

## **II.6.1 - MODELAGEM DA DISPERSÃO DE ÓLEO E EFLUENTES**

### **II.6.1.1 - MODELAGEM DA DISPERSÃO DE ÓLEO**

#### **II.6.1.1.1 - Introdução**

O presente item descreve os resultados obtidos na modelagem numérica do transporte de óleo no mar para um cenário acidental de vazamento durante a Produção de Petróleo no Bloco BM-S-40, Áreas de Tiro e Sidon, Bacia de Santos, costa sul do litoral brasileiro. O local de vazamento é o poço de Tiro, TP2, de coordenada geográfica 26°27' 16,65" S e 46°34' 3 ,62" W.

Para contextualizar a questão, a metodologia aplicada para a realização das simulações, os modelos numéricos e os dados físicos usados serão também descritos.

#### **II.6.1.1.2 - Metodologia**

##### **II.6.1.1.2.1 - Modelo de Transporte e Dispersão de Poluentes**

As simulações numéricas apresentadas nesse estudo foram feitas com o STROLL, modelo desenvolvido pela PROOCEANO para estudos de 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 a 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 sob a influência de uma extensa combinação de cenários ambientais e determinar a probabilidade de presença e o tempo mínimo de chegada do mesmo em cada região do domínio do modelo.

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

### II.6.1.1.2.1.1 - Modo Determinístico

A emissão de óleo no mar é representada pela inserção de um número de elementos  $n_e$  a cada intervalo de tempo  $\Delta t$  na região fonte. Considerando uma vazão  $Q$  m<sup>3</sup>/s, o volume inicialmente associado a cada elemento será:

$$q_{e,t=0} = \frac{Q\Delta t}{n_e} \quad 1$$

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:

$$p_{e,t+1} = p_{e,t} + \Delta t \frac{dp_e}{dt} + \frac{\Delta t^2}{2} \frac{d^2 p_e}{dt^2} \quad 2$$

Onde:

$$\frac{dp_{i,e}}{dt} = \bar{u}_i \quad \text{é a velocidade e} \quad 3$$

$$\frac{d^2 p_{i,e}}{dt^2} = \frac{d\bar{u}_i}{dt} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad \text{a aceleração} \quad 4$$

Para  $i = 1, 2$ . A velocidade  $\bar{u}_i$  (u e v) é obtida através de interpolação bi-linear no espaço e linear no tempo, dos dados fornecidos pelo modelo hidrodinâmico e pelo campo de vento, cuja contribuição, nesse caso, é de 1,5% de sua intensidade.

A aceleração é obtida através da derivação no tempo dos valores de velocidade interpolados. Os valores de velocidade utilizados são fornecidos por um modelo hidrodinâmico externo.

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).

### II.6.1.1.2.1.1.1 - Intemperismo

O STROLL simula os principais processos de intemperismo que ocorrem no óleo quando este é derramado no mar: espalhamento, evaporação, emulsificação e dispersão, e as consequentes mudanças nas propriedades físicas, como a densidade e a viscosidade.

#### Viscosidade e Densidade do Contaminante

A variação temporal da densidade do óleo ( $\rho_o(t)$ ) é calculada de forma indireta, em função do conteúdo de água ( $Wc$ ) presente na mistura e da fração de óleo evaporada ( $frac_{evap}$ ), que são calculadas a cada passo de tempo do modelo, segundo a formulação apresentada à seguir:

$$\rho_o(t) = Wc * \rho_{\acute{a}gua} + (1 - Wc) \rho_0 \left[ 1 - c_1 (T - T_{\acute{a}gua}) (1 - c_2 frac_{evap}) \right] \quad 5$$

Onde:

$\rho_o$  é a densidade do óleo,

$\rho_0$  é a densidade inicial do óleo,

$\rho_{\acute{a}gua}$  a densidade da água,

$T$  a temperatura do óleo

$T_{\acute{a}gua}$  a temperatura da água

$frac_{evap}$  a fração de óleo evaporada

$c_1$  e  $c_2$  as constantes empíricas específicas para cada tipo de óleo.

A viscosidade do constituinte  $\mu$  varia ao longo de sua trajetória, sendo parametrizada por Mackay et al. (1983) apud Lehr *et al* (2002).

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp \left[ \left( C_{evap} frac_{evap} \right) + \frac{C_{emul1} Wc}{1 - C_{emul2}} + C_{temp} \left( \frac{T_{\acute{a}gua} - T}{T_{\acute{a}gua} T} \right) \right] \quad 6$$

Onde:

$\mu_0$  é a viscosidade inicial do constituinte;

$C_{evap}$  é a constante de evaporação e igual a 5000 K (NOAA, 2000);

$C_{temp}$  uma constante empírica adimensional que depende do tipo de óleo, podendo variar entre 1 e 10. Para as constantes adimensionais  $C_{emul1}$  e  $C_{emul2}$ , NOAA (2000) sugere-se valores de 2,5 e 0,65, respectivamente.

## Espalhamento

Admitindo que a fase inicial do espalhamento (gravitacional-inercial) de uma mancha de óleo é muito curta, o STROLL parte da fase gravitacional-viscosa para calcular o espalhamento, assumindo que quando a espessura da mancha decresce até um determinado valor, o espalhamento termina. Assim o raio  $R_0$  da área inicial é calculado por:

$$R_0 = \frac{K_2^2}{K_1} \left( \frac{V_0^5 g \Delta}{\mu_{\text{água}}} \right)^{\frac{1}{12}} \quad 7$$

onde  $K_1$  e  $K_2$ , recomendado por Flores *et al* (1999) *apud* Soto (2004), são iguais a 0,57 e 0,725, respectivamente,  $V_0$  o volume inicial do óleo derramado,  $\mu_{\text{água}}$  a viscosidade da água e  $\Delta$  a diferença relativa de densidade da água e do óleo:

$$\Delta = \frac{\rho_{\text{água}} - \rho_{\text{óleo}}}{\rho_{\text{óleo}}} \quad 8$$

## Evaporação

O STROLL utiliza o modelo de evaporação proposto por Jones (1997), o qual se baseia na relação de Mackay & Matsugu (1973), porém considerando o óleo como sendo uma mistura de componentes. Essa abordagem é também conhecida como modelo de Pseudo-Componentes, onde a taxa de evaporação pode ser obtida por:

$$\frac{dV_j}{dt} = \frac{K_j A \bar{V}_j \chi_j P_j}{R T} \quad 9$$

Onde:

$j$  varia de acordo com o número de pseudo-componentes,

$K_j$  é o coeficiente de transferência de massa do pseudo-componente;

$A$  é a área da mancha;

$\bar{V}_j$  é o volume molar do pseudo-componente;

$\chi_j$  é a fração molar do componente;

$P_j$  é a pressão de vapor do pseudo-componente;

$R$  é a constante universal dos gases;

$T$  é a temperatura.

A fração molar de cada pseudo-componente muda com o tempo e é constituída pela razão entre o número de moles do pseudo-componente, que é obtido dividindo-se o seu volume por seu volume molar, e a soma do número de moles total da mistura.

O volume molar de cada pseudo-componente é obtido através de uma correlação de dados de pontos de ebulição e volumes molares de uma série de alcanos com números de carbonos variando entre 3 e 20 (C3 e C20), expressa por:

$$\bar{V}_j = 7 \times 10^{-5} - (2,102 \times 10^{-7} BP_j) + [1 \times 10^{-9} (BP_j)^2] \quad 10$$

onde  $BP_j$  é o ponto de ebulição de cada componente.

A pressão de vapor de cada pseudo-componente na temperatura ambiente é obtida através de seus pontos de ebulição, utilizando-se a Equação de Antoine, segundo Lyman *et al.* (1990) *apud* Jones (1997):

$$\ln \frac{P_j}{P^0} = \frac{\Delta S_j \cdot (BP_j - C)^2}{R \cdot BP_j} \cdot \left[ \frac{1}{BP_j - C} - \frac{1}{T - C} \right] \quad 11$$

Onde:

$P^0$  é a pressão atmosférica;

$\Delta S_i = 8,75 + 1,987 \log(BP_i)$ , é a variação na entropia do componente oriunda da vaporização;

$C = (0,19 \cdot BP_i) - 18$  é uma constante determinada a partir do ponto de ebulição do pseudo-componente.

O coeficiente de transferência de massa é calculado segundo Mackay & Matsugu (Mackay *et al.*, 1973):

$$K_i = 0,048 \cdot U^{7/9} \cdot Z^{-1/9} \cdot Sc_j^{-2/3} \quad 12$$

Onde:

$U$  é a velocidade do vento;

$Z$  é o comprimento da mancha na direção do vento;

$Sc$  é o número de Schmidt do pseudo-componente.

O número de Schmidt expressa a razão entre a viscosidade cinemática do ar com a difusividade molecular do pseudo-componente.

Para obter-se a difusividade molecular do pseudo-componente usa-se a seguinte aproximação, segundo (Thibodeaux, 1979 apud Jones, 1997):

$$D_j = D_{\text{água}} \sqrt{\frac{MW_{\text{água}}}{MW_j}} \quad 13$$

Onde:

$D_{\text{água}}$  é a difusividade molecular da água;

$MW_{\text{água}}$  é o peso molecular da água.

O peso molecular de cada pseudo-componente é calculado através de uma correlação também obtida de uma série de alcanos C3 a C20:

$$MW_j = 0,04132 - \left( 1,985 \cdot 10^{-4} \cdot BP_j \right) + \left[ 9,494 \cdot 10^{-7} \cdot (BP_j)^2 \right] \quad 14$$

Reescrevendo a equação em termos de volume e volume molar, as taxas de evaporação de cada pseudo-componente pode ser obtida por:

$$\frac{dV_j}{dt} = - \frac{A \cdot K_j \cdot P_j \cdot V_j}{R \cdot T \cdot \sum_{k=1}^{nc} \frac{V_j}{V_k}} \quad 15$$

## Emulsificação

A incorporação de água no óleo é descrita no modelo por uma equação proposta por Mackay *et al* (1980):

$$\frac{dfrac_{wv}}{dt} = K_w (1 + W)^2 \left( 1 - \frac{frac_{wv}}{frac_{wv}^{final}} \right) \quad 16$$

em que  $frac_{wv}$  é a fração volumétrica de água incorporada na emulsão,  $frac_{wv}^{final}$  é a fração final de água incorporada e  $K_w$  uma constante empírica e igual a  $1,6 \times 10^{-6}$ .

## Dispersão

A formulação utilizada para o cálculo do entranhamento no STROLL é baseada no modelo desenvolvido por Delvigne & Sweeney (1988) a partir de estudos sobre o entranhamento ou dispersão superficial e subsuperficial de óleo, realizados em laboratório.

Nesse modelo, a taxa de entranhamento por unidade de área é expressa por:

$$Q(d_0) = C_0 \cdot D_{ba}^{0,57} \cdot S_{cov} \cdot F_{wc} \cdot d_0^{0,7} \cdot \Delta d \quad 17$$

Onde:

$Q(d_0)$  é a taxa de entranhamento por unidade de área no intervalo  $\Delta d$  de diâmetros de gotículas de óleo em torno de  $d_0$ ,  $\left( d_0 - \frac{1}{2} \Delta d \text{ a } d_0 + \frac{1}{2} \Delta d \right)$ ;

$d_0$  é o diâmetro da gotícula de óleo;

$C_0$  é uma constante de dispersão, relacionada a viscosidade do óleo;

$D_{ba}$  é a energia de dissipação por ondas;

$S_{cov}$  é o fator de cobertura da superfície do mar por óleo ( $0 \leq S_{cov} \leq 1$ ), sendo

$S_{cov} = 1$  para manchas contínuas;  $F_{wc}$  é a fração da superfície do mar suscetível a quebra de ondas (encapelamento) por unidade de tempo.

A energia de dissipação por ondas por unidade de área é calculada por:

$$D_{ba} = 0,0034 \cdot \rho_w \cdot g \left[ \frac{HS}{\sqrt{2}} \right]^2 \quad 18$$

Onde  $HS$  é a altura significativa de ondas, podendo ser calculada por:

$$HS = \frac{0,243 \cdot U^2}{g}, \text{ sendo } U \text{ a velocidade do vento; } \rho_w \text{ é a densidade da água; e } g \text{ a aceleração da gravidade.}$$

Para estimar a fração da superfície do mar suscetível ao encapelamento, o modelo utiliza a formulação proposta por Monahan (1971), Ding & Farmer (1994) *apud* Lehr & Simecek-Beatty (2000) e Lehr & Simecek-Beatty (2000), sendo:

$$F_{wc} = \frac{0,025 \cdot (U - 3)}{T_M} \rightarrow 0 \leq U \leq 4; \quad 19$$

$$F_{wc} = \frac{0,01 \cdot U + 0,01}{T_M} \rightarrow U > 4,$$

onde  $T_M$  é a constante de tempo de Monahan (1971), sendo  $T_M = 3,85$  para água do mar.

Segundo Lehr & Simecek-Beatty (2000), variações nos diâmetros das gotículas de óleo acarretam em diferentes flutuabilidades para as mesmas, causando estratificação na concentração de óleo na coluna de água. Ainda segundo esses autores, a partir 50 a 100  $\mu$  de diâmetro, as partículas apresentam flutuabilidade neutra, sendo o movimento dominado pela dispersão horizontal e vertical sobre os efeitos de flutuabilidade.

O intervalo de diâmetro das gotículas de óleo utilizado no STROLL, assim como o modelo ADIOS2 (Lehr et al., 2002) varia entre  $d_{\min} = 0\mu$  a  $d_{\max} = 70\mu$ .

A constante de dispersão  $C_0$ , segundo Delvigne & Hulsén (1994) pode ser obtida através da seguinte relação:

$$C_0 = 1827 \cdot \nu^{-0,0658} \rightarrow \nu < 125 \text{ cSt}; \quad 20$$

$$C_0 = 1827 \cdot \nu^{-1,1951} \rightarrow \nu > 125 \text{ cSt};$$

onde  $\nu$  é a viscosidade do óleo.

Integrando a taxa de entranhamento por unidade de área no intervalo  $\Delta d$  de diâmetros de gotículas de óleo ( $Q(d_0)$ ) no intervalo de gotículas  $d_{\min}$  a  $d_{\max}$ , obtêm-se:



$$Q = \frac{d_{\max}}{1,7} \cdot C_0 \cdot D_{ba}^{0,57} \cdot F_{wc} \cdot S_{cov} \quad 21$$

Sendo  $Q$  é a taxa de entranhamento total, por unidade de área.

Para estimar a penetração máxima do óleo na coluna de água o modelo utiliza a equação proposta por Delvigne & Sweeney (1988):

$$Z_i = (1,5 \pm 0,35) \cdot H_b \quad 22$$

onde  $H_b$  é a altura de quebra da onda.

#### II.6.1.1.2.1.1.2 - Cálculo da Espessura

A espessura do óleo associada a cada elemento é dada por:

$$esp_e(x, y, t) = \frac{q_e}{2\pi[\sigma(t)]^2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{x - p_{x,e}(t)}{\sigma(t)} \right)^2 + \left( \frac{y - p_{y,e}(t)}{\sigma(t)} \right)^2 \right] \right\} \quad 23$$

Onde:

$q_e$  é volume de cada elemento;

$x$  e  $y$  as coordenadas do ponto de grade;

$p_{x,e}$  e  $p_{y,e}$  a posição do centro de massa de cada elemento;

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

$$D = \frac{1}{2} \frac{d\sigma^2(t)}{dt} \quad 24$$

sendo  $D$  a difusividade turbulenta isotrópica horizontalmente, parametrizada à partir do escoamento, obtido do modelo hidrodinâmico, segundo a formulação de Smagorinsky:

$$D = C \Delta x \Delta y \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad 25$$

Onde:

$\Delta x$  e  $\Delta y$  são os intervalos de discretização da grade;

$C$  é a constante de Smagorinsky, cujos valores para o oceano variam da ordem de 0,1 a 0,2 (Oey et al., 1985a e b).

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

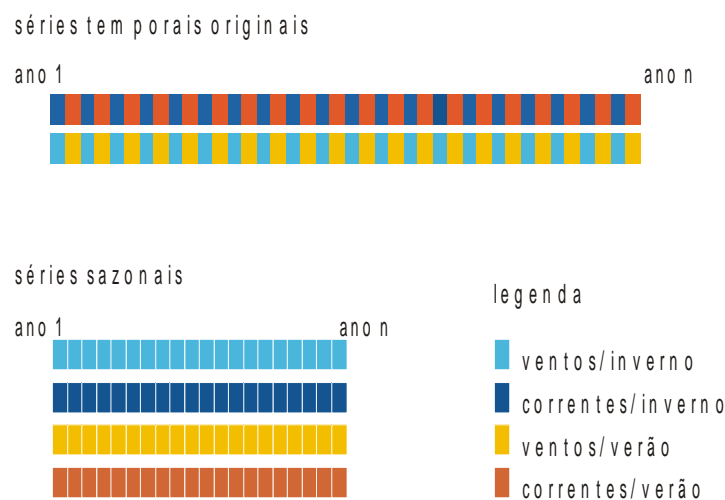
$$ESP(x, y, t) = \sum_{e=1}^{n_e} esp_e(x, y, t) \quad 26$$

### II.6.1.1.2.1.2 - 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 meteo-oceanográfica locais, as séries temporais de vento e corrente são repartidas em 4 séries sazonais – correntes-verão, correntes-inverno, ventos-verão, ventos-inverno – conforme apresentado no esquema da

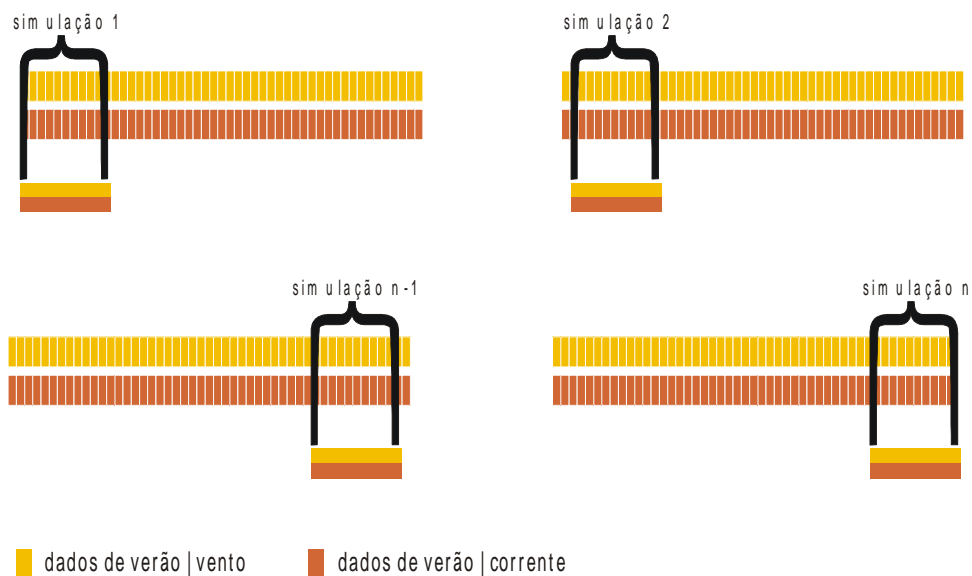
Figura II.6.1.1-1.



**Figura II.6.1.1-1 - 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 de forma ideal os possíveis cenários ambientais (Figura II.6.1.1-2).

exemplo: probabilístico de verão



**Figura II.6.1.1-2** - Representação esquemática da combinação dos dados de vento e corrente para a simulação probabilística.

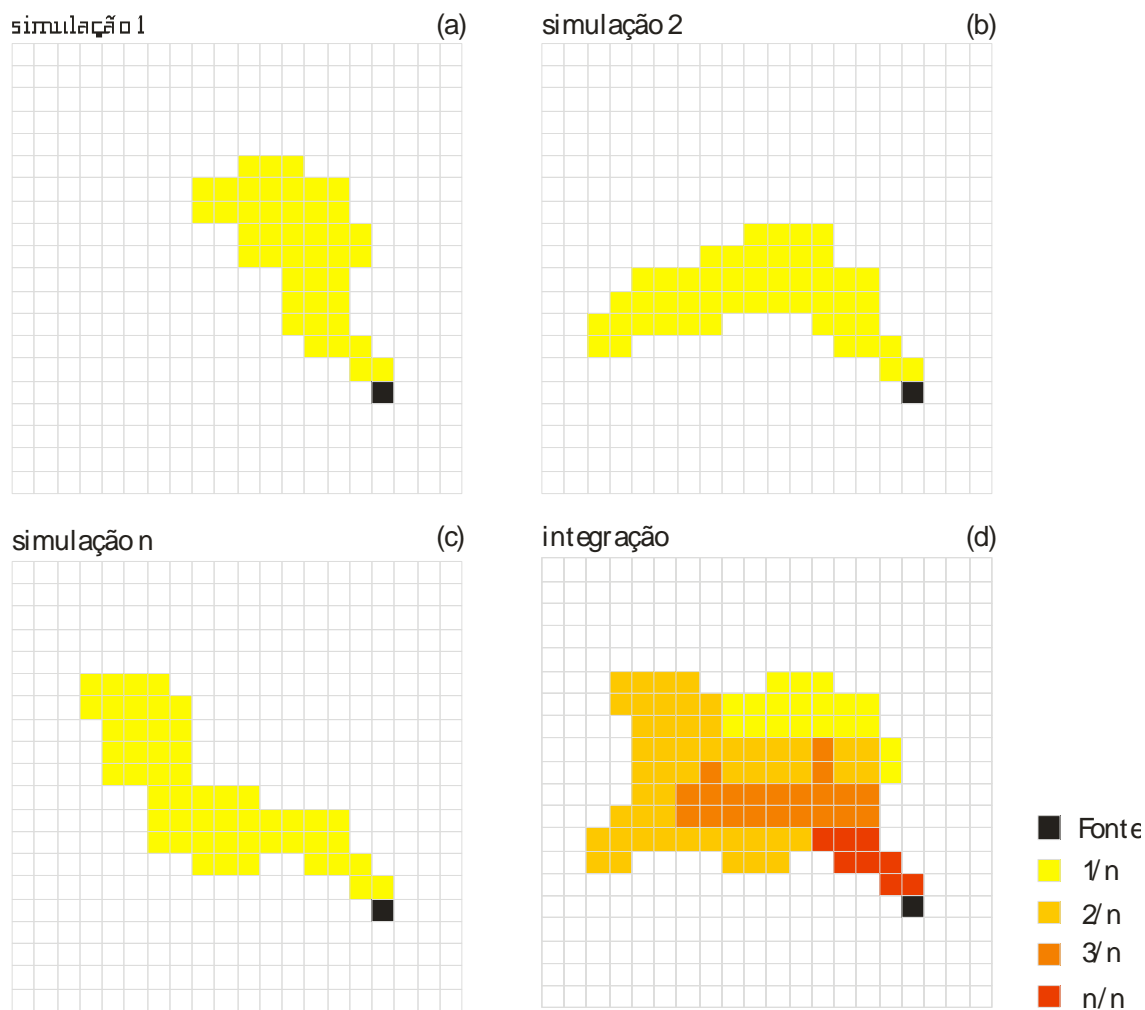
Cada combinação de vento e corrente irá determinar um comportamento para o vazamento. O modelo identifica, em cada combinação, os pontos de grade onde a espessura da mancha do constituinte esteve acima do limiar determinado (Figura II.6.1.1-3, b e c):

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

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

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 II.6.1.1-3 d):

$$P(x,y) = \sum_{i_{sim}=1}^{n_{comp}} \left( \frac{I(x,y)}{n_{com}} \right) \quad 27$$



**Figura II.6.1.1-3** - Representação esquemática do cálculo da probabilidade de presença de constituinte no STROLL.

Além da probabilidade de presença do constituinte, o módulo probabilístico do STROLL fornece também os tempos de chegada da mancha em cada ponto de grade do domínio, em cada simulação.

### II.6.1.1.3 - Características da Simulação

As simulações foram realizadas considerando eventos de *blow-out* (Tabela II.6.1.1-1), com vazamento contínuo por 30 dias (720 horas) em 2 (dois) cenários sazonais, verão e inverno. Após a disponibilização do óleo na água, o

comportamento de sua deriva foi acompanhado por 30 dias. Portanto ao final das simulações foram totalizados 60 dias (1440 horas).

Além da simulação de *blow-out*, na qual é considerado o volume de pior caso, 116.076 m<sup>3</sup>, foram ainda realizadas simulações para vazamentos instantâneos de pequeno e médio porte, 8 m<sup>3</sup> e 200 m<sup>3</sup>, respectivamente. Nesses casos as simulações duraram 30 dias (720 horas).

Para todos os casos simulados a deriva do óleo foi acompanhada por 30 dias nos vazamentos instantâneos e 60 dias para *blow-out*, independente da espessura do óleo, ou seja, mesmo que todo óleo tenha ficado abaixo do limiar de detecção em algum momento da simulação.

Em todas as simulações considerou-se como critério de existência de óleo espessuras maiores ou iguais ao limiar de 3 x 10<sup>-7</sup> metros (limiar de detecção) (ELPN/IBAMA, 2002) e o critério de parada utilizado nas simulações está de acordo com a Nota Técnica Nº 02/2009/CGPEG/DILIC.

**Tabela II.6.1.1-1 - Volume de óleo e tipo de vazamento.**

Local	Volume de óleo (m <sup>3</sup> )	Tipo de Vazamento
Poço de Tiro (TP2)	116.076	<i>blowout</i>

Fonte: Petrobras.

A seguir, na Tabela II.6.1.1-2 e Tabela II.6.1.1-3, serão apresentadas as características do óleo e o local do vazamento.

**Tabela II.6.1.1-2 - Características do óleo utilizadas nas simulações.**

	Parâmetro	Valor	Unidade	Temperatura
Poço Tiro (TP2)	API	34,3	-	-
	Densidade relativa	0,8496	-	20/4 °C
	Viscosidade Cinemática	11,78	cSt	20°C
	Tensão Interfacial óleo / água salgada	8,5	mN/m	21,1°C
	Destilação	50	%vol	324°C
	Teor Máximo de Água	0,02	%vol	

Fonte: Petrobras.

**Tabela II.6.1.1-3 - Localização do Vazamento.**

Poço de Tiro (TP2)	Longitude	46° 34' 3,62" W
	Latitude	26° 27' 16,65" S

Fonte: Petrobras.

Na Tabela II.6.1.1-4 é apresentado um resumo das simulações conduzidas no estudo.

**Tabela II.6.1.1-4 - Resumo das simulações conduzidas no estudo.**

Modelo	Produto	Volume (m <sup>3</sup> )	Cenário	Vazamento	Tempo simulado
<b>Probabilístico</b>					
Pequeno porte	óleo	8	verão	instantâneo	30 dias
Pequeno porte	óleo	8	inverno	instantâneo	30 dias
Médio porte	óleo	200	verão	Instantâneo	30 dias
Médio porte	óleo	200	inverno	Instantâneo	30 dias
Pior caso	óleo	116.076	verão	contínuo	60 dias
Pior caso	óleo	116.076	inverno	contínuo	60 dias
<b>Determinístico</b>					
Condição Meteo-oceanográfica frequente	óleo	116.076	verão	contínuo	60 dias
Condição Meteo-oceanográfica frequente	óleo	116.076	inverno	contínuo	60 dias

A seguir serão apresentados os forçantes utilizados durante a simulação probabilística.

#### **II.6.1.1.4 - Forçantes**

Os dados de vento utilizados são provenientes das reanálises do NCEP – *National Centers for Environmental Prediction* – (Kalnay *et al.*, 1996). Essa base consiste em uma série de dados meteorológicos, com aproximadamente 1,8° de resolução espacial cobrindo todo o globo e disponível gratuitamente na internet (<http://www.ncep.noaa.gov>).

Para este estudo foram tratados 30 anos de dados compreendidos entre janeiro de 1977 a dezembro de 2006 com uma resolução temporal de 6 horas (4 dados por dia).

A seguir, são apresentadas as rosas dos ventos, para o período analisado, na região do poço de Tiro (Figura II.6.1.1-4 e Figura II.6.1.1-5).

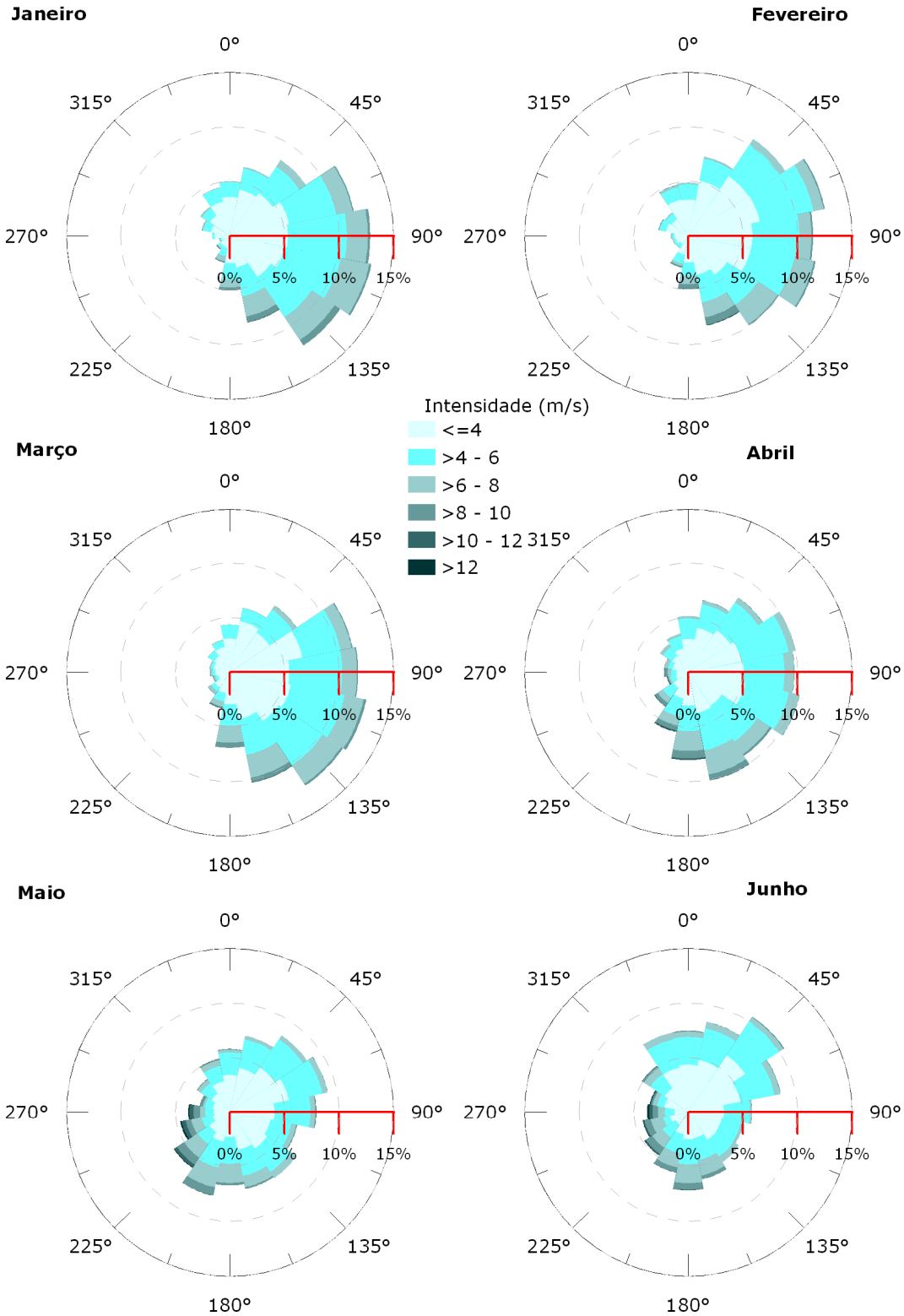
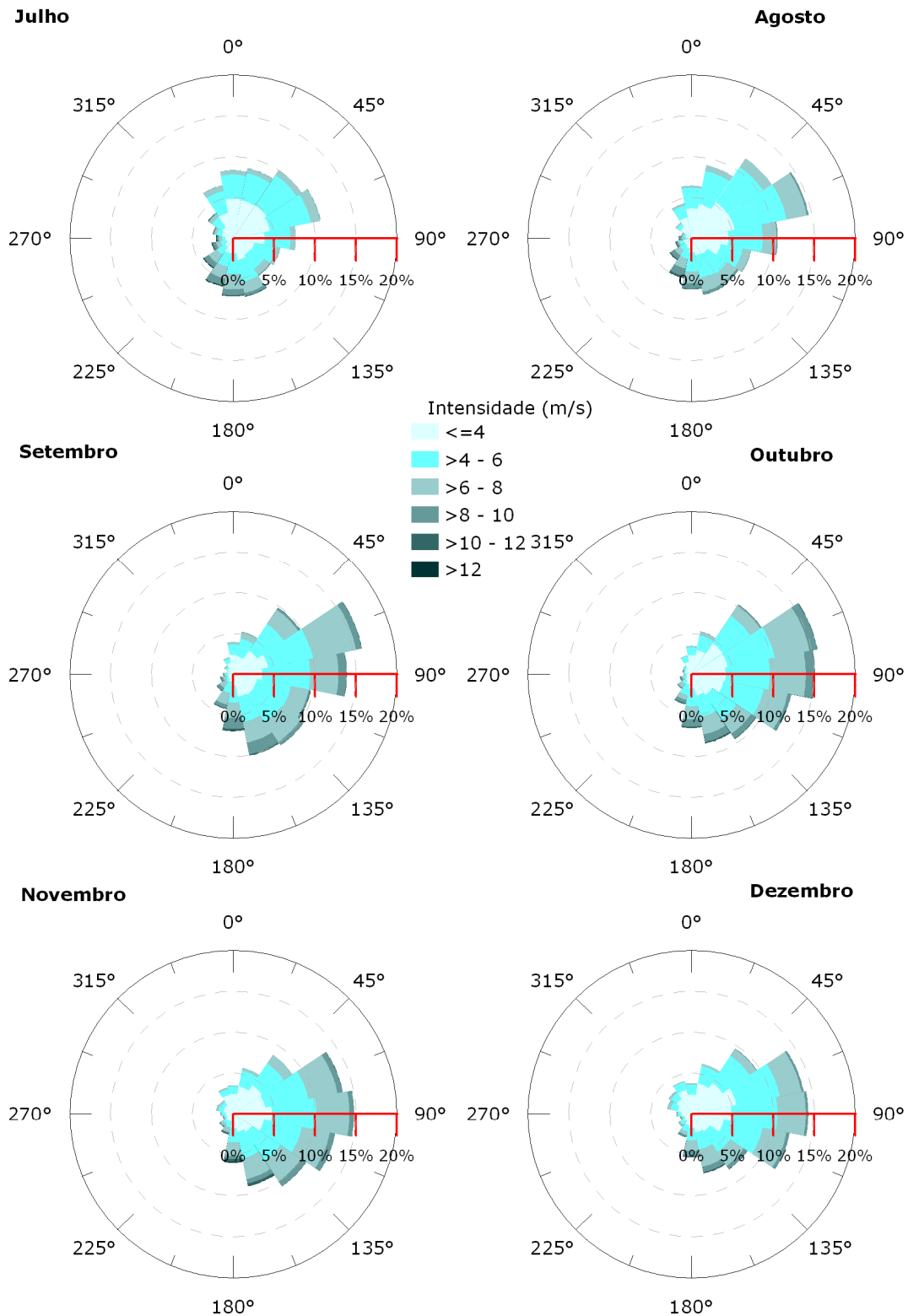


Figura II.6.1.1-4 - Rosa dos ventos de janeiro a junho na região do poço de Tiro. Fonte: NCEP.





**Figura II.6.1.1-5** - Rosa dos ventos de julho a dezembro na região do poço de Tiro.  
Fonte: NCEP.

A análise dos histogramas possibilitou a caracterização de dois períodos com características distintas dentro do ano.

O período de verão, que compreende os meses de outubro a março é caracterizado pela maior frequência de ventos de nordeste e leste. Também foi registrada a ocorrência de ventos de sudoeste e sudeste, estes em menor frequência.

No período de abril a setembro, caracterizado por condições típicas de inverno, também existe a predominância dos ventos de nordeste intensos e frequentes. Porém, esses se apresentam um pouco menos intensos que os observados no período de verão. Incidência de ventos de sul, sudoeste e sudeste, também é identificada durante o período de inverno devido, principalmente, à passagens de sistemas frontais na região.

Os dados de correntes utilizados foram obtidos da base de dados da PETROBRAS. Nesse estudo foi analisada uma série temporal de 1 (um) ano de dados (1992).

### **II.6.1.1.5 - Variabilidade Ambiental**

Na implementação de um modelo probabilístico de vazamento de óleo é necessária a definição de um universo amostral que represente a variabilidade ambiental da região. No modelo de óleo STROLL, o universo amostral é criado por  $n$  repetições com condições de vento e corrente variadas, o que cria a necessidade de se definir o número de simulações que serão conduzidas na realização da modelagem. Este número deve ser suficiente para representar de forma adequada a variabilidade ambiental presente na região, obtendo um mapa de probabilidade estatisticamente coerente.

A metodologia proposta por Elliot (2004) sugere o número adequado de simulações baseado na análise do número de zeros-ascendentes (zero-up-crossing) do vento, que consiste na identificação do número de vezes que as componentes zonal ( $u$ ) e meridional ( $v$ ) do vento trocam de sinal. De forma prática, a alteração de sentido nas componentes está ligada a mudanças no

padrão sinótico do vento, como por exemplo, no período de passagem de um sistema frontal pela região. Como um dos principais fatores limitantes em modelagem é o tempo de simulação, Da Silva *et al.* (2008) avaliaram o número de simulações necessárias para a correta representação da variabilidade ambiental na porção sul da Bacia de Santos. Tendo o mapa probabilístico obtido com um número de simulações proposto pela metodologia de Elliot (2004) como o ideal, os autores avaliaram a evolução do erro médio quadrático (RMSE) entre o resultado final e resultados parciais.

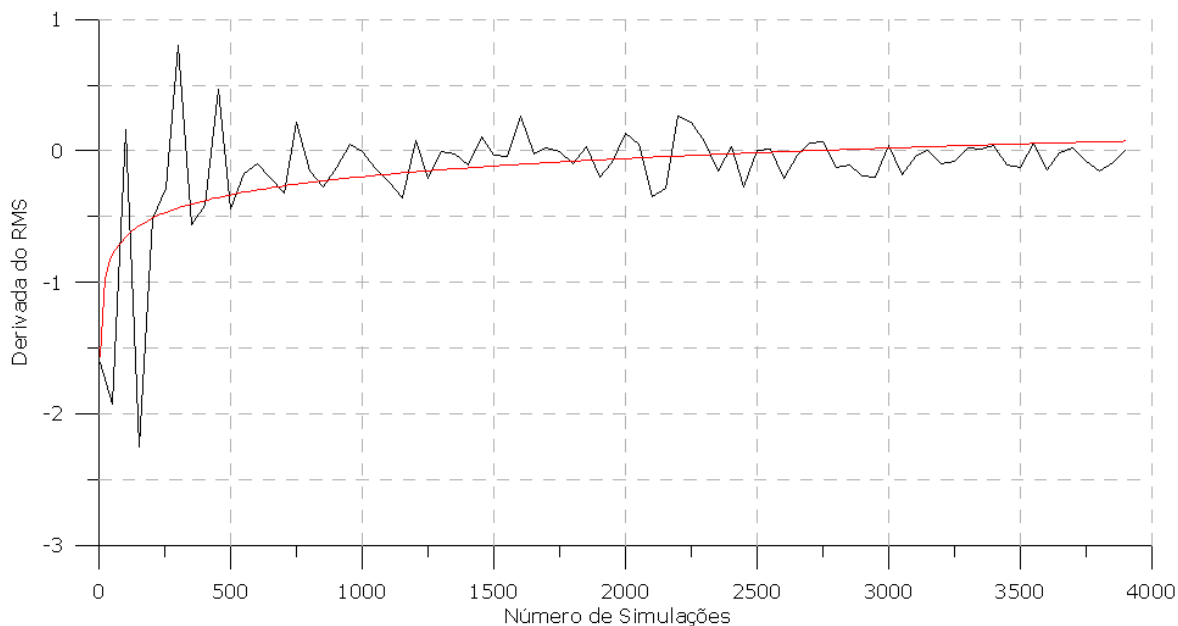
O cálculo do Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error* — RMSE) entre os resultados parciais e o final é dado pela seguinte equação:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{\eta} \sum_{i=1}^{\eta} (P_i - O_i)^2}$$

Onde:

- $P_i$  é o resultado parcial e  $O_i$  resultado final para cada ponto de grade do modelo;
- $\eta$  é o número de simulações realizadas para cada ponto de vazamento.

A derivada da evolução do erro médio quadrático é apresentada na **Erro!** **Fonte de referência não encontrada.**, onde nota-se que, por volta de 1000 simulações, o erro já se encontra próximo a zero, indicando ser este o número de simulações apropriado para a correta representação da variabilidade ambiental da região.



**Figura II.6.1.1-6** - Derivada da Curva do Erro Médio Quadrático (RMSE).

Assim, para uma correta e conservadora representação dessa variabilidade na modelagem probabilística de óleo, serão realizadas 1.000 simulações em cada cenário, verão e inverno.

### **II.6.1.1.6 - Resultados**

A seguir serão apresentados os mapas de probabilidade de presença de óleo e tempo mínimo de chegada para as simulações de vazamentos de 8, 200 m<sup>3</sup> e pior caso (116.076 m<sup>3</sup>), para os cenários de verão e inverno.

Para a obtenção destes resultados foram realizadas 1.000 diferentes simulações para cada cenário (verão e inverno), nos diferentes volumes de vazamento 8 m<sup>3</sup>, 200 m<sup>3</sup> e pior caso, totalizando 6.000 possíveis cenários ambientais de vazamento.

No modo determinístico serão apresentadas duas trajetórias que representarão a deriva do óleo nas condições meteo-oceanográficas mais frequentes da região, nos cenários sazonais de verão e inverno. Nesta condição,

em ambos os cenários sazonais, foram identificados um domínio no regime hidrodinâmico de correntes com direção S-SW, devido à presença da Corrente do Brasil. No regime de ventos, embora a incidência de sistemas frontais seja maior no período de inverno, foi identificada uma dominância de ventos de NE ao longo de todo o ano.

O modo determinístico em condições críticas não foi apresentado, pois como pode ser observado no modo probabilístico, não houve probabilidade de chegada de óleo na costa.

A Tabela II.6.1.1-5, a seguir, resume a forma como os resultados serão apresentados.

**Tabela II.6.1.1-5 – Ordem de apresentação dos resultados.**

<b>Modo Probabilístico</b>
<b>Vazamentos instantâneos (8 e 200 m<sup>3</sup>)*</b>
Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo
Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo
<b>Blow-out (116.076 m<sup>3</sup>)*</b>
Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo
Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo
<b>Modo Determinístico *</b>
Trajetória do Óleo em Condições Meteo-oceanográficas frequentes
Intemperismo do Óleo

Legenda: \* cenário de verão e inverno

## **II.6.1.1.6.1 - Modo Probabilístico**

### **II.6.1.1.6.1.1 - Vazamento de 8m<sup>3</sup>**

Foram realizadas simulações para vazamentos instantâneos de pequeno volume (8m<sup>3</sup>) para os cenários de verão e inverno. Como o vazamento, nesse caso, é instantâneo, o tempo de simulação total é de 30 dias (720 horas). A seguir são apresentados os resultados probabilísticos dessas simulações.

#### **II.6.1.1.6.1.1.1 - Verão**

O mapa de probabilidade de presença de óleo para o vazamento de 8 m<sup>3</sup> no cenário de verão é apresentado na Figura II.6.1.1-7, enquanto o tempo mínimo de chegada encontra-se na Figura II.6.1.1-8.

## STROLL - modo probabilístico

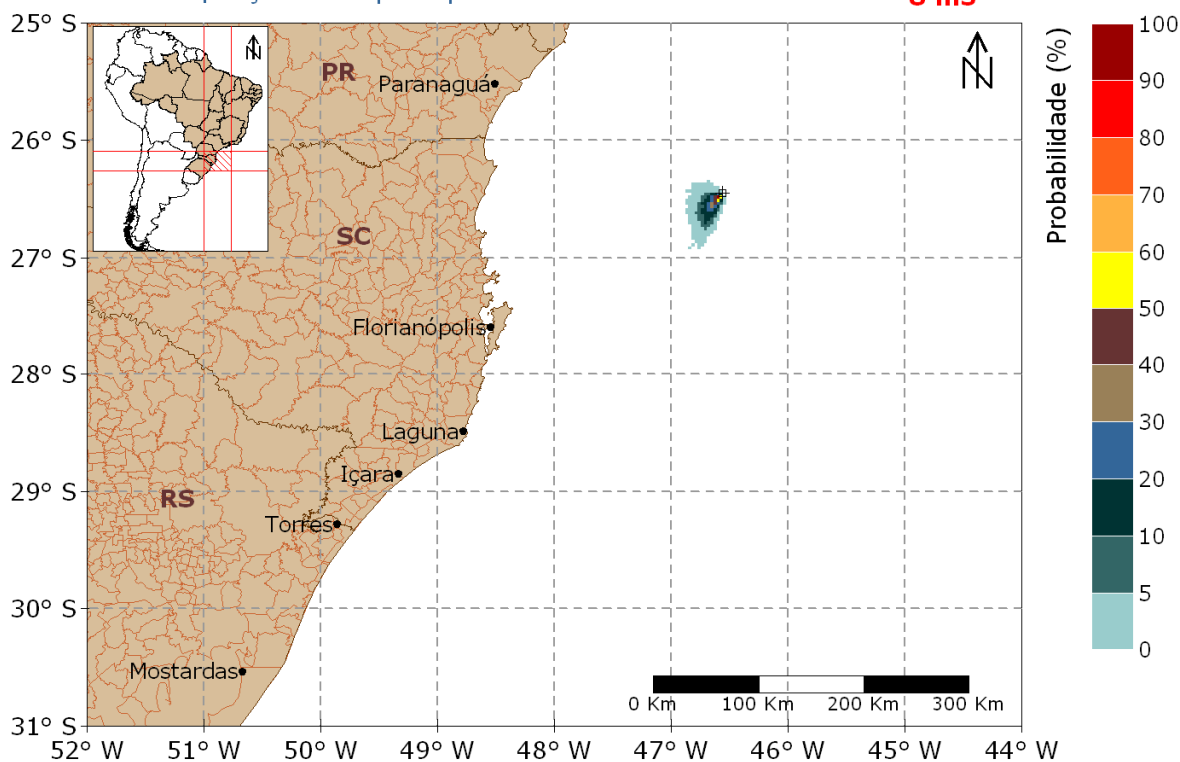


Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Simulação 30 dias | 1.000 simulações

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Verão

8 m<sup>3</sup>



**Figura II.6.1.1-7 - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de 8 m<sup>3</sup>, no cenário de verão. Simulação de 720 horas (30 dias).**

A deriva do óleo foi preferencial para oeste do local de vazamento.

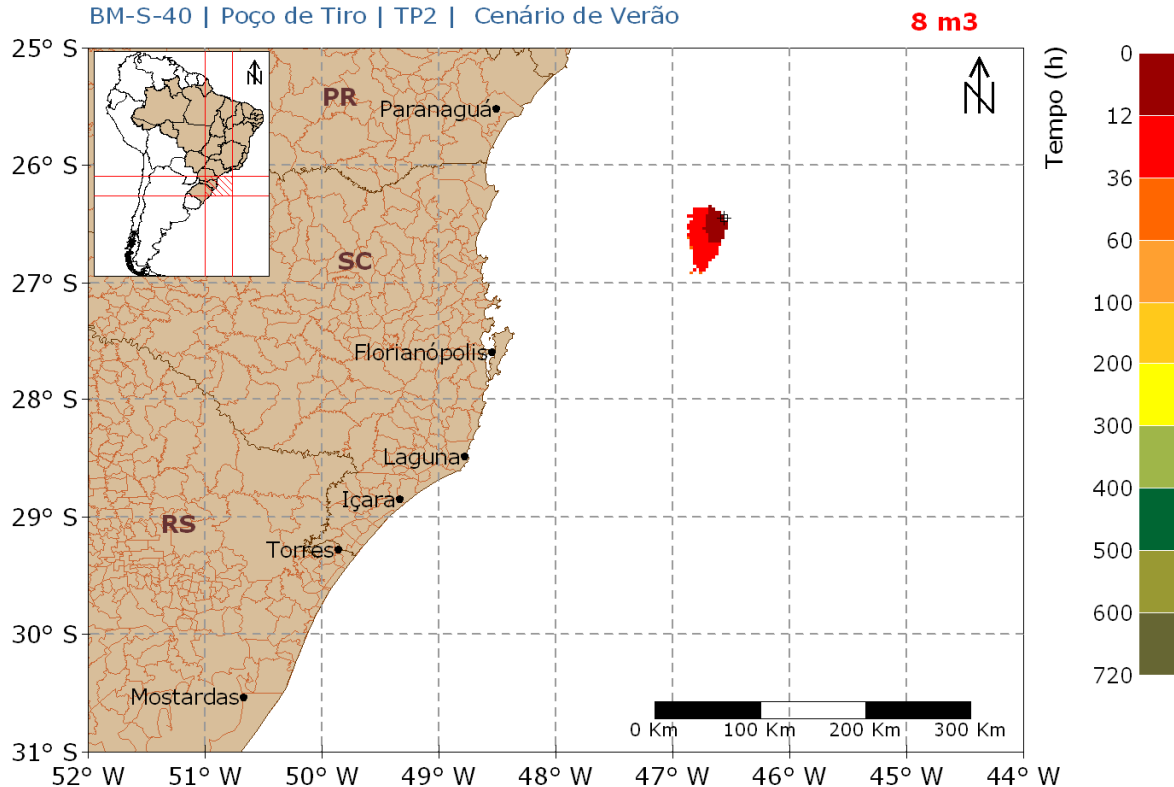
## STROLL - modo probabilístico



Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo

Simulação 30 dias | 1.000 simulações

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Verão



**Figura II.6.1.1-8** - Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo, para vazamento de 8 m<sup>3</sup>, no cenário de verão. Simulação de 720 horas (30 dias).

Observa-se que toda a região com probabilidade de presença de óleo foi atingida com o tempo mínimo de 12-36 horas após o início da simulação.

### II.6.1.1.6.1.1.2 - Inverno

Os mapas de probabilidade de presença de óleo e de tempo mínimo de chegada, para o vazamento de 8 m<sup>3</sup>, no cenário de inverno, encontram-se na Figura II.6.1.1-9 e na Figura II.6.1.1-10, respectivamente.

## STROLL - modo probabilístico

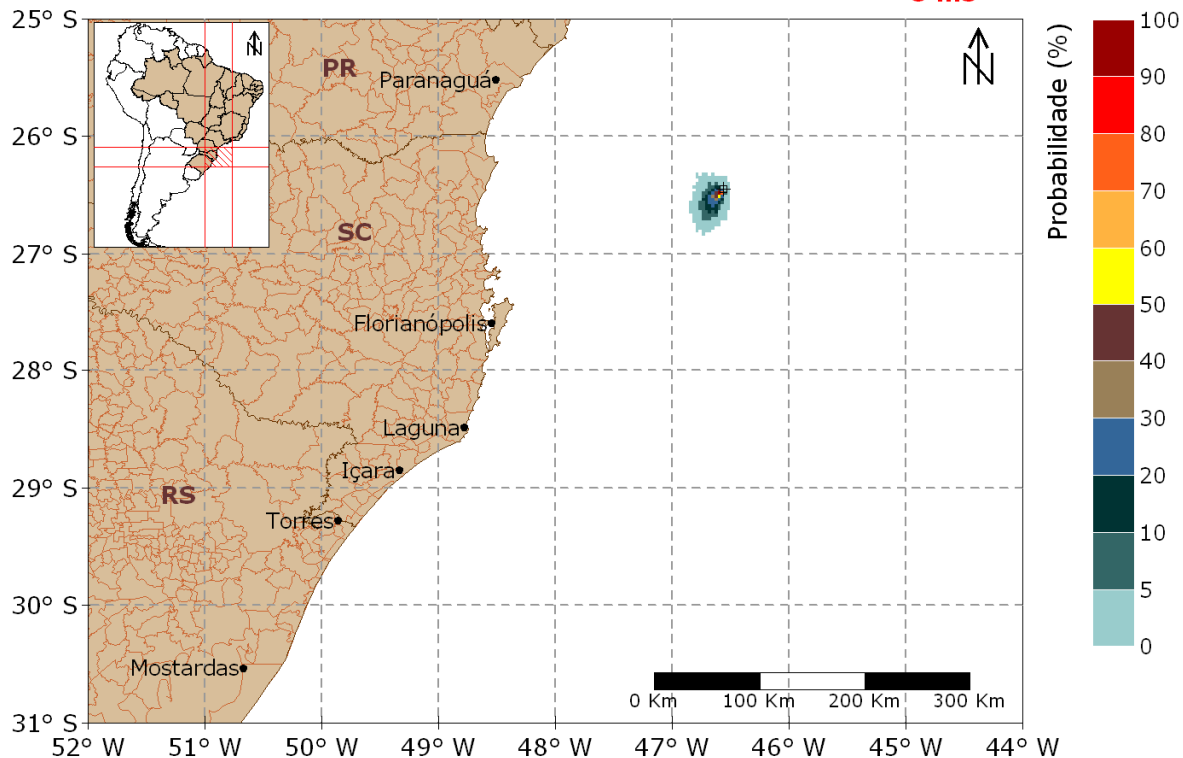


Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Simulação 30 dias | 1.000 simulações

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Inverno

8 m<sup>3</sup>



**Figura II.6.1.1-9** - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de 8 m<sup>3</sup>, no cenário de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias).

No cenário de inverno a deriva do óleo ocorreu rumo a sudoeste, preferencialmente.



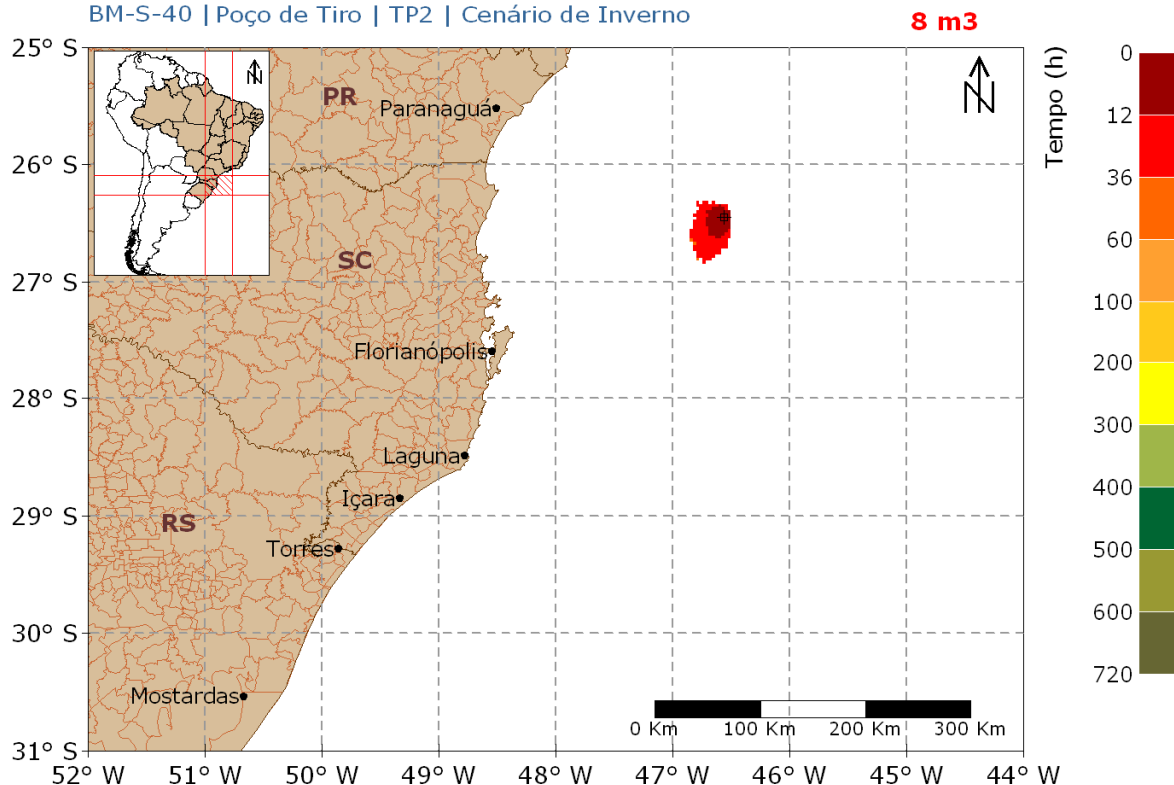
## STROLL - modo probabilístico



Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo

Simulação 30 dias | 1.000 simulações

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Inverno



**Figura II.6.1.1-10** - Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo, para vazamento de 8 m<sup>3</sup>, no cenário de inverno. Simulação de 720 horas (30 dias).

Assim como no cenário de verão, neste cenário também observa-se toda a área com probabilidade de presença do óleo sendo atingida com o tempo mínimo de 12-36 horas após o início do vazamento.

### II.6.1.1.6.1.2 - Vazamento de 200m<sup>3</sup>

As simulações para vazamentos instantâneos de médio porte (200m<sup>3</sup>) também foram realizadas para os cenários de verão e inverno e consideraram tempos de simulação total de 6 horas e de 30 dias. A seguir são apresentados os resultados probabilísticos dessas simulações.

### II.6.1.1.6.1.2.1 - Verão

O Mapa de Probabilidade de presença de óleo para o vazamento de médio porte ( $200 \text{ m}^3$ ) com tempo de simulação de 6 horas, no cenário de verão, é apresentado na Figura II.6.1.1-11.

## STROLL - modo probabilístico

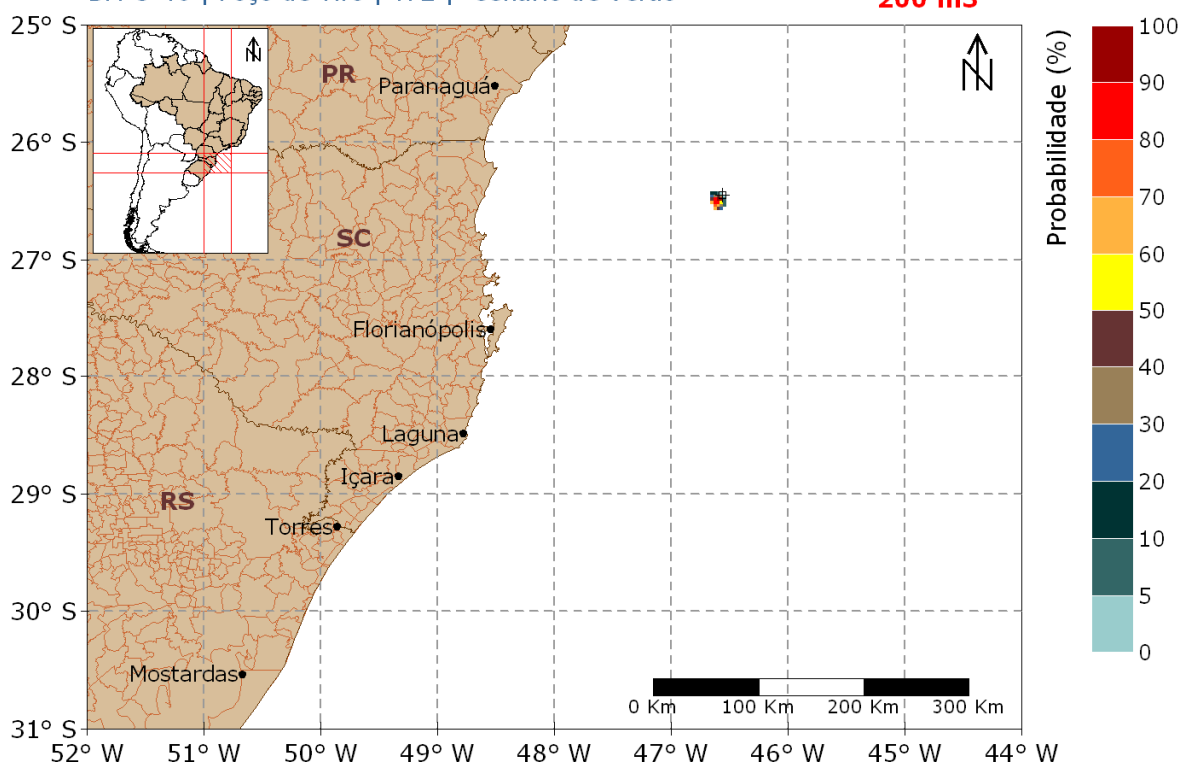


Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

6 horas após o início do vazamento

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Verão

200 m<sup>3</sup>



**Figura II.6.1.1-11** - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de  $200 \text{ m}^3$ , no cenário de verão. Simulação de 6 horas.

O Mapa de Probabilidade de presença de óleo para o vazamento de médio porte ( $200 \text{ m}^3$ ) com tempo de simulação de 30 dias, no cenário de verão, encontra-se na Figura II.6.1.1-12, e o de tempo mínimo de chegada, na Figura II.6.1.1-13.

## STROLL - modo probabilístico

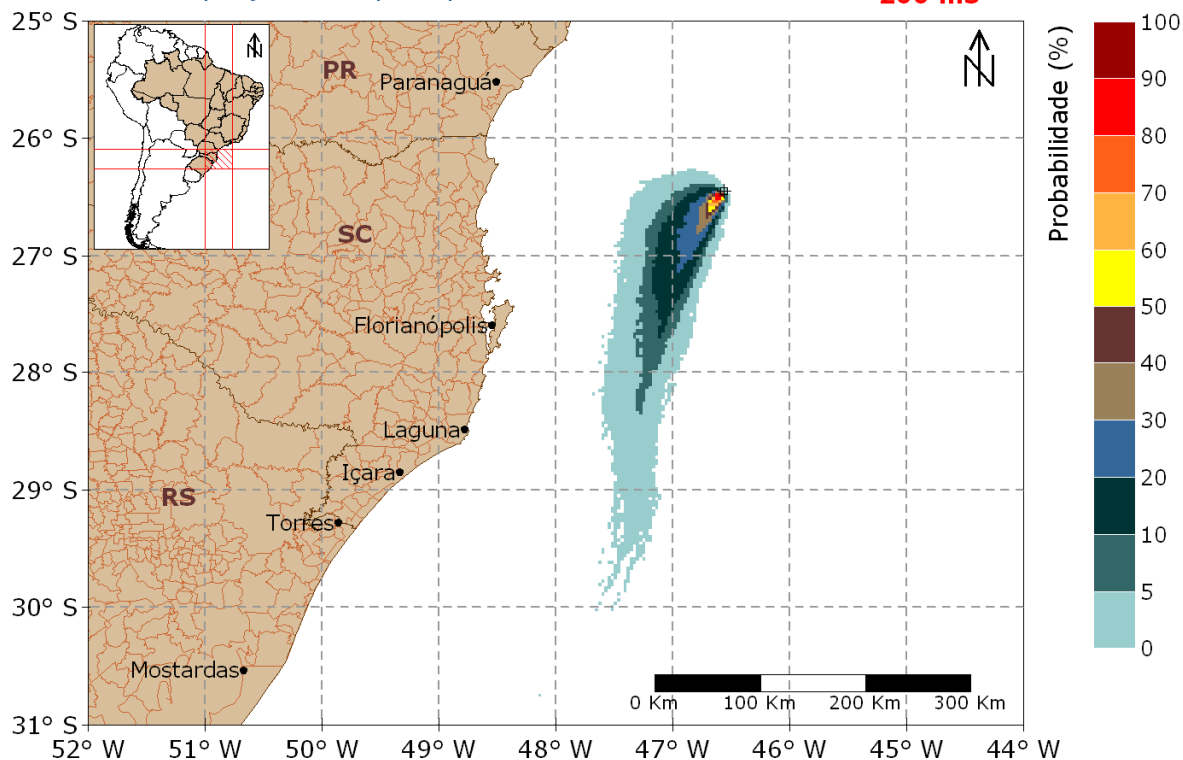


Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Simulação 30 dias | 1.000 simulações

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Verão

200 m<sup>3</sup>



**Figura II.6.1.1-12** - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de 200 m<sup>3</sup>, no cenário de verão. Simulação de 720 horas.

Pode-se observar que a deriva do óleo foi preferencial para sudoeste do poço e não houve probabilidade do óleo chegar à costa.

## STROLL - modo probabilístico

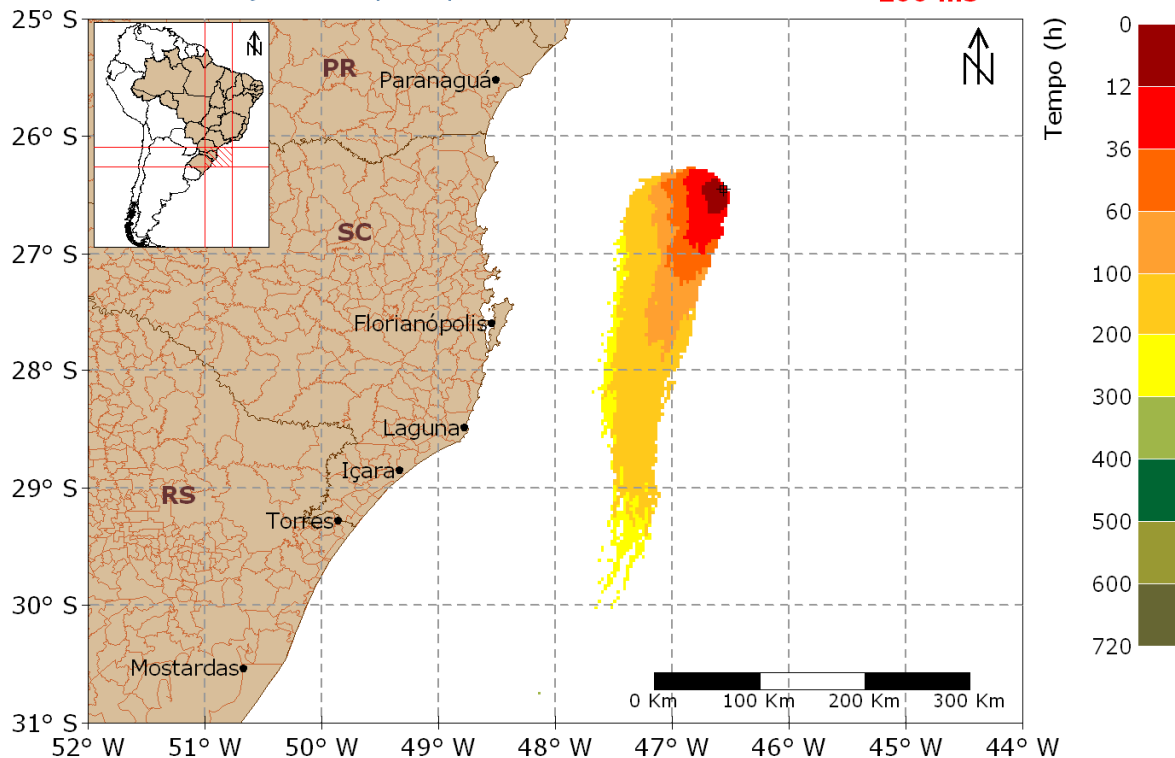


Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo

Simulação 30 dias | 1.000 simulações

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Verão

200 m<sup>3</sup>



**Figura II.6.1.1-13** - Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo, para vazamento de 200 m<sup>3</sup>, no cenário de verão. Simulação de 720 horas.

Toda a área com probabilidade de presença de óleo foi atingida com o tempo mínimo de 200-300 horas após o início da simulação.

### II.6.1.1.6.1.2.2 - Inverno

O Mapa de Probabilidade de presença de óleo para o vazamento de médio porte (200 m<sup>3</sup>), com tempo de simulação de 6 horas, no cenário de inverno, encontra-se na Figura II.6.1.1-14.

## STROLL - modo probabilístico

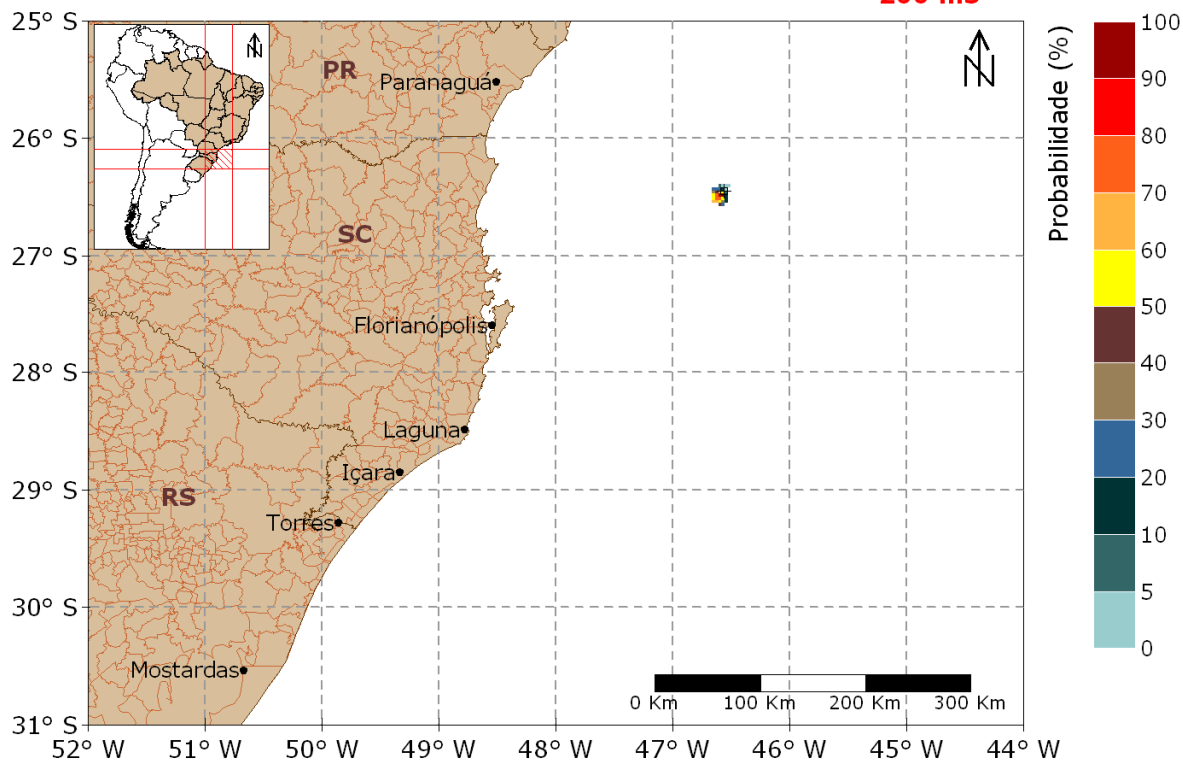


Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

6 horas após o início do vazamento

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Inverno

200 m<sup>3</sup>



**Figura II.6.1.1-14** - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de 200 m<sup>3</sup>, no cenário de inverno. Simulação de 6 horas.

O mapa de probabilidade de presença de óleo para o vazamento de 200 m<sup>3</sup> com tempo de simulação de 30 dias, no cenário de inverno, encontra-se na Figura II.6.1.1-15, enquanto o tempo mínimo de chegada encontra-se na Figura II.6.1.1-16.

## STROLL - modo probabilístico

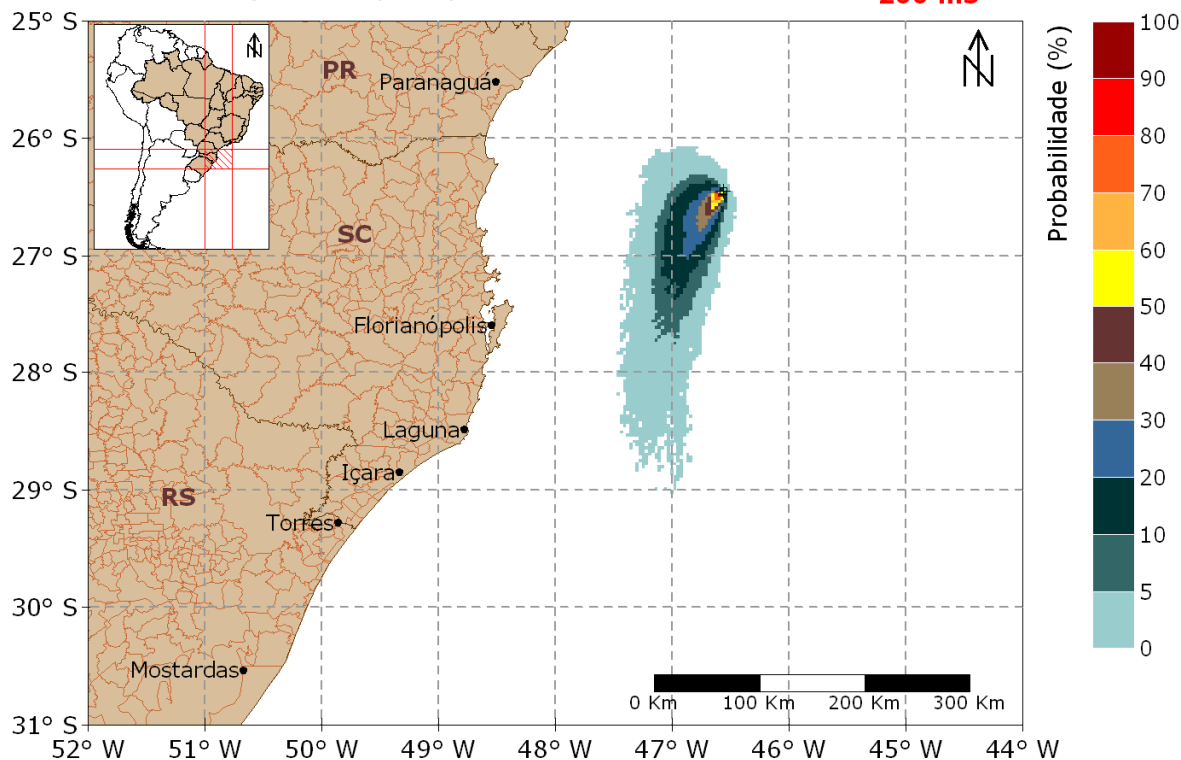


Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Simulação 30 dias | 1.000 simulações

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Inverno

200 m<sup>3</sup>



**Figura II.6.1.1-15** - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de 200 m<sup>3</sup>, no cenário de inverno. Simulação de 720 horas.

Neste cenário a deriva do óleo também foi preferencial rumo a sudoeste do poço, porém atingiu menos áreas a sul. O limite sul do contorno de probabilidade atingiu a latitude de aproximadamente 29° S.

## STROLL - modo probabilístico

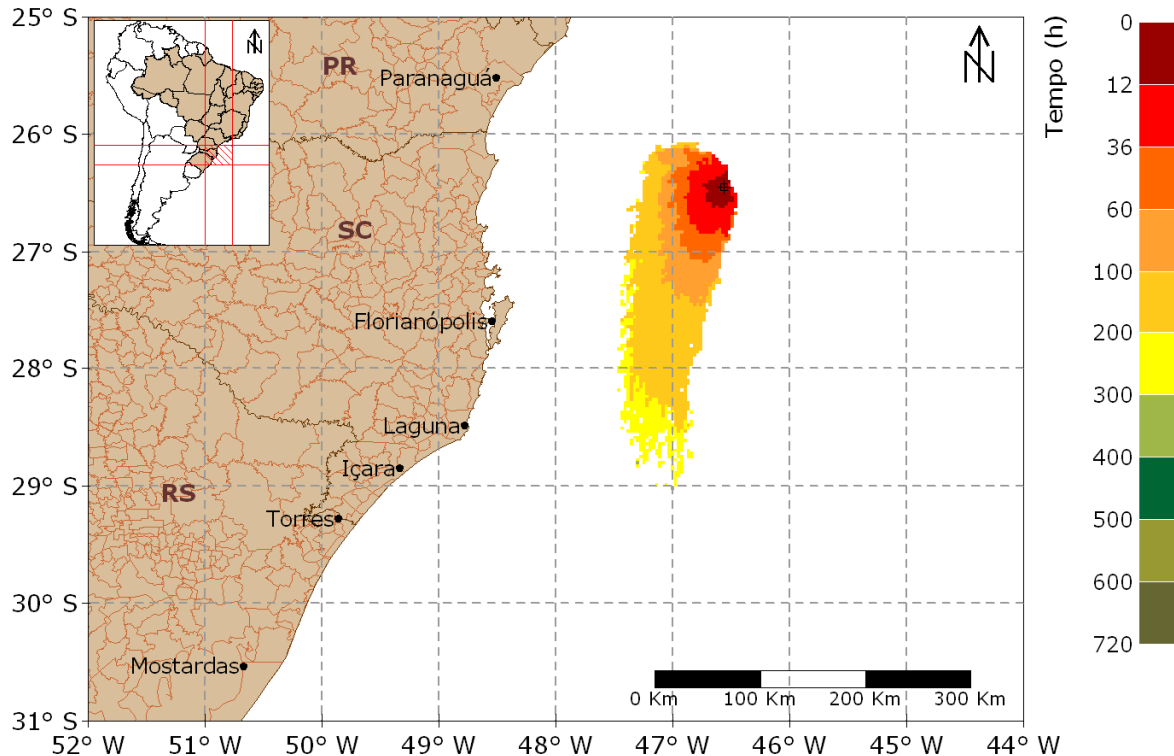


Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo

Simulação 30 dias | 1.000 simulações

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Inverno

200 m<sup>3</sup>



**Figura II.6.1.1-16** - Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo, para vazamento de 200 m<sup>3</sup>, no cenário de inverno. Simulação de 720 horas.

Neste cenário toda a área com probabilidade de presença de óleo também foi atingida com o tempo mínimo de 200-300 horas, após o início do vazamento.

### II.6.1.1.6.1.3 - Vazamento de Pior Caso

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nas simulações probabilísticas de *blow-out*, volume vazado de 116.076 m<sup>3</sup> em 30 dias.

### II.6.1.1.6.1.3.1 - Verão

O Mapa de Probabilidade de presença de óleo para o vazamento de pior caso (116.076 m<sup>3</sup>) com tempo de simulação de 12, 36 e 60 horas, no cenário de verão, encontra-se na Figura II.6.1.1-17, Figura II.6.1.1-18, e Figura II.6.1.1-19, respectivamente.

## STROLL - modo probabilístico

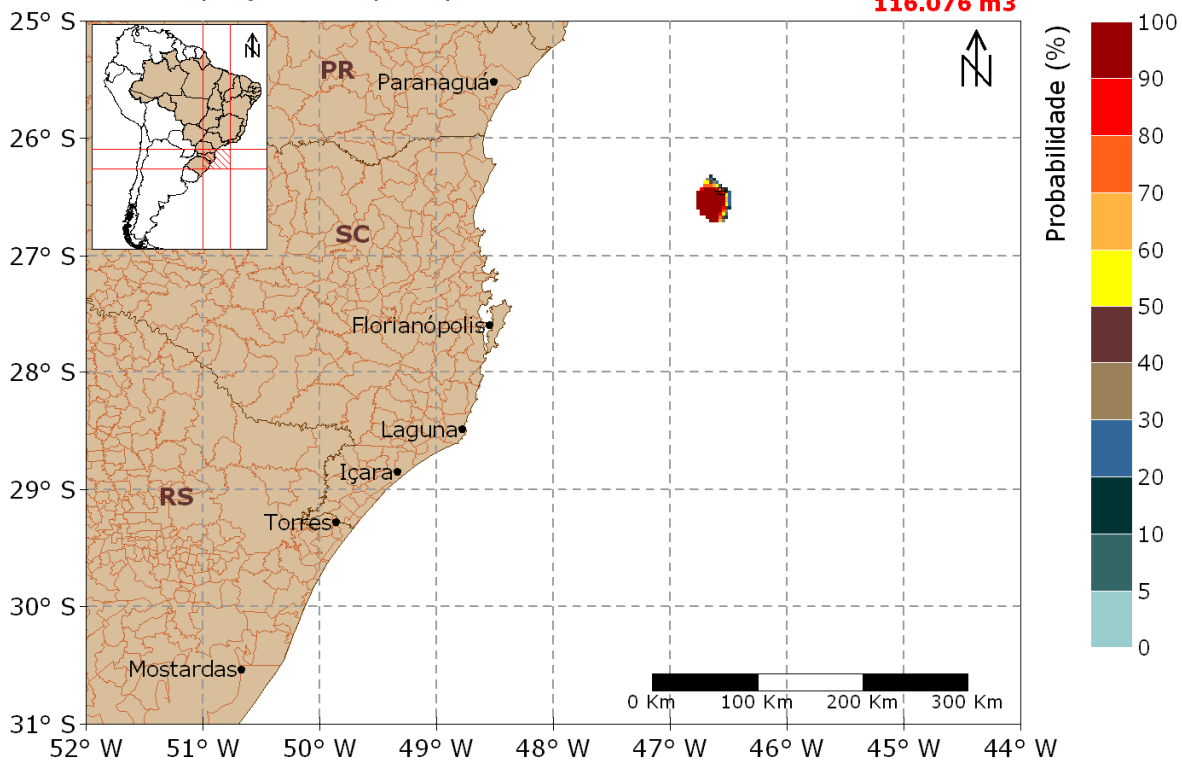


Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Blow-out 30 dias | 12 horas após o início do vazamento

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Verão

116.076 m<sup>3</sup>



**Figura II.6.1.1-17 - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para uma simulação de 12 horas no cenário de verão.**



## STROLL - modo probabilístico

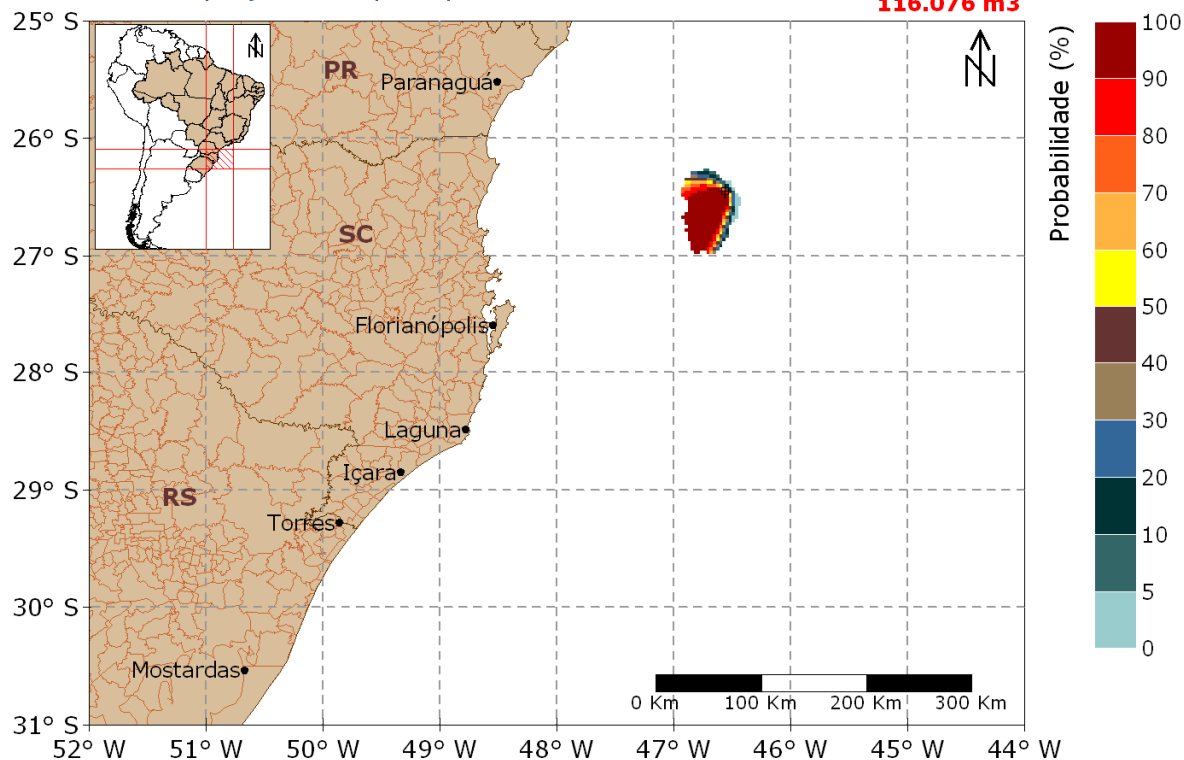


Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Blow-out 30 dias | 36 horas após o início do vazamento

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Verão

**116.076 m<sup>3</sup>**



**Figura II.6.1.1-18** - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para uma simulação de 36 horas no cenário de verão.

## STROLL - modo probabilístico

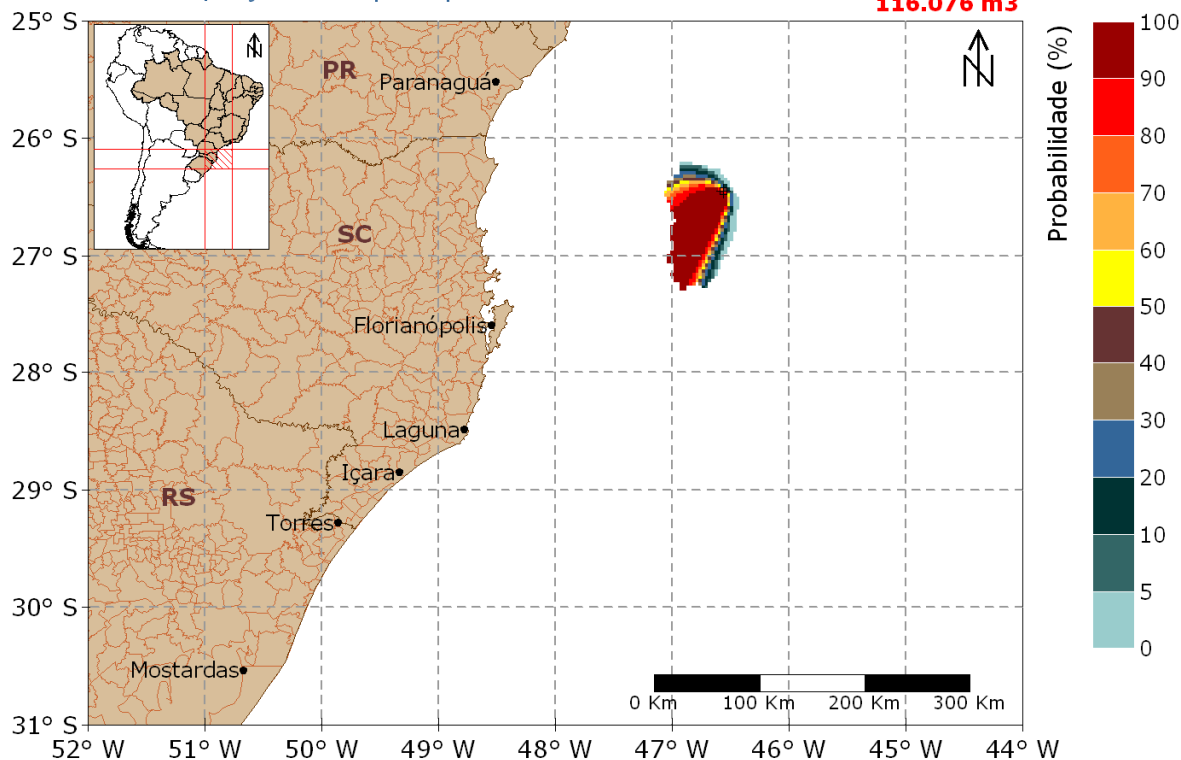


Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Blow-out 30 dias | 60 horas após o início do vazamento

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Verão

116.076 m<sup>3</sup>



**Figura II.6.1.1-19** - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para uma simulação de 60 horas no cenário de verão.

Os mapas de probabilidade e de tempo mínimo de chegada para o vazamento de 30 dias no período de verão são apresentados na Figura II.6.1.1-20 e na Figura II.6.1.1-21 .

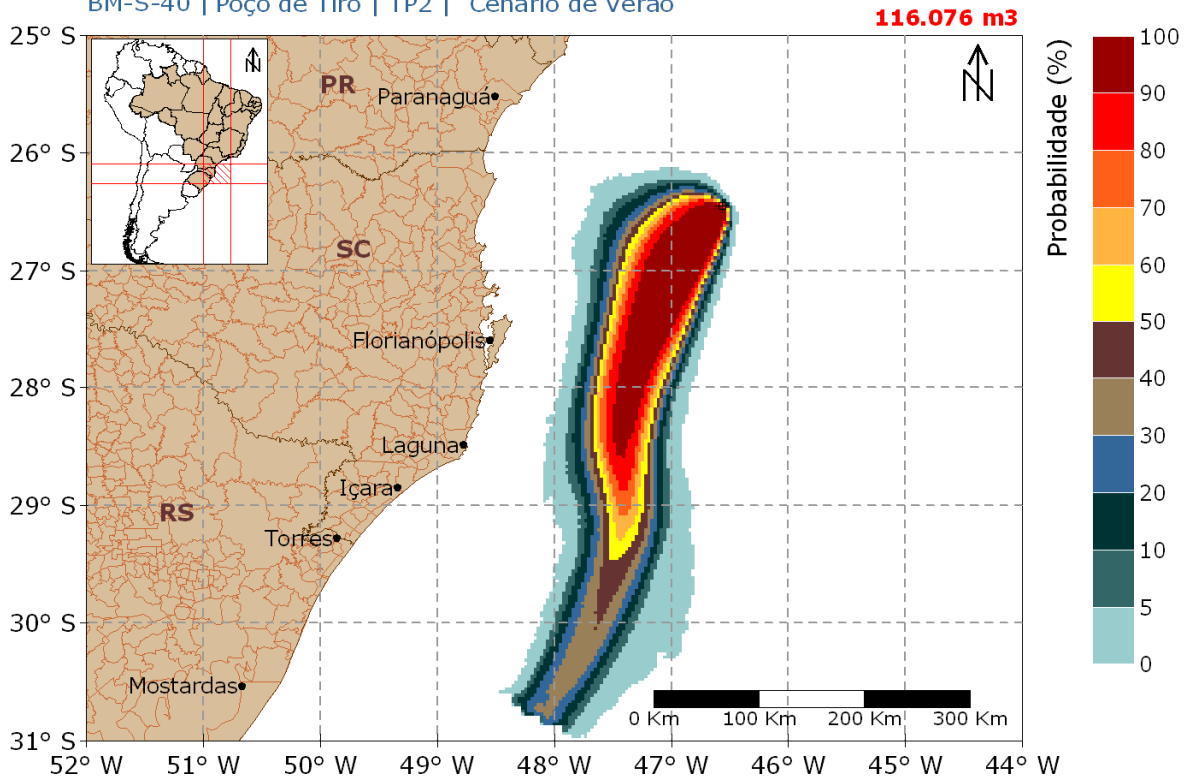
## STROLL - modo probabilístico



Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Blow-out 30 dias | Simulação 60 dias | 1.000 simulações

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Verão



**Figura II.6.1.1-20** - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão.

Observa-se que a deriva do óleo foi preferencial rumo a sudoeste do poço. Derivas rumo a noroeste também foram observadas, porém não houve probabilidade do óleo atingir a costa. Observa-se que algumas trajetórias são cortadas na fronteira sul (canto inferior do domínio do modelo). Consideramos que essa parte das trajetórias é praticamente irrelevante para a modelagem, uma vez que não há toque na costa e a região com probabilidade de presença de óleo, encontra-se a mais de 200 km da mesma. Além disso, ressalta-se que a sul do limite da grade do modelo, a orientação da linha de costa é nordeste-sudoeste, afastando-se ainda mais da região com probabilidade de presença de óleo.

## STROLL - modo probabilístico

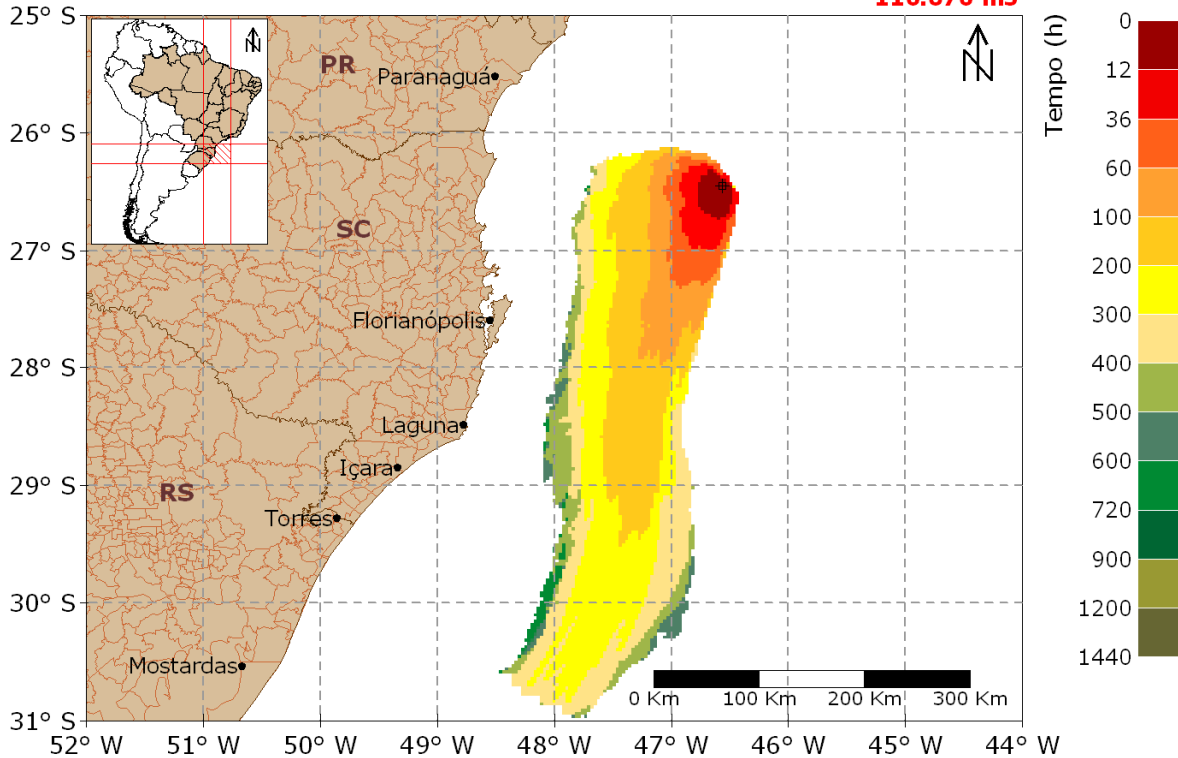


Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo

Blow-out 30 dias | Simulação 60 dias | 1.000 simulações

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Verão

**116.076 m<sup>3</sup>**



**Figura II.6.1.1-21** - Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de óleo, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão.

Observa-se na Figura II.6.1.1-21 que a área com probabilidade de presença de óleo foi atingida, em sua maioria, com o tempo mínimo de 200-300 horas. Áreas nas extremidades leste e oeste foram as que apresentaram o maior tempo mínimo de chegada do óleo, 400-900 horas.

### II.6.1.1.6.1.3.2 - Inverno

O Mapa de Probabilidade de presença de óleo para o vazamento de pior caso (116.076 m<sup>3</sup>) com tempo de simulação de 12, 36 e 60 horas, no cenário de

inverno, encontra-se na Figura II.6.1.1-22, Figura II.6.1.1-23 e Figura II.6.1.1-24, respectivamente.

## STROLL - modo probabilístico

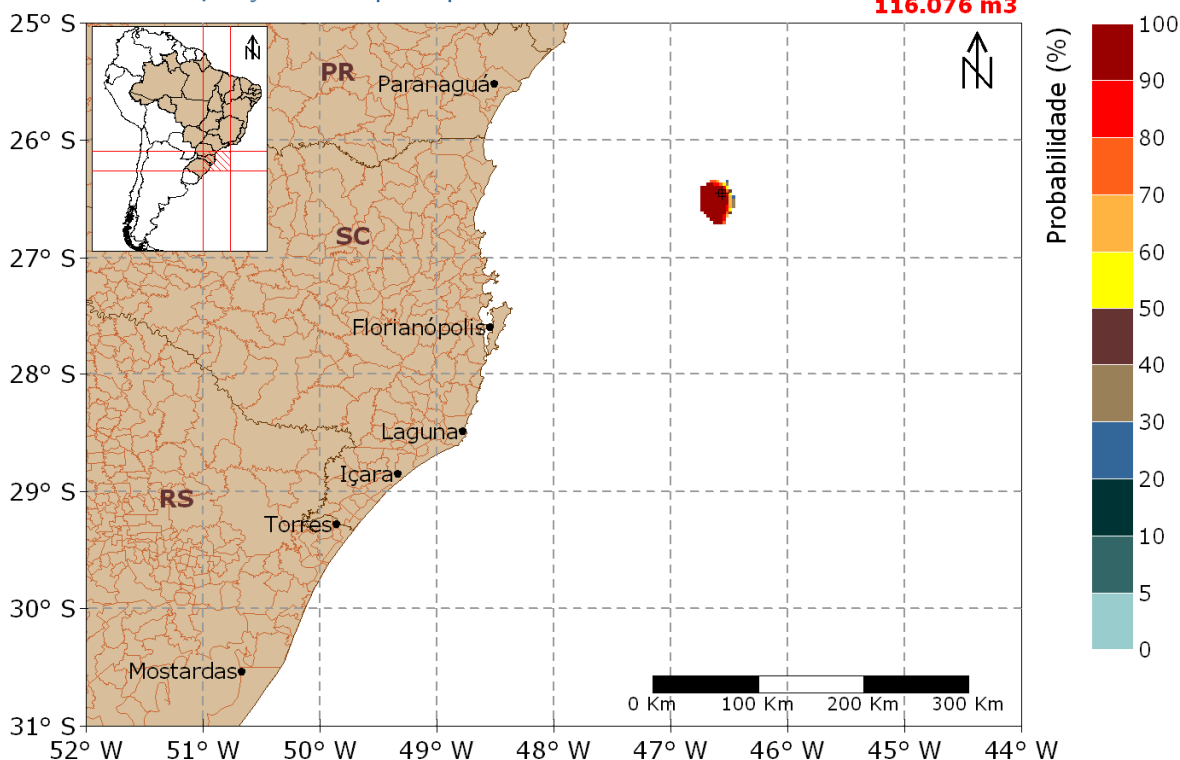


Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Blow-out 30 dias | 12 horas após o início do vazamento

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Inverno

**116.076 m3**



**Figura II.6.1.1-22** - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para uma simulação de 12 horas no cenário de inverno.

# STROLL - modo probabilístico

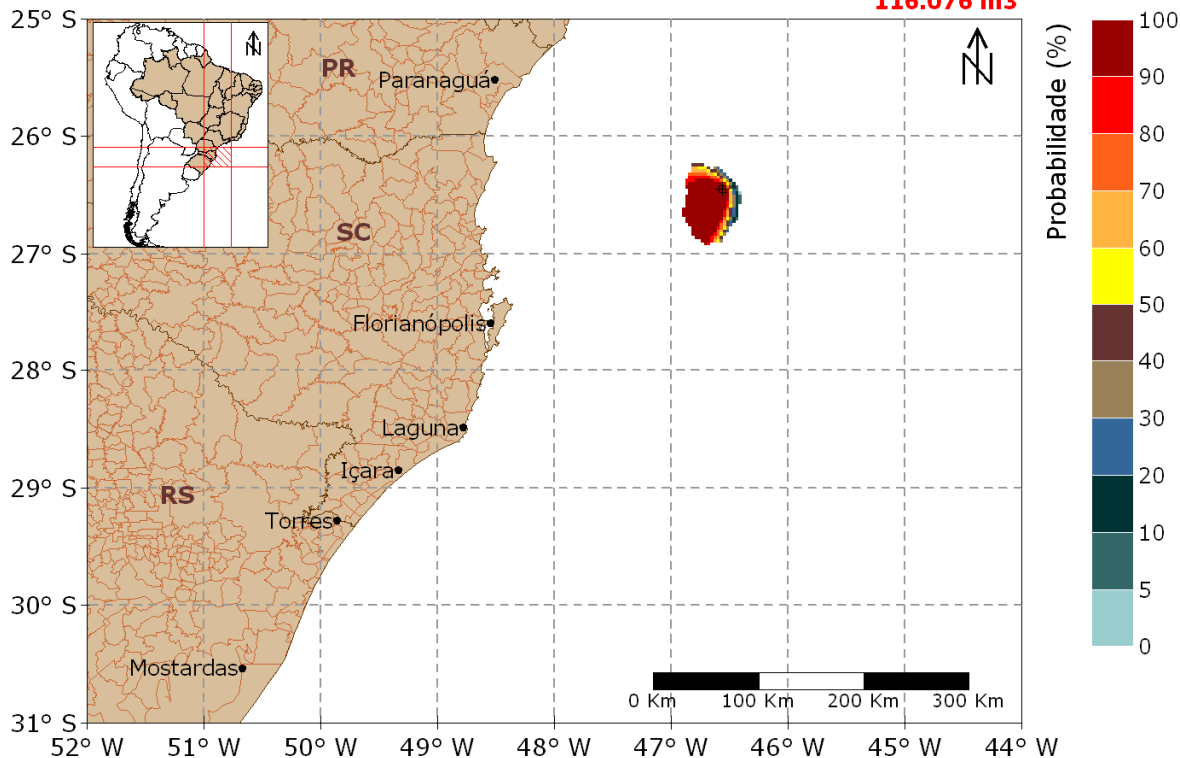


Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Blow-out 30 dias | 36 horas após o início do vazamento

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Inverno

116.076 m3



**Figura II.6.1.1-23 - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para uma simulação de 36 horas no cenário de inverno.**

## STROLL - modo probabilístico

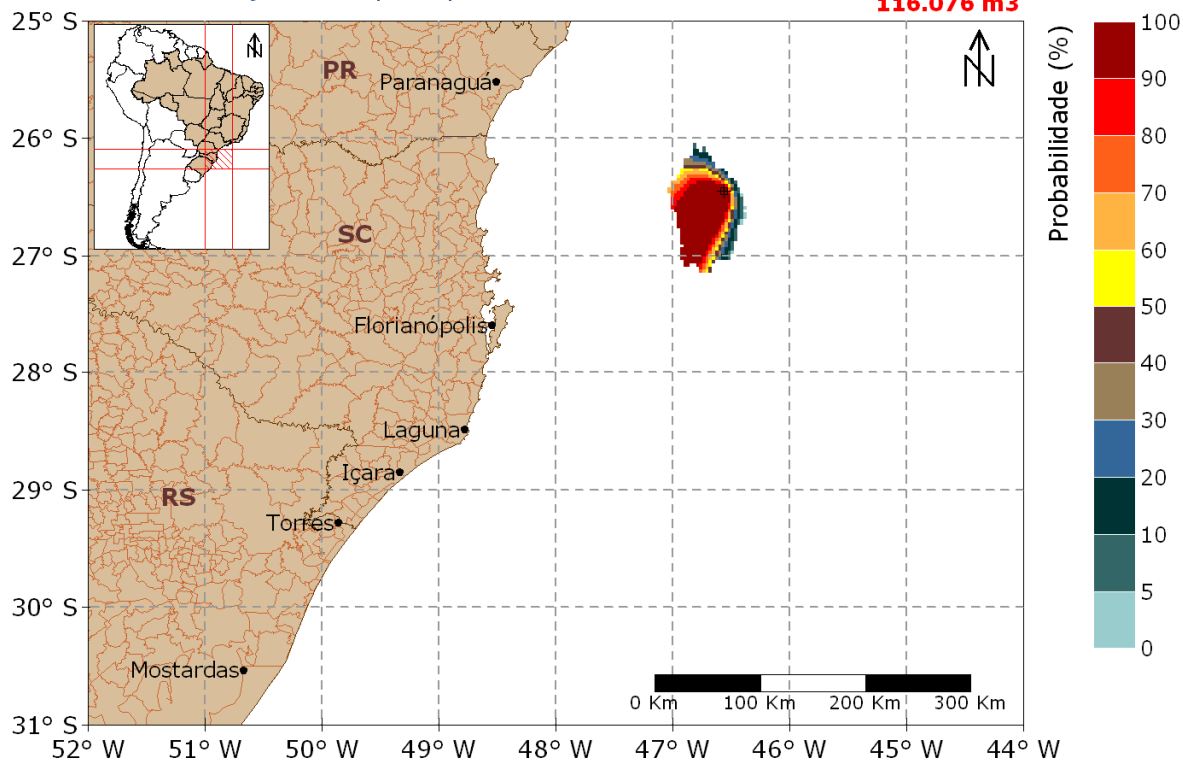


Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Blow-out 30 dias | 60 horas após o início do vazamento

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Inverno

**116.076 m<sup>3</sup>**



**Figura II.6.1.1-24** - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para uma simulação de 60 horas no cenário de inverno.

Os mapas de probabilidade e de tempo mínimo de chegada para o vazamento de 30 dias no período de inverno são apresentados na Figura II.6.1.1-25 e na Figura II.6.1.1-26 .

## STROLL - modo probabilístico

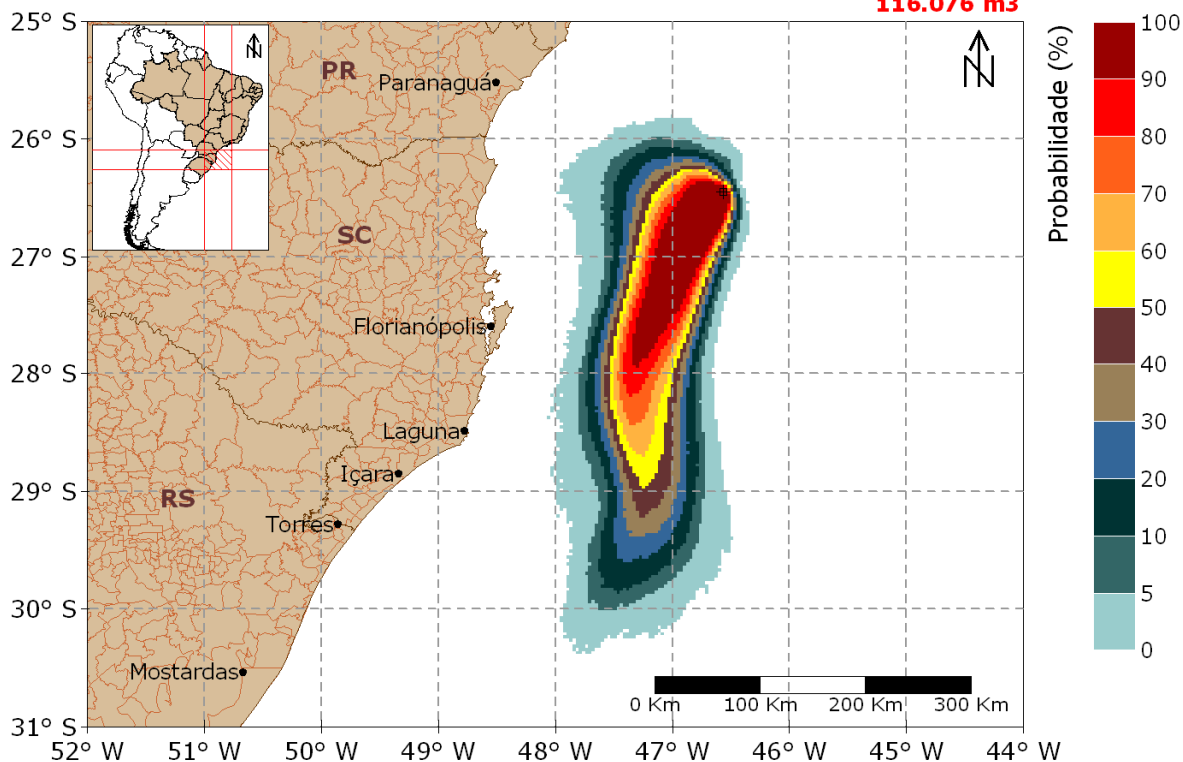


Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Blow-out 30 dias | Simulação 60 dias | 1.000 simulações

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Inverno

**116.076 m3**



**Figura II.6.1.1-25 - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno.**

A deriva do óleo neste cenário é similar ao observado no cenário de verão, porém a área com probabilidade de presença de óleo atingiu latitudes menores, aproximadamente 30,5°.



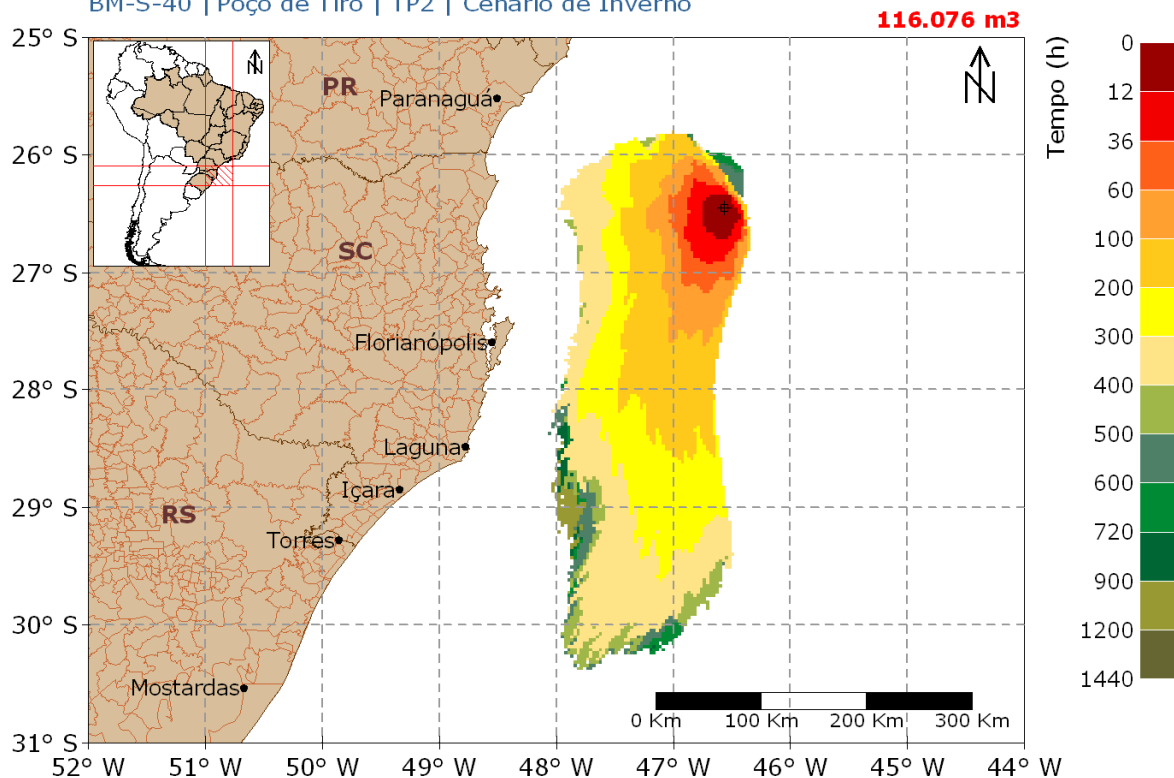
## STROLL - modo probabilístico



Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo

Blow-out 30 dias | Simulação 60 dias | 1.000 simulações

BM-S-40 | Poço de Tiro | TP2 | Cenário de Inverno



**Figura II.6.1.1-26** - Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de óleo, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno.

Neste cenário a maior parte das áreas com probabilidade de presença de óleo foi atingida com o tempo mínimo de 300-400 horas após o início da simulação.

### II.6.1.1.6.2 - Modo Determinístico

Com base nos resultados obtidos nas simulações probabilísticas foram eleitas, nos dois cenários (verão e inverno), as trajetórias que representaram a deriva do óleo em condições meteo-oceanográficas mais frequentes da região, segundo descrito no item II.6.1.1.6 -.

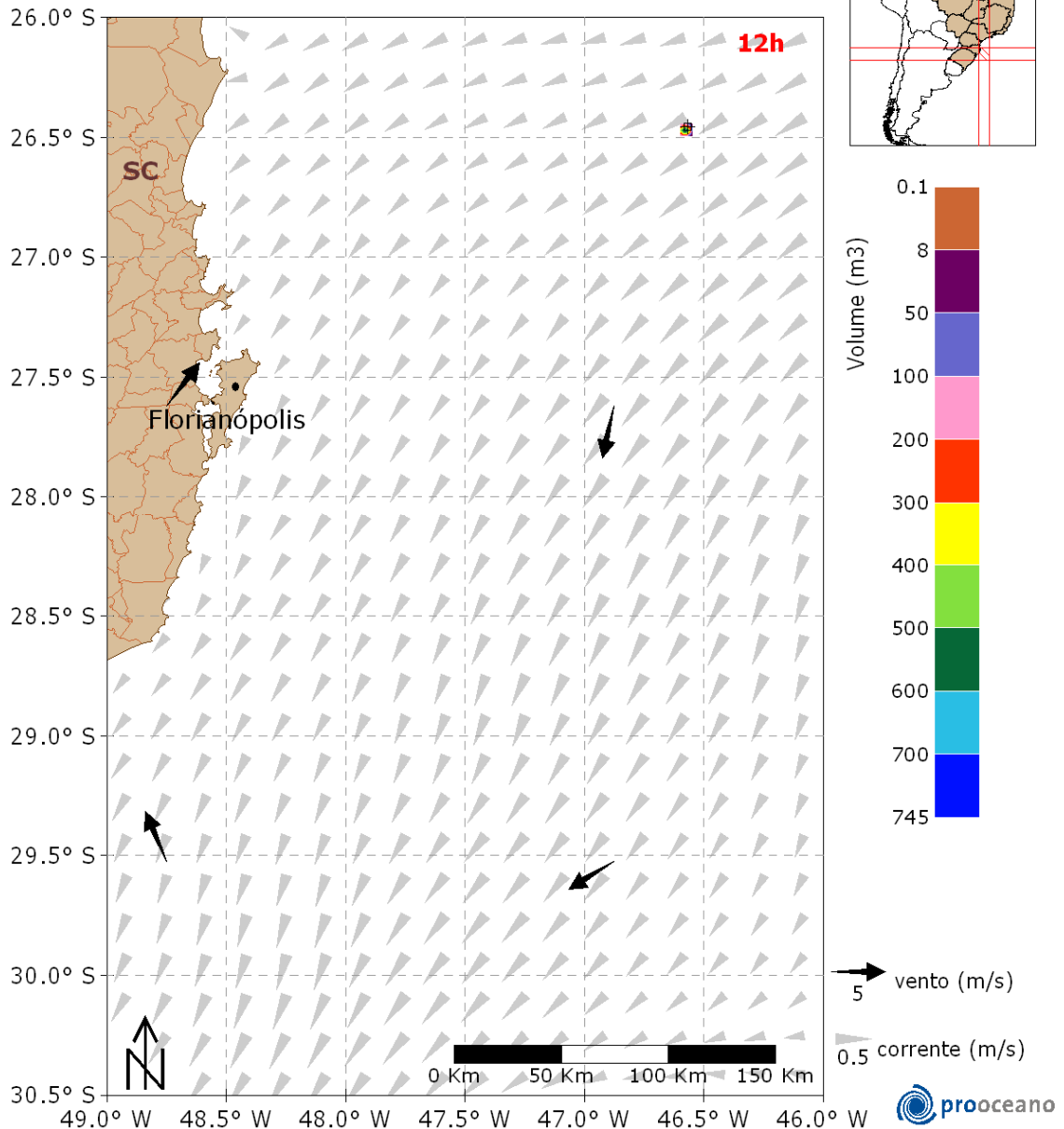
O modo determinístico para a situação crítica não foi apresentado, pois não houve chegada do óleo na costa, em nenhuma das simulações realizadas.

#### **II.6.1.1.6.2.1 - Verão**

Na Figura II.6.1.1-27 a Figura II.6.1.1-37 são apresentados instantâneos com os resultados da simulação determinística da dispersão de óleo realizada em condições meteo-oceanográficas frequentes no verão. São também apresentados, nas mesmas figuras, os campos de vento e correntes que transportaram o óleo nesse cenário.

# STROLL - Modo Determinístico

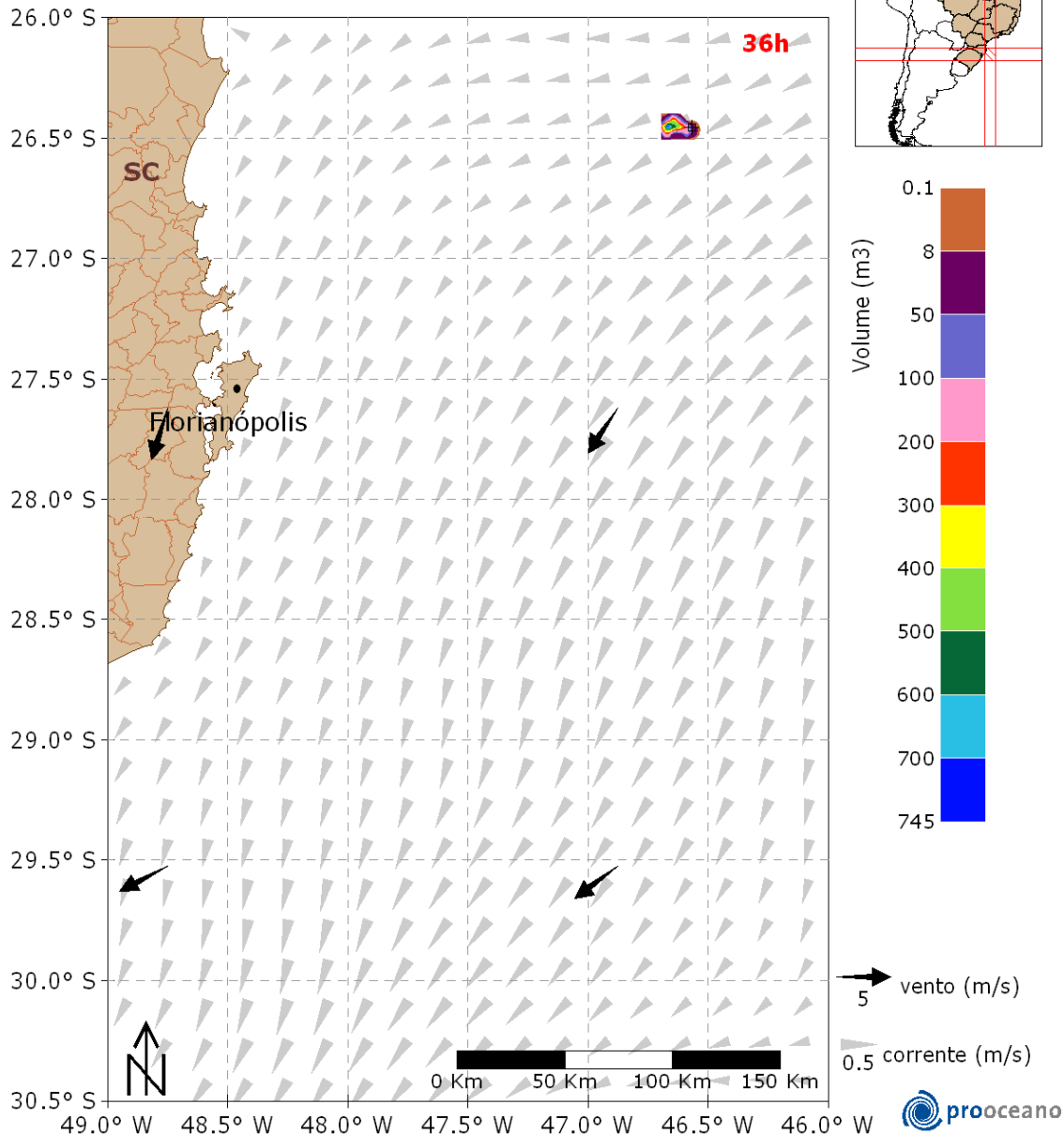
BM-S-40 | Cenário de Verão | C. M. Frequentes



**Figura II.6.1.1-27** - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 12 horas de simulação.

# STROLL - Modo Determinístico

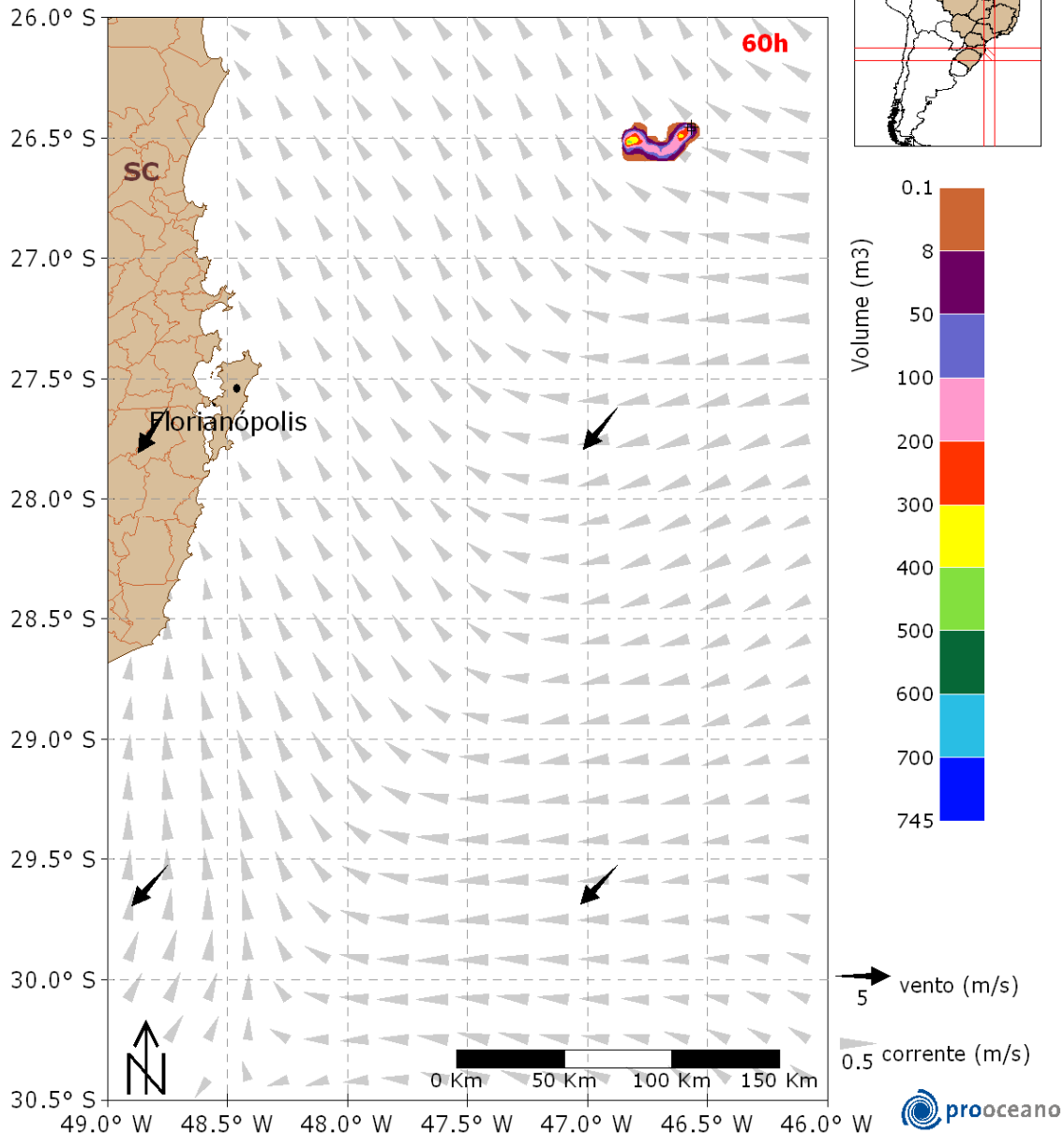
BM-S-40| Cenário de Verão| C. M. Frequentes



**Figura II.6.1.1-28** - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 36 horas de simulação.

# STROLL - Modo Determinístico

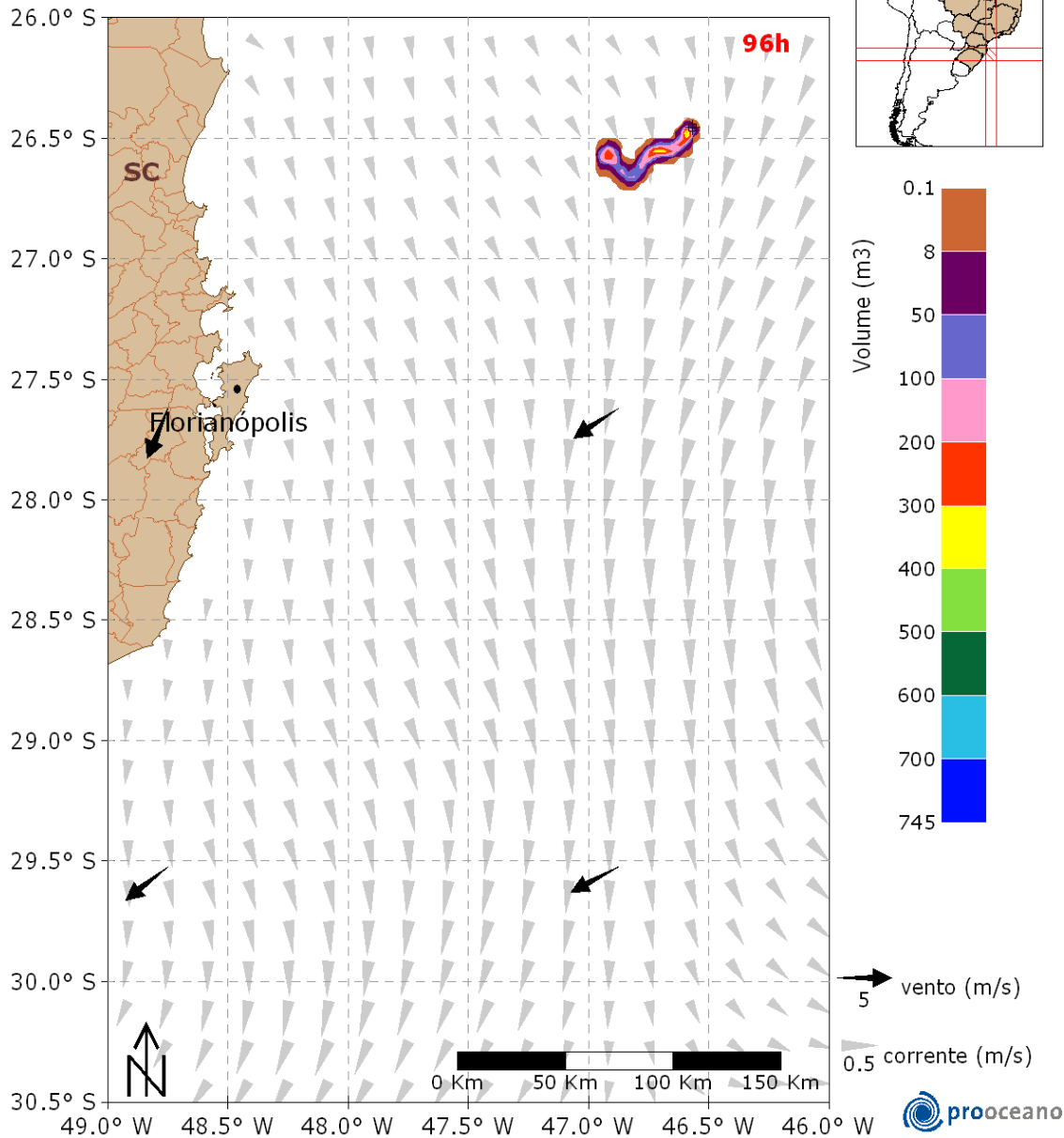
BM-S-40| Cenário de Verão| C. M. Frequentes



**Figura II.6.1.1-29** - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 60 horas de simulação.

## STROLL - Modo Determinístico

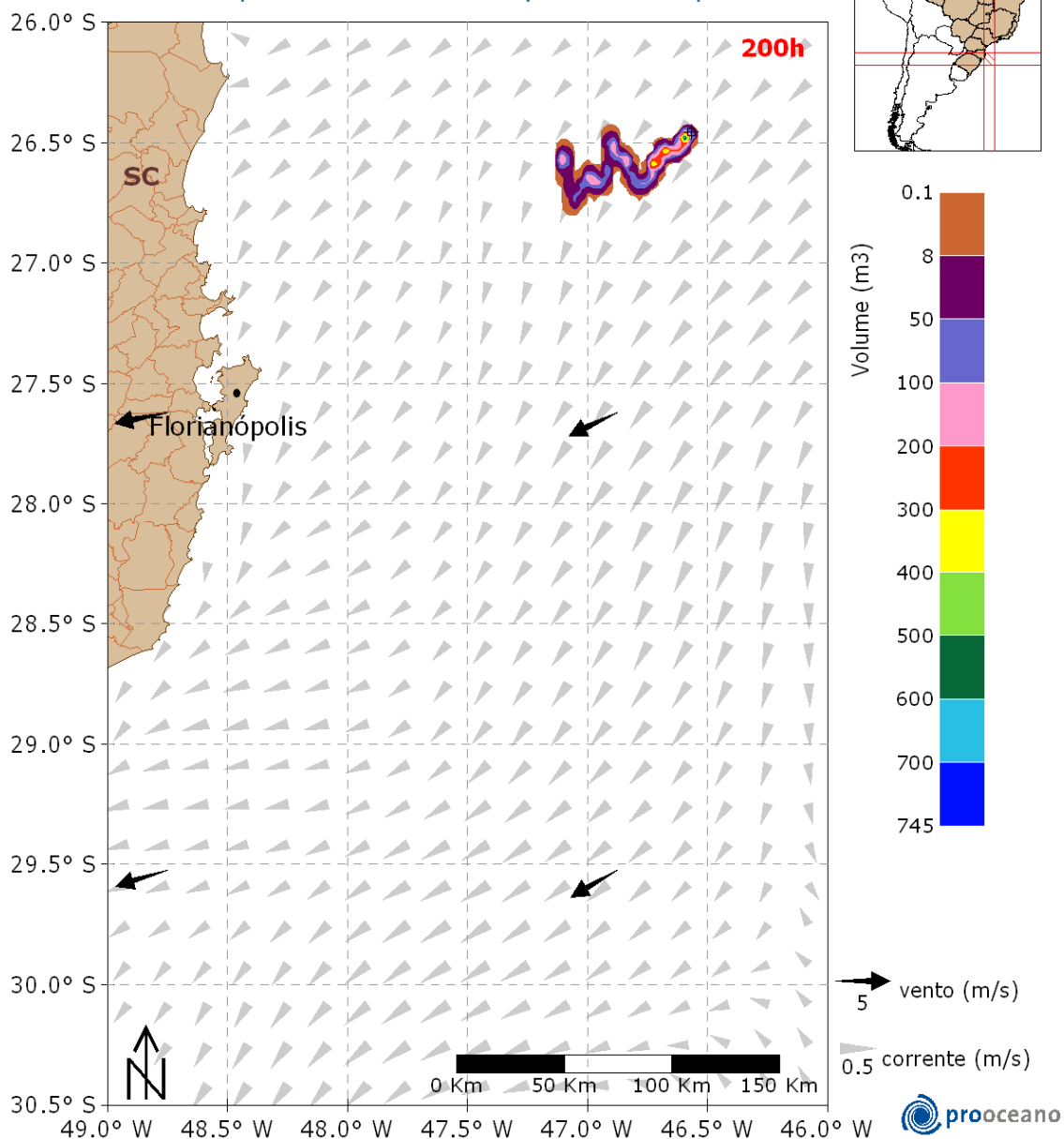
BM-S-40| Cenário de Verão| C. M. Frequentes



**Figura II.6.1.1-30** - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 96 horas de simulação.

# STROLL - Modo Determinístico

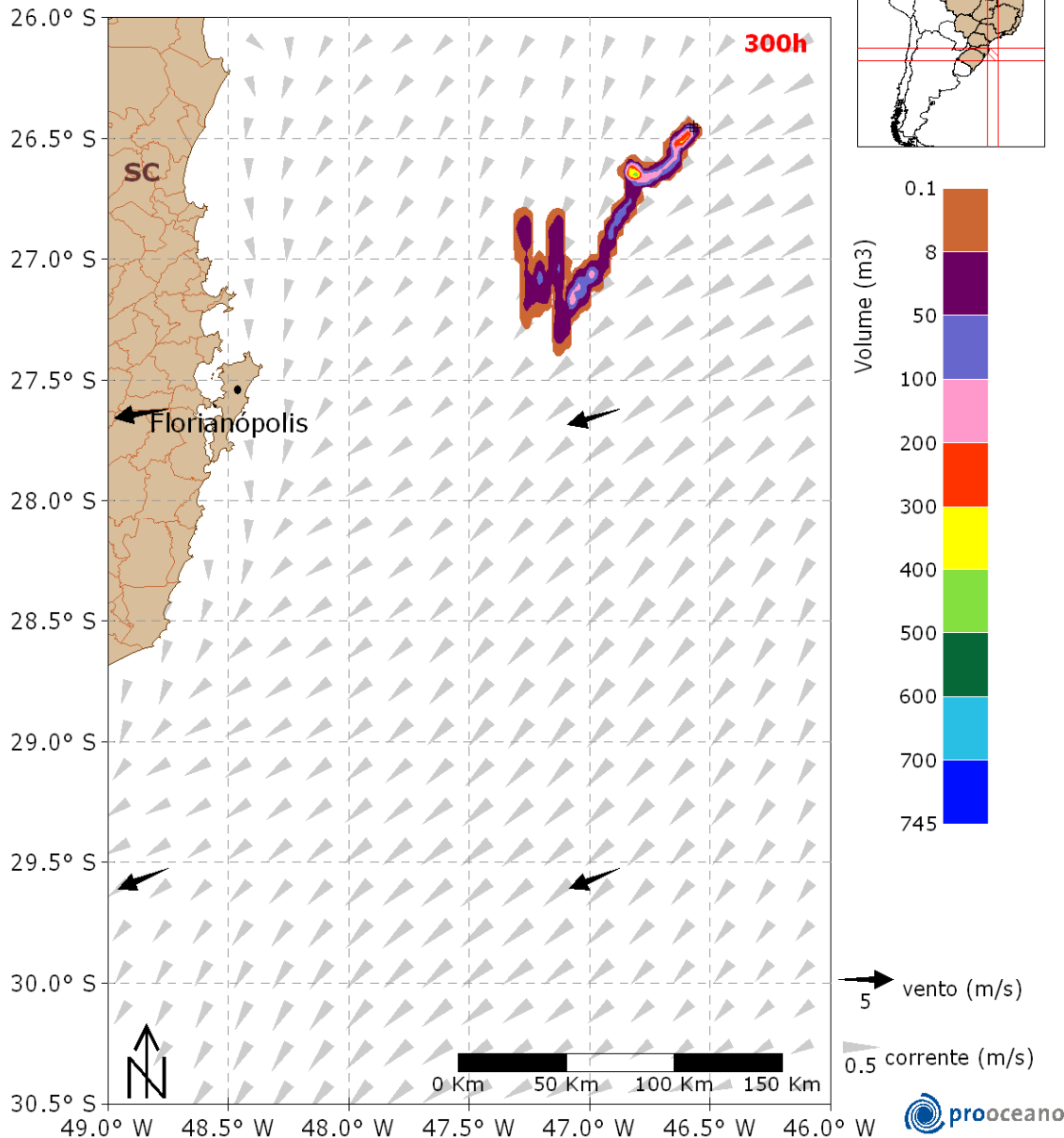
BM-S-40| Cenário de Verão| C. M. Frequentes



**Figura II.6.1.1-31** - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de verão, após 200 horas de simulação.

# STROLL - Modo Determinístico

BM-S-40| Cenário de Verão| C. M. Frequentes

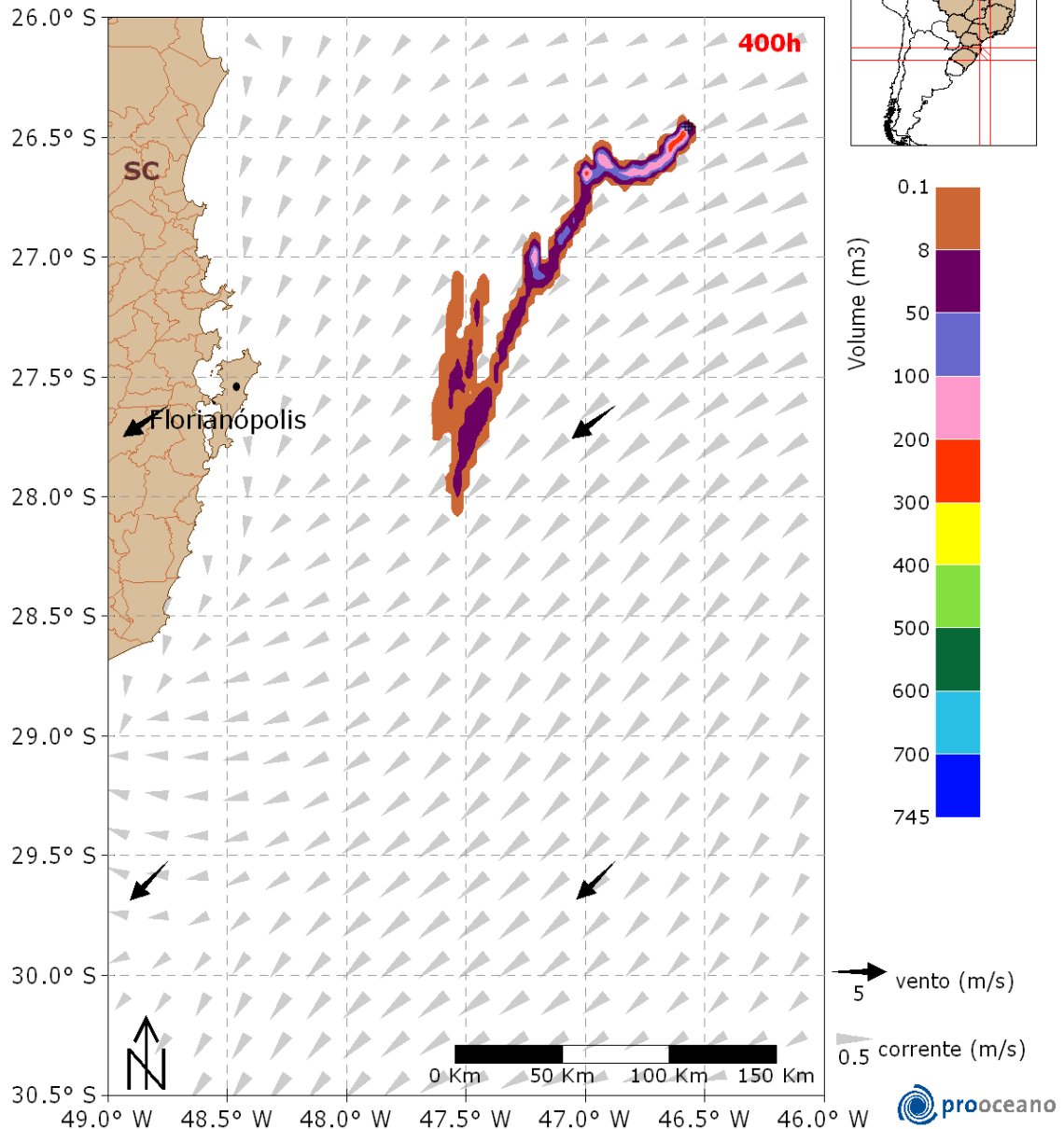


**Figura II.6.1.1-32** - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de verão, após 300 horas de simulação.



## STROLL - Modo Determinístico

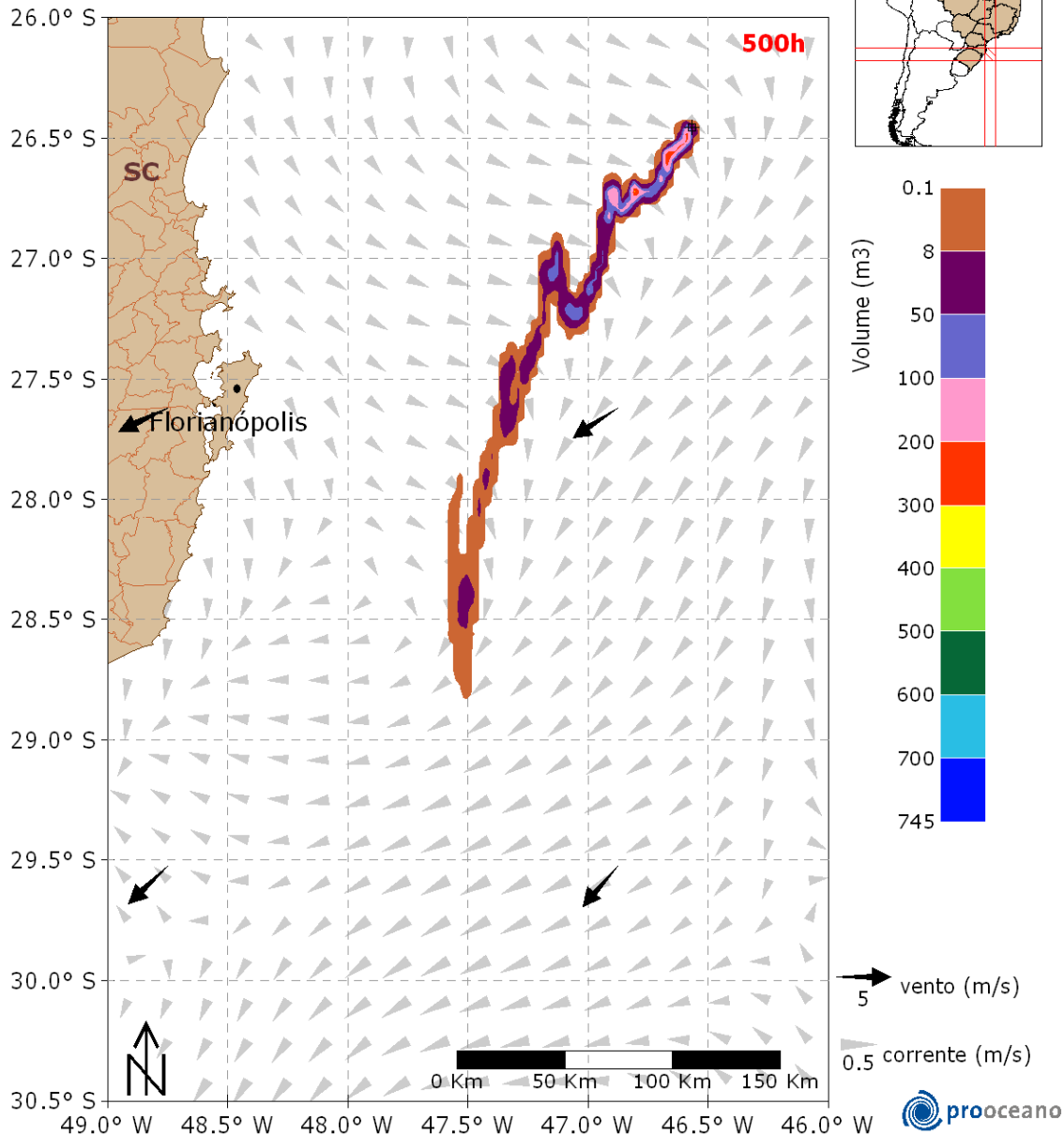
BM-S-40 | Cenário de Verão | C. M. Frequentes



**Figura II.6.1.1-33** - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 400 horas de simulação.

# STROLL - Modo Determinístico

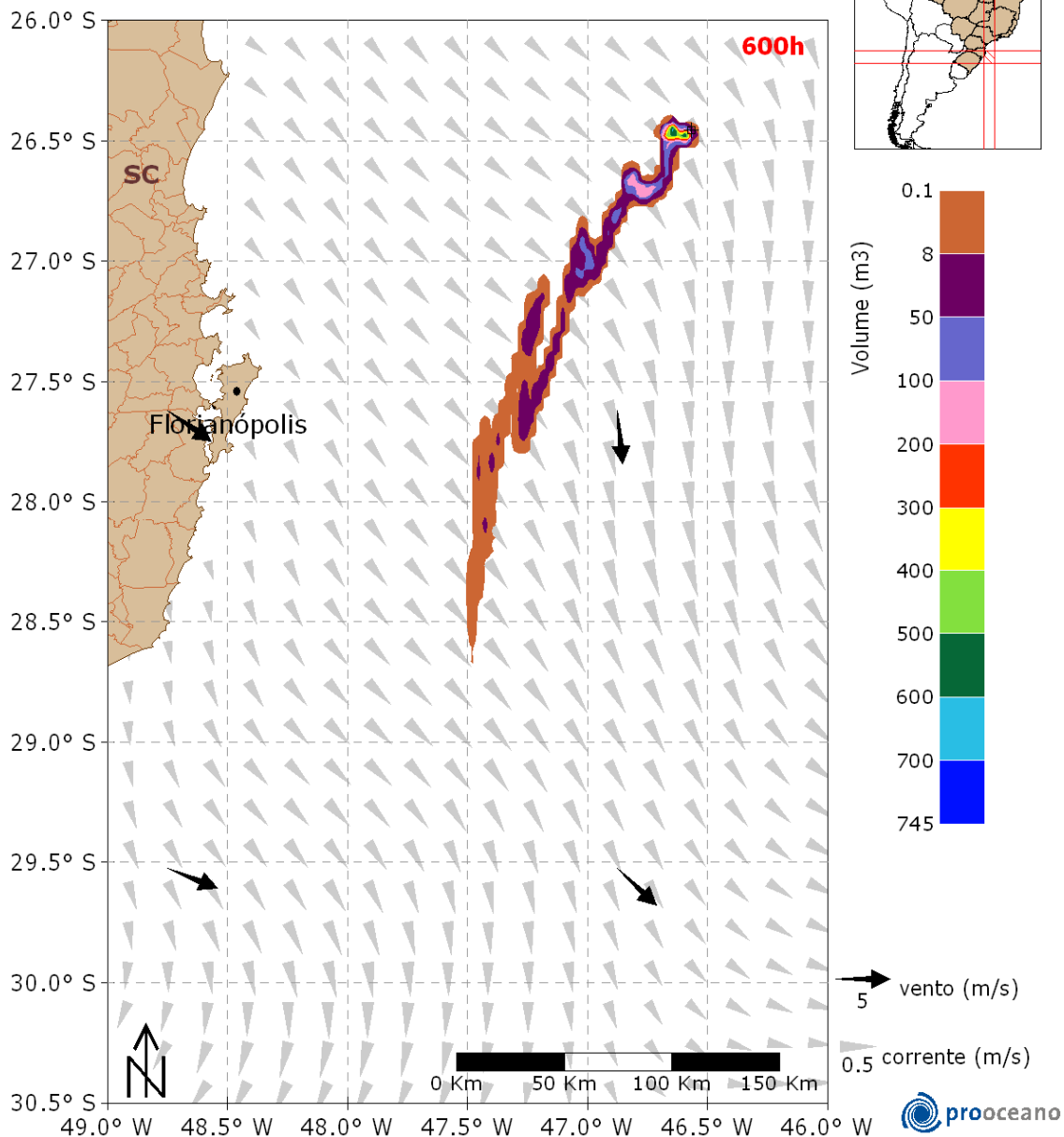
BM-S-40| Cenário de Verão| C. M. Frequentes



**Figura II.6.1.1-34** - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de verão, após 500 horas de simulação.

# STROLL - Modo Determinístico

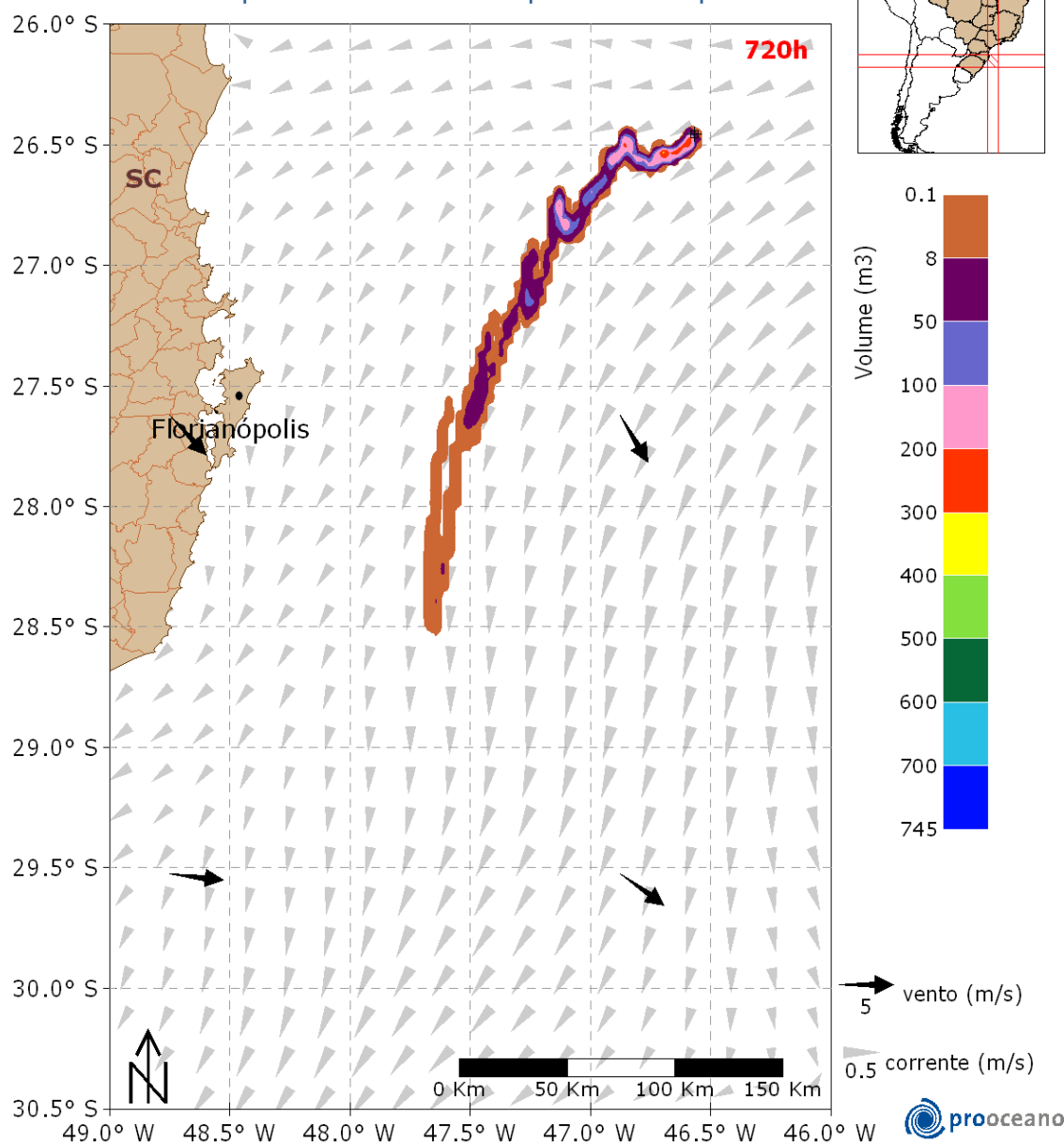
BM-S-40| Cenário de Verão| C. M. Frequentes



**Figura II.6.1.1-35** - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de verão, após 600 horas de simulação.

## STROLL - Modo Determinístico

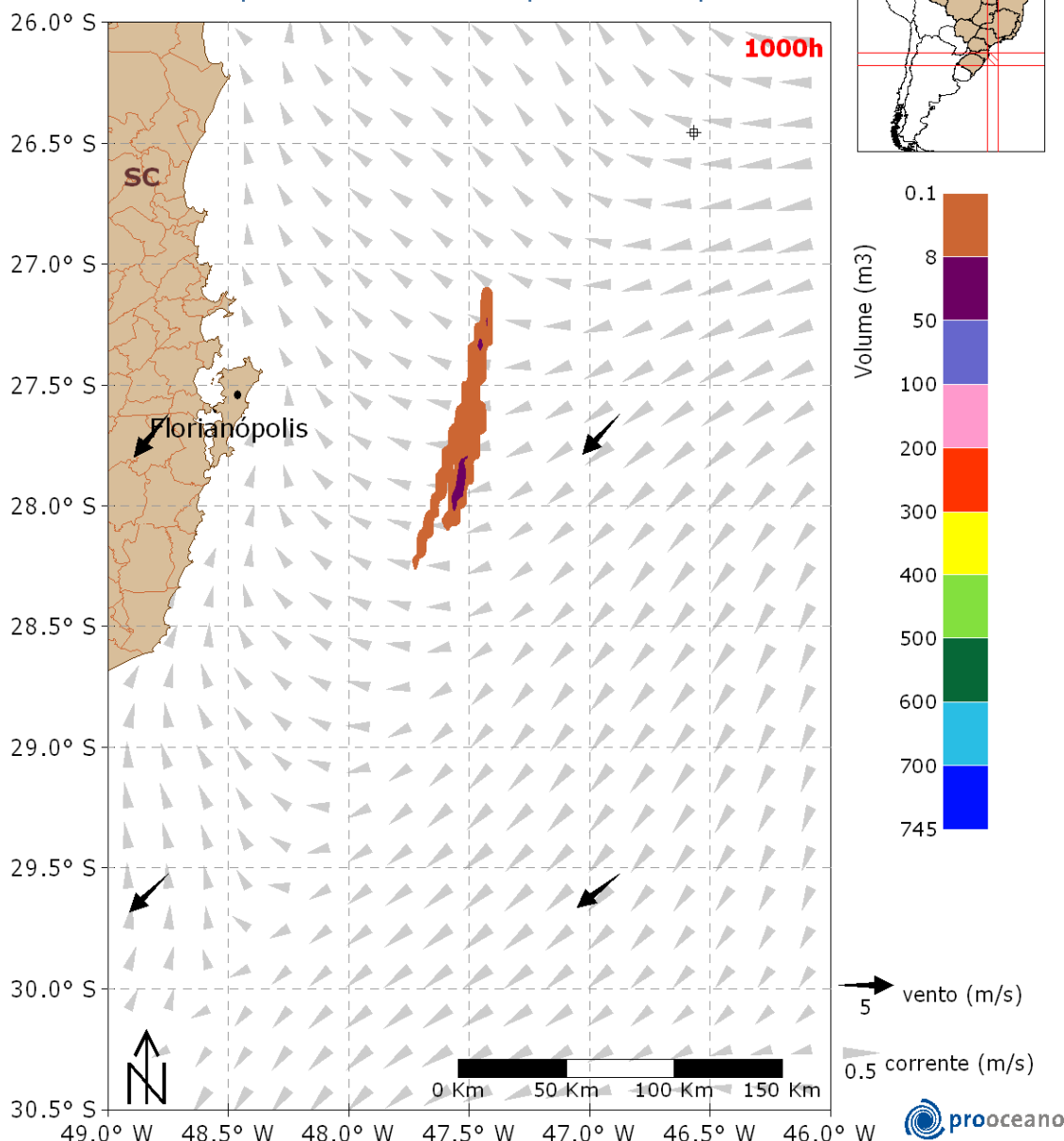
BM-S-40| Cenário de Verão| C. M. Frequentes



**Figura II.6.1.1-36** - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 720 horas de simulação.

## STROLL - Modo Determinístico

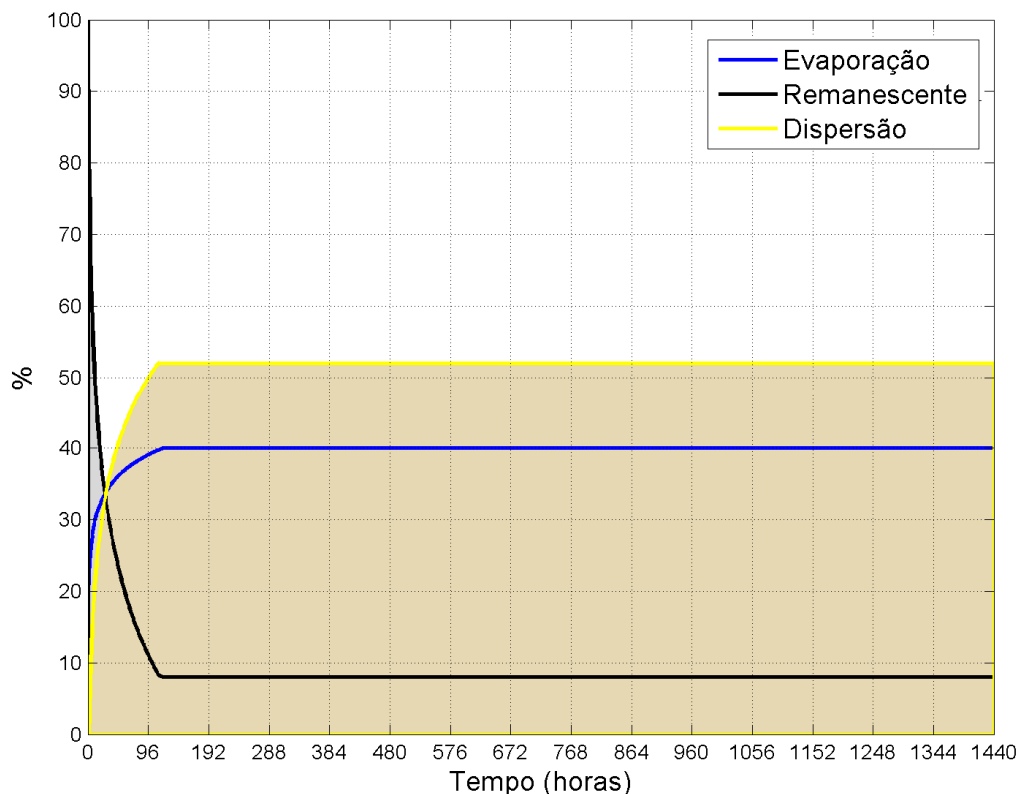
BM-S-40| Cenário de Verão| C. M. Frequentes



**Figura II.6.1.1-37** - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 1000 horas de simulação.

Observa-se que a deriva do óleo ocorreu rumo a sudoeste do poço durante toda a trajetória. No instante de 1000 horas o óleo presente na água encontrava-se com um volume entre 0,1 e 50 m<sup>3</sup>. Após esse momento, o volume de óleo foi se reduzindo, não havendo mais óleo na superfície da água com espessuras superiores a 3x10<sup>-7</sup> m.

Os processos que retiraram massa de óleo da superfície da água são apresentados a seguir na Figura II.6.1.1-38.



**Figura II.6.1.1-38 - Evolução temporal do balanço de massa ao longo da simulação da trajetória do volume de pior caso (116.076 m<sup>3</sup>) em condições meteo-oceanográficas frequentes, no cenário de verão.**

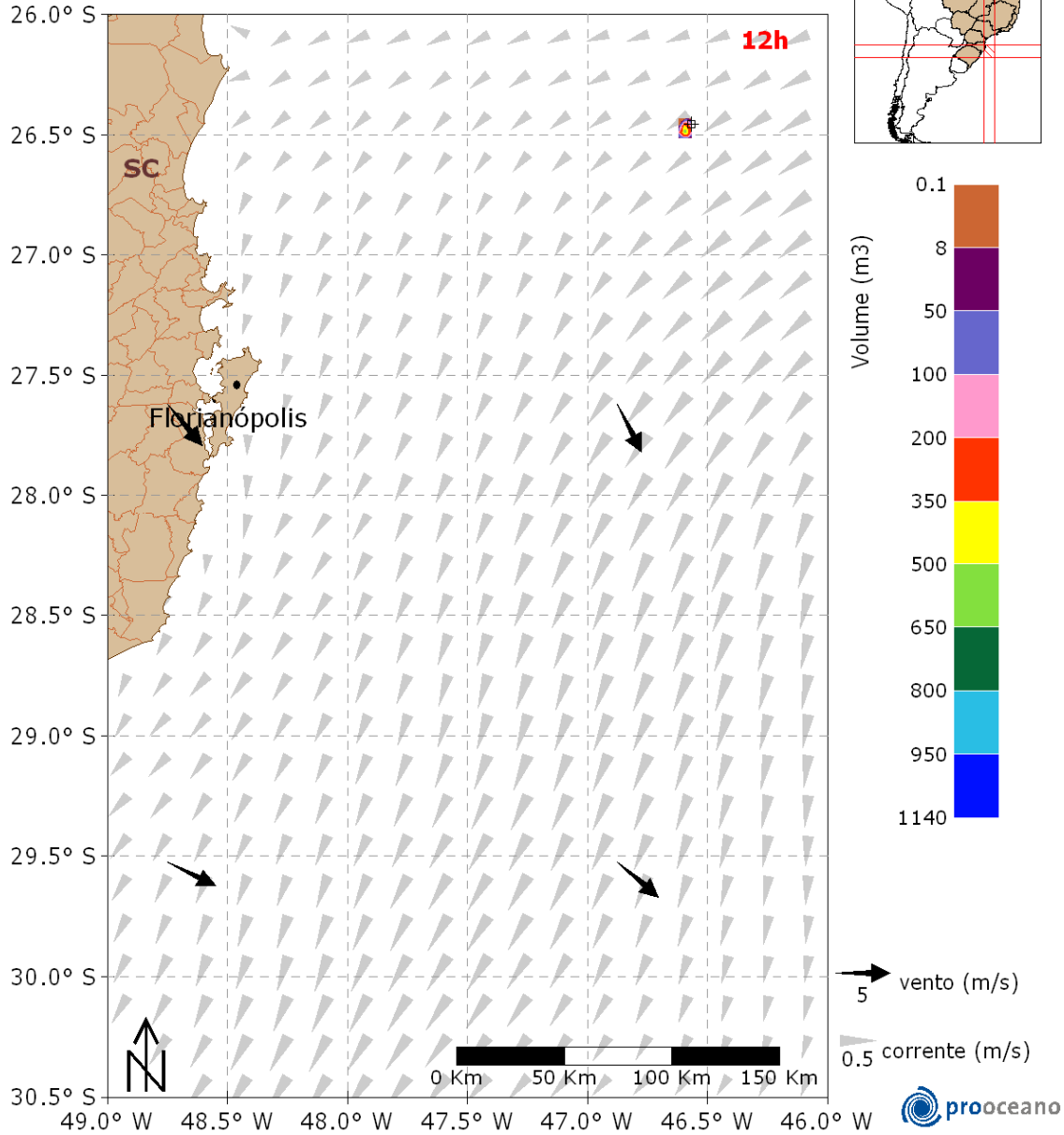
Observa-se que a massa de óleo que permanece na superfície da água, ao final da simulação, é de aproximadamente 8%. O processo de dispersão foi o mais efetivo consumindo 52% do total.

#### **II.6.1.1.6.2.2 - Inverno**

Da Figura II.6.1.1-39 à Figura II.6.1.1-49 são apresentados instantâneos com os resultados da simulação determinística da dispersão de óleo realizada em condições meteo-oceanográficas frequentes de inverno. São também apresentados, nas figuras, os campos de vento e correntes que transportaram o óleo nesse cenário.

## STROLL - Modo Determinístico

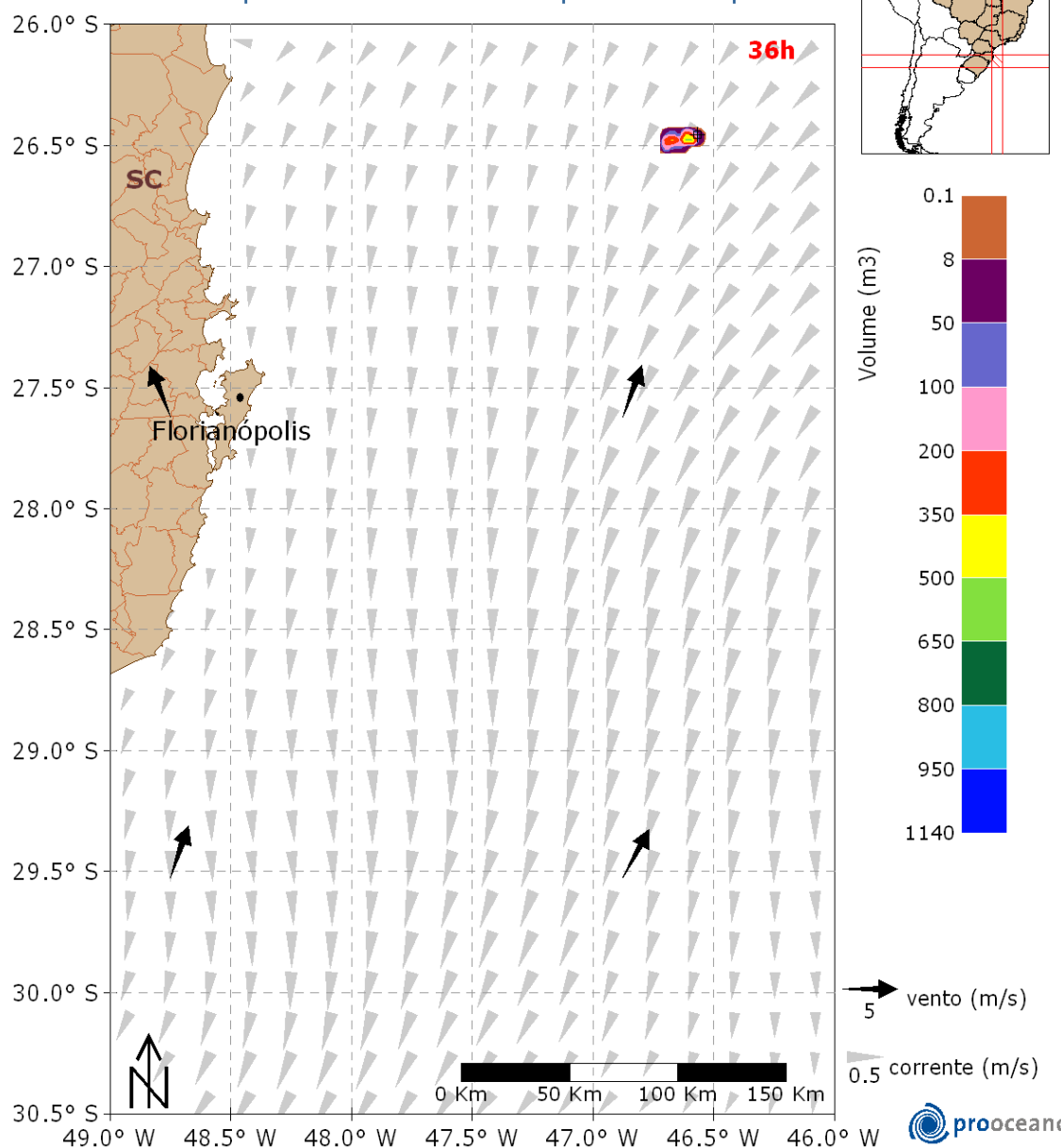
BM-S-40 | Cenário de Inverno | C. M. Frequentes



**Figura II.6.1.1-39** - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 12 horas de simulação.

# STROLL - Modo Determinístico

BM-S-40| Cenário de Inverno| C. M. Frequentes

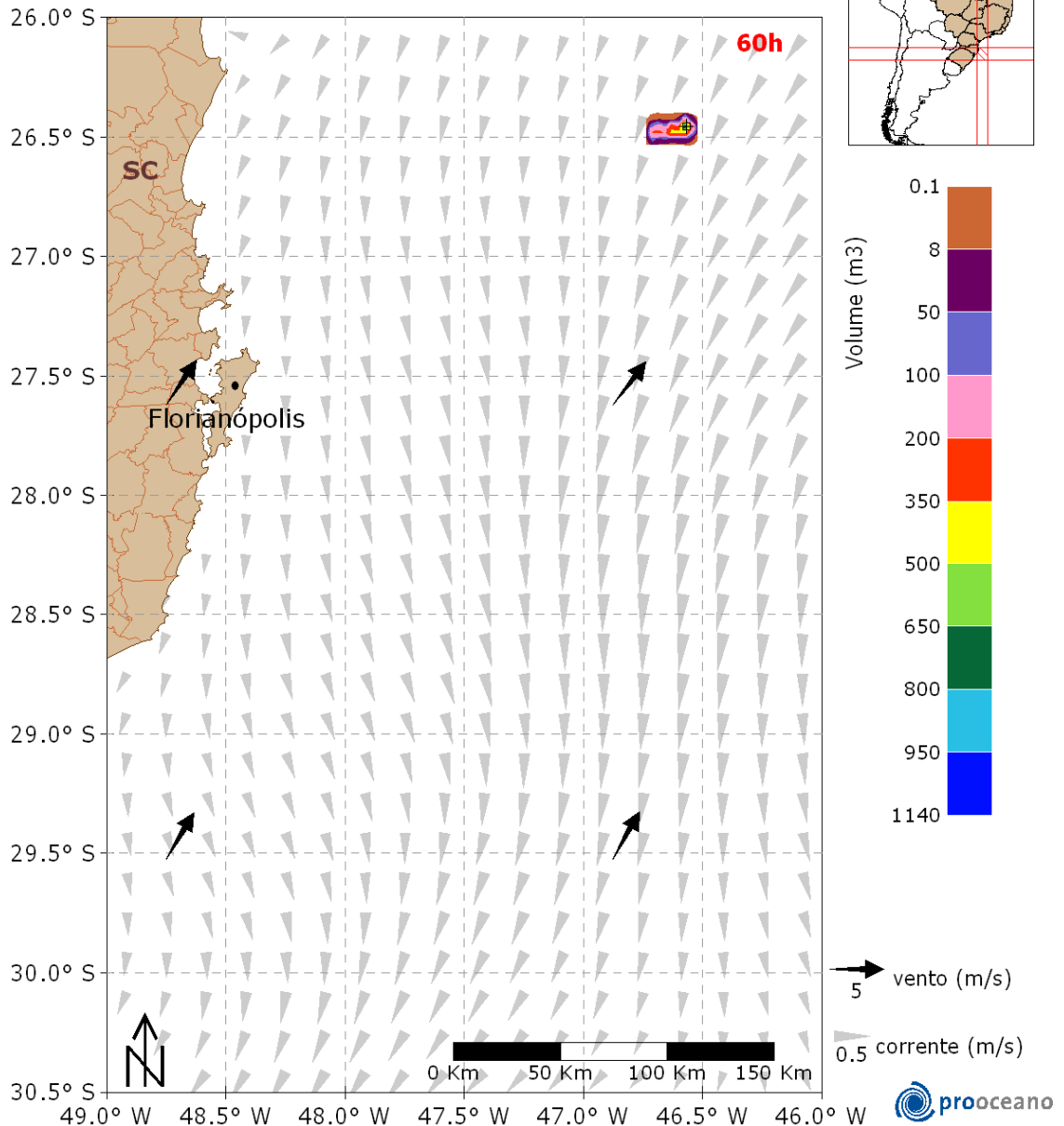


**Figura II.6.1.1-40** - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de inverno, após 36 horas de simulação.



# STROLL - Modo Determinístico

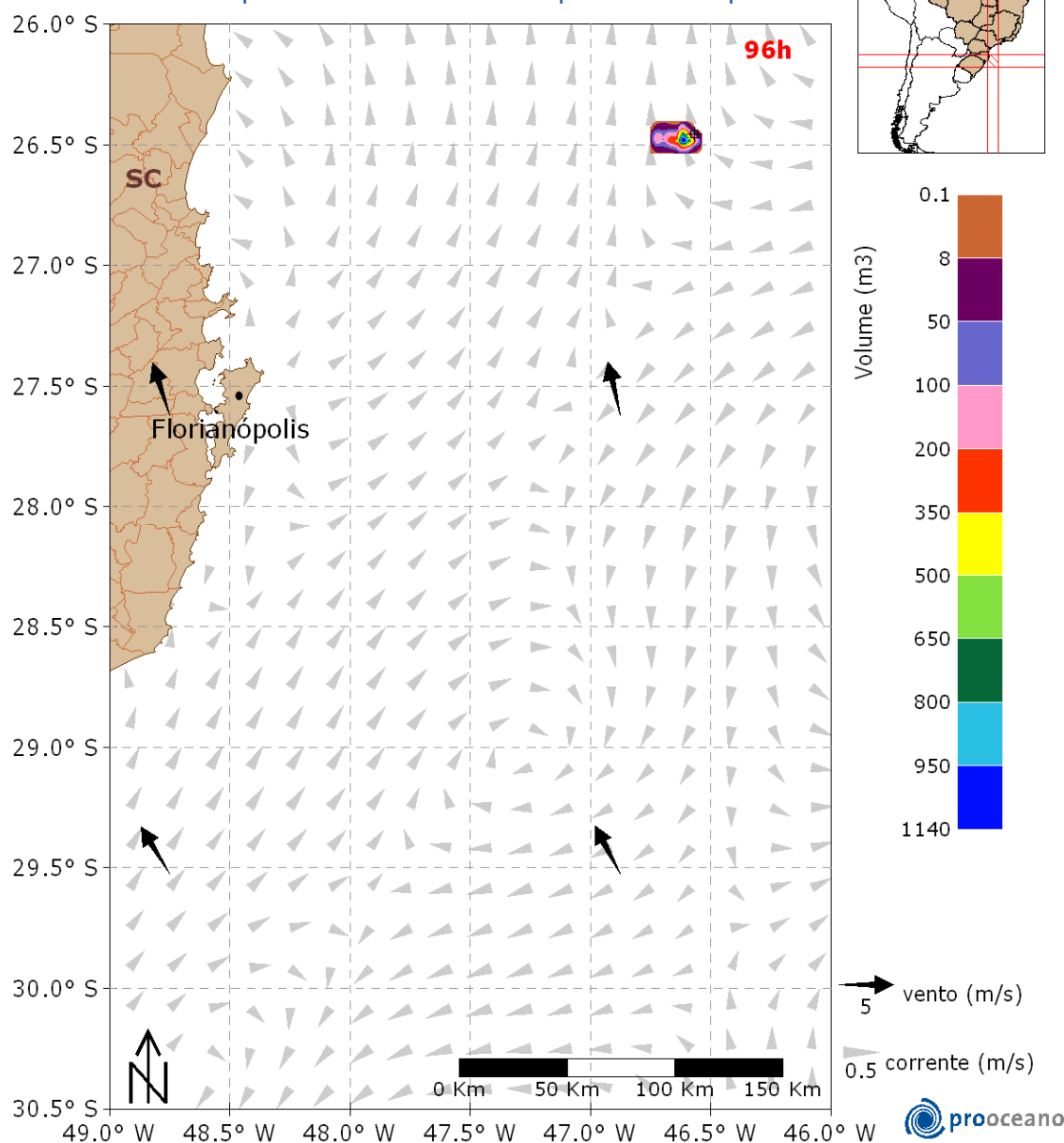
BM-S-40| Cenário de Inverno| C. M. Frequentes



**Figura II.6.1.1-41** - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 60 horas de simulação.

# STROLL - Modo Determinístico

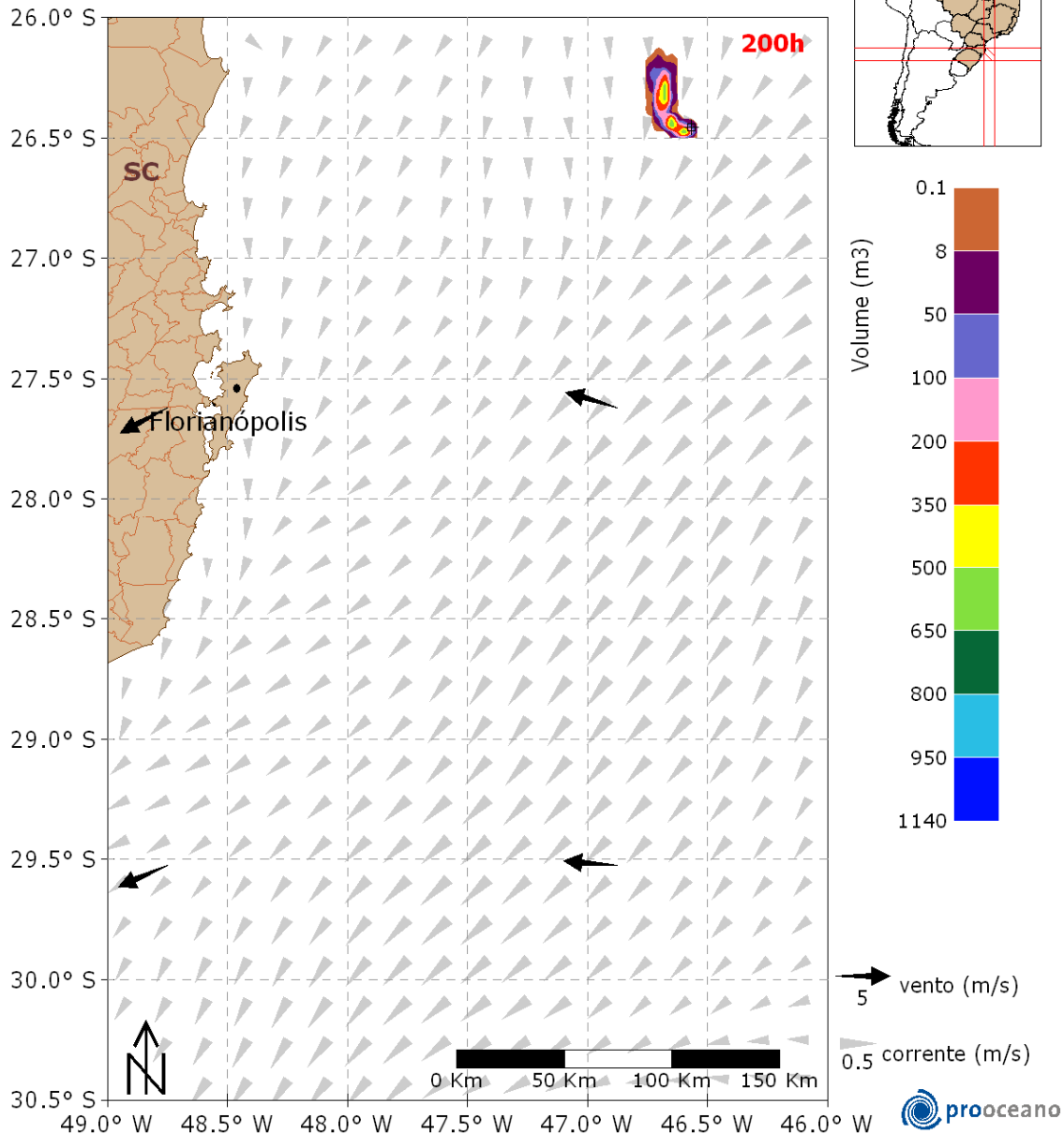
BM-S-40| Cenário de Inverno| C. M. Frequentes



**Figura II.6.1.1-42** - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de inverno, após 96 horas de simulação.

# STROLL - Modo Determinístico

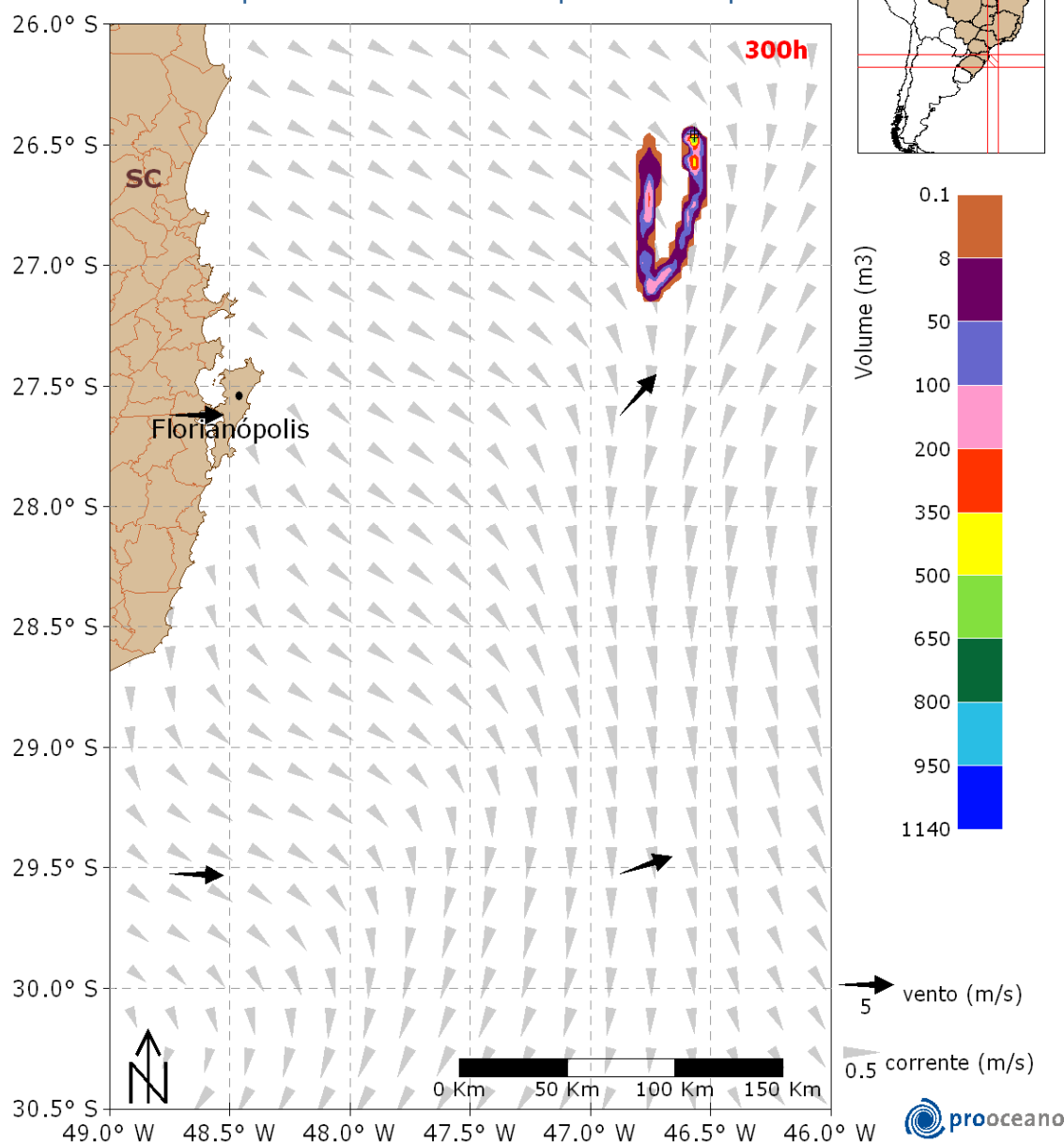
BM-S-40| Cenário de Inverno| C. M. Frequentes



**Figura II.6.1.1-43** - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de inverno, após 200 horas de simulação.

# STROLL - Modo Determinístico

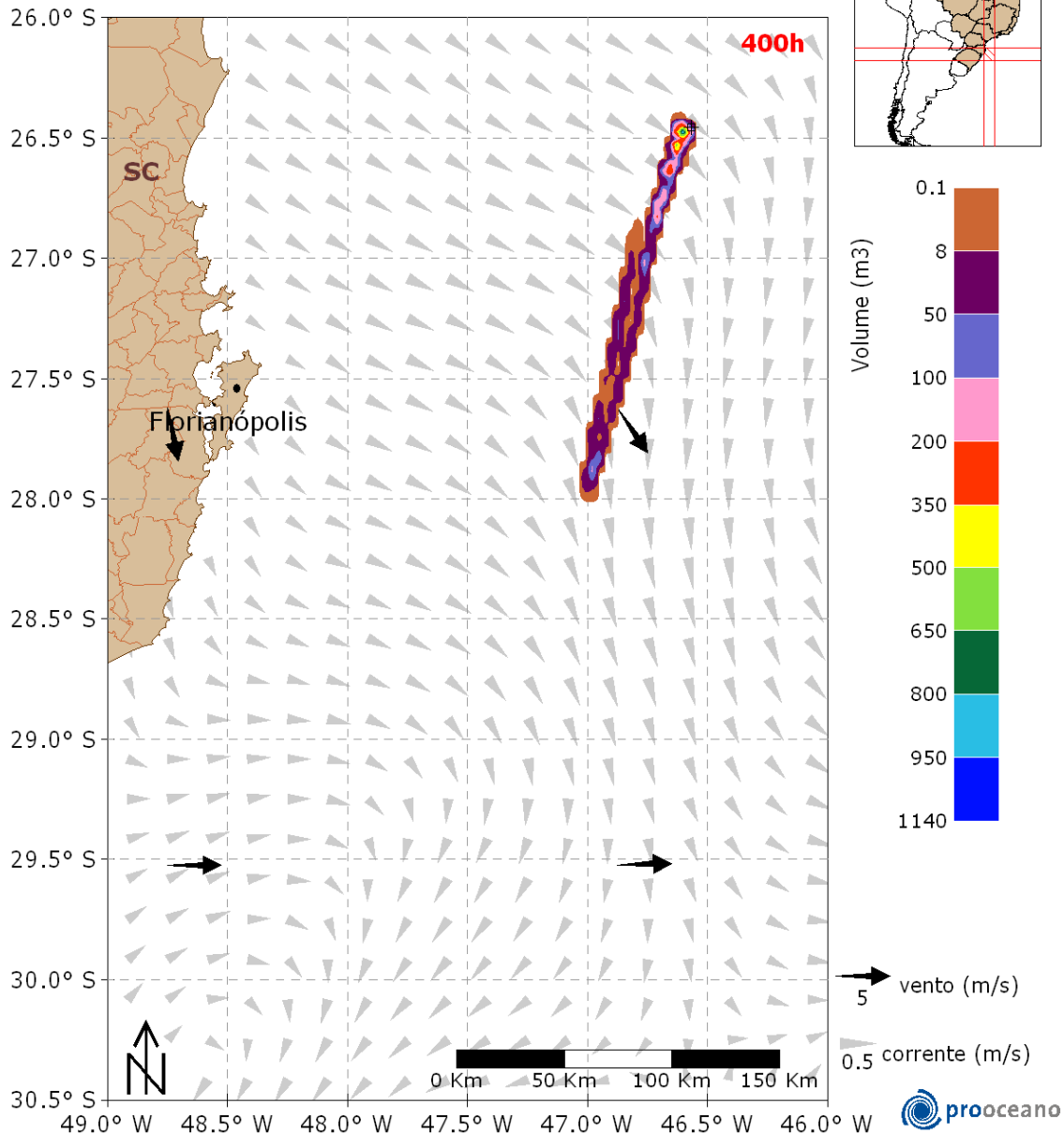
BM-S-40| Cenário de Inverno| C. M. Frequentes



**Figura II.6.1.1-44** - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de inverno, após 300 horas de simulação.

# STROLL - Modo Determinístico

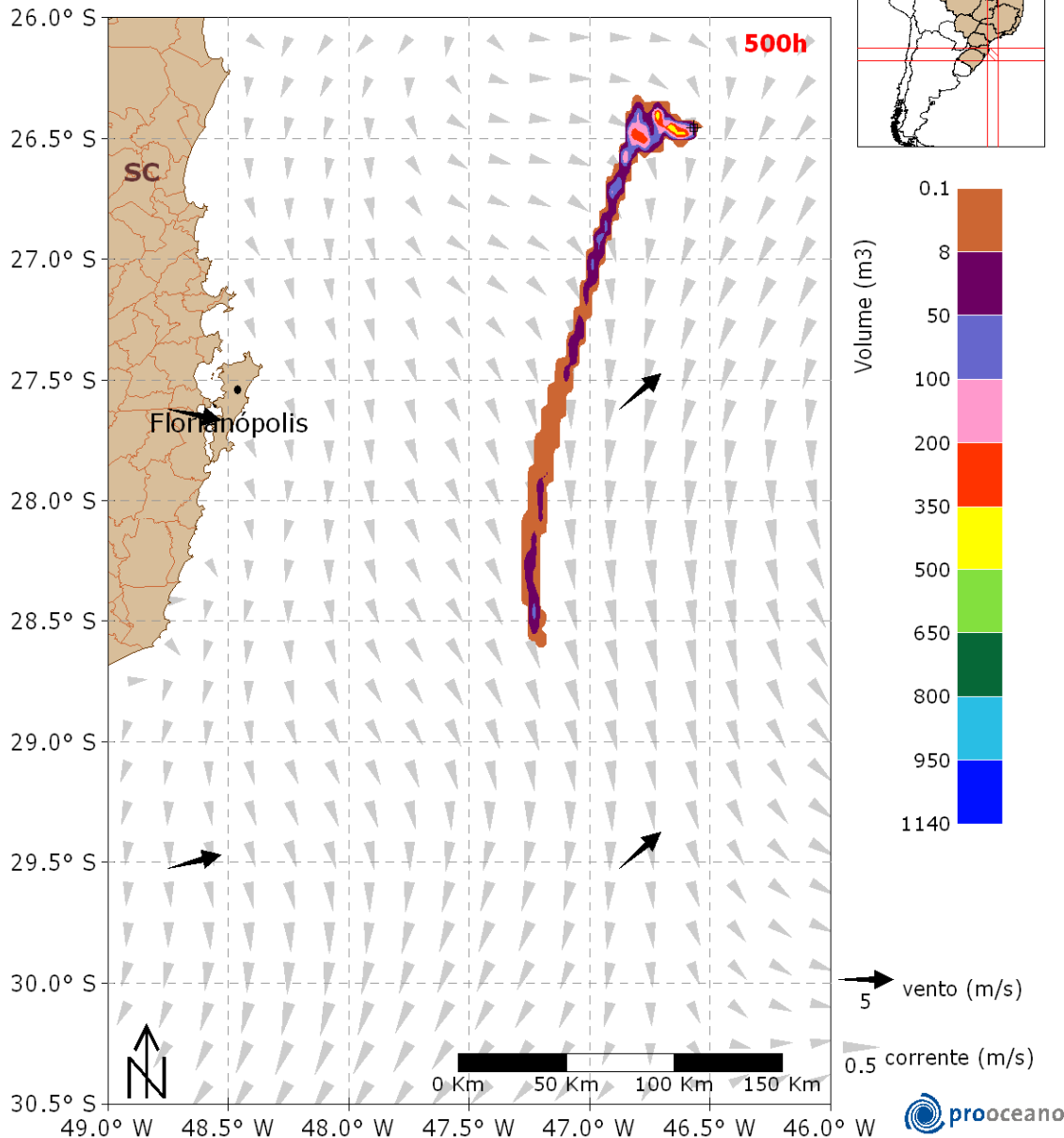
BM-S-40| Cenário de Inverno| C. M. Frequentes



**Figura II.6.1.1-45** - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de inverno, após 400 horas de simulação.

# STROLL - Modo Determinístico

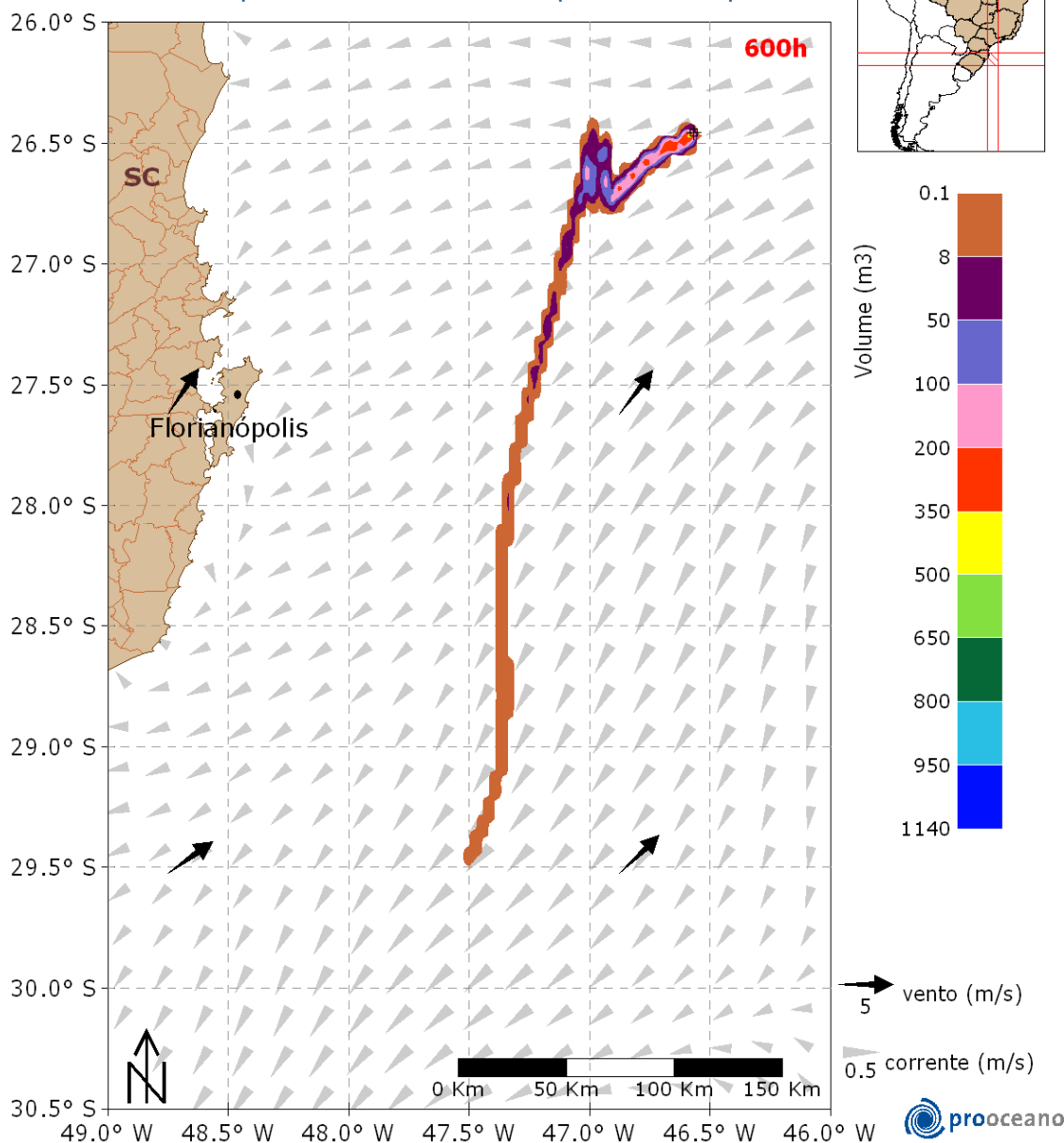
BM-S-40| Cenário de Inverno| C. M. Frequentes



**Figura II.6.1.1-46** - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de inverno, após 500 horas de simulação.

## STROLL - Modo Determinístico

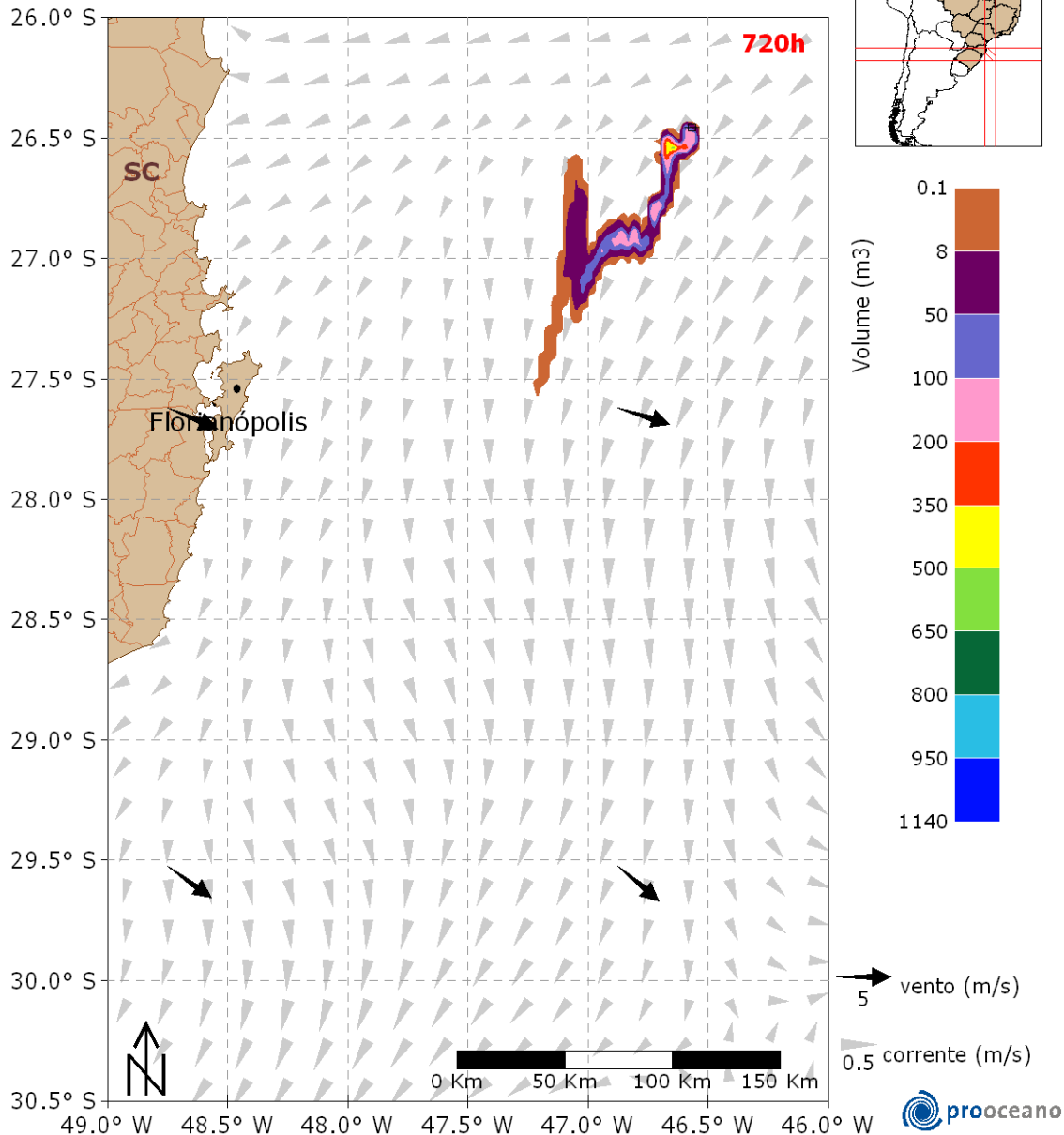
BM-S-40| Cenário de Inverno| C. M. Frequentes



**Figura II.6.1.1-47** - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 600 horas de simulação.

# STROLL - Modo Determinístico

BM-S-40| Cenário de Inverno| C. M. Frequentes

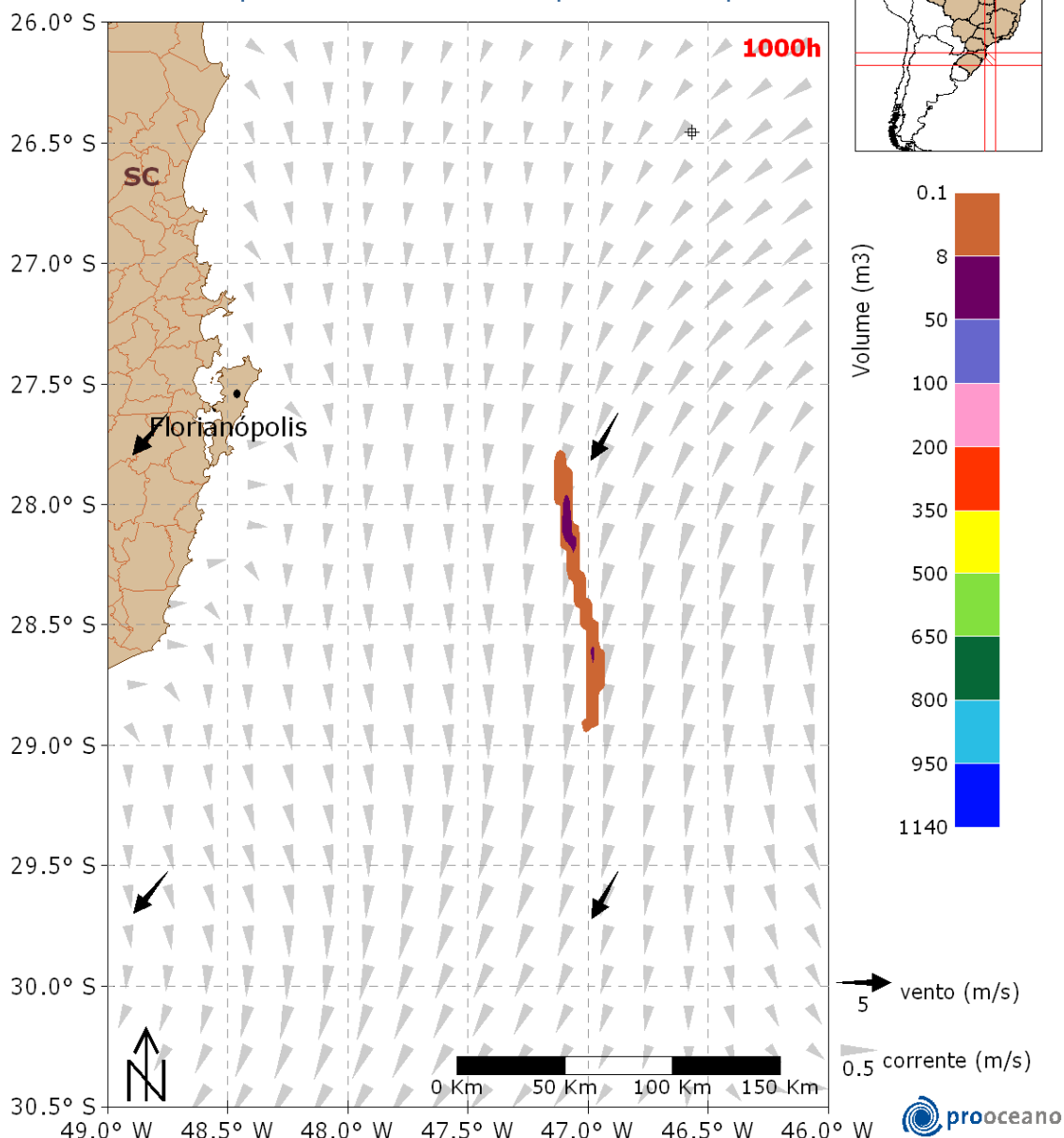


**Figura II.6.1.1-48** - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de inverno, após 720 horas de simulação.



## STROLL - Modo Determinístico

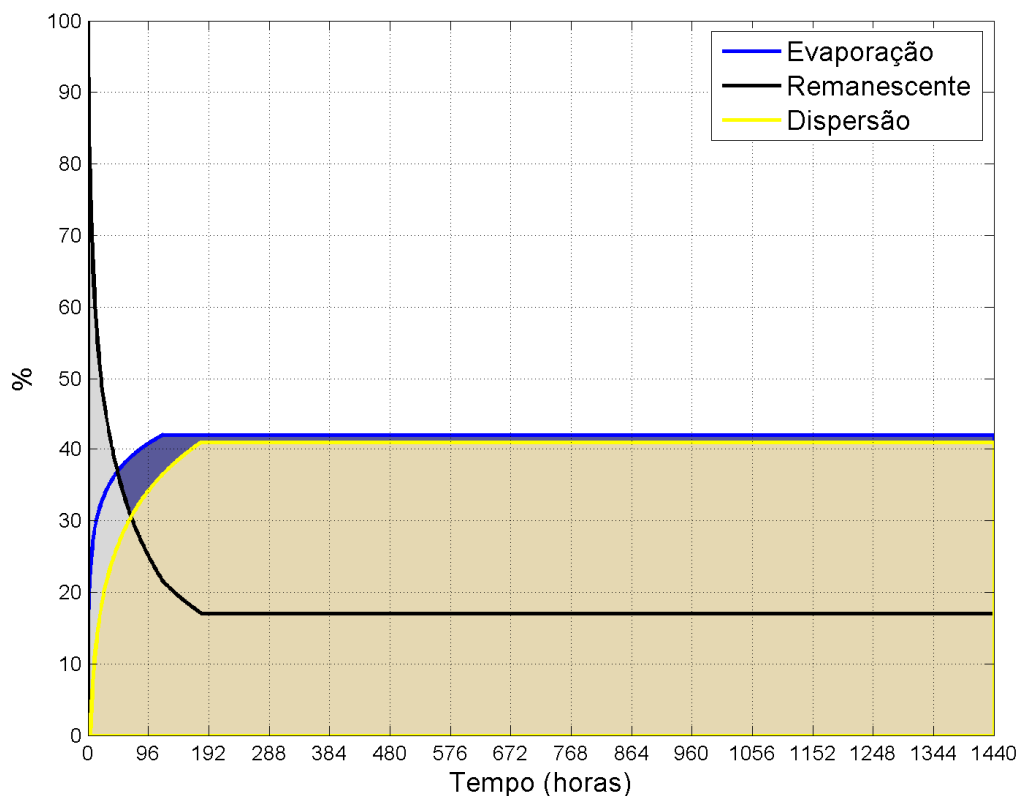
BM-S-40 | Cenário de Inverno | C. M. Frequentes



**Figura II.6.1.1-49** - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de inverno, após 1000 horas de simulação.

A deriva do óleo na simulação determinística neste cenário ocorreu preferencialmente rumo a sul do poço. Derivas rumo a norte foram notadas de forma mais acentuada em 200 horas de simulação. Após 1000 horas de simulação, o mesmo comportamento do cenário de verão foi observado. Não havendo mais óleo na superfície da água com espessuras superiores a  $3 \times 10^{-7}$  m, a partir de então.

Os processos que retiraram massa de óleo da superfície da água são apresentados a seguir na Figura II.6.1.1-50



**Figura II.6.1.1-50 - Evolução temporal do balanço de massa ao longo da simulação da trajetória do volume de pior caso ( $116.076 \text{ m}^3$ ) em condições meteorológicas frequentes, no cenário de inverno.**

Observa-se que a massa de óleo que permanece na superfície da água, ao final da simulação, é de aproximadamente 17%. O processo de evaporação foi o mais efetivo consumindo 42% do total.

### **II.6.1.1.7 - Conclusão**

Em todas as simulações probabilísticas para os cenários de verão e inverno, vazamento de pequeno ( $8 \text{ m}^3$ ) e médio ( $200 \text{ m}^3$ ) volume e *blow-out*, não houve probabilidade do óleo atingir a costa.

Os resultados obtidos na simulação de um descontrole do poço considerando um vazamento total de 116.076 m<sup>3</sup>, ao longo de 30 dias, mostraram a deriva do óleo seguindo preferencialmente rumo a sudoeste do poço.

Com base nos resultados do modo probabilístico foi escolhida a trajetória influenciada por condições meteo-oceanográficas frequentes em cada cenário, verão e inverno. Nas duas trajetórias a deriva do óleo foi preferencial rumo a sudoeste do poço, sendo que no cenário de inverno derivas a noroeste também foram observadas, devido, principalmente, à ocorrência de sistemas frontais neste período.

A situação de pior caso não foi apresentada, pois não houve probabilidade do óleo atingir a costa em nenhuma das simulações.

Os resultados obtidos em relação ao intemperismo do óleo mostraram que a massa total de óleo retirada da superfície da água foi maior na simulação determinística de verão, 92%, sendo que a dispersão foi mais efetiva e consumiu 52% desse total.

### **II.6.1.1.8 - BIBLIOGRAFIA**

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

DA Silva, A. P. F. ; CRUZ, L. M. ; FRAGOSO, M. ; DOS SANTOS, F. A. . Um Estudo Sobre o Número Ótimo de Simulações Numéricas para Elaboração dos Mapas de Probabilidade de Presença de Óleo no Mar Baseado na Variabilidade do Vento. In: III Congresso Brasileiro de Oceanografia, 2008, Fortaleza - CE. III Congresso Brasileiro de Oceanografia, 2008.

DELVIGNE G.A.L. and SWEENEY C.E.. Natural dispersion of Oil. Oil & Chemical Pollution 4 (1988) 281-310.

DELVIGNE G.A.L., HULSEN L. Simplified laboratory experiments of oil dispersion coefficient- Application of computations of natural oil dispersion. Proc. 17th AAM Oilspill Program Technical Seminar. Vancouver, Canada, 1994.

DING, L.; FARMER, D. M. 1994. Observations of breaking wave statistics. *Journal of Physical Oceanography* 24, 1368-1387.

ELLIOTT A.J. A probabilistic description of the wind over Liverpool Bay with application to oil spill simulations *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 61 (2004) 569–581.

ELPN/IBAMA. Informação Técnica nº 023/2002. Modelagem de Derramamento de Óleo no Mar.

FLORES, et al. Computer Modeling of Oil Spill Trajectories with a High Accuracy Method. *Spill Science & Technology Bulletin*. v. 5, n.5-6, 1999, p. 323-330.

JONES. R. 1997 A simplified Pseudo-component Oil evaporation Model. NOAA, USA in Proceedings of the Twentieth Arctic and Marine Oilspill Program, Technical Seminar, Volume 1, p.43-60. Vancouver, Canada.

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.

LEHR, W.J., JONES, R., EVANS, M., SIMECEK-BEATTY, D., OVERSTREET, R., 2002. Revisions of the ADIOS oil spill model. *Environmental Modelling and Software* 17, 191-199.

LEHR, W.J., SIMECEK-BEATTY, D., 2000. The relation of Langmuir circulation processes to the standard oil spill spreading, dispersion, and transport algorithms. *Spill Science and Technology Bulletin* 6, 247–253.

LYMAN, J. L.; REEHL, W.F.; ROSENBLATT, D.A. Handbook of Chemical Property Estimation Methods. American Chemical Society, Washington D.C., 1990.

MACKAY, D. & MATSUGU, R. S. 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.

MACKAY, D., SHIU, W.Y., HOSSAIN, K., STIVER, W., MCCURDY, D., PETERSON, S., TEBEAU, P. A., 1983. Development and Calibration of an Oil Spill Behavior Model, Report No. CG-D-27-83, United States Coast Guard Office of Research and Development, Groton, Conn., USA.

MONAHAN, E., 1971. Oceanic whitecaps. *Journal of Physical Oceanography* 1, 139–144.

NOAA. ADIOS™(Automated Data Inquiry for Oil Spill) version 2.0 Seattle: Hazardous materials Response and Assessment Division, NOAA. Prepared for the U. S. Coast Guard Research and Development Center, Groton Connecticut, 2000.

OEY, L.-Y., G.L. MELLOR, and R.I. HIRES, 1985a. A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary. Part I: Description of the model and model simulations, *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1676-1692.

OEY, L.-Y., G.L. MELLOR, and R.I. HIRES, 1985b. A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan estuary. Part II: Comparison with observation, *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1693-1709.

THIBODEAUX, L.J. *Chemodynamics: Environmental Movement of Chemicals in Air, Water, and Soil*. John Wiley and Sons, New York, 501 p., 1979.