



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física



Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Estudo de Cenários de Vazamento de Óleo no Porto de Rio Grande - RS e seus Impactos Ambientais

Bruno Vasconcellos Lopes¹, Kelly Kathleen Almeida Heymann², Caroline Barbosa Monteiro³ Phelype Haron Oleinik⁴, Wiliam Correa Marques⁵, Thaísa Beloti Trombetta⁶, Osmar Olinto Möller Junior⁷.

¹Mestrando em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Campus Carreiros, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil, lopesbruno13@gmail.com (autor correspondente). ²Mestranda em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Curitiba, Paraná, Brasil, heylmannkelly@gmail.com. ³Doutoranda em Oceanografia Física, Química e Geológica, Universidade Federal do Rio Grande, Campus Carreiros, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil, monteirocbm@gmail.com. ⁴Graduando em Engenharia Civil Costeira e Portuária, Universidade Federal do Rio Grande, Campus Carreiros, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil, phe.h.o1@gmail.com. ⁵Doutor em Oceanografia Física, Química e Geológica, Professor no Instituto de Matemática, Estatística e Física (IMEF) e nos Programas de Pós-Graduação: Modelagem Computacional (PPGMC), Oceanografia Física, Química e Geológica (PPGOFQG) e Engenharia Oceânica (PPGEO), Universidade Federal do Rio Grande, Campus Carreiros, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil, wilianmarques47@gmail.com. ⁶Mestranda em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Campus Carreiros, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil, thaisa_bt@hotmail.com. ⁷Doutor em Oceanologie - Professor do curso de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande, Campus Carreiros, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil, dfsomj@furg.br.

Artigo recebido em 02/04/2018 e aceito em 05/12/2018

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 seis 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. As simulações foram utilizadas para a identificação das principais forçantes que controlam o movimento das manchas de óleo, como também, o seu destino final. O período da simulação hidrodinâmica realizada foi de um ano, sendo este equivalente às médias diárias calculadas entre os anos de 2003 a 2015. Para as simulações dos derrames de óleo em eventos de vazante e enchente, pode 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. Por fim, o modelo ECOS se mostrou eficaz na simulação do deslocamento da mancha de óleo, ao fornecer os resultados de suscetibilidade ao toque do óleo na costa, nas áreas de singularidade e riqueza ambientais, e nos segmentos onde ocorrem elevados Índices de Sensibilidade do Litoral. Sendo assim, os resultados do estudo também podem ser utilizados para subsidiar ações em caso de acidentes que envolvam vazamentos de óleo na Lagoa dos Patos. Palavras-Chave: Vazamento de óleo, Telemac-3D, impactos ambientais, estuário da Lagoa dos Patos.

Study of oil leakage scenarios in the Porto of Rio Grande - RS and its environmental impacts

ABSTRACT

Facing the impossibility to eradicate the hazards due to oil spills, mainly in harbor zones, it is crucial the establishment of action protocols against such eventual accidents. Therefore, the focus of this study is to understand the potential risks showed by model simulations evolving oil spills at the harbor region of Rio Grande - RS. Eight scenarios were simulated using the numerical modeling system Telemac-3D + ECOS under different environmental and oil spills conditions. The resulting simulations collaborated to the identification of the mainly forcing factors that control the oil slicks movement and it is final destination. The hydrodynamic simulation period was of one year, equivalent to the mean average computed between the years from 2003 of 2015. The oil spill simulations during ebb and flood regimes showed that the displacement of the oil slick, at first hours, has as mainly forcing the dominant current. And some time

2229

after, the wind makes the oil slick displacement move towards the sides of the channel. The results showed a range of possible negative direct and indirect environmental impacts in an oil slick scenario at the harbor of Rio Grande. Observing the coastal oil touch susceptibility results, areas of singular and rich ecosystems, as well as segments of high Coastal Sensitivity Indexes, the model ECOS proved effective in simulating the displacement of oil slicks. Such results could evenly support actions in cases of accidents involving oil slicks at the Patos lagoon.

Keywords: Oil Spill, Telemac-3D, numerical simulation, environmental impacts, Patos Lagoon.

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 destas atividades, podem ocorrer acidentes na extração, transporte e armazenamento dos combustíveis, fato que ocasiona uma intensa degradação ambiental capaz de afetar a população inserida nesta região (Braskstad et al., 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; Almada e Bernardino, 2017). A preocupação insere-se não somente no momento e locais atingidos, mas também ao longo do tempo, visto que a poluição causada pelos acidentes persiste por várias décadas (Culbertson et al., 2008; Moreno et al., 2011; Fadigas, 2017).

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 2016 (ITOPF, 2017). Neste cenário, o Porto do Rio Grande movimentou 38.223.751 toneladas de carga, sendo 4.602.636 de granéis líquidos referentes principalmente de hidrocarbonetos em forma de combustíveis (SUPRG, 2016). Diante da impossibilidade de eliminar os riscos de acidentes envolvendo derramamento de óleo, principalmente em zonas onde ocorre o transbordo de carga de petroleiros, é importante o

estabelecimento de protocolos para uma rápida ação contra estes eventuais acidentes (Stringari et al., 2013; Liu et al., 2016; Boehm et al., 2016).

Segundo preconizado pela legislação ambiental brasileira, 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. Tais simulações são necessárias para a definição da área de influência indireta destas atividades, considerando os cenários de provável ocorrência de contaminação, compondo os Planos de Emergência Individual (PEI) e corroborando para a mitigação de danos (IBAMA, 2002).

Neste contexto, dados os potenciais riscos de derrames de óleo envolvendo a Região Sul do Brasil, o presente estudo foi direcionado à região portuária do município de Rio Grande/RS. O estudo de caso fundamentou-se em simulações de eventos de derrames de óleo, realizadas pelo acoplamento entre o módulo de simulações hidrodinâmicas tridimensional do sistema Telemac (www.opentelemac.org) e o modelo de óleo ECOS (*Easy Coupling Oil System*). A partir dos resultados de diferentes condicionantes ambientais, principalmente de ventos e correntes, o presente trabalho buscou comparar os cenários de vazamento de óleo, observando os Índices de Sensibilidade do Litoral (ISL), conforme MMA (2007), e as áreas de singularidade e riqueza ambientais.

Material e métodos

Área de estudo

Região estuarina da Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil (Fig. 1).

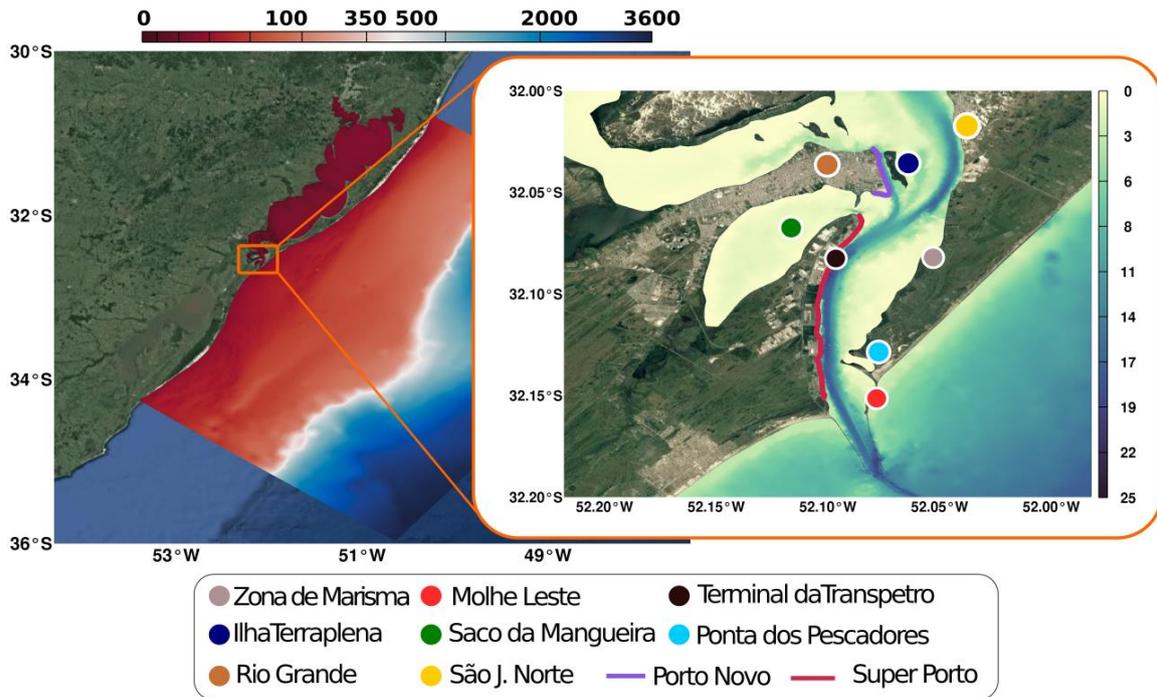


Figura 1. Área de estudo com pontos de referências. O ponto em preto é o local em que inicia os vazamentos de óleo e os demais referem-se a os locais de chegada do óleo.

Modelo Numérico

O trabalho foi desenvolvido utilizando uma malha computacional construída com o software BlueKenue, que foi desenvolvido pelo CHC (*Canadian Hydraulic Centre*), com os limites das bordas estuarina, costeira e oceânica devidamente georreferenciadas, cobrindo toda a extensão da Lagoa dos Patos e da Plataforma Continental Sul do Brasil. A malha computacional gerada, tipo não estruturada e com elementos triangulares, foi construída para a representação dos domínios de estudo a partir de níveis de refino não uniformes, obtendo maiores resoluções em regiões específicas (Lynch et al., 1996; Kirinus et al., 2015). No domínio do estudo, os tamanhos dos elementos triangulares variam dos 11.000 m na zona oceânica a 30 m no ponto de lançamento do vazamento do óleo. O número total de nós na malha computacional foi de 93.050 pontos.

Para a discretização vertical foram inseridos os dados batimétricos da região estuarina e oceânica obtidos de cartas náuticas (Lagoa dos Patos - N° 2140; Pinhal a Rio Grande - N° 2350; Rio Grande e Arroio Chuí - N° 2112) e dados costeiros do levantamento batimétrico da Marinha do Brasil (LEPLAC).

Telemac-3D

Para as simulações foi utilizado o módulo hidrodinâmico Telemac-3D do sistema de modelagem numérica open Telemac-Mascaret (www.opentelemac.org), seguindo a metodologia

de Marques et al. (2017). Os processos turbulentos horizontais e verticais foram simulados pelo modelo de turbulência k-epsilon.

O módulo hidrodinâmico Telemac-3D permite o estudo dos aspectos relacionados à hidrodinâmica tridimensional dos fluxos de superfície livre em rios, estuários, regiões costeiras e oceânicas (Hervouet, 2007). De acordo com Hervouet (2007), o modelo resolve as equações de Navier-Stokes considerando a equação da continuidade e a aproximação de Boussinesq para a resolução das equações de quantidade de movimento.

Modelo ECOS

Para descrever os processos do óleo no meio aquático foi utilizado o modelo ECOS (*Easy Coupling Oil System - BR 51 2013 000131-5 INPI*) que vem sendo desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande desde o ano de 2010 (Marques et al., 2013). O modelo ECOS manipula o óleo como partículas discretas utilizando a aproximação Lagrangeana para descrever a variação das propriedades (Marques et al., 2017, Lopes et al., 2017).

As trajetórias das partículas são avaliadas assumindo que o óleo funciona de forma análoga a um grande número de partículas que se movem de forma independente na água. As velocidades das partículas são interpoladas em cada nó do domínio numérico hidrodinâmico. A posição final da partícula depende de quatro fatores diferentes:

velocidade e direção das correntes, velocidade e direção do vento, efeito de espalhamento e difusão turbulenta (Stringari et al., 2013; Marques et al.; 2017; Monteiro et al. 2017; Lopes et al., 2017).

O fenômeno de advecção se refere às trajetórias das partículas e o modelo ECOS calcula utilizando a equação 1.

$$\begin{aligned} U_i &= KcUc + KwUv \\ V_i &= KcVc + KwVv \\ W_i &= KcWc + Wi \end{aligned} \quad (1)$$

onde i representa o índice para cada partícula, U_i , V_i e W_i são as componentes meridional, zonal e vertical da velocidade da partícula, Uc , Vc e Wc são as componentes de transporte das correntes, Uv e Vv são componentes de transporte associadas ao vento, Kc e Kw são coeficientes de transporte das correntes e dos ventos, respectivamente, e Wi a componente de fluatibilidade do óleo.

Empregando a proposta de French- Mccay (2004) no cálculo da componente de fluatibilidade da partícula de óleo (Wi), é descrita a equação 2.

$$W_i = \frac{d_i^2 g (1 - \frac{\rho_o}{\rho_w})}{18V_w} \quad (2)$$

onde d_i é diâmetro da gota de óleo, g a aceleração da gravidade, ρ_o a massa específica do óleo, ρ_w a massa específica da água e V_w a viscosidade dinâmica da água.

O efeito de espalhamento ou expansão horizontal da mancha do óleo ocorre devido à diferença entre as tensões superficiais da água e do óleo. Atualmente, o modelo ECOS usa a aproximação de Fay (1969) para avaliar as velocidades de espalhamento. Além disso, o algoritmo de espalhamento final do ECOS usa os coeficientes propostos por Paulo (1996) e Flores et al. (1998) e a formulação de Proctor et al. (1994).

Para avaliar o efeito de espalhamento na mancha de óleo, as seguintes equações são usadas (3), (4), (5), (6) e (7):

$$D_x = D_y = \frac{\pi K_{s1}^2}{16} \left(\frac{\Delta \sigma V^2}{V_w^2} \right)^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

$$Ur = \sqrt{\frac{2D_x}{\Delta t}} \quad (4)$$

$$Vr = \sqrt{\frac{2D_y}{\Delta t}} \quad (5)$$

$$Us_i = R1 \cos(2\pi R_2) Ur \quad (6)$$

$$Vs_i = R1 \sin(2\pi R_2) Vr \quad (7)$$

onde D_x e D_y são os coeficientes que determinam o deslocamento máximo do óleo, $K_{s1}^2 = 0,57$ é um parâmetro empírico adimensional, V o volume de derramamento, t o tempo de simulação e Δt o passo de tempo da simulação. Finalmente, as velocidades de espalhamento são calculadas nas Equações (6) e (7).

Para os cálculos de difusão turbulenta o modelo utiliza do comprimento de mistura modificado descrito por Al-Rebet et al. (1998).

$$\Delta s = R1 \sqrt{(12D_x \Delta t)} \quad (8)$$

$$Ud_i = \Delta s \cos(2\pi R_2) \quad (9)$$

$$Vd_i = \Delta s \sin(2\pi R_2) \quad (10)$$

onde Δs representa a máxima distância que um partícula pode deslocar-se durante o passo de tempo Δt e Ud_i e Vd_i são as componentes de velocidade de difusão.

Após todas as propriedades das contribuintes no transporte terem sido calculadas, a posição final de cada traçador é integrada no tempo usando o método de Runge-Kutta de segunda ordem.

Dados de condições iniciais e de contorno

Os dados de condições iniciais e as condições de contorno superficiais foram construídos com dados globais atmosféricos da NOAA (<http://noaa.org/>), 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° x 2,5°. Para os dados de contorno e condições iniciais do oceano foi utilizado o modelo HyCOM (<http://hycom.org/>), considerando as componentes da velocidade da corrente, a salinidade e a temperatura da água do mar com resolução temporal de 24 h e espacial de 0,75° x 0,75°.

Os principais rios da região de estudo foram forçados com descarga fluvial média, ou seja, foram utilizadas médias de dados de vazão de longo período. Para o Rio Guaíba foi considerado 1.080 m³.s⁻¹ segundo Marques e Moller Jr (2009), para o Rio Camaquã foi utilizado o valor de 307 m³.s⁻¹, de acordo com Marques et al. (2014) e para o Canal São Gonçalo foi considerado o valor de 365 m³.s⁻¹.

Período da simulação hidrodinâmica

O período da simulação hidrodinâmica foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa foi realizada a verificação da qualidade dos resultados hidrodinâmicos, os quais foram conduzidos por 105 dias simulados (01/11/2010 a 15/02/2011). Estas informações obtidas foram utilizadas para validação dos resultados do modelo, a partir da

comparação com dados de correntes e salinidade observados em campo na região da Praticagem de Rio Grande localizado no Super Porto. Na segunda etapa foi realizada uma simulação com 365 dias, sendo esta equivalente às médias diárias dos dados atmosféricos e oceanográficos calculadas entre os anos de 2003 e 2015.

Para a realização das simulações de derrame de óleo foram analisadas as condições hidrodinâmicas e a intensidade dos ventos, de forma que foram definidos seis eventos mais comuns levando em consideração as condições de vazante e enchente na região do estuário da Lagoa dos Patos. O ponto de derrame do óleo simulado está localizado no terminal portuário da Transpetro, sendo as coordenadas do ponto 32°04'37,2" S e 53°05'27,6"O (Fig. 1). O volume de vazamento foi considerado de 20 m³ de óleo, sendo este, o valor referente ao pior cenário,

conforme estabelecido pelo ELPN/IBAMA (2002).

Índice de Sensibilidade do Litoral

Para identificação da problemática ao toque do óleo na encosta foi utilizado o ISL, por se tratar de uma ferramenta amplamente utilizada para o planejamento de contingência e para a implementação de ações de resposta a incidentes de poluição por óleo (Castanelo et al., 2009; Nicolodi, 2016). A Figura 2 mostra a classificação do ISL para o estuário da Lagoa dos Patos, baseada no parâmetro de valor 1, para ambientes menos sensíveis, variando até 10 para os setores da costa mais vulneráveis (MMA, 2007).

O ISL possui um sistema de hierarquização no qual 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 (Nicolodi, 2016).

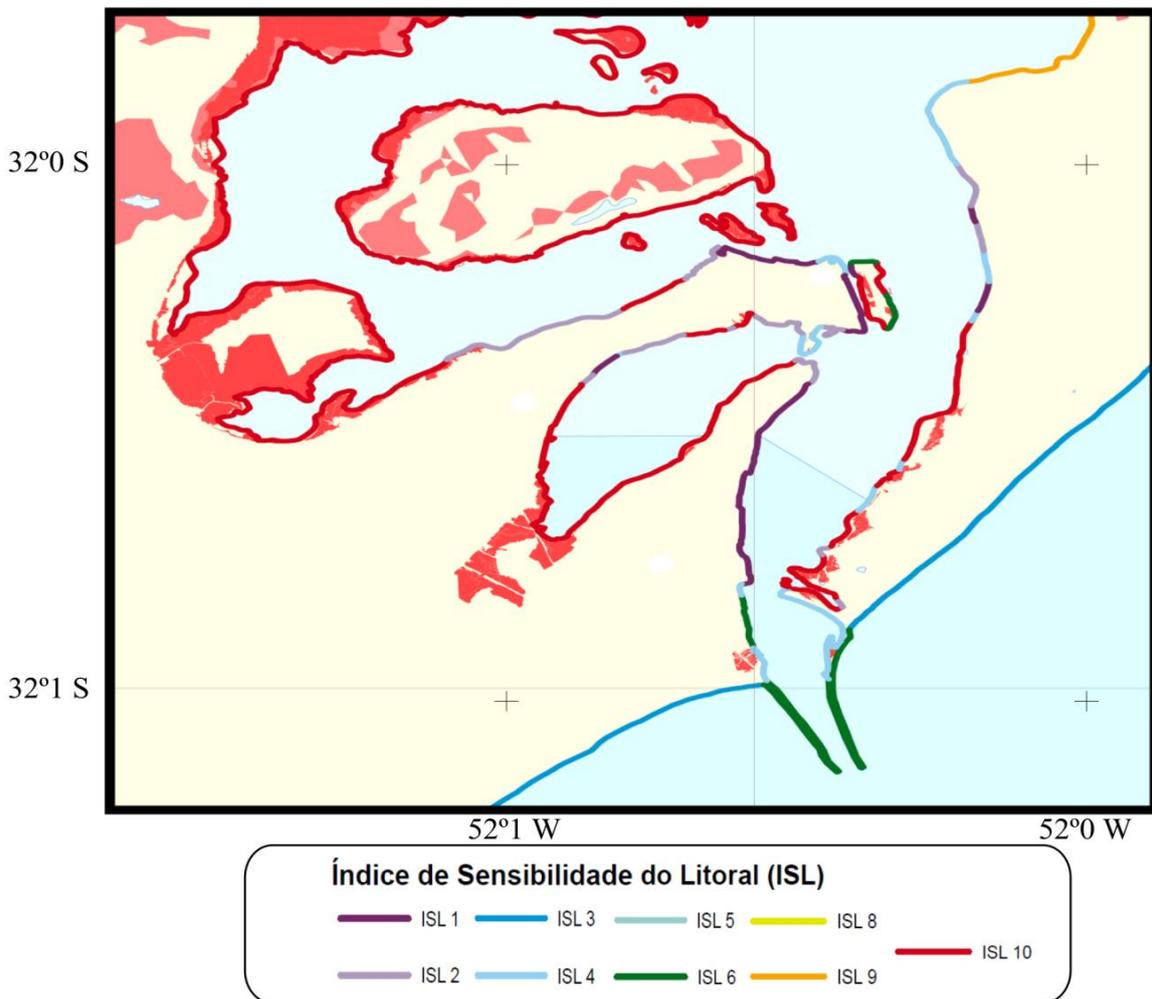


Figura 2. Mapa do Índice de Sensibilidade do Litoral ajustado para região do Porto de Rio Grande. Fonte: Adaptado de Nicolodi (2016).

Validação hidrodinâmica

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 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 a uma

profundidade de 12 m. Para melhorar a comparação entre as séries temporais, foi utilizado um filtro cossenoidal tipo Lanczos para remover as oscilações de alta frequência com períodos inferiores a 12 h (Fig. 3).

Os dados de salinidade foram obtidos utilizando um sensor de Condutividade e Temperatura (CT), posicionado no mesmo ponto do canal de navegação (Estação da Praticagem) a uma profundidade de 3 m (Fig. 4).

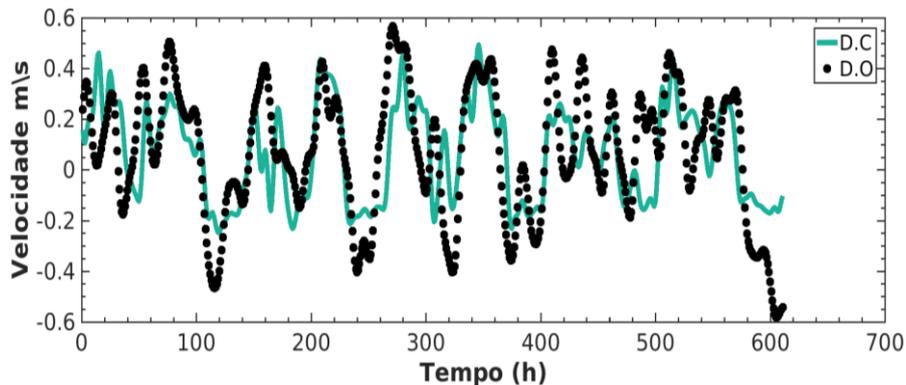


Figura 3. Comparação das séries temporais da velocidade meridional observada (cor preta) com o resultado do modelo hidrodinâmico calculado (cor verde). Erro quadrático médio: 0,193; Coeficiente de correlação: 0,666; Viés: -0,008.

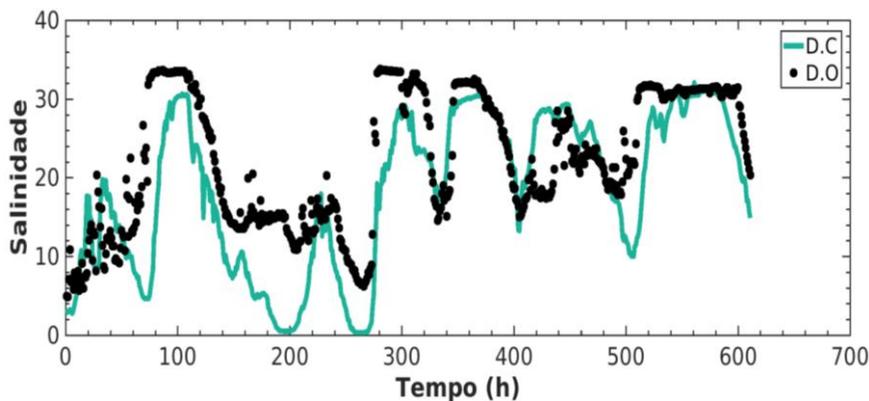


Figura 4. Comparação das séries temporais de salinidade observada (cor preta) com o resultado do modelo hidrodinâmico calculado (cor verde). Erro quadrático médio: 7,466; Coeficiente de correlação: 0,768; Viés: -3,907.

O modelo demonstrou boa reprodução das tendências observadas de corrente e salinidade, sendo que o modelo subestima ambos os valores (Fig. 3 e 4). A performance da simulação foi quantificada utilizando os mesmos métodos utilizados por Sutherland e Wallingford (2001), Marques et al (2017) e Oleinik et al (2017), com o cálculo da média, do erro absoluto, do erro quadrático médio (RMSE), do coeficiente de correlação (R) e do viés entre os dados observados e os resultados do modelo.

As subestimações dos resultados numéricos podem estar relacionadas ao uso de um

coeficiente constante de influência do vento ou à ausência de energia das ondas geradas pelo vento no modelo hidrodinâmico, já que estes são fatores que apresentam variabilidade espacial na região estudada, mas sua implementação requereria informações não disponíveis ou o acoplamento de outros módulos ao sistema de modelagem utilizado por Marques et al. (2017). Outro fator seria a baixa resolução dos dados de reanálise utilizados como dados de superfície e de contorno, conforme estudado pelos autores Sutherland e Wallingford (2001).

Simionato et al. (2006) realizaram simulações numéricas da hidrodinâmica para a região do Rio da Prata, utilizando dados de reanálise do NOAA, com o objetivo de comparar a confiabilidade dos dados de vento calculados e observados. Estes autores concluíram que os eventos de alta intensidade foram subestimados em até 50% quando comparados com os dados de campo, porém, mesmo que eles tendam a subestimar a velocidade, a direção e a variação do vento, parecem estar devidamente representados nas escalas atmosféricas sinóticas e intra-sazonais.

A verificação dos resultados indica que, mesmo com a limitação dos dados utilizados para forçar o modelo, a simulação reproduz a tendência observada 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.

Resultados e discussão

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; Lages, 2003; Stringari et al., 2013; Marques et al., 2010; Marques et al., 2014).

A partir de uma análise comparativa entre os eventos de enchentes e vazantes, foi constatada maior frequência de ocorrência dos fenômenos de vazante, principalmente devido aos efeitos dos ventos de quadrante norte e a constante descarga dos rios afluentes que abastecem a Lagoa dos Patos, resultando em uma corrente estuarina que avança em direção ao oceano. Estudos realizados por Moller Jr et al. (1996) e Marques et al. (2014) também analisaram a frequência destes eventos com maior ocorrência.

As condições de enchente que estão associadas aos ventos do quadrante sul promoveram os efeitos secundários e o sentido resultante da corrente apontou para a porção norte do estuário. Outros autores observaram os fenômenos de enchente como efeitos secundários influenciados pelo vento do quadrante sul e baixa vazão dos rios que alimentam a lagoa dos patos (Marques, 20011; Marques et al., 2014).

Para as simulações dos cenários 1, 2 e 3 (Fig. 5, 6 e 7), os derrames de óleo em vazante demonstraram que o deslocamento da mancha, nas primeiras horas, tem como principal forçante a corrente dominante que se desloca para a saída do estuário. Em nenhum dos cenários analisados neste estudo, a mancha se deslocou para fora da desembocadura dos molhes, principalmente devido à ação dos ventos que direcionam o óleo para as encostas do canal.

Conforme demonstrado na simulação do cenário 1 (Fig. 5), o vento e a corrente apresentam maior intensidade quando comparados com os outros vazamentos, fazendo com que a mancha se desloque rapidamente para a costa portuária, fato que pode comprometer a qualidade da água local e gerar impactos negativos, como perdas e transtornos econômicos na área de influência direta dos eventos simulados. Tais impactos negativos ainda podem ser intensificados, visto que o transporte de partículas de óleo ocorre em um local de intenso transbordo de cargas.

Para o cenário 1 representado na Figura 5, ocorrem os menores potenciais de impactos ambientais dentre os eventos simulados, levando em consideração que o óleo é transportado para regiões de borda, com os menores índices de sensibilidade ambiental ao derramamento (na maior parte dos casos ocorre ISL 1 e, em uma pequena parte, ISL 4).

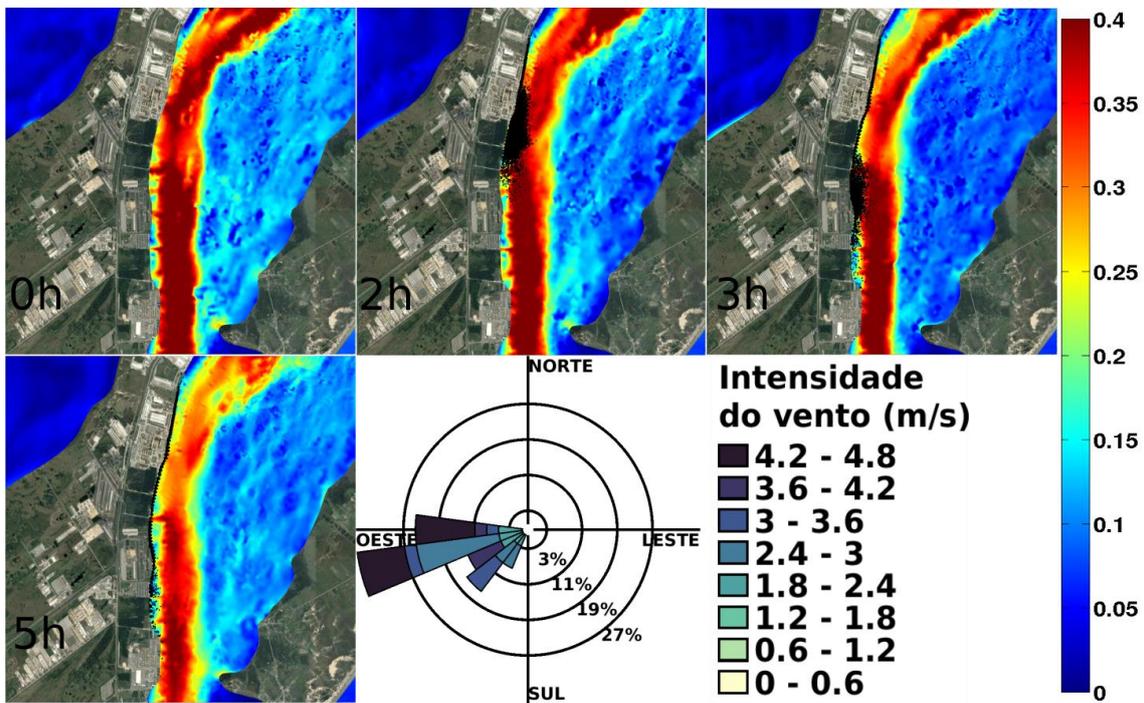


Figura 5. Cenário 1, vazamento de óleo com condições de vazante, representando maiores intensidade de vento e corrente. A intensidade de corrente está representada na barra de cores em $m.s^{-1}$.

No resultado dos cenários 2 e 3 (Fig. 6 e 7), o vazamento segue o fluxo da corrente com baixa intensidade, por um uma distância de 6.000

metros, antes de sofrer a ação dos ventos que desloca o derrame para a encosta.

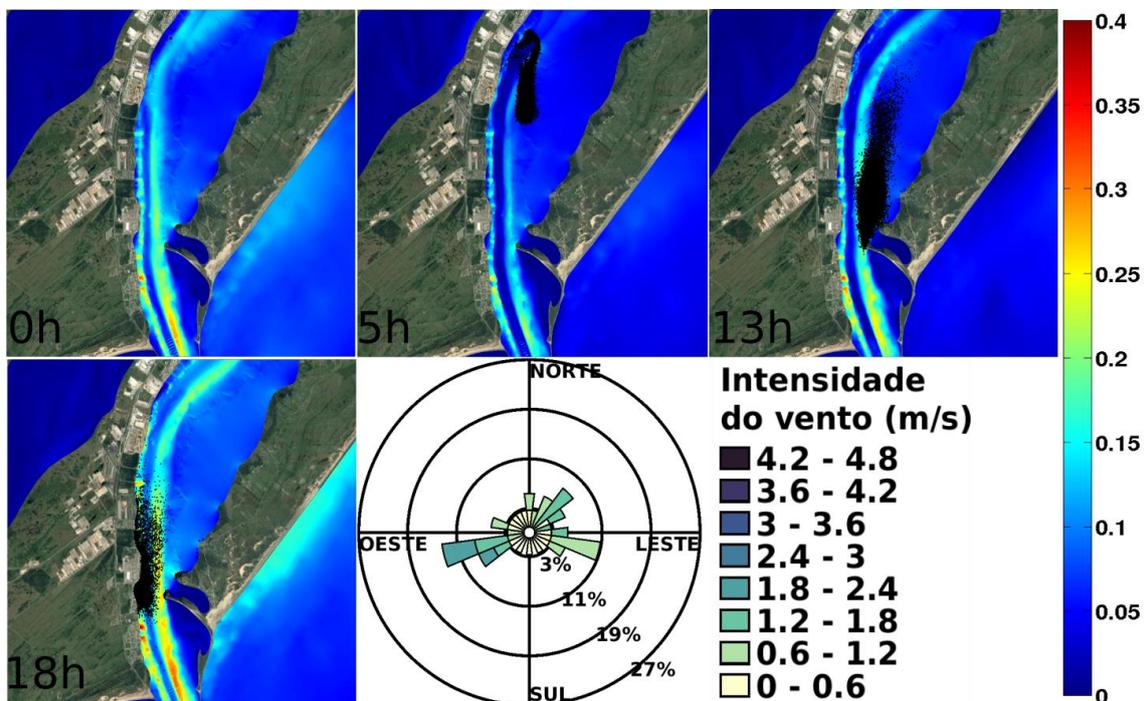


Figura 6. Cenário 2, vazamento de óleo com condições de vazante, representando baixa intensidade de corrente e vento com direções variadas. A intensidade de corrente está representada na barra de cores ($m.s^{-1}$).

No cenário 2 (Fig. 6), o derrame de óleo segue o fluxo de vazante, apresentando baixa intensidade de correntes e ventos. Após a

passagem de 13 h, a mancha de óleo começa a sofrer interação do vento que desloca na sua totalidade para a encosta do Super Porto, e uma

pequena parcela de óleo chega na desembocadura

da enseada da Ponta dos Pescadores.

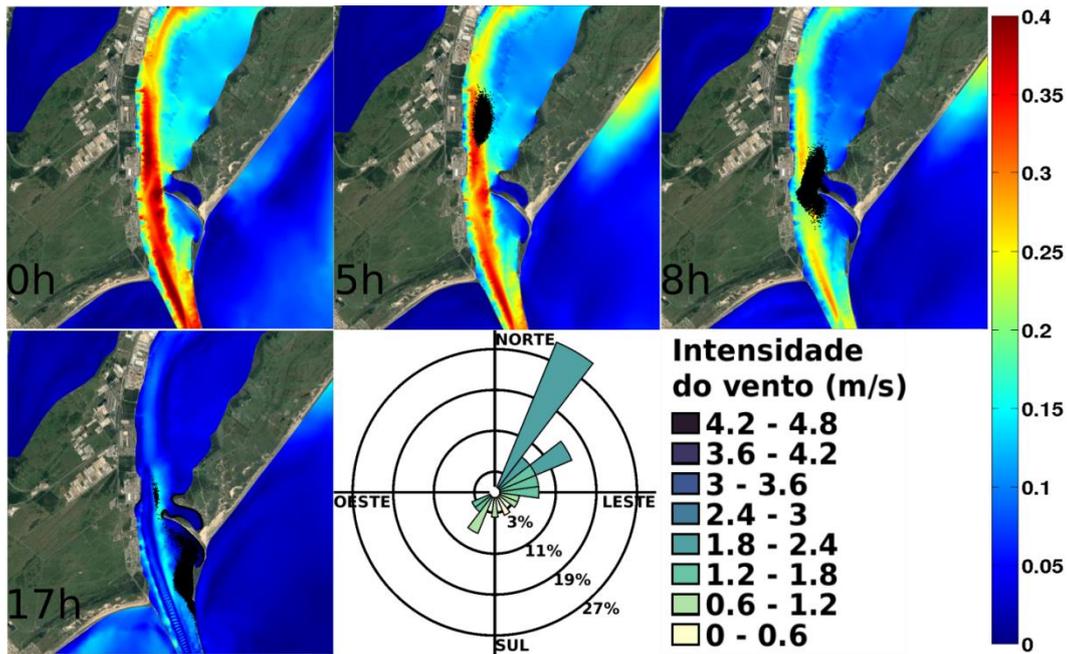


Figura 7. Cenário 3, vazamento de óleo com condições de vazante, intensidade de corrente alta e maior frequência do vento vindo do quadrante sul. A intensidade de corrente está representada na barra de cores ($m.s^{-1}$).

No cenário 3 ocorre uma intensidade de corrente superior à do cenário 2, fazendo com que a mancha de óleo se desloque mais rápido, chegando ao Pontal dos Pescadores em aproximadamente 8 h após o vazamento. E, com a predominância de ventos do quadrante sul, as partículas de óleo são predominantemente transportadas em direção às localidades de maior atividade pesqueira, atingindo as áreas destas comunidades desde a área do Pontal dos Pescadores, e avançando em direção ao início do Molhe Leste, na desembocadura do canal de acesso da Lagoa dos Patos.

Considerando os tipos de substrato, a declividade do litoral e o grau de exposição, o potencial gerador de impactos ambientais aumenta do cenário 1 (em sua totalidade ISL 1) em direção ao cenário 2 (em sua maioria ISL 1, 2 e 6) e ao cenário 3, atingindo na sua totalidade ISL 2, 4, 6 e 10, conforme as informações disponibilizadas na Carta Tática de Sensibilidade Ambiental ao Derrame de Óleo da Bacia de Pelotas (PEL 16 - Rio Grande) disponibilizadas por Nicolodi (2016). Ainda para o cenário 3, dado o predominante destino das partículas de óleo nas áreas de banhados e marismas, espera-se um maior impacto negativo para os componentes bióticos e físicos do meio ambiente.

Adentrando nas feições dominantes nas marismas, os níveis de vulnerabilidade ao recobrimento por manchas de óleo tendem a variar em função da sua cobertura vegetal. Segundo Azevedo et al. (2016) os canais e poças de maré, os planos de lama e as marismas inferiores estão sujeitos a serem cobertos pelo nível da lagoa, por qualquer material em suspensão que esteja à deriva. Tais constatações ressaltam o potencial gerador de impactos negativos decorrentes de derrames de óleo nas feições descritas, posto que em boa parte dos cenários simulados as partículas de óleo adentram tais marismas.

Nos cenários do evento de enchente, conforme estabelecido nos casos dos cenários 4, 5 e 6 (Fig. 8, 9 e 10), constatou-se que o espalhamento da mancha de óleo avançou em direção ao interior do estuário, seguindo a corrente dominante. Nestes casos verificou-se que a interferência do vento local e suas oscilações ao longo dos quadrantes sul e norte são as forçantes de maior influência no deslocamento da mancha de óleo pela área estuarina.

Dessa forma, para os resultados obtidos, os cenários de enchente mostraram-se preocupantes em relação à ocorrência de possíveis impactos ambientais negativos atrelados.

No cenário 4 (Fig. 8), com o diferencial da enchente e da ação do vento atuando do quadrante noroeste, as partículas de óleo atingem uma grande área, a qual envolve a encosta do

Super Porto (ISL 1 e 2), o Porto Novo (ISL 1), a Ilha de Terraplina (ISL 6 e 10) e o destino final para dentro do Saco da Mangueira na encosta da cidade de Rio Grande (ISL 2, 4 e 10).

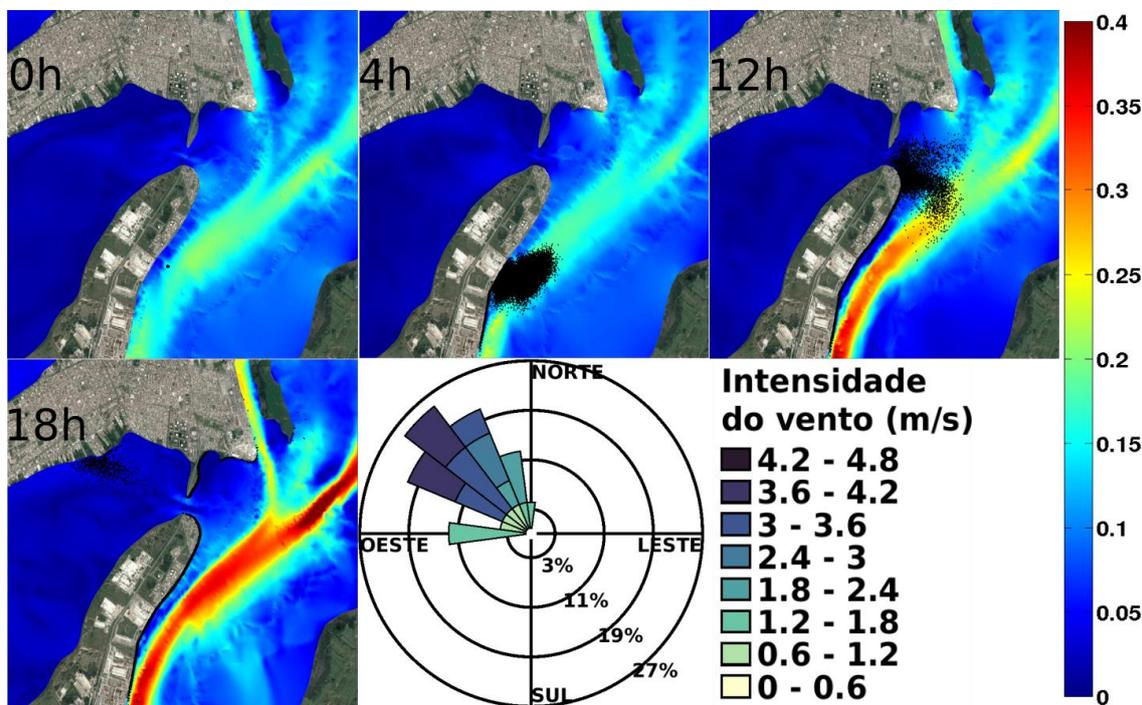


Figura 8. Cenário 4, vazamento de óleo com condições de enchente, ventos predominantes do quadrante noroeste. A intensidade de corrente está representada na barra de cores em $m.s^{-1}$.

Na enseada do Saco da Mangueira são realizadas várias atividades econômicas que dão suporte ao parque industrial da cidade de Rio Grande, relacionadas com a pesca artesanal de camarão, dentre outras atividades de lazer (Monteiro et al., 2011; Marreto et al., 2017).

O cenário 5 (Fig. 9) apresenta características distintas quando comparado às outras simulações, devido ao fato da velocidade de corrente ser baixa e dada a orientação dos ventos de sudoeste de baixa intensidade. Estas

condições favorecem o deslocamento das manchas de óleo em conformidade com o padrão dos ventos, fazendo com que áreas de ISL's elevados (entre 4 e 10) sejam atingidas. Tal padrão de deslocamento foi classificado como de alto potencial de comprometimento da qualidade ambiental, nas localidades de banhados e marismas, nas margens das lagoas situadas próximas a cidade de São José do Norte (Nicolodi, 2016).

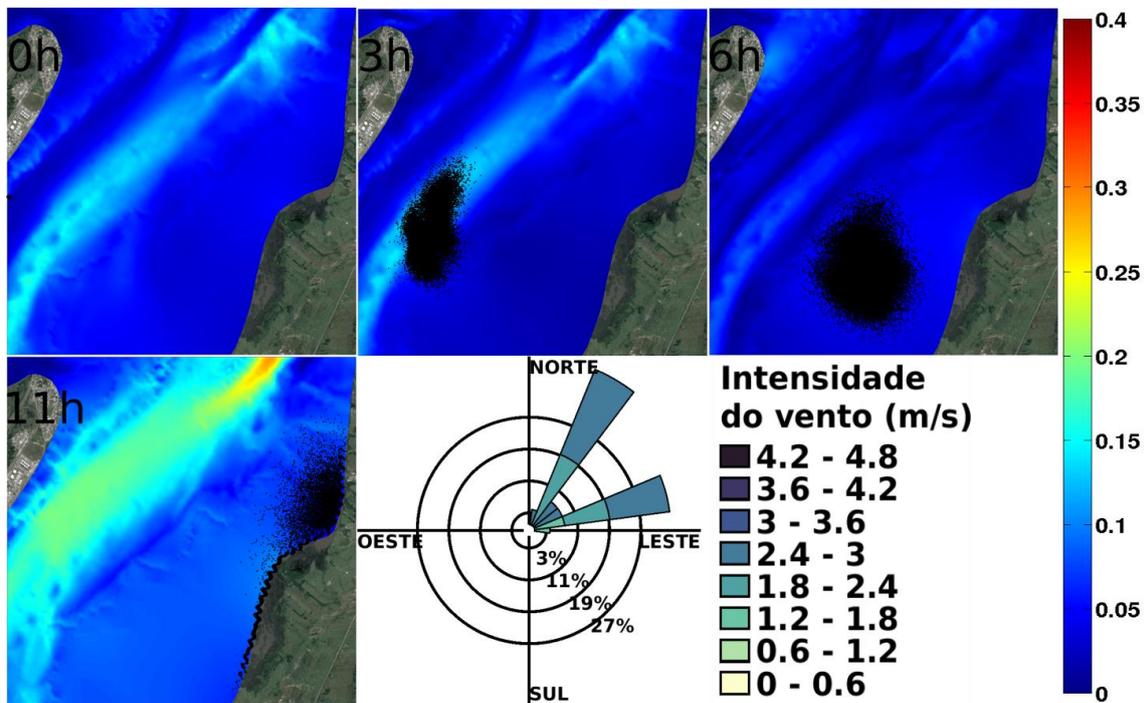


Figura 9. Cenário 5, vazamento de óleo com condições de enchente, baixa intensidade de vento e corrente. A intensidade de corrente está representada na barra de cores em $m.s^{-1}$.

O cenário 6 (Fig. 10) apresenta uma condição inicial de alta intensidade de corrente no canal de navegação em direção ao interior do estuário da Lagoa dos Patos, e um vento predominantemente do quadrante sudoeste, representando situações em que as partículas foram transportadas para áreas de elevados ISL.

No resultado do cenário 6, a mancha de óleo desloca-se para o interior da Lagoa dos Patos, tendo como destino final as regiões localizadas na Ilha do Terraplino (ISL 6 e 10), o Porto Novo (ISL 1), a zona das marismas (ISL 10) e porções urbanizadas da cidade de São José do Norte (ISL 1, 2 e 4).

O caráter imediato da ocorrência de impactos ambientais negativos decorrentes dos eventos de vazamento de óleo, somado ao baixo grau de reversibilidade e às propriedades

acumulativas e sinérgicas características das poluições, e ainda, em função do considerável nível de sensibilidade ambiental das áreas passíveis de serem atingidas por tais tipos de eventos, é esperada significativa distribuição dos passivos ambientais para a comunidade do local de estudo (Costa, 2018).

Não obstante, os efeitos diretos em caso de vazamento de óleo e as consequências crônicas de uma contaminação, poderiam influenciar o potencial pesqueiro da região, assim como a saúde, a segurança e o bem estar da população, pois o petróleo possui em suas composições componentes altamente tóxicos aos seres vivos, e também possui a capacidade de causar bioacumulação nas diferentes cadeias alimentares, ocasionando uma notável perda de biodiversidade ao tratar-se de uma área estuarina (Fadigas, 2017).

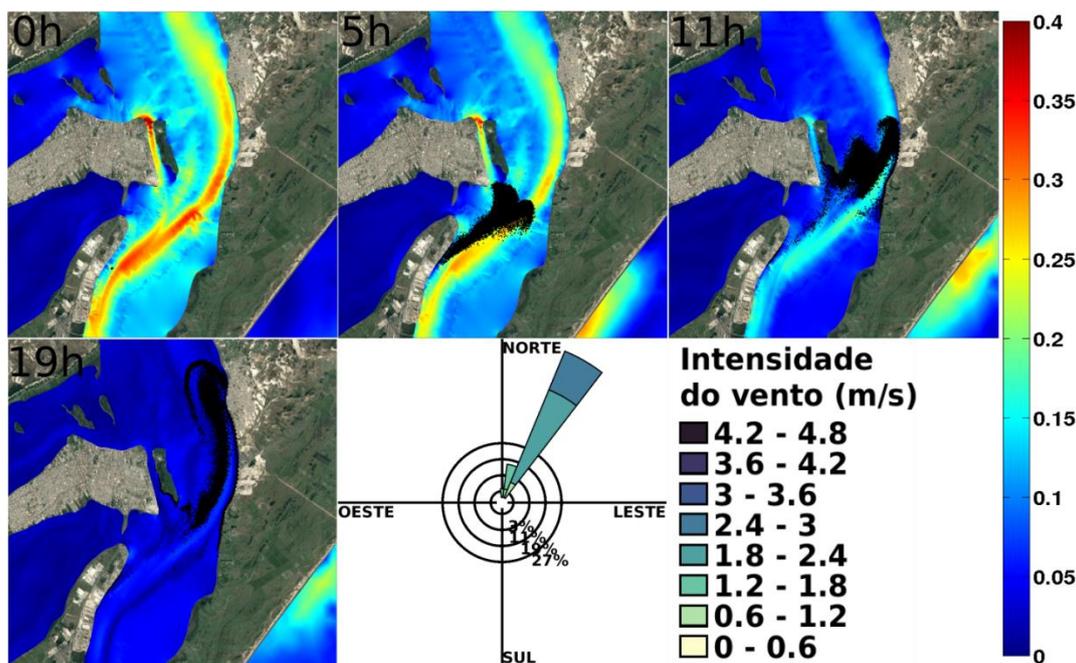


Figura 10. Cenário 6, vazamento de óleo com condições de enchente, maiores intensidades de corrente e baixa intensidade de vento. A intensidade de corrente está representada na barra de cores em $m.s^{-1}$.

A partir do estudo da interferência das variáveis hidrodinâmicas no destino de comportamento das manchas de óleo, é possível potencializar os efeitos das ações de respostas a serem definidas na fase de previsão dos cenários de derrames de óleo. Tal medida poderia colaborar com uma maior eficiência das ações táticas e técnicas de atuação emergencial, definidas em conformidade com a Resolução Conama nº 398, de 11 de junho de 2008 e contidas nos Planos de Emergência Individuais. Assim, é importante que a aplicação das técnicas de intervenção emergencial seja devidamente embasada no conhecimento do regime hidrodinâmico, como também nos seus efeitos sobre a dispersão do óleo, respeitando as características socioambientais das regiões que apresentam alto potencial de serem afetadas por derrames de óleo.

Conclusões

O modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D se mostrou capaz de simular corretamente a tendência do movimento da corrente e da salinidade dentro do canal do Porto do Rio Grande, sendo, portanto, utilizado para gerar os resultados do deslocamento da mancha de óleo.

O deslocamento do óleo foi principalmente analisado pelo espalhamento horizontal das manchas dos derrames simulados. Assim, os resultados mostraram que a mancha se

move de acordo com as forças atuantes de correntes e ventos.

O destino final do óleo nos cenários de vazante tem como principais pontos a encosta do canal do Super Porto de Rio Grande, a linha de cota paralela à área do Farol Atalaia e o início do molhe leste (no lado de São José do Norte).

Os destinos finais para os casos dos eventos simulados para condições de enchentes apresentaram maiores variabilidades, sendo que os mais frequentes foram no sentido do Porto Velho de Rio Grande, da faixa costeira da cidade de Rio Grande, da Ilha do Terraplino e da cidade de São José do Norte.

Sendo assim, este artigo constata que o estudo do regime de cheias e vazantes, juntamente com os seus efeitos sobre as trajetórias de óleo, demonstra a possibilidade de serem geradas informações confiáveis para a orientação dos procedimentos de resposta, em caso de vazamento de óleo no ponto de transbordo de carga líquida do Porto de Rio Grande. Consequentemente, os impactos ambientais negativos para a sociedade e para os componentes dos compartimentos ambientais físicos e bióticos seriam atenuados, mesmo que inseridos na zona de influência direta ou indireta dos empreendimentos com riscos de derrames de óleo.

Com base nos cenários de derrame de óleo contemplados pelo presente estudo, é provável que os agravos ambientais de tais tipos

de acidentes possam repercutir tanto na forma de impactos negativos relacionados ao uso da água, como concernentes aos meios físicos, biológicos e aos ecossistemas naturais locais, em âmbitos de imediato, a médio e longo prazo.

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 e ao Centro Nacional de Supercomputação (CESUP), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que auxiliaram o desenvolvimento deste trabalho. Agradecem também à NOAA pelos dados oceanográficos e meteorológicos utilizados nas condições de contorno do modelo, o consórcio open TELEMAC-MASCARET por disponibilizar o sistema TELEMAC gratuitamente e ao Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC) pela disponibilização de uso do supercomputador Santos Dumont.

Referências

- Al-Rabeh, A. H., Cekirge, H. M., Gunay N., 1989. A stochastic simulation model of oil spill fate and transport. *Appl. Math. Model* 13, 322-329.
- Alves, F. N. A., 2006. Estudo do transporte de manchas de óleo por um modelo lagrangeano de partículas na Baía de Pelotas. Dissertação (Mestrado) Rio Grande, FURG.
- Azevedo, A. M. G. D., Costa, C. S. B., Leal, C. E. D. S., Marangoni, J. C., 2016 The effects of planting density and nutrient addition on container-grown vegetative propagules of halophytic grasses. *Revista Ceres*, 63, 76-85.
- Brakstad, O. G., 2017. Biodegradation of petroleum oil in cold marine environments. *Springer International Publishing* 47, 777-780.
- Culbertson, J. B., Valiela, I., Pickart, M., Peacock, E. E., Reddy, C. M., 2008. Long-term consequences of residual petroleum on salt marsh grass. *Journal of Applied Ecology*, 45(4), 1284-1292.
- Costa, J. C., Asmus, M. L., 2018. Base ecossistêmica da atividade pesqueira artesanal: estudo de caso no Baixo Estuário da Lagoa dos Patos (BELP), RS, Brasil. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 44.
- Fadigas, A. 2017. Vulnerability factors of shellfisherwoman in the face of oil spill events: an analysis of the prestige case. *International journal of disaster risk reduction*, 24, 560-567.
- IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos recursos Naturais Renováveis, 2002. Modelagem de derramamento de óleo no mar. Disponível: <http://www.anp.gov.br/meio/guias/MODELAGEM/index2.htm>. Acesso: 10 mai. 2017.
- Fay J. A., 1969. The Spread of Oil Slicks on a Calm Sea. *Oil on the Sea* Plenum Press 4, 53-63.
- Fernandes E. H. L., Dyer, K. R., Niencheski, L. F. H., 2001. TELEMAC-2D calibration and validation to the hydrodynamics of the Patos Lagoon (Brazil). *Journal of Coastal Research* 34, 470-488.
- Flores, H., Andreatta, A., Llona, G., Saavedra I., 1998. Measurements of Oil Spill Spreading in a Wave Tank Using Digital Image Processing. *Transactions n Ecology and the environment* 27, 165-173.
- Gurjar, B. R., Sharma, R. K., Ghuge, S. P.; Wate, S. P., Agrawai, E. S., 2015. Individual and societal risk assessment for a petroleum oil storage terminal. *Jornal of Hazerdous, Toxic, and Radioactive Waste* 19, 04015003 .
- Heiderscheidt, D., Pereira, J., Burghardt, J. E., Silva, L. A. S., Oliveira, C., 2016. Conceitos aplicados à poluição do solo decorrente do derrame de petróleo e seus derivados. *Revista Maiêutica* 4, 7-14.
- Hervouet, J. M., 2007. Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method, 1 John Wiley & Sons.
- ITOPF. International Tanker Owners Pollution Federation Limited, 2017. Disponível: http://www.itopf.com/fileadmin/data/Photos/Statistics/Oil_Spill_Stats_2017_web.pdf. Acesso: 1 fev. 2018.
- Lages, R. D. S., 2003. Padrões de ventos no extremo sul: análise do período de 2000 a 2003 e aplicação à dispersão de poluentes. Monografia do curso de Oceanografia. Dissertação (Mestrado). Rio Grande, FURG.
- Lan, D., Liang, B., Bao, C., Ma, M., Xu, Y., Yu, C., 2015. Marine oil spill risk mapping for accidental pollution and its application in a coastal city. *Marine pollution bulletin* 96, 220-225.
- Lopes B. V., Oleinik P. H., Monteiro C. B., Silva D. V., Marques W. C., Guimarães R. C., Trombetta T. B., 2017. Numerical Study of Oil Spill in The Patos Lagoon Under Flood and EBB Conditions. CILAMCE 2017. Disponível:<http://doi:0.20906/CPS/CILAMCE2017-0900>. Acesso: 06 jan. 2018.
- Lopes, C. F., Milanelli, J. C. C., Epoffo, I. R. F., 2007. Ambientes costeiros contaminados por óleo: procedimentos de limpeza – manual de

- orientação 21. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, São Paulo.
- Liu, X., Guo, M., Wang, Y., Yu, X., Gou, J., Tang, C., Hu, X., Wang, C., E Li, B. Assessing pollution-related effects of oil spills from ships in the Chinese Bohai Sea. *Marine Pollution Bulletin*, v. 110, n. 1, p. 194–202, 2016.
- Lynch, D. R., Ip, J. T. C., Naimie, C. E., Wermer, F. E., 1996. Comprehensive coastal circulation model with application to the Gulf of Maine. *Revista Continental Shelf Research* [online] 16. Disponível: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434395000283>. Acesso: 18 mai. 2017.
- Maragoni, J. C., Costa, C. S. B., 2010. Caracterização das atividades econômicas tradicionais no entorno das marismas no estuário da Lagoa dos Patos (RS). *Desenvolvimento e Meio Ambiente* 21, 129-142.
- Marques, W.C., 2005. Padrões de variabilidade temporal nas forçantes da circulação e seus efeitos na dinâmica da Lagoa dos Patos. Tese (Doutorado) Rio Grande, FURG.
- Marques, W. C., Möller Jr. O. O., 2009. Variabilidade temporal em longo período da descarga fluvial e níveis de água da Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira Recursos Hídricos* 13, 155–163.
- Marques, W. C., Fernandes, E. H. L., Moraes, B. C., Möller Jr, O. O., 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, 1-22.
- Marques, W. C., Stringari, C. E., Mello, L. F., 2013. ECOS - Easy Coupling Oil System. Patente: Programa de Computador. Número do registro: BR 51 2013 00013, título: "ECOS - Easy Coupling Oil System", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial.
- Marques, W. C., Stringari, C. E., Kirinus, E. P., Moller Jr, O. O., Toldo Jr, 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.
- Marques, W. C., Stringari, C. E., EIDT, R. T., 2014. The Exchange processes of the Patos Lagoon estuary – Baril: A typical e Niño year versus a normal metrological conditions year. *Advances in Water Resource and Protection* 2, 11-20.
- Marreto, R. N., Baumgrten, M. G. Z., Wallner-Kersnach, M., 2017 Trophic quality of waters in the Patos Lagoon estuary: a comparison between its margins and the port channel located in Rio Grande, RS, Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 29.
- Mello, L. F., Stringari, C. E., Eidt, R. T., Marques, W. C., 2012. Desenvolvimento de modelo lagrangeano de transporte de o óleo. Estruturação e Acoplamento ao Modelo Hidrodinâmico TELEMAC3D. *Pesquisas Aplicadas em Modelagem Matemática* 1, 1-21.
- Moller Jr O. O., Lorenzzenti, J. A., Stech, J., Math, M. M., 1996. The Patos Lagoon Summertime Circulation and Dynamics. *Continental Shelf Research* 16, 335-351.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente, 2007. Especificações e Normas Técnicas para Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para Derramamentos de Óleo. Brasília.
- Monteiro, C. B., Kirinus, E. D. P., Marques, W. C., Oleink, P. H., Costi, E. J., 2017. Analysis of two oil spills in the Southern brazilian shelf, in the years of 2012 and 2014. *Defect and diffusin Forum* 372, 70-80.
- Monteiro, I. O., Pearson M. L., Möller Jr, O. O., Fernandes, E. H. L., 2011. Hidrodinâmica do Saco da Mangueira: mecanismos que controlam as trocas com o estuário da Lagoa dos Patos. *Atlântica (Rio Grande)* 27, 87-101.
- Moreno, R., Jover, L., Diez, C., & Sanpera, C. 2011. Seabird feathers as monitors of the levels and persistence of heavy metal pollution after the Prestige oil spill. *Environmental pollution* 159, 2454-2460.
- Nicolodi, J. L., 2016. Atlas de Sensibilidade ao da Bacia Marítima de Pelotas 1. Porto Alegre: Panorama crítico. Disponível: <http://saopelotas.furg.br/index.php/pt/>. Acesso: 08 Ago. 2017.
- Nogueira, R. X. S., Costa, C. S. B., 2003. SIGMAR: Aplicação e análise de sensibilidade das marismas a derrames de óleo. XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, 1617-1619.
- Oleinik P. H., Marques W. C., Kirinus E. P., 2017. Estimate of the Wave Climate on the Most Energetic Locations of the South-Southeastern Brazilian Shelf. *Defect and Diffusion Forum* [online] 370. Disponível: <https://www.scientific.net/DDF.370.130>. Acesso: 15 Mar. 2017.
- Paulo L. A., 1996. Modelo De Dispersão Lagrangeano Tridimensional, Dissertação (Mestrado). Lisboa, UTL.
- Proctor, R., Flather, R., Elliot A, 1994. Modelling tides and surface drift in the Arabian Gulf – application to the Gulf oil spill *Cont. Shelf* 14, 531-545.

- Simionato, C. G., Meccia, V. L., Dragani, W. C., E Nuñez, M. N., 2006. On the use of the NCEP/NCAR surface winds for modeling barotropic circulation in the Rio de la Plata Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 70, 195–206.
- Stringari, C. E., Marques, W. C., Eidt, R. T., Mello, L. F., 2001. Modeling an oil spill along the Southern Brazilian Shelf: Forcing characterization and its influence on the oil fate. *International Journal of Geosciences* 4, 397-407.
- Stringari, C. E., Marques, W. C., Mello, L. F., Eidt, R. T., 2013. Modeling the wind influence in an oil spill along the Southern Brazilian Shelf. *Engenharia Térmica* 11, 100-109.
- SUPRG. Superintendência do Porto de Rio Grande. Movimentação por segmento de carga ano 2016. Disponível: http://www.portoriogrande.com.br/site/consultas_estatisticas.php/. Acesso: 25 Mai. 2017.
- Sutherland, J. E., Wallingford, H. R., 2001. Cosmos modelling and the decolopment of model performace statistics. HR Wallingford 3, 1–4.
- TELEMAC-MASCARET Consortium, 2016. openTELEMAC-MASCARET. The mathematically superior suite of solvers. Disponível: opentelemac.org. Acesso: 13 Mar. 2017.
- Vaz, A. C., Möller Jr, O. O., Almeida, T. L., 2011. Análise quantitativa da descarga dos rios afluentes da Lagoa dos Patos. *Atlântica (Rio Grande)* 28, 13-24.