

. **MODELAGEM DE OLEO | CAMPO DE POLVO**

RELATÓRIO

Para: ECOLOGUS Engenharia Consultiva

ago-05

. ÍNDICE

I_ INTRODUÇÃO	3
II_ METODOLOGIA	3
II_1. Modo Determinístico	3
II_2. Processos De Intemperismo	5
II_2.1 EVAPORAÇÃO	5
II_2.2 ENTRANHAMENTO (OU DISPERSÃO)	6
II_3. Modo Probabilístico	7
II_4. Características da Simulação	10
II_4.1 FORÇANTES	10
II_4.2 CARACTERÍSTICAS DO VAZAMENTO	11
III_ RESULTADOS	11
III_1. SIMULAÇÃO PROBABILÍSTICA	12
III_1.1 VERÃO	12
III_1.2 INVERNO	13
III_2. SIMULAÇÃO DETERMINÍSTICA	16
III_2.1 BALANÇO DE MASSA (OU PROCESSOS DE INTEMPERISMO)	17
IV_ CONCLUSÕES	24
V_ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

I_ INTRODUÇÃO

O presente relatório descreve os resultados obtidos na modelagem numérica do transporte de óleo no mar para um cenário acidental de rompimento dos tanques do FPSO de produção e conseqüente vazamento do óleo neles contidos. O local do vazamento é coincidente com a localização do navio, no *Campo de Polvo*, nas coordenadas 23° 04' 57,69" S e 41° 00' 29,65" W.

Para contextualizar a questão, uma descrição da metodologia, dos modelos e dos dados utilizados é apresentada.

II_ METODOLOGIA

As simulações deste estudo foram feitas com o STROLL, desenvolvido pela PROOCEANO para estudos do transporte de contaminantes no mar. O STROLL é um modelo lagrangeano capaz de simular o transporte advectivo-turbulento em até 3 dimensões além dos processos de intemperismo e perda de massa de diversos tipos de contaminantes.

O STROLL possui dois modos de operação: determinístico e probabilístico.

A modelagem determinística consiste em estudar o comportamento do contaminante em um determinado cenário ambiental, apresentando instantâneos deste comportamento em tempos definidos pelo usuário.

Cabe à simulação probabilística, averiguar o comportamento do contaminante em uma extensa combinação de cenários ambientais e determinar a probabilidade de presença e o tempo mínimo de chegada do contaminante em cada região do domínio do modelo.

Uma breve descrição destes métodos, bem como dos processos de intemperismo será apresentada a seguir.

II_1. MODO DETERMINÍSTICO

A emissão de óleo no mar é representada pela inserção de um número de elementos n_e a cada intervalo de tempo Δt na região fonte. Considerando uma vazão Q m³/s, o volume inicialmente associado a cada elemento será:

$$q_{e,t=0} = \frac{Q\Delta t}{n_e} \quad (\text{II-1})$$

O transporte advectivo de cada elemento é dado através do cálculo de sua posição p_e a cada passo de tempo. Com isso, a posição do elemento e no instante t é dada por:

$$p_{e,t+1} = p_{e,t} + \Delta t \frac{dp_t}{dt} + \frac{\Delta t^2}{2} \frac{d^2 p_t}{dt^2} \quad (\text{II-2})$$

onde

$$\frac{dp_t}{dt} = \bar{u}_i \quad \text{é a velocidade e} \quad (\text{II-3})$$

$$\frac{d^2 p_t}{dt^2} = \frac{d\bar{u}_i}{dt} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \quad \text{a aceleração} \quad (\text{II-4}),$$

Para $i = x, y$. Os valores de velocidade utilizados são normalmente fornecidos por um modelo hidrodinâmico externo (detalhes no ANEXO I – Relatório Hidrodinâmico).

A difusão turbulenta do material é simulada através de modelos de passos aleatórios (*random walk models*), cuja idéia central consiste em adicionar um desvio de velocidade aleatório \bar{u}'_i às velocidades advectivas (Csanady, 1972). Seguindo o modelo sugerido por Rosman (1997) obtêm-se:

$$\bar{u}'_i = \frac{\alpha}{\bar{u}_i \Delta t} \left(v_{ij} + \frac{\Lambda_i^2}{24} \left| \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right| \right) \quad (\text{II-5})$$

Onde α é um número aleatório que varia no intervalo $[-1,+1]$. v_{ij} e Λ_i são a viscosidade cinemática e a escala de comprimento da turbulência, respectivamente. Estes parâmetros, assim como as velocidades são fornecidos, pelo modelo hidrodinâmico.

A espessura do filme de óleo associada a cada elemento é dada por

$$esp_e(x, y, t) = \frac{q_{e,t}}{\sqrt{2\pi} [\sigma(t)]^2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x - p(x, y, t)}{\sigma(t)} \right)^2 + \left(\frac{y - p(x, y, t)}{\sigma(t)} \right)^2 \right] \right\} \quad (II-6)$$

onde $\sigma_i^2(t)$ é a variância da distribuição, relacionado à turbulência local através da equação:

$$D_i = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_i^2(t)}{dt} \quad (II-7)$$

sendo D_i é a difusividade turbulenta horizontal, também fornecida pelo modelo hidrodinâmico.

A espessura resultante de todo o descarte é então obtida através da soma da contribuição de cada elemento:

$$ESP(x, y, t) = \sum_{e=1}^{n_e} esp_e(x, y, t) \quad (II-8)$$

II_2. PROCESSOS DE INTEMPERISMO

II_2.1 EVAPORAÇÃO

O STROLL utiliza-se da relação de Mackay & Matsugu (1973), que expressa a quantidade de massa evaporada em um passo de tempo:

$$dm = (K_2 \cdot P_{vp} \cdot \frac{A}{R \cdot T}) \cdot f \cdot MW \cdot \Delta t \quad (II-9)$$

onde dm é a massa evaporada; K_2 é o coeficiente de transferência de massa; P_{vp} é a pressão de vapor; A é a área da mancha; R é a constante universal dos gases; T é a temperatura; f é a fração evaporável do constituinte; e MW , o peso molecular desta fração.

O coeficiente K_2 pode ser parametrizado da seguinte forma:

$$K_2 = 0.029 \cdot W^{0.78} \cdot d^{-0.11} \cdot S_c^{-0.67} \cdot \sqrt{\frac{(MW + 29)}{MW}} \quad (\text{II-10})$$

sendo W a velocidade do vento; d é o diâmetro da mancha e S_c é o número de Schmidt ($S_c = 2,7$, segundo Mackay et. al, 1980).

O volume evaporado corresponde à relação entre a massa evaporada dm e a densidade do constituinte ρ_o .

$$Ev = \frac{dm}{\rho_o} \quad (\text{II-11})$$

II_2.2 ENTRANHAMENTO (OU DISPERSÃO)

Reed (1989) utiliza a seguinte parametrização para calcular a fração da superfície do mar sujeita ao entranhamento (dispersão) por hora:

$$D_a = 0.11 \cdot (W + 1)^2 \quad (\text{II-12})$$

Sendo o volume de constituinte entranhado:

$$En = D_a \cdot [1 + 50 \cdot (\mu)^{1/2} \cdot h \cdot S_t]^{-1} \quad (\text{II-13})$$

Onde h é a espessura da mancha e S_t , a tensão na interface entre a água e o poluente.

A viscosidade do constituinte μ varia ao longo de sua trajetória, sendo parametrizada por Mackay et al. (1982) apud Reed (1989).

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{C_4 \cdot F_{evap}} \quad (\text{II-14})$$

onde μ_0 é a viscosidade inicial do constituinte, C_4 é uma constante empírica intrínseca a cada tipo de constituinte e F_{evap} é a fração do constituinte evaporada.

O volume de cada elemento é então atualizado seguindo a equação:

$$q_{e,t} = q_{e,t-1} - (Ev + En) \tag{II-15}$$

II_3. MODO PROBABILÍSTICO

Na abordagem probabilística utilizada são realizadas diversas simulações determinísticas, considerando-se todos os processos citados nos itens anteriores, em diferentes cenários meteo-oceanográficos. Este módulo do STROLL tem por objetivo verificar a probabilidade de presença do constituinte na região estudada, bem como o tempo de chegada, a fim de determinar um cenário crítico para o descarte de contaminantes na região.

De acordo com os cenários apontados na caracterização meteo-oceanográfica do diagnóstico de meio físico, as séries temporais de vento e corrente são repartidas. Esta divisão resulta em 4 séries sazonais – correntes-verão, correntes-inverno, ventos-verão, ventos-inverno – conforme apresentado no esquema da Figura 1.

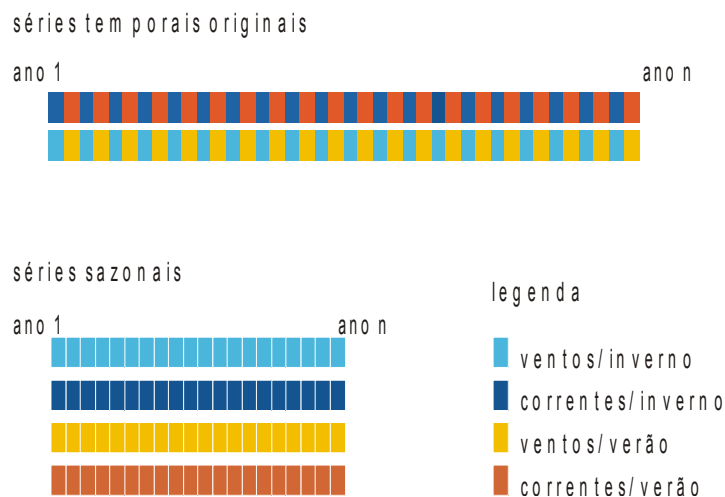


Figura 1: Representação esquemática da separação sazonal dos dados para a modelagem probabilística.

As séries de vento e corrente são então combinadas em diversos arranjos de forma a contemplar o maior número possível de cenários (Figura 2).

exemplo: probabilístico de verão

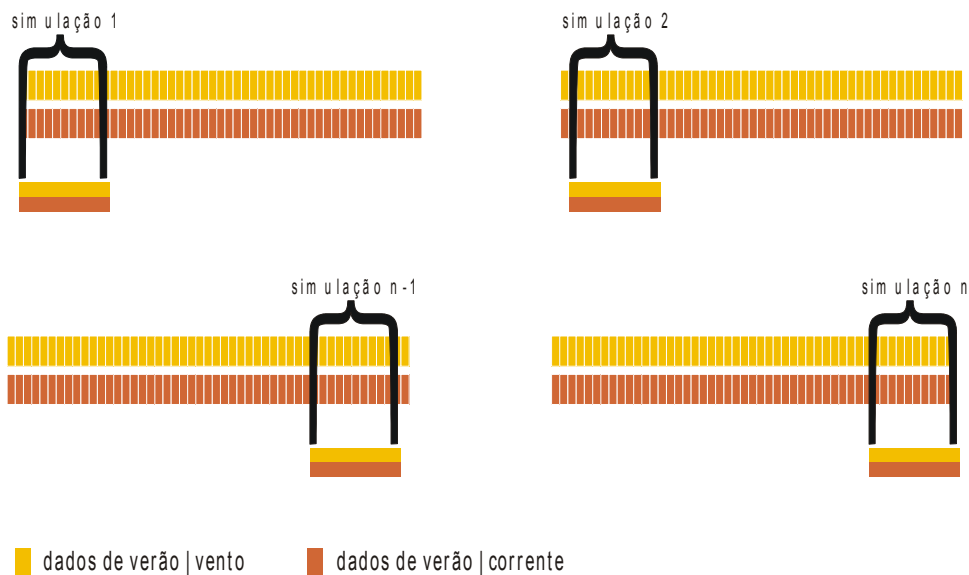


Figura 2: Representação esquemática da combinação dos dados de vento e corrente para a simulação probabilística.

Cada combinação de vento e corrente irá determinar um comportamento para o vazamento. O modelo identifica, em cada combinação, os pontos de grade onde a espessura da mancha do constituinte esteve acima do limiar determinado (Figura 3 a, b, c e d):

$$I(x, y) = 1 \quad \text{se } ESP(x, y, t) \geq \text{lim}$$

$$I(x, y) = 0 \quad \text{se } ESP(x, y, t) < \text{lim}$$

A probabilidade de presença do poluente será dada pela normalização do número de vezes em que a mancha esteve acima do limiar em cada ponto de grade pelo número de combinações n_{com} realizadas (Figura 3):

$$P(x, y) = \sum_{i_{sim}=1}^{n_{com}} \left(\frac{I(x, y)}{n_{com}} \right) \tag{II-16}$$

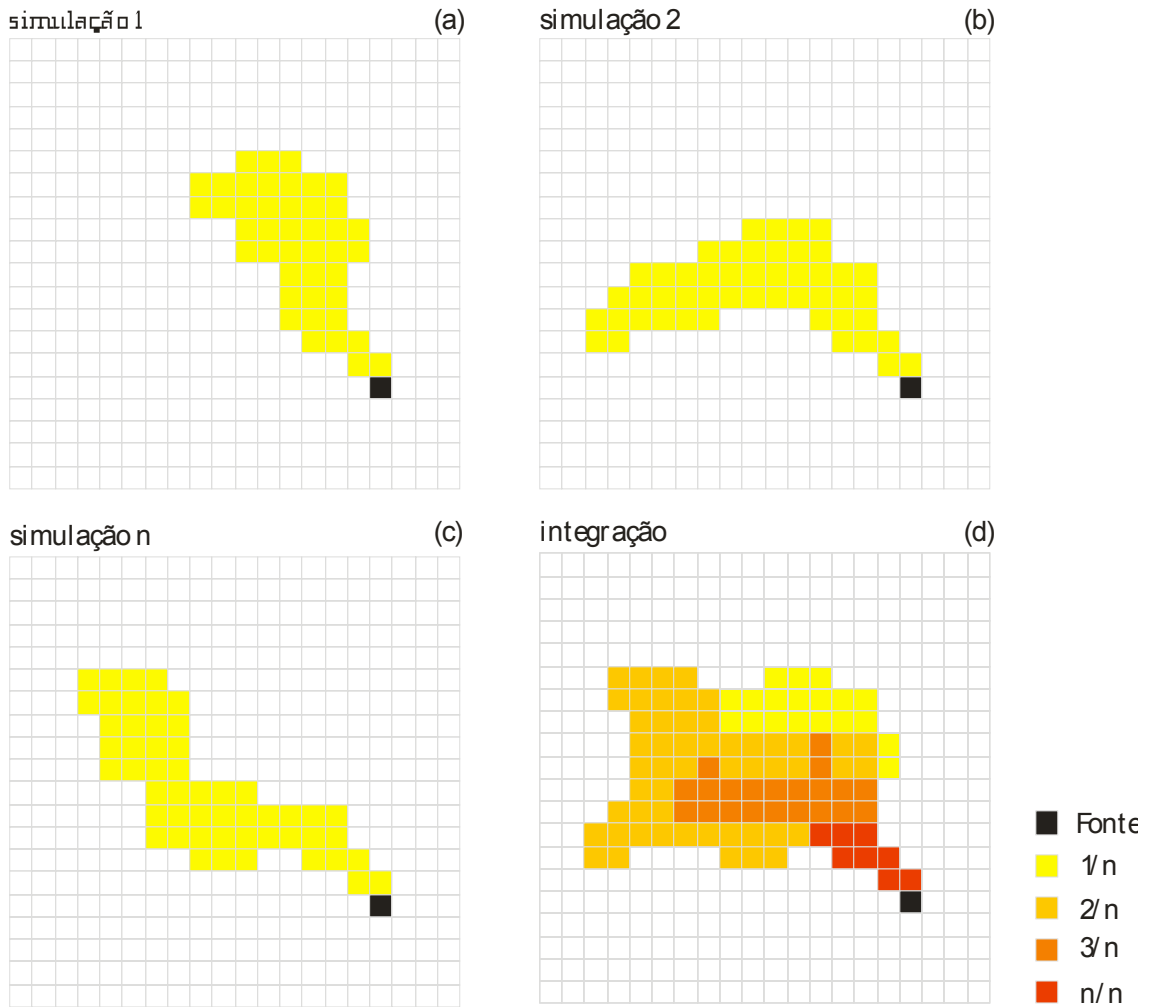


Figura 3: Representação esquemática do cálculo da probabilidade de presença de constituinte no STROLL.

Quanto maior a extensão da série temporal, maior será o número de simulações e, conseqüentemente, maior o número de cenários contemplados.

Além da probabilidade de presença do constituinte, o módulo probabilístico do STROLL fornece também o menor tempo de chegada da mancha em cada ponto de grade do domínio. Com base nestas duas informações o cenário de pior caso é identificado e apresentado em maior detalhamento na simulação determinística.

II_4. CARACTERÍSTICAS DA SIMULAÇÃO

De forma a contemplar as características sazonais da região de estudo, foram realizadas 2 simulações probabilísticas. Foi denominada de *verão* a simulação para o período do ano entre os meses de outubro e abril, da mesma maneira, *inverno* corresponde ao período entre os meses de maio e setembro. Essa separação foi baseada na análise dos dados meteo-oceanográficos, apresentada no item II.5.1, deste relatório.

As simulações foram realizadas com um critério que considera a existência de óleo nas regiões onde este apresenta espessura maior ou igual ao limiar de 3×10^{-7} metros (limiar de detecção), de acordo com os critérios sugeridos pelo ELPN – IBAMA no documento Diretrizes Técnicas para Modelagem de Óleo no Mar (IBAMA/ANP, 2002).

II_4.1 FORÇANTES

Os dados de vento utilizados são provenientes das reanálises do NCEP – *National Centers for Environmental Prediction* – (Kalnay *et al.*, 1996). Consiste em uma série de dados meteorológicos, com 2,5 graus de resolução espacial cobrindo todo o globo e disponível gratuitamente na internet (<http://www.ncep.noaa.gov>).

Para este estudo foram tratados 21 anos de dados (1983 a 2003) com uma frequência temporal de 6 horas (4 dados por dia).

A análise desses dados possibilitou a caracterização de dois períodos bem marcados, com condições de inverno e verão. O primeiro indo de maio a setembro é caracterizado pela predominância dos ventos de nordeste, porém com grande incidência dos ventos de quadrante sul (sudoeste a sudeste). Nessa estação ocorre também uma maior incidência de passagens de sistemas frontais na região.

O período de outubro a abril é caracterizado por condições típicas de verão, com ventos predominantemente variando de leste a nordeste.

Os dados de corrente utilizados foram obtidos da base de dados da PROOCEANO e uma descrição detalhada encontra-se no ANEXO I (Modelagem Hidrodinâmica).

II_4.2 CARACTERÍSTICAS DO VAZAMENTO

Foi considerado em todas as simulações (probabilísticas e determinística), um vazamento de óleo com duração de 2 horas, cujo volume é correspondente à capacidade operacional do FPSO, quando este estiver em produção.

As características do óleo são descritas nas Tabela 1 e Tabela 2, e foram estimadas, de forma conservativa, em função das análises realizadas pela Devon Energy do Brasil, em amostras retiradas no campo de exploração.

Tabela 1: Características do óleo utilizadas na simulação.

Parâmetro	Valor	Temperatura	Unidade
API	19.3		
Viscosidade Inicial	52.7	20° C	cp
Densidade	0.9403	20° C	g/cc

Tabela 2: Características do Vazamento.

Longitude	41° 00' 29,65" W
Latitude	23° 04' 57,69" S
Prof. da Lâmina D'água	105 m
Volume	111291 m ³

III_ RESULTADOS

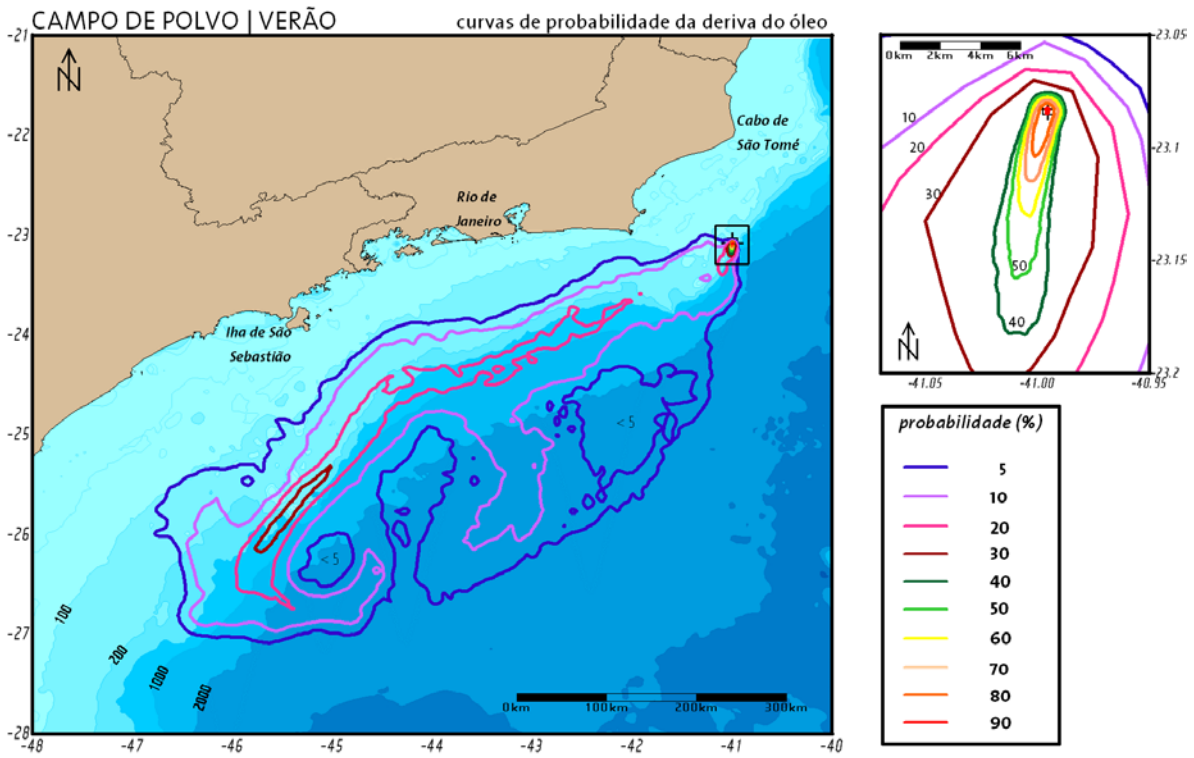
A seguir são apresentados os mapas de probabilidade de presença de óleo e tempo mínimo de chegada para as simulações de verão e inverno. Para a obtenção destes resultados foram realizadas 265 diferentes simulações para cada período citado.

Com base nestes resultados será definido o pior caso e apresentada a simulação determinística deste cenário.

III_1. SIMULAÇÃO PROBABILÍSTICA

III_1.1 VERÃO

O mapa de probabilidade de presença de óleo encontra-se na Figura 4 enquanto o tempo mínimo de



chegada encontra-se na Figura 5.

Figura 4: Probabilidade de presença do óleo para a simulação de verão com detalhe da mancha apresentada no quadro menor.

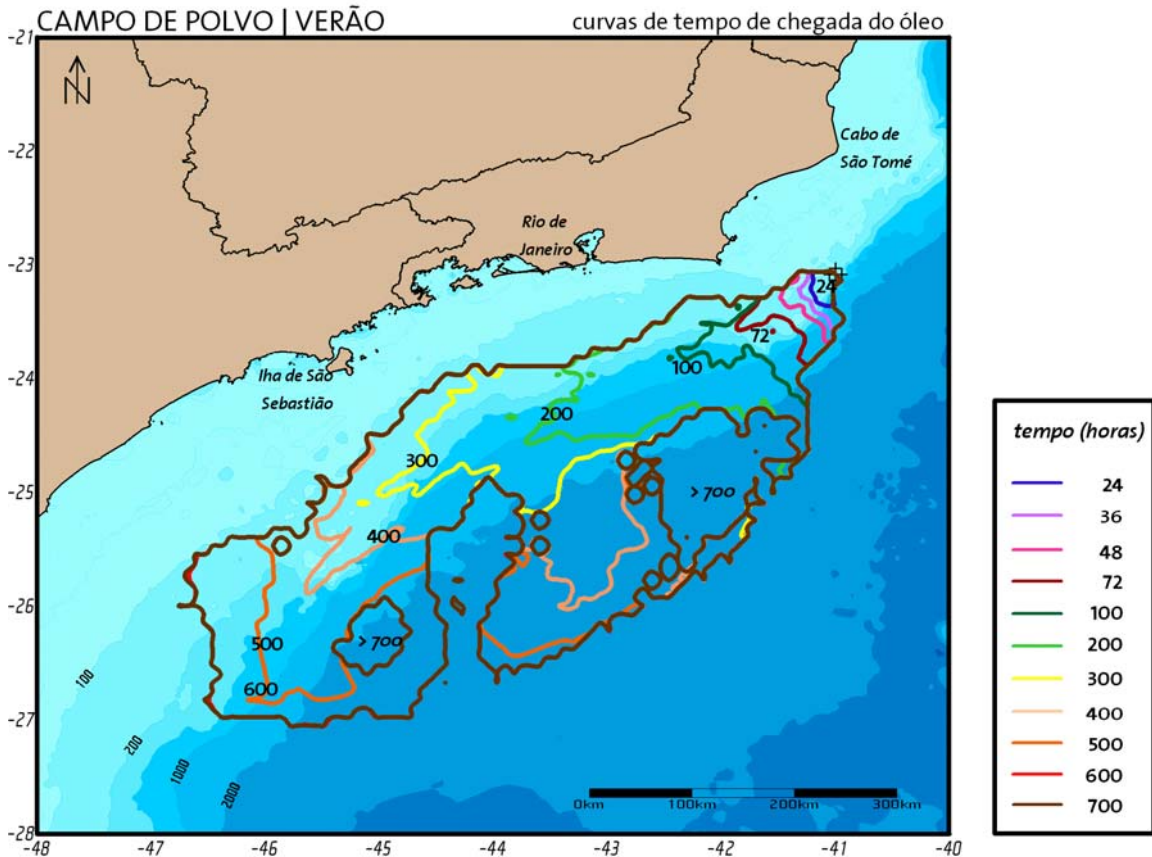


Figura 5: Tempo mínimo de chegada do óleo para a simulação de verão com detalhe da mancha apresentada no quadro menor.

Os resultados, considerando um limite de 5% de probabilidade, mostram que a deriva do óleo apresenta orientação nordeste-sudoeste, na região da quebra da Plataforma Continental, sendo bastante influenciada pelo fluxo da corrente do Brasil. Nota-se ainda a influência dos vórtices e meandramentos associados ao fluxo principal dessa corrente.

Considerando esse limiar, a menor distância do contorno de 5% em relação à costa é de 30 Km, na região próxima a Cabo Frio.

III_1.2 *INVERNO*

Na Figura 6 encontra-se o mapa de probabilidade de presença do óleo para a simulação de inverno.

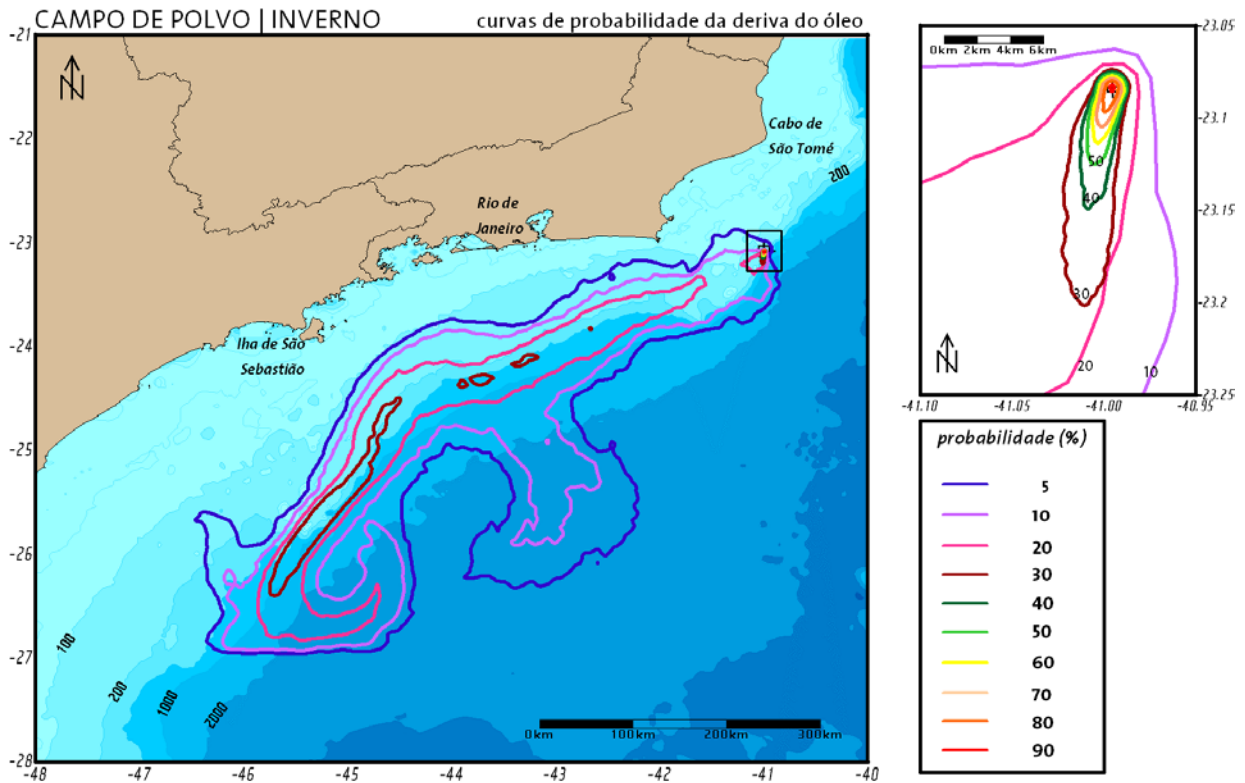


Figura 6: Probabilidade de presença do óleo para a simulação de inverno com detalhe da mancha apresentada no quadro menor.

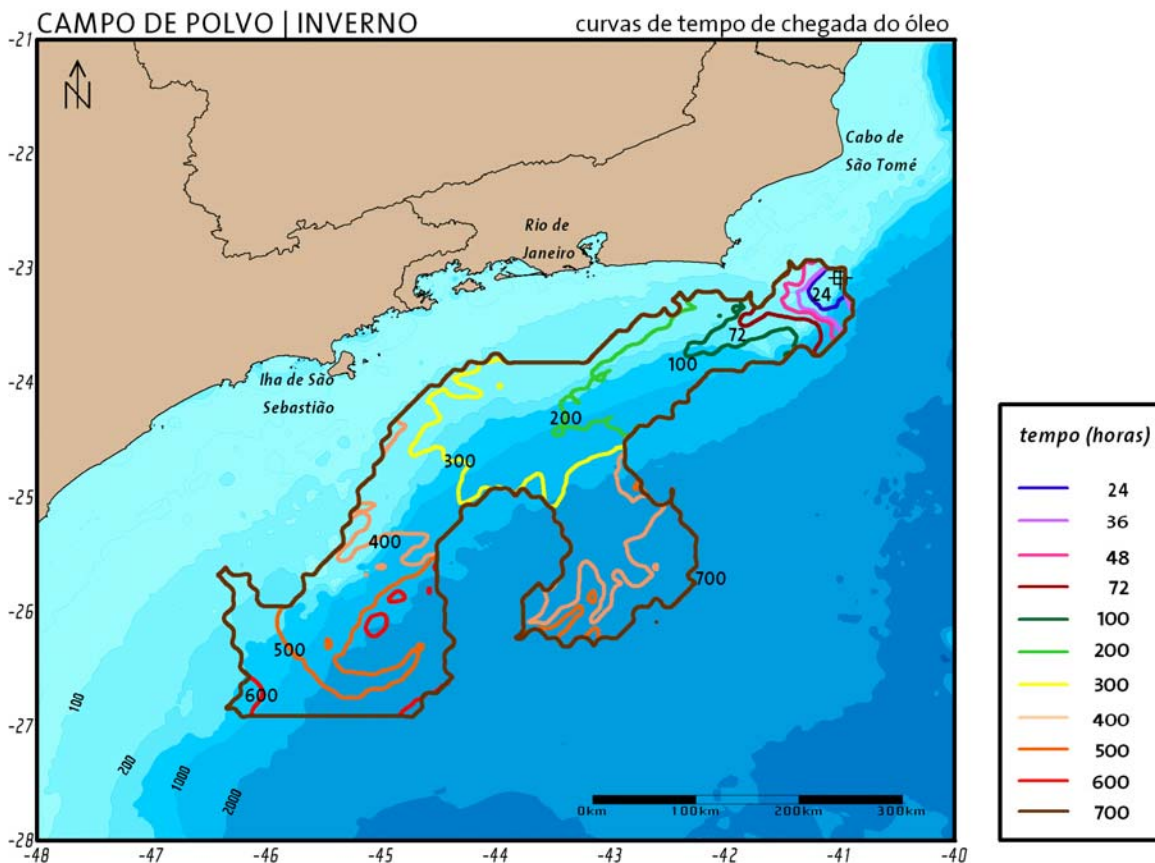


Figura 7: Tempo mínimo de chegada do óleo para a simulação de inverno com detalhe da mancha apresentada no quadro menor.

Os resultados, considerando um limite de 5% de probabilidade, mostram que o óleo, apresenta maior probabilidade de se aproximar da costa, na região do Cabo Frio. Observa-se, no entanto, que a área de probabilidade é menor do que a obtida na simulação para o período de verão, apresentando, porém, a mesma orientação nordeste-sudoeste, na região da quebra da Plataforma Continental.

Considerando esse limiar, a menor distância do contorno de 5% em relação à costa é de 24 km, na região próxima a Cabo Frio.

A simulação realizada para o período de inverno, considerando um limiar de 5%, mostrou regiões mais próximas à linha de costa, com maiores probabilidades de chegada de óleo.

Foi observado, no entanto, que em alguns cenários houve toque de óleo na costa, porém com probabilidades de 1%. Esse fato ocorre devido a natureza da simulação. Como o óleo está totalmente disponibilizado na água em pouco tempo (vazamento instantâneo) todo o volume fica, no início da simulação, restrito a uma área pequena, quando comparado a um vazamento contínuo. Isso faz com que as ocorrências de chegada de óleo na costa sejam pontuais e com baixas probabilidades.

Considerando todos os eventos de toque de óleo na costa, independente da região que este ocorra, as chances do óleo atingir o continente são de 3 %. Mais uma vez ressalta-se que, para um mesmo ponto, este valor não é superior a 1%.

Foi escolhido para a simulação determinística, o pior cenário probabilístico para o período de inverno. Para a caracterização desse evento, foi levado em consideração o menor tempo de toque na costa, ocorrido na região de Cabo Frio, após 144 horas de simulação.

III_2. SIMULAÇÃO DETERMINÍSTICA

Os resultados da simulação determinística para o cenário de pior caso são apresentados da Figura 8 a Figura 14.

Pode-se notar que a mancha desloca-se com direção preferencial para oeste do início até 144 horas após o vazamento. Nesse momento ocorre o toque de óleo na costa, na região do Cabo Frio, como pode ser observado na Figura 11.

A partir desse momento a deriva ocorre rumo a sudoeste, na quebra da Plataforma Continental, acompanhando o fluxo principal da Corrente do Brasil.

Nesse ponto da simulação a área da mancha vai progressivamente aumentando, enquanto a espessura diminui. Isso se deve, tanto pelo espalhamento da mancha, como também pelo intemperismo atuante ao longo do tempo.

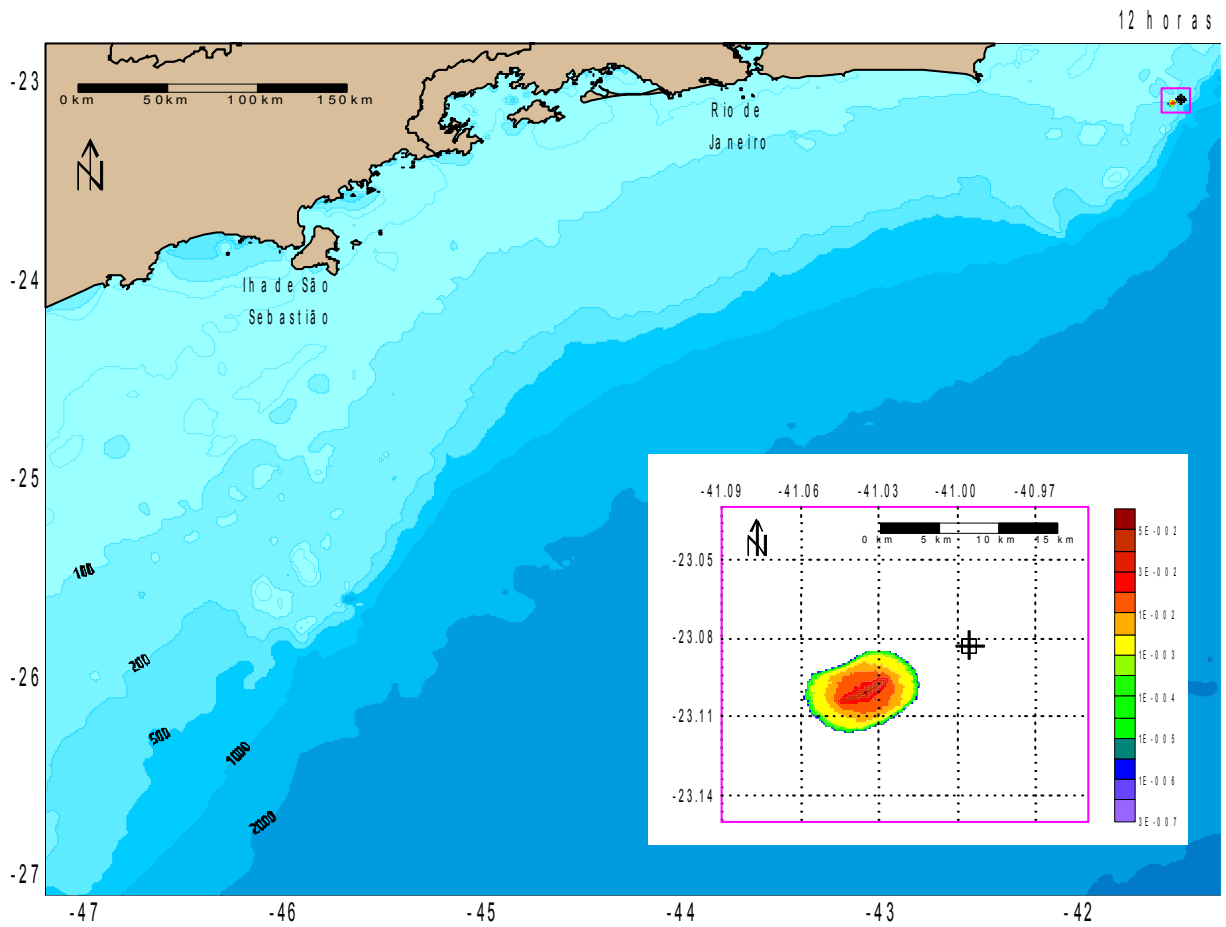


Figura 8: Resultado da simulação determinística após 12 horas de vazamento. Detalhe para a região da mancha. Espessura em metros.

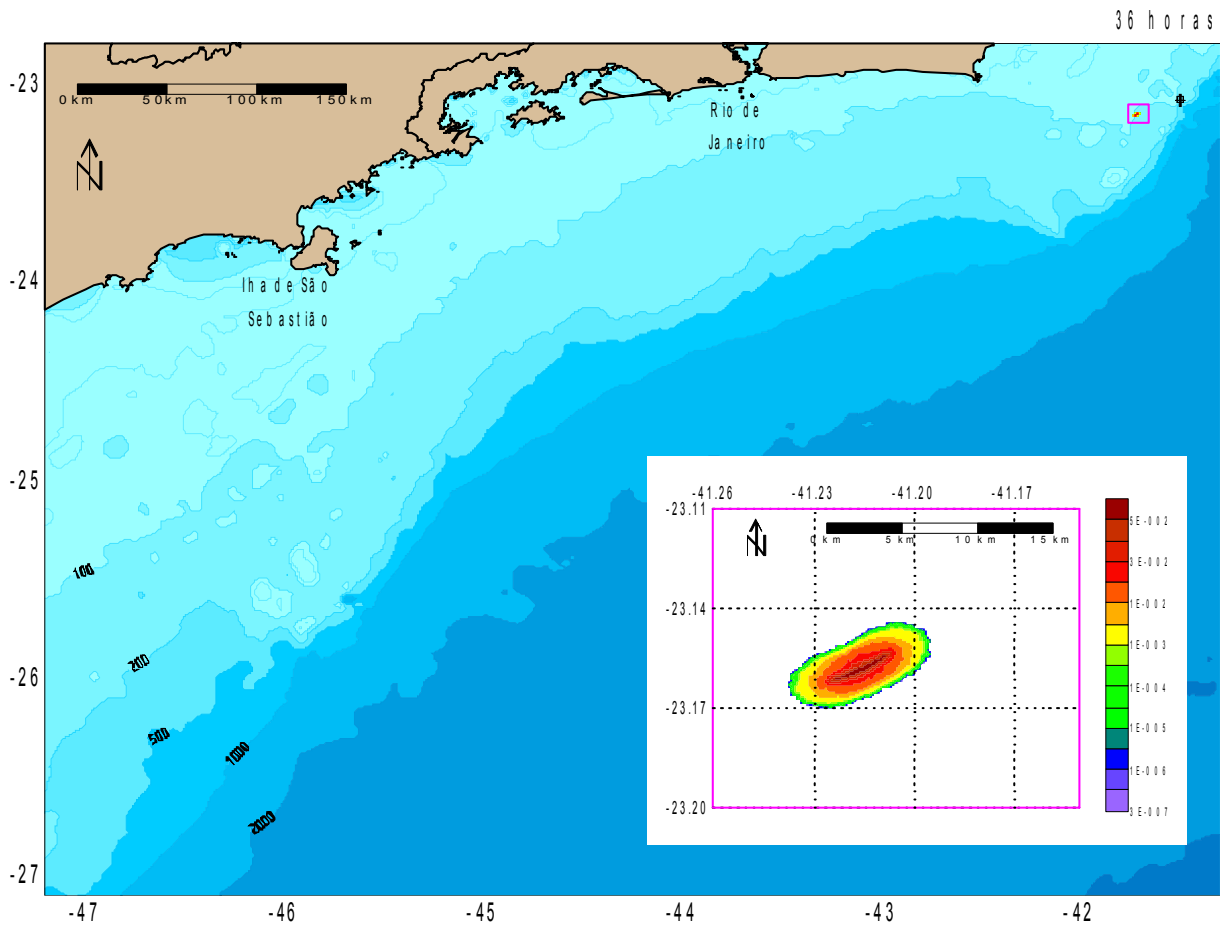


Figura 9: Resultado da simulação determinística após 36 horas de vazamento. Detalhe para a região da mancha. Espessura em metros.

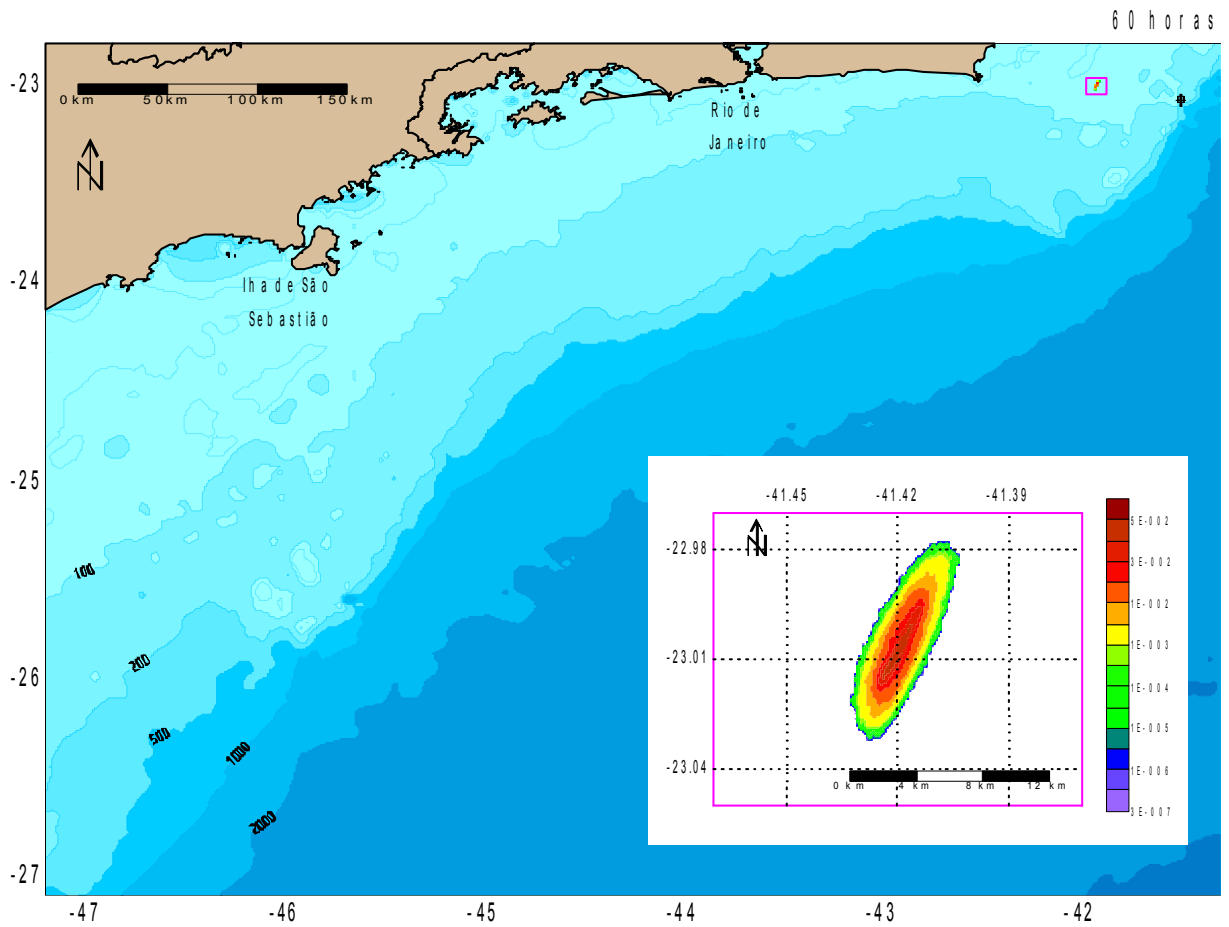


Figura 10: Resultado da simulação determinística após 60 horas de vazamento. Detalhe para a região da mancha. Espessura em metros.

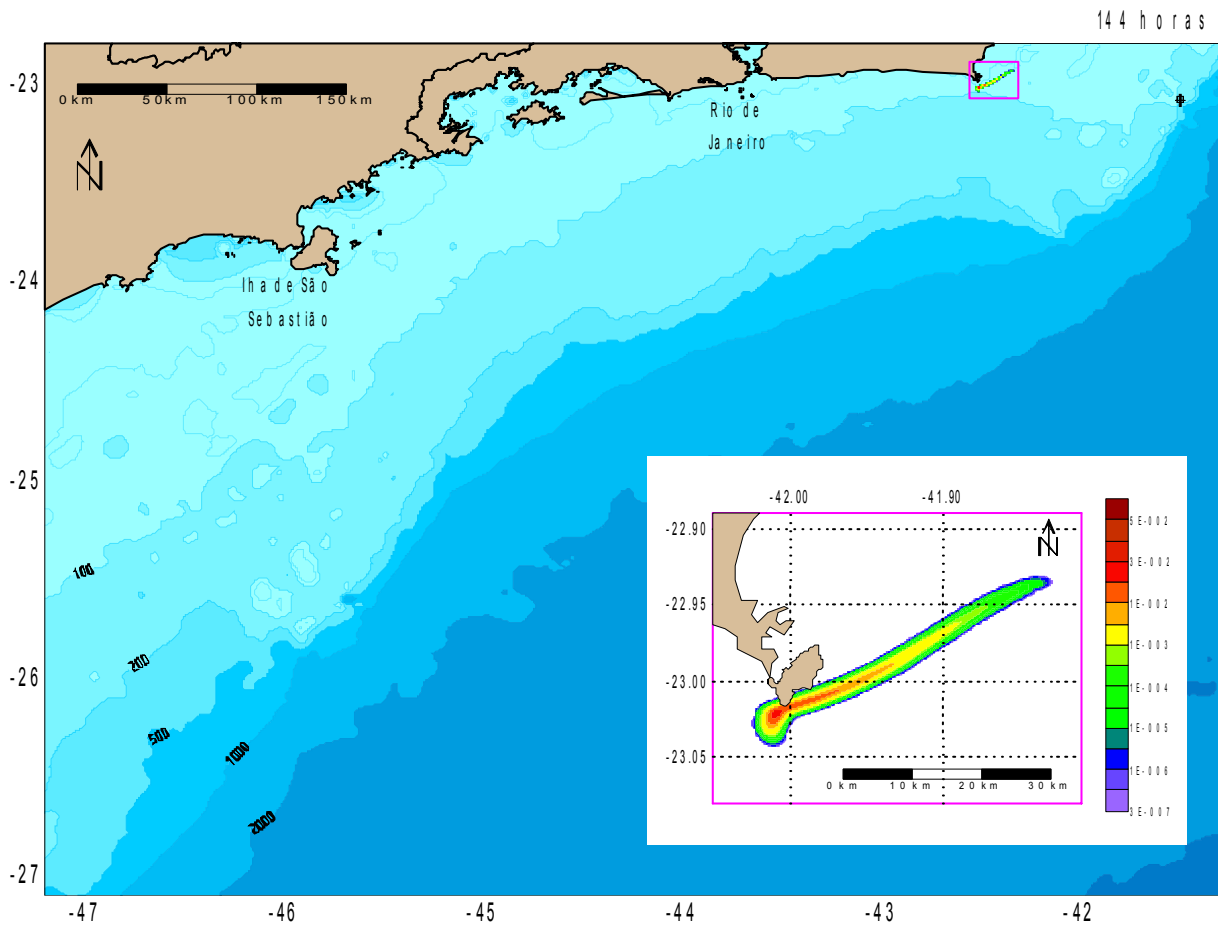


Figura 11: Resultado da simulação determinística após 144 horas de vazamento. Detalhe para a região da mancha. Espessura em metros.

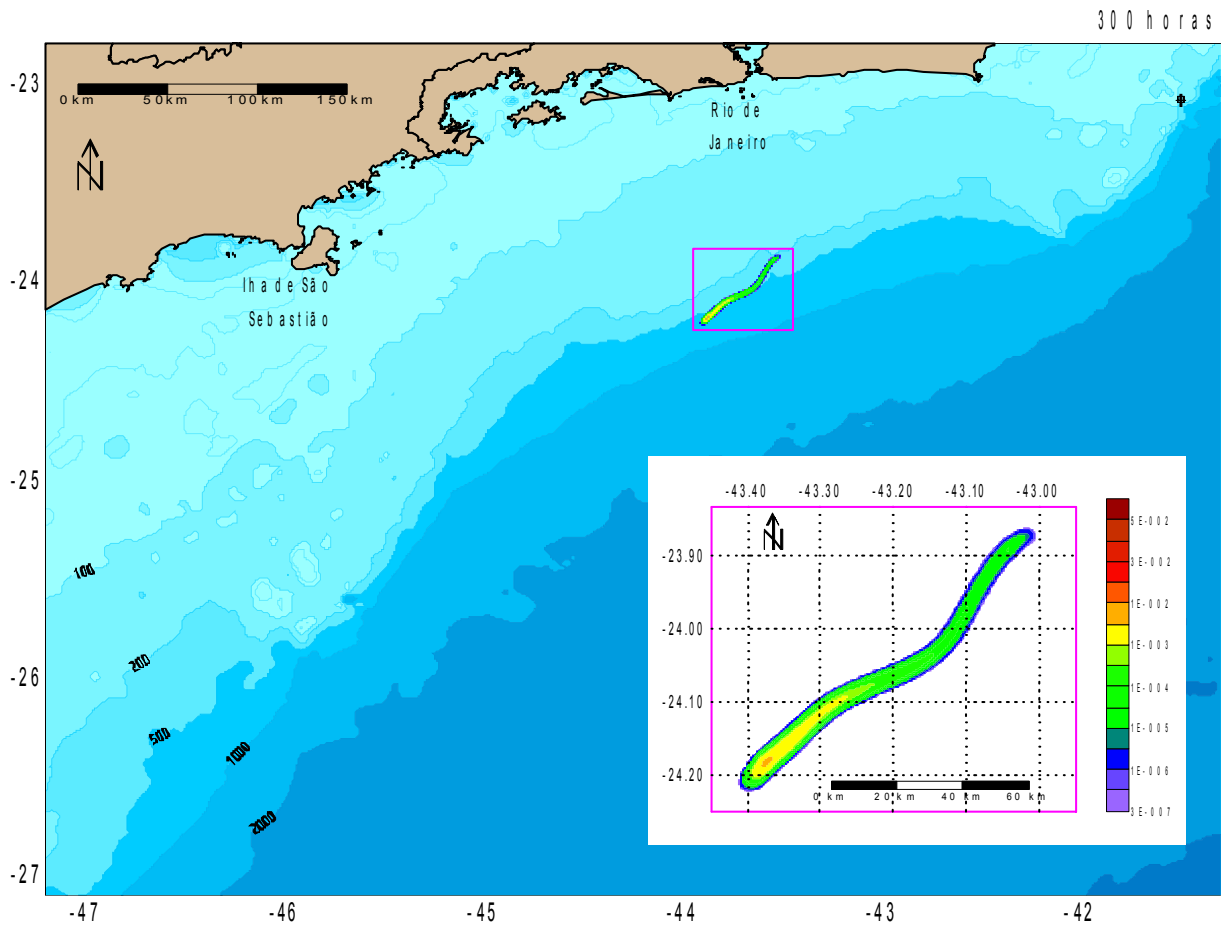


Figura 12: Resultado da simulação determinística após 300 horas de vazamento. Detalhe para a região da mancha. Espessura em metros.

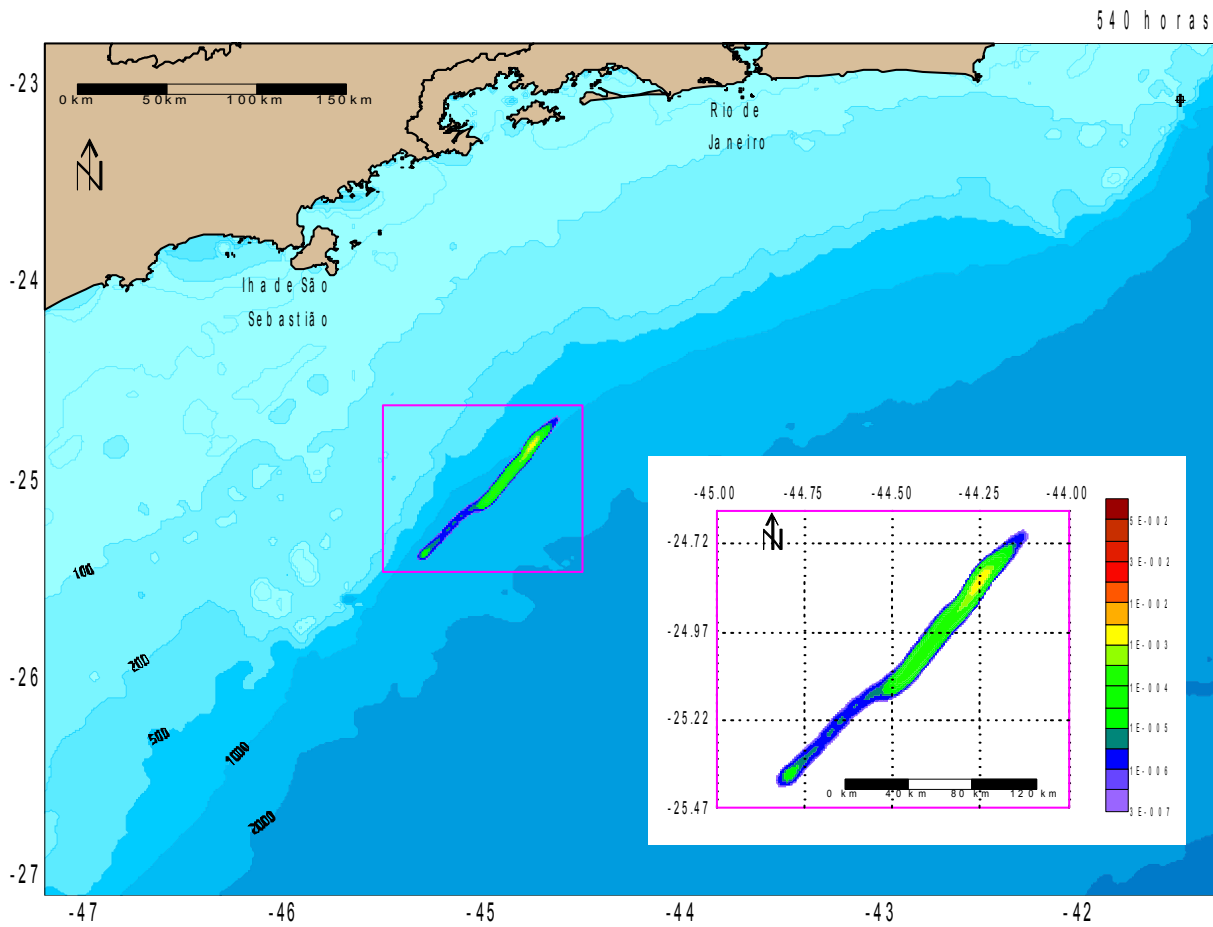


Figura 13: Resultado da simulação determinística após 540 horas de vazamento. Detalhe para a região da mancha. Espessura em metros.

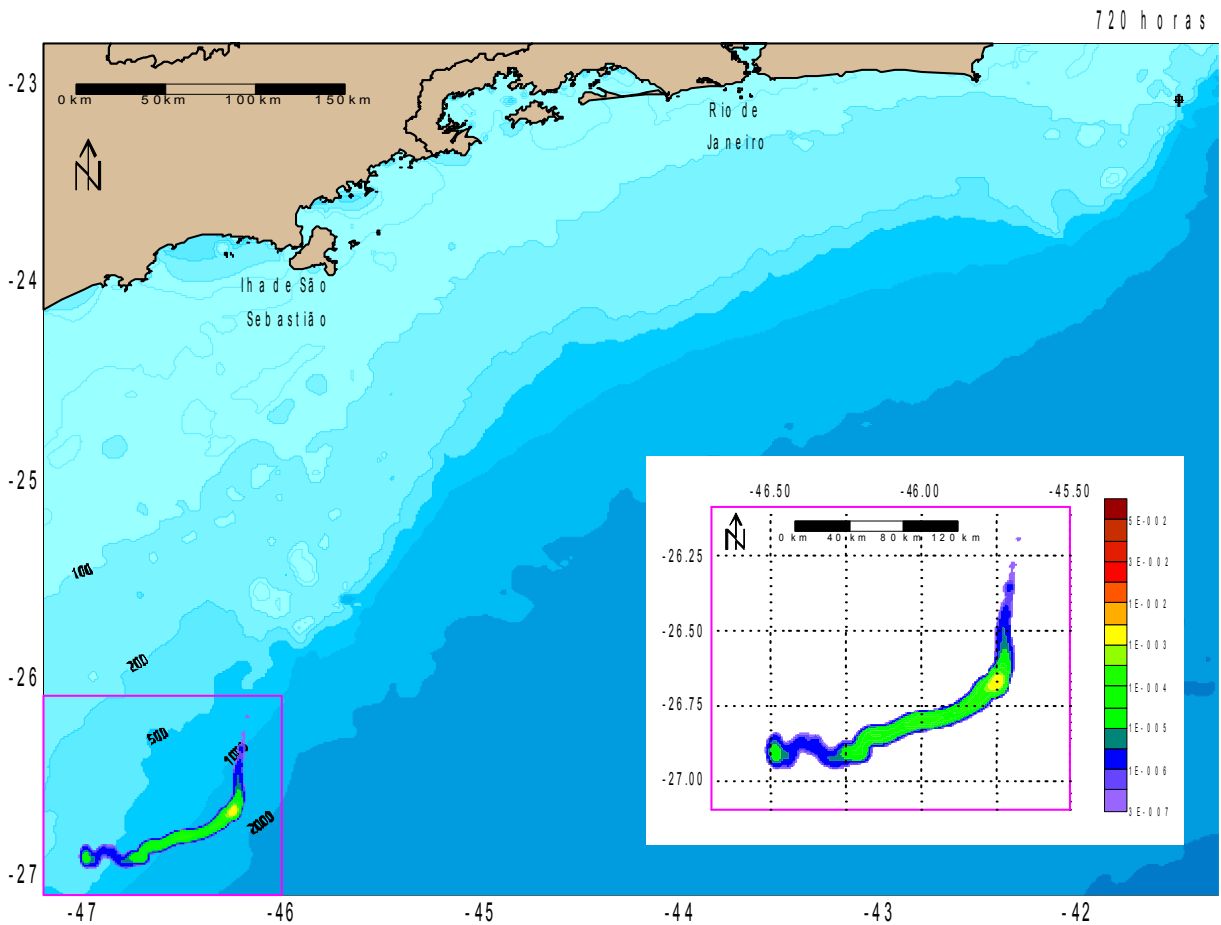


Figura 14: Resultado da simulação determinística após 720 horas de vazamento. Detalhe para a região da mancha Espessura em metros.

IV_ CONCLUSÕES

As simulações probabilísticas realizadas mostraram que no período compreendido entre maio e setembro, aqui denominado inverno, o óleo apresenta maiores probabilidades de atingir regiões mais próximas à costa, comparando-se com a simulação de verão. Este foi portanto, o período escolhido como o de pior caso.

Dentre as 265 simulações realizadas no período de inverno para compor o resultado do probabilístico, foi escolhida aquela onde o óleo atinge a costa em menor tempo como sendo o pior dos piores casos. Esta trajetória foi simulada no modelo determinístico.

O resultado do modelo determinístico mostrou que o óleo toca a costa, na região da Ilha de Cabo Frio, 144 horas após o vazamento. Ressalta-se, contudo que tal trajetória determinística ocorre com probabilidade inferior a 2% levando-se em conta as 265 trajetórias simuladas.

Após 720 de simulação ainda há óleo presente na água com espessuras maiores que 3×10^{-7} m. Esse volume de óleo continuará sofrendo a ação de corrente, ondas e ventos que podem alterar sua forma, inclusive fazendo com que a mancha seja fragmentada em várias menores.

V_ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CSANADY, G. T., 1972. Turbulent Diffusion in the Environment. Geophysics and Astrophysics Monographs, Vol.3, 247 pp., D. Reidel Publishing Company, Dordrecht: Holland.

IBAMA/ANP, 2002: Diretrizes técnicas para modelagem de derramamento de óleo no mar.

KALNAY, E, M. KANAMITSU, R. KISTLER, W. COLLINS, D. DEAVEN, L. GANDIN, M. IREDELL, S. SAHA, G. WHITE, J. WOOLLEN, Y. ZHU, M. CHELLIAH, W. EBISUZAK, W. HIGGINS, J. JANOWIAK, K.C. MO, C. ROPELEWSKI, J. WANG, A.LEETMAA, R. REYNOLDS, R. JENNE, D. JOSEPH, 1996: "The NCEP /NCAR 40-Year Reanalysis Project", Bulletin of the American Meteorological Society, 437-470.

MACKAY, D. & R. S. MATSUGU, 1973.: Evaporation rates of liquid hydrocarbon spills on land and water. Can J. Chem. Eng., 51. 434-9.

MACKAY, D., I. BUIST, R. MASCARENHAS & S. PATERSON, 1980.: Oil Spill Processes and Models. Environmental Protection Service. Canada. Report EE-8.

REED, M., 1989.: The Physical Fates Component of The Natural Resource Damage Assesment Model System. Oil & Chemical Pollution. Elsevier Science Publishers Ltd. England.

ROSMAN, P. C. C., 1997: Subsídios para Modelagem de Sistemas Estuarinos. Métodos Numéricos em Recursos Hídricos. Cap. 3. A.B.R.H./COPPETEC. 231-248.