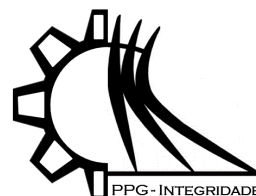




ISSN 2447-6102



PPG- INTEGRIDADE

Article

## Identificação de regiões suscetíveis à contaminação por óleo na Lagoa dos Patos

## Identification of sectors susceptible to oil contamination in the Patos Lagoon

Lopes, B.V.<sup>1</sup>, Trombetta, T.B.<sup>1\*</sup>, Möller Jr, O.O.<sup>2</sup> and Marques, W.C.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Análise Numérica e Sistemas Dinâmicos (LANSD) - Instituto de Matemática, Estatística e Física (IMEF) - Universidade Federal do Rio Grande (FURG) - Itália Avenue, Km 8, Rio Grande - RS, Brazil.

<sup>2</sup> Laboratório de Oceanografia Costeira e Estuarina (LOCOSTE) - Instituto de Oceanografia (IO) - Universidade Federal do Rio Grande (FURG) - Itália Avenue, Km 8, Rio Grande - RS, Brazil.

\* Correspondence: thaisabtrombetta@gmail.com.

Received: 08/06/2021; Accepted: 15/07/2021; Published: 17/09/2021

**Resumo:** O presente estudo consiste em simular eventos de derrame de óleo na região portuária de Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil, com aplicação da modelagem numérica. Para isso, foi realizada uma simulação hidrodinâmica de 365 dias, sendo esta equivalente às médias diárias calculadas entre 2003 e 2015. Ademais, simulações de vazamento de óleo foram utilizadas para identificar as principais forçantes que controlam o deslocamento da mancha, assim como, seu destino final. Os resultados mostraram que a tendência do deslocamento do óleo ocorre devido à combinação dos efeitos do vento e da descarga dos afluentes da Lagoa dos Patos. Durante os períodos de verão e primavera, os ventos de Nordeste resultaram mais frequentes, sendo estes os principais responsáveis pelo deslocamento das manchas de óleo. Além disso, a descarga dos afluentes apresentou valores abaixo de 2500 m<sup>3</sup>/s, tornando a ação das correntes menos significativas. Nos meses mais frios, a alta descarga dos afluentes foi combinada ao efeito direto das correntes para deslocamento do óleo, tornando o efeito do vento menos significativo. Em relação à suscetibilidade à chegada do óleo, é possível ressaltar que o Super Porto foi o mais afetado em todas as estações do ano, seguido de Marismas, que foi destacado como o mais preocupante, uma vez que apresentou grandes concentrações de óleo e possui o maior Índice de Sensibilidade do Litoral. Por fim, as informações disponibilizadas sobre possíveis vazamentos no estuário da Lagoa dos Patos, contribuem com planos de contingência, e possibilitam uma resposta rápida à contaminação neste ambiente.

**Palavras-chave:** Vazamento de óleo; Lagoa dos Patos; Índice de Sensibilidade do Litoral; Modelagem numérica; TELEMAC-3D.

**Abstract:** The present study consists in simulate oil spill events in port region of Rio Grande city, Rio Grande do Sul, Brazil, using numerical modeling. In order to accomplish that was carried out a hydrodynamic simulation during 365 days, being this equivalent to daily means calculated between 2003 and 2015. The oil spill simulations were used to identify the mainly forcing which control the oil displacement, as the final destination. The results showed that the oil displacement tendency occurs due to the combination of wind effects and freshwater discharge of Patos Lagoon. During Summer and Spring periods, the Northeast winds occurred with higher frequency, being this the mainly forcing for the oil displacement. In this period, the discharge presented values below 2500 m<sup>3</sup>/s, making the action of currents less significant. In the coldest months, the high discharge was combined with the effects of currents controlling the oil displacement, became the wind effects less significant. Regarding the susceptibility of the oil arrival in analyzed sectors, it is possible to emphasize that Super Porto (super port) was the most affected in all seasons, followed by Salt Marshes, which was detached as the most worrying, since it presented high oil

concentrations and it has the highest Littoral Sensitivity Index. Finally, information about possible leaks in the Patos Lagoon estuary, contribute to contingency plans, and enable a quick response to contamination in this environment.

**Keywords:** Oil spill; Patos Lagoon; Littoral Sensitivity Index; Numerical modeling; TELEMAC-3D.

---

## 1. Introdução

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

Os óleos de combustíveis fósseis são constituídos por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's) e por metais pesados, possuindo efeitos tóxicos aos seres vivos devido às suas características carcinogênicas, mutagênicas e teratogênicas, além da elevada capacidade de bioacumulação ao longo dos diferentes níveis de cadeias tróficas (Almada e Bernardino, 2017). Dessa forma, a preocupação em relação aos acidentes com óleo não deve ocorrer apenas nos instantes e locais atingidos, uma vez que a poluição persiste por várias décadas (Moreno et al., 2011).

Os acidentes ambientais relacionados ao petróleo são frequentes e globais. Estima-se que aproximadamente 5,86 milhões de toneladas de petróleo foram derramados no oceano, entre 1970 e 2019, como resultado de incidentes envolvendo navios-tanque (ITOPF, 2019).

A legislação ambiental brasileira preconiza que as atividades e empreendimentos que produzem e/ou distribuem petróleo e seus derivados, devem ser fundamentadas por simulações numéricas de cenários de derrames no mar. Estas simulações possibilitam a definição da área de influência das atividades, assim como os prováveis cenários de contaminação, compondo o Plano de Emergência Individual (PEI) e auxiliando na mitigação dos danos ambientais (IBAMA, 2002).

Os impactos ambientais decorrentes de acidentes com óleo afetam direta e indiretamente a qualidade de vida das populações nas áreas de risco, destacando a dificuldade de tratamento de áreas contaminadas (Dupuis e Ucan-Marin, 2015). Dessa forma, é necessário um monitoramento mais frequente nestas regiões, possibilitando uma rápida tomada de decisão, em caso de incidentes.

A região portuária de Rio Grande, localizada no Rio Grande do Sul, pode ser destacada como uma área de risco para possíveis acidentes, uma vez que possui atividades de embarque/desembarque de petróleo. Além disso, entre janeiro e maio de 2020, o Porto do Rio Grande movimentou 15.504.882 toneladas de carga, sendo 1.439.114 toneladas de graneis líquidos (SUPRG, 2020).

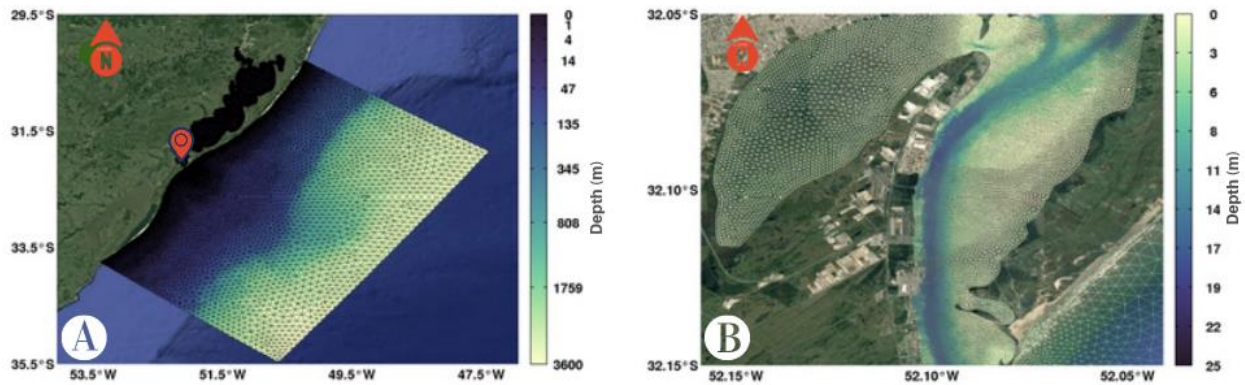
Neste âmbito, dados os potenciais riscos envolvendo o município de Rio Grande, este estudo consiste em investigar o comportamento do óleo, a partir de um acidente hipotético. Para isso, serão identificados os contribuintes meteoroclimáticos, além dos setores com maior suscetibilidade à contaminação.

## 2. Materiais e Métodos

Este estudo considera a aplicação de modelos numéricos para representação da dispersão do óleo na região estuarina da Lagoa dos Patos, mais precisamente no Super Porto de Rio Grande. As simulações envolveram um período de 365 dias, sendo este equivalente às médias diárias calculadas entre os anos de 2003 e 2015.

### 2.1 Área de Estudo

A área de estudo está localizada na Região Sul do Brasil, entre 30°S e 34°S, compreendendo a Lagoa dos Patos. O foco do estudo ocorre na região portuária de Rio Grande (Figura 1), mais precisamente no Super Porto, devido ao seu potencial risco ambiental relacionado ao alto fluxo de embarque/desembarque de petróleo.



**Figura 1.** Malha computacional representando a área de estudo (A), com enfoque na região do Porto de Rio Grande (B). A barra de cores representa a profundidade, em metros.

A Lagoa dos Patos foi definida por Kjerfve (1986) como uma das maiores lagunas estranguladas do mundo, possuindo uma extensão aproximada de 250 km, largura média de 40 km e área de cerca de 10.360 km<sup>2</sup>. Além disso, foi classificada como uma laguna rasa, uma vez que sua profundidade média é de 5 m.

A região adjacente à Lagoa dos Patos é caracterizada por ser uma área de grande interesse econômico, devido à movimentação de cargas, em função do Porto de Rio Grande e, até mesmo, de Montevidéu e Buenos Aires. Além disso, há uma intensa atividade pesqueira envolvida na região, onde são gerados importantes recursos ecossistêmicos que atuam na manutenção da pesca artesanal.

O estuário da Lagoa dos Patos é controlado principalmente por dois mecanismos: os ventos e as descargas fluviais (Möller e Castaing, 1999). O efeito do vento local atua diretamente na superfície da água, dentro da laguna, transferindo quantidade de movimento por fricção e, conseqüentemente, gerando um mecanismo de rebaixamento e elevação nas suas extremidades, que depende da direção e intensidade destes ventos (Marques et al. 2009). O efeito não-local do vento se manifesta na porção costeira, causando o aumento do nível da água e do transporte transversal à costa (Marques et al. 2014).

## 2.2 Modelos Numéricos

Para a análise dos processos hidrodinâmicos foi considerado o modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D, que integra a suite de modelagem open TELEMAC-MASCARET ([www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org)). Este modelo resolve as equações de Navier-Stokes, assumindo ou não condições de pressão hidrostática, considera a evolução da superfície livre como função do tempo, e utiliza equações de advecção e difusão para a simulação de propriedades como salinidade e temperatura (Hervouet, 2007).

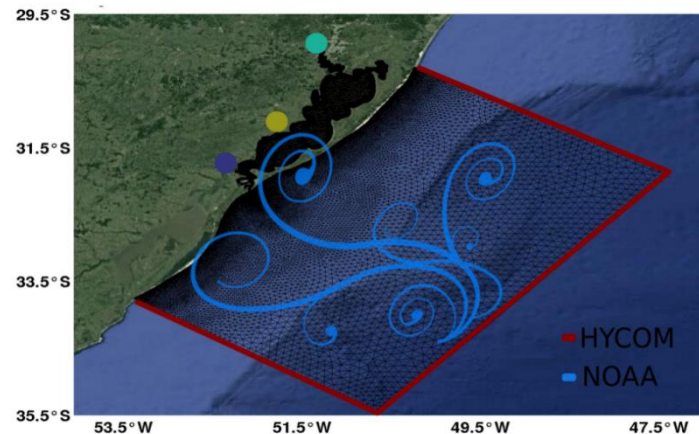
Para descrever os processos associados à dinâmica do óleo foi utilizado o módulo ECOS (*Easy Coupling Oil System*), desenvolvido em 2010 na Universidade Federal do Rio Grande (FURG), e registrado no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). O ECOS manipula o óleo como partículas discretas, e considera a aproximação Lagrangeana para descrever a variação das propriedades (Marques et al., 2017).

Alguns processos ao qual o óleo está sujeito, e que estão incluídos neste módulo, são: espalhamento, evaporação, dispersão, sedimentação, dissolução, emulsificação, solubilização e deposição. As velocidades que controlam estes processos dependem de fatores climáticos, ambientais e do tipo de óleo considerado.

## 2.3 Condições Iniciais e de Contorno

Para realizar as simulações foi construído um domínio computacional, incluindo toda a Lagoa dos Patos e região costeira adjacente, conforme demonstrado anteriormente na Figura 1. Este domínio é composto por polígonos triangulares, totalizando 93.050 nós, sendo que a distância entre os vértices destes elementos varia de 10 m no estuário a 10 km na região offshore, com 15 níveis sigma.

Os dados utilizados como condições iniciais e de contorno para o domínio do modelo hidrodinâmico foram extraídos de diferentes fontes e, posteriormente, interpolados e prescritos para cada ponto da malha de elementos finitos. As condições iniciais e de contorno utilizadas estão representadas na Figura 2.



**Figura 2.** Condições iniciais e de contorno para o domínio do modelo hidrodinâmico. Imagem sobreposta do Google Maps, Landsat/Copernicus, 2017.

Os dados de velocidade da corrente, salinidade e temperatura da água do mar foram obtidos a partir do modelo HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*), e estão prescritos nas bordas oceânicas do domínio. Os dados meteorológicos, representados pela velocidade de vento, temperatura do ar e pressão atmosférica, foram obtidos do banco de dados do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

Os dados de descargas fluviais foram extraídas da página da ANA (Agência Nacional de Águas), e estão prescritos nos contornos continentais líquidos do modelo. Estes dados representam os rios Guaíba e Camaquã e o Canal São Gonçalo.

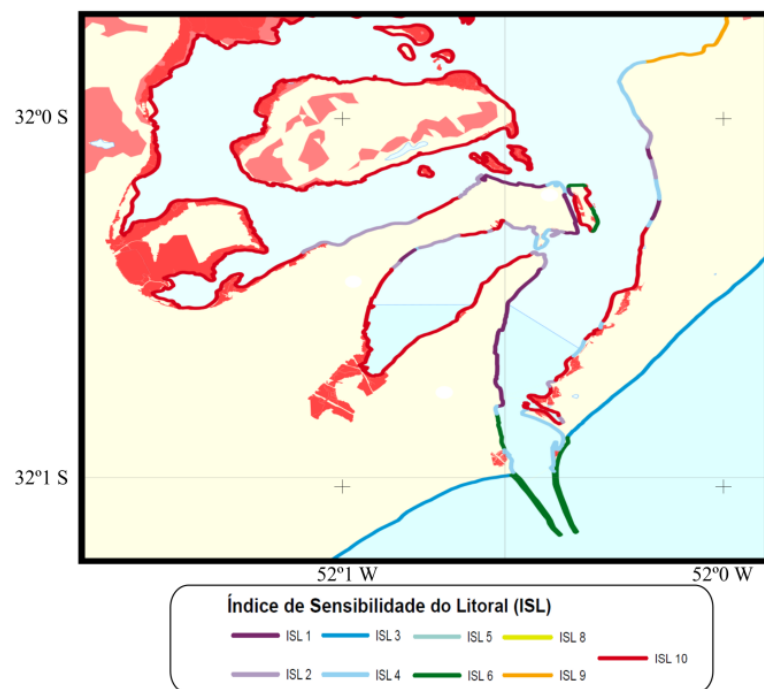
As informações do óleo utilizadas no modelo ECOS foram obtidas em relatórios técnicos da FEPAM (Fundação Estadual de Proteção Ambiental do Rio Grande do Sul), do MMA (Ministério do Meio Ambiente), da Marinha do Brasil, e da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). O volume de óleo derramado é de 20 m<sup>3</sup>, seguindo a norma de “Modelagem e Derramamento de Óleo no Mar” 023/2002 do IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis).

A utilização de um óleo com característica leve (800 kg/m<sup>3</sup>) ocorreu com base nos dados fornecidos pela empresa Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A.), que apresenta os quatros principais óleos transportados no Porto de Rio Grande. O ponto inicial de derrame do óleo simulado está localizado no terminal portuário da Transpetro, nas coordenadas 32°04'37,2" S e 53°05'27,6"W.

#### 2.4 Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL)

Para identificação da problemática associada à chegada do óleo na costa, foi utilizado o Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL), que representa a escala de impacto causado pelo óleo. A Figura 3 apresenta a classificação do ISL para a região de estudo, iniciando em 1 para ambientes menos sensíveis, e variando até 10 para os setores mais vulneráveis (MMA, 2007).

O ISL é uma ferramenta amplamente utilizada para o planejamento de contingência e para a implementação de ações de resposta a incidentes de poluição por óleo (Nicolodi, 2016). Este índice integra os fatores de exposição relativa do ambiente à energia das ondas e marés, à declividade da praia, ao tipo de substrato e sensibilidade, e à produtividade da biota (MMA, 2007; Nicolodi, 2016).



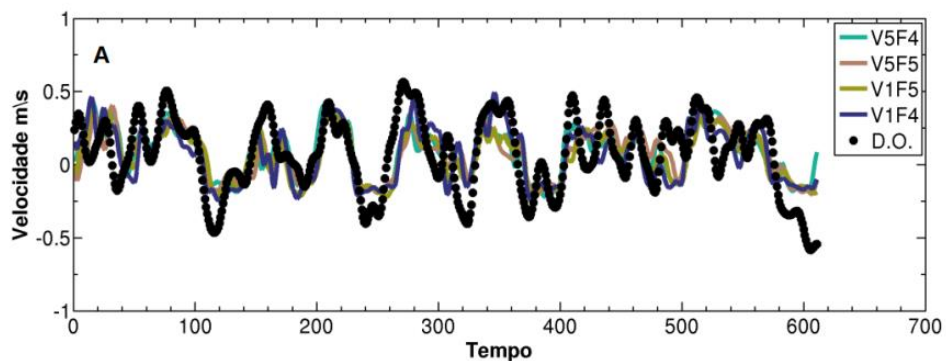
**Figura 3.** Mapa do Índice de Sensibilidade do Litoral ajustado para região do Porto de Rio Grande. Adaptado de Nicolodi (2016).

### 2.5 Calibração do Modelo TELEMAC-3D

O modelo hidrodinâmico foi calibrado através da consideração de quatro parametrizações, sendo modificadas duas variáveis: o coeficiente de influência do vento e o coeficiente de fricção com o fundo. Para o coeficiente de influência do vento foram considerados os valores  $1.10^{-5}$  e  $5.10^{-6}$ , e para o coeficiente de fricção do fundo, os valores 0,04 e 0,05.

As simulações de calibração foram conduzidas por 105 dias, entre 01/11/2010 e 15/02/2011, e os resultados foram comparados com dados de corrente e salinidade medidos na Estação da Praticagem (canal de acesso à Lagoa dos Patos). Os dados de corrente foram obtidos com um *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP), a uma profundidade de 14 m, e os dados de salinidade através de um sensor de Condutividade e Temperatura (CT), em 3 m.

As séries temporais de velocidade da corrente, em comparação com os dados observados, estão apresentadas na Figura 4. Os pontos pretos indicam os dados obtidos *in situ*, enquanto as linhas coloridas representam as quatro simulações com diferentes configurações do coeficiente de atrito do vento e de fricção com o fundo.



**Figura 4.** Séries temporais da velocidade da corrente para calibração do modelo hidrodinâmico. Os pontos pretos representam os dados observados (D.O.), e as linhas coloridas, os resultados modelados (V1F4, V1F5, V5F5 e V5F4).

O modelo demonstrou uma boa reprodução das tendências observadas para a velocidade da corrente e a salinidade. A performance das simulações foram quantificadas utilizando os mesmos métodos utilizados por Sutherland e Wallingford (2001) e Marques et al. (2017).

A simulação V1F4 (linha roxa) apresentou a melhor performance ao ser comparada com as demais simulações. Para a velocidade da corrente, o coeficiente de correlação (R) ficou em 0,661 e o erro absoluto (EA) em 0,155.

A verificação dos resultados indica que a simulação reproduz a tendência dos dados medidos na estação da Praticagem. Sendo assim, os coeficientes de atrito do vento ( $1.10^{-5}$ ) e de fricção com o fundo (0,04) estão devidamente calibrados para avaliar prováveis cenários de derramamento de óleo na região do estudo.

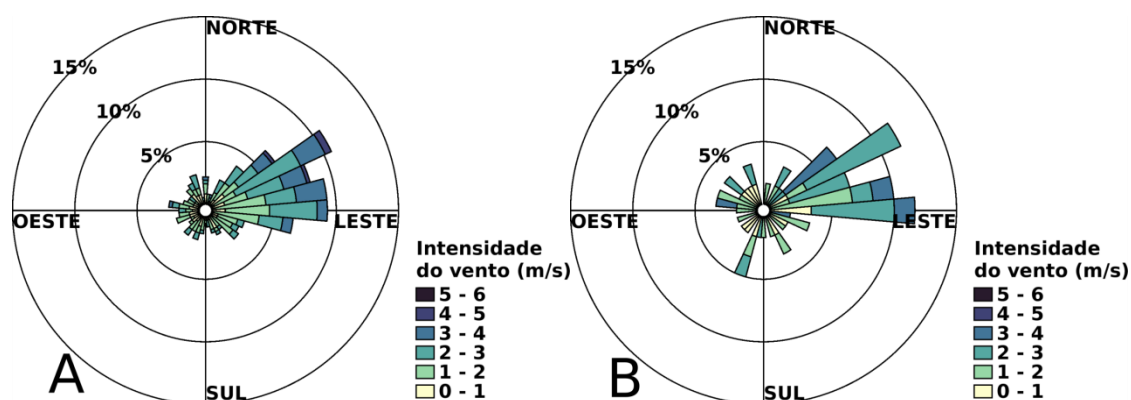
### 3. Resultados e Discussões

Os resultados apresentados neste artigo consideram um período de simulação hidrodinâmica de 365 dias, sendo este equivalente às médias diárias calculadas entre os anos de 2003 e 2015. No total, foram realizadas 60 simulações de vazamentos de óleo, ao longo destes 365 dias, com intervalos de 6 dias. O ponto de lançamento do óleo ocorreu sempre no Terminal da Transpetro, conforme indicado anteriormente.

#### 3.1 Ventos e Correntes

Para demonstrar a representatividade das 60 simulações, foi realizada a comparação das correntes e dos ventos no ponto inicial do vazamento do óleo. Estas forças são as que mais influenciam o deslocamento da mancha dentro do estuário da Lagoa dos Patos.

Os resultados da comparação entre os ventos para os 365 dias modelados e para os 60 cenários de vazamento de óleo, estão apresentados na Figura 5. É possível observar que as principais características dos ventos são similares nas duas situações, sendo que o vento predominante é de Nordeste e Leste.



**Figura 5.** Comparação entre os ventos para os 365 dias de simulação (A) e para os 60 cenários de vazamento de óleo (B).

A ocorrência de ventos menos intensos nos demais quadrantes também pode ser verificada nas duas situações. Entretanto, é observado que os maiores picos de intensidade de vento de Nordeste (5 a 6 m/s), não ocorreram nos 60 cenários de vazamento de óleo.

Os padrões de ventos tem mudanças sazonais que são representativas na direção e intensidade, conforme destacado por Camargo (2014). De acordo com Möller et al. (2001), nas estações de verão e primavera pode-se observar maior frequência de ventos de Nordeste, e para as estações mais frias (outono e inverno) há maior variabilidade na direção dos ventos.

O comportamento na variação dos ventos, na região do sul do Rio Grande do Sul, ocorre devido à sua posição geográfica localizada em uma zona de transição climatológica, onde os principais sistemas globais impactantes são os extratropicais e intertropicais (Machado et al., 2010). Desta forma, é possível verificar a relação dos ventos entre os 365 dias modelados e os 60 cenários de vazamento do óleo, confirmando a representatividade destas simulações.

Os resultados da comparação entre as correntes para os 365 dias modelados e para os 60 cenários de vazamento de óleo, estão apresentados na Figura 6. É possível observar uma alta concordância entre os resultados, uma vez que as duas situações mostram ocorrências próximas a 90% para Sudoeste, representando uma dominância de eventos de vazante no estuário.

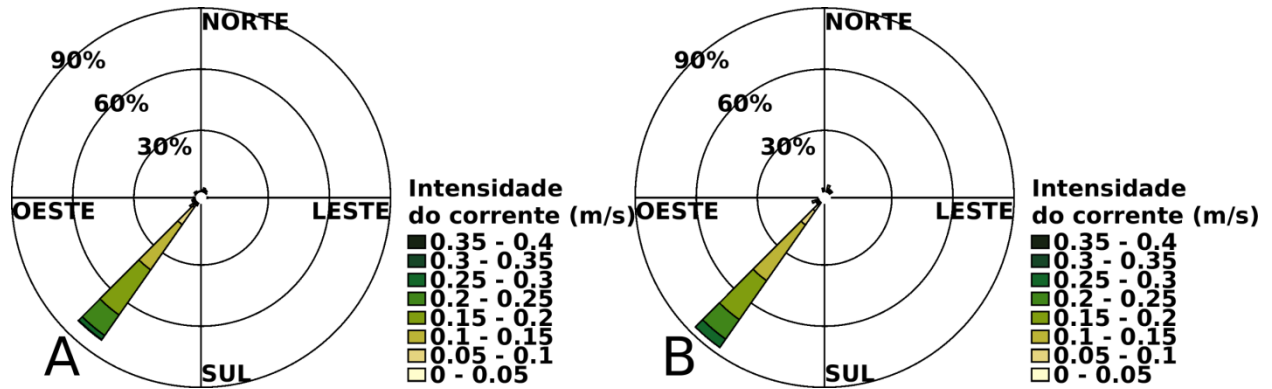


Figura 6. Comparação entre as as correntes para os 365 dias de simulação (A) e para os 60 cenários de vazamento de óleo (B).

Outra característica similar refere-se à intensidade das correntes, que também demonstraram correlação com os estudos de Möller et al. (1999), Marques et al. (2014) e Marques et al. (2017). Adicionalmente, Möller et al. (2001) observaram que as condições de vazante estão relacionadas ao fluxo de corrente mais comum da região de estudo e, conforme observado por Marques et al. (2014), a descarga dos afluentes é a principal forçante de saída de água doce do estuário.

Por outro lado, os eventos de enchente causam fluxo de entrada de água salgada do oceano para o estuário, e a combinação de ventos locais e remotos é o principal mecanismo que controla este fenômeno (Möller et al., 2001). Marques et al. (2014) destacaram que a baixa descarga dos afluentes intensifica o fluxo de correntes em eventos de enchente.

### 3.2 Deslocamento da Mancha de Óleo

O deslocamento da mancha de óleo ao longo do tempo, considerando as 60 simulações de vazamento, é apresentado na Figura 7. Este resultado consiste em apresentar a concentração do óleo, para identificar os pontos de maior contaminação no estuário da Lagoa dos Patos.

Além disso, é possível verificar as possibilidades de deslocamento da mancha de óleo, no médio e baixo estuário da Lagoa dos Patos, considerando um período de 24 horas de vazamento. Sendo assim, pode-se destacar que as maiores concentrações de óleo ocorrem na encosta do Super Porto, Vila dos Pescadores, alguns pontos da região de marismas e São José do Norte.

A tendência do deslocamento das manchas de óleo, ocorre devido à combinação dos efeitos dos ventos e da descarga dos afluentes da Lagoa dos Patos (Marques et al., 2017). Durante o período de verão e primavera, os ventos de Nordeste são de maior frequência e a descarga dos afluentes é baixa, enquanto no outono e inverno, os ventos possuem maior variabilidade em todas as direções, que são combinadas com as maiores descarga dos afluentes (Möller et al., 2001, Marques et al., 2009, Machado et al., 2010, Marques et al., 2014, Marques et al., 2017).

Neste contexto, é possível verificar que o comportamento das correntes dominantes nas diferentes estações do ano, dentro do estuário da Lagoa dos Patos, é influenciado pelo vento e pela descarga dos rios. Portanto, um único vazamento de óleo é capaz de atingir diversas regiões.

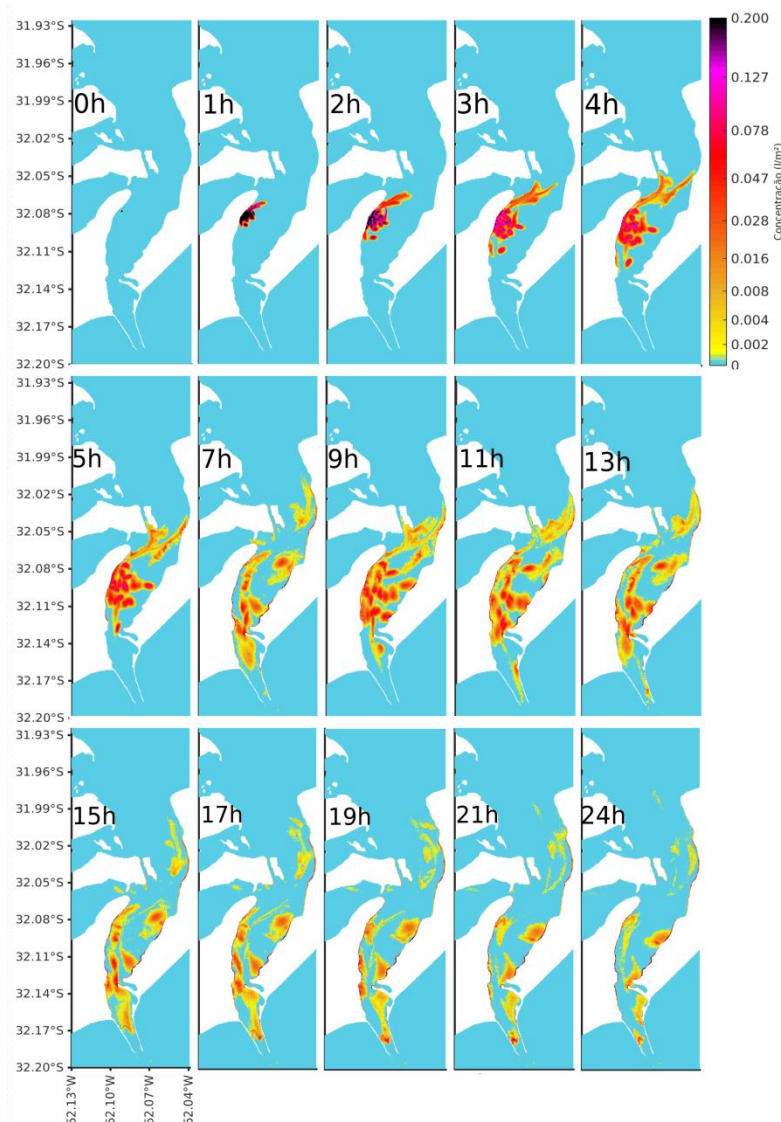
Outro resultado analisado, consiste nas porcentagens referentes à chegada do óleo durante as 60 simulações, nos diferentes setores do estuário da Lagoa dos Patos. Estes valores foram divididos para as quatro estações do ano, e indicam a montante de simulações (em %) em que o óleo atingiu a região.

Nas estações de primavera e verão são observados características semelhantes, sendo possível destacar que em 100% das simulações, nestes períodos, a mancha de óleo atingiu a região do Super Porto. Adicionalmente, em nenhuma das simulações a mancha chegou à região do Molhes e dos Marismas, devido à baixa ocorrência de ventos de quadrante sul com alta intensidade, durante estas estações do ano.

A porcentagem de chegada de óleo nas demais regiões, durante a primavera e o verão, resultou em baixos valores, devido à ocorrência em apenas duas simulações que apresentaram características de enchente. Estas manchas de óleo chegaram à encosta da cidade de São José do Norte, Ilha do Terraplano, Porto Novo, enseada do Saco da Mangueira, Ilhas dos Marinheiros e Ilha da Pólvora e, somente na primavera, Vila dos Pescadores.

No outono e no inverno, a variação da direção dos ventos e a vazão acumulada dos rios induziram as correntes a variar o sentido e, por conseguinte, é observada a chegada de óleo em diferentes locais. Entretanto, durante estas

estações do ano, as manchas de óleo não atingiram a região do Saco da Mangueira e as Ilhas em nenhuma das simulações.



**Figura 7.** Representação do deslocamento da mancha de óleo ao longo do tempo, considerando as 60 simulações de vazamento.

No outono ocorre a variação da direção e intensidade das correntes e ventos, alternando os fenômenos de vazante e enchente no baixo estuário. Sendo assim, nas 6 simulações em que a corrente foi orientada pelo fenômeno de enchente, as manchas de óleo se deslocaram para a região de São José do Norte, Ilha do Terraplano e Porto Novo, atingindo 36,71% de ocorrências. Outra característica dessa estação do ano é a forte influência dos ventos de quadrante sul, o que resultou na contaminação da região de Marismas em 8 simulações (57,14).

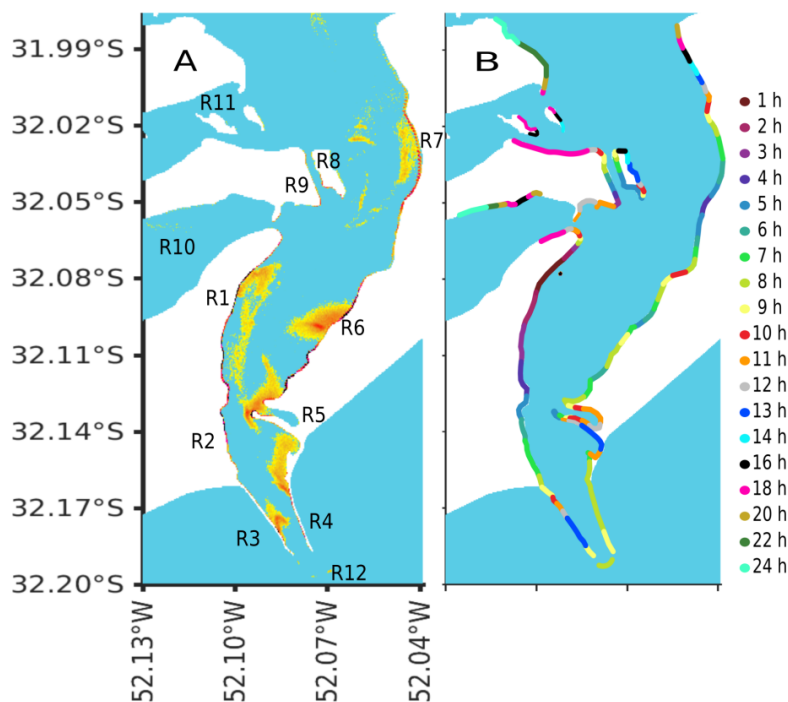
No inverno, as variações na direção dos ventos causaram os dois maiores picos de vazão acumulada dos afluentes. Dessa forma, durante os fortes fenômenos de vazante, as manchas de óleo foram deslocadas pelas correntes para o Sul, e os setores de São José do Norte, Ilha do Terraplano e Porto Novo não foram contaminados.

Os pontos de chegada das manchas de óleo em algumas regiões localizados na encosta do baixo estuário da Lagoa dos Patos, estão de acordo com Lopes et al. (2019). Neste estudo, os autores realizaram 8 simulações na região do Super Porto, em Rio Grande, utilizando dados médios de fenômenos de enchente e vazante, para identificar as regiões de chegada das manchas de óleo.



### 3.3 Suscetibilidade às Manchas de Óleo

A ocorrência de vazamentos de óleo no Terminal da Transpetro foi analisada ao longo de 60 simulações, sendo possível identificar as maiores concentrações de óleo na hora 24 de cada dia de vazamento (Figura 8A). Além disso, também foi verificado o menor tempo de chegada das manchas de óleo, nos diferentes setores da área de estudo (Figura 8B). Estes resultados podem ser utilizados como suporte para tomadores de decisão, no caso de incidentes com vazamento de óleo no terminal.



**Figura 8.** Representação das maiores concentrações de óleo na hora 24 de cada dia de vazamento (A), e menor tempo de chegada do óleo na encosta do estuário da Lagoa dos Patos (B).

As manchas de óleo podem atingir a região do Super Porto (R1) em menos de 1 hora, e se espalhar pelas bordas da região em aproximadamente 5 horas, com uma concentração considerável de óleo. De acordo com Nicolodi (2016), esta região apresenta menor índice (ISL 1) de sensibilidade ao óleo, por possuir estruturas artificiais lisas e expostas (paredões marítimos artificiais). Portanto, um vazamento de óleo nesta região não ocasionaria significativos transtornos econômicos e ambientais.

A região da Vila dos Pescadores (R2) é atingida pelo óleo entre 5 e 7 horas, após o derramamento. A contaminação desta região causaria impacto na comunidade local que sobrevive da pesca, uma vez que o ISL varia de 4 a 6 neste local, de acordo com Nicolodi (2016).

Na região dos molhes (R3), o intervalo de tempo da chegada das manchas de óleo foi de 8 a 13 horas. Segundo Nicolodi (2016), este setor possui enrocamentos, sendo enquadrado com ISL 6. Os molhes possuem características ambientais sensíveis, uma vez que é considerado local de turismo, pesca recreativa e unidade de conservação a recursos biológicos.

O local denominado como Marismas (R4) inicia sua contaminação pela mancha de óleo entre 5 e 12 horas. Nesta região há um terminal de desembarque de pescado e, conseqüentemente, ocorre concentração de pescadores. Desse modo, uma porção considerável da região apresenta ISL 10, e uma restrita porção, ISL 2 (Nicolodi, 2016).

A região de São José do Norte (R5) é caracterizada por ser urbanizada em relação aos demais setores analisados no presente artigo, e possui 3 ISL's diferentes, conforme observado anteriormente na Figura 3. Na região com ISL 1, as manchas de óleo atingem a encosta entre 4 e 6 horas, enquanto na porção com ISL 2, o tempo varia de 7 a 13 horas. Para a porção mais sensível, com ISL 4, o tempo de toque do óleo possui um intervalo maior, podendo atingir o local a partir de 6 até 20 horas após o vazamento.

Na Ilha do Terraplano (R6), o vazamento de óleo contaminou em 6 horas os setores mais sensíveis, demonstrados na Figura 3. Nas demais regiões da ilha, a mancha de óleo atingiu a encosta somente a partir de 7 até 16 horas.

A Região do Porto Novo (R7) foi rapidamente contaminada pela mancha do óleo, sendo atingida a partir de 3 horas após o vazamento. Entretanto, esta região é enquadrada ao ISL 1, uma vez que possui estruturas artificiais lisas.

Na região do Saco da Mangueira (R8), o tempo de toque do óleo ocorreu em aproximadamente 16 horas, seguindo paralelamente à encosta até 24 horas. Esta região possui ISL 2 e 10 (Nicolodi, 2016), uma vez que são realizadas diversas atividades econômicas, como a pesca artesanal de camarão, além de atividades de lazer. Entretanto, esta região não apresenta grandes concentrações de óleo, devido à estreita entrada da enseada do Saco da Mangueira, que causa uma barreira física.

A Ilha dos Marinheiros e a Ilha da Pólvora (R9) apresentam a menor concentração de óleo, pois somente duas simulações indicam a chegada da mancha neste local. Apesar do óleo atingir a região entre 14 e 24 horas após o derramamento, esta possui um ISL igual a 10 (Nicolodi, 2016).

Os impactos ambientais negativos decorrentes dos eventos de vazamento de óleo, somados ao baixo grau de reversibilidade em caso de poluição, afetam significativamente as comunidades nas áreas passíveis de serem atingidas por tais incidentes. Além disso, estes eventos causam consequências crônicas de contaminação na água, podendo prejudicar a biodiversidade estuarina, e impactar o potencial pesqueiro da região.

## 5. Conclusões

Os resultados da simulação hidrodinâmica de 365 dias, sendo este equivalente às médias diárias calculadas entre os anos de 2003 e 2015, foram utilizadas para identificar as principais forçantes que controlam o movimento e o tempo de toque das manchas de óleo. As principais conclusões deste estudo, considerando o vazamentos de óleo no terminal da Transpetro, no estuário da Lagoa dos Patos, são indicados a seguir.

O deslocamento da mancha de óleo ocorre devido à combinação do efeito do vento e da descarga dos afluentes da Lagoa dos Patos. Durante o período de verão e primavera, os ventos de Nordeste são de maior frequência e a descarga dos afluentes é baixa. Enquanto no outono e inverno, os ventos possuem maior variabilidade em todas as direções, que são combinadas com as maiores descargas.

Nas estações de verão e primavera, a ação dos ventos direcionou a mancha de óleo para a encosta da região do Super Porto, em 100% das simulações. Em algumas análises, as manchas de óleo também atingiram a encosta da enseada do Saco da Mangueira. Entretanto, a região dos molhes e Marismas não foram afetadas pelo derramamento.

No outono, o óleo atingiu a encosta do Super Porto em aproximadamente 80% das simulações, enquanto na região de marismas, em mais de 30 simulações, indicando uma alta possibilidade de contaminação neste período. Os setores que envolvem São José do Norte, Ilha do Terraplano e Porto Novo também apresentaram uma alta suscetibilidade à chegada do óleo derramado.

Durante o Inverno, destaca-se a probabilidade da chegada do óleo, principalmente, na Região do Super Porto, seguida pelos setores de marismas, molhes e Vila dos Pescadores, respectivamente. As demais regiões não foram afetadas neste período do ano.

Em todas as estações do ano foi observado que o óleo atinge a região do Super Porto na maioria das simulações. Dessa forma, um vazamento na Transpetro causaria uma alta suscetibilidade à chegada do óleo nas adjacências do Super Porto.

As regiões com maiores concentrações de óleo, ou seja, com maior contaminação são: encosta do Super Porto, Marismas e São José do Norte. Marismas é um dos setores mais preocupantes, uma vez que apresentaram grandes concentrações de óleo, e possuem o maior índice de sensibilidade litoral (ISL 10).

Por fim, é importante destacar que a suscetibilidade dos diferentes setores no estuário da Lagoa dos Patos, em relação a incidentes com derramamento de óleo, pode causar prejuízos sócio-econômicos e ambientais irreversíveis. Sendo assim, o presente artigo pode contribuir com informações referentes ao tempo de toque e destino do óleo, em caso de vazamento no estuário da Lagoa dos Patos, a fim de contribuir com planos de contingência, e desenvolver uma resposta rápida à contaminação.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem ao consórcio Open TELEMAT-MASCARET por disponibilizar gratuitamente o sistema TELEMAT, ao Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC) pela disponibilidade para uso do Supercomputador Santos Dumont, e ao Centro Nacional de Supercomputação (CESUP) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa. Este estudo foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Brasil - Código Financeiro 001, e foi apoiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), Brasil - Contrato 17/2551-001159-7, e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brasil - Contrato 305780/2019-0.

**Conflito de Interesses:** Os autores declaram que este estudo não foi publicado e não está sendo considerado para publicação em outra revista. Não há conflito de interesses na sua divulgação, e todos os autores aprovam a sua publicação.

## Referências

1. Gurjar, B.R., Sharma, R.K., Ghuge, S.P., Wate, S.R., Agrawal, R. Individual and Societal Risk Assessment for a Petroleum Oil Storage Terminal. *J Hazard Toxic Radioact Waste*, **2015**, 19, 4015003.
2. Brakstad O.G., Lofthus S., Ribicic D., Netzer R. Biodegradation of Petroleum Oil in Cold Marine Environments. In: *Psychrophiles: From Biodiversity to Biotechnology*, 1st ed.; Margesin, R.; Publisher: Springer, Cham; 2017; pp. 613-644.
3. Almada, G.V.d.M.B., Bernardino, A.F. Conservation of deep-sea ecosystems within offshore oil fields on the Brazilian margin, SW Atlantic. *Biol Conserv*, **2017**, 206, 92–101.
4. Moreno, R., Jover, L., Diez, C., Sanpera, C. Seabird feathers as monitors of the levels and persistence of heavy metal pollution after the Prestige oil spill. *Environ Pollut*, **2011**, 159, 2454–2460.
5. ITOPF, 2019. *Oil Tanker Spill Statistics*. Publisher: The International Tanker Owners Pollution Federation Limited, Inglaterra, 2019; Volume 1, pp. 20.
6. 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.
7. Dupuis, A., Ucan-Marin, F. A literature review on the aquatic toxicology of petroleum oil: an overview of oil properties and effects to aquatic biota. Publisher: DFO Canadian Science Advisory Secretariat Research Document, 2015; 1, 57.
8. SUPRG - Superintendência do Porto de Rio Grande. *Movimentação por segmento de carga*, 2020; 1, 23.
9. Kjerfve, B., 1986. Comparative oceanography of coastal lagoons. *Estuarine Variability*, **1986**, 1, 63–81.
10. Möller, O.O., Castaing, P. Hydrographical characteristics of the estuarine area of Patos Lagoon (30 o S, Brazil). *Estuaries of South America - Their Geomorphology and Dynamics*, **1999**, 83–100.
11. Marques, W.C., Fernandes, E.H., Monteiro, I.O., Möller, O.O. Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. *Cont Shelf Res*, **2009**, 29, 556–571.
12. Marques, W.C., Stringari, C.E., Eidt, R.T., 2014. 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*, **2014**, 568 2, 11–20.
13. Hervouet, J.M. *Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method*, 1st ed.; Publisher: John Wiley & Sons, Wiley, 1, 2007, pp. 5-75.
14. Marques, W.C., Stringari, C.E., Kirinus, E.P., Möller Jr, O.O., Toldo Jr, E.E., Andrade, M.M. Numerical modeling of the Tramandaí beach oil spill, Brazil - Case study for January 2012 event. *Applied Ocean Research*, **2017**, 65, 178-572.
15. MMA - Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. Especificações e Normas Técnicas para Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para Derramamentos de Óleo. 2007.
16. Nicolodi, J.L. Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da Bacia Marítima de Pelotas. Porto Alegre: Panorama Crítico, 2016.
17. Sutherland, J., Wallingford, H.R. *Cosmos modelling and The development of model performance statistics*. TR121-EC MAST Project number MAS3-CT97-0086, 2001. Publisher: HR Wallingford, Reino Unido, pp. 1–4.
18. Camargo. Atlas Eólico: Rio Grande do Sul. Publisher: Camargo–Schubert Engenharia Eólica. Porto Alegre – RS. 2014: Volume 1. pp. 54.
19. Möller, O.O., Castaing, P., Salomon, J.C., Lazure, P., 2001. The Influence of Local and Non-Local Forcing Effects on the Subtidal Circulation of Patos Lagoon. *Estuaries*, **2001**, 24, 297.
20. Machado, A.A., Calliari, L.J., Melo, E., Klein, A.H.F., 2010. Historical assessment of extreme coastal sea state conditions in southern Brazil and their relation to erosion episodes. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, **2010**, 5, 277–286.
21. Lopes, B.V., Trombetta, T.B., Pavlovic, A., Oleinik, P.H., Monteiro, C.B., Guimarães, R.C., da Silva, D.V., Marques, W.C., 2019. Numerical Study of Oil Spill in the Patos Lagoon Under Flood and Ebb Conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, **2019**.