

# MODELAGEM NUMÉRICA DA REPRODUTIBILIDADE DE DERRAME DE ÓLEO BUNKER DURANTE OPERAÇÃO DE ABASTECIMENTO DE EMBARCAÇÃO

## NUMERICAL MODELING OF REPRODUCIBILITY OF A BUNKER OIL SPILL DURING VESSEL SUPPLY OPERATION

Caroline Barbosa Monteiro<sup>1</sup>  
Phelype Haron Oleinik<sup>2</sup>  
Bruno Lopes Vasconcellos<sup>2</sup>  
Juliana Costi<sup>3</sup>  
Eduardo de Paula Kirinus<sup>4</sup>  
Wiliam Correa Marques<sup>5</sup>

**Resumo:** Regiões costeiras podem apresentar alta suscetibilidade a derramamentos de óleo, devido ao intensificado transporte e manuseio de combustíveis em áreas portuárias, por exemplo. Derrames de óleo ambiente marinho podem gerar efeitos crônicos em curto, médio e longo prazo, justificando a modelagens desses eventos. O deslocamento e o intemperismo partículas de óleo na água foram avaliados por simulação numérica de reprodutibilidade de um derrame de óleo marítimo *bunker* em um Terminal de Petróleo e derivados em uma zona estuarina. Foi utilizada a configuração acoplada do modelo ECOS (Easy Coupling Oil System) ao código fonte do modelo hidrodinâmico tridimensional Telemac3D. Tal configuração possibilitou a transferência de resultados hidrodinâmicos para o modelo de óleo, permitindo assim o cálculo das trajetórias e do comportamento das partículas de óleo. Os resultados hidrodinâmicos foram analisados em termos dos campos de velocidade de correntes e elevação da superfície livre do mar, e pela análise de séries temporais da elevação da superfície associada a análise das principais forçantes físicas atuantes na área de estudo. A contribuição da velocidade de ventos representou cerca 60% e a intensidade de correntes aproximadamente 10% dos processos simulados. Os resultados apontam boa equivalência entre as informações simuladas e as observações realizadas em campo, no relatório de emergência ambiental do acidente. Tal similaridade entre dados modelados e informações

<sup>1</sup> Doutoranda em Oceanografia, Instituto de Oceanografia. Universidade Federal do Rio Grande Campus Carreiros, Av. Itália s/n Km 8, CEP 96201-900, Brasil.

<sup>2</sup> Mestrando em Engenharia Oceânica, Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande Campus Carreiros, Av. Itália s/n Km 8, CEP 96201-900, Brasil.

<sup>3</sup> Pesquisadora pós doutoranda, Instituto de Matemática, Estatística e Física. Universidade Federal do Rio Grande Campus Carreiros, Av. Itália s/n Km 8, CEP 96201-900, Brasil.

<sup>4</sup> Pesquisador pós doutorando, Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande Campus Carreiros, Av. Itália s/n Km 8, CEP 96201-900, Brasil.

<sup>5</sup> Professor Adjunto, Instituto de Matemática, Estatística e Física. Universidade Federal do Rio Grande Campus Carreiros, Av. Itália s/n Km 8, CEP 96201-900, Brasil.

coletas em campo para o acidente apontam a competência do sistema de modelagem utilizado em reproduzir situações realísticas de derrames de óleo.

**Palavras-chave:** Telemac3D. ECOS. Reprodutibilidade de derrames de óleo. Suscetibilidade.

**Abstract:** Coastal sites may be highly susceptible to oil spills, due to the increased transportation and handling of fuels in port areas, as an example. Spills of marine environment oil can generate chronic effects in the short, medium and long term, justifying the modeling of these events. The displacement and degradation of oil particles in the water were evaluated by numerical simulation of reproducibility of a maritime oil spill bunker at an oil Terminal and derivatives in an estuarine zone. To run the simulations was used the coupled configuration of the ECOS (Easy Coupling Oil System) model in the three-dimensional hydrodynamic model Telemac3D source code. This configuration allowed the transfer of hydrodynamic results to the oil model, thus allowing the calculation of the trajectories and the behavior of the oil particles. The hydrodynamic results were analyzed in terms of the velocity fields of currents and elevation of the free surface of the sea and the analysis of time series of the elevation of the surface associated with the analysis of the main physical forces acting in the study area. The contribution of the wind speed meant about 60% and the currents intensity approximately 10% of simulation forcings. The results indicate appropriate equivalence between the simulated information and the observations from the field by the environmental emergency report of the accident. Such similarity between modeled data and field information collected for the accident points to the competence of the modeling system used to reproduce realistic situations of oil spills.

**Keywords:** Telemac3D. ECOS. Reproducibility of oil spills. Susceptibility.

## 1 INTRODUÇÃO

O petróleo é a principal fonte das matrizes energéticas de muitos países e a maior parte de sua produção mundial é transportada pelos oceanos. Além do seu principal uso como combustível, o petróleo também é insumo para a produção de polímeros, como embalagens, materiais de construção, tecidos, impermeabilizantes, pneus, entre outros materiais necessários às atividades econômicas.

Parte dos derrames de óleo no mar pode ocorrer afastada das áreas costeiras, entretanto, a poluição resultante pode ser transportada para o litoral pelas correntes oceânicas e os pelos ventos superficiais (Marta-Almeida et al., 2013).

Nas zonas costeiras, as áreas de atividades portuárias, petrolíferas e de operações de manuseio e transporte de combustíveis estão entre as regiões mais suscetíveis a derrames de óleo, e são geralmente próximas de zonas sensíveis como estuários, mangues e marismas (Tansel, 2014).

Em conformidade com a legislação brasileira, as simulações numéricas de derrames de óleo têm sido utilizadas na definição da área de influência de atividades com suscetibilidade de poluição por hidrocarbonetos, informação essencial para a regulação e normatizações ambientais do setor.

Uma estratégia à realização dessas simulações numéricas é a reprodutibilidade de derrames realísticos de óleo. Tal artifício foi utilizado no presente estudo, e consistiu na reprodução de um vazamento ocorrido no Terminal de Petróleo e Derivados de Rio Grande - TERIG, região do Superporto de Rio Grande, município de Rio Grande (RS). O vazamento ocorreu durante uma das operações de abastecimento do navio *Baltic Champion*, com combustível do tipo *bunker* (classificado como MF 380), paralelamente à operação de descarga de petróleo para o terminal, atividade recorrente e com alta probabilidade de riscos de vazamentos, seja por falhas em equipamentos como pelo erros humanos inerentes.

Sendo assim, o principal objetivo deste trabalho é avaliar as taxas de degradação e as forçantes meteorológicas e oceânicas responsáveis pela trajetória das partículas de óleo para o derrame.

## 2.1 Óleo ao mar

O aporte de hidrocarbonetos no ambiente marinho é marcado por um padrão de distribuição irregular, de forma concordante com a variabilidade das origens de suas fontes.

O padrão irregular de liberação de óleo no mar tende a dificultar a delimitação de zonas de alcance de manchas de óleo bem como os níveis de suscetibilidade dos diferentes elementos dos compartimentos ambientais que são sensíveis aos efeitos do óleo, intervindo negativamente também nas estimativas das vulnerabilidades e dos riscos ambientais envolvidos.

Analisando as principais causas dos acidentes ambientais da exploração, produção e refino de petróleo nos oceanos e zonas costeiras globais, a ITOPF (2017) apresenta estatísticas recentes para as principais fontes destes eventos, sendo 33% decorrentes de encalhes, 29% de colisão, 13% de falha em casco, 12% de acidentes com fogo e explosões, 4% de falhas em equipamentos e 9% de origem desconhecida.

O transporte de hidrocarbonetos em embarcações está entre as mais prováveis fontes de risco. Os registros mais comuns de ameaças com embarcações envolvem navios petroleiros (*tankers*), principalmente os casos de falhas operacionais em atividades rotineiras, como a transferência e o abastecimento de óleo em portos e terminais de produção.

Derrames de óleo no mar podem ocasionar impactos ambientais negativos, sobretudo porque grande parte das regiões mais suscetíveis ao óleo coincidem com áreas ambientalmente mais vulneráveis, resultando impactos como a redução na riqueza e alteração na composição de espécies.

A Plataforma Continental Sul do Brasil (PCSB) apresenta áreas de prováveis riscos aos acidentes com óleo. A exemplo, Nicolodi e Pettermann (2011) indicaram áreas críticas como a Lagoa dos Patos, sobretudo a região do

complexo lagunar do Guaíba em que estão situadas a região metropolitana de Porto Alegre e o Pólo Petroquímico de Triunfo. Tal região recebe grande parte do petróleo desembarcado nas monoboias de Tramandaí (RS) e dos derivados de petróleo transportados pela hidrovia Rio Grande - Porto Alegre. Segundo os autores, essa região é classificada como extremamente frágil aos acidentes com óleo, tanto em função das suas características geológicas e dinâmica peculiar de circulação da água, quanto pelos processos de ressuspensão de sedimentos.

Alguns autores simularam diferentes eventos de derrames de óleo em alguns pontos na costa do Rio Grande do Sul e na região estuarina da Lagoa dos Patos, constatando que o transporte das manchas de óleo tende a acompanhar as oscilações de nível da Lagoa dos Patos e da superfície do mar, forçados especialmente pela descarga fluvial e pelo padrão clássico de circulação costeira atuantes na região (Janeiro, 2008; Stringari, 2013, Marques, 2017; Lopes et al., 2017).

Portanto, o melhor entendimento dos processos que ocorrem com o óleo no mar, sejam tipicamente advectivos relativos ao transporte de partículas, quanto mais difusivos e turbulentos, demanda aproximações mais refinadas do destino e intemperismo de uma mancha de óleo após os variados tipos de acidentes seguidos pela liberação de hidrocarbonetos na água.

### **2.1.1 Transporte e degradação do óleo**

Uma vez que o óleo é derramado no mar, uma série de processos de naturezas física, química e biológica começam a ocorrer, promovendo tanto o transporte do óleo quanto o intemperismo das manchas, encarregado pela disponibilização de hidrocarbonetos na coluna d'água.

Variações nas taxas dos processos intemperismo, tais como emulsificação e evaporação, são sensíveis ao tipo e a idade do óleo e aos fatores ambientais, como velocidade do vento, temperatura, altura de ondas, salinidade e misturas turbulentas no oceano (Mariano et al., 2011).

A emulsificação é o processo de formação de emulsões do tipo água em óleo ou do tipo óleo em água. Diferentemente dos demais processos de degradação, a emulsificação tende a ampliar a área da mancha, pela incorporação de água em meio as partículas de óleo. Também contribui para a geração das alterações consideráveis nas propriedades das manchas de óleo. Emulsões mais estáveis podem conter entre 50 e 80% de partículas de água incorporada às partículas de óleo, resultando em expansões do volume das manchas que podem elevar o raio de atuação do volume de óleo em até cinco vezes o seu volume original (Fingas e Fieldhouse, 2003).

A evaporação é outro processo relevante no estudo do balanço de massa final do óleo. Permite a retirada da maior parte das frações voláteis de óleo em poucas horas após o derrame, sendo influenciada principalmente pela velocidade do vento e pelo tamanho da área do derrame (Fingas, 1999).

As taxas de evaporação oscilam em função de acréscimos de turbulência, velocidade do vento e área superficial da mancha de óleo (Fingas, 1997). Assim como na emulsificação, os processos de misturas físicas forçados pela turbulência das águas superficiais do oceano também são importantes. Características como volatilidade, viscosidade, densidade dos óleos também podem auxiliar no estudo da evaporação (Mariano et al., 2011).

## **2 METODOLOGIA**

Com intuito de simular os processos oceanográficos que ocorrem na região costeira próxima da área de estudo, o domínio computacional, devidamente calibrado e validado, agrupou uma área superior (maior que 300km<sup>2</sup>) a da região específica do estudo. Esta configuração também minimiza os problemas nas soluções das equações nas áreas das bordas, além de fornecer condições de pista para simulação dos efeitos remotos dos ventos na plataforma, conforme as recomendações de Csanady (1982).

As simulações foram realizadas pela configuração acoplada do modelo numérico hidrodinâmico tridimensional Telemac3D ([www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org)) e do modelo ECOS (Easy Coupling Oil System - [www.lansd.furg.br](http://www.lansd.furg.br)) para a

simulação do vazamento de óleo de 14 de outubro de 2010, ocorrido no Terminal de Petróleo e Derivados de Rio Grande (TERIG).

O ponto de partida da simulação (32°04'38,91"S/52°05'34.57"W) foi obtido do relatório de emergência ambiental elaborado pelo Serviço de Emergência Ambiental (SEAMB, 2010) da FEPAM. O relatório apresenta descrição do evento de vazamento e dos procedimentos de resposta realizados para o mencionado vazamento de óleo *bunker* no canal da Laguna dos Patos, durante uma operação de abastecimento da embarcação *Baltic Champion*.

A escolha do presente caso de estudo foi guiada pela ocorrência do evento em uma das zonas mais suscetíveis ao óleo da PCSB, as quais também agrupam compartimentos ambientais de alta sensibilidade.

Os resultados do presente estudo de caso também poderão contribuir com posteriores investigações de risco ao óleo em áreas sensíveis da PCSB, área de dinâmica peculiar e usos ou interesses conflitantes.

## **2.1 Área de estudo**

A região de estudo está inserida na PCSB (Figura 1). Localizada em plataforma continental de contorno oeste tem padrão de correntes costeiras intensas e de grande variabilidade em meso-escala, geradas por variações batimétricas ou por fatores meteorológicos, como ação dos ventos locais. Apresenta comportamento típico de micro marés, e as intensidades e direções dos ventos e suas interações com a topografia do fundo estão entre os fatores que ordenam os padrões de circulação costeira (Möller Jr et al., 2001; Castelão e Möller Jr, 2006).

Os padrões de circulação da Lagoa dos Patos foram amplamente estudados. Entre as principais conclusões está a de que a descarga fluvial, efeitos locais e remotos dos ventos são as principais forçantes no controle dos gradientes de pressão e dos processos de troca (Möller Jr et al., 2001; Marques et al., 2014).

Com respeito à dinâmica de fluídos geofísicos, o vento é a forçante dominante da circulação oceânica superficial, dispersando energia pela tensão

de cisalhamento superficial (Kundu e Cohen, 2002). Tal efeito do vento também é notado na PCSB, em que suas direções e velocidades estão entre os principais efeitos necessários à formação de correntes costeiras.

Segundo Rubert et al. (2006) o padrão dos ventos na PCSB sofre a influência do Anticiclone do Atlântico Sul, sobretudo nos meses de primavera e verão, quando ocorrem as maiores intensidades das velocidades dos ventos.

O número de derrames de óleo na PCSB tem aumentado na última década. Conforme o mapeamento nacional de sensibilidade ao óleo, a região do estudo está entre os territórios da PCSB com os maiores índices de sensibilidade litorânea ao óleo e seus derivados (IBAMA, 2002).

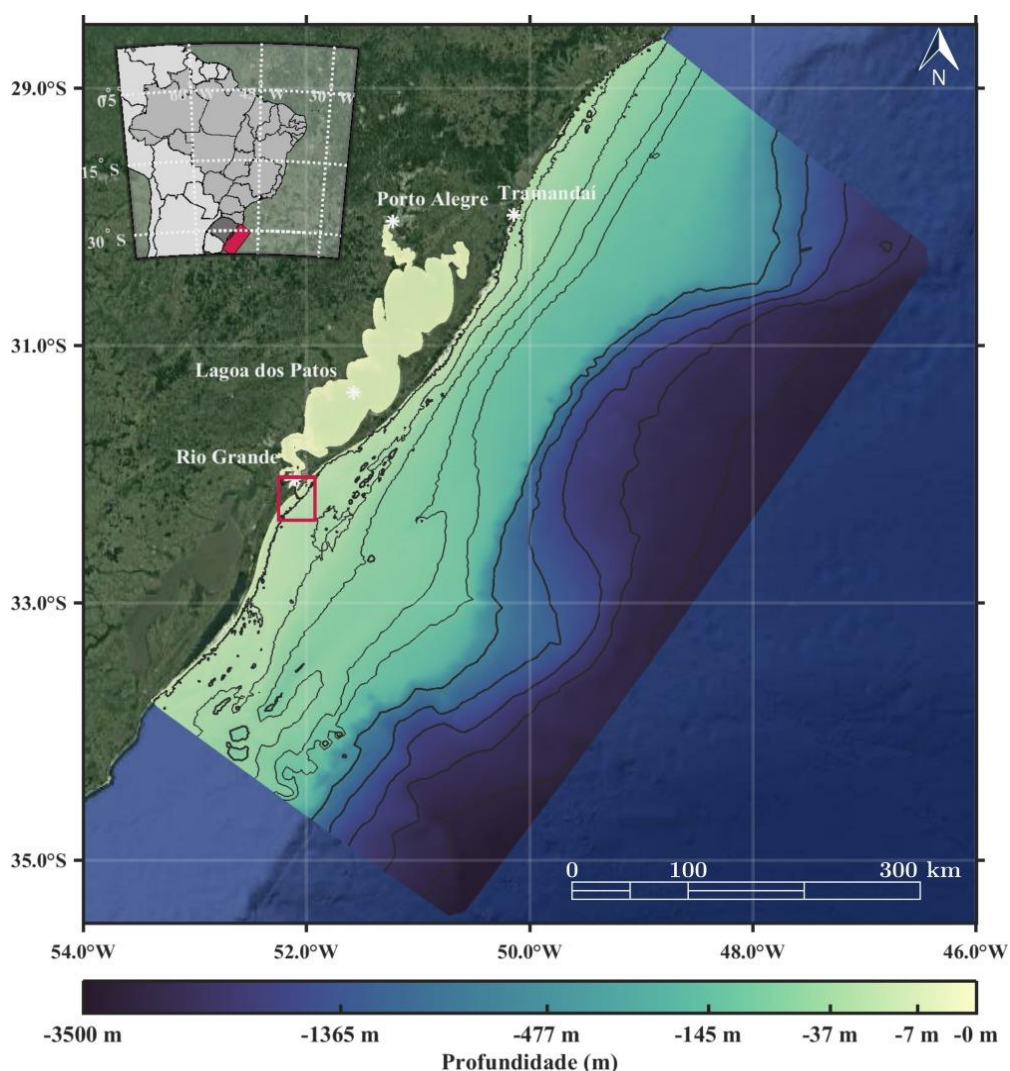


Figura 1: Localização da área de estudo na Plataforma Continental Sul do Brasil (PCSB), representada sobre uma imagem do Google Earth©. O domínio computacional abrange a área onde está representada a batimetria local, e como retângulo vermelho indicando a região de estudo da simulação de óleo.

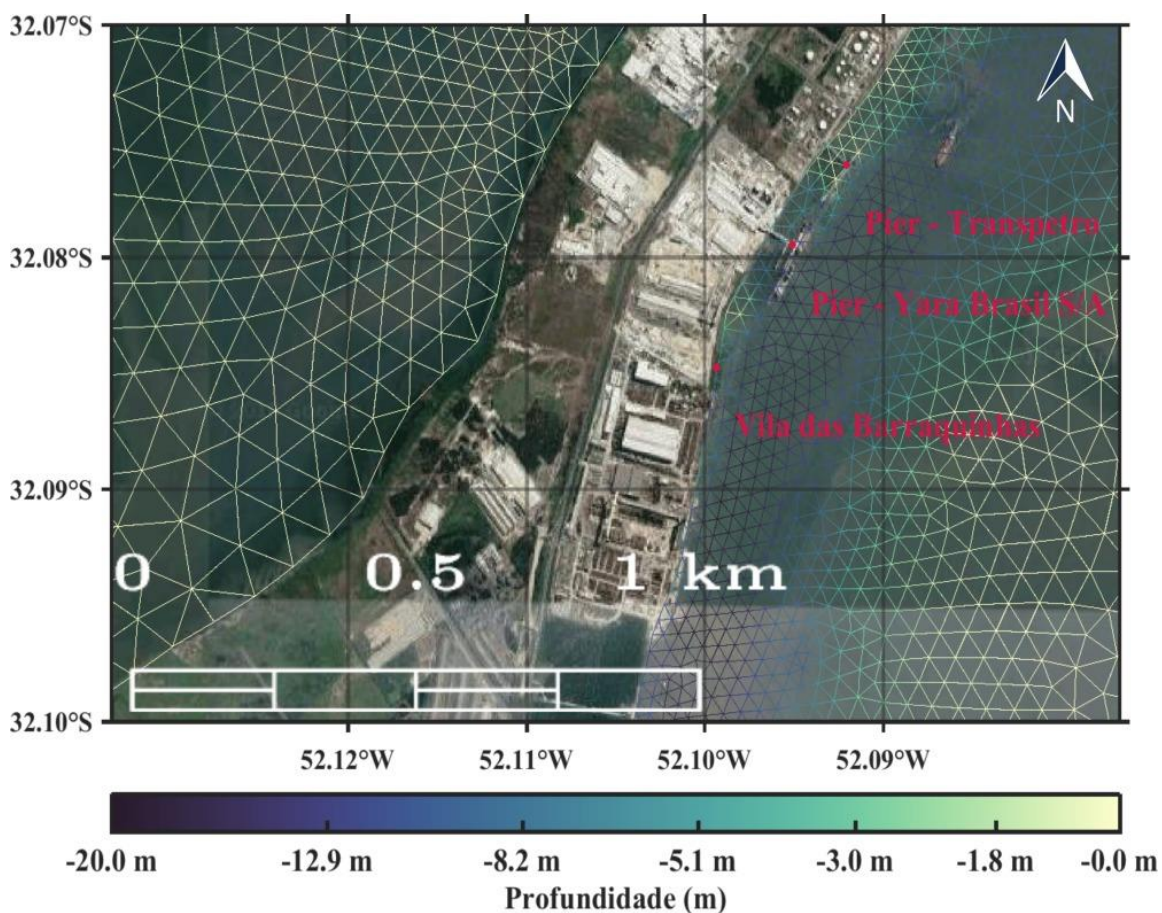


Figura 2: Área de estudo específica. Pier da Transpetro adotado como ponto de partida da simulação de óleo representado sobre uma imagem do Google Earth©.

## 2.1 Modelagem hidrodinâmica

Nas simulações hidrodinâmicas foi utilizado o modelo numérico Telemac3D. O modelo resolve as equações de conservação da quantidade de movimento considerando a pressão hidrostática e a aproximação de Boussinesq, e desconsidera as variações de densidade (Hervouet, 2007).

O modelo aplica a técnica de elementos finitos para resolver as equações hidrodinâmicas usando o sistema de coordenadas sigma na discretização vertical, de forma a acompanhar os limites superficiais e de fundo. O Método de Elementos Finitos (MEF) permite o controle da distribuição de elementos na grade computacional utilizada, permitindo estabelecer alta resolução em áreas de morfologia costeira e batimetria complexa.

Descrições mais detalhada do equacionamento e a parametrização do modelo Telemac3D podem ser encontradas no trabalho de Hervouet (2007).

## **2.2 Modelagem de óleo**

Escrito em Fortran, o código do ECOS foi acoplado ao código fonte do modelo hidrodinâmico utilizado, escrito na mesma linguagem. As variáveis necessárias para a descrição das características do hidrocarboneto derramado, volume, coordenadas, profundidade, duração, tempo de início e término da simulação do derrame, entre outras informações são facilmente inseridas pelo usuário.

As informações calculadas pelo modelo hidrodinâmico, como os campos de correntes, salinidade e temperatura são utilizadas pelo ECOS ao longo das iterações necessárias aos cálculos do intemperismo e transporte das partículas de óleo.

Do ponto de vista conceitual, o modelo considera um derrame de óleo como um agrupamento de partículas discretas, utilizando a abordagem lagrangeana. Seu código foi estruturado de forma que cada processo simulado é representado por uma variável. As variáveis do modelo podem ser tanto de natureza comportamental, para descreverem o intemperismo, quanto de natureza lagrangeana, utilizadas nos cálculos da trajetória das partículas. Assim, para cada iteração são estimados os aspectos comportamentais (calculado pelas variáveis do módulo de intemperismo) e é atualizada a trajetória pelo módulo de transporte do ECOS.

Os dois módulos do modelo estão relacionados, sendo possível estabelecer aproximações confiáveis para as perdas por evolução dos processos de intemperismo no balanço de massa conjuntamente com as variações das posições das partículas de óleo ao longo dos passos de tempo da simulação.

Atualmente, a estimativa dos processos de espalhamento, difusão turbulenta, evaporação, dispersão e emulsificação estão implementados no ECOS. Descrições mais detalhadas sobre o modelo podem ser encontradas nos trabalhos de Mello (2013) e Stringari (2014).

Os principais resultados do modelo de óleo mostraram-se similares às informações obtidas de laudos de ambientais de derrames de óleo realísticos, segundo constatações de estudos já realizados na PCSB utilizando o modelo

ECOS acoplado ao Telemac3D (Stringari et al., 2013; Marques et al., 2017; Monteiro et al., 2017 e Lopes et al., 2017).

### **2.3 Acoplamento – ECOS & TELEMAC3D**

A configuração acoplada do modelo ECOS ao código fonte do Telemac3D permite a simulação dos processos de diferentes naturezas que governam o trajeto e perdas de massa do óleo no mar. O modelo hidrodinâmico simula o campo de velocidades necessário para os cálculos de evolução da trajetória e perdas de massa da mancha de óleo. Tal trajetória é calculada considerando que o óleo pode ser idealizado como um número grande de partículas que se movem independentemente na água

A combinação do transporte de partículas (módulo de transporte do modelo ECOS) com os processos estimados pelo módulo de intemperismo da mancha de óleo gera resultados como a evolução do campo de óleo ao longo das simulações. As interações do óleo com as propriedades da água e do fundo são transferidas para o Telemac3D que segue atualizando as propriedades para informá-las novamente ao modelo ECOS até que passo de tempo final da simulação seja atingido.

### **2.4 Condições iniciais e de contorno**

As condições iniciais e de contorno oceânicas são prescritas por marés astronômicas, velocidade e direção das correntes, salinidade e temperatura. Os dados foram obtidos a partir do modelo de simulação e previsão oceânica HYCOM ([www.hycom.org](http://www.hycom.org)), com 0,083° de resolução horizontal (cerca de 7 km para as médias latitudes). Informações sobre as oito principais componentes relacionadas às marés astronômicas (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1) foram obtidas do sistema de modelagem de marés oceânicas *Grenoble Model FES95.2* (*Finite Element Solution v.95.6*) e interpoladas a todos os nós superficiais da malha de elementos finitos do estudo.

Para a prescrição dos contornos líquidos fluviais foram interpolados dados diários dos volumes de descarga dos rios nos pontos do domínio numérico correspondentes às desembocaduras dos principais rios efluentes da Lagoa dos Patos (Rio Guaíba, Rio Camaquã e Canal São Gonçalo) obtidos junto à Agência Nacional das Águas ([www.snirh.gov.br/hidroweb](http://www.snirh.gov.br/hidroweb)).

Os dados batimétricos foram obtidos de diferentes fontes. Para a região costeira e para a Lagoa dos foi utilizada a base do Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil (<http://www.marinha.mil.br/chm/chm/dados-do-segnav-cartas-nauticas>). Na região oceânica também foram utilizados dados do GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Ocean* - <http://www.gebco.net>).

Dados de pressão atmosférica na superfície, ventos e temperatura do ar foram obtidos da reanálise global do projeto ERA-Interim do Centro Europeu para previsões atmosféricas de médio prazo (<http://www.ecmwf.int>), com resolução horizontal de 0,75° equivalente a cerca de 80 km nas médias latitudes, sendo aplicados como condições de contorno superficiais na simulação.

As simulações de óleo foram conduzidas com o mesmo tipo de óleo combustível marítimo de tipo *bunker* (densidade de 964 kg.m<sup>-3</sup>) e volume de derrame (3,3 m<sup>3</sup>), respectivamente obtidos junto à Gerência Geral de Operação de Dutos e Terminais do Sul da Transpetro e do relatório de emergência ambiental da SEAMB da FEPAM, órgão ambiental de Rio Grande (RS).

A Figura 3 apresenta uma ilustração da malha de elementos finitos elaborada para o estudo e da aplicação dos diferentes tipos de dados descritos no domínio computacional utilizado.

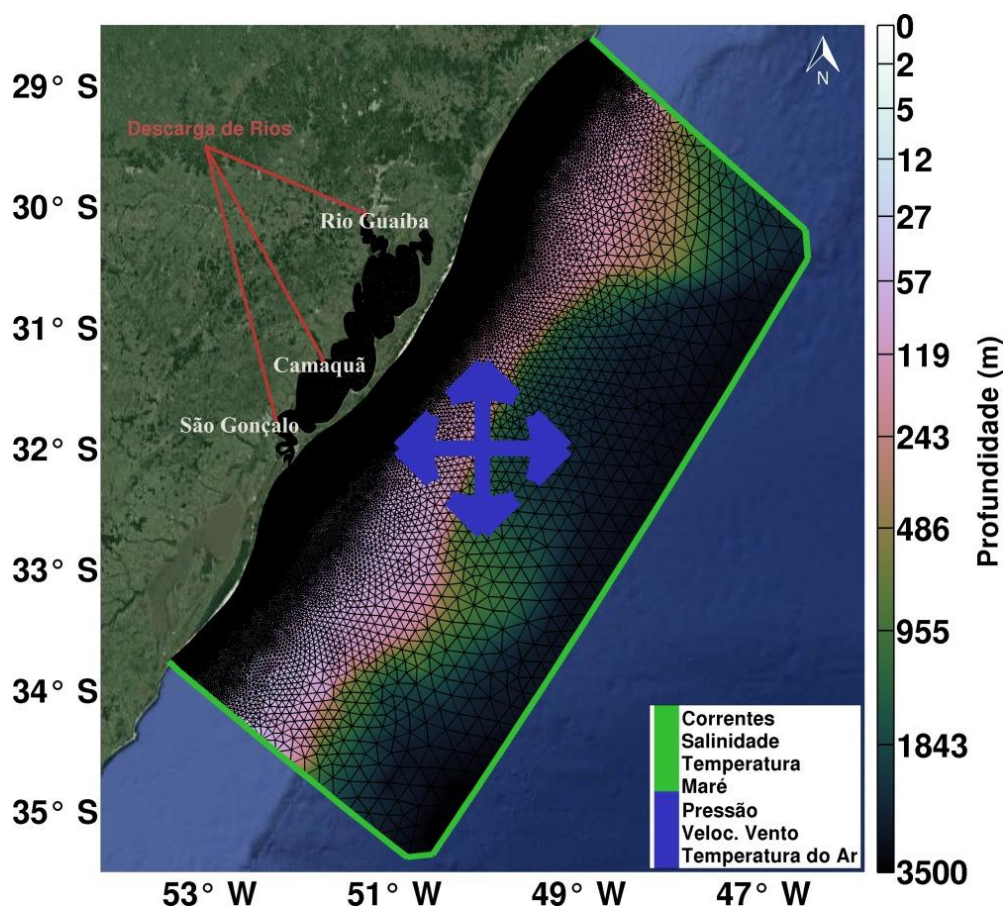


Figura 3: Ilustração da malha de elementos finitos e dos diferentes tipos de dados aplicados para gerar as condições iniciais e de contorno do domínio numérico do estudo, sobre uma imagem do Google Earth©. Dados oceanográficos do HYCOM (linhas verdes), dados meteorológicos das reanálises do ERA-Interim (setas em azul).

## 2.5 Setup, calibração e validação

O modelo Telemac3D foi calibrado e validado para a realização de estudos na região da Lagoa dos Patos e zona costeira adjacente do litoral do Rio Grande do Sul em estudos anteriores Marques et al. (2009, 2017). Além dos estudos previamente destacados, outros estudos envolvendo testes de calibrações e validações foram realizadas para porção norte do domínio referente às regiões costeiras de Tramandaí e Imbé, visando maior precisão nas análises associadas aos processos analisados (Stringari et al., 2014; Marques et al., 2017).

A calibração e validação dos resultados do modelo ECOS representa um desafio para os estudos posteriores.

Os resultados do modelo ECOS podem ser calibrados e validados utilizando imagens de sensores SAR (*Synthetic Aperture Radar*) obtidas durante derrames que tenham ocorrido ao longo dos últimos anos na Plataforma Continental do Sul do Brasil. Entretanto, ainda não foi possível aplicar essa técnica de calibração, devido à escassez de imagens SAR para as datas dos eventos simulados.

Variáveis como percentuais de perdas de massa por evaporação, emulsificação, bem como a trajetória das partículas de óleo podem ser utilizadas em estudos de calibração do modelo.

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Para uma análise mais completa do caso do derrame em questão, os resultados da simulação de óleo serão apresentados juntamente com a descrição das variáveis oceânicas relevantes às alterações do comportamento e transporte do óleo, como campos de variação do nível do mar, de velocidade de corrente e vento incidente.

Assim, à medida que os resultados hidrodinâmicos são abordados, é possível estabelecer associações entre o comportamento das variáveis hidrodinâmicas e os resultados de degradação do óleo, como a contribuição dos processos de intemperismo no balanço de massa da mancha, bem como sobre o destino final e tempo que a mancha alcança a costa do canal.

#### **3.1 Hidrodinâmica e transporte de óleo**

A Figura 4 ilustra a predominância do empilhamento de água em direção à costa, enquanto níveis mais baixos são observados nas proximidades do talvegue do canal de acesso da Lagoa dos Patos. A partir dos valores observados nas isolinhas de elevação da superfície livre do mar (linhas brancas na Figura 4) é notado que as médias de elevação do nível do mar oscilaram entre 0,75 e 1,15 m para os 60 dias anteriores ao dia do derrame, favorecendo o empilhamento de água em um dos lados da lagoa.

O padrão das maiores elevações da superfície do nível do mar em um dos lados da lagoa pode ser relacionado aos valores máximos de intensidade de correntes, que variaram em torno de 0,4 e 0,6 m/s, por sua vez forçados

pelos ventos mais intensos. De forma geral, as oscilações nas intensidades de correntes acompanharam as flutuações da elevação da superfície do mar, em concordância com o padrão clássico de circulação costeira conduzido pelo vento (Möller Jr et al, 1996, 2001; Castelão e Möller Jr, 2006; Rubert et al, 2006), em que os ventos incidentes em direção à costa, de áreas mais rasas como as do estudo, tendem a forçar a formação de correntes superficiais que podem favorecer o empilhamento de águas nessa direção.

Observando as séries temporais, tanto para as correntes (Figura 5a) quanto para os ventos (Figura 5b), o padrão de elevação do nível mar acompanhou ao padrão de oscilação da intensidade de corrente, sendo possível discriminar segmentos na série temporal em que tais variáveis apresentaram concordância de fase. Esse padrão de variações em fase, entre os valores de elevação da superfície livre do mar e os valores de intensidade de correntes e de ventos ressaltam a contribuição de tais forçantes para a dinâmica da região do estudo, e por sua vez, para o transporte e processos aos quais as partículas de óleo são submetidas após um derrame de óleo.

Analisando os percentuais de contribuição das principais forçantes para o caso em estudo, nas duas primeiras horas de simulação, as correntes atuaram em menores proporções (12,3%) e a circulação do óleo foi predominantemente comandada pelos efeitos dos ventos, com de 60,4% de influência no transporte das partículas de óleo.

Os resultados hidrodinâmicos e da simulação de óleo são discutidos de acordo com o comportamento das variáveis oceanográficas de elevação da superfície livre do mar, velocidades de correntes, e análises representadas na forma de séries temporais das velocidades de corrente e vento (Figura 5a e b), que são as principais forçantes do movimento do óleo na região.

Ao longo da maior parte da série de dados analisada, os padrões de elevação do nível mar e as oscilações das intensidades de correntes apresentaram alta concordância e ocorrendo na maior parte das séries em fase equivalente, conforme ilustrado na Figura 5.

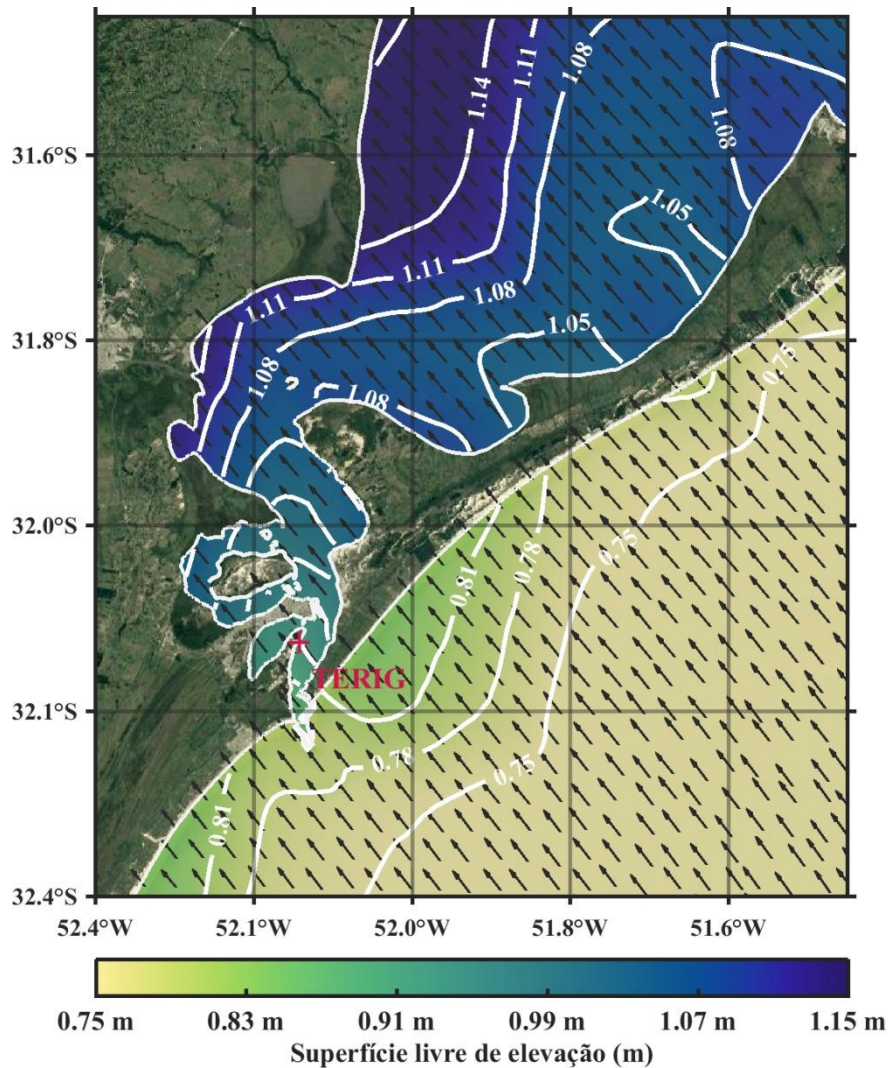


Figura 4: Campo médio de elevação do nível do mar dos 60 dias anteriores ao derrame de 14/10/2010. Indicação do ponto de partida da simulação de óleo ("+", em vermelho), correspondente ao ponto de vazamento (Terminal de Petróleo e Derivados de Rio Grande – TERIG). As setas pretas indicam o sentido predominante dos ventos incidentes.

Tais constatações equivalem às observações de Marques et al (2017) e Monteiro et al (2017) para a porção norte da PCSB, e por Lopes et al (2017) na região também para a região estuarina da Lagoa dos Patos.

Os padrões da variabilidade da elevação da superfície do mar acompanharam as oscilações de ventos e correntes, ressaltando a importância do estudo mais detalhado da variabilidade dessas oscilações para um desempenho mais eficiente dos sistemas de modelagem e monitoramento de derrames de óleo no oceano

As séries temporais de elevação da superfície livre do mar, intensidade de correntes e ventos (Figura 5) são apresentadas para o ponto do domínio numérico de coordenada geográfica equivalente ao ponto do derrame de óleo.

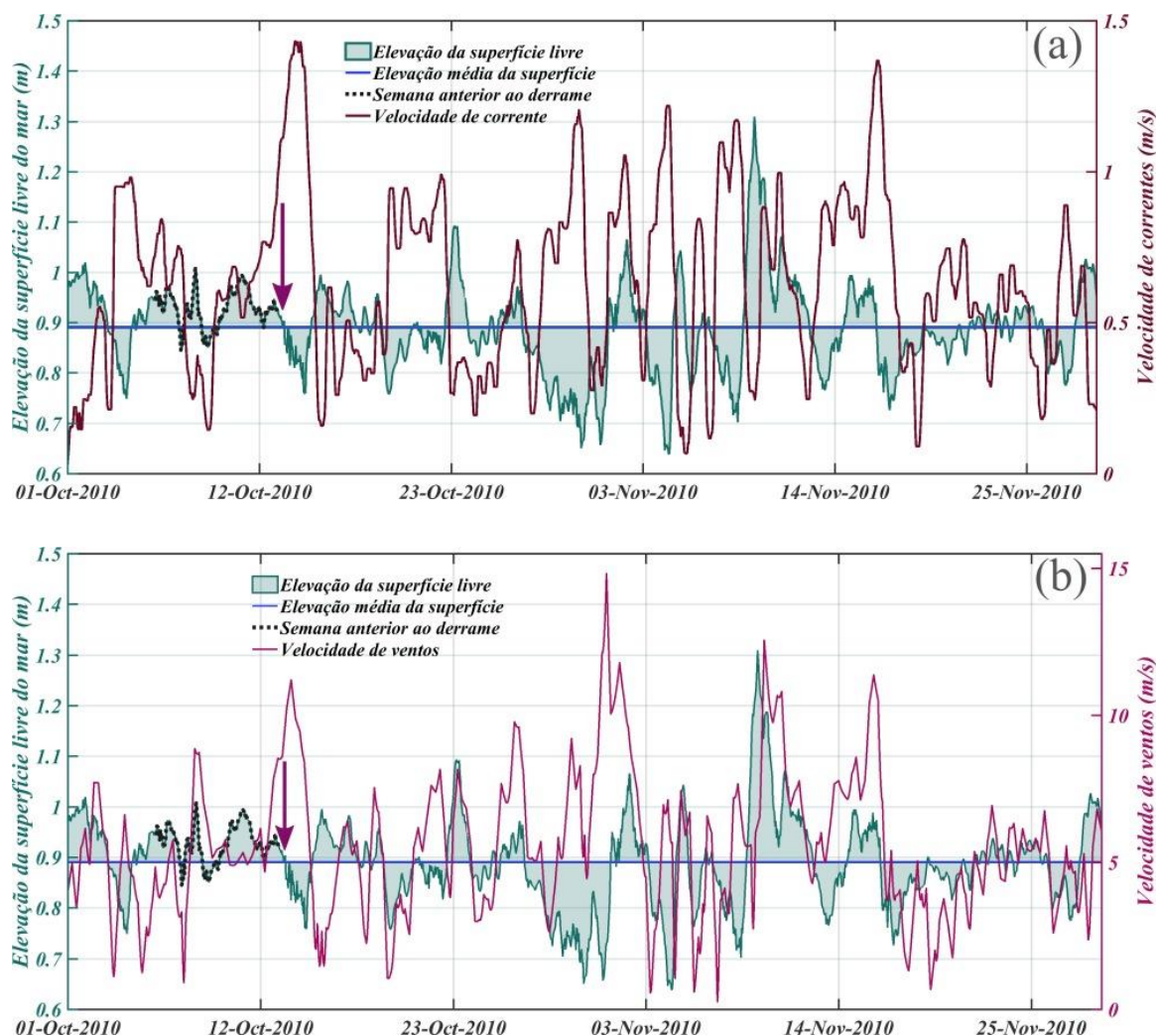


Figura 5: Séries temporais das variáveis hidrodinâmicas do estudo. Em (a) estão as oscilações de intensidade de correntes em (b) as dos ventos *versus* as oscilações do nível médio da superfície do mar para 60 dias de simulações hidrodinâmicas. O dia do vazamento (14/10/2010) é indicado pela seta magenta.

Entretanto, a partir das análises das séries temporais apresentadas, já é possível discriminar concordâncias entre os padrões da variabilidade da elevação da superfície do mar e as oscilações de ventos e de correntes.

Nos primeiros instantes posteriores ao derrame (Figura 6), a trajetória do óleo gerou uma mancha alongada, com extensão de aproximadamente 150 metros. Uma limitação do modelo é que este desconsidera o retorno das

partículas de óleo à água nos passos de tempo seguintes ao seu toque na costa, devido à complexidade dos fenômenos envolvidos. Assim, à medida que as partículas atingiram a linha de costa o modelo de óleo deixou de simular efeitos como retorno de partículas de óleo à água por mudanças nos padrões de ventos, por exemplo, frequentemente ocorrentes na região do estudo.

Portanto, após a segunda hora de simulação de óleo, quando a mancha é espalhada na margem do Canal, o ECOS deixou de calcular tanto os resultados das oscilações nas posições das partículas quanto os percentuais de contribuição das principais forçantes físicas como a ação das correntes, dos ventos, da turbulência e espalhamento no óleo.

A ilustração da mancha de óleo na Figura 6 corrobora com o padrão de comportamento que é esperado para o caso de derrames de óleos densos e persistentes, como o caso do *bunker* simulado, nas 24 horas seguintes a determinado derrame, em que as manchas de óleo tendem a um padrão de distribuição de partículas tipicamente circular. Tal modelo de espalhamento ilustrado também retrata o comportamento típico de casos de derrames de óleos pesados, cujas elevadas gravidades específicas tendem a um processo de espalhamento mais lento do que nos casos de derrames de óleos menos densos, como o diesel marítimo.

O padrão circular de crescimento progressivo de dentro para fora do ponto de liberação, também verificado na simulação do derrame (Figura 6), representa um comportamento típico de condições de águas mais calmas, como pouca incidência de ventos, como verificado para as águas estuarinas nas condições do presente estudo.

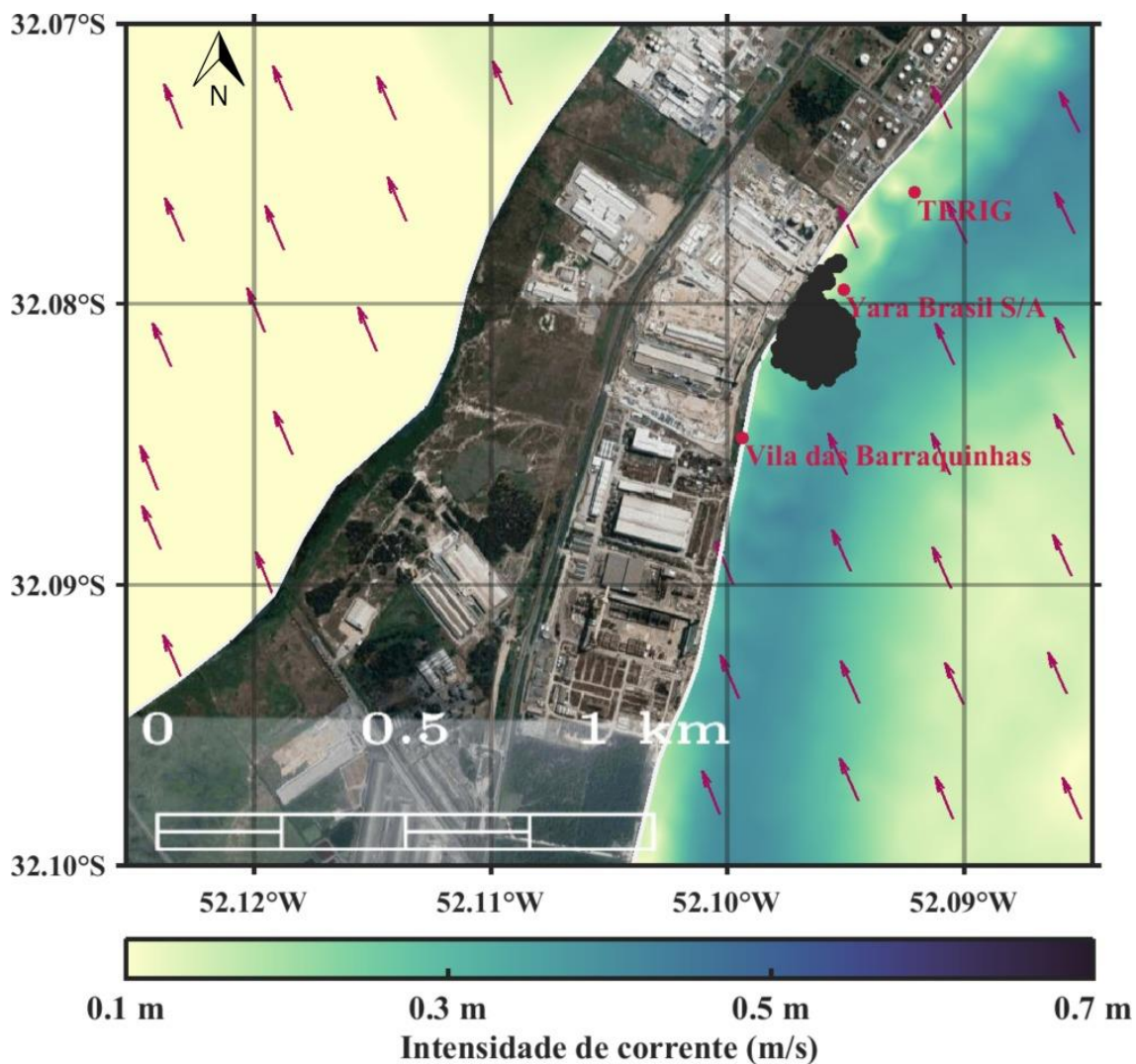


Figura 6: Variabilidade temporal e espacial das partículas de óleo para o derrame de 14/10/2010, ventos (setas vermelhas), pontos pretos representando as partículas de óleo na primeira hora do derrame.

Em condições de ventos e correntes de superfície mais intensas o padrão de espalhamento da mancha nas primeiras horas após o derrame poderia resultar em padrões iniciais de distribuição das partículas mais lineares e seguindo as condições dos fluxos dominantes.

Observando a variabilidade espacial e temporal das partículas de óleo, pode-se constatar que após a segunda hora da simulação do ECOS (Figura 7), as partículas de óleo atingiram a margem do Canal, nas proximidades da “Vila das Barraquinhas” ( $32^{\circ}0,5'5,15''S$  /  $52^{\circ}0,5'57.61''W$ , datum WGS 84).

Nos resultados simulados, o ponto crítico da acumulação de óleo também foi na Vila das Barraquinhas, igualmente ao ponto crítico indicado no relatório ambiental.

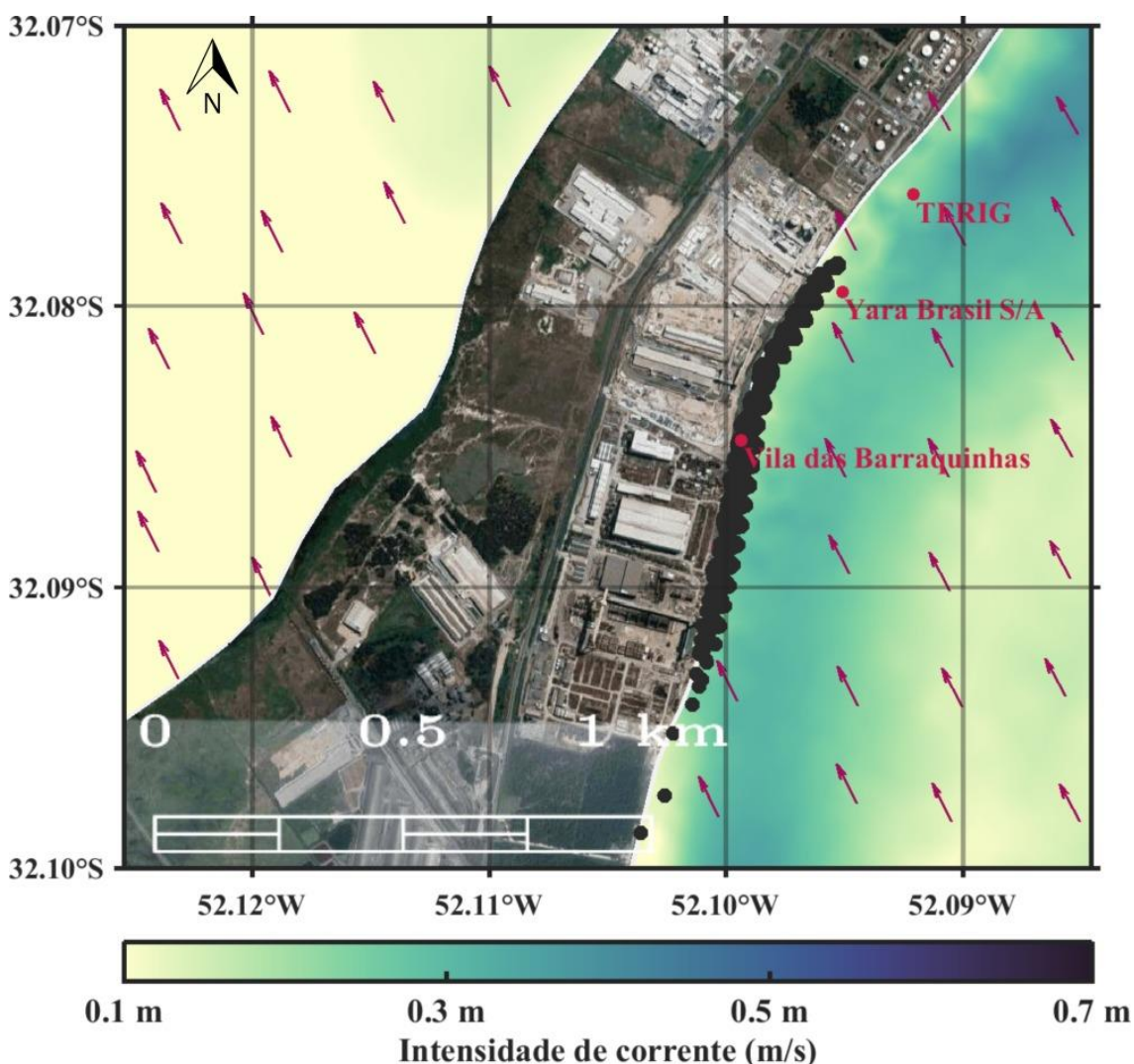


Figura 7: Variabilidade temporal e espacial das partículas de óleo para o derrame de 14/10/2010, ventos (setas vermelhas), pontos pretos representando as partículas de óleo entre a segunda e terceira hora após o derrame.

Segundo informações obtidas no relatório de emergência ambiental, foi constatada a chegada do óleo até a praia existente na Vila das Barraquinhas, atingindo vegetação de marisma, areia e rochas, além de redes e embarcações de pescadores locais, área de elevada sensibilidade ao óleo.

Outra similaridade entre os resultados simulados e as observações das vistorias do órgão ambiental ao longo da margem atingida pelo vazamento de óleo, é que em ambos os casos foi possível identificar vestígios do óleo numa

extensão de até 8 km a jusante do terminal, atingindo setores além da Vila das Barraquinhas, região de maior ação dos efeitos do acidente.

Mesmo não sendo possível realizar a calibração quantitativa do destino final do óleo, a partir do presente estudo pode-se observar que a trajetória e as dimensões da mancha de óleo resultante do acoplamento entre os modelos Telemac3D e o ECOS reproduziram a trajetória que foi descrita no relatório de emergência ambiental de referência.

Apesar de não ser devidamente uma validação, e equivalência de informações entre os resultados da simulação e os resultados das verificações de campo realizadas pelo órgão ambiental já constituem uma aproximação inicial da capacidade do *setup* de simulação do estudo quando à reprodutibilidade de situações realísticas de derrames de óleo.

Todavia, do ponto de vista da estratégia das modelagens, simulações aleatórias e sistemáticas de um número robusto de derrames de óleo embasariam análises mais confiáveis quanto aos níveis de suscetibilidade e riscos atrelados aos derrames de óleo. Isso pode ser explicado pela deriva de óleo no mar ser sensível às flutuações de variáveis ambientais, meteorológicas e oceanográficas.

### **3.2 Degradação do óleo**

Para o presente estudo de caso, as partículas de óleo atingiram a região costeira do canal de acesso à Lagoa dos Patos após duas horas de simulação, sendo conduzidas à praia, mediante a influência de ventos que favorecem o empilhamento de água nessa direção, os quais eram dominantes durante o período estudado e no dia do evento.

As intensidades das correntes oscilaram entre 0,05 e 0,5 m/s, com regime de fluxo de vazante dominando durante o período, que acabaram forçando o espalhamento da mancha na margem do canal próxima ao píer da Transpetro, atingindo cerca de 8 km de extensão de linha de costa e ficando aprisionadas em zona de baixo Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL 1), com

estruturas artificiais lisas, como paredões marítimos artificiais e infraestruturas costeiras associadas.

Tal confinamento do óleo na faixa costeira poderia contribuir com o aumento dos processos difusivos, uma vez que a linha de costa funcionaria como uma barreira física ao fluxo da mancha de óleo. Entretanto, após as primeiras horas do derrame os resultados de emulsificação, predominantemente influenciados por esses processos difusivos, tenderam à estabilização, assim como os percentuais de evaporação (Figura 8). Os resultados indicaram taxas em torno de 40% para evaporação e 20% para emulsificação.

As perdas de massa por evaporação são consideravelmente superiores às de emulsificação, e provavelmente devidas ao fato do sentido dos ventos e das correntes superficiais predominantes no momento do derrame terem forçado a condução da mancha para a costa, dificultando a incorporação de moléculas de água pela mancha de óleo.

O aprisionamento da mancha na costa também contribuiu para a ocorrência menos intensa de formação de emulsões de água em óleo. Caso o aprisionamento do óleo não ocorresse, provavelmente, por tratar-se de um óleo pesado e persistente, e dadas às condições de baixa energia de circulação estuarina verificada no momento do evento, a taxa de emulsificação fosse mais alta, seguindo o comportamento descrito por Lopes (2007) ao ressaltar que a emulsificação pode ser mais intensa após as 10 primeiras horas seguintes ao derrame, sobretudo em casos de óleos densos como o óleo marítimo analisado.

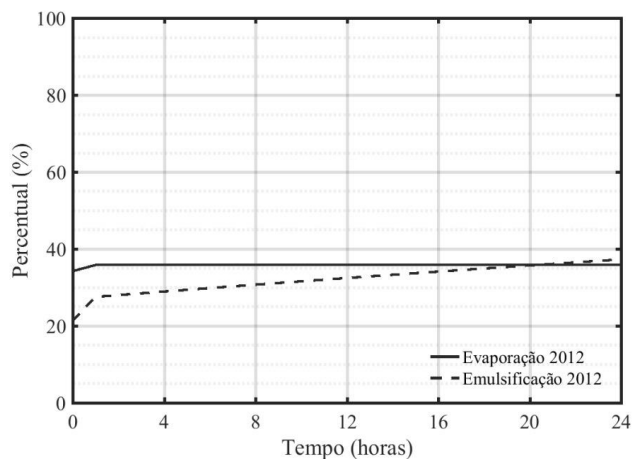


Figura 8: Evolução dos processos de degradação das manchas de óleo para os dois eventos estudados. Taxas das perdas por emulsificação e por evaporação para o evento de 14/10/2010.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos poderão contribuir para a definição de medidas emergenciais em casos de incidentes semelhantes (e.g., planos de Emergência Individuais, planos de contingência, planos de área), além de minimizar os danos ambientais que possam ser desencadeados.

As oscilações no estado de elevação do mar, dadas na medida das flutuações de intensidades dos ventos e correntes, entre outras forçantes, são concordantes com os padrões clássicos de circulação costeira dirigida pelo vento, típicos da região do estudo.

Nesse estudo do transporte e do comportamento de uma mancha de óleo em área estuarina, a ação dos ventos dominantes favoráveis ao empilhamento de água interviram no transporte das manchas e também orientaram as taxas de perdas por evaporação e emulsificação.

A estratégia de simulação adotada pelo estudo, baseada na reprodução de um derrame realístico e significativo destes tipos de acidentes na região, apresentou resultados muito próximos às informações dos trabalhos de campo que subsidiaram a elaboração do relatório de emergência ambiental do derrame. No entanto, a técnica utilizada não é a apropriada à avaliação da suscetibilidade, uma vez que as trajetórias das partículas de óleo tendem a uma considerável variabilidade para uma mesma área, devido às oscilações esperadas nos parâmetros dos oceanográficos e meteorológicos envolvidos.

Uma estratégia baseada em um número mais robusto de simulações favoreceria a redução das incertezas quanto à suscetibilidade associada à trajetória do óleo. Estudos mais completos, como os de risco ambiental decorrentes de vazamentos de óleo, demandariam de, por exemplo, um estudo mais representativo da probabilidade de ocorrência desses acidentes, entre outras complementações.

## REFERÊNCIAS

CASTELAO, R. M.; MOLLER JR, O. O. A modeling study of Patos Lagoon (Brazil) flow response to idealized wind and river discharge: Dynamical analysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 54, n. 1, p. 1-17, 2006.

CSANADY, G. T. *Circulation in the coastal ocean*. 1. ed. Holland: Reidel Publ. Co., 1982, 292 pp.

FINGAS, M.; FIELDHOUSE, B. Studies of the formation process of water-in-oil emulsions. *Marine Pollution Bulletin*, v. 47, n. 9-12, p. 369-396, 2003.

FINGAS, M. F. Studies on the evaporation of crude oil and petroleum products: I. The relationship between evaporation rate and time. *Journal of hazardous materials*, v. 56, n. 3, p. 227-236, 1997.

FINGAS, M. F. The evaporation of oil spills: development and implementation of new prediction methodology. In: *International Oil Spill Conference*. American Petroleum Institute, 1999. p. 281-287.

HERVOUET, J. *Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method*. John Wiley & Sons, 2007.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos recursos Naturais Renováveis. Modelagem de derramamento de óleo no mar. In: *Informação Técnica ELPN/IBAMA n° 023/02*, 2002. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/meio/guias/MODELAGEM/index2.htm>>. Acesso em 10 mai. 2017.

ITOPF - The International Tanker Owners Pollution Federation Ltd. *Oil spill tanker statistics: 2017*. Disponível em: <[http://www.itopf.com/fileadmin/data/Photos//Statistics/Oil\\_Spill\\_Stats\\_2017\\_web.pdf](http://www.itopf.com/fileadmin/data/Photos//Statistics/Oil_Spill_Stats_2017_web.pdf)>. Acesso em 12 de jun. 2018.

JANEIRO, J. et al. Wind and freshwater influence over hydrocarbon dispersal on Patos Lagoon, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, v. 56, n. 4, p. 650-665, 2008.

KUNDU, P. K.; COHEN, I. M. *Fluid Mechanics* (New York: Academic). 2002.

LOPES, C. F. et al. Ambientes costeiros contaminados por óleo. Procedimentos de limpeza: manual de orientação. In: *Ambientes costeiros contaminados por óleo*.

**Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão. Paranaguá, PR, v.3, n.3, setembro de 2018.**

Procedimentos de limpeza: manual de orientação. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2007.

LOPES, B. V. et al. Numerical study of oil spill in the Patos Lagoon under flood and ebb conditions. In: Congress on Computational Methods in Engineering on Conference Proceedings. ABMEC, Florianópolis, SC, Brazil, November 5-8, 2017.

MARIANO, A. J. et al. On the modeling of the 2010 Gulf of Mexico oil spill. Dynamics of Atmospheres and Oceans, v. 52, n. 1-2, p. 322-340, 2011.

MARQUES, W. C. et al. Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. Continental Shelf Research, v. 29, n. 3, p. 556-571, 2009.

MARQUES, W. C.; STRINGARI, C. E.; EIDT, R. T. The exchange processes of the Patos Lagoon Estuary-Brazil: A Typical El Niño year versus a normal meteorological conditions year. Advances in Water Resource and Protection, v. 2, p. 11-20, 2014.

MARQUES, W. C. et al. Numerical modeling of the Tramandaí beach oil spill, Brazil - Case study for January 2012 event. Applied Ocean Research, v. 65, p. 178-191, 2017.

MARTA-ALMEIDA, M. et al. Efficient tools for marine operational forecast and oil spill tracking. Marine Pollution Bulletin, v. 71, n. 1-2, p. 139-151, 2013.

MELLO, L. F. Desenvolvimento de um modelo de óleo baseado na visão lagrangeana de partículas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia da Computação) - Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, RS, p. 53, 2013.

MÖLLER JR, O. O. et al. The Patos Lagoon summer time circulation and dynamics. Continental Shelf Research, v. 16, n. 3, p. 335-351, 1996.

MÖLLER JR, O. O. et al. The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. Estuaries, v. 24, n. 2, p. 297-311, 2001.

MONTEIRO, C. B. et al. Analysis of Two Oil Spills in the Southern Brazilian Shelf, in the Years of 2012 and 2014. In: Defect and Diffusion Forum. Trans Tech Publications, 2016. p. 70-80. NICOLODI, J. L.; PETTERMANN, R. M. Vulnerability of the Brazilian coastal zone in its environmental, social and technological aspects. Journal of Coastal Research, n. 64, p. 1372, 2011.

RUBERT, J.; SANTOS, M. B.; KRUSCHE, N. Comparação entre medidas de velocidade do vento em Rio Grande, RS, de 2001 a 2006. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006.

SEAMB - Serviço de Emergência Ambiental. Relatório de Emergência Ambiental - Vazamento de óleo *bunker* (MF 380) no canal da Laguna dos Patos, oriundo de operação de abastecimento da embarcação *Baltic Champion*. FEPAM (Fundação Estadual de Proteção Ambiental), RS: Porto Alegre, 2010.

STRINGARI, C. E. et al. Modeling an oil spill along the Southern Brazilian Shelf: Forcing characterization and its influence on the oil fate. 2013. International Journal of Geosciences, 4, 397- 407, 2013.

**Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão. Paranaguá, PR, v.3, n.3, setembro de 2018.**

STRINGARI, C. E. Desenvolvimento de uma estrutura de previsão do comportamento de derrames de óleo na bacia de Pelotas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanologia) - Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, RS, p. 96, 2014.

TANSEL, B. Propagation of impacts after oil spills at sea: Categorization and quantification of local vs regional and immediate vs delayed impacts. International Journal of Disaster Risk Reduction, v. 7, p. 1-8, 2014.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores são gratos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão das bolsas de estudo; ao Centro Nacional de Supercomputação (CESUP) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelo acesso ao cluster SGI Altix, e ao Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC) pela disponibilização de acesso ao supercomputador Santos Dumont.

**Enviado em:** 15 jun. 2018

**Aceito em:** 06 jul. 2018

**Editor responsável:** Mateus das Neves Gomes