

Article

Estudo Numérico de Derrames de Óleo com Condições de Enchente na Região do Super Porto de Rio Grande - RS

Silva, M. C.¹, Lopes, B. V.¹, Leal, T. F.¹, Oleinik, P. H.¹, Monteiro, C. B.², Möller, O. O. J.², Kirinus, E. de P.¹ e Marques, W. C.³

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica - PPGeo, Universidade Federal do Rio Grande – FURG - Avenida Itália - Carreiros, Rio Grande-RS, 96203-900, Brasil; mauren_costa@hotmail.com

² Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, química e Geológica -PPG, Universidade Federal do Rio Grande – FURG - Avenida Itália - Carreiros, Rio Grande-RS, 96203-900, Brasil; monteirocbm@gmail.com

³ Instituto de Matemática, Estatística e Física - IMEF - Universidade Federal do Rio Grande – FURG - Avenida Itália - Carreiros, Rio Grande-RS, 96203-900, Brasil; wilianmarques@furg.br

* Correspondente: mauren_costa@hotmail.com

Received: 14/12/2018; Accepted: 05/01/2019; Published: 16/01/2019

Resumo: O crescente uso das áreas costeiras para fins econômicos é responsável pelo aumento da poluição por hidrocarbonetos no meio marinho. Como consequência, ocorrem os acidentes na extração, transporte e armazenamento dos combustíveis, fato que ocasiona uma intensa degradação ambiental. Devido às dificuldades de tratamento de áreas contaminadas, os impactos ambientais decorrentes destes acidentes afetam direta e indiretamente a qualidade de vida das populações inseridas nestas áreas. Neste sentido, foram simulados três cenários de eventos de derrame de óleo com diferentes condições ambientais na região portuária da cidade de Rio Grande — RS, modelados pelo modelo de vazamento de óleo ECOS, acoplado ao modelo hidrodinâmico Telemac-3D. As simulações foram utilizadas para a identificação das principais forçantes que controlam o movimento das manchas de óleo, como também, o seu destino final. Para as simulações dos derrames de óleo em eventos de enchente, pôde ser observado que o deslocamento das manchas de óleo nos primeiros instantes tem como principal forçante as correntes e, após algum tempo, a ação dos ventos, que causa o deslocamento das manchas para as margens do canal. Sendo assim, o modelo ECOS se mostrou eficaz, fornecendo os locais suscetíveis à contaminação na região costeira e nos segmentos onde ocorrem elevados Índices de Sensibilidade do Litoral. Portanto, os resultados do estudo podem servir como embasamento para ações em caso de acidentes que envolvam vazamentos de óleo na Lagoa dos Patos.

Palavras-chave: Telemac-3D, ECOS, Derrame de Óleo, Lagoa dos Patos.

Numerical Study of Oil Spills Under Flood Conditions at the Rio Grande Super Port Region - RS

Abstract: The growing usage of coastal areas for economic purposes is responsible for the higher risks of oil pollution in the marine environment. Accidents can occur during the extraction, transportation and storage of fuels, which causes an intense environmental degradation. Due to the difficulties of treating contaminated areas, the environmental impacts resulting from these accidents affect directly and indirectly the quality of life of the inhabitants of these regions. In this sense, three oil spill scenarios were simulated considering different environmental conditions in the harbor region of Rio Grande - RS, modeled by the ECOS oil spill model, coupled to the Telemac-3D hydrodynamic model. The simulations were used to identify the main forces that control the movement of oil slicks, as well as the final destination of the oil. The simulations of oil spill in flood events showed that the displacement of the oil slick in the first few hours has as main force the currents, and later, the action of the

winds, which causes the displacement of the oil to the edges of the waterway. Thus, the ECOS model proved to be effective, showing locations susceptible to contamination in the coastal region and in places with high Coastal Sensitivity Indices. Therefore, the results of the study can serve as a basis for actions in case of accidents involving oil spills in the Patos Lagoon.

Keywords: Telemac-3D, ECOS, Oil Spill, Patos Lagoon.

1. Introdução

A sociedade atual está baseada na utilização de combustíveis fósseis, e a extração e o transporte de óleo exige extremo cuidado, pois este é composto por substâncias tóxicas que, expostas ao meio ambiente, podem originar efeitos crônicos de longo prazo. Desta forma, a recuperação do ambiente afetado pode levar de dezenas a centenas de anos, ou mesmo ser irreversível, afetando a sociedade em diferentes aspectos.

De acordo com a ITOPE (2016), que mantém um banco de dados de vazamentos de óleo desde 1970 a 2015, aproximadamente 5,72 milhões de toneladas de óleo foram derramadas em acidentes envolvendo navios petroleiros. Já a SUPRG (2017) explicou sobre a entrada e saída de aproximadamente 4 milhões de toneladas de grânéis líquidos no Porto de Rio Grande, informando que a maioria trata-se de óleo derivados de petróleo. Segundo (Pereira, Soares, e Marques, 2002) as operações rotineiras em portos, acidentes em redes de terminais de transporte e efluentes urbanos têm sido as maiores fontes de petróleo para os oceanos.

A região costeira do sul do Brasil apresenta alta suscetibilidade a eventuais acidentes de derrame de óleo, visto que atualmente existe um intenso transporte de óleo na região devido à presença do Porto de Rio Grande, do Terminal Aquaviário da Transpetro (Petrobras) e a Refinaria de Petróleo Riograndense S/A (SUPRG, 2017). A maior parte das atividades de transporte identificadas na região ocorre no ambiente estuarino da Lagoa dos Patos e na região costeira adjacente. A ocorrência de derrames de óleo em estuários é preocupante pois, além de serem ambientes importantes ecológica e economicamente, apresentam grande facilidade de reter óleo (GESAMP, 1993), intensificando o efeito da contaminação. Portanto, os estuários são alguns dos ambientes que apresentam maior grau de sensibilidade na escala utilizada nas cartas de sensibilidade ao óleo (Nicolodi, 2015) (Oliveira e Nicolodi, 2017).

Este trabalho tem como contribuição a utilização de simulações de eventos de derrame de óleo com diferentes condições de eventos de enchente. Para o estudo foi utilizado o modelo hidrodinâmico tridimensional Telemac-3D e o modelo ECOS (Easy Coupling Oil System). Portanto, serão identificadas as principais contribuintes oceanográficas e meteorológicas que determinam o movimento do óleo que atingem a região leste da Lagoa dos Patos, assim como as áreas de maior suscetibilidade à contaminação por acidentes.

1.1 Região de estudo

A região de estudo compreende o estuário da Lagoa dos Patos e a área costeira adjacente, situados na costa sul do Brasil. Os pontos de derrames de óleo hipotéticos ocorreram na região portuária de Rio Grande, mais precisamente no Super Porto, conforme a Fig. 1B. O local foi escolhido devido ao transporte e desembarque de petróleo, além de seu potencial risco ambiental. Para melhor identificação do leitor, a Fig. 1B também identifica os pontos de chegada das partículas de óleo na costa das três simulações apresentadas neste trabalho.

Localizada na planície costeira do Rio Grande do Sul, a Lagoa dos Patos (Fig. 1A) possui 250 km de comprimento e largura média de 40 km, cobrindo uma área em torno de 10,360 km². Estas características a tornam a maior lagoa costeira do tipo estrangulada do mundo.

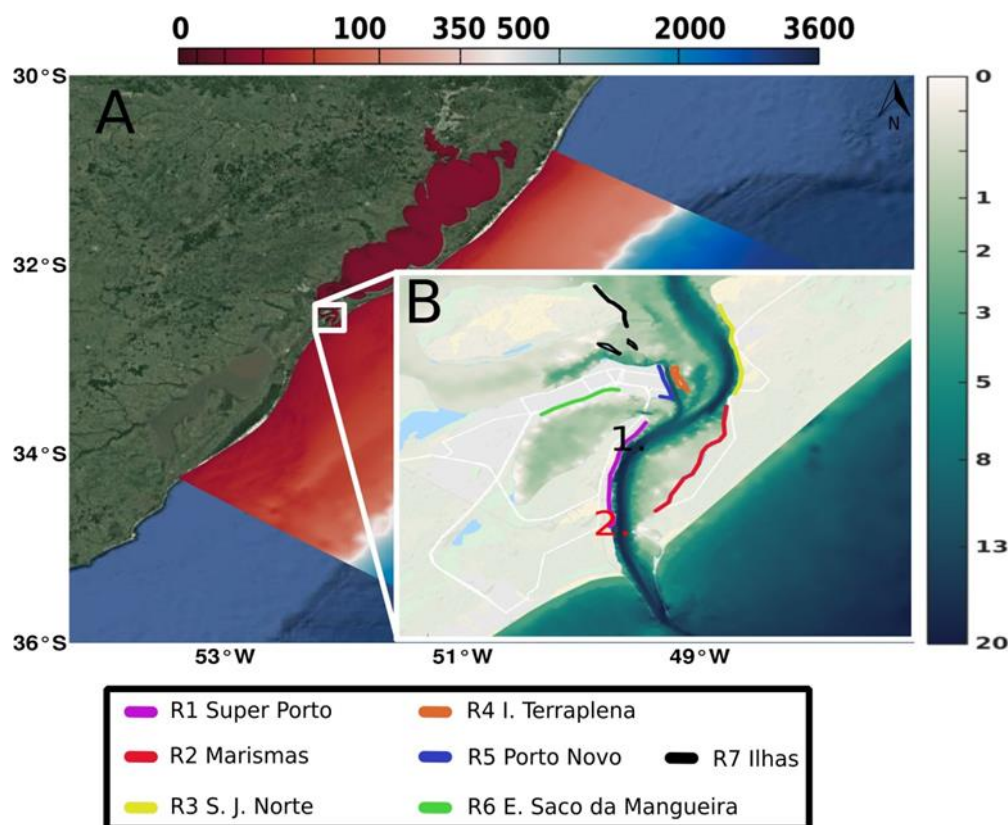


Figura 1. A) Região de influência da área de estudo. B) Área de estudo com pontos de referências. O ponto 1 refere-se ao local em que se iniciam os vazamentos de óleo, e o ponto 2 ao de coleta de dados observados de corrente.

A Lagoa dos Patos pode ser classificada como uma laguna rasa, já que sua profundidade média é de 5 m. A topografia do corpo lagunar principal é caracterizada por canais naturais e artificiais (8–9 m), amplas áreas adjacentes (<5 m) e sacos marginais rasos (Fernandes, Dyer, Möller, e Niencheski, 2002).

Segundo Moller, Lorenzzenti, Stech, e Math (1996) Castelão e Moller Jr (2003) a região estuarina é controlada por dois mecanismos, os ventos e a descarga fluvial. A ação local dos ventos atuam diretamente na superfície da água, e a ação não local influencia na porção costeira, causando um efeito de elevação ou rebaixamento do nível da água (Moller, Castaing, Salomon, e Lazure, 2001a). A atuação dos ventos e descargas dos afluentes geram a distinção da hidrodinâmica da região que tem dominância de eventos de vazante em direção a região oceânica.

Os eventos de vazante estão vinculados a ventos do quadrante norte e a constante descarga dos afluentes. O segundo padrão de hidrodinâmica são os eventos de enchente caracterizados pela entrada de água salgada do oceano para dentro do estuário, relacionados com ventos do quadrante sul e menores descargas dos afluentes (Moller et al., 2001a) (Marques, Stringari, e Eidt, 2014).

2. Metodologia

Este trabalho consiste na utilização de modelagem numérica e análise direta dos resultados obtidos. O sistema de modelagem numérica utilizado é o Telemac9, através do módulo hidrodinâmico Telemac-3D, desenvolvido dentro do consórcio open Telemac- Mascaret. Este módulo é utilizado para estudos de aspectos relacionados à hidrodinâmica tridimensional de fluxos com superfícies livres de rios, estuários, regiões costeiras e/ou oceânicas.

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

2.1 Telemac-3D

O Telemac-3D é utilizado para o estudo de aspectos relacionados à hidrodinâmica tridimensional de fluxos com superfície livre em rios, estuários, regiões costeiras e/ou oceânicas. O modelo utiliza a técnica de elementos finitos,

juntamente com os níveis verticais sigma para resolver as equações de Navier-Stokes, considerando a aproximação de Boussinesq para a resolução das equações de conservação da quantidade de movimento e equação da continuidade (Hervouet, 2007).

2.2 ECOS

Para descrever os processos associados à dinâmica do óleo no meio marinho utilizou-se o modelo ECOS. Este modelo trabalha com partículas discretas de óleo usando aproximações Lagrangeanas para avaliar as propriedades das partículas ao longo do tempo. As trajetórias das partículas são avaliadas assumindo que o óleo atua de forma análoga a um grande número de partículas que se movem independentemente na água. As velocidades das partículas são interpoladas em cada nó do domínio numérico hidrodinâmico. A posição final depende de quatro fatores diferentes: (1) velocidade da corrente, (2) velocidade do vento, (3) efeito de espalhamento e (4) difusão turbulenta (Marques et al., 2017).

2.3 Malha computacional

Inicialmente foi feita a construção da malha computacional com elementos triangulares e que representam o ambiente em questão. Nesta malha foram definidos os limites das bordas estuarina, costeira e oceânica, que constituem a extensão da Lagoa dos Patos e a zona costeira adjacente. A variação no tamanho dos triângulos do domínio é de 11.000 m na zona oceânica, a 30 m no ponto de lançamento do vazamento do óleo. Desta forma, a malha possui um total de 93.050 nós.

2.4 Condições Iniciais e de Contorno

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

Os dados de condições iniciais e as condições de contorno superficiais foram construídos com dados globais atmosféricos da NOAA (*National Oceanic Atmospheric Administration*)¹⁰, considerando a velocidade do vento, a temperatura do ar e a pressão atmosférica, com espaçamento temporal de 6 h e resolução espacial de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$. Para os dados de contorno e condições iniciais do oceano foi utilizado o modelo HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model)¹¹, considerando as componentes da velocidade da corrente, a salinidade e a temperatura da água do mar com resolução temporal de 24 h e resolução espacial de $0,75^\circ \times 0,75^\circ$.

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

- Contornos da descarga fluvial: neste trabalho os principais afluentes da Lagoa dos Patos, Rio Guaíba, Rio Camaquã e do Canal São Gonçalo foram utilizados, sendo prescritas séries temporais de descarga fluvial;
- Contornos de fronteira oceânica: onde são prescritas a maré astronômica, as velocidades de corrente, a salinidade e a temperatura;
- Contornos Sólidos: referentes ao fim do domínio da malha, basicamente na região costeira.

Os principais rios da região de estudo foram forçados com descarga fluvial média, de 2003 a 2015, com os dados do rio Guaíba e rio Camaquã extraídos da Agência Nacional de águas (ANA). Para o Canal São Gonçalo foi considerada uma vazão constante devido à ausência de dados.

2.5 Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL)

Para identificação dos locais de maior vulnerabilidade à chegada do óleo na costa, foi utilizado o ISL (Fig. 2) para a região de estudo. O ISL é uma importante ferramenta técnico-gerencial para a priorização dos ambientes a serem protegidos, que devam ser aplicados ou concentrados esforços de forma correta em casos acidentais/emergenciais, de forma a reduzir as consequências ambientais tanto do derrame quanto dos esforços de limpeza (Freire, 2006; Nicolodi, 2015). A Fig. 2 mostra a classificação do ISL para o estuário da Lagoa dos Patos, que é baseada no parâmetro que inicia em 1 para ambientes menos sensíveis, variando até 10 para os setores da costa mais vulneráveis (MMA, s.d.).

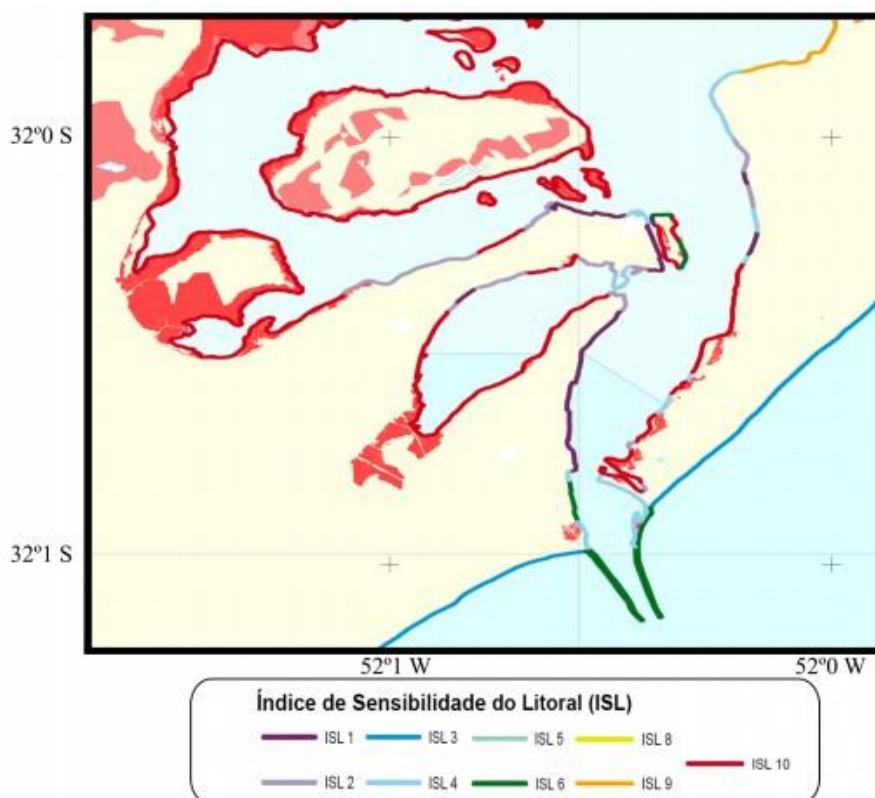


Figura 2. Mapa do Índice de Sensibilidade do Litoral ajustado para região do Porto de Rio Grande. Fonte: Adaptado de Nicolodi (2016).

2.6 Período das simulações

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

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

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

3. Calibração dos resultados hidrodinâmicos

As simulações hidrodinâmicas utilizadas para a calibração dos resultados foram conduzidas por 105 dias, de 01/11/2010 a 15/02/2011. Estas informações foram utilizadas para analisar os resultados do modelo a partir da comparação com dados observados em campo.

Para realização do estudo com o modelo hidrodinâmico, o Telemac-3D foi calibrado usando quatro parametrizações, modificando duas variáveis: o coeficiente de influência do vento e o coeficiente de fricção com o fundo. As modificações se deram da seguinte forma, conforme apresentado na tabela Tab. 1.

Tabela 1: Tabela das constantes modificadas.

Simulações	Coefficiente de atrito do vento	Coefficiente de fricção do fundo
V1F4	1.10^{-5}	0,04
V1F5	1.10^{-5}	0,05
V5F5	5.10^{-6}	0,05
V5F4	5.10^{-6}	0,04

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

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

A Fig. 3 mostra a comparação das séries temporais observadas (pontos pretos) com o resultado de quatro simulações (V5F4, V5F5, V1F5 e V1F4) com diferentes configurações (linhas coloridas).

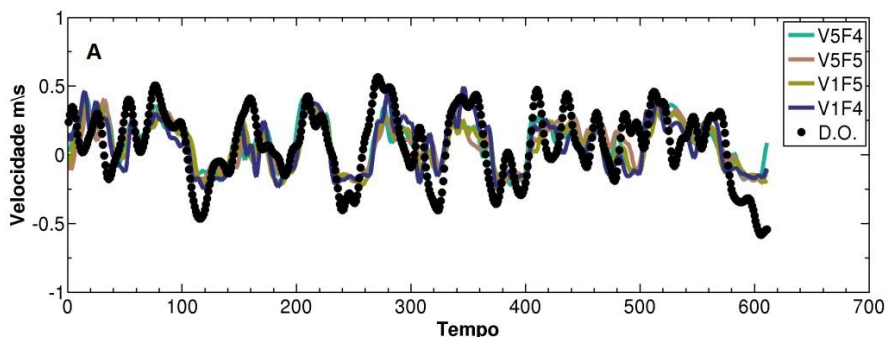


Figura 3: Comparação da velocidade meridional. Em preto são representados os dados observados (D.O.) e colorido são apresentados os dados calculados pelo modelo (V1F4, V1F5, V5F5 e V5F4).

O modelo demonstrou boa reprodução das tendências observadas de corrente, sendo que este tem tendência a subestimar os valores.

4. Resultados e discussões

Das 60 simulações realizadas foram escolhidas apenas 3 para discussão deste trabalho. De acordo com Moller, Lorenzenti, Stech, e Mata (1996), Moller, Castaing, Salomon, e Lazure (2001b) e Marques, Fernandes, Moraes, Möller, e Malcherek (2010), os fenômenos de enchente são tipicamente caracterizados pela entrada de água oceânica na região estuarina da Lagoa dos Patos através da combinação da ação local e remota do vento.

4.1 Cenário 1

O cenário 1 (Fig. 4) apresenta-se sob condições de enchente e a atuação dos ventos neste cenário ocorre do quadrante Sul, com intensidade média de 1,70 m/s e direção que inicia de Sudeste e se alterna para Leste.

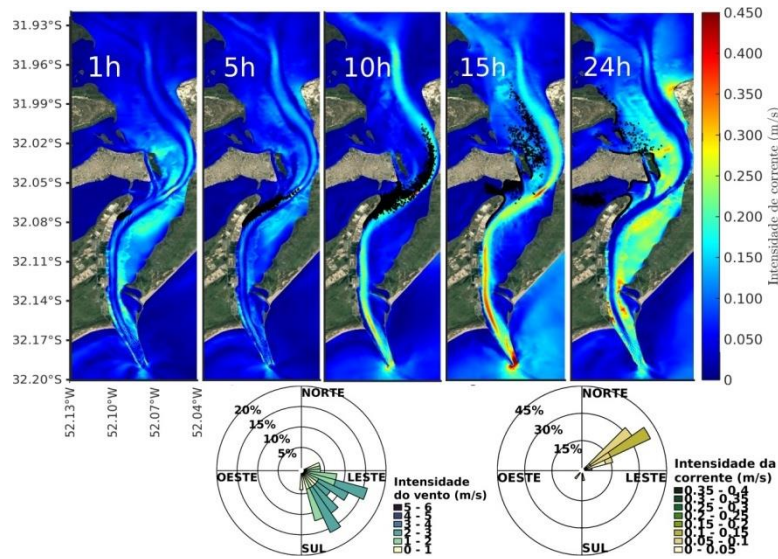


Figura 4: Cenário 1, tempo de vazamento do óleo de 24 h.

É possível observar que a condição de enchente auxilia as correntes no deslocamento das partículas de óleo para dentro do estuário, seguindo o canal de navegação até as 10 h. Após esse período, as correntes diminuem sua intensidade e os ventos de Leste controlam o deslocamento para o lado Oeste do estuário.

As partículas de óleo se espalham por uma grande área, chegando a encosta do Super Porto (R1), a Ilha de Terraplina (R4) e o Porto Novo (R5) em 10 h. Com a mudança na direção do vento para Leste, o óleo chega ao Saco da Mangueira (R6) em 15 h e a Ilha dos Marinheiros e Ilha da Pólvora (R7) após 19 h. Os locais que possuem maiores ISL, ou seja, mais vulneráveis, são o R6, uma porção do R4 e o R7.

Na Fig. 5 pode-se observar a influência das forçantes de correntes e ventos, em um período de 24 h. A corrente se mostrou com maior influência nas partículas até as 11 h, e após esse período, o vento leste começou a atuar, justificando a chegada de óleo nas regiões atingidas.

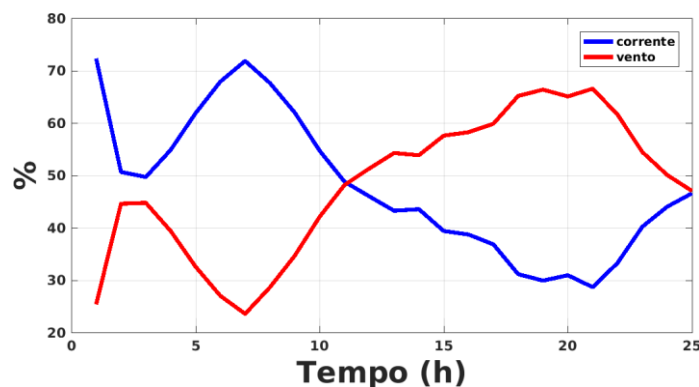


Figura 5: Relação da porcentagem média de influência do vento e corrente nas partículas de óleo para o evento1.

4.2 Cenário 2

No cenário 2 (Fig. 6), tem-se a condição de enchente com vento predominantemente de Oeste, com poucas variações para outras direções e com correntes de baixas intensidades. A ação dos ventos nesta direção faz com que as partículas de óleo se desloquem paralelamente ao ponto inicial do vazamento, em direção à região de Marismas (R2) e chegando na encosta após 6 h.

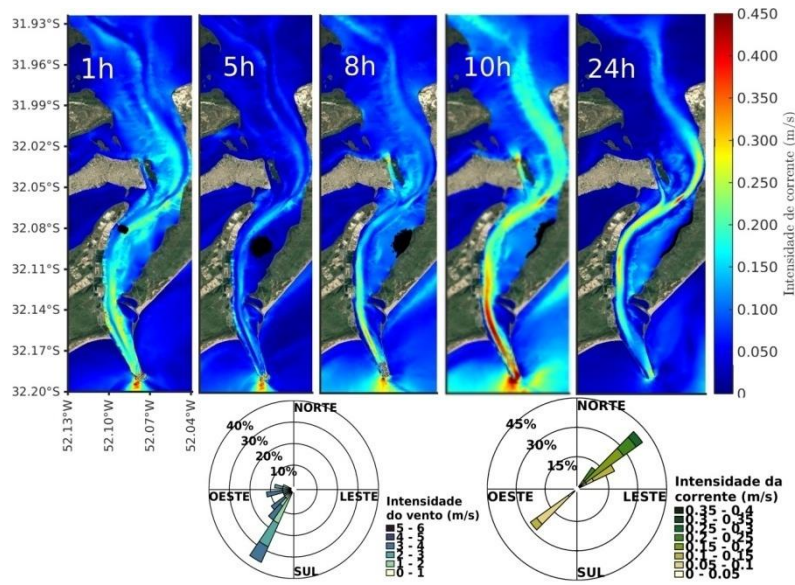


Figura 6. Cenário 2, tempo de vazamento do óleo de 24 h.

Este cenário, diferente dos demais, apresenta uma velocidade de corrente baixa e a intensidade média dos ventos é de 3,14 m/s. Essas condições favorecem o deslocamento das partículas seguindo a mesma direção dos ventos.

A região atingida (R2) apresenta ISL 10 e 4, sendo assim, o padrão de deslocamento foi classificado como de alto potencial de comprometimento da qualidade ambiental nessa localidade (Nicolodi, 2015). De acordo com Lopes (2006), os marismas estão entre os ecossistemas mais sensíveis à derrames de óleo, e devem ser considerados prioridades para proteção e limpeza.

Conforme a Fig. 7 observa-se que o vento perdurou por 13 h e que foi o maior influenciador no deslocamento das partículas de óleo.

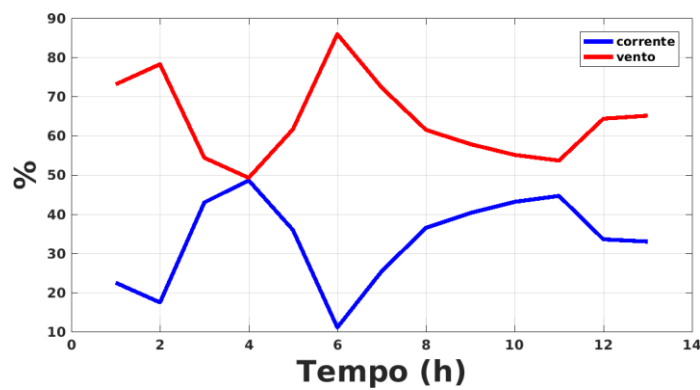


Figura 7. Relação da porcentagem média de influência do vento e corrente nas partículas de óleo para o evento 2.

Para eventos de derrames de óleo em litorais e oceanos profundos já é conhecido que o vento tem maior influência no deslocamento das manchas de óleo, conforme observado nos trabalhos de Stringari et al. (2012), Stringari et al. (2013), García-Garrido, Ramos, Mancho, Coca, e Wiggins (2016) e Marques et al. (2017).

4.2 Cenário 3

A Fig. 8 ilustra um cenário típico de condição de enchente, sob ventos predominantemente incidentes do quadrante Sul (Sudoeste), onde as partículas de óleo avançam em direção ao interior do estuário, seguindo a velocidade das correntes no canal de acesso à Lagoa dos Patos.

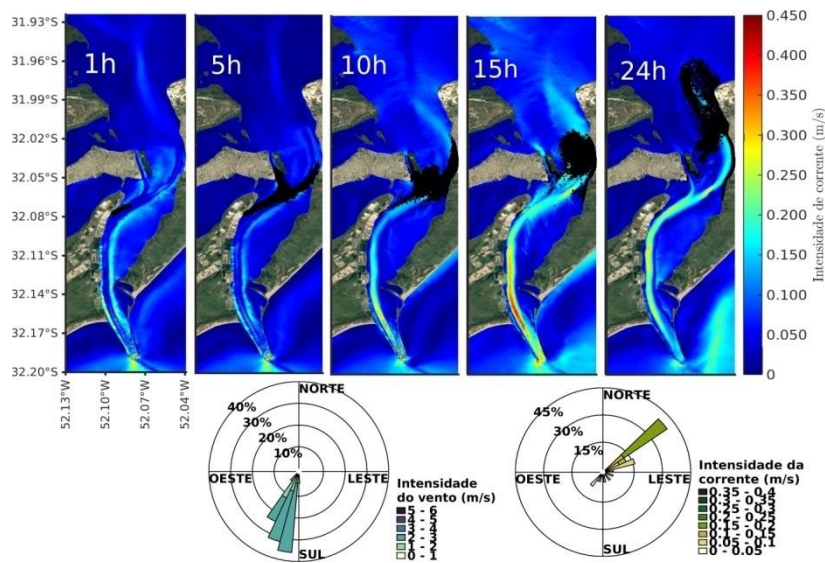


Figura 8. Cenário 3, tempo de vazamento do óleo de 24 h.

Após 5h de simulação, observa-se neste cenário (Fig. 8), que ocorre uma separação da mancha de óleo, onde as primeiras partículas chegam na região de São José do Norte (R3), no Porto Novo (R5) e na Ilha de Terraplina (R4). Esse direcionamento bifurcado das partículas de óleo é devido à interação das características morfológicas e hidrodinâmicas do canal de acesso à Lagoa dos Patos. Com o decorrer do tempo, o óleo continua se deslocando para dentro do estuário, atingindo as demais regiões. Neste cenário a velocidade média do vento é de 2,4 m/s, enquanto a velocidade da corrente em alguns pontos pode chegar a 0,3 m/s.

Ao final das 24 h, analisando o destino das partículas de acordo com o ISL da região (Nicolodi, 2015), pode-se observar a Ilha do Terraplina (R4), com ISL 6 e 10, o Porto Novo (R5), com ISL 1, e a região de São José do Norte (R3), com ISL 1, 2 e 4.

De acordo com a Fig. 9, o evento durou 24 h, os ventos e as correntes estão na mesma direção, porém as correntes tiveram maior influência no deslocamento do óleo até as 11 h, pois a maior concentração das partículas de óleo está no canal, e este local possui as maiores velocidades de corrente.

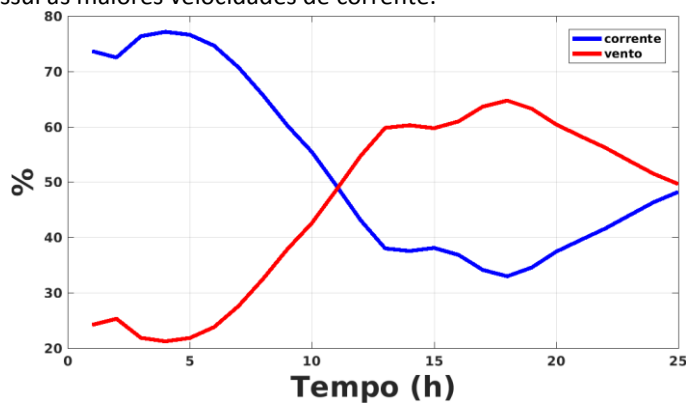


Figura 9. Relação da porcentagem média de influência do vento e corrente nas partículas de óleo para o evento 3.

Após o intervalo de 11 h, as partículas estão mais espalhadas para regiões que possuem menores velocidades de corrente, assim o vento controla o deslocamento das partículas.

5. Conclusões

O ECOS mostrou-se capaz de simular corretamente a tendência do movimento da corrente dentro do canal de acesso ao Porto do Rio Grande quando acoplado ao modelo hidrodinâmico Telemac-3D na simulação do deslocamento das manchas de óleo.

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

Pode-se indicar como principais conclusões dos estudos com os vazamentos de óleo no ponto do terminal da Transpetro:

- A tendência de deslocamento das partículas de óleo ocorre devido à combinação dos efeitos dos ventos e da descarga dos afluentes da Lagoa dos Patos;
- A ação dos ventos é a principal contribuinte para as partículas de óleo chegarem nas encostas da região estuarina, pois o vento assume diversas direções, enquanto as correntes tem dominância no sentido longitudinal do canal de acesso à Lagoa dos Patos;
- Para os cenários apresentados, os destinos finais dos eventos simulados para condições de enchentes apresentaram grande variabilidade, atingindo regiões como o Saco da Mangueira, Marismas, São José do Norte, o Porto Novo e a Ilha de Terraplana.
- As diferentes direções e intensidades de ventos podem gerar distintas interações nos efeitos sobre as trajetórias das partículas de óleo podendo tanto intensificar ou retardar a velocidade de deslocamento.

Portanto, este trabalho constata que o estudo do regime de cheias juntamente com os seus efeitos sobre as trajetórias de óleo demonstra a possibilidade de serem geradas informações cientificamente confiáveis para a orientação dos procedimentos de resposta, em caso de vazamento de óleo no Terminal da Transpetro do Porto de Rio Grande.

Agradecimentos: Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão das bolsas de estudo, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo contrato 304227/2016-1, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo contrato 17/2551-0001159-7 e ao Centro Nacional de Supercomputação (CESUP), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que auxiliaram o desenvolvimento deste trabalho. Agradecem também ao ECMWF pelos dados oceanográficos e meteorológicos utilizados nas condições de contorno do modelo, ao consórcio Open TELEMAT-MASCARET por disponibilizar o sistema TELEMAT gratuitamente e ao Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC) pela disponibilização de uso do Supercomputador Santos Dumont.

Referências

1. Castelhão, R. M., e Moller Jr, O. O. (2003). Sobre a circulação tridimensional forçada por ventos na lagoa dos patos. *Revista Atlantica*, 25(2001),91–106.
2. Fernandes, E., Dyer, K. R., Möller, O. O., e Niencheski, L. F. H. (2002). The Patos Lagoon hydrodynamics during an El Niño event (1998). *Continental Shelf Research*, 22(11-13), 1699–1713. doi: 10.1016/S0278-4343(02)00033-X
3. Freire, I. D. S. O. (2006). *Mapeamento De Sensibilidade Ambiental Para Derrames de Óleo da Porção Sul da Costa do Rio Grande do Sul* (Tese não publicada).
4. García-Garrido, V. J., Ramos, A., Mancho, A. M., Coca, J., e Wiggins, S. (2016). A dynamical systems perspective for a real-time response to a marine oil spill. *Marine Pollution Bulletin*, 12(1-2), 201–210. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.08.018> doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.08.018
5. GESAMP. (1993). *Impact of oil and related chemicals on the marine environment* (Vol. 50; Rel. Téc.).
6. Hervouet, J.-M. (2007). *Hydrodynamics of Free Surface Flows. Modelling with the Finite Element Method*. England. doi: 10.1002/9780470319628
7. ITOF. (2016). *Oil Tanker Spill Statistics 2015. The International Tanker Owners Pollution Federation Limited*.
8. Lopes, C. F. (2006). *Ambientes Costeiros Contaminados por Óleo: Procedimentos de Limpeza*.

9. Marques, W. C., Fernandes, E. H., Moraes, B. C., Möller, O. O., e Malcherek, A. (2010). Dynamics of the Patos Lagoon coastal plume and its contribution to the deposition pattern of the southern Brazilian inner shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(10), 1–22. doi:10.1029/2010JC006190
10. Marques, W. C., Stringari, C. E., 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*, 2, 11–20.
11. Marques, W. C., Stringari, C. E., Kirinus, E. P., Möller, O. O., Toldo, E. E., e Andrade, M. M. (2017). Numerical modeling of the Tramandaí beach oil spill, Brazil—Case study for January 2012 event. *Applied Ocean Research*, 65, 178–191. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.apor.2017.04.007> doi: 10.1016/j.apor.2017.04.007
12. MMA. (s.d.). Especificações e Normas Técnicas para a Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para Derramamentos de Óleo. Em *Publicação do ministério do meio ambiente* (p. 94).
13. Moller, O. O., Castaing, P., Salomon, J.-C., e Lazure, P. (2001a). The Influence of Local and Non-Local Forcing Effects on the Subtidal Circulation of Patos Lagoon. *Estuaries*, 24(2), 297. Disponível em <http://link.springer.com/10.2307/1352953> doi: 10.2307/1352953
14. Moller, O. O., Castaing, P., Salomon, J.-C., e Lazure, P. (2001b). The Influence of Local and Non-Local Forcing Effects on the Subtidal Circulation of Patos Lagoon. *Estuaries*, 24(2), 297. Disponível em <http://link.springer.com/10.2307/1352953> doi: 10.2307/1352953
15. Moller, O. O., Lorenzzenti, J. a., Stech, J., e Math, M. M. (1996). The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. *Continental Shelf Research*, 16(3), 335–351. doi: 10.1016/0278-4343(95)00014-R
16. Moller, O. O., Lorenzzenti, J. A., Stech, J. L., e Mata, M. M. (1996). The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. *Continental Shelf Research*, 16(3), 335–351. doi: 10.1016/0278-4343(95)00014-R
17. Monteiro, C. B., Kirinus, E. d. P., Marques, W. C., Oleinik, P. H., e Costi, J. (2017). Analysis of Two Oil Spills in the Southern Brazilian Shelf, in the Years of 2012 and 2014. *Defect and Diffusion Forum*, 372, 70–80. Disponível em <http://www.scientific.net/DDF.372.70> doi: 10.4028/www.scientific.net/DDF.372.70
18. Nicolodi, L. (2015). Mapeamento de sensibilidade ao óleo da baía marítima de pelotas. , 2014–2015.
19. Oliveira, E. B., e Nicolodi, J.L. (2017). Oil permeability variations on lagoon sand beaches in the Patos-Guaíba system in Rio Grande do Sul, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 115(1-2), 154–163. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.12.020> doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.12.020
20. Pereira, R. C., Soares, G. A., e Marques, J. A. N. (2002). *Biologia Marinha*.
21. Stringari, C. E. (2014). *Desenvolvimento de uma Estrutura de Previsão do Comportamento de Derrames de Óleo na Baía Pelotas* (Tese não publicada).
22. Stringari, C. E., Marques, W. C., Eidt, R. T., e Mello, L. F. (2013). Modeling an Oil Spill along the Southern Brazilian Shelf: Forcing Characterization and Its Influence on the Oil Fate. *International Journal of Geosciences*, 04(02), 397–407. Disponível em <http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/ijg.2013.42038> doi: 10.4236/ijg.2013.42038
23. Stringari, C. E., Marques, W. C., Mello, L. F., e Eidt, R. T. (2012). Modeling the Wind Influence in an Oil Spill Along the Southern Brazilian Shelf. *Engenharia Térmica (Thermal Engineering)*, 11(1), 100–109.
24. SUPRG. (2017). *Superintendência do Porto de Rio Grande. Movimentação por segmento de carga ano 2016*. Acessado em 2017-05-01, de http://www.portoriogrande.com.br/site/consultas_estatisticas.php