

Article

Estudo numérico de vazamento de óleo utilizando dados de hidrodinâmica média do estuário da Lagoa dos Patos

Lopes, B.V.^{1*}, Leal, T.F.², Oleinik, P.H.³, Trombetta, T.B.⁴, Monteiro, C.B.⁵, Möller Jr, O.O.⁶ e Marques, W.C.⁷

¹ Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande—FURG, Campus Carreiros, Av. Itália s/n Km 8, Rio Grande CEP 96201-900, Brasil; lopesbruno13@gmail.com¹; thalitaeinstein-fisica@hotmail.com²; phe.h.o1@gmail.com³; thaisa_bt@hotmail.com⁴

⁵ Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande—FURG, Campus Carreiros, Av. Itália s/n Km 8, Rio Grande CEP 96201-900, Brasil; monteirocbm@gmail.com⁵; dfsomj@furg.br⁶

⁷ Instituto de Matemática, Estatística e Física, Universidade Federal do Rio Grande—FURG Campus Carreiros, Av. Itália s/n Km 8, Rio Grande CEP 96201-900, Brasil; wilianmarques@furg.br⁷

* Correspondente: lopesbruno13@gmail.com; Tel.(53)98106-6556

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

Resumo: A impossibilidade de eliminar riscos de acidentes envolvendo o derramamento de óleo, principalmente em zonas portuárias, ressalta a importância de estabelecer protocolos para uma rápida ação contra estes eventuais desastres. Neste estudo foram simulados sessenta cenários de eventos de derrame de óleo com diferentes condições ambientais na região portuária da cidade de Rio Grande – RS, modelados pelo sistema numérico Telemac-3D + ECOS. O período da simulação hidrodinâmica foi de 365 dias, sendo este equivalente às médias diárias calculadas entre os anos de 2003 a 2015. Os resultados para a validação da hidrodinâmica, realizada no mês de janeiro de 2011, mostraram-se satisfatórios. As simulações dos vazamentos escolhidas, ao longo dos 365 dias, foram utilizadas para a identificação das principais forçantes que controlam o movimento das partículas de óleo, assim como, o seu destino final. A tendência do deslocamento das partículas de óleo é devido a combinação dos efeitos dos ventos, correntes e descarga dos afluentes da Lagoa dos Patos. Os diferentes regimes de enchentes, vazantes e condições de ventos podem criar distintas interações nos efeitos sobre as trajetórias das partículas de óleo, podendo intensificar ou retardar a velocidade de deslocamento das partículas de óleo. Sendo assim, os resultados do estudo também podem ser utilizados para subsidiar ações em caso de acidentes que envolvam vazamentos de óleo no Super Porto.

Palavras-chave: Modelagem Numérica. Telemac-3D. ECOS.

Numerical study of oil spill using average hydrodynamic data in the Patos Lagoon estuary

Abstract: The impossibility of eliminating risks of accidents involving oil spills stresses the importance in establishes fast action protocols against these eventual disasters, mainly in harbor zones. In this study sixty simulations with different scenarios for oil spill events were simulated in different environmental conditions at the harbor zone of the city of Rio Grande - RS. The simulations were made using the numerical system Telemac-3D + ECOS. The

hydrodynamic simulation period was of 365 days corresponding to the daily means calculated for the period between the years of 2003 and 2015. The hydrodynamic validation for the month of January of 2011 showed satisfactory results. The oil spills simulations, spaced over 365 days, were used to identify the main forces controlling the oil particles movement and its final destination. The trend of the movement of oil particles is due the combination of winds, currents and water discharge from the Patos lagoon tributary rivers. The different scenarios of flood/ebb regime and different direction and intensity of winds generate distinct interactions over the oil particles trajectories that can intensify or slow down the displacement velocity of the particles. Lastly, the ECOS model showed satisfactory results can support actions in case of accidents involving oil spills at the Super Porto region.

Keywords: Numerical Modeling. Telemac-3D. ECOS.

1. Introdução

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

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

A legislação ambiental brasileira preconiza que as atividades e empreendimentos que envolvam a produção e a distribuição de petróleo e seus derivados devem ser fundamentadas por simulações numéricas de cenários de derrames de hidrocarbonetos no mar. As simulações são necessárias à definição da área de influência direta e indireta das atividades, e cenários de provável ocorrência de contaminação, compondo o Plano de Emergência Individual (PEI), e corroborando para a mitigação dos danos ambientais (IBAMA, 2002).

Estima-se que aproximadamente 5,72 milhões de toneladas de petróleo foram derramados no oceano como resultado de incidentes envolvendo navios-tanque, de 1970 a 2015 (ITOPF, 2016). Atualmente, na região portuária do município de Rio Grande, no estado do Rio Grande do Sul, de acordo com a base de dados de atracções da *Superintendência do Porto de Rio Grande* (SUPRG), no ano de 2016, o Porto do Rio Grande, incluindo os Terminais de Uso Privado (TUPs) situados na área do porto organizado, movimentaram 38.223.751 toneladas de carga, sendo 4.602.636 toneladas de granéis líquidos, onde a principal forma de desembarque e embarque é de petróleo (SUPRG, 2017).

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

2. Metodologia

Na análise dos processos hidrodinâmicos foi utilizado o módulo hidrodinâmico Telemac-3D. O modelo utiliza a técnica de elementos finitos, juntamente com os níveis verticais sigma para resolver as equações de Navier-Stokes, considerando a aproximação de Boussinesq para a resolução das equações de conservação da quantidade de movimento e massa. Uma descrição completa sobre o modelo e a técnica dos elementos finitos aplicadas ao Telemac-3D podem ser encontradas em (Hervouet, 2007).

2.1. Modelo ECOS

Para descrever os processos associados a dinâmica do óleo no meio marinho foi utilizado o modelo ECOS desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande o modelo encontra-se em estágio avançado de desenvolvimento Marques et al., (2017). O ECOS manipula o óleo como partículas discretas usando a aproximação Lagrangeana para descrever a variação das propriedades de advecção, espalhamento e turbulência.

O fenômeno de advecção refere-se as trajetórias das partículas de óleo que são calculadas a partir das contribuintes de velocidade e direção do vento, velocidade e direção das correntes, velocidade de espalhamento e velocidade por efeitos da difusão turbulenta fig.1.

As componetes que mais influenciam no deslocamento das partículas de óleo é o corrente e o vento a fig.1 apresenta deforma ilustrativa o deslocamento ao longo do tempo, onde a interação das forçantes determina o deslocamento final da mancha.

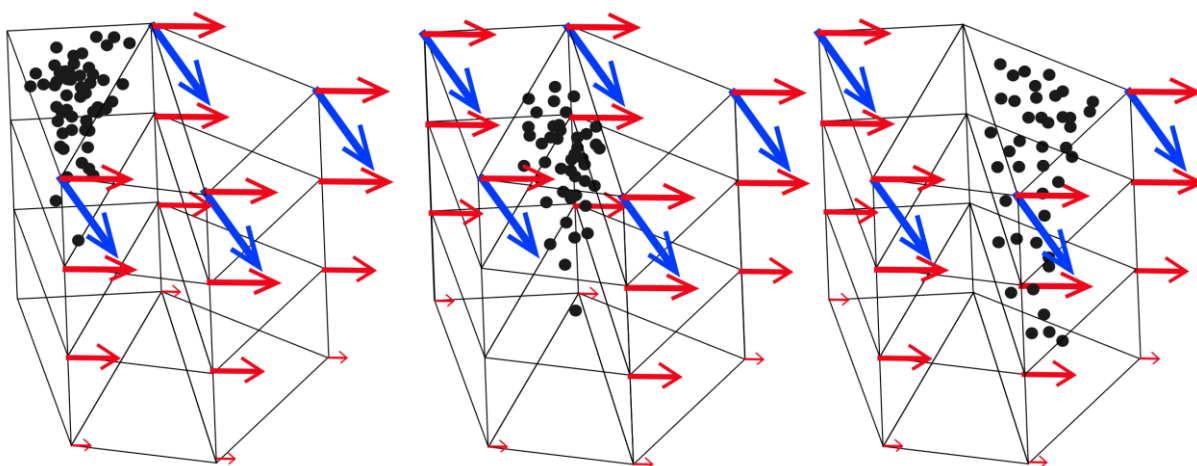


Figura 1. Forças advectivas em um elemento genérico. Vetores azuis indicam contribuição do vento e vetores em vermelho indica contribuição da corrente; o caminho final de cada partícula é interpolação algébrica deste forças.

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

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

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

2.2. Condições Iniciais e de Contorno

Além de condições iniciais pré-definidas através do uso de parâmetros e campos de propriedades, o modelo numérico necessita de condições de contorno para os cálculos da hidrodinâmica, para isso foram utilizados diferentes fontes para o domínio do modelo, e depois interpolados e prescritos para cada ponto da malha de elementos finitos.

As séries de descargas fluviais para o rio Guaíba e do rio Camaquã foram extraídas da página da Agência Nacional de Águas - ANA (www.ana.gov.br) e a partir do modelo HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*), foram obtidos os dados oceanográficos, representados pelas componentes da velocidade da corrente, salinidade e temperatura da água do mar.

Os dados meteorológicos representam as condições superficiais, utilizando o banco de dados do NOAA (*National Oceanic Atmospheric Administration*), representados por velocidade de vento, temperatura do ar e pressão atmosférica.

2.3. 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.

Na segunda etapa foi realizada uma simulação hidrodinâmica de 365 dias, sendo esta equivalente às médias diárias dos dados de vazões dos afluentes, dados atmosféricos e dados oceanográficos calculadas entre os anos de 2003 e 2015. Os resultados da simulação hidrodinâmica é possível reproduzir os principais ciclos de variabilidade sazonal 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 óleo de no máximo 24 horas e com passo de salvamento de 1 hora. No total foram realizadas 60 simulações divididas igualmente no tempo, durante os 365 dias da simulação hidrodinâmica média.

A utilização de um óleo com característica leve 800 Kg/m^3 , e a escolha hipotética de 20 m^3 de óleo vazado com o ponto inicial de derrame do óleo simulado está localizado no terminal portuário da Transpetro sendo as coordenadas do ponto $32^{\circ}04'37,2'' \text{ S}$ e $53^{\circ}05'27,6'' \text{ W}$.

3. Resultados

3.1 Validação dos Resultados Hidrodinâmicos

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

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.

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

Os dados de corrente foram obtidos com um *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP). 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 horas das séries temporais). Os dados de salinidade foram obtidos utilizando um sensor de Condutividade e Temperatura (CT) posicionado no mesmo ponto do canal de navegação, em uma profundidade de 3 metros.

A fig. 2 mostra a comparação das séries temporais observadas (pontos pretos) com o resultado de quatro simulações com diferentes configurações (linhas cinzas). As configurações diferem quanto aos valores do coeficiente do vento e de atrito de fundo, que foram calibrados de forma a reduzir a diferença entre os valores observados e simulados.

A simulação V1F4 (linha azul) apresentou a melhor performance para dos dois parametros de corrente e salinidade, quando comparada com as demais simulações, para corrente meridional o coeficiente de correlação ficou em 0,661 e o erro absoluto 0,155 e para salinidade R 0,768 e o erro de 5,740. A verificação dos resultados indica que mesmo com a limitação dos dados usados para forçar o modelo, a simulação reproduz a tendência das observações no canal estuarino da Lagoa dos Patos. Assim é possível utilizar a simulação para avaliar prováveis cenários de derramamento de óleo na região do estudo.

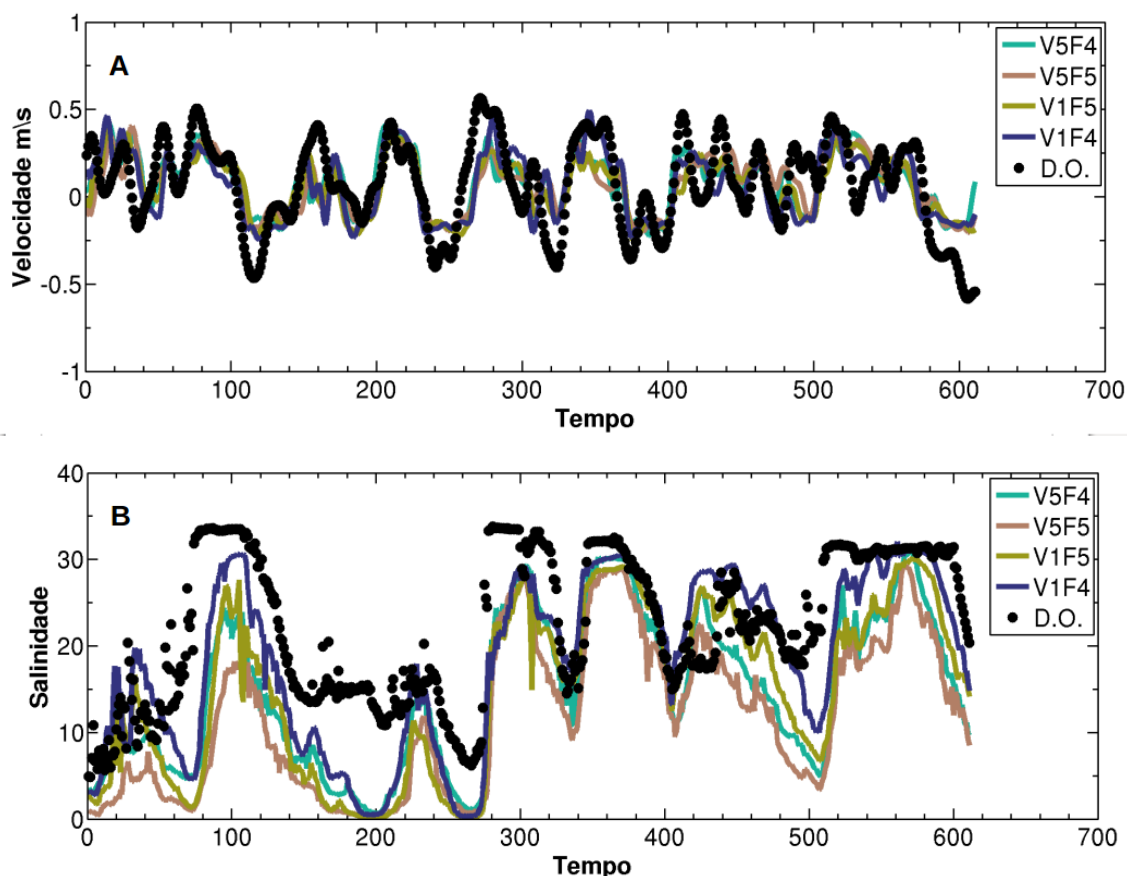


Figura 2. Comparação da velocidade meridional (A) e da salinidade (B). Em preto são representados os dados observados (D.O) e colorido são apresentados os dados calculados pelo modelo (V1F4, V1F5, V5F5 e V5F4).

3.2. Hidrodinâmica

Na simulação hidrodinâmica com as médias diárias dos anos de 2003 a 2015, pode ser observado uma atenuação dos efeitos das componentes dos ventos e das correntes, quando comparado com outros estudos que não utilizaram os valores médios das componentes destas variáveis na mesma região de estudo (Moller Jr et al., 1996, Stringari et al., 2013, Marques et al., 2010, Marques et al., 2014).

3.3. Deslocamento das partículas de óleo de todos os vazamentos

A fig. 3 apresenta todas as 60 simulações dos vazamentos de óleo, em um quadro temporal, onde cada cor representa um vazamento. Nesta figura observa-se as possibilidades para o deslocamento das partículas de óleo, no médio e baixo estuário da Lagoa dos Patos, em vazamentos com períodos de 24 horas.

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

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

Neste contexto é possível perceber que as partículas de óleo ocupam uma porção da região portuária de Rio Grande e São José do Norte. Para melhor entendimento deste estudo é apresentado a fig.3.

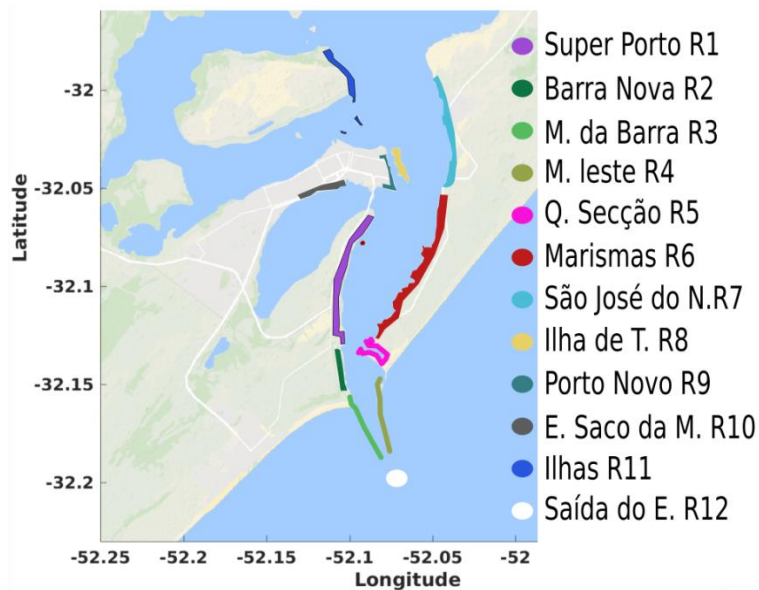


Figura 3. Locais característicos da região de estudo, relacionadas com os pontos de chegada do óleo

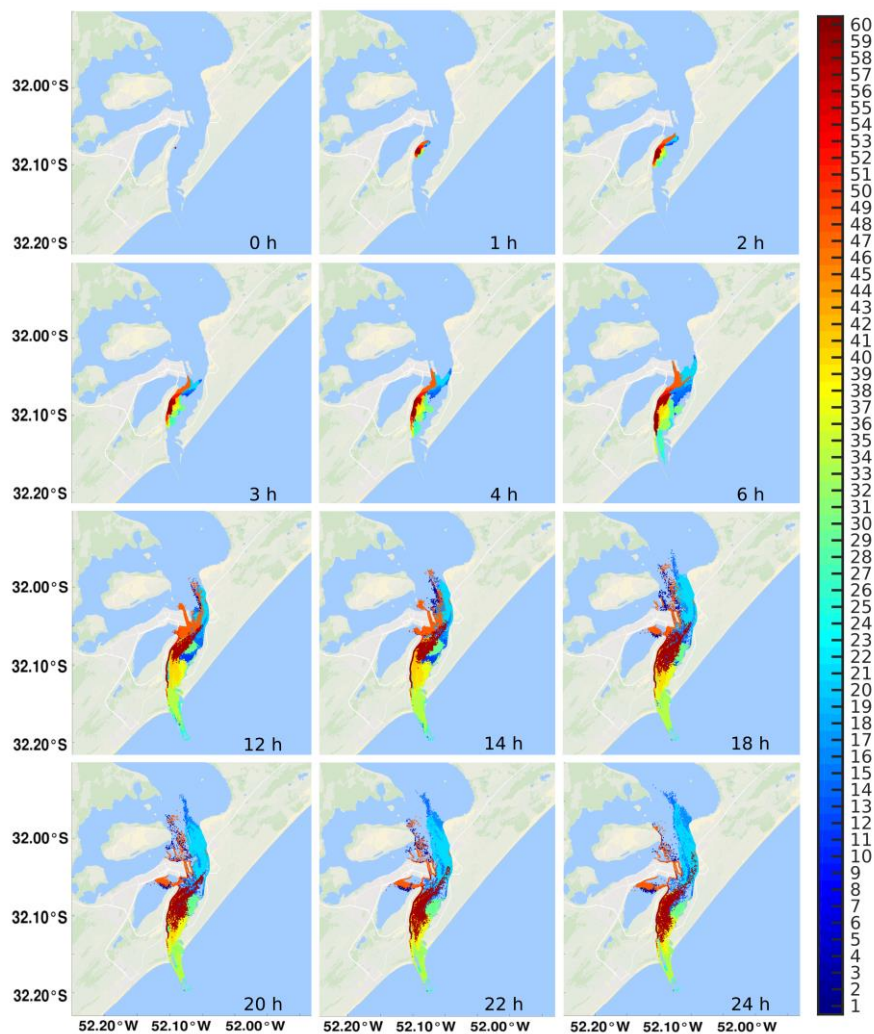


Figura 4. Resultados das 60 simulações de vazamento de óleo, as imagens ilustram o deslocamento das partículas no tempo.

No verão na cor azul escuro na fig.4, e primavera cor vermelho na fig.4 possui pouca variabilidade nos padrões dos ventos, com sentido de nordeste, e por consequência, as correntes contribuem para o transporte do óleo no sentido de vazante.

Nas estações de verão e primavera são observados que em 100% das simulações uma porção das partículas de óleo chega na encosta da região do Super Porto (R1). Nestas estações, existe a probabilidade de que em 17,9% das simulações, uma porção das partículas de óleo chegue a encosta da enseada do Saco da Mangueira (R10). Nenhuma das simulações nos períodos de verão e primavera chegam a região do Molhes da Barra (R3), Molhes Leste (R4), Q.Secção (R5) e Marismas (R6).

No outono nas cores azul e azul celeste na fig.4, e no inverno nas cores verde, amarelo e laranja na fig.4 a variação da direção dos ventos e a vazão acumulada dos rios induzem as correntes a variar o sentido, e por conseguinte, observa-se a chegada das partículas de óleo em vários locais.

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

No outono ocorre a variação da direção e intensidade da velocidade de corrente e ventos (alternada por fenômenos de vazante e enchente) no baixo estuário, em 6 simulações a corrente é orientada pelo fenômeno de enchente, assim as partículas de óleo deslocam-se para a região de São José do Norte (R7), Ilha de Terraplina (R8) e Porto Novo (R9). Outra característica é a influência do vento no quadrante Sul, pois 8 simulações atingiram região de Marismas (R6).

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

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

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

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

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

4. Conclusão

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

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

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

maiores descarga dos afluentes;

- Nas estações de verão e primavera são observados que em 100% das simulações uma porção das partículas de óleo chegam na encosta da região do Super Porto (R1). Nestas estações, existe a probabilidade de que em 17,9% das simulações, uma porção das partículas de óleo cheguem à encosta da enseada do Saco da Mangueira (R10). Não tiveram ocorrências de chegada de partículas de óleo nas regiões do Molhes da Barra (R3), Molhes Leste (R4), Q.Secção (R5) e Marismas (R6);
- Nas estações de outono e inverno são observados que em 60% das simulações uma porção de partículas de óleo chegam à encosta da região so Super Porto (R1), 40% chegam na região de Marismas (R6) e 30% atingem a região dos Molhes da Barra (R3). A probabilidade das partículas de óleo saírem para fora da região do Estuário (R12) é de 16,7% e nestas simulações, as partículas de óleo não chegaram a região do Saco da Mangueira (R10), Ilha dos Marinheiros e Ilha da Pólvora (R11);
- A contaminação da água e os efeitos diretos e indiretos, poderiam influenciar na ocorrência das especies na área estuarina, no potencial pesqueiro da região, assim como na saúde, na segurança e no bem estar da população, pois o petróleo possui em suas composições, componentes altamente tóxicas aos seres vivos.

Acknowledgment: 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 17/2551-0001 159-7 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. Almada, G. V. d. M. B., e Bernardino, A. F. (2017). Conservation of deep-sea ecosystems within offshore oil fields on the Brazilian margin, SW Atlantic. *Biological Conservation*, 206, 92–101. doi: 10.1016/j.biocon.2016.12.026
2. Al-Rabeh, A. H., Cekirge, H. M., e Water, N. G. (1989). A stochastic simulation model of oil spill fate and transport. *Applied Mathematical Modelling*, 13, 322–329.
3. Alves, T. M., Kokinou, E., e Zodiatis, G. (2014). A three-step model to assess shoreline and offshore susceptibility to oil spills: The South Aegean (Crete) as an analogue for confined marine basins. *Marine Pollution Bulletin*, 86(1-2), 443–457. doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.06.034
4. Bozkurtoğlu, Ş. N. E. (2017). Modeling oil spill trajectory in Bosphorus for contingency planning. *Marine Pollution Bulletin*, 123(1-2), 57–72. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.09.029
5. Brakstad, O. G. (2017). Biodegradation of Petroleum Oil in Cold Marine Environments. *Psychrophiles: From Biodiversity to Biotechnology*.
6. Chapman, H., Purnell, K., Law, R. J., e Kirby, M. F. (2007). The use of chemical dispersants to combat oil spills at sea: A review of practice and research needs in Europe. *Marine Pollution Bulletin*, 54(7), 827–838. doi: 10.1016/j.marpolbul.2007.03.012.
7. Culbertson, J. B., Valiela, I., Pickart, M., Peacock, E. E., e Reddy, C. M. (2008). Long-term consequences of residual petroleum on salt marsh grass. *Journal of Applied Ecology*, 45(4), 1284–1292. doi: 10.1111/j.1365-2664.2008.01477.
8. Fay, J. A. (1969). *The Spread of Oil Slicks on a Calm Sea*. M.I.T. Fluid Mechanics Laboratory.
9. Flores, H., Andreatta, A., Llona, G., e Saavedra, I. (1998). Measurements of oil spill spreading in a wave tank using digital image processing. *Transactions on Ecology and the Environment*, 20.
10. Gurjar, B. R., Sharma, R. K., Ghuge, S. P., Wate, S. R., e Agrawal, R. (2015). Individual and Societal Risk Assessment for a Petroleum Oil Storage Terminal. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 19(4), 4015003. doi: 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000277
11. Hervouet, J. M. (2007). *Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method*. John Wiley & Sons, Wiley.

13. IBAMA. (2002). Informação Técnica ELPN/IBAMA N 023/02 - Modelagem de Derramamento de óleo no mar.
14. ITOFF. (2016). Oil Tanker Spill Statistics 2015. The International Tanker Owners Pollution Federation Limited.
15. Liu, X., Guo, M., Wang, Y., Yu, X., Guo, J., Tang, C., . . . Li, B. (2016). Assessing pollution-related effects of oil spills from ships in the Chinese Bohai Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 110(1), 194–202. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.06.062
16. Lopes, B. V., Oleinik, P. H., Monteiro, C. B., da Silva, D. V., Marques, W. C., Guimarães, R. C., e Trombetta, T. B. (2017). Numerical Study of Oil Spill in the Patos Lagoon Under Flood and Ebb Conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, v.7, p.4 - , 2019. doi: 10.3390/jmse7010004.
18. Machado, A. A., Calliari, L. J., Melo, E., e Klein, A. H. F. (2010). Historical assessment of extreme coastal sea state conditions in southern Brazil and their relation to erosion episodes. *Journal of Aquatic Sciences*, 5, 277–286.
19. Marques, W. C., Fernandes, E. H. L., e Rocha, L. A. O. (2011). Straining and advection contributions to the mixing process in the Patos Lagoon estuary, Brazil. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(3), 1–23. doi: 10.1029/2010JC006524.
20. 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.
21. Marques, W. C., Stringari, C. E., Kirinus, E. P., Möller Jr, O. O., Toldo Jr, 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. doi: 10.1016/j.apor.2017.04.007
22. Moller, O. O., Castaing, P., Salomon, J.-C., e Lazure, P. (2001). The Influence of Local and NonLocal Forcing Effects on the Subtidal Circulation of Patos Lagoon. *Estuaries*, 24(2), 297. doi: 10.2307/1352953.
23. Moreno, R., Jover, L., Diez, C., e Sanpera, C. (2011). Seabird feathers as monitors of the levels and persistence of heavy metal pollution after the Prestige oil spill. *Environmental Pollution*, 159(10), 2454–2460. doi: 10.1016/j.envpol.2011.06.033.
24. Sebastião, P., e Soares, C. G. (1995). Modeling the Fate of Oil Spills at Sea. *Spill Science & Technology Bulletin*, 2, 121–131.
25. SUPRG. (2017). Superintendência do Porto de Rio Grande. Movimentação por segmento de carga ano 2016.