



Modelagem de Transporte de Óleo
Terminais de *Ferry-Boat* da Ponta
da Espera e Cujupe

ÍNDICE

1. Introdução	3
2. Modelo de transporte de óleo na superfície do oceano (NICOIL).....	5
3. Simulações hidrodinâmicas	11
4. Referências Bibliográficas.....	20

Equipe Executora

Dr. Marco V.J. Cutrim – Coordenador (Depto. Oceanografia e Limnologia)

Dr. Audálio Rebelo Torres Júnior - Laboratório de Modelagem de Processos Marinhos e Atmosféricos – LAMMA/UFRJ

1. Introdução

Neste relatório são apresentados os resultados preliminares do estudo da dispersão de poluentes no mar, nas proximidades de duas áreas de interesse: Canal do Cujupe e Ponta da Espera, no estado do Maranhão. Estas duas regiões abrangem dois terminais de *Ferryboats*, os quais serão, hipoteticamente, as fontes dos poluentes.

A região do entorno da Ilha de São Luís abrange ambientes costeiros com diversos ecossistemas de grande importância. No entanto, o desenvolvimento da economia no estado necessita de intenso transporte aquaviário, conseqüentemente com intensas atividades comerciais e turísticas portuárias. No caso das proximidades do Porto de Itaqui, um estudo recente demonstrou que a sensibilidade ambiental é alta para a região (Novaes et al., 2007).

Para avaliar a dispersão de qualquer constituinte no meio marinho é necessário conhecer a circulação da área de interesse e de seu entorno. Para a região de interesse, a maré é a principal influência na dinâmica das correntes marinhas.

Desta forma, séries temporais de corrente, maré e batimetria foram fornecidas pela Empresa Maranhense de Administração Portuária como fonte de informações *in situ*. Estes dados foram utilizados para definir o período do presente estudo, de maneira que os resultados obtidos possam ser posteriormente comparados com os dados.

A principal metodologia deste trabalho é a modelagem numérica computacional. A hidrodinâmica marinha é reproduzida em resposta às forças atuantes no meio, através da solução numérica das equações que governam os processos envolvidos. Esta metodologia apresenta uma série de vantagens, como: baixo custo, logística simples, capacidade de obter resultados simultâneos em amplas regiões (visão sinótica) e a possibilidade de simular diversas condições iniciais e de contorno diferentes para uma mesma região, como por exemplo, condições de verão e inverno, marés de sizígia e quadratura, e ainda investigar a influência de diversas feições como a topografia de fundo, a linha de costa, e estruturas como portos, por exemplo, na circulação do local estudado.

Estudos deste tipo vêm sendo desenvolvidos com sucesso pelo Laboratório de Modelagem de Processos Marinhos e Atmosféricos (LAMMA) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), em escalas de sistemas estuarinos com resolução da ordem de poucos metros até escalas de bacia oceânica, em trabalhos realizados para a Marinha do Brasil, Programa REVIZEE (Programa de Levantamento do Potencial Sustentável dos Recursos Vivos na Regida Zona Econômica Exclusiva), Secretaria Municipal do Meio Ambiente, além de uma série de trabalhos científicos publicados sobre o assunto.

Para a simulação hidrodinâmica foi utilizado o modelo numérico pseudo-tridimensional *Princeton Ocean Model* (POM), desenvolvido por Blumberg e Mellor (1983) e utilizado em mais de 40 países por mais de 500 usuários registrados. É baseado nas equações hidrodinâmicas primitivas, utilizando o sistema de coordenadas sigma (Phillips, 1957 *apud* Torres Jr, 1995), que objetiva incluir uma topografia do fundo mais realista quando da discretização das equações. Trata-se de um modelo que pode ser utilizado para estudos de fenômenos de pequena e larga escalas e de fenômenos cujas escalas temporais vão de semi-diurna até sazonal. O POM pode ser aplicado tanto para estudos diagnósticos, como para estudos de previsões de correntes oceânicas e da estrutura termohalina. Maiores informações e detalhes sobre o modelo podem ser encontrados na página da Internet dedicada ao modelo, cujo endereço é: <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/>

2. Modelo de transporte de óleo na superfície do oceano (NICOIL)

O interesse em possíveis impactos causados por derramamentos de óleo no meio marinho levou ao desenvolvimento de um modelo computacional para simular o transporte de manchas de óleo na superfície da água. Dentro deste contexto, o modelo NICOIL foi desenvolvido considerando os seguintes processos físico-químicos intrínsecos ao óleo: advecção, espalhamento, *entrainment* e evaporação.

No processo de advecção a mancha movimenta-se como um todo, sem que a quantidade de óleo seja alterada, com a mesma velocidade das correntes superficiais. Já no processo de espalhamento (*spreading*), há a alteração da forma da mancha em função do efeito da energia potencial da massa de óleo, da viscosidade e de sua tensão superficial. O processo de *entrainment* na coluna d'água de substâncias que flutuam na superfície da água ocorre devido à troca de massa entre os dois fluidos diferentes, no caso a água e o óleo, gerando uma mistura. E o processo de evaporação (volatilização) caracteriza-se por ser, na maioria dos casos, o processo mais importante na diminuição da quantidade de óleo após um vazamento. Este mecanismo é influenciado principalmente pela composição do óleo, temperatura do ar e da água, área do vazamento, velocidade do vento, radiação solar e espessura da mancha de óleo.

Embora os processos de advecção e espalhamento não alterem a quantidade de óleo, são importantes na estimativa de perdas de óleo por outros processos, como a evaporação, onde o volume perdido de óleo é função direta da área superficial da mancha.

A seguir serão apresentados em detalhe os processos resolvidos pelo modelo:

A dispersão de óleo (petróleo) no mar foi modelada em termos da espessura da camada de óleo flutuante. Supondo-se que no caso de um derrame ou vazamento o óleo se espalhe sobre a superfície do mar, definimos um elemento de controle de lados $\delta x, \delta y, \delta z$. No instante inicial, pode-se supor que o óleo toma toda a coluna vertical do

elemento de controle, podendo-se dizer que a razão óleo/água nesse instante

$\left(\varphi \equiv \frac{\text{espessura do óleo}}{\text{espessura da coluna}} \right)$ é igual a 1.

O gráfico a seguir ilustra a situação:



Observa-se a evolução no tempo da razão óleo/água apenas devido ao espalhamento, que pode ser definida como:

$$\varphi_i \equiv \frac{h_i}{h_0} \quad (I)$$

onde h_0 é a espessura inicial da coluna de óleo, e h_i é a variação da espessura de óleo no tempo. A medida que óleo vai sendo subtraído da coluna por qualquer processo, vai sendo substituído por água, de forma que a espessura vertical do elemento de controle (δz) não varia com o tempo. No tempo zero ou instante inicial, a função é igual a 1 e diminui a medida que o óleo perde massa ou espalha.

Supondo que pode-se transportar a razão óleo/água $\left(\varphi \equiv \frac{\text{óleo}}{\text{água}} \right)$, aplica-se a equação de transporte advectivo difusivo para a razão, onde:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\partial \varphi}{\partial t} + u \frac{\partial \varphi}{\partial x} + v \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \kappa \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right) + Spr + Evap + Entr . \quad (II)$$

onde Spr vem a ser o espalhamento, $Evap$ a parcela que evapora e $Entr$ a porção que “entranha” no meio.

Pode-se agora incluir as variações de massa no óleo através das parametrizações em φ .

A seguir serão apresentados os tratamentos para cada um dos processos de perda de óleo comentados anteriormente:

ESPALHAMENTO (SPREADING)

Aplicou-se a relação clássica de Fay-Hoult:

$$\frac{dA}{dt} = C \cdot A^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{V_m}{A} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (III)$$

onde A é a área da mancha, C uma constante e V_m o volume despejado. Pode-se supor o conhecimento da variação da área da mancha no tempo, considerando um espalhamento circular, e a partir disso, supõe-se também a evolução da espessura da mancha no tempo, definida como:

$$h_i = \frac{V_m}{A_i}, \text{ onde o subscrito } i \text{ indica variação no tempo.}$$

Lembrando que $\varphi_i \equiv \frac{h_i}{h_0}$, obtém-se um termo para Spr na equação II.

Obs.: Como em toda parametrização, o sucesso da modelagem vai depender da estimativa dos termos da equação do processo. No caso do espalhamento, equação III, é necessário obter o volume derramado, a constante C e a espessura inicial h_0 . Esta última grandeza aparece como uma necessidade do esquema numérico obtido para a equação III.

VOLATILIZAÇÃO (EVAPORAÇÃO)

Utilizou-se a relação de Mackay & Matsugu (1973), que expressa a variação da massa (M), em grama por hora, no tempo:

$$\frac{dM}{dt} := K_2 \cdot P_{vp} \cdot \frac{A}{R \cdot T} \cdot f \cdot M_w$$

onde,

$$K_{2i} := 0.029 \cdot W^{.78} \cdot (D_i)^{-.11} \cdot Sc^{-.67} \cdot \sqrt{\frac{M_w + 29}{M_w}}$$

W é a velocidade do vento (m/hr), D o diâmetro de mancha (m), Sc o número de Schmidt, M_w o peso molecular (g/mol) da porção volátil, P_{vp} a pressão de vapor (atm), R a constante universal dos gases, T a temperatura (K) e f a fração da mancha composta por substâncias voláteis.

Pode-se então obter, mantendo a notação de tempo i , a quantidade evaporada (em metros cúbicos) em termos da variação de espessura da mancha: $h_i = \frac{M_i}{A_i} \cdot 10^{-6}$.

Lembrando-se que $\varphi_i \equiv \frac{h_i}{h_0}$, obtemos um termo para $Evap$ na equação II, assim como no caso do espalhamento.

ENTRAINMENT

A partir do trabalho de Reed (1989), utilizou-se a fração da superfície do mar sujeita ao entranhamento por hora:

$$Da := 0.11 \cdot (W + 1)^2,$$

onde W é a velocidade do vento em metros por segundo.

A fração de óleo que não retorna à mancha é:

$$Dh_i := \left(1 + 50 \cdot \mu^{0.5} \cdot h_i \cdot St \right),$$

onde μ é a viscosidade do óleo em g/m s, h_i é a espessura da mancha de óleo e St é a tensão interfacial entre a água e o óleo.

A viscosidade do óleo varia de acordo com a formação do mousse e pode ser modelada por

$$\mu_i := \mu_0 \cdot e^{C4 \frac{M2_i}{Vm}},$$

onde μ_0 é a viscosidade inicial, $C4$ varia de 1 para gasolina e 10 para outros produtos de petróleo, sendo estes limites sua faixa de variação (maiores detalhes em Reed [1989]), $M2$ é a massa evaporada e Vm a massa inicial. A razão entre $M2$ e Vm representa a fração evaporada da mancha.

O óleo "entranhado", em metros cúbicos, é portanto:

$$E_i := Da \cdot \left[1 + 50 (\mu_i)^{.5} \cdot h_i \cdot St \right]^{-1}$$

Da mesma forma que os processos anteriores (espalhamento e evaporação) pode-se obter, mantendo a notação de tempo i , a quantidade "entranhada" (em metros cúbicos) em termos da variação de espessura da mancha: $h_i = \frac{E_i}{A_i}$. Lembrando-se que

$\varphi_i \equiv \frac{h_i}{h_0}$, obtém-se um termo para $Entr$ na equação II, da mesma forma que nos casos anteriores.

3. Simulações hidrodinâmicas

As duas áreas de interesse, região do Canal de Cujupe e proximidades da Ponta da Espera, estão destacadas na Figura 1.

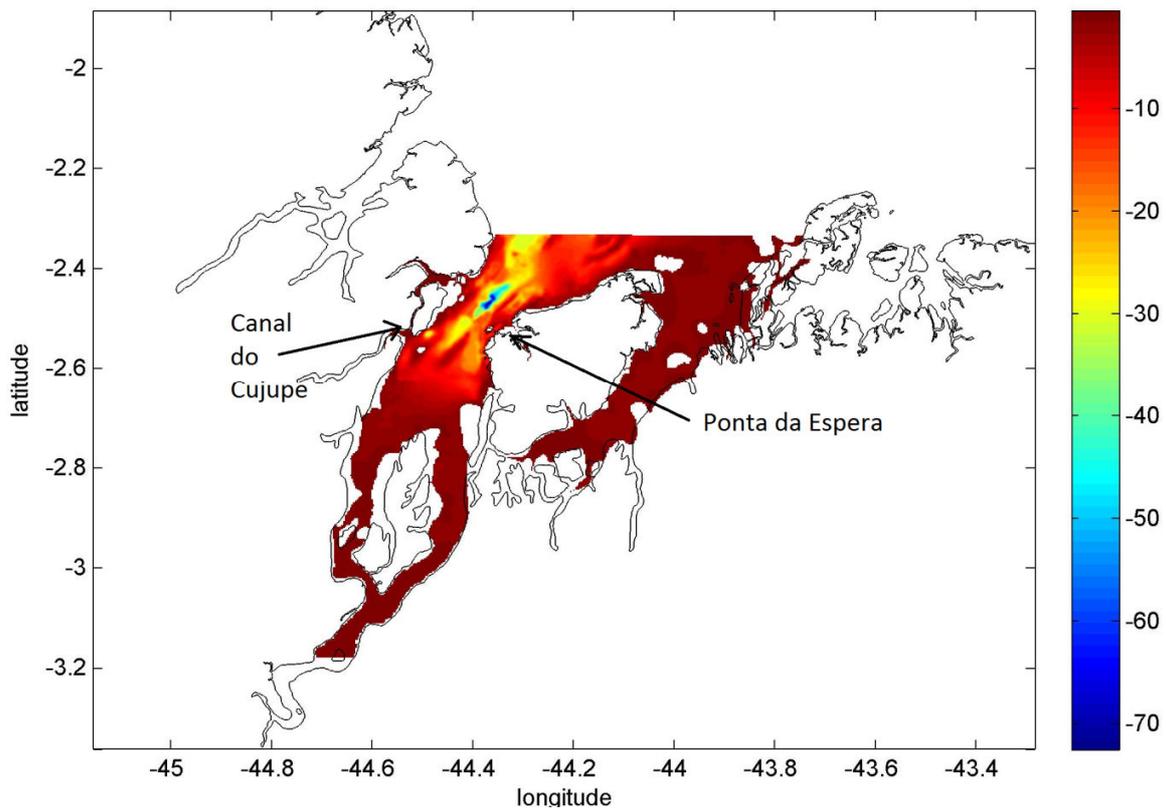


Figura 1: Batimetria (em metros) do entorno da Ilha de São Luís, MA, e as duas áreas de interesse.

Dois simulações hidrodinâmicas aninhadas foram realizadas (Figura 2). A primeira possui menor resolução espacial, com 300 metros de espaçamento entre os elementos de grade. A simulação foi forçada por maré e por uma vazão fluvial média ao sul da grade de $770\text{m}^3/\text{s}$ (Pontes, 2007). O período simulado foi o mês de junho de 2012.

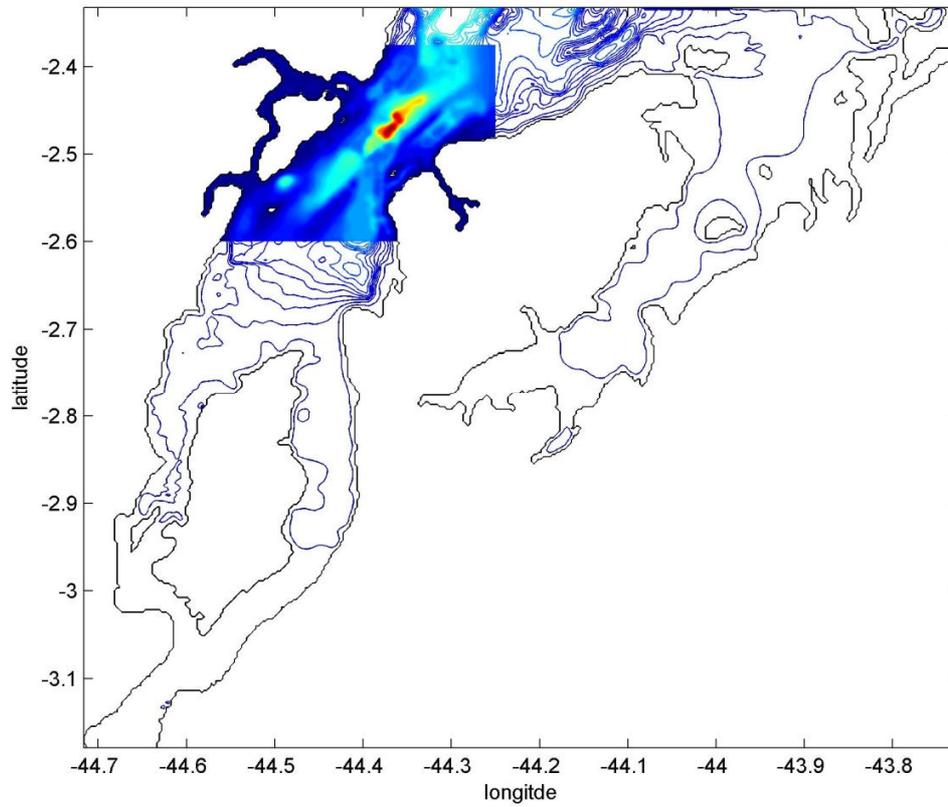


Figura 2: Batimetria (em metros) ilustrada para as duas grades numéricas utilizadas nas simulações com o POM: em contornos coloridos está a grade de 300 metros de resolução espacial e em contornos coloridos preenchidos está a grade de maior resolução (40 metros).

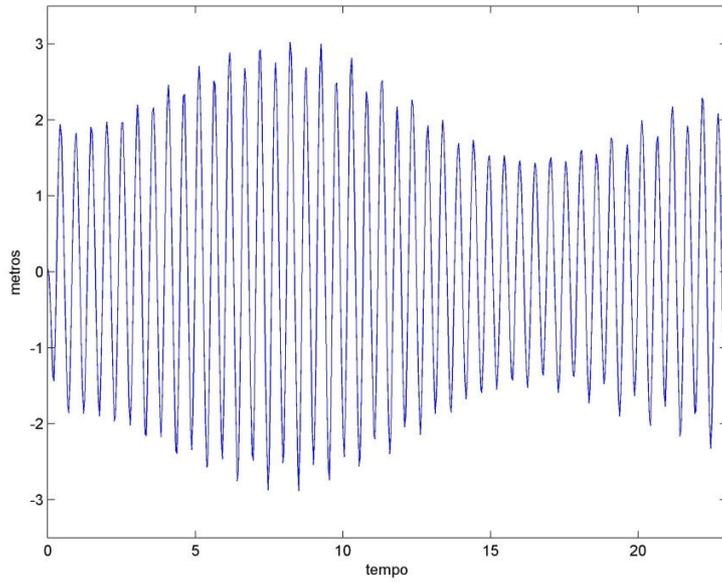
A seguir são apresentados os resultados para a simulação de grade grosseira (de 300 metros de resolução espacial).

3.1 Resultados da Simulação de 300 metros

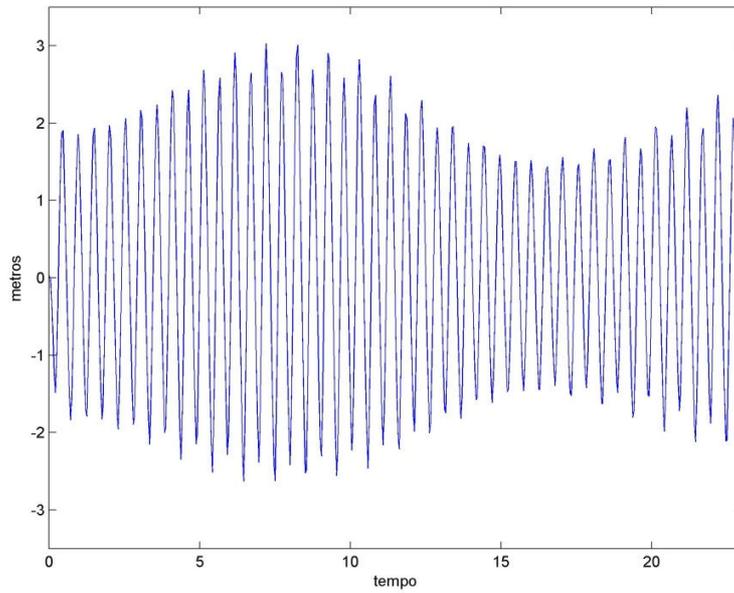
A realização desta simulação teve como objetivo principal a obtenção do campo de correntes marinhas geradas pelas variações de maré do mês de junho de 2012 sob a influência da vazão média (supracitada) do Golfão Maranhense.

O ciclo da maré representada pelo modelo é avaliado para o período de simulação. Na Figura 3 as séries temporais de elevação da superfície para dois pontos (próximo ao Porto de Itaqui e próximo ao canal de Cujupe) foram extraídas e podem ser observadas.

Observa-se que entre os dias 5 e 10 da simulação está representado o período de maré de sizígia (com as maiores amplitudes de maré) e entre os dias 15 e 18, o período de quadratura (menores amplitudes). Velocidades de aproximadamente 1,6 m/s ao longo do canal principal de navegação são observadas durante o sexto dia de simulação durante a maré de sizígia (Figura 4a). Durante a maré de quadratura (durante o dia 16 da simulação), as velocidades, na mesma região, são de apenas cerca de 1 m/s (Figura 4b). Diferenças de velocidade similares são observadas para a maré vazante (Figura 5).

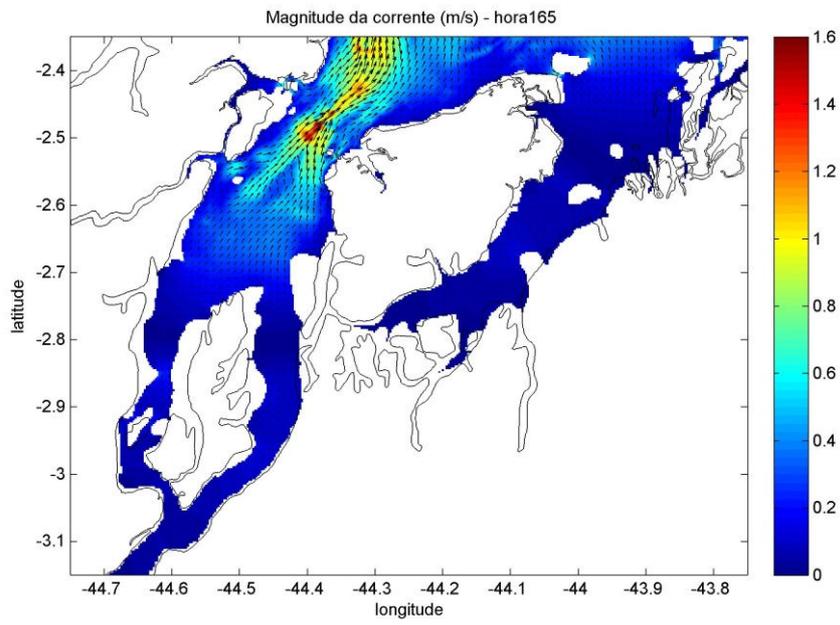


(a)

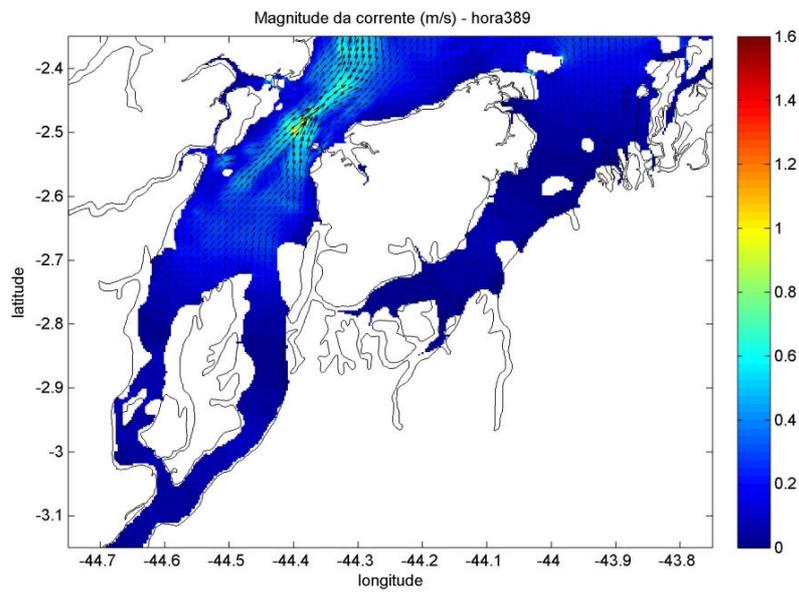


(b)

Figura 3: Séries de nível do mar (em metros) extraídas do modelo de 300 metros de resolução espacial para as proximidades do Porto de Itaqui (a) e do canal de Cujupe (b).

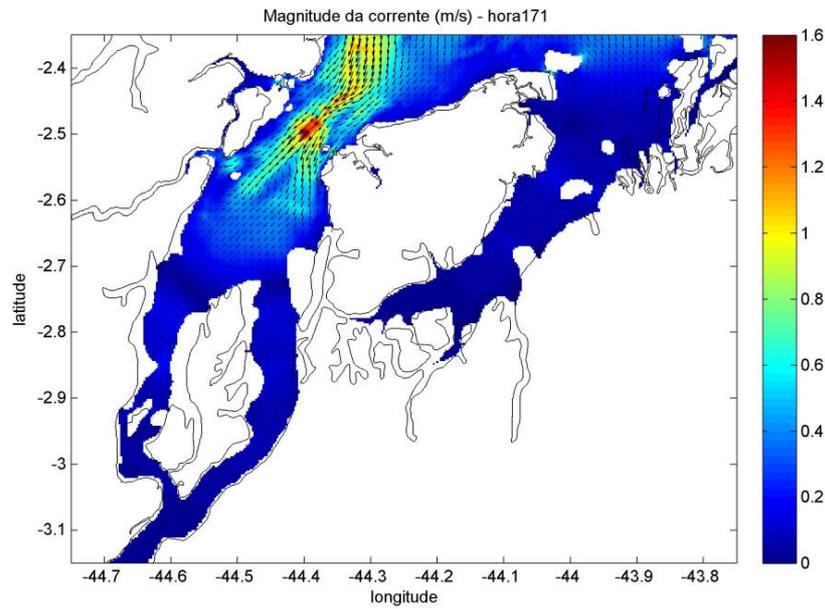


(a)

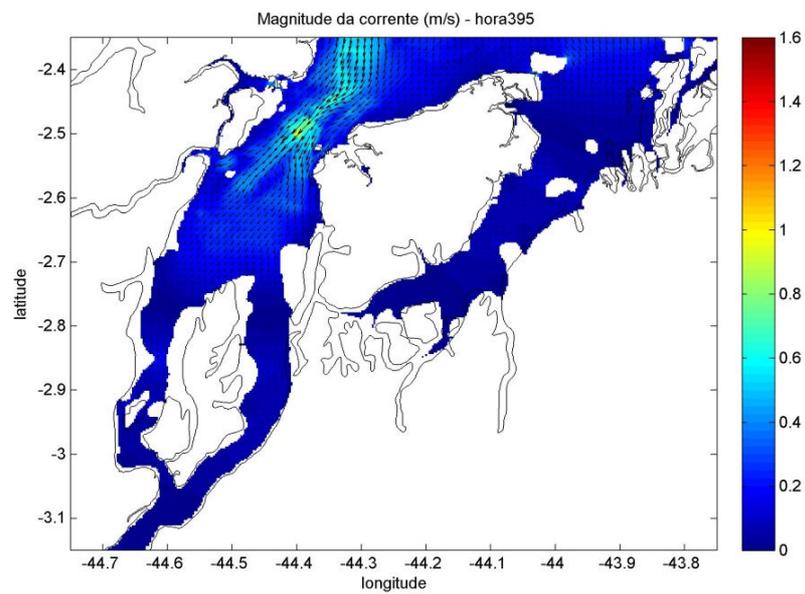


(b)

Figura 4: Campo de correntes marinhas durante maré enchente para a sizígia (a) e para a quadratura (b).



(a)



(b)

Figura 5: Campo de correntes marinhas durante maré vazante para a sizígia (a) e para a quadratura (b).

3.1 Resultados da Simulação de 40 metros

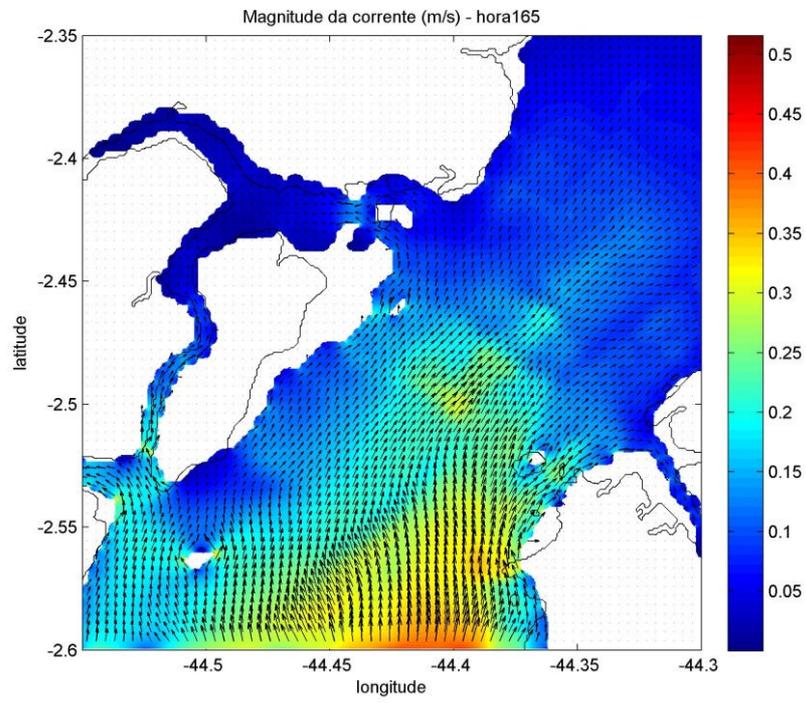
Nesta seção são apresentados os resultados da simulação numérica com a grade de 40 metros de resolução espacial.

Para este modelo, as séries temporais de velocidade geradas pelo modelo de 300 metros ao longo da latitude de, aproximadamente, 2,6°S foram utilizadas como condição de contorno. A região de sobreposição entre as duas grades numéricas foi mostrada na Figura 2.

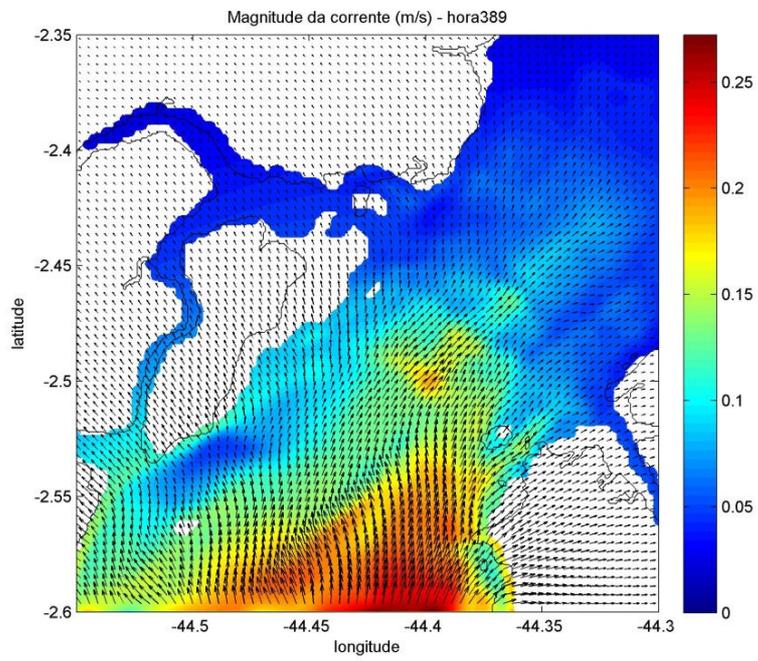
Nesta simulação, é esperado que algumas diferenças sejam encontradas em relação à simulação anterior uma vez que a física é resolvida para uma escala espacial menor do que no modelo de 300 metros. No entanto, os principais padrões durante os períodos de maré enchente e vazante são os mesmos.

Na Figura 6, observa-se a região de maiores intensidades de correntes marinhas durante a maré enchente é próxima do Porto de Itaqui. Para a época de sizígia, as maiores velocidades foram da ordem de 0,5 m/s, e para quadratura, este valor diminui pela metade.

Para a maré vazante (Figura 7), os padrões são similares aos observados para a maré enchente.

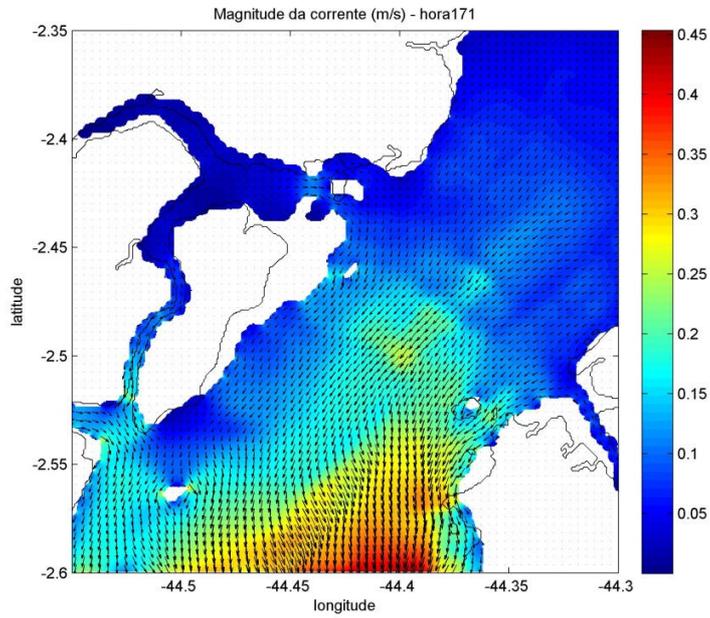


(a)

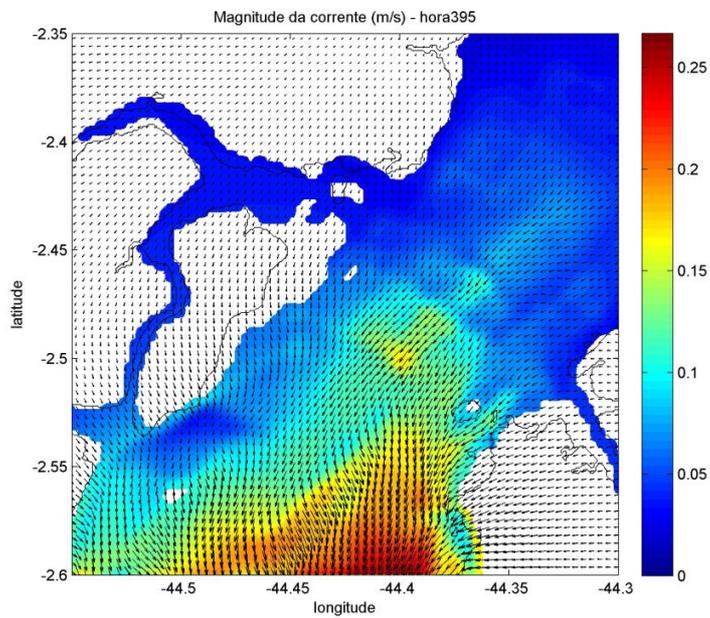


(b)

Figura 6: Campo de correntes marinhas durante maré enchente para a sizígia (a) e para a quadratura (b).



(a)



(b)

Figura 7: Campo de correntes marinhas durante maré vazante para a sizígia (a) e para a quadratura (b).

5. Simulações de transporte de óleo

Foram realizadas quatro simulações, considerando marés de quadratura e de sizígia, com derrames instantâneos (blowouts) e contínuos no tempo. Foram considerados dois pontos, um próximo ao terminal do Cujupe e outro próximo à Ponta da Espera. Nestas simulações consideramos o volume de cerca de 22.000,00 litros de óleo.

Visando definir o tempo de simulação foi utilizado o modelo ADIOS2 do NOAA, utilizando o óleo diesel No @ Chevron, API 33.5, densidade 0,857 g/cc a 27 C e viscosidade 0,8 cSt a 27 C.

As condições ambientais consideradas foram médias de vento de 3 m/s obtidos das normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia. Altura de onda obtida a partir da intensidade do vento, velocidades de correntes médias obtidas do modelo de 0.5 m/s, temperatura média de 27 Celsius, carga de sedimentos de cerca de 50 g/m³ que é uma média típica para sistemas estuarinos.

Os resultados deste modelo indicam uma evaporação crescente de cerca de 40% em 24 horas, atingindo cerca de 80% no quinto dia.

Para obter uma ideia inicial da resposta do óleo ao movimento da água, analisamos 24 horas de simulação na sizígia e na quadratura.

Nas figuras a seguir estão representados o estado final movimento da mancha de óleo no tempo sob as quatro condições após 24 horas.

Em anexo a este documento seguem animações do movimento da mancha para os mesmos casos.

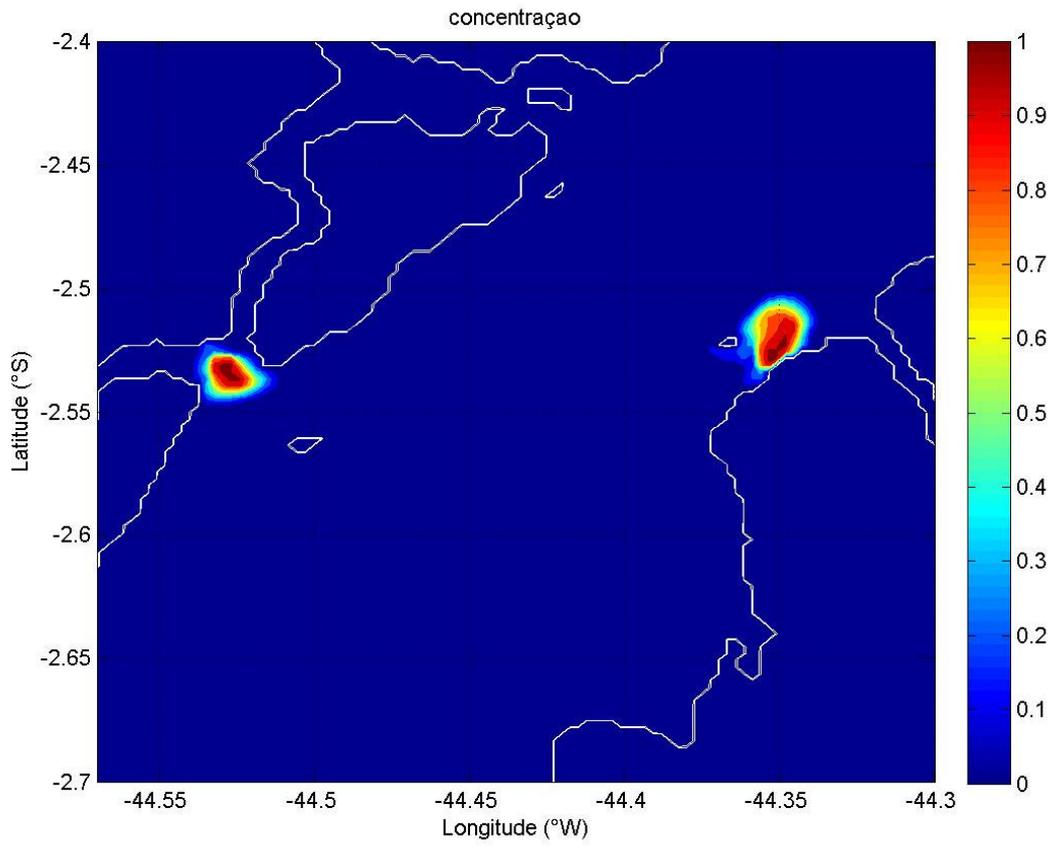


Figura 8. Situação final da dispersão do óleo, vazado continuamente, após 24 horas no caso da maré de sizígia.

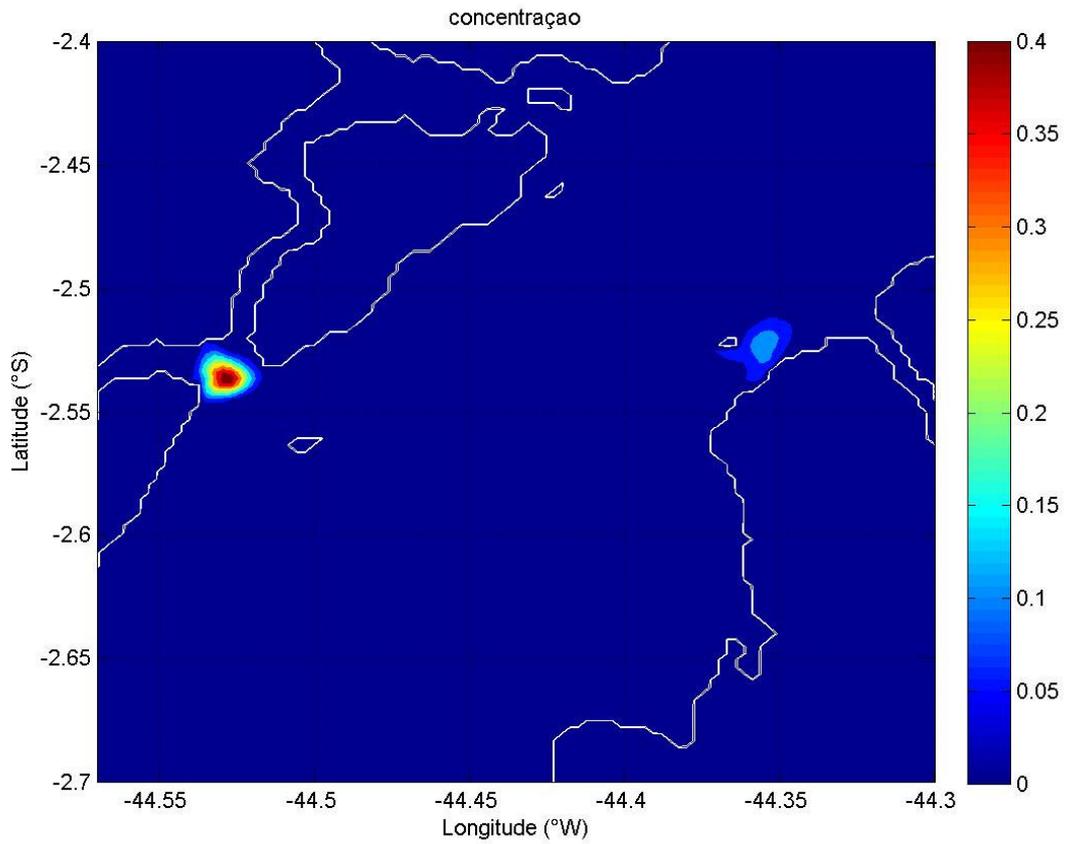


Figura 9. Situação final da dispersão do óleo, vazado instantaneamente, após 24 horas no caso da maré de sizígia.

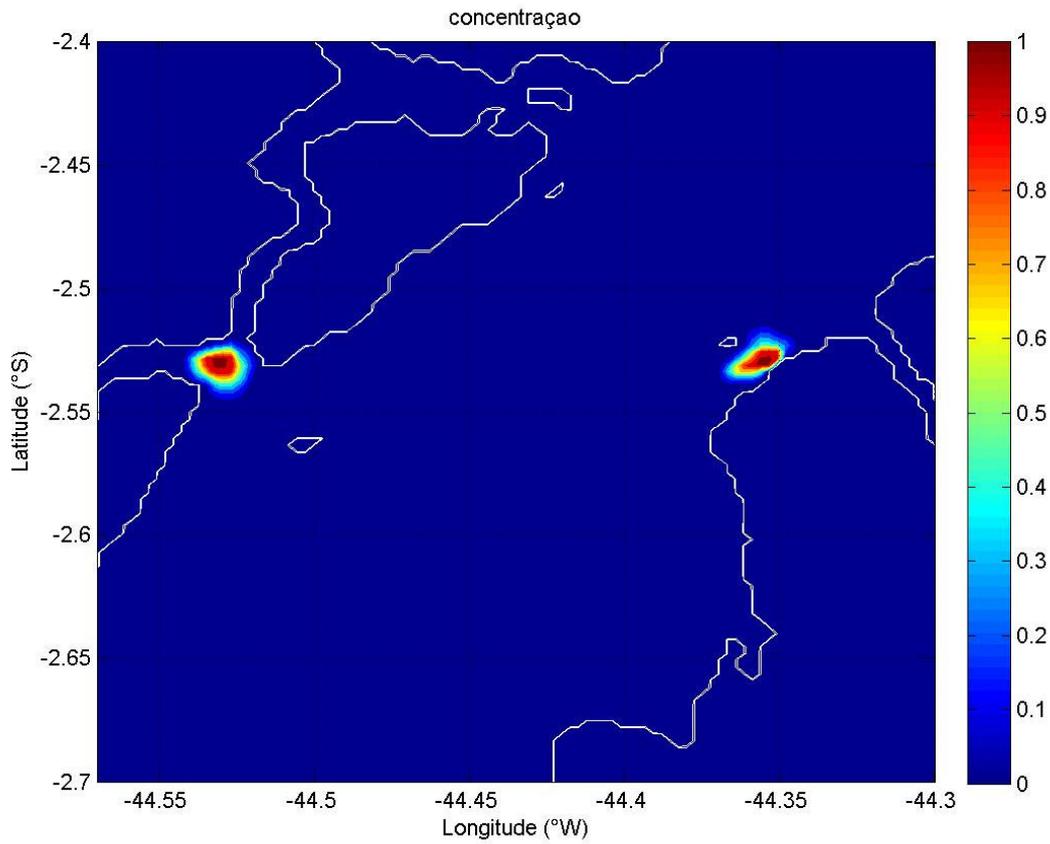


Figura 10. Situação final da dispersão do óleo, vazado continuamente, após 24 horas no caso da maré de quadratura.

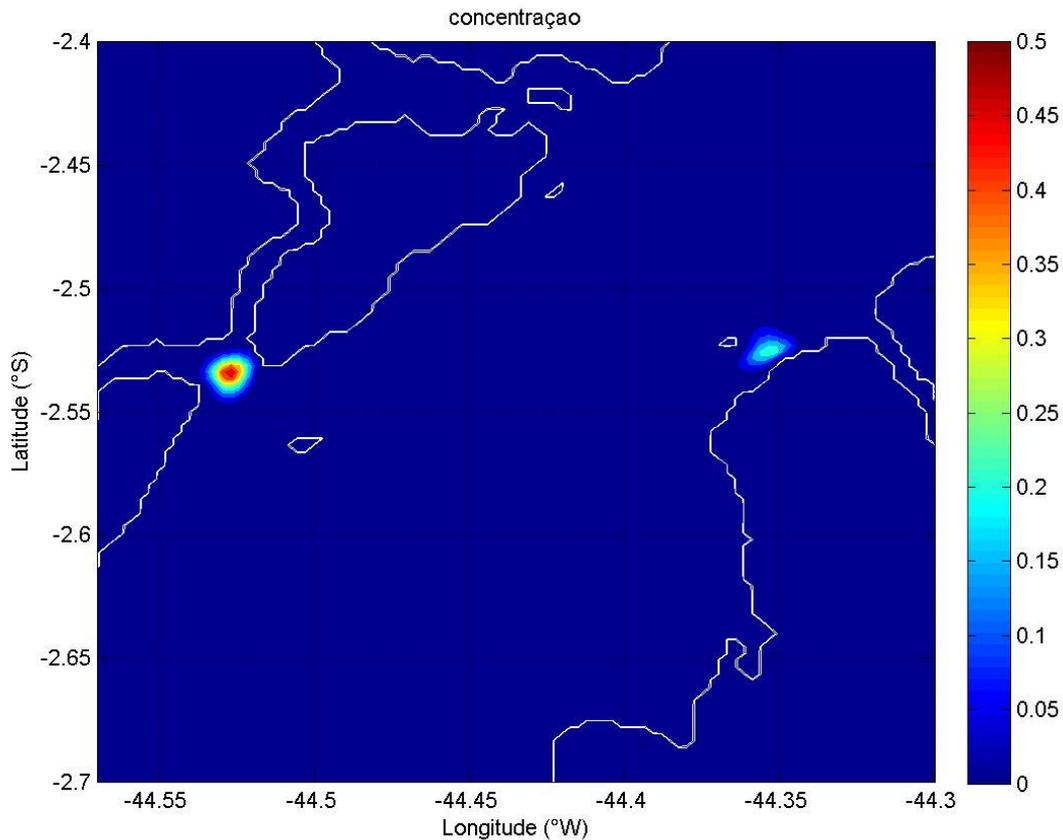


Figura 11. Situação final da dispersão do óleo, vazado instantaneamente, após 24 horas no caso da maré de quadratura.

Nota-se observando as figuras 8 e 10, relativas ao vazamento contínuo no tempo, na sizígia e na quadratura de maré respectivamente, um maior espalhamento do óleo, ou uma maior difusividade na figura 8, ou seja, no caso da maré de sizígia que imprime maiores velocidades às correntes.

Caso similar acontece quando se observa as figuras 9 e 11, relativas ao vazamento instantâneo (blowout), sob os mesmos regimes de maré.

Comparando-se as figuras 8 e 9, ou seja, vazamentos contínuo e instantâneo, sob regime de maré de sizígia, nota-se o rápido decaimento das concentrações no caso do vazamento instantâneo, isso se deve ao fato do óleo entrar em contato com o mar e a atmosfera de uma vez e passar a receber os efeitos da volatilização, que remove

cerca de 40% do óleo em 24 horas, somados aos efeitos de espalhamento. No caso do vazamento contínuo, o óleo apenas sofre o efeito de volatilização a medida que entra em contato com a atmosfera e o mar, mantendo portanto valores de concentrações mais altas junto ao ponto em que inicia a reação de weathering.

Em todas as simulações, em 24 horas, as regiões costeiras próximas ao ponto de vazamento são atingidas, ou seja, a região entre a Ponta da Espera e a ilha do Medo, e a região da entrada do canal no Cujupe.

5. Referências Bibliográficas

Novaes, R. C., Tarouco, J. E. F., Rangel, M. E. S. e Dias, L. J. B. da S., 2007. Análise da sensibilidade ambiental da parte ocidental da Ilha do Maranhão. Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 4089 – 4096.

Pontes, P. H. P. 2007. Identificação e caracterização das massas d'água da Plataforma Continental do Maranhão, durante os períodos seco (novembro, 1997) e chuvoso (junho, 1999). Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. Belém, Pará.