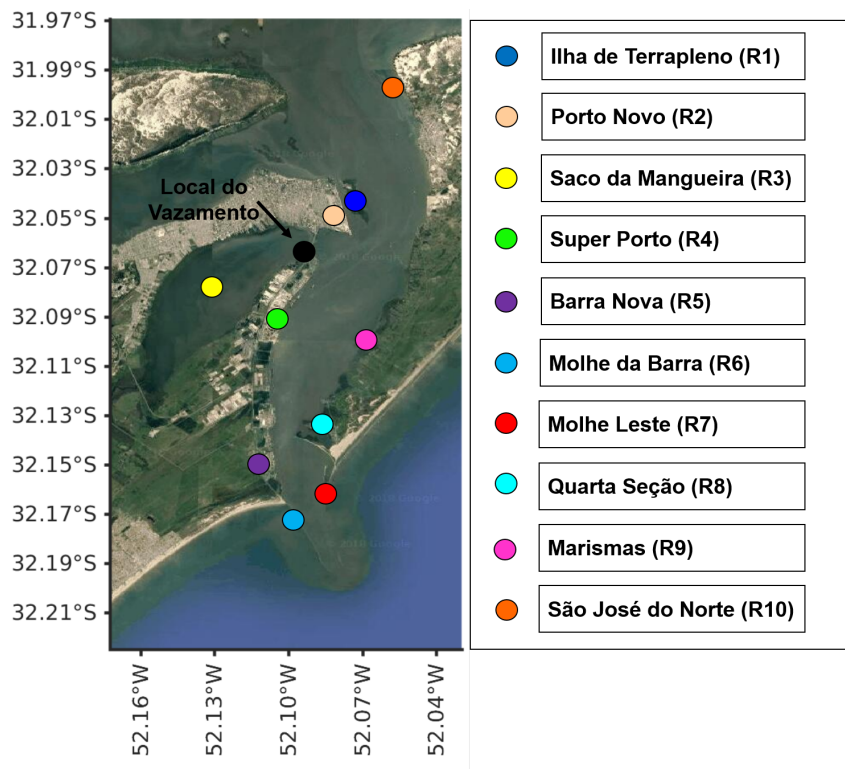


Figura 5.7: Locais com características similares, relacionadas com os pontos de chegada do óleo.

à Ilha de Terraplino (R1) e Barra Nova (R5). Outras porções menores de partículas de óleo chegam a outras regiões, como 6,7% ao Porto Novo (R2), Quarta Seção da Barra (R8) e à cidade de São José do Norte. Outra porção de partículas ainda menor, com cerca de 3,3%, chegam ao Molhe da Barra (R6) e Marismas (R9). Nenhuma porção das partículas de óleo deste período chegaram à região do Molhe Leste (R7).

No período de verão, representado pelas simulações 1, 6, 7 (cor azul na Fig. 5.6), 12,13 (cor variando de ciano para verde limão na Fig. 5.6) e 17 (cor amarelo na Fig. 5.6), pouca variabilidade nos padrões de ventos e correntes foi observada, quando comparado ao inverno.

A simulação 12 possui características de vazante, onde a maior intensidade dos ventos é de quadrante nordeste (NE). A simulação 12 possui intensidade de correntes e ventos de quadrante nordeste (NE) que contribuem para o deslocamento de uma porção de óleo para o interior do Saco da Mangueira (R3), na direção da região industrial da cidade de Rio Grande (RS), e para a encosta do Super Porto (R4).

As simulações 6, 7 e 13 possuem características de vazante alternadas com períodos de enchente. Na simulação 6 a condição de vazante predomina no período inicial, com intensidade de ventos e correntes de quadrante nordeste (NE). Estas condições colaboram para o deslocando do óleo para o interior do Saco da Mangueira (R3), na direção da região industrial, e outra porção de partículas se direciona para a encosta do Super Porto (R4). Depois de um determinado período, a condição de vazante se inverte para a condição de enchente, com intensidade de ventos e correntes de quadrante sudoeste (SO). Nestas condições, as partículas que estão no interior do Saco da Mangueira deslocam-se para o

lado oposto da enseada, chegando a encosta da cidade de Rio Grande.

A mesma condição da simulação 6 ocorre com a simulação 7. Esta simulação ocorre inicialmente com condição de vazante e intensidade de correntes e ventos de quadrante nordeste (NE), concentrando uma porção de óleo na região da Ponte dos Franceses. Depois de um período, inverte-se a condição de vazante para a condição de enchente, com intensidade de ventos e correntes de quadrante sudoeste (SO), as partículas de óleo deslocam-se para a região da Ilha de Terraplano (R1), e outra porção para as praias da cidade de São José do Norte (R10). A simulação 13 é similar a simulação 6, porém as partículas de óleo, além de deslocarem-se também para a região industrial de Rio Grande (R3) e Super Porto (R4), deslocam-se para as regiões de Barra Nova (R5), Molhe da Barra (R6) e Quarta Seção da Barra (R8).

No verão, as simulações 1 e 17 possuem características de enchente. Na simulação 1 a intensidade de ventos e correntes possui um padrão de variabilidade em todos os quadrantes, porém a intensidade de ventos de quadrante sudoeste (SO), combinados com a variabilidade de correntes de quadrante leste (E) e noroeste (NO), contribuem para o deslocamento das partículas de óleo para o interior do Saco da Mangueira (R3), concentrando uma porção de partículas na região da Ponte dos Franceses e outra porção na região da Refinaria de Petróleo Riograndense.

A simulação 17 possui intensidade de ventos do quadrante sudoeste (SO) e sudeste (SE) e correntes em todos os quadrantes, que contribuem para o deslocamento das partículas de óleo para a região da Ilha de Terraplano (R1), Porto Novo (R2) e São José do Norte (R10).

O período de primavera, representado pelas simulações 5 (cor azul na Fig. 5.6), 11 (cor ciano na Fig. 5.6) e 16 (cor amarelo na Fig. 5.6), 20 (cor laranja na Fig. 5.6) e 22 (cor vermelho na Fig. 5.6) possuem variabilidade nos padrões de correntes. As maiores intensidades dos ventos neste período são de quadrante nordeste (NE), e por consequência, contribuem para o transporte do óleo em condições de vazante do estuário. Todas as simulações neste período apresentam condições de vazante.

A simulação 5 possui variabilidade de ventos e correntes, porém a maior contribuição é de quadrante sudeste (SE) que colaboram para o deslocamento do óleo em direção à região do Super Porto (R4), Quarta Seção da Barra (R8) e Marismas (R9). Esta simulação é a única neste período em que as partículas de óleo não chegam ao interior do Saco da Mangueira (R3), devido à variabilidade nos padrões de ventos e correntes.

A simulação 11 possui intensidade de ventos e correntes de quadrante nordeste (NE) e sudeste (SE) e colaboram para o deslocamento das partículas de óleo para o interior do Saco da Mangueira (R3), na encosta da região industrial e bairros da cidade de Rio Grande. Na simulação 16, a intensidade das correntes e ventos são de quadrante nordeste (NE) e contribuem para o deslocamento das partículas de óleo para o Saco da Mangueira (R3) na região industrial. Uma porção de partículas desloca-se para o Super Porto (R4) e Barra Nova (R5).

A simulação 20 é diferente das demais, embora configure condição de vazante. No período inicial da simulação, com intensidade de ventos e correntes de quadrante nordeste (NE), como na simulação 16, as partículas de óleo deslocam-se para a região industrial no Saco da mangueira (R3) e Super Porto (R4). Depois de um período, as correntes e os ventos modificam o sentido do transporte do óleo para o quadrante sudeste (SE), e as

partículas de óleo dentro da enseada deslocam-se para a direção oposta, chegando a cidade de Rio Grande. Na simulação 22 verifica-se a mesma condição da simulação 16.

Nas estações de outono e inverno são observados que 47,2% das partículas de óleo chegam ao interior do Saco da Mangueira (R3). Ainda nestas estações, existe à probabilidade de que 14,7% das partículas de óleo cheguem a região do Super Porto (R4). Outras porções menores de partículas de óleo chegam a outras regiões, como 5,3%, que chegam à Ilha de Terraplano (R1), Porto Novo (R2), Barra Nova (R5), Molhes da Barra (R6) e Leste (R7), Quarta Seção da Barra (R8) e à cidade de São José do Norte. Nenhuma porção das partículas de óleo deste período chegam à região de Marismas (R9).

No período de inverno, representado pelas simulações 4 (cor azul escuro na Fig. 5.6), 9 (cor azul turquesa na Fig. 5.6), 10 (cor ciano na Fig. 5.6), 15 (cor amarelo na Fig. 5.6) e 21 (cor laranja na Fig. 5.6) possui variabilidade nos padrões de ventos e correntes, mas alta descarga dos afluentes nestes períodos contribuem para o confinamento dos vazamentos no interior do estuário, mesmo em eventos de enchente.

As simulações 4, 10 e 21 possuem características de vazante. Na simulação 4 a intensidade de correntes possui variabilidade em todos os quadrantes, mas as correntes que contribuem para o deslocamento das partículas de óleo são de quadrante leste (E) e noroeste (NO), combinadas com a ação dos ventos no quadrante de sudoeste (SO), que auxiliam para o deslocamento das partículas de óleo para o Saco da Mangueira (R3), na encosta da cidade de Rio Grande. Na simulação 10, a intensidade de correntes e ventos de Nordeste (NE) deslocam as partículas de óleo para o interior do Saco da Mangueira e as mesmas condições ocorrem com a simulação 21.

As simulações 9 e 15 possuem características de enchente. A simulação 9 possui intensidade de ventos e correntes de quadrante de sudoeste (SO) onde uma porção de partículas ficam na região da Ponte dos Franceses, outras porções deslocam-se para Porto Novo (R2) e Ilha de Terraplano (R1), e uma outra porção de partículas de óleo chegam as praias de cidade de São José do Norte. Na simulação 15, o sentido das correntes e dos ventos são de quadrante sudeste (SE) e colaboram para as partículas de óleo deslocarem-se para o interior do Saco da Mangueira (R3).

No período de outono, representado pelas simulações 3 (cor azul claro na Fig. 5.6), 4 (cor azul na Fig. 5.6), 8 (cor azul escuro na Fig. 5.6), 20 (cor verde limão na Fig. 5.6), 18 (cor verde na Fig. 5.6), 18 (cor laranja claro na Fig. 5.6) e 19 (cor laranja claro escuro na Fig. 5.6) ocorre a condição de vazante, com variabilidade da intensidade das correntes e ventos maiores que às demais estações.

Na simulação 3, a intensidade de correntes e ventos de quadrante sudoeste (SE) colaboram para o deslocamento do óleo para interior do Saco da Mangueira (R3). Na simulação 8 ocorre a mesma condição que a simulação 3. Na simulação 14, a intensidade dos ventos e correntes possuem variabilidade em todos os quadrantes, onde a contribuição dos ventos de quadrante leste (E) e correntes de sudoeste (SO) auxiliam no transporte de uma porção da partículas de óleo para o interior do Saco da Mangueira (R3). Outra porção segue para a região do Super Porto (R4), Barra Nova (R5), Molhe da Barra (R6) e Marismas (R8).

Na simulação 18, a intensidade de ventos e correntes são de quadrante nordeste (NO) e colaboram com o transporte do óleo para o interior do Saco da Mangueira (R3) e uma pequena porção para a região do Super Porto (R4). Na simulação 19 ocorre a mesma

condição da simulação 14, porém as partículas de óleo não chegam a região de Barra Nova (R5), Molhe da Barra (R6) e Marismas (R8). Nesta condição, o alcance máximo das partículas de óleo é até a região do Super Porto (R4).

As simulações 7 (verão) e 9 (inverno), influenciadas pela condição de enchente, apresentaram as maiores distâncias percorridas pelas partículas de óleo de aproximadamente 20.000 m durante 24 h, com a velocidade de correntes médias de 0.2 m s^{-1} , e com as partículas mais distantes deslocando-se para a encosta das praias de São José do Norte. As simulações 13 (verão) e 14 (outono), influenciadas pela condição de vazante, apresentaram as maiores distâncias percorridas pelas partículas de óleo, de aproximadamente 14.000 m durante 24 h, com a velocidade de correntes médias de 0.4 m s^{-1} , e com as partículas mais distantes deslocando-se para a saída dos Molhes da Barra e Leste.

Alguns estudos identificaram a variabilidade no deslocamento das partículas de óleo utilizando simulações numéricas, como Alves *et al.* (2015) que modelaram uma série de vazamentos hipotéticos de óleo no Mar Mediterrâneo Oriental. O volume total de óleo liberado foi de 55,8 mil barris e um total de 104 simulações de vazamento de óleo foram calculadas para 11 locais diferentes na Bacia Levantine, mostrando a chegada do óleo ao litoral de Cyprus, entre 4 e 7 dias nas condições de verão.

Asl *et al.* (2017) propuseram um método para estimar o tempo de permanência do óleo na superfície. O derrame de óleo cru foi simulado na região *Green Canyon*, no Golfo do México, com condições de vento fraco e corrente forte. Os vazamentos produziram manchas de óleo maiores que 20 km e persistiram por um período de 48 h. Bozkurtoglu (2017) propôs um modelo numérico de vazamento de óleo na região do estreito de Bosphorus, na Turquia. As simulações indicaram que o óleo derramado atingiu o litoral, em ambos os lados de Bosphorus, em menos de 4 h após o vazamento.

Os estudos de Alves *et al.* (2015), Asl *et al.* (2017) e Bozkurtoglu (2017) mostraram a importância de monitorar tempo e o deslocamento das partículas de óleo e a chegada até a região litorânea, a fim de desenvolver um plano de resposta à contaminação, e geração de planos de contingência em caso de acidentes com vazamentos de óleo.

A Fig. 5.8 apresenta uma análise do percentual de influência dos mecanismos de forçantes (correntes e ventos) para o transporte das partículas de óleo e sua relação com a vazão média. Essa análise do percentual foi realizada através de dados das forçantes obtidas em cada simulação hidrodinâmica. As simulações possuem maiores influências dos ventos de quadrante nordeste (NE), que contribuem no deslocamento das partículas de óleo para a região do Saco da Mangueira (R3). As correntes são dominantes quando os afluentes possuem menores vazões, durante o verão.

5.3 Concentração dos vazamentos e tempo de chegada das partículas de óleo.

A Fig. 5.9 apresenta a concentração dos vazamentos de óleo em ml m^{-2} . Quanto mais escuras as cores, maior a concentração da contaminação por óleo. As maiores concentrações de óleo ocorrem no interior do Saco da Mangueira (R3), Ilha de Terrapleno (R1) e na cidade de São José do Norte (R10).

A Fig. 5.9 também identifica o tempo de chegada das partículas de óleo na encosta das regiões identificadas na Fig. 5.7, para o período de 24 h, posteriormente na ocorrência de vazamentos de óleo. Esta análise auxilia para tomada de decisão e planos de contingência

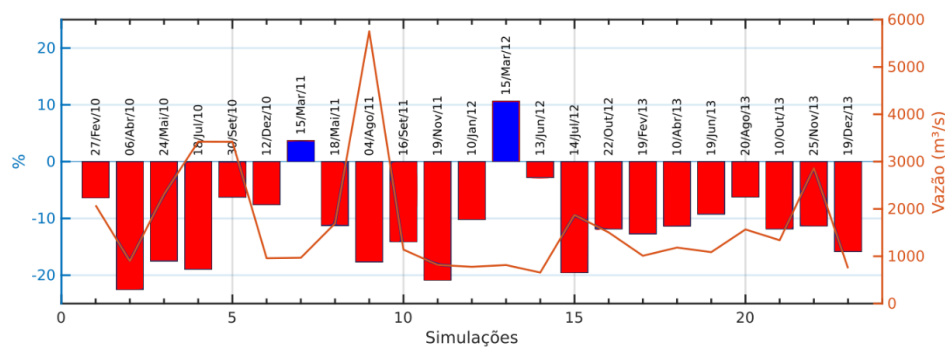


Figura 5.8: Análise da influência das correntes (representado pela barra azul) e ventos (representado pela barra vermelho) no deslocamento das partículas de óleo para todas as simulações e a vazão climatológica (representado pela linha laranja).

em tempo hábil. Ainda nesta seção serão identificados os índices de sensibilidade do litoral (ISL'S), quanto à sensibilidade ao óleo, de acordo com o estudo realizado por Nicolodi (2016) para a Lagoa dos Patos e o litoral do Rio Grande do Sul.

As partículas de óleo atingem o interior do Saco da Mangueira (R3), o sul do Porto Novo (R2) e o norte do Super Porto (R4) em 1 h, onde as primeiras regiões atingidas são as extremidades da Ponte dos Franceses. De acordo com Nicolodi (2016), as regiões localizadas nas extremidades da Ponte dos Franceses possuem dois índices de sensibilidade do litoral (ISL), quanto à sensibilidade ao óleo. O ISL 2 e ILS 5 destas regiões são devido à existência de terraços, conforme a Tab. 3.3. Desde que haja a contaminação por óleo em terraços (sedimentos inconsolidados), de acordo com Doshi *et al.* (2018), existe a probabilidade de 13% do óleo permanecer nestes sedimentos.

O Saco da Mangueira (R3) é a região mais afetada pelo vazamento de óleo e possui quatro ISL'S (Nicolodi, 2016), conforme a Tab. 3.3. O ISL 1 e ISL 2 são delimitados por um estreito comprimento (Fig. 3.8) na região da enseada e devem-se à existência de costões rochosos e lisos, e a diferença entre os ISL'S são decorrentes dos graus de declividade da rocha.

O ISL 4 compreende a extensão que está localizada na região da cidade de Rio Grande-RS, e esta região possui praias arenosas, onde o fator que classifica este ISL é a variação do tamanho dos sedimentos e a exposição da praia. O ISL 10 é o índice mais alto de contaminação, e a maior parte da enseada possui este índice, que abrange toda a região industrial de Rio Grande, onde esta classificação é devido à região constituir um brejo alagadisso e salobro. Porém no intervalo de 2 h a 6 h, o óleo atinge à região de ISL 1, 2 e 10, e após às 6 h, o óleo atinge à região de ISL 4 e continua chegando às regiões dos demais ISL'S.

Ainda dentro do período de 2 h, uma porção do óleo desloca-se para o sul do Porto Novo (R2), e outra para o norte do Super Porto (R4). De acordo com Nicolodi (2016), essas regiões, quanto à sensibilidade ao óleo, apresentam o menor índice (ISL 1), pois possuem estruturas artificiais lisas e expostas (paredões marítimos artificiais).

Na Ilha de Terraplino (R1), as partículas de óleo chegam a região em menos de 2 h. Esta região de acordo com o mapa PEL-114 de Nicolodi (2016) é considerada sensível e possui ISL 10, pois trata-se de terraços alagadiços de margens de lagoa. Ainda dentro deste período, o óleo continua deslocando-se para o interior do Saco da Mangueira (R3).

De acordo com Nicolodi (2016), o segmento que compreende São José do Norte (R10) é uma das regiões mais sensíveis da Lagoa dos Patos, devido à presença de praias arenosas, e por possuir três índices de sensibilidade, conforme o mapa operacional PEL-114. As partículas de óleo atingem os limites desta região após 3 h de vazamento. A região é caracterizada por costões rochosos lisos, com ISL 1 e ISL 2, e praias arenosas expostas, com ISL 4.

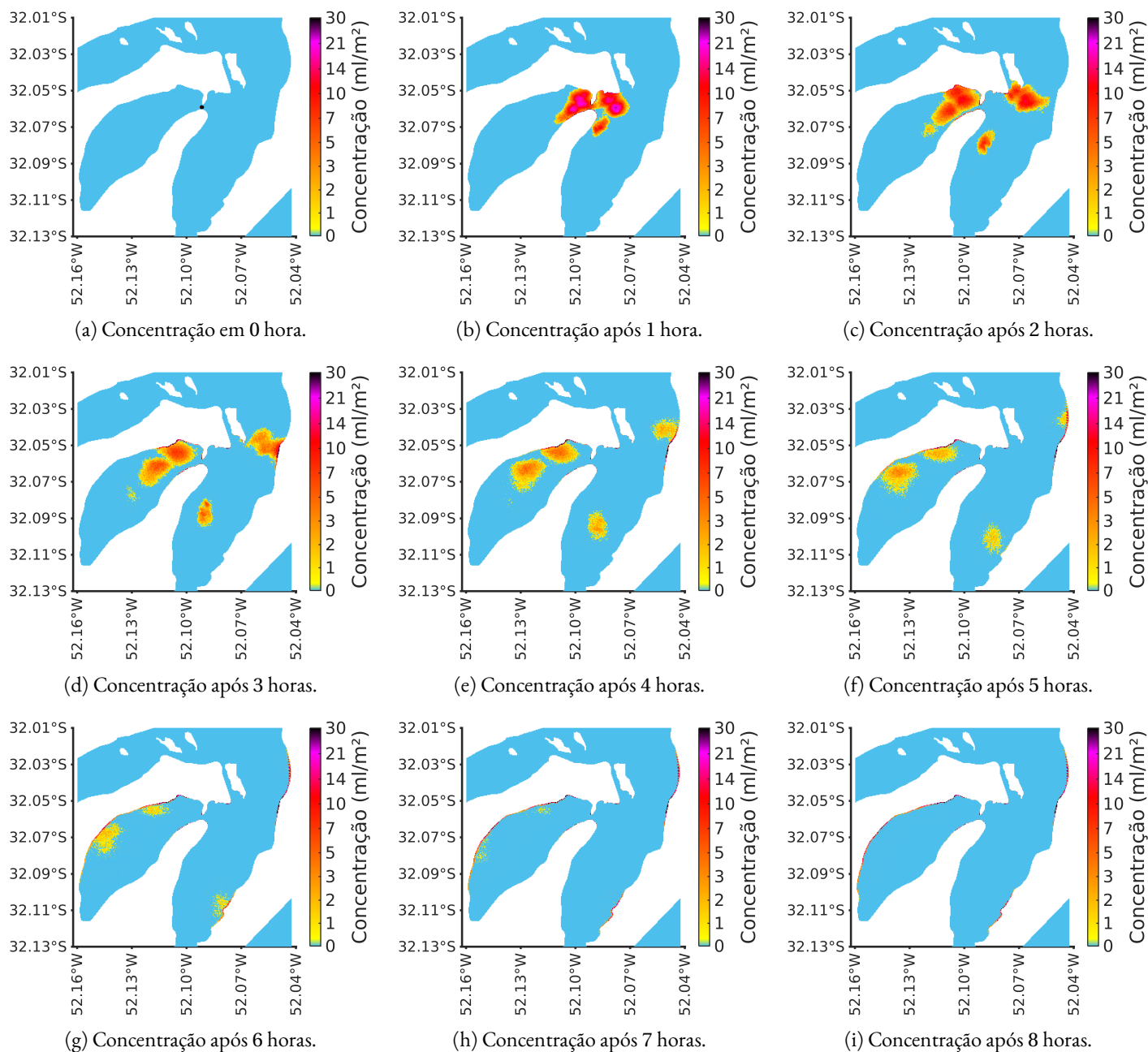


Figura 5.9: Pannel temporal representando à concentração em ml m^{-2} de óleo.

Para a região de Marismas (R9), a chegada do óleo ocorre a partir das 5 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 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. O estuário da Lagoa dos Patos tem cerca de 70 km das margens e ilhas recobertos por marismas irregularmente alagadas, constituindo 93% dos marismas do litoral gaúcho.

A partir das 7 h as partículas de óleo continuam chegando as regiões do Saco da Mangueira (R3), Marismas (R9) e São José do Norte (R10), porém depois das 10 h a concentração da contaminação de óleo é pouco significativa ($> 0.05 \text{ ml m}^2$) e não aparece na Fig. 5.9.

Shami *et al.* (2017) avaliaram os riscos de vazamentos no mar mediterrâneo usando três métricas diferentes: ISL, volume de óleo vazado, e tempo de chegada do óleo no litoral de Cagliari na Itália, e em Beirute no Líbano. Os resultados indicam que embora os três índices tenham concordado amplamente quando a morfologia no litoral é simples, foram encontradas diferenças consideráveis de perigos quando a morfologia no litoral é complexa. Essas diferenças afetam a quantificação do risco, destacando a necessidade de examinar os perigos da contaminação de óleo.

Ha (2018) realizaram um estudo no litoral da Coreia avaliando o risco de vazamento de óleo usando fatores de causas ambientais e econômicas. O peso de cada parâmetro foi calculado usando o *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Os graus regionais de risco final de vazamentos de óleo foram estimados pela combinação do grau e peso de cada parâmetro existente. A partir desses riscos foram estimados níveis de capacidades de recuperação de 7500 kl de óleo. As estimativas foram consideradas viáveis e proporcionaram uma distribuição de recursos equilibrado, com relação os recursos existentes definidos de acordo com os padrões atuais.

Os vazamentos de óleo causam um grande impacto nos ambientes marinhos e costeiros (Jackson e Apel, 2004), onde representam um risco de poluição para todas as atividades costeiras, como pesca, turismo e lazer realizadas no Saco da Mangueira (R3), conforme Monteiro *et al.* (2006), e para o ecossistema local, como Marismas (R9).

Por essa razão, várias políticas necessitam ser estabelecidas para evitar acidentes com vazamentos de óleo e contramedidas efetivas para minimizar os danos causados em caso de acidentes. As contramedidas caso ocorra acidente devem ser otimizadas de acordo com as características morfológicas da região. As considerações apresentadas, através do ISL é um modelo de resposta personalizado para lidar com eficiência em situações de vazamentos no estuário da Lagoa dos Patos.

5.4 Intemperismo

Após o vazamento ocorrem alterações físico-químicas e biológicas no óleo que modificam as suas características iniciais em determinados intervalos de tempo. O conjunto de alterações é denominado de intemperismo e o conhecimento dos processos auxilia para tomada decisões em relação à contenção e limpeza do óleo derramado em água (Bollmann *et al.*, 2010).

As alterações do intemperismo no óleo estão diretamente relacionadas às condições ambientais locais e não-locais, como: a velocidade do vento, temperatura da água, altura das ondas, salinidade, misturas turbulentas, características físico-químicas do óleo e volume derramado. Alguns pesquisadores estimam que 20% do óleo evaporara, 50% biodegrada, 14% pode ser retirado do ambiente marinho, 13% permanece em sedimentos, 2% permanece em limites costeiros e menos de 1% permanece na água (Doshi *et al.*, 2018).

A taxa de intemperismo não é constante, porém é mais efetiva nas primeiras horas do vazamento. Os processos de espalhamento, evaporação, dispersão, emulsificação e dissolução são mais efetivos nas primeiras horas do vazamento, enquanto a oxidação, sedimentação e biodegradação ocorrem em um período de tempo maior. Após um período na água, o óleo modifica suas características iniciais, aumentando a massa específica, viscosidade e sua persistência no ambiente, conforme Bollmann *et al.* (2010) e Doshi *et al.* (2018).

Os óleos mais leves são voláteis e podem evaporar rapidamente na superfície da água, onde alguns componentes do óleo podem serem quebrados pela luz solar, através de reação fotoquímica, e outros podem serem biodegradados por micróbios e bactérias (Farrington, 2014). No entanto, os óleos viscosos e pesados, como petróleo bruto e óleo combustível pesado, que não podem serem evaporados facilmente, podem formar camadas espessas na superfície da água, causando ameaça significativa às aves, mamíferos, peixes e crustáceos.

Assim, o óleo derramado espalha-se na superfície da água formando uma camada fina, onde alguns componentes mais leves evaporam enquanto alguns componentes solúveis em água se dissolvem, e outros transformam-se em gotículas através da ação das ondas formando emulsão (Doshi *et al.*, 2018).

Para analisar o intemperismo das 22 simulações, foram utilizados quatro parâmetros: emulsificação, evaporação, massa específica e massa de óleo, conforme Stringari *et al.* (2012), Stringari (2014), Marques *et al.* (2017), Monteiro *et al.* (2018). O tempo de análise dos resultados para as 22 simulações ficou limitado em 24 h. O tempo de chegada das partículas de óleo nos limites da região estuarina é relativamente pequeno, pois trata-se de uma região com dimensões pequenas, quando comparado à regiões de outros trabalhos, conforme Marques *et al.* (2017) e Monteiro *et al.* (2018), pois em regiões que possuem dimensões maiores, o óleo tem maior tempo de deslocamento e permanência, até chegar ao litoral.

5.4.1 Emulsificação

A emulsificação é caracterizada pela dispersão coloidal entre dois líquidos imiscíveis, onde as gotículas da fase dispersa estarão suspensas na fase contínua. Neste caso, o tipo de emulsão é do óleo em água (O/A), devido a influência da intensidade dos ventos e correntes na região de estudo. Esta contribuição configura este cenário como fase dispersa, ou seja, a