

## **Anexo II.6.2 - Modelagem Hidrodinâmica e de Dispersão de Óleo**

### **II.6.2.1 - Modelagem Hidrodinâmica**

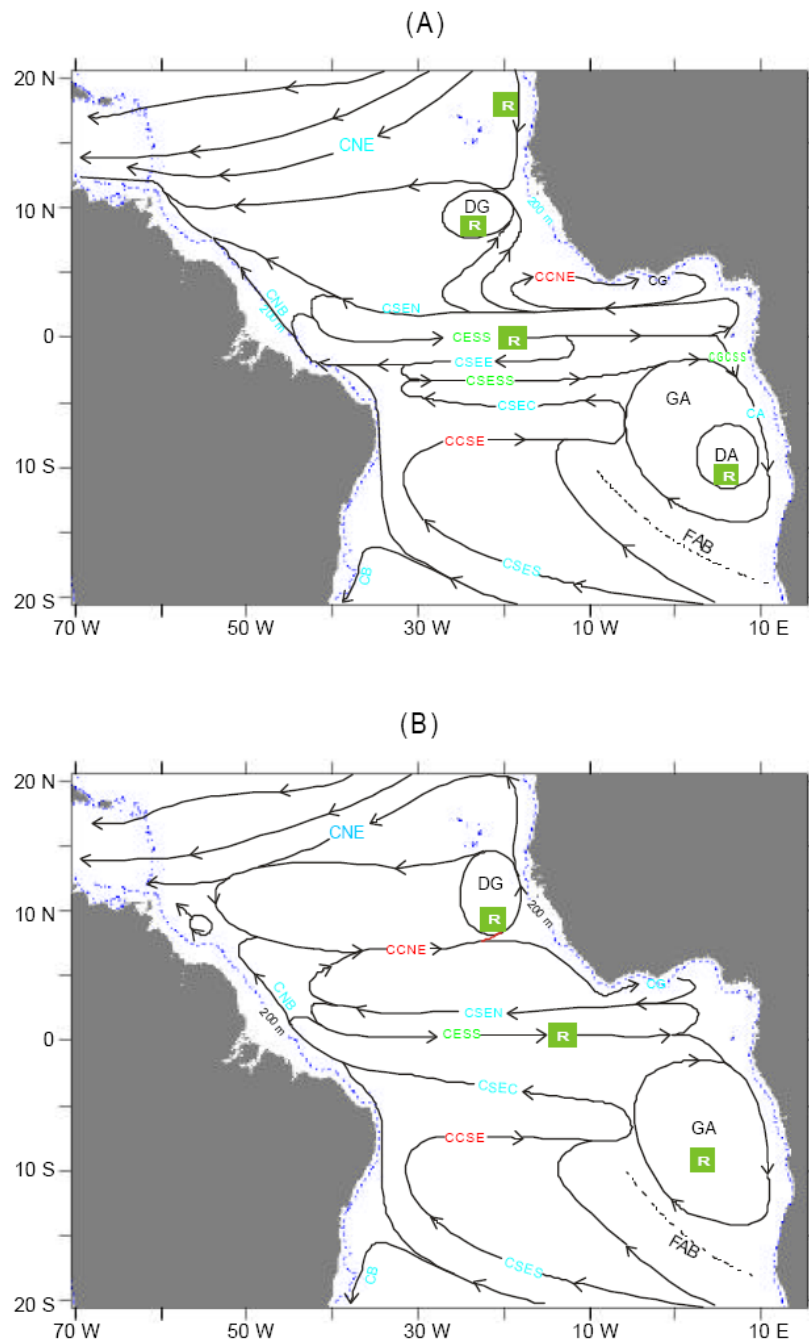
#### **II.6.2.1.1 - Introdução**

Os Blocos BM-POT-16 e BM-POT-17 situam-se em uma região cuja circulação oceânica é extremamente complexa. As variações de maré na costa norte do Brasil são as maiores de toda a costa brasileira. Por outro lado, a circulação da Plataforma Continental adjacente apresenta grande energia, com velocidades de correntes oceânicas associadas à Corrente Norte do Brasil, cujo transporte é bastante significativo. Portanto, a modelagem numérica hidrodinâmica desta região torna-se desafiadora. Os resultados devem ser capazes de reproduzir o mecanismo de maré, mas também a influência da circulação na plataforma adjacente. Desta forma, optou-se por realizar um aninhamento de grade com domínios e resoluções espaciais diferentes para que a parte mais importante da circulação da região dos Blocos BM-POT-16 e BM-POT-17 pudesse estar presente nos resultados obtidos e porconsequinte estes pudessem ser utilizados na modelagem de dispersão de óleo a contento.

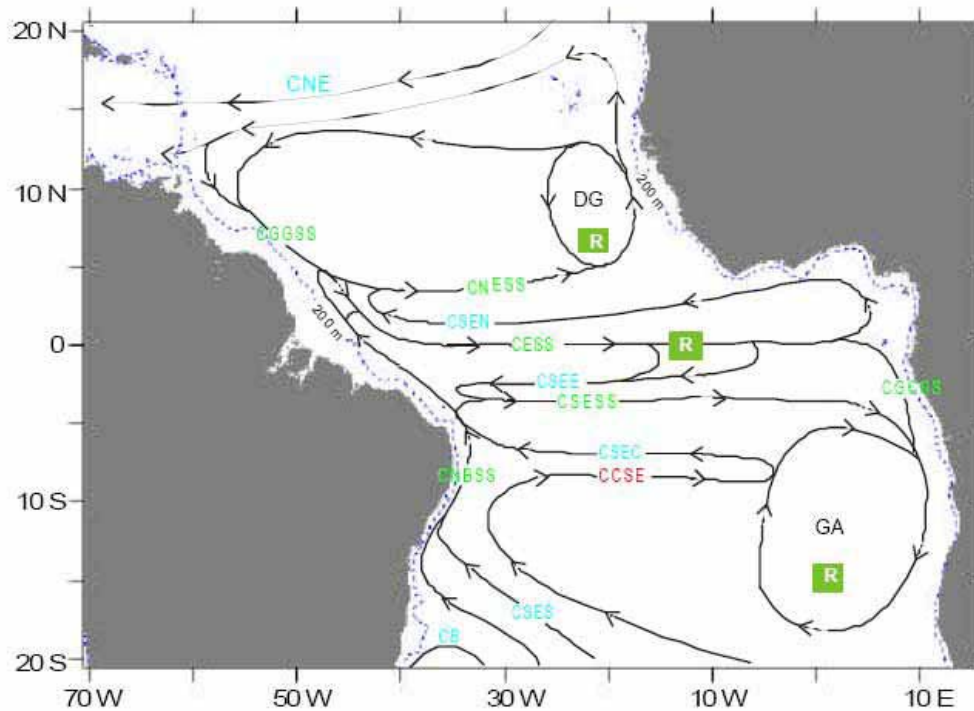
Detalhes sobre as grades utilizadas e as técnicas de aninhamento serão fornecidos no item II.6.2.1.4 .

#### **II.6.2.1.2 - Características Oceanográficas**

A região onde estão localizados os Blocos BM-POT-16 e 17 sofre a influência indireta da Corrente Norte do Brasil (CNB). A CNB é formada a partir da bifurcação do ramo sul da Corrente Sul-Equatorial (CSE), que flui para oeste em direção ao cabo de São Roque (ponto mais a leste da América do Sul), dividindo-se em duas partes: a Corrente Norte do Brasil (CNB) e a Corrente do Brasil (CB) (STRAMMA, 1991). Na Figura II.6.2.1.2-1 e na Figura II.6.2.1.2-2 são apresentados mapas das principais correntes no Atlântico Tropical em superfície entre 0 e 100 metros, e em subsuperfície (100 e 500 metros).



**Figura II.6.2.1.2-1** - Mapas esquemáticos mostrando a distribuição das principais correntes na camada superficial (entre 0 e 100 m) no Atlântico Tropical: (a) situação típica de outono/HS (março, abril e maio). (b) situação típica de primavera/HS (setembro, outubro e novembro). Fonte: Menezes, 1999.



**Figura II.6.2.1.2-2 - Mapa esquemático mostrando a distribuição das principais correntes na camada subsuperficial (entre 100 e 500 m) no Atlântico Tropical. Fonte: Menezes, 1999.**

Nessas figuras, CA é a Corrente de Angola; CB - Corrente do Brasil; CCNE - Contra-corrente Norte Equatorial; CCSE - Contra-corrente Sul Equatorial; CESS - Corrente Equatorial Subsuperficial; CG - Corrente da Guiné; CGCSS - Corrente do Gabão-Congo Subsuperficial; CNB - Corrente Norte do Brasil; CNE - Corrente Norte Equatorial; CSEC - Corrente Sul Equatorial ramo central; CSEE - Corrente Sul Equatorial ramo equatorial; CSEN - Corrente Sul Equatorial ramo norte; CSES - Corrente Sul Equatorial ramo sul; CSESS - Corrente Sul Equatorial Subsuperficial; DA - Domo de Angola; DG - Domo da Guiné; FAB - Frente Angola-Benguela; GA - Giro da Guiné; R - Áreas de provável ressurgência.

A circulação superficial do Atlântico Tropical, segundo Pickard & Emery (1995), é formada pelas seguintes correntes:

- Corrente norte equatorial (CNE), fluindo para oeste, a norte de 10° N, com velocidade média de 10-15 cm/s;

- Contra-corrente norte equatorial (CCNE), fluindo para leste entre 8° N e 3°N;

- Corrente sul equatorial (CSE) fluindo para oeste a sul de 3° N.

Atualmente, a CSE por apresentar uma estrutura muito complexa é subdividida em 3 ramos distintos: um mais ao norte (corrente sul equatorial ramo norte - CSEN), um central (corrente sul equatorial ramo central - CESC) e um ao sul (corrente sul equatorial ramo sul - CSES) (Stramma & Schott, 1999). Esses ramos são separados, respectivamente, pela corrente sul equatorial subsuperficial (CSESS) que flui entre 3° S e 5° S e pela contra-corrente sul equatorial (CCSE) que flui para leste entre 7° S e 9° S (Menezes, 1999).

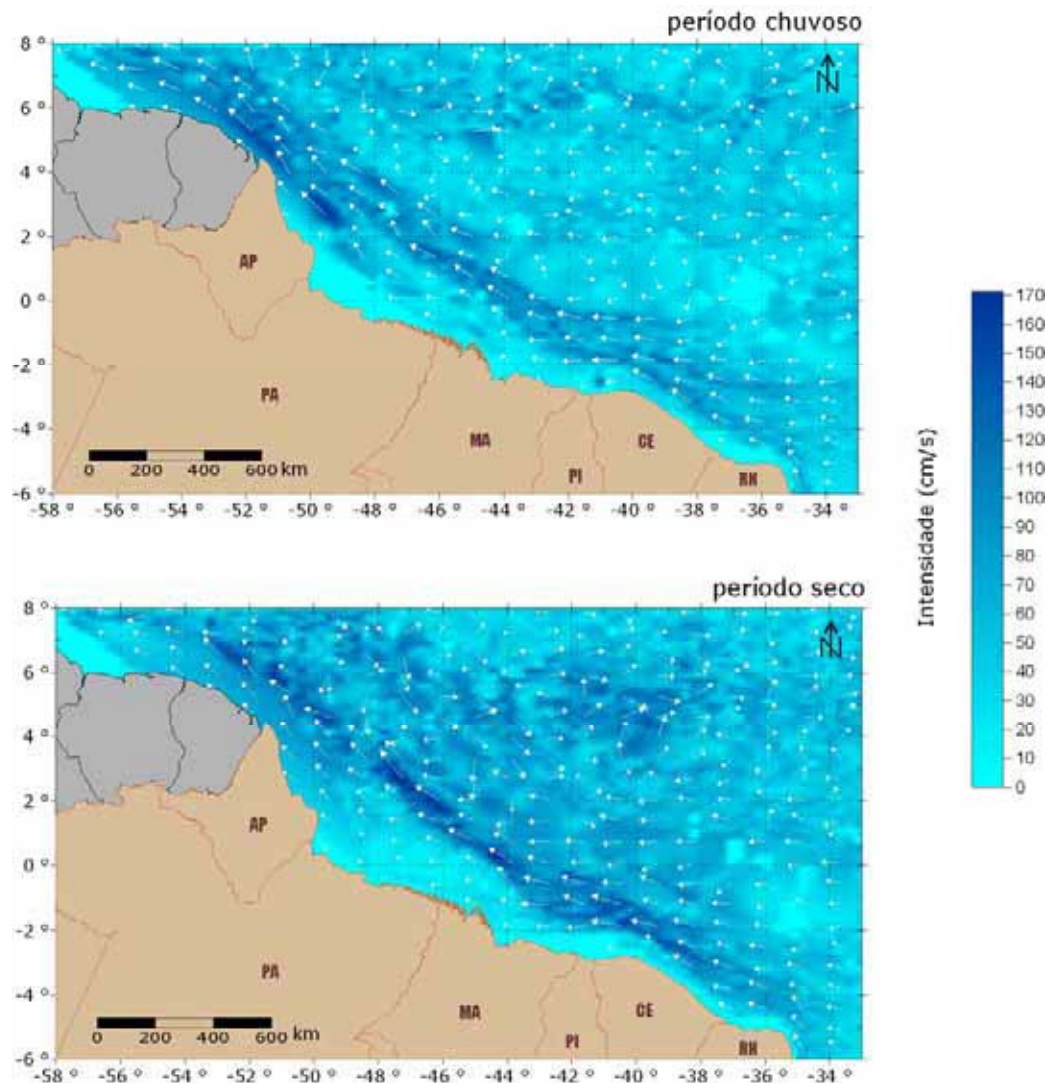
Próximo à costa do Brasil, a sul de 10° S, a CSES ramifica-se formando a corrente do Brasil (CB) que flui para sul com velocidade média de 10-15 cm/s e a corrente norte do Brasil (CNB) que cruza o equador e acelera, alcançando em 2° N a velocidade de 81 cm/s. Nesta localidade, 2° N, a CNB une-se à CSEN, fluindo próximo à costa na direção norte (Stramma, 1991). Devido à complexa estrutura da CSE no lado oeste da bacia atlântica, a localização exata da origem da CNB não é bem definida (Silveira et al., 1994).

Na segunda metade do ano, tipicamente de julho a setembro, a CNB divide-se próximo a 8° N – 50° W: uma parte continua para norte próximo à costa, primeiro como corrente das Guianas (CGG) e depois como corrente do Caribe (CC); outra parte inflete-se para fora da costa, alimentando a CCNE (Silveira et al., 1994 apud Menezes (1999)). Este processo é conhecido como a retroflexão da CNB. Segundo Johns et al. (1990) apud Menezes (1999), a separação da CNB é um processo fortemente estratificado, isto é, a camada superficial da CNB alimenta a CCNE; a camada da termoclina alimenta a corrente equatorial subsuperficial (CESS); e camada sub-termoclina, que é permanentemente retro-refletida entre 3° N e 5° N, alimenta a corrente norte equatorial subsuperficial (CNESS).

A CESS flui para leste, entre 50 e 300 metros de profundidade, a uma velocidade média de cerca de 100-110 cm/s. máxima e mínima observadas foram de 30,28°C e 26,92°C, respectivamente.

Para auxiliar a caracterização das correntes em superfície ainda foram utilizados dados obtidos por bóias de deriva no Interpolated Global Lagrangian

Drifter Database gerenciado pelo Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory (AOML). Os dados transmitidos pelas bóias são disponíveis na rede no endereço <http://www.aoml.noaa.gov>. Os dados analisados foram obtidos de diversas bóias no período de 1990 a 2005. Os resultados são mostrados na Figura II.6.2.1.2-3.

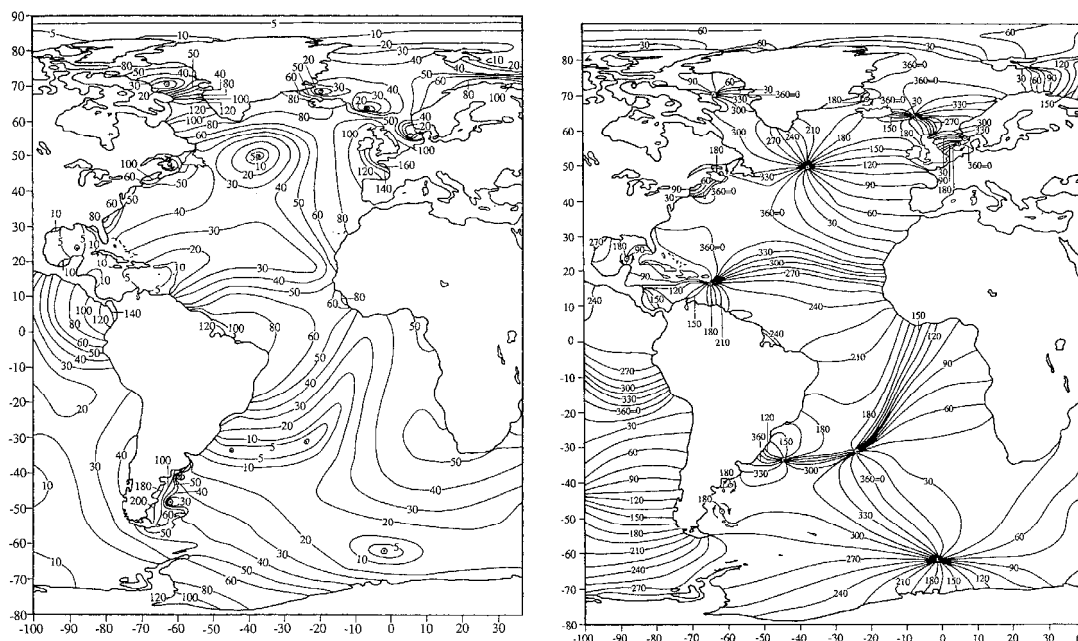


**Figura II.6.2.1.2-3 - Vetores de correntes para o período chuvoso e seco.**

É possível observar, baseado nos dados analisados, que as correntes superficiais na região apresentam sentido preferencial noroeste, indicando de acordo com a bibliografia, a presença da CNB. No entanto, no verão (período

chuvoso), a intensidade da CNB apresenta-se menor quando comparada com o inverno (período seco). Foram obtidos valores de intensidade máxima em torno de 1,75 m/s na CNB, para o período chuvoso, e 1,95 m/s no período seco.

Na região dos Blocos BM-POT-16 e 17, além da influência da circulação da CNB descrita anteriormente, ainda existe a influência direta da maré, sendo este talvez, o principal mecanismo forçante para as correntes ali presentes. Essa região possui uma das maiores amplitudes de maré da costa brasileira e de todo o globo. Tal fato é causado pela distribuição da variação da maré global no oceano, que naquela região possui grandes oscilações, em contraste com regiões influenciadas por pontos anfidrômicos, como a costa sudeste e sul do Brasil. A Figura II.6.2.1.2-4 mostra a distribuição das amplitudes e fases da principal componente de maré ( $M_2$ ) no Oceano Atlântico. Pode-se notar um núcleo de grandes amplitudes na região do Blocos BM-POT-16 e 17 e adjacências.



**Figura II.6.2.1.2-4 - Distribuição das amplitudes (cm) e fases (graus) da componente  $M_2$  da maré no Oceano Atlântico. Fonte: Schwerdski (1979).**

### **II.6.2.1.3 - Modelo Numérico Utilizado**

Para as simulações hidrodinâmicas da região do Blocos BM-POT-16 e BM-POT-17 foi utilizado o modelo conhecido como Regional Ocean Modeling System - ROMS (HAIDVOGEL ET AL., 2008). O ROMS é um modelo oceânico de superfície livre, coordenadas seguidoras de terreno e equações primitivas, utilizado amplamente pela comunidade científica em uma ampla gama de aplicações (e.g., Haidvogel et al., 2000; Marchesiello et al., 2003; Peliz et al., 2003). Os algoritmos não lineares que formam o cerne computacional do ROMS são descritos em detalhes em Shchepetkin e McWilliams (2003, 2005). O ROMS inclui modelos acoplados para processos biogeoquímicos, bio-ópticos, transporte de sedimentos e também inclui diversos regimes de mistura vertical (Warner et al., 2005a), níveis múltiplos de aninhamento e grades compostas.

Para minimizar o gasto computacional, as equações hidrostáticas primitivas de momento são resolvidas utilizando um passo de tempo dividido explicitamente, necessitando um tratamento especial e o acoplamento entre o modos barotrópicos (rápido) e baroclínicos (lento). Um número finito de passos de tempo barotrópicos, onde cada passo baroclínico é efetuado para desenvolver as equações de superfície livre e momento verticalmente integrado. No intuito de evitar erros associados com o aliasing de frequências resolvidas pelos passos barotrópicos mas não pelo passo baroclínico, são realizadas médias temporais nos campos baroclínicos antes de serem trocados com os valores obtidos com um passo baroclínico de maior duração. Um filtro de tempo cossenoidal, centrado no novo nível de tempo, é usado para fazer as médias dos campos barotrópicos (Shchepetkin and McWilliams, 2005). Além disso, o passo de tempo separado é forçado a manter a conservação de volume e a preservação de consistência, propriedades que são necessárias para as equações de traçadores (p.ex. temperatura e salinidade) (Shchepetkin and McWilliams, 2005). Atualmente, todas as equações em duas e três dimensões são discretizadas no tempo usando um algoritmo de passo de tempo, previsor (Leap-Frog) e corretor (Adams-Molton), de terceira ordem que

é altamente robusto e estável. A estabilidade reforçada pelo esquema permite passos de tempo mais longos, por um fator de aproximadamente quatro, o qual mais do que compensa o custo elevado do algoritmo predictor-corrector.

As equações primitivas são discretizadas verticalmente sobre a variável topografia utilizando coordenadas seguidoras de terreno “esticadas” (Song and Haidvogel, 1994). As coordenadas esticadas permitem o aumento da resolução em áreas de interesse, como a termoclina e as camadas limites de fundo. A grade padrão utiliza diferenças finitas de segunda ordem, centradas em uma grade vertical irregular. Opções para grades de ordens maiores são disponíveis via uma reconstrução conservativa de derivadas verticais (Shchepetkin e McWilliams, 2005). Esta classe de modelo apresenta grande sensibilidade à topografia, resultando em erros do gradiente de pressão. Estes erros aumentam devido a divisão do termo do gradiente de pressão em um componente ao longo da coordenada sigma e uma correção hidrostática (para maiores detalhes, veja Haidvogel e Beckmann, 1999). O algoritmo numérico no ROMS é desenvolvido para minimizar tais erros (Shchepetkin e McWilliams, 2003).

Na horizontal, as equações primitivas são calculadas usando coordenadas ortogonais curvilíneas ajustadas ao contorno em uma grade C de Arakawa irregular. A formulação geral das coordenadas curvilíneas incluem as coordenadas cartesianas e as esféricas. Contornos de costa também podem ser especificados como uma grade discretizada finitamente pela máscara terra/mar. Assim como na vertical, a grade horizontal utiliza diferenças finitas de segunda ordem centradas. Entretanto, o código é desenvolvido para fazer a implementação de grades de maior ordem facilmente.

Existem várias opções para esquemas de advecção: diferenças centradas de segunda e quarta ordens; e terceira ordem, upstream biased. Este último esquema, padrão do modelo, apresenta uma dissipação hiper-difusa dependente da velocidade como erro dominante de truncamento (Shchepetkin e McWilliams, 1998). Estes esquemas são estáveis para a metodologia de previsão e correção do modelo. Além disso, há uma opção para representação da advecção vertical, utilizando spline parabólico conservativo, que tem



propriedades de dispersão similares a um esquema convencional preciso de oitava ordem.

Várias parametrizações de escala de sub-grade estão presentes no ROMS. A mistura vertical de momento e de traçadores pode ocorrer no níveis verticais, superfícies geopotenciais (profundidade constante), ou superfícies isopícnais (densidade constante). O operador de mistura pode ser harmônico (arranjo de 3 pontos) ou biharmônico (arranjo de 5 pontos). Em Haidvogel e Beckmann (1999) podem ser obtidos maiores esclarecimentos sobre estes operadores.

A parametrização vertical de mistura no ROMS pode ser tanto por esquemas de fechamento locais, como não-locais. Os esquemas de fechamento locais são baseados nas equações de energia cinética turbulenta de nível 2.5 de Mellor and Yamada (1982) e na parametrização de Escala Genérica de Dimensão (EGD) (Umlauf and Burchard, 2003). O esquema de fechamento não-local é baseado na formulação da camada limite, perfil-K, definida por Large et al. (1994). O esquema de perfil-k tem sido expandido para incluir tanto os limites de camadas de superfície quanto os de fundo. O EGD é um modelo de turbulência de duas equações que permite uma ampla variedade de fechamentos de mistura vertical, incluindo os esquemas k-kl (Mellor-Yamada level 2.5), k-e e k-w. Muitas funções de estabilidade têm sido empregadas para favorecer a flexibilidade. Um estudo recente (Warner et al., 2005a) avaliou a performance desses fechamentos de turbulência no ROMS, em aplicações de transporte de sedimentos idealizado. Além disso, existe um esquema de camada limite de fundo onda/corrente que provoca o estresse de fundo (Styles and Glenn, 2000) e o transporte de sedimentos, que tem ganhado importância em aplicações costeiras.

Atualmente, a camada limite de interação ar-mar utilizada no ROMS, baseia-se na parametrização de Fairall et al. (1996). Esta foi adaptada do algoritmo COARE (*Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment*) para o cálculo de fluxos de momentum de superfície, calor sensível, e calor latente. Esta camada limite é utilizada para o acoplamento com modelos atmosféricos.

O ROMS é um código altamente moderno e modular escrito em F90/95. Utiliza pré-processamento C (CPP) para ativar as diversas opções físicas e

numéricas. Muitos padrões de códigos têm sido estabelecidos para facilitar a leitura, manutenção e portabilidade do modelo. Todas as variáveis do modelo de estado são dinamicamente alocadas e passadas como argumento das rotinas computacionais.

O conjunto de equações governantes do ROMS é formado pelas equações primitivas do movimento, fazendo uso das aproximações de Boussinesq, plano  $\beta$  e hidrostática. Referenciando-se a um sistema de coordenadas cartesianas ortogonais com valores positivos de  $x$  no sentido leste e de  $y$  no sentido norte e realizando a transformação para coordenada sigma, tem-se o conjunto de equações básicas utilizadas pelo ROMS.

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento na direção zonal:

$$\frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UV D}{\partial y} + \frac{\partial U \omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gD^2}{\rho_o} \int_{\sigma}^{\sigma'} \left[ \frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] + F_x \quad (2)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento na direção meridional:

$$\frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial UV D}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V \omega}{\partial \sigma} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gD^2}{\rho_o} \int_{\sigma}^{\sigma'} \left[ \frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] + F_y \quad (3)$$

Equação da conservação de calor:

$$\frac{\partial \theta D}{\partial t} + \frac{\partial \theta UD}{\partial x} + \frac{\partial \theta VD}{\partial y} + \frac{\partial \theta \omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_H}{D} \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} \right] + F_\theta - \frac{\partial R}{\partial z} \quad (4)$$

Equação da conservação de sal:

$$\frac{\partial S D}{\partial t} + \frac{\partial S UD}{\partial x} + \frac{\partial S VD}{\partial y} + \frac{\partial S \omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] + F_s \quad (5)$$

Equação de estado da água do mar:

$$\rho = \rho(S, \theta, P) \quad (6)$$

Nestas equações  $D = H + \eta$ ,  $U$  e  $V$  são os componentes zonal e meridional da velocidade, respectivamente,  $f$  é o parâmetro de Coriolis,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\rho$  é a densidade,  $\rho_0$  é a densidade de referência,  $\rho'$  é a anomalia de densidade,  $\theta$  é a temperatura potencial,  $S$  é a salinidade,  $KM$  é o coeficiente de viscosidade cinemática vertical,  $KH$  é o coeficiente de difusão de calor vertical,  $\partial R / \partial z$  é o termo de fluxo de calor radiativo e  $\omega$  é a velocidade vertical transformada, correspondente à componente de velocidade normal às superfícies sigma. Essa transformação se dá segundo:

$$W = \omega + U \left( \sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + V \left( \sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \sigma \frac{\partial D}{\partial a} + \frac{\partial \eta}{\partial a} \quad (7)$$

#### II.6.2.1.4 - Estratégia de Modelagem

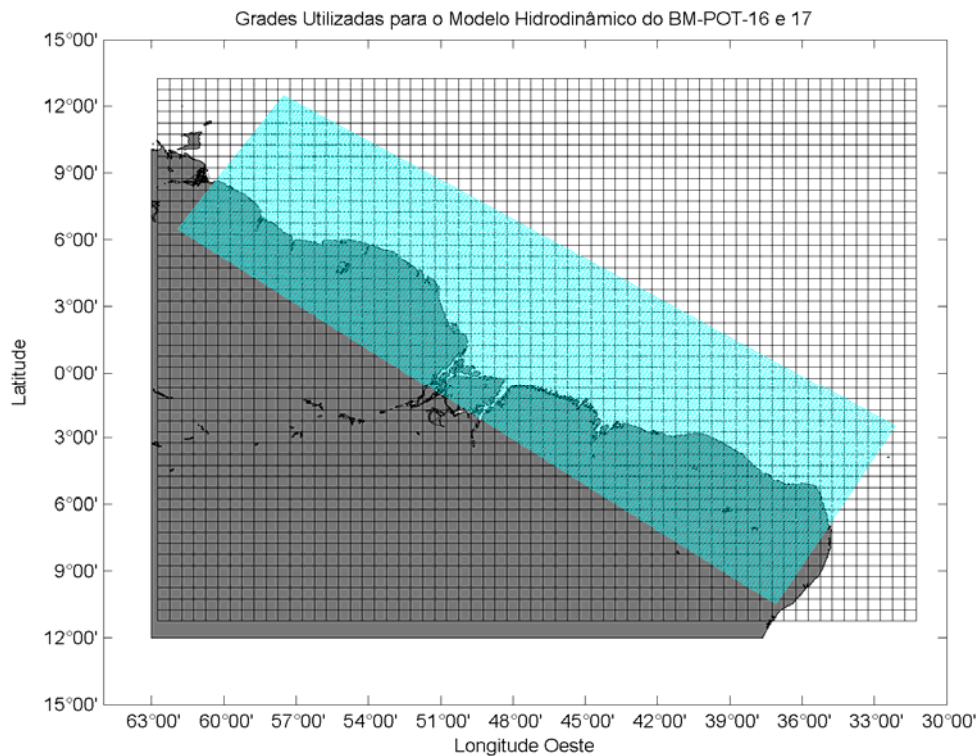
De modo a tornar o modelo hidrodinâmico para a região dos Blocos BM-POT-16 e 17 capaz de reproduzir o mecanismo de maré e também capturar a influência da circulação na plataforma adjacente, optou-se por realizar um aninhamento de grade, descrito a seguir.

A Figura II.6.2.1.4-1 e a Figura II.6.2.1.4-2 apresentam o domínio (em preto) da grade que fornece as condições de contorno e iniciais (SODA\_POP) para o modelo aninhado do BM-POT-16 e do BM-POT-17 (grade em azul). O fluxo de informações segue então o seguinte esquema: SODA\_POP → ROMS\_BM-POT-16 e 17.

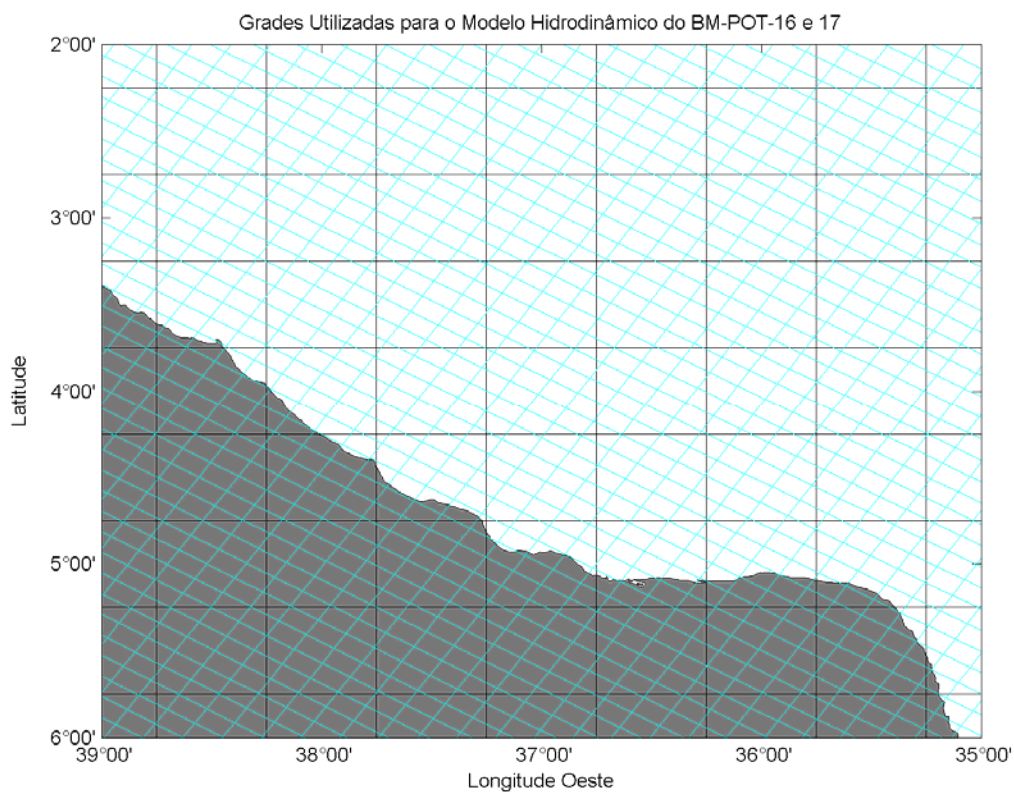
A base de dados do SODA (*Simple Ocean Data Assimilation*) consiste em uma análise global de 46 anos (1950-1995) de dados de temperatura, salinidade e correntes, com resolução espacial de  $0,5^\circ$ . O projeto SODA utiliza um modelo de previsão baseado no modelo POP (Parallel Ocean Program) forçado pelos ventos do ERA-40.

O modelo foi integrado por dois anos (2006 e 2007) utilizando médias mensais para temperatura do mar, salinidade, elevação da superfície e fluxos de momento obtidos pelo modelo global SODA\_POP. Trata-se portanto do que se convencionou chamar de aninhamento *offline* em dois níveis.

O esquema de interpolação dos dados de uma grade para outra seguiu a metodologia proposta por Sikiric (2009).

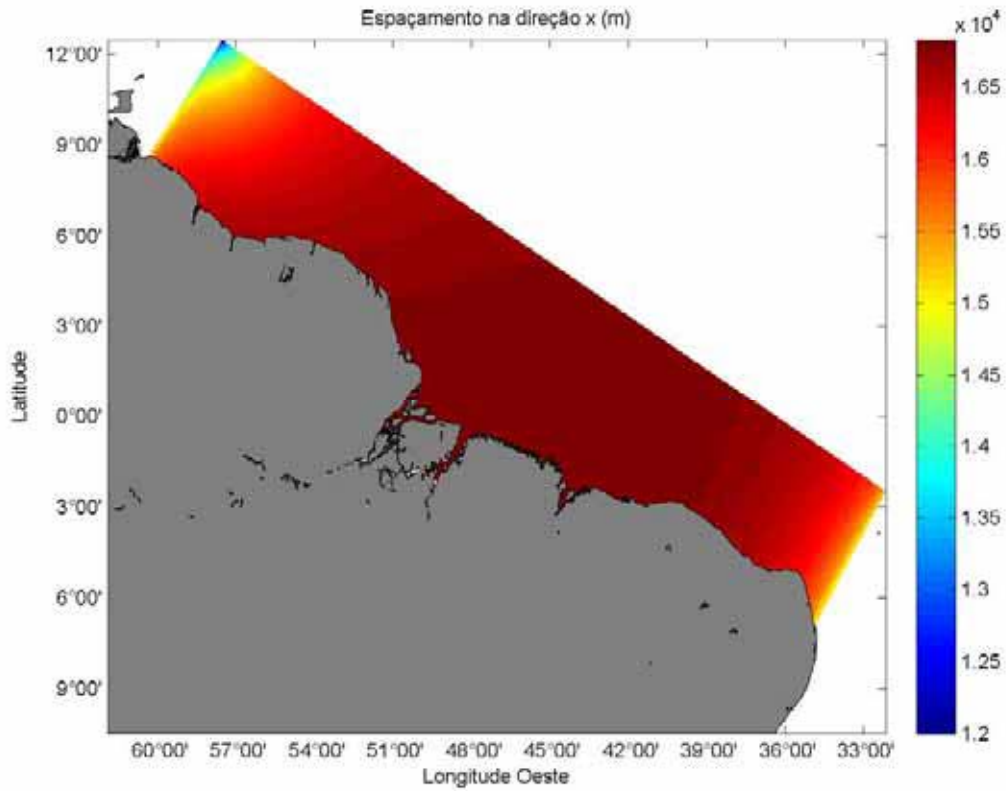


**Figura II.6.2.1.4-1 – Esquema de aninhamento de grades para obtenção de condições de contorno e iniciais para a modelagem hidrodinâmica dos Blocos BM-POT-16 e 17.**

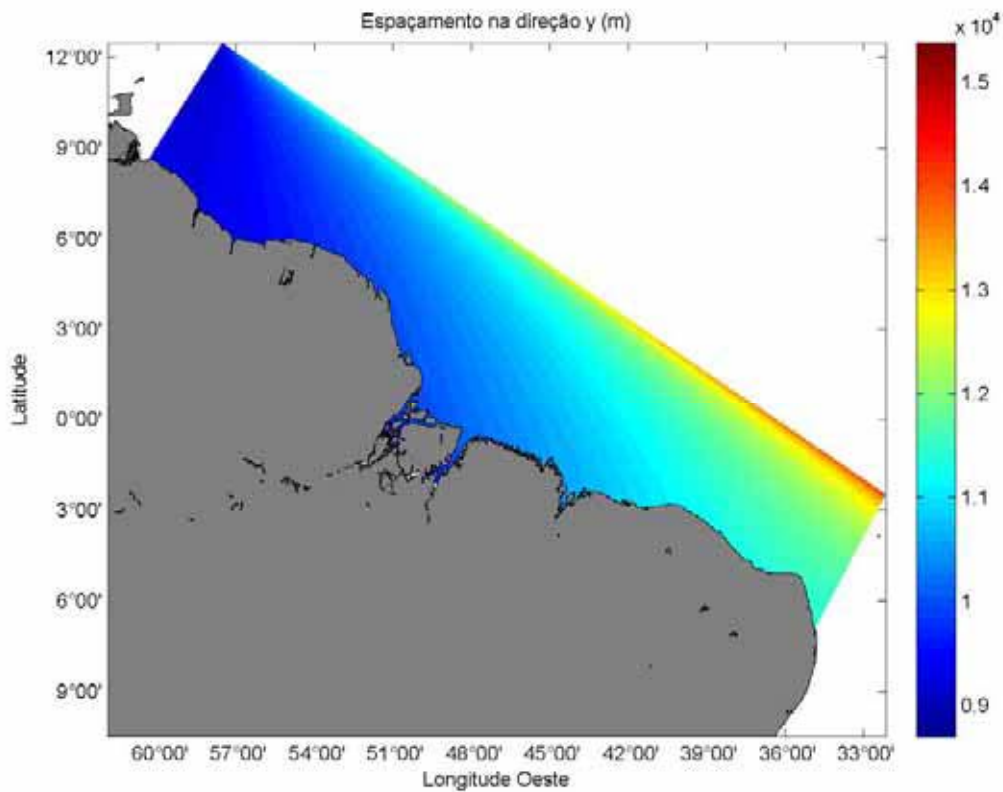


**Figura II.6.2.1.4-2 – Detalhe do esquema de aninhamento de grades para obtenção de condições de contorno e iniciais para a modelagem hidrodinâmica dos Blocos BM-POT-16 e 17.**

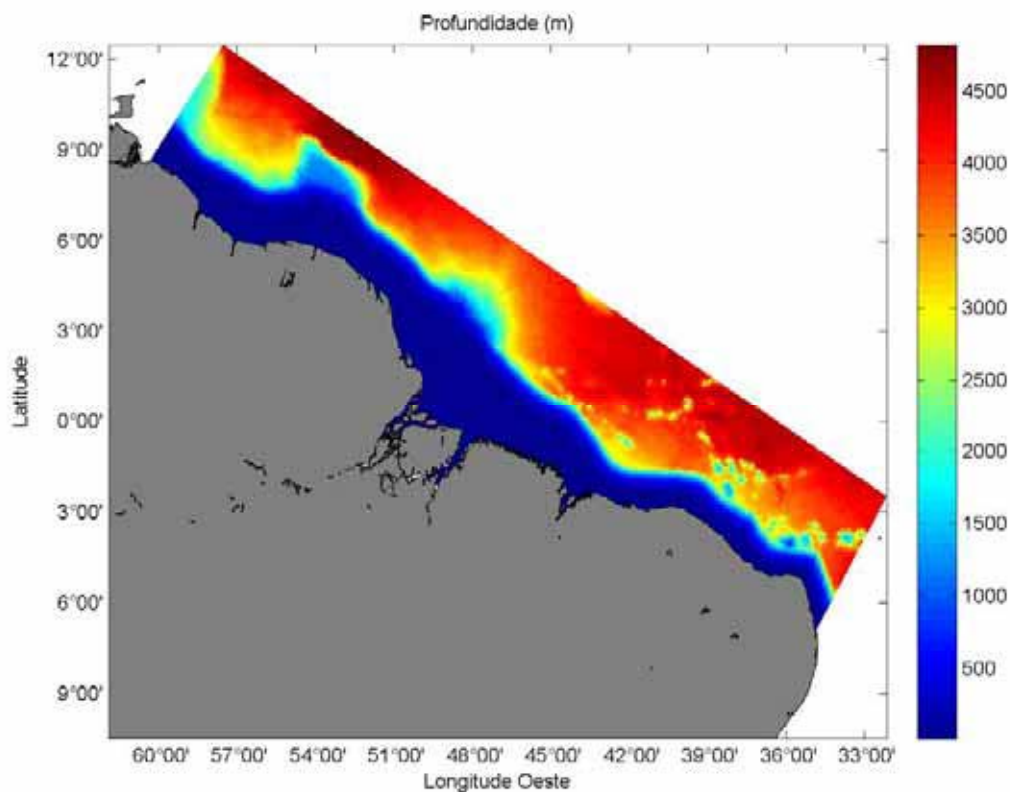
As figuras a seguir (Figura II.6.2.1.4-3 à Figura II.6.2.1.4-5) mostram a resolução espacial da grade do BM-POT-16 e do BM-POT-17, e a batimetria utilizada como condição de contorno de fundo.



**Figura II.6.2.1.4-3 – Resolução espacial (m) da grade dos Blocos BM-POT-16 e 17 na direção x (dx).**



**Figura II.6.2.1.4-4 - Resolução espacial (m) da grade do BM-POT-16 e 17 na direção y (dy).**



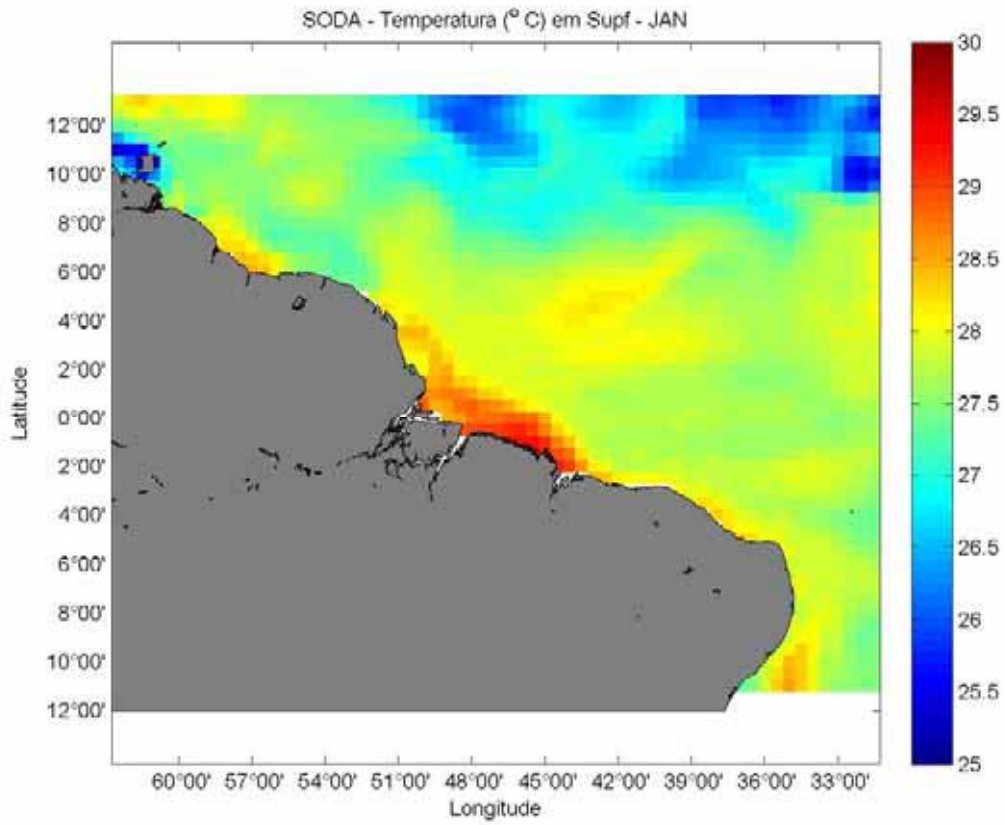
**Figura II.6.2.1.4-5 – Batimetria obtida a partir da digitalização das cartas náuticas da região em composição com dados do ETOPO1 e interpoladas para a grade do modelo dos Blocos BM-POT-16 e 17.**

A resolução espacial da grade varia entre poucas dezenas de metros a dezenas de quilômetros na região da plataforma continental. A grade possui 200x90 pontos na horizontal e 20 camadas verticais.

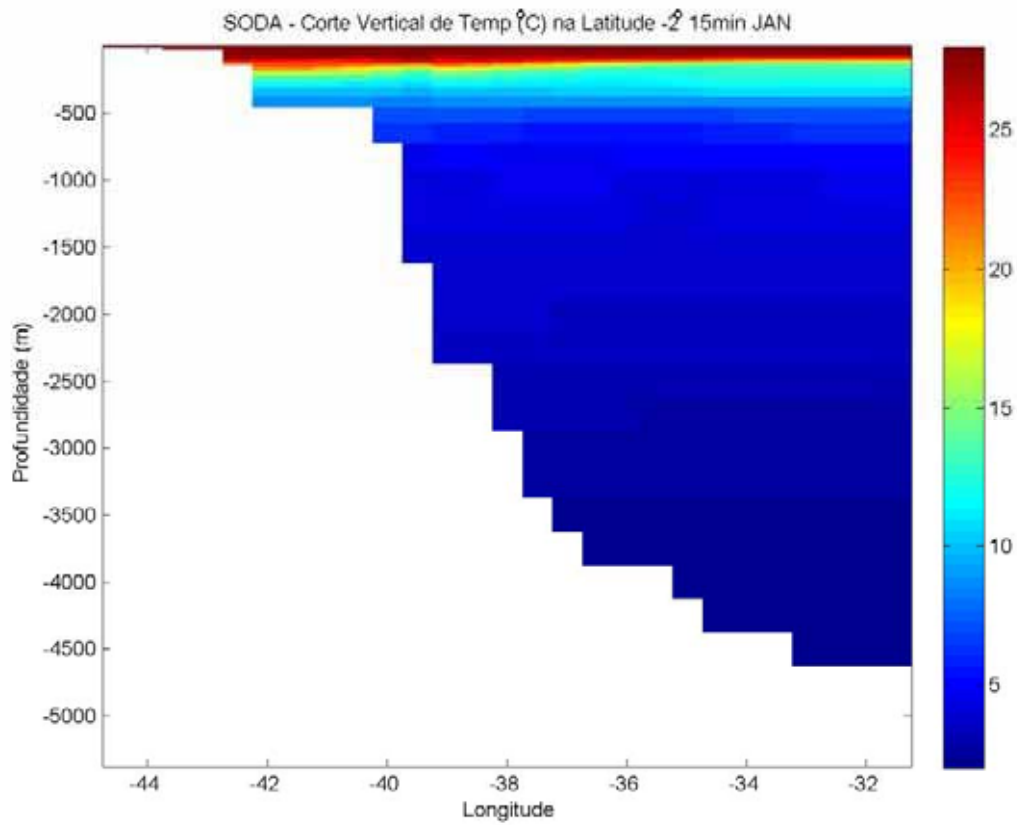
### **II.6.2.1.5 - Condições de Contorno e Iniciais**

As figuras a seguir (Figura II.6.2.1.5-1 à Figura II.6.2.1.5-8) mostram as condições de contorno e iniciais utilizadas na modelagem, seguindo o fluxo de informações SODA\_POP → ROMS\_BM-POT-16 e 17.

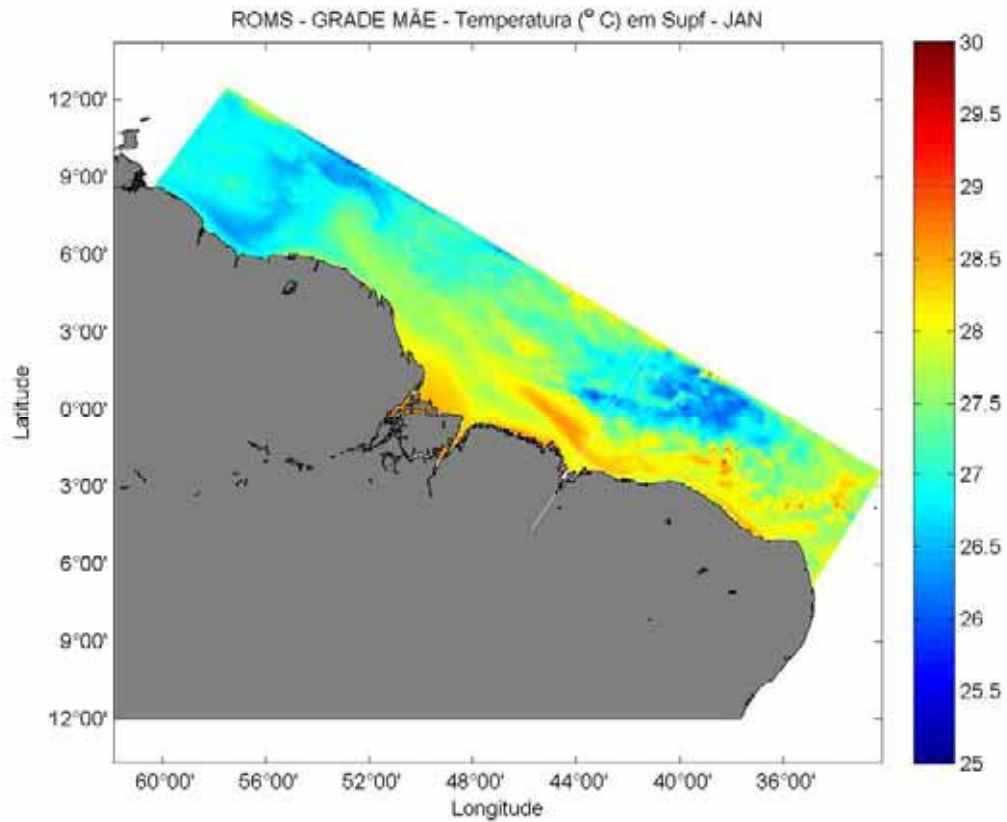




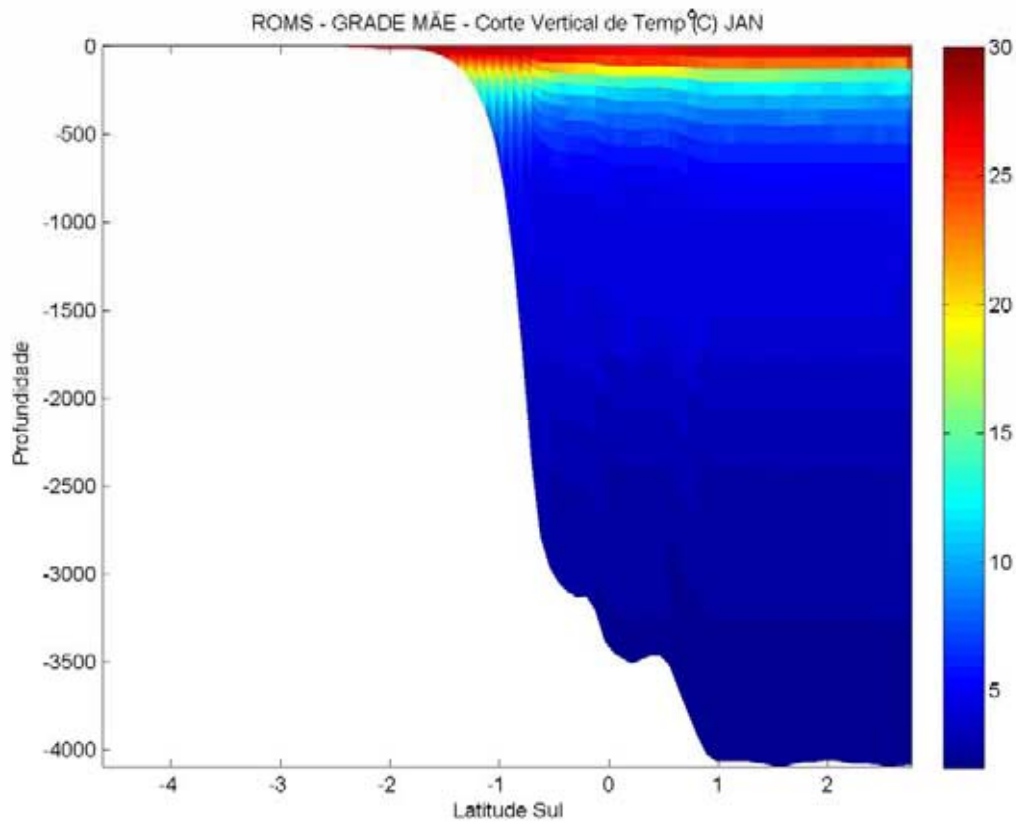
**Figura II.6.2.1.5-1 – Mapa de temperatura em superfície do SODA-POP para janeiro.**



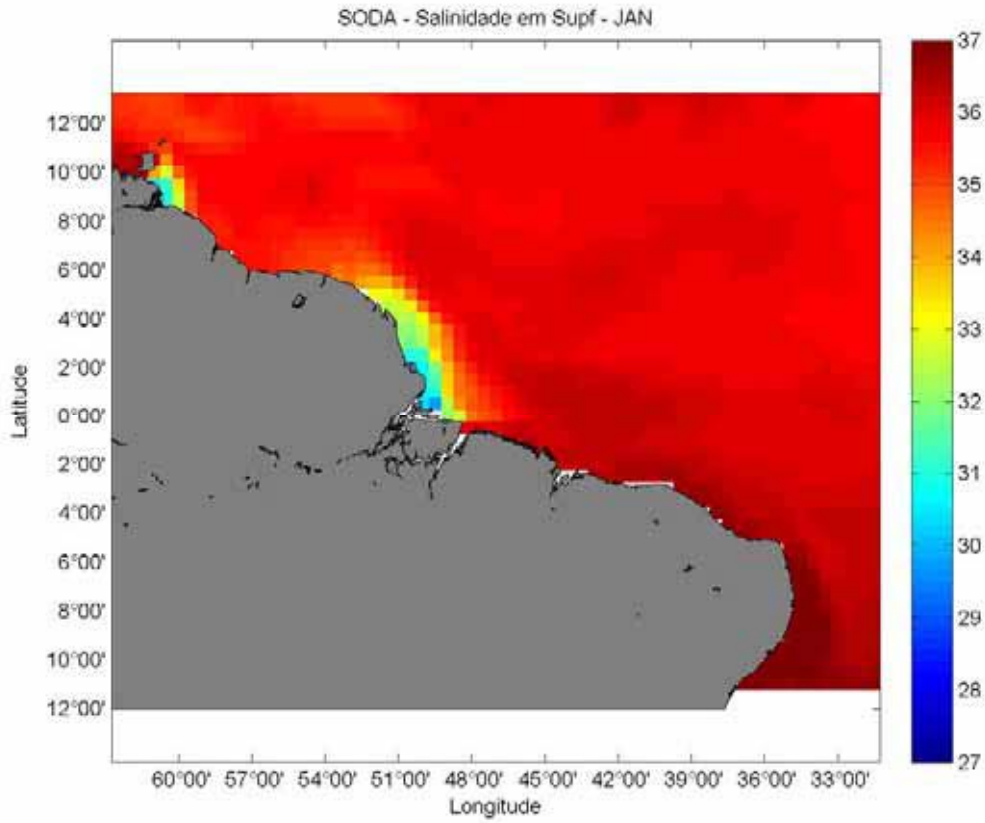
**Figura II.6.2.1.5-2 – Corte vertical da temperatura do SODA-POP para janeiro.**



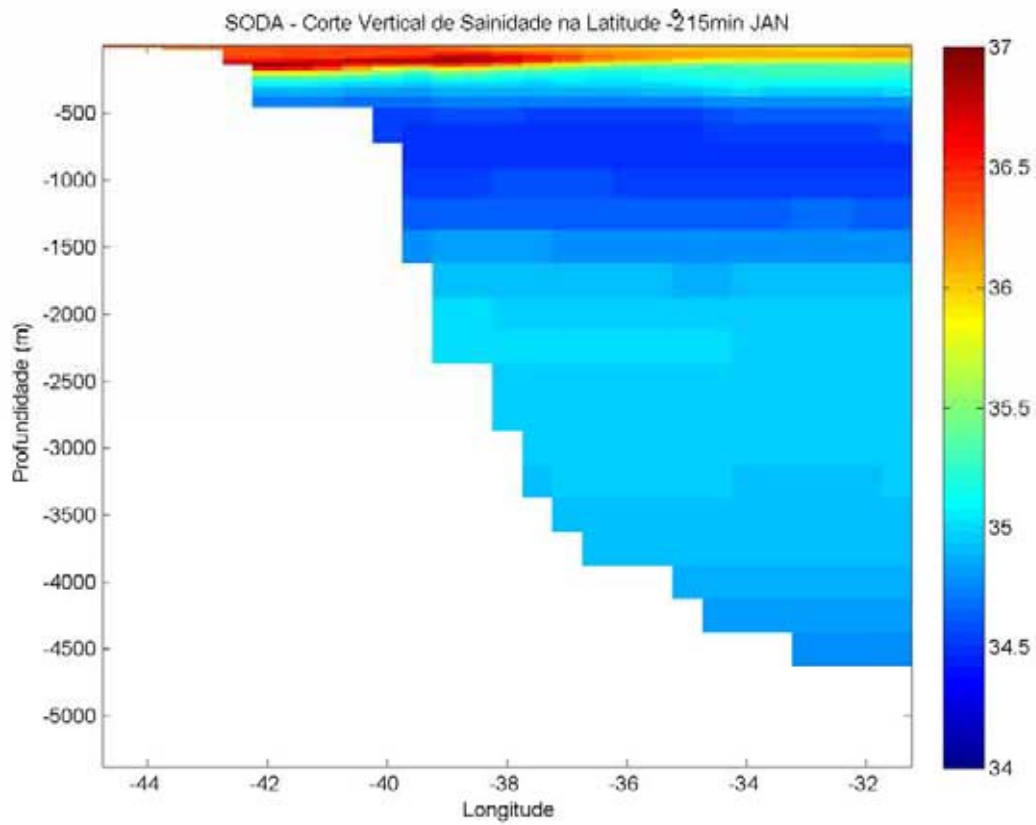
**Figura II.6.2.1.5-3 - Mapa de temperatura em superfície da do BM-POT-16 e 17 para janeiro. A linha branca indica o local do perfil vertical.**



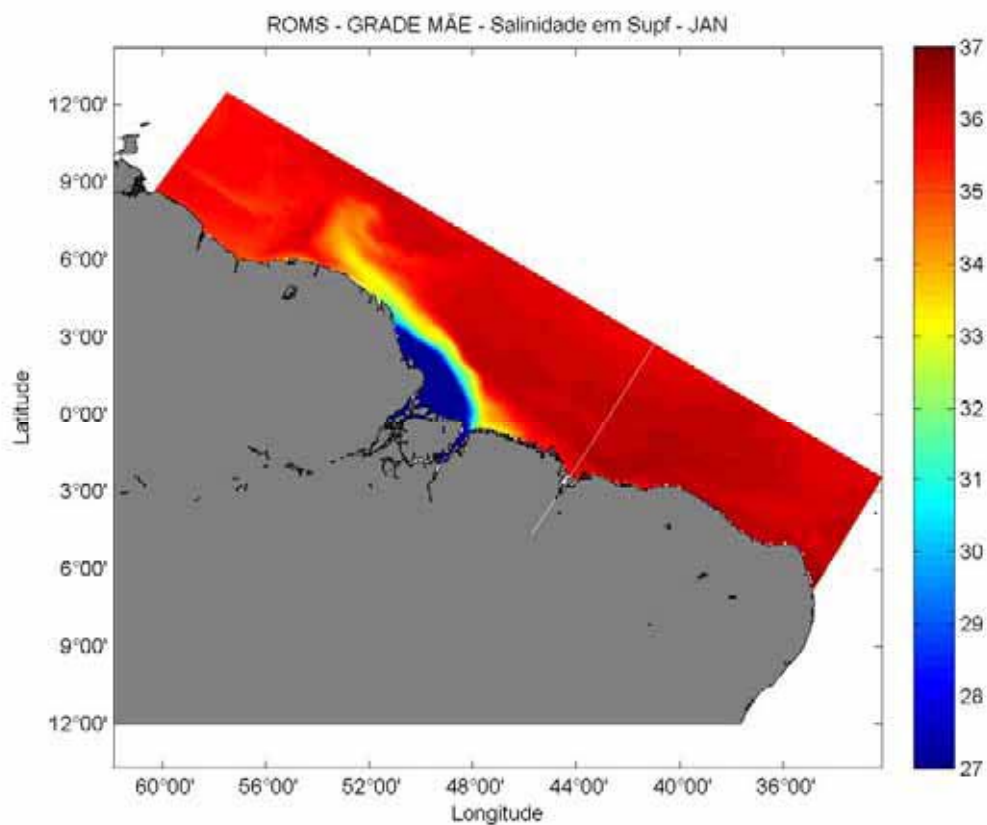
**Figura II.6.2.1.5-4 - Corte vertical da temperatura da na região dos Blocos BM-POT-16 e 17 para janeiro.**



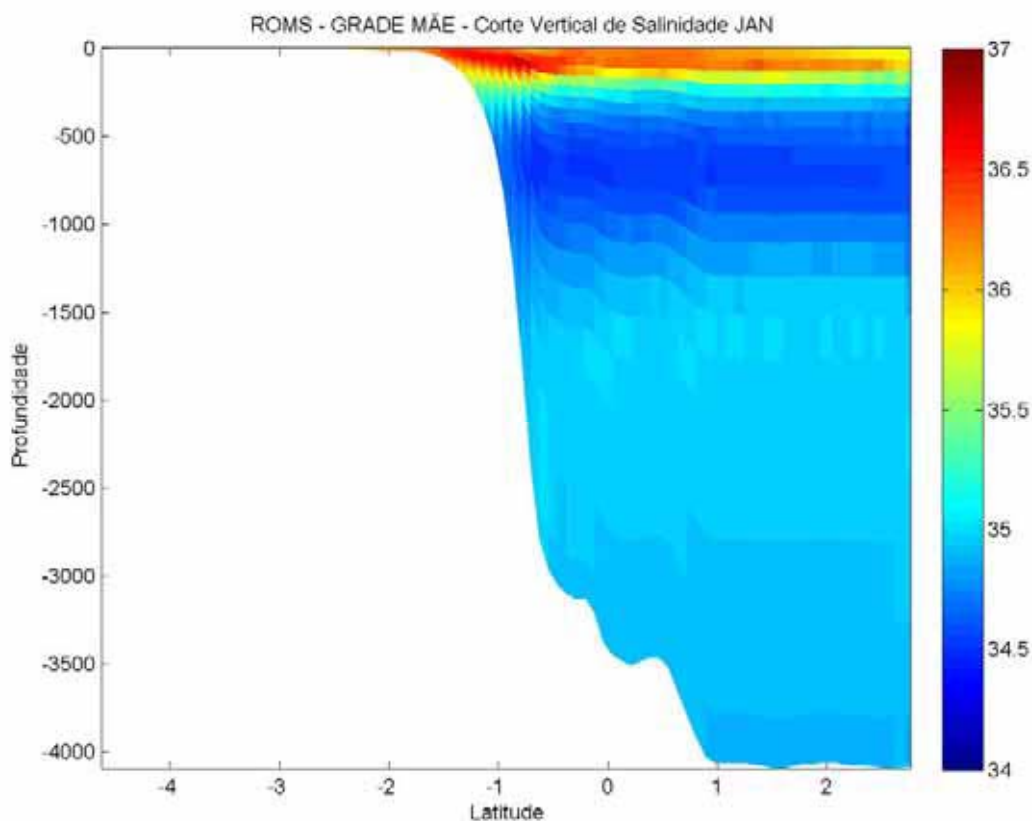
**Figura II.6.2.1.5-5 - Mapa de salinidade em superfície do SODA-POP para janeiro.**



**Figura II.6.2.1.5-6 - Corte vertical de salinidade do SODA-POP para janeiro.**



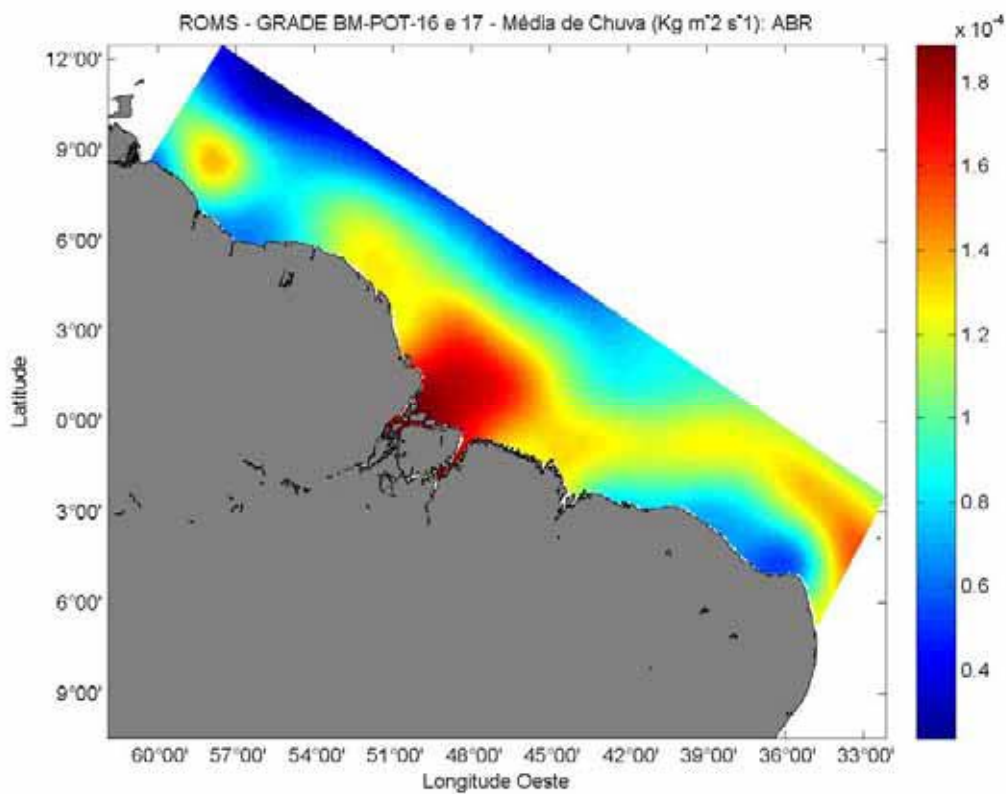
**Figura II.6.2.1.5-7 - Mapa de salinidade em superfície da grade do BM-POT-16 e 17 para janeiro. A linha branca indica o local do perfil vertical.**



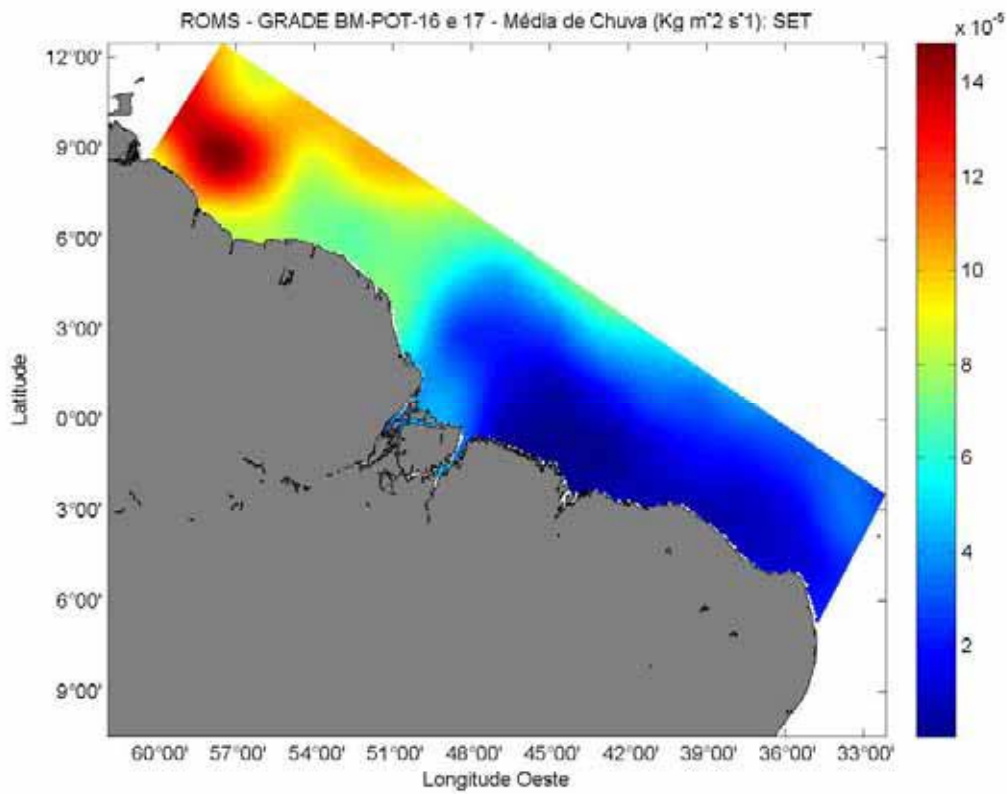
**Figura II.6.2.1.5-8 - Corte vertical da salinidade da grade Blocos BM-POT-16 e 17 para janeiro.**

Em relação às forçantes atmosféricas utilizadas como condição de contorno, os dados foram obtidos a partir da Reanálise do NCEP disponíveis a cada 6 horas para os anos de 2006 e 2007. As seguintes variáveis foram utilizadas, radiação de onda curta, radiação de onda longa, vento, chuva, temperatura do ar e pressão atmosférica. As figuras a seguir (Figura II.6.2.1.5-9 à Figura II.6.2.1.5-14) mostram as variáveis vento, chuva e temperatura do ar em épocas distintas para ilustração da variabilidade sazonal.

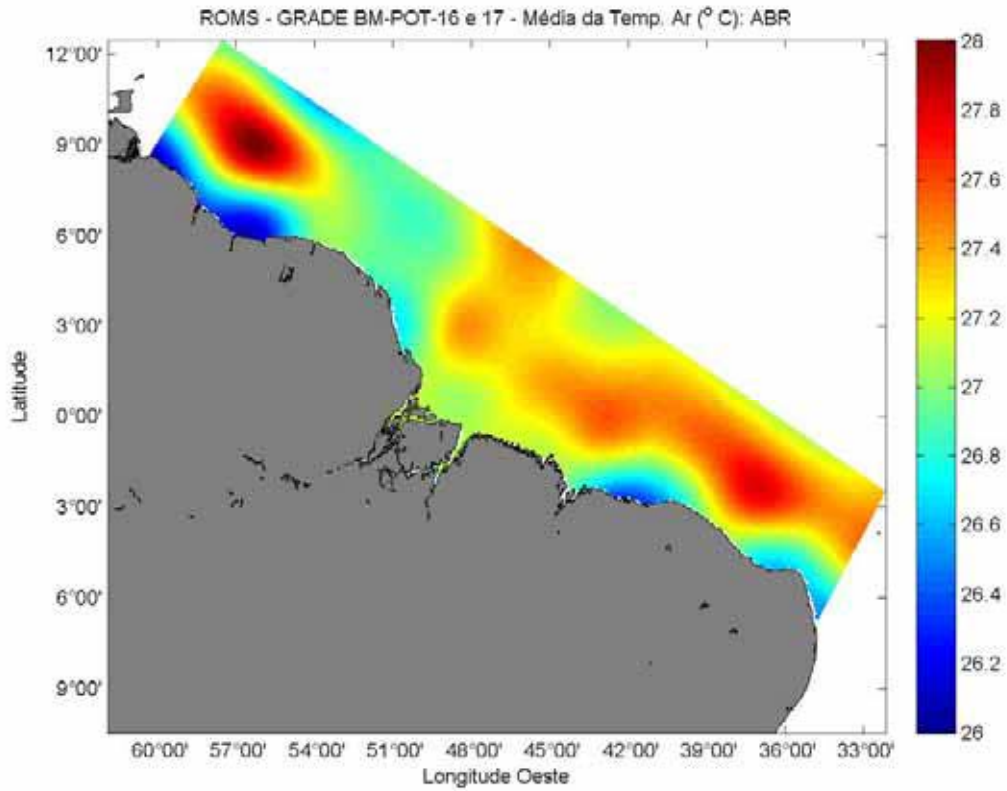




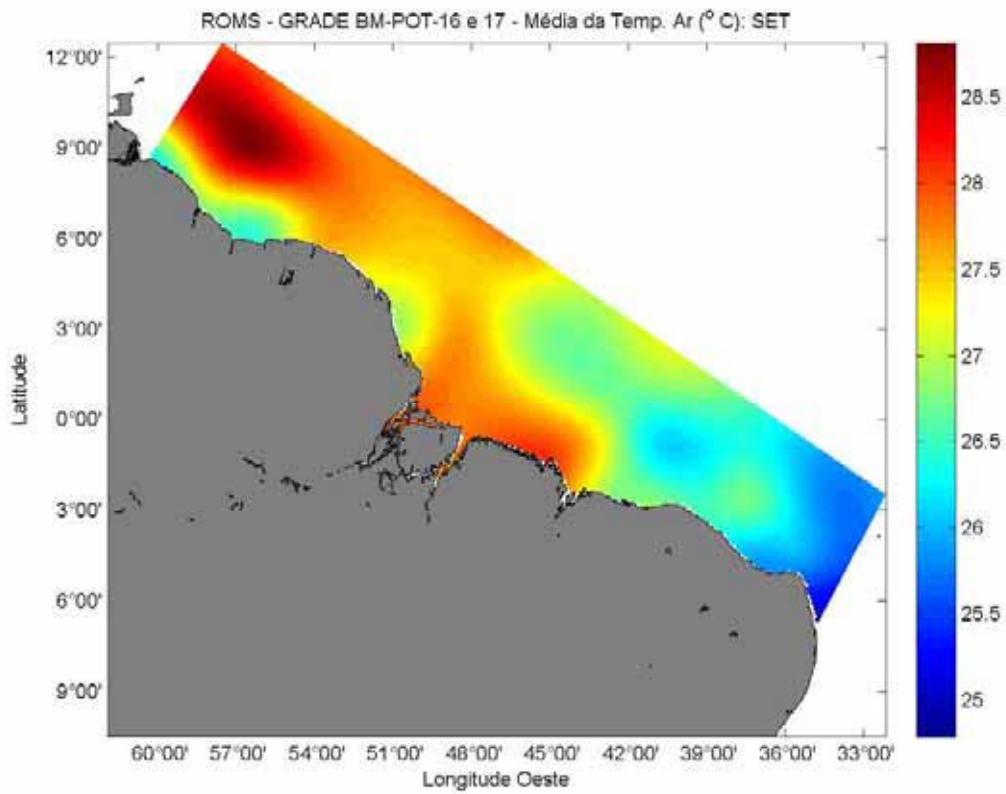
**Figura II.6.2.1.5-9 – Mapa da média mensal de chuva para o mês de abril.**



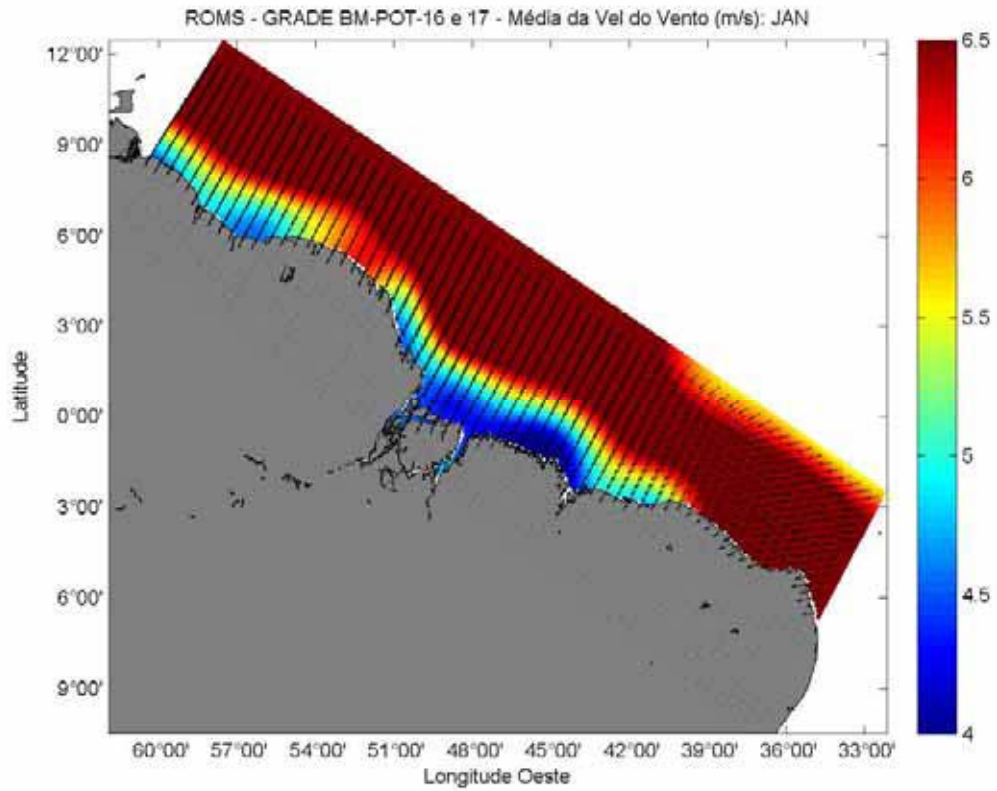
**Figura II.6.2.1.5-10 - Mapa da média mensal de chuva para o mês de setembro.**



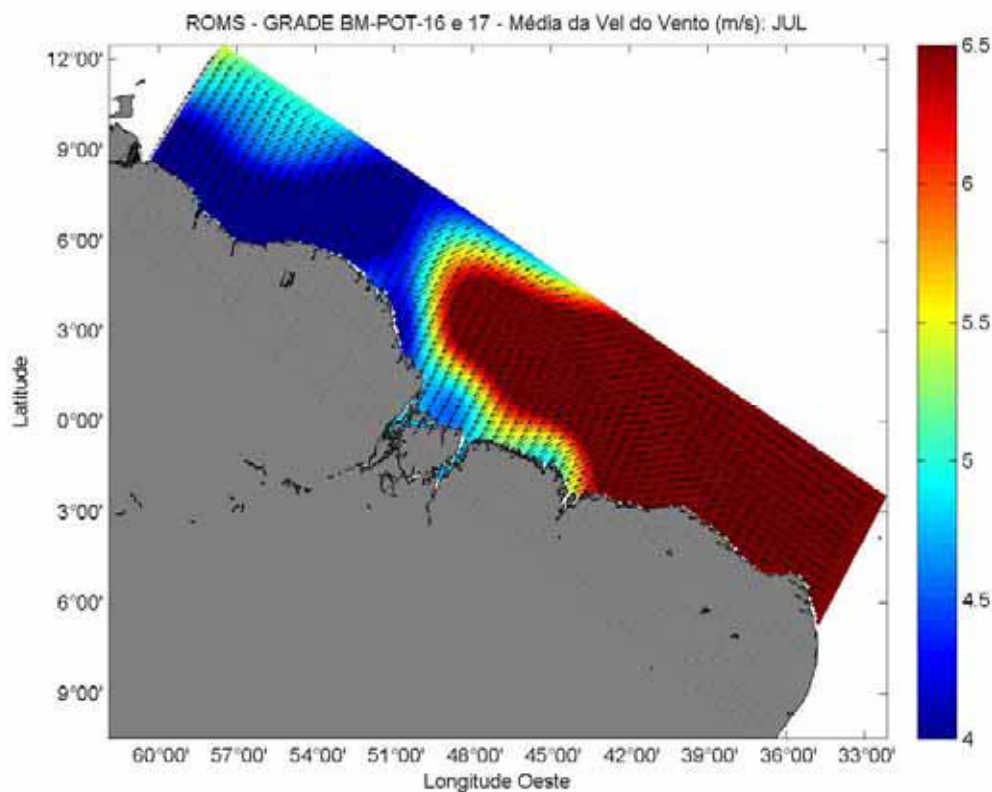
**Figura II.6.2.1.5-11 - Mapa da média mensal da temperatura do ar para o mês de abril.**



**Figura II.6.2.1.5-12 - Mapa da média mensal da temperatura do ar para o mês de setembro.**

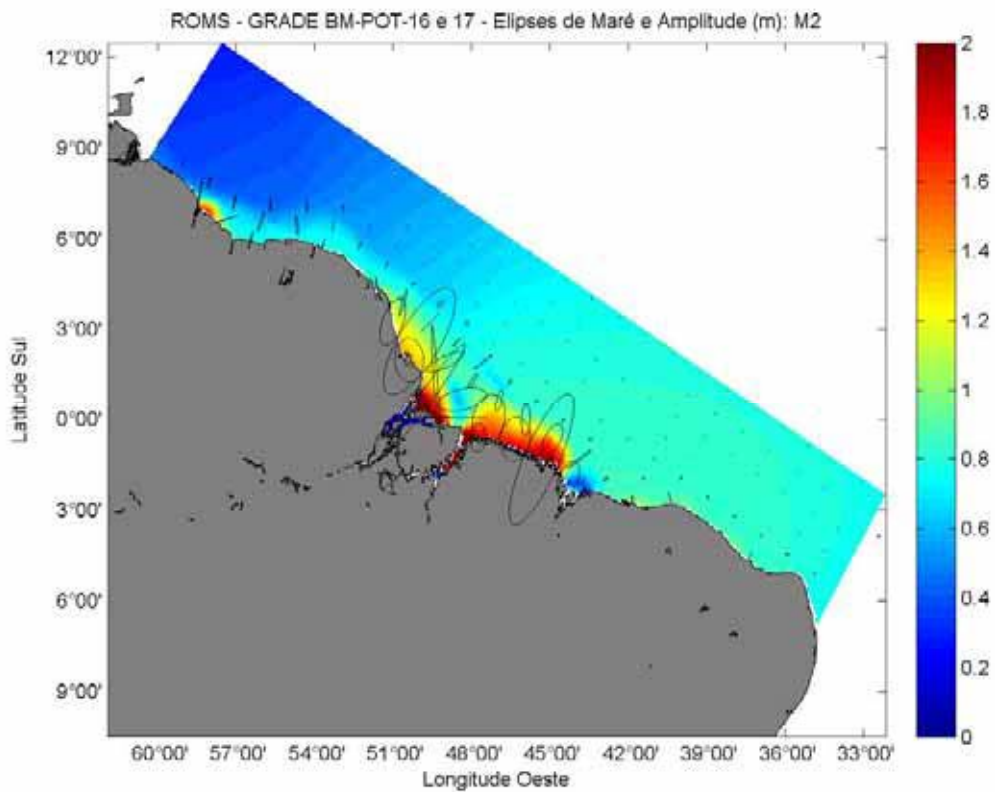


**Figura II.6.2.1.5-13 - Mapa da média mensal do vento a 10m para o mês de janeiro.**

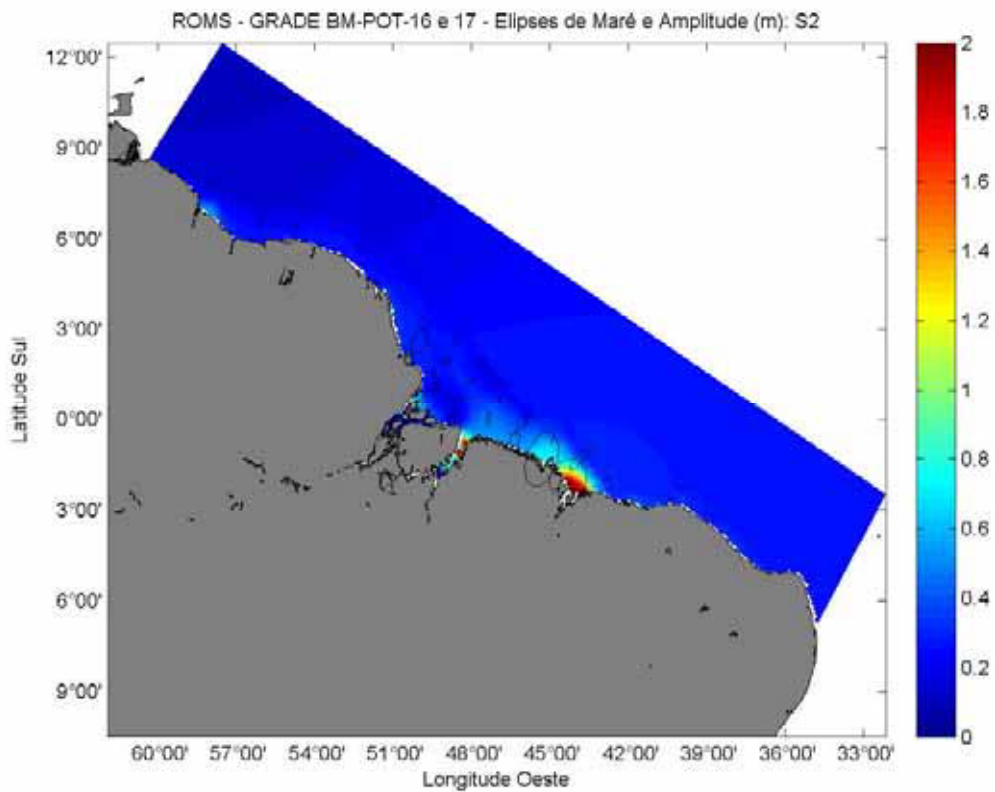


**Figura II.6.2.1.5-14 - Mapa da média mensal do vento a 10m para o mês de julho.**

Os dados de maré foram retirados do modelo global de marés TPX07, que ajusta por meio de mínimos quadrados as equações de maré de Laplace e dados obtidos pelos ciclos orbitais do TOPEX/Poseidon (Egbert, et al., 1994). As marés são fornecidas como amplitudes complexas relativas à Terra, da elevação da superfície do mar e das correntes de maré para oito constantes harmônicas primárias (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1), com resolução de 0,5 graus. A elevação foi propagada utilizando-se a combinação de condições de contorno do tipo Flather para as velocidades barotrópicas e Chapman para a elevação. A seguir (Figura II.6.2.1.5-15 à Figura II.6.2.1.5-19) são ilustradas as principais componentes utilizadas na grade dos Blocos BM-POT-16 e 17.

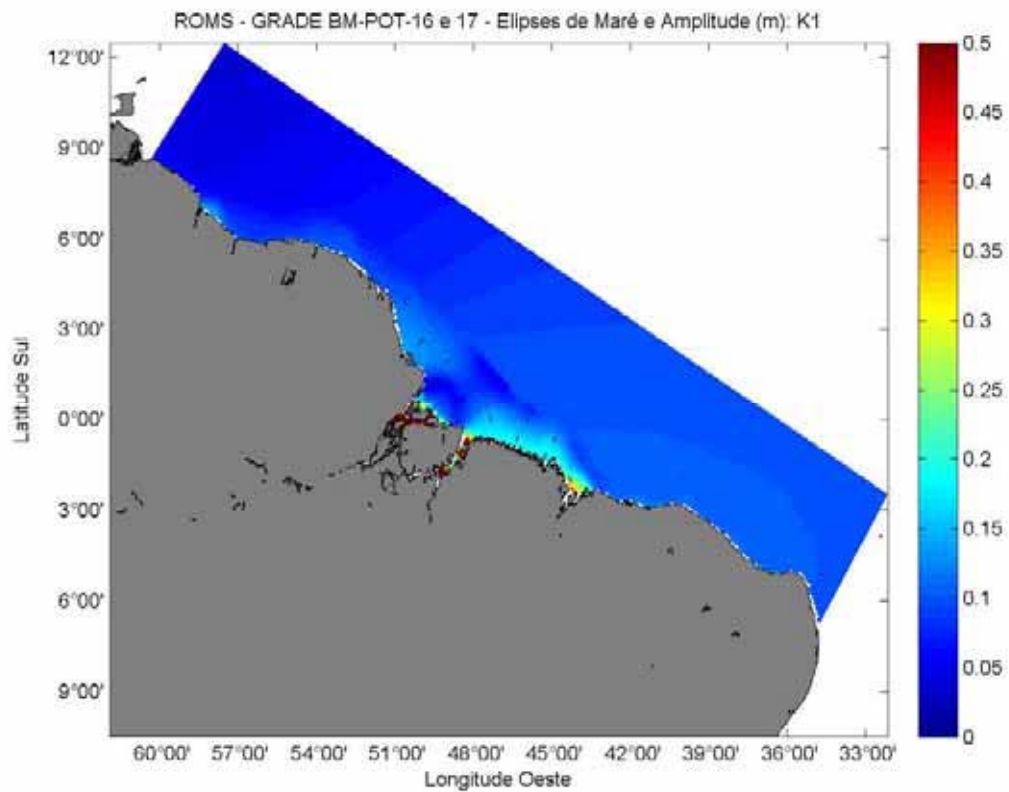


**Figura II.6.2.1.5-15 – Mapa de amplitudes da elevação da componente de maré (m) e das elipses de corrente de maré para a componente M2.**

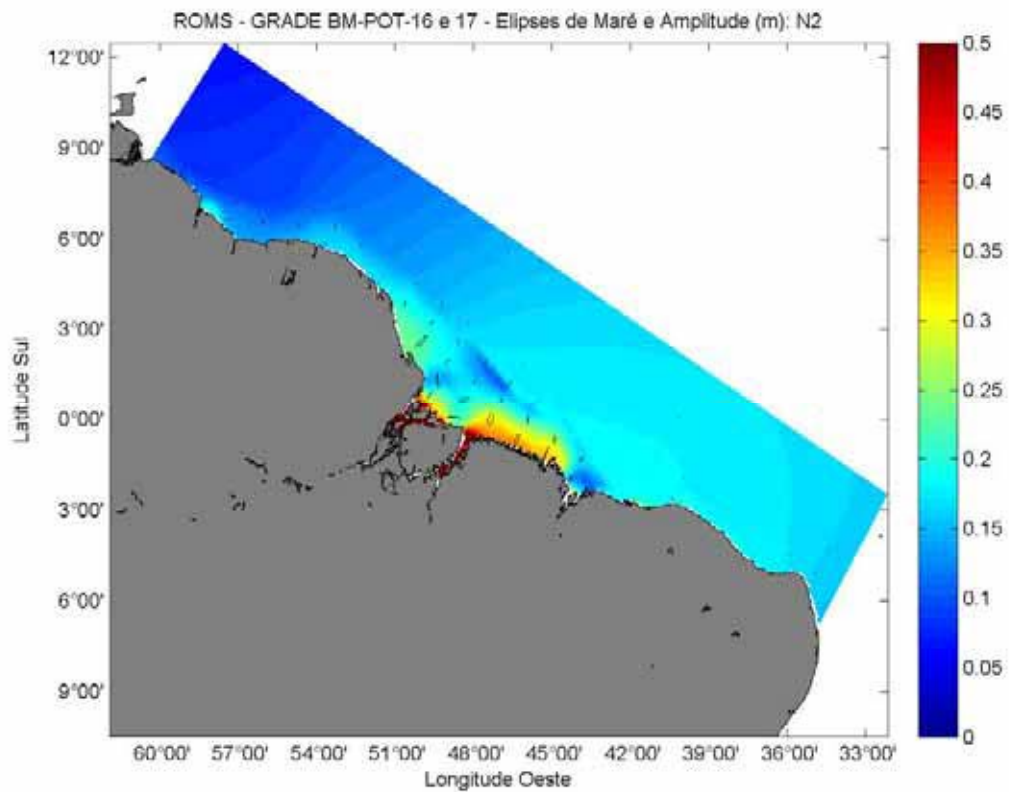


**Figura II.6.2.1.5-16 - Mapa de amplitudes da elevação da componente de maré (m) e das elipses de corrente de maré para a componente S2.**

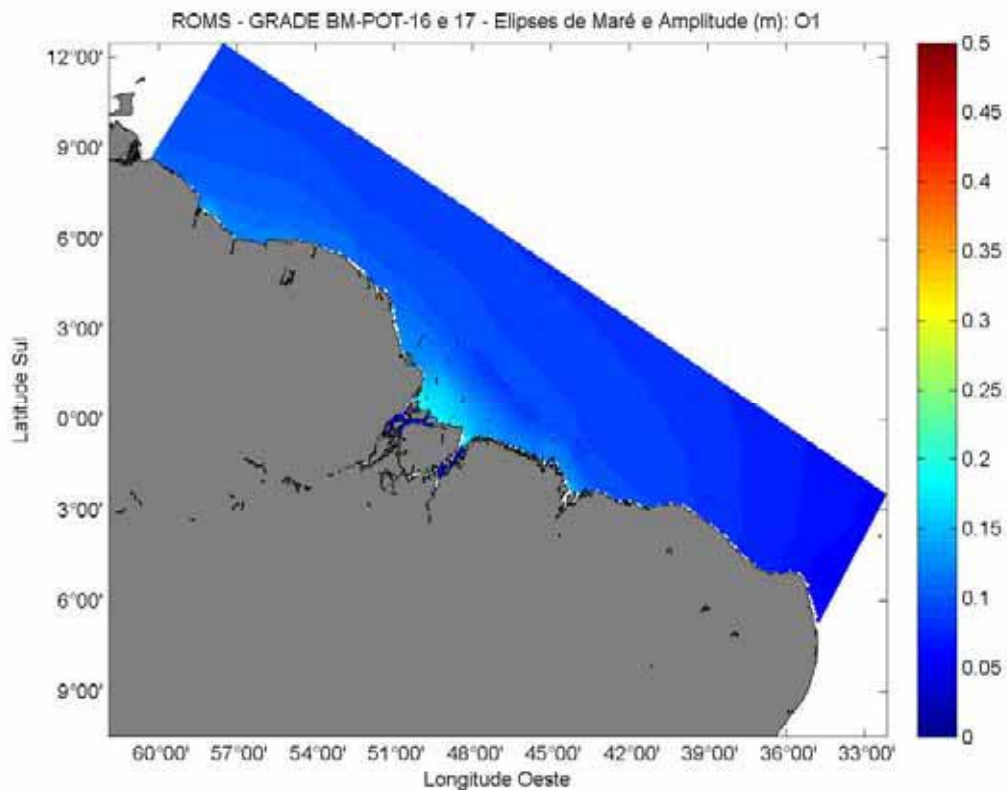




**Figura II.6.2.1.5-17 - Mapa de amplitudes da elevação da componente de maré (m) e das elipses de corrente de maré para a componente K1.**



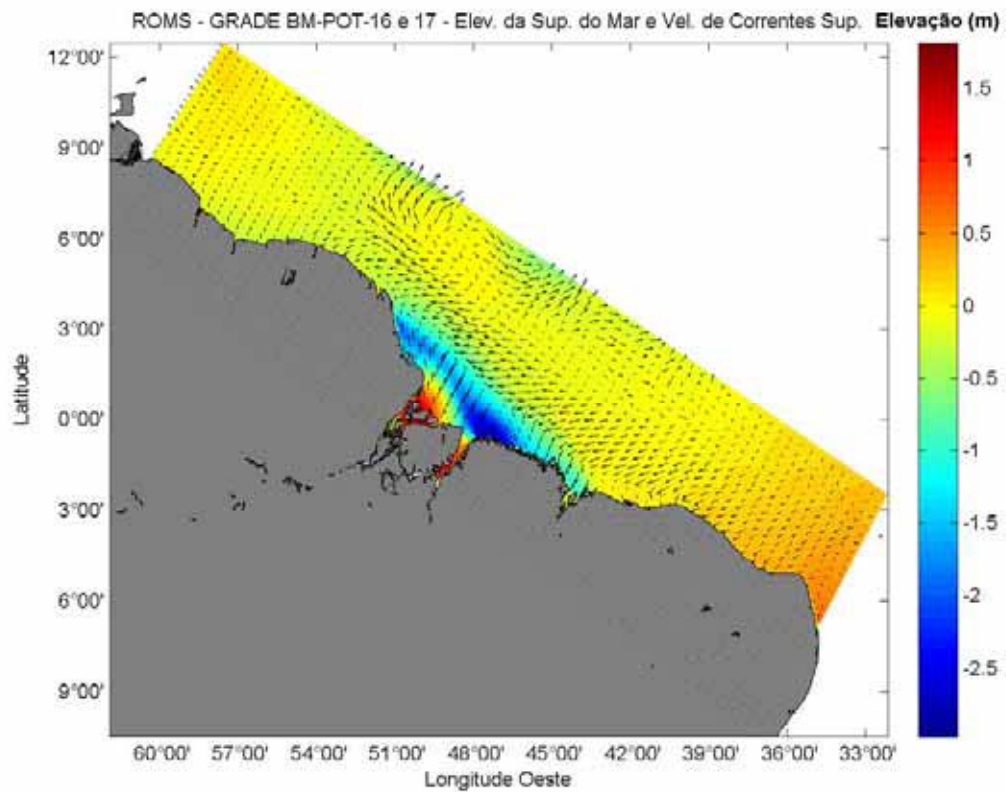
**Figura II.6.2.1.5-18 - Mapa de amplitudes da elevação da componente de maré (m) e das elipses de corrente de maré para a componente N2.**



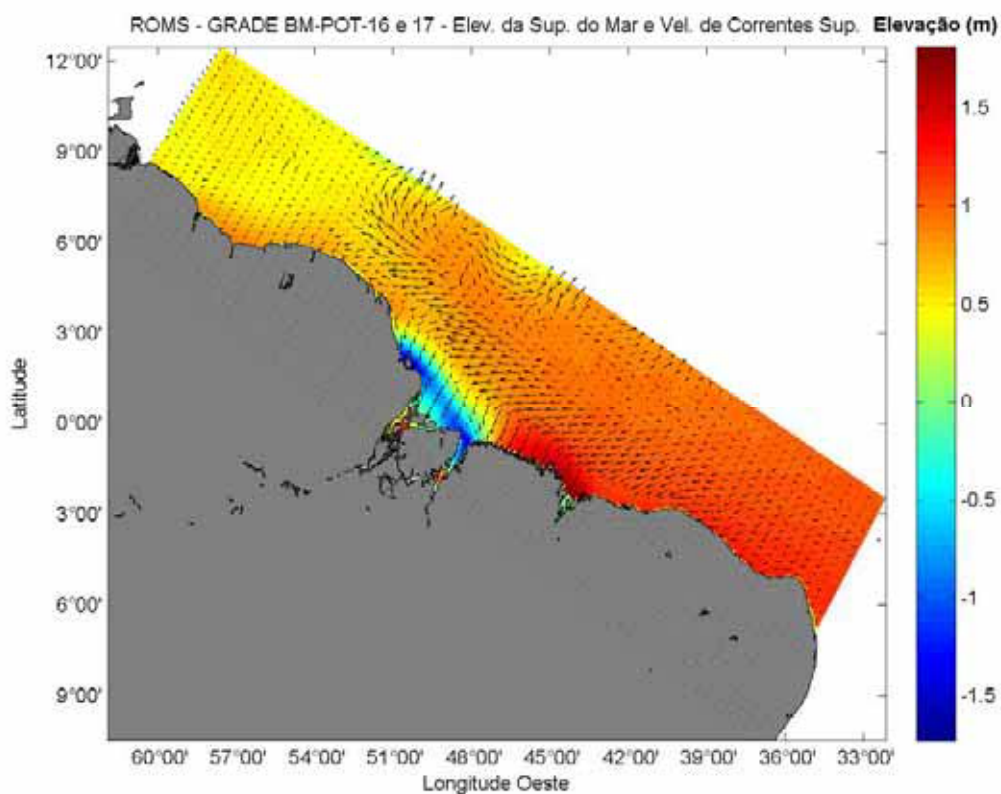
**Figura II.6.2.1.5-19 - Mapa de amplitudes da elevação da componente de maré (m) e das elipses de corrente de maré para a componente O1.**

### **II.6.2.1.6 - Resultados**

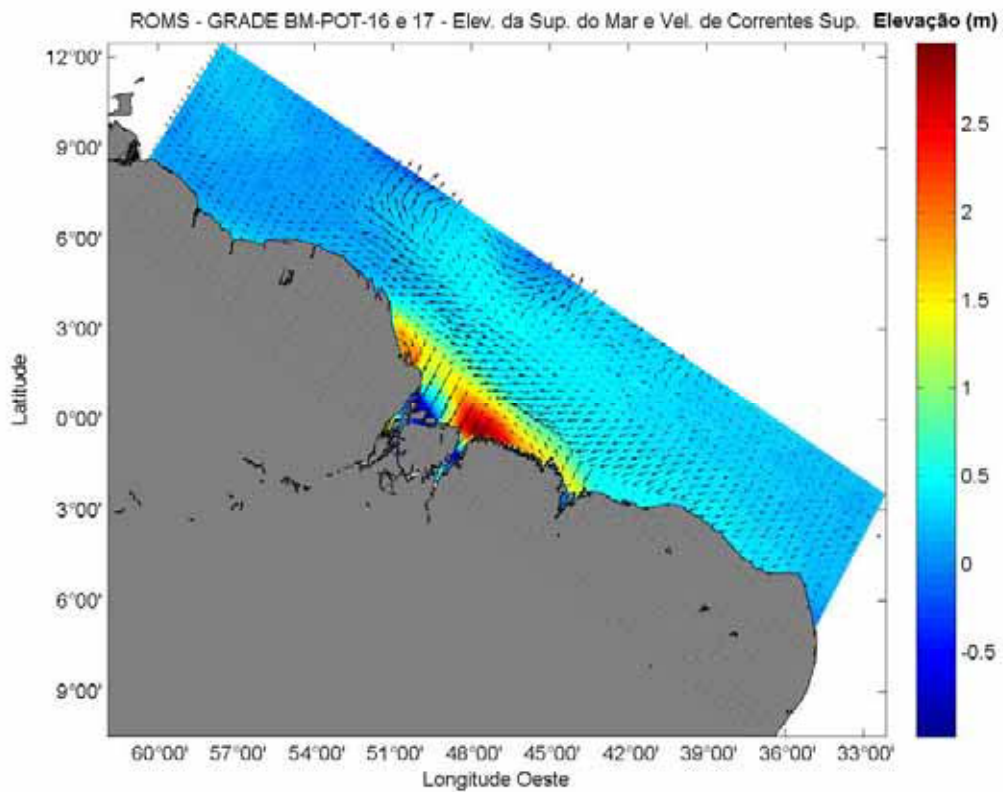
A seguir (Figura II.6.2.1.6-1 à Figura II.6.2.1.6-4) são apresentados alguns resultados focados na elevação de maré e velocidade de corrente obtidos pelo modelo numérico hidrodinâmico para a região dos Blocos BM-POT-16 e BM-POT-17.



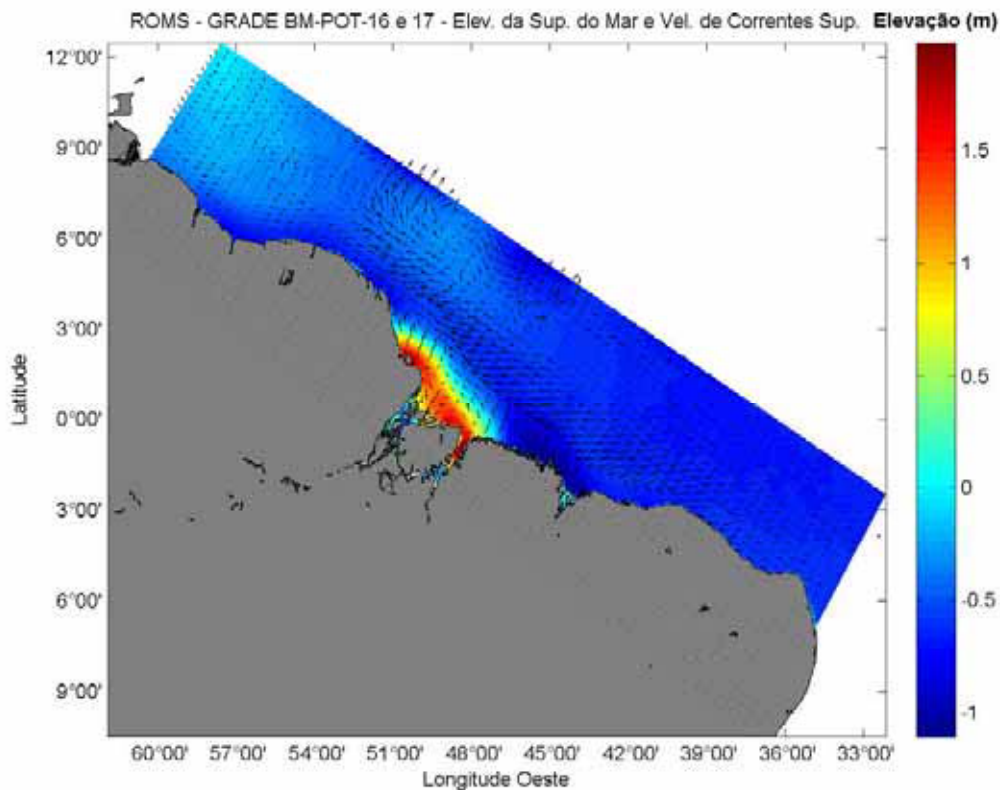
**Figura II.6.2.1.6-1 – Elevação do Nível do Mar (m) e velocidade da corrente em superfície no instante de enchente em maré de quadratura.**



**Figura II.6.2.1.6-2 - Elevação do Nível do Mar (m) e velocidade da corrente em superfície no instante de enchente em maré de sizígia.**



**Figura II.6.2.1.6-3 - Elevação do Nível do Mar (m) e velocidade da corrente em superfície no instante de vazante em maré de quadratura.**

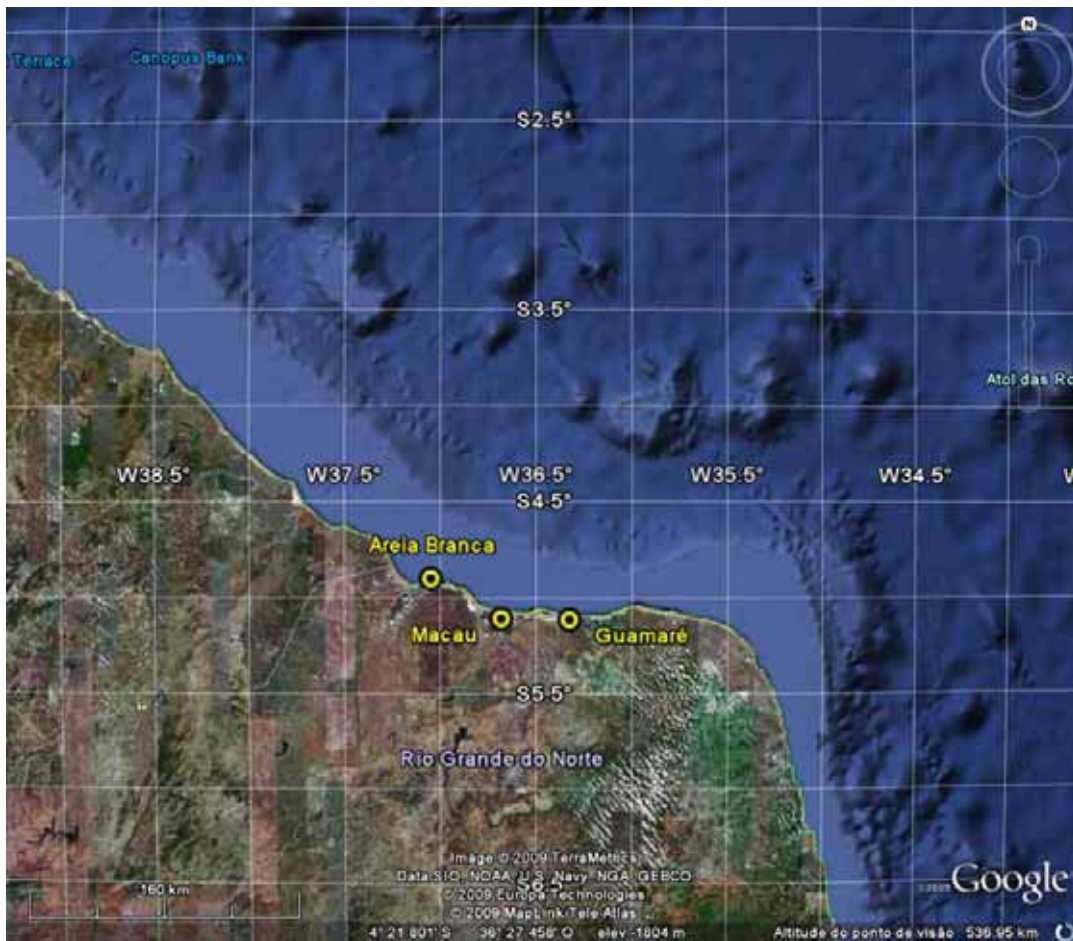


**Figura II.6.2.1.6-4 - Elevação do Nível do Mar (m) e velocidade da corrente em superfície no instante de vazante em maré de sizígia.**

#### **II.6.2.1.6.1 - Comparação com Observações**

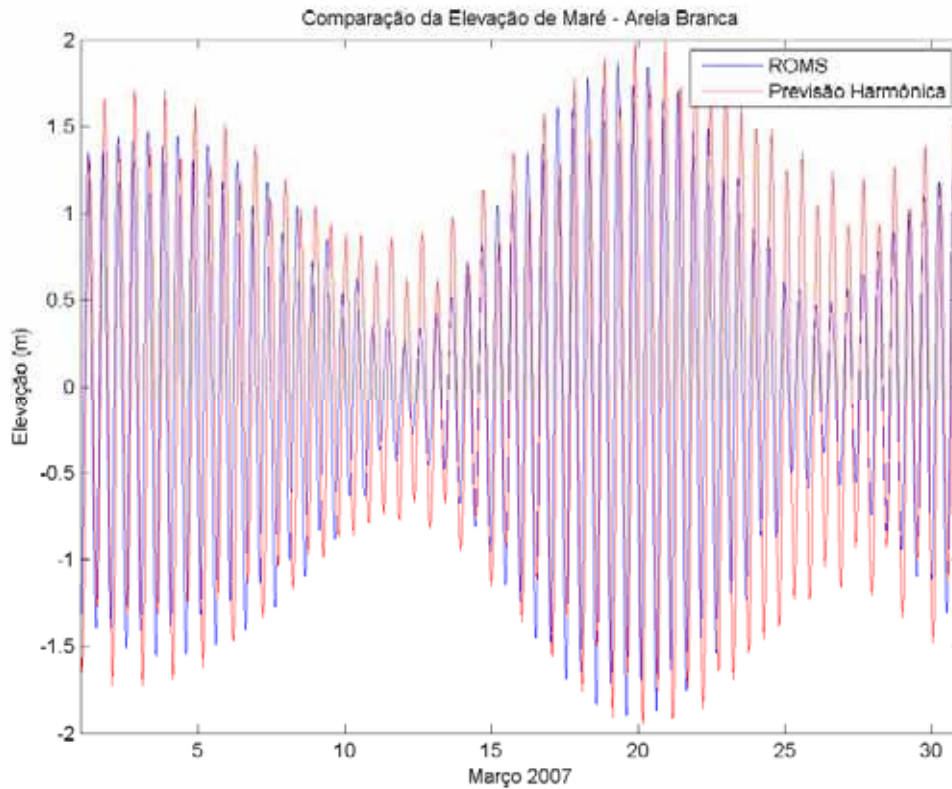
Foram monitorados três pontos na grade do modelo dos Blocos BM-POT-16 e BM-POT-17 para posterior comparação com dados observados.

As figuras a seguir (Figura II.6.2.1.6-6 à Figura II.6.2.1.6-8) mostram as comparações em relação às séries temporais de maré obtidas pelo ROMS e observadas através da previsão harmônica de maré. A localização das estações, pode ser observada na Figura II.6.2.1.6-5.

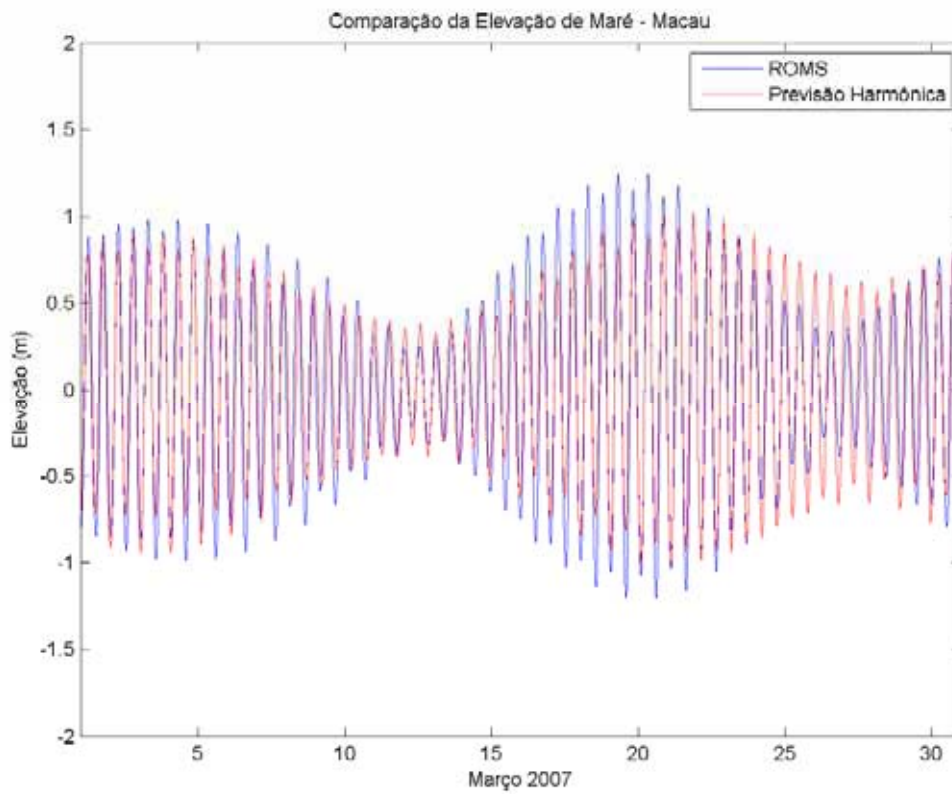


**Figura II.6.2.1.6-5 – Localização das estações maregráficas da FEMAR utilizadas para comparação de maré.**

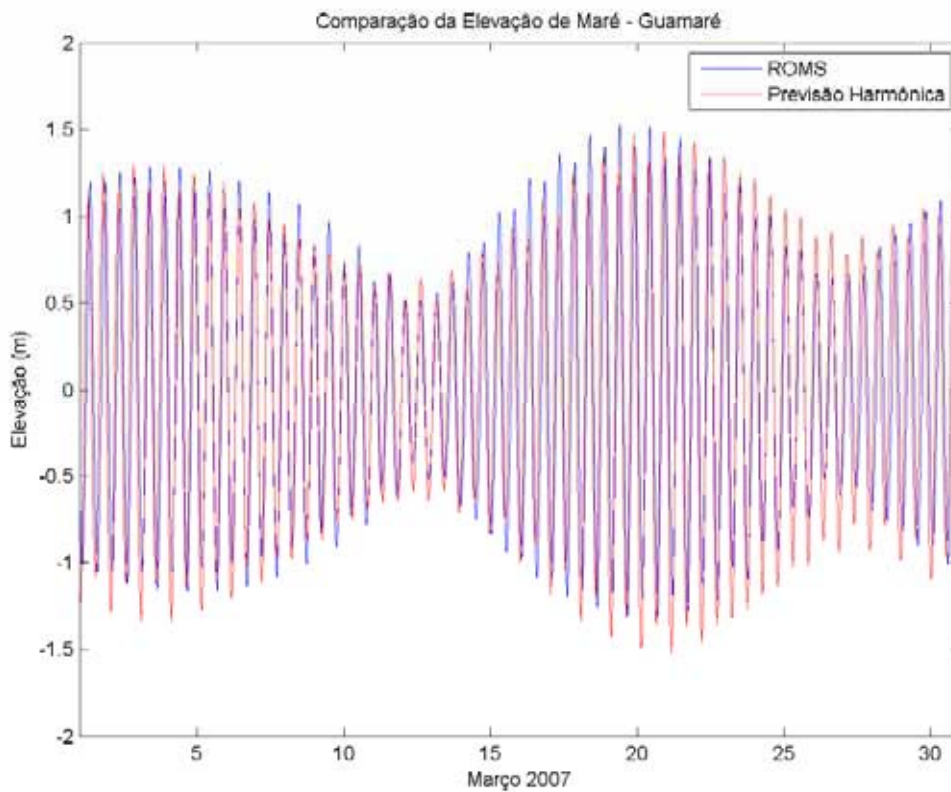




**Figura II.6.2.1.6-6** – *Série temporal de marés resultantes do ROMS e observadas (previsão harmônica) para a estação de Areia Branca.*

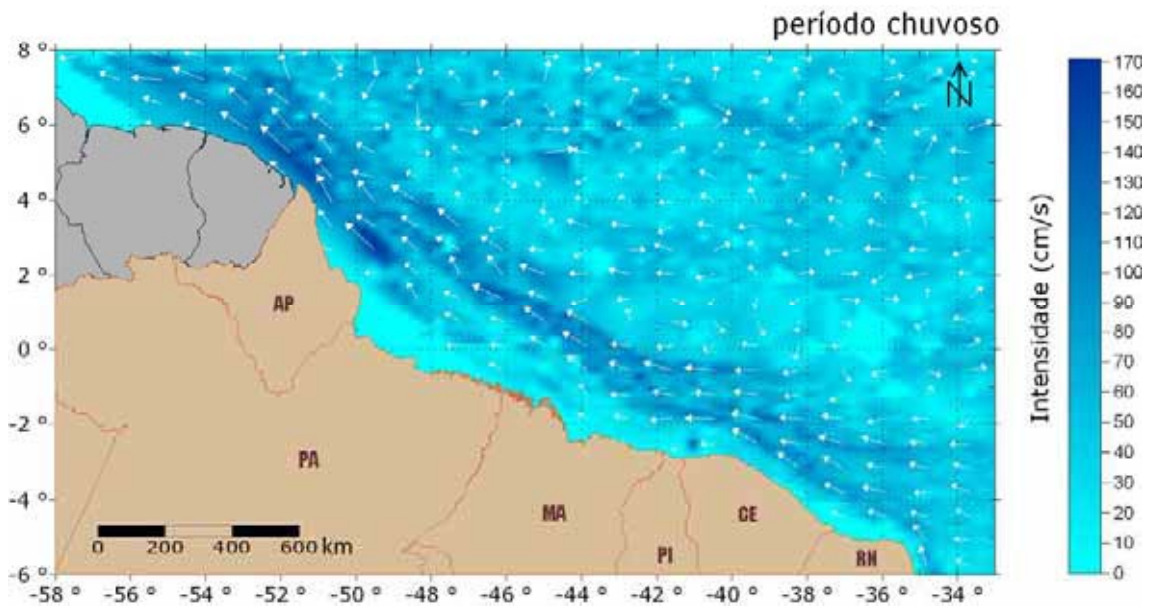


**Figura II.6.2.1.6-7 - Série temporal de marés resultantes do ROMS e observadas (previsão harmônica) para a estação de Macau.**

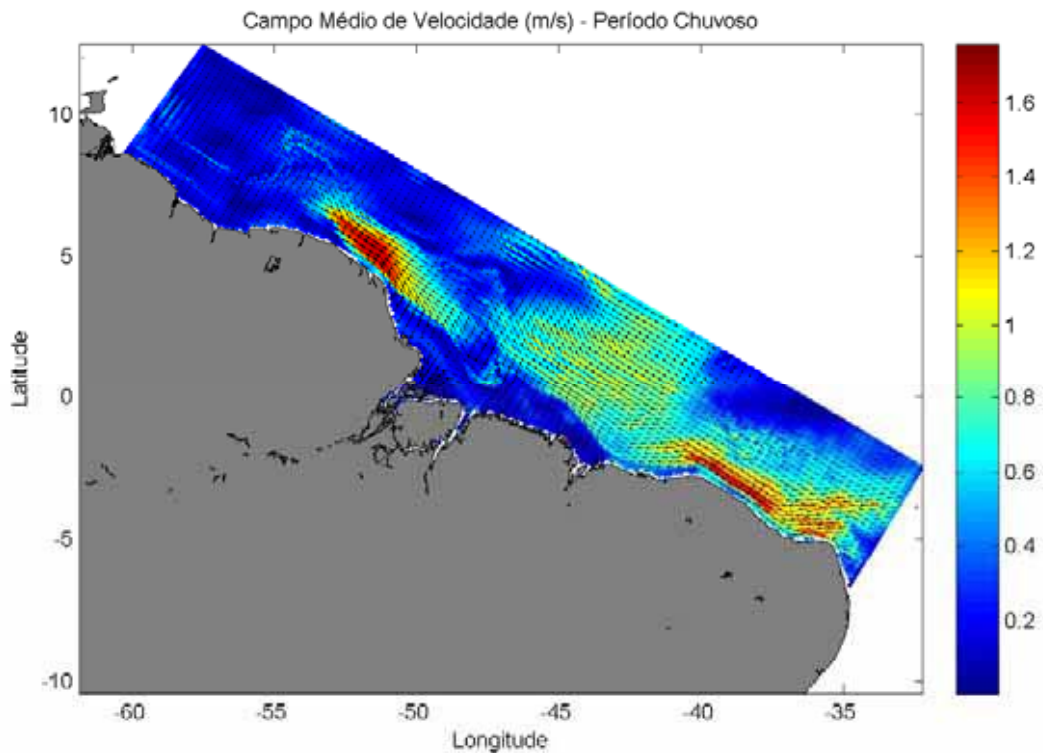


**Figura II.6.2.1.6-8 - Série temporal de marés resultantes do ROMS e observadas (previsão harmônica) para a estação de Guararé.**

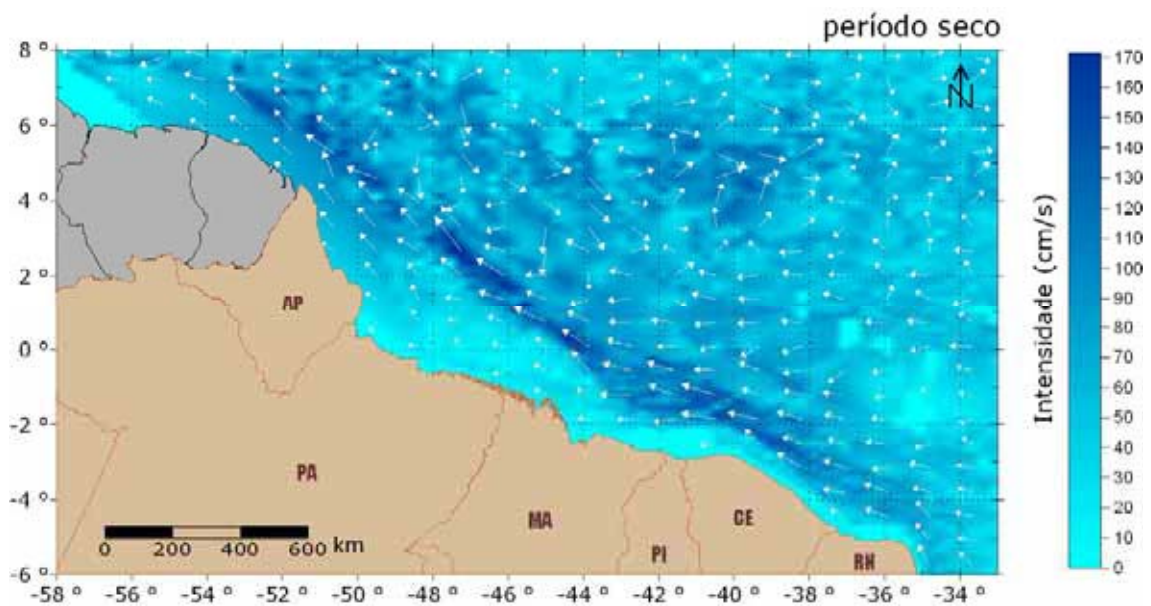
Para comparação dos dados de correntes, foram geradas médias sazonais para o período chuvoso (janeiro a junho) e para o período seco (julho a dezembro). A seguir, da Figura II.6.2.1.6-9 à Figura II.6.2.1.6-12 são apresentados os campos médios de correntes obtidos através dos dados do *Global Drifter Program* (NOAA/AOML) e pelas simulações do ROMS.



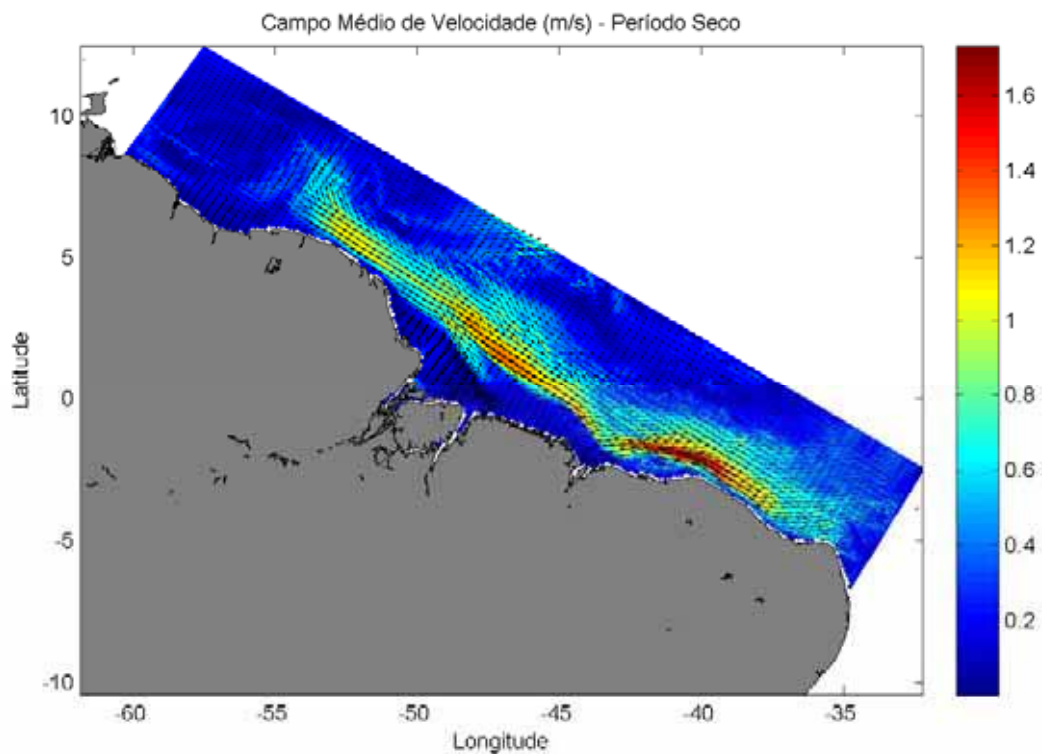
**Figura II.6.2.1.6-9 – Campo médio de correntes para o período chuvoso na Costa Norte do Brasil. Dados: NOAA/AOML.**



**Figura II.6.2.1.6-10 – Campo médio de correntes obtido pelo ROMS para o período chuvoso na Costa Norte do Brasil.**



**Figura II.6.2.1.6-11 – Campo médio de correntes para o período seco na Costa Norte do Brasil. Dados: NOAA/AOML.**



**Figura II.6.2.1.6-12 – Campo médio de correntes obtido pelo ROMS para o período seco na Costa Norte do Brasil.**

### II.6.2.1.7 - Conclusão

Os resultados das comparações entre os dados simulados pelo ROMS e os observados mostram que o modelo hidrodinâmico para a região dos Blocos BM-POT-16 e BM-POT-17 está bem ajustado com os fenômenos oceanográficos que ocorrem na região. Sendo assim, os dados do ROMS podem ser utilizados para as simulações de transporte de material no oceano para os referidos blocos.

### **II.6.2.1.8 - Referências**

Fairall, C.W., E.F. Bradley, D.P. Rogers, J.B. Edson and G.S. Young, 1996: Bulk parameterization of air-sea fluxes for tropical ocean-global atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment, *J. Geophys. Res.*, 101, 3747-3764.

Haidvogel, D. B. and A. Beckmann, 1999: *Numerical Ocean Circulation Modeling*. Imperial College Press.

Haidvogel, D. B., H. G. Arango, K. Hedstrom, A. Beckmann, P. Malanotte-Rizzoli, and A. F. Shchepetkin (2000), Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: Simulations in nonlinear terrain-following coordinates, *Dyn. Atmos. Oceans*, 32, 239-281.

Large, W. G., J. C. McWilliams, and S. C. Doney, 1994: Oceanic vertical mixing: a review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Rev. Geophys.*, 32, 363-403.

Marchesiello, P., J.C. McWilliams, and A. Shchepetkin, 2003: Equilibrium structure and dynamics of the California Current System, *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 753-783.

Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 851-875.

Peliz, A., J. Dubert, D. B. Haidvogel, and B. Le Cann (2003), Generation and unstable evolution of a density-driven Eastern Poleward Current: The Iberian Poleward Current, *J. Geophys. Res.*, 108(C8), 3268, doi:10.1029/2002JC001443.

Pickard, G.L. and Emery - Descriptive Physical Oceanography. An Introduction. Pergamon, 1995.

Shchepetkin, A. F., and J. C. McWilliams (2003), A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate, J. Geophys. Res., 108(C3), 3090, doi:10.1029/2001JC001047.

Shchepetkin, A. F., and J. C. McWilliams (2005), The Regional Ocean Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model, Ocean Modelling, 9, 347-404.

Song, Y. and D. B. Haidvogel, 1994: A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system. J. Comp. Phys., 115(1), 228-244.

Stramma L., 1991: Geostrophic Transport of the South Equatorial Current in the Atlantic. Journal of Marine Research, 49. 281 - 294p

Stramma, L. , Schott, F. , 1999. The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean. Deep-Sea Research II 46 (1999) 279-303

Styles, R. and S.M. Glenn, 2000: Modeling stratified wave and current bottom boundary layers in the continental shelf. J. of Geophys. Res., 105, 24119-24139.

Umlauf, L., H. Burchard, 2003: A generic length-scale equation for geophysical turbulence models. J. Marine Res., 61, 235-265.

Warner, J.C, C.R. Sherwood, H.G. Arango, and R.P. Signell, 2005a: Performance of four Turbulence Closure Methods Implemented using a Generic Length Scale Method. Ocean Modelling, 8, 81-113.

## **II.6.2.2 - Modelagem de Dispersão do Óleo**

### **II.6.2.2.1 - Introdução**

O presente relatório descreve os resultados obtidos na modelagem numérica do transporte de óleo no mar em um cenário acidental de vazamento na região dos blocos BM-POT-16 e 17, Bacia Potiguar, costa Nordeste do litoral brasileiro. O local do vazamento encontra-se nas coordenadas geográficas 4° 00' 00" S e 37° 30' 00" 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.6.2.2.2 - Metodologia**

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.6.2.2.2.1 - 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:

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

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

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.6.2.2.2.1.1 - 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 conseqüentes mudanças nas propriedades físicas, como a densidade e a viscosidade.

### II.6.2.2.2.1.2 - 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,  $T$  e  $T_{\acute{a}gua}$  a temperatura do óleo e da água, respectivamente,  $frac_{evap}$  a fração de óleo evaporada, e  $c_1$  e  $c_2$  são constantes empíricas e podem variar em função do tipo de óleo. No entanto, segundo Lehr (2002), valores razoáveis são de 0,008K-1 e 0,18, respectivamente.

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, seguindo Mackay et al. (1980) é utilizado o valor de 5. Para as constantes adimensionais  $C_{emul1}$  e  $C_{emul2}$ , NOAA(2000) sugere valores de 2,5 e 0,65, respectivamente.

### II.6.2.2.2.1.3 - 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:

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

#### II.6.2.2.1.4 - 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 com 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, nesse caso, cinco.  $K_j$  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 e  $T$  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 coeficiente de transferência de massa do pseudo-componente é calculado por:

$$K_j = 0,0048 \cdot U^{7/9} \cdot Z^{-1/9} \cdot Sc_j^{-2/3} \quad (10)$$

Onde  $U$  é a velocidade do vento;  $Z$  é o comprimento da mancha na direção do vento; e  $Sc$  é o número de Schmidt, sendo utilizado o mesmo valor para todos os pseudo-componentes e, segundo NOAA (2000), igual a 2,7.

Tais valores variam ao longo da simulação, sendo recalculados internamente, para cada pseudo-componente e a cada passo de tempo, no modelo.

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:

$$\bar{V}_j = 7 \times 10^{-5} - (2,102 \times 10^{-7} BP_j) + [1 \times 10^{-9} (BP_j)^2] \quad (11)$$

Onde  $BP_j$  é o ponto de ebulição de cada componente, calculado internamente no modelo, segundo NOAA (2000), por:

$$BP_j = T_0 + \frac{dT}{df} \frac{(j - 1/2)}{5} \quad (12)$$

Sendo que:

$$\frac{dT}{df} = 1356,7 - 247,36 \cdot \ln(API) \quad (13)$$

$$T_0 = 457,16 - 3,3447 \cdot API \quad (14)$$

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):

$$\ln \frac{P_j}{P^0} = \frac{\Delta S_j \cdot (BP_j - C)^2}{R \cdot BP_j} \cdot \left[ \frac{1}{BP_j - C} - \frac{1}{T - C} \right] \quad (15)$$

onde  $P^0$  é a pressão atmosférica;  $\Delta S_j = 8,75 + 1,987 \log(BP_j)$ , é a variação na entropia do componente oriunda da vaporização e  $C = (0,19 \cdot BP_j) - 18$  é uma constante determinada a partir do ponto de ebulição do pseudo-componente.

O coeficiente de transferência de massa é calculado segundo Mackay & Matsugu (1973):

$$K_i = 0,0048 \cdot U^{7/9} \cdot Z^{-1/9} \cdot Sc_j^{-2/3} \quad (16)$$

onde  $U$  é a velocidade do vento;  $Z$  é o comprimento da mancha na direção do vento; e  $Sc$  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):

$$D_j = D_{\text{água}} \sqrt{\frac{MW_{\text{água}}}{MW_j}} \quad (17)$$

onde  $D_{\text{água}}$  é a difusividade molecular da água; e  $MW_{\text{água}}$  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:

$$MW_j = 0,04132 - \left( 1,985 \cdot 10^{-4} \cdot BP_j \right) + \left[ 9,494 \cdot 10^{-7} \cdot (BP_j)^2 \right] \quad (18)$$

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

$$\frac{dV_j}{dt} = - \frac{A \cdot K_j \cdot P_j \cdot V_j}{R \cdot T \cdot \sum_{k=1}^{nc} \frac{V_j}{V_k}} \quad (19)$$

### II.6.2.2.2.1.5 - Emulsificação

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

$$\frac{dfrac_{wv}}{dt} = K_w (1 + W)^2 \left( 1 - \frac{frac_{wv}}{frac_{wv}^{final}} \right) \quad (20)$$

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  $1,6 \times 10^{-6}$ .

### II.6.2.2.2.1.6 - 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:

$$Q(d_0) = C_0 \cdot D_{ba}^{0,57} \cdot S_{cov} \cdot F_{wc} \cdot d_0^{0,7} \cdot \Delta d \quad (21)$$

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  $d_0$   $\left(d_0 - \frac{1}{2}\Delta d$  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:

$$D_{ba} = 0,0034 \cdot \rho_w \cdot g \left[ \frac{HS}{\sqrt{2}} \right]^2 \quad (22)$$

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

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

$g$  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:

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

$$F_{wc} = \frac{0,01 \cdot U + 0,01}{T_M} \rightarrow U > 4,$$
(23)

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, 2002) varia entre  $d_{\min} = 0\mu$  a  $d_{\max} = 70\mu$ .

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

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

$$C_0 = 1827 \cdot \nu^{1,1951} \rightarrow \nu > 125 \text{ cSt};$$
(24)

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:

$$Q = \frac{d_{\max}}{1,7} \cdot C_0 \cdot D_{ba}^{0,57} \cdot F_{wc} \cdot S_{cov}$$
(25)

sendo  $Q$  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):

$$Z_i = (1,5 \pm 0,35) \cdot H_b$$
(26)

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



### II.6.2.2.2.1.7 - Cálculo da Espessura

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

$$esp_e(x, y, t) = \frac{q_e}{2\pi[\sigma(t)]^2} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x - p_{x,e}(t)}{\sigma(t)}\right)^2 + \left(\frac{y - p_{y,e}(t)}{\sigma(t)}\right)^2\right]\right\} \quad (27)$$

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

$$D = \frac{1}{2} \frac{d\sigma^2(t)}{dt} \quad (28)$$

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

$$D = C \Delta x \Delta y \left[ \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (29)$$

onde  $\Delta x$  e  $\Delta y$  são os intervalos de discretização da grade e  $C$  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).

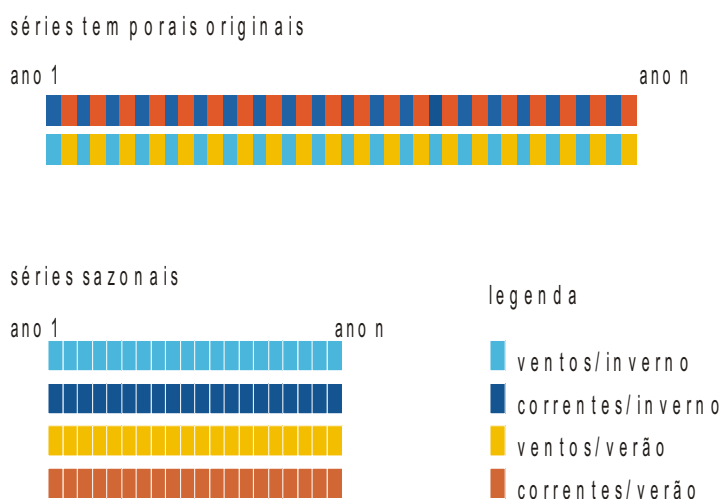
A espessura resultante de todo o descarte é então obtida através da soma da contribuição de cada elemento:

$$ESP(x, y, t) = \sum_{e=1}^{n_e} esp_e(x, y, t) \quad (30)$$

### II.6.2.2.2.2 - 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.

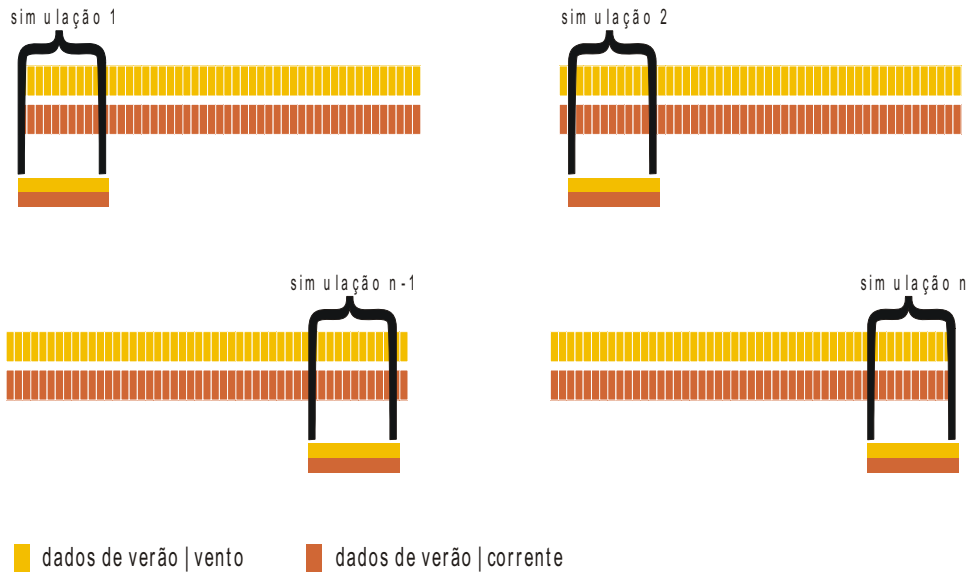
De acordo com os cenários meteo-oceanográficos locais, as séries temporais de vento e corrente são repartidas em 4 séries sazonais – correntes-verão, correntes-inverno, ventos-verão, ventos-inverno – conforme apresentado no esquema da Figura II.6.2.2.2-1.



**Figura II.6.2.2.2-1 - 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.6.2.2.2-2).

exemplo: probabilístico de verão



**Figura II.6.2.2.2-2 - Representação esquemática da combinação dos dados de vento e corrente para a simulação probabilística.**

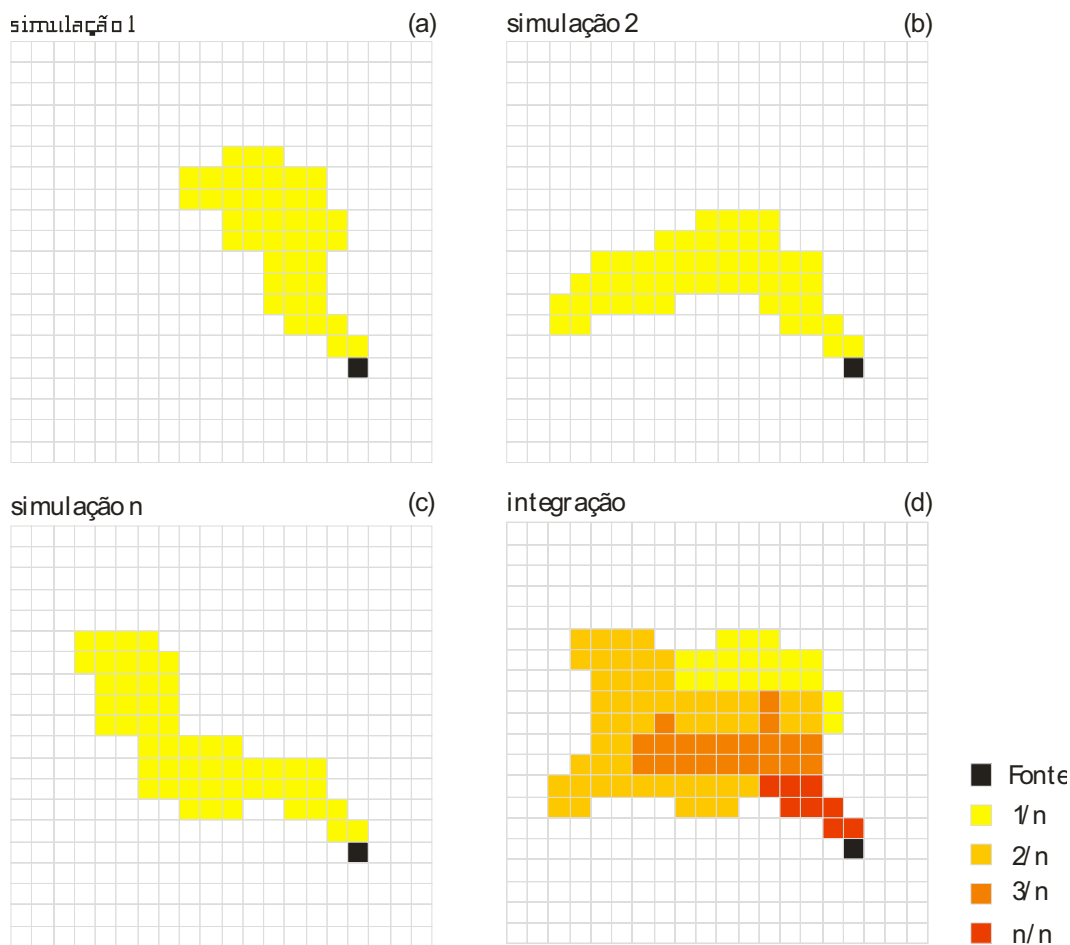
Cada combinação de vento e corrente irá determinar um comportamento para o vazamento. O modelo identifica, em cada combinação, os pontos de grade onde a espessura da mancha do constituinte esteve acima do limiar determinado (Figura II.6.2.2.2-3, b e c):

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

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

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.6.2.2.2-3d):

$$P(x, y) = \sum_{i_{sim}=1}^{n_{com}} \left( \frac{I(x, y)}{n_{com}} \right) \quad (31)$$



**Figura II.6.2.2.2-3 - 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.6.2.2.3 - Características da simulação**

As simulações foram realizadas considerando um evento de *blow-out* 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).

De acordo com a Especificação Técnica emitida pela PETROBRAS (ET N° - 3000.00-1000-986-PPC-001) que define os critérios a serem adotados na

modelagem de derrame de óleo no mar, as partículas são retiradas do domínio do modelo após completarem 30 dias na água.

Além da simulação de *blow-out*, na qual é considerado o volume de pior caso (2.400m<sup>3</sup>), foram ainda realizadas simulações para vazamentos de pequeno e médio volume, 8 m<sup>3</sup> e 200 m<sup>3</sup>, respectivamente. Nesses casos as simulações duraram 30 dias.

Em todas as simulações considerou-se como critério de existência de óleo espessuras maiores ou iguais ao limiar de  $3 \times 10^{-7}$  metros (limiar de detecção) (ELPN/IBAMA, 2002).

O óleo utilizado nas simulações é o 3-RNS-117-A, a seguir, na Tabela II.6.2.2.3-1 e Tabela II.6.2.2.3-2, serão apresentadas as características desse óleo e do vazamento.

**Tabela II.6.2.2.3-1 - Características do óleo utilizadas na simulação.**

Parâmetro	Valor	Unidade	Temperatura
API	41,9		
Densidade	0,812	g/cm <sup>3</sup>	20/24° C
Viscosidade dinâmica	33,00	cP	25° C

Fonte: Petrobras.

**Tabela II.6.2.2.3-2 - Localização do Vazamento.**

Longitude	37° 30' 00" W
Latitude	4° 00' 00" S

Fonte: Petrobras.

A seguir serão apresentadas as forçantes utilizadas durante a simulação probabilística.

#### II.6.2.2.4 - Forçantes

Na área compreendida entre as latitudes de 30° N e 30° S existe um domínio na circulação superficial dos ventos Alíseos, incluindo assim, a região dos Blocos BM-POT-16 e 17. Os Ventos Alísios são massas de ar superficiais provenientes das latitudes subtropicais que se movem em direção à região equatorial, mais precisamente em direção a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que marca o equador meteorológico. A ZCIT é caracterizada por uma faixa de baixa pressão devido ao aquecimento da região equatorial (Feitosa et.al., 1998). A sua posição média é 5° N, embora apresente um caráter migratório bem definido. No primeiro semestre, período de verão, a ZCIT se aproxima do equador, e no segundo semestre, no período de inverno, se afasta em direção ao norte. Esse caráter migratório influencia, não só, o regime de chuvas, como também, o padrão dos ventos nas regiões Norte e parte da Nordeste do Brasil, o que para efeitos práticos em modelagem é de extrema relevância. Para avaliar o comportamento do vento ao longo do ciclo sazonal da ZCIT foi conduzida uma análise no conjunto de dados oriundo da Reanálise do NCEP.

A base de dados conhecida como “Reanálises do NCEP” foi originada a partir de uma cooperação entre o NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) e o NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), com intuito de produzir inicialmente uma rede de 40 anos de dados meteorológicos globais com base nas análises dos campos atmosféricos (Kalnay et al., 1996). Posteriormente, esse projeto foi ampliado para uma janela de tempo de 50 anos (Kistler et al., 2001), e atualmente, estão disponíveis mais de 60 anos (1948-atual) de dados.

A Reanálise do NCEP (R-1) usa o estado da arte em sistemas de assimilação de dados e um banco de dados mais completo possível, abrangendo informações meteorológicas primárias das mais diversas fontes associadas aos dados do modelo atmosférico global do NCEP (Kistler et al., 2001).

Estes dados são amplamente utilizados pela comunidade científica, sendo, portanto adequados para utilização em estudos dessa natureza. Os dados primários utilizados para gerar as reanálises são de diferentes origens:

- Dados globais de radiossondas.
- Dados da superfície do mar obtidos através do projeto COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) no período de 1983 a 1996 (13 anos), originados de diversas fontes, dentre elas, observações de navios, bóias fixas, bóias móveis e estações oceânicas próximas à superfície.
- Dados aéreos, originados de observações por aeronaves em todo o globo, geralmente associados a projetos como GARP (Global Atmospheric Research Program) e GATE (Global Atlantic Tropical Experiment), por exemplo.
- Dados de Satélite, que começaram a ser obtidos em 1967, através de diversos programas. Atualmente, o NCEP/NCAR utiliza dados fornecidos pelo projeto TOVS (Operational Vertical Sounder System), com variáveis em três dimensões, cuja resolução espacial média é de 2,5 graus.
- Dados de vento em superfície, obtidos pelo sensor espacial Microwave/Imager (SSM/I) a partir de 1987, submetidos ao tratamento feito pela rede neural de KRANSNOPOLSKY et al. (1995) apud KALNAY et al. (1996).
- Dados de cobertura de nuvens obtidos por estimativas dos dados de Satélites Meteorológicos Geoestacionários (SMG). Esses dados estão disponíveis desde 1978.

Todos os dados utilizados nas reanálises passam por um rigoroso controle de qualidade e recebem um tratamento diferenciado de acordo com a forma de obtenção. Utilizando-se técnicas de interpolação espaço-temporal, que levam em consideração não somente a estatística como também a dinâmica dos fenômenos meteorológicos (análise objetiva).

As reanálises foram criadas por um sistema complexo de programas, bibliotecas, algoritmos e dados, que envolvem diversas etapas no processamento, tais como, decodificação, controle de qualidade, análises,

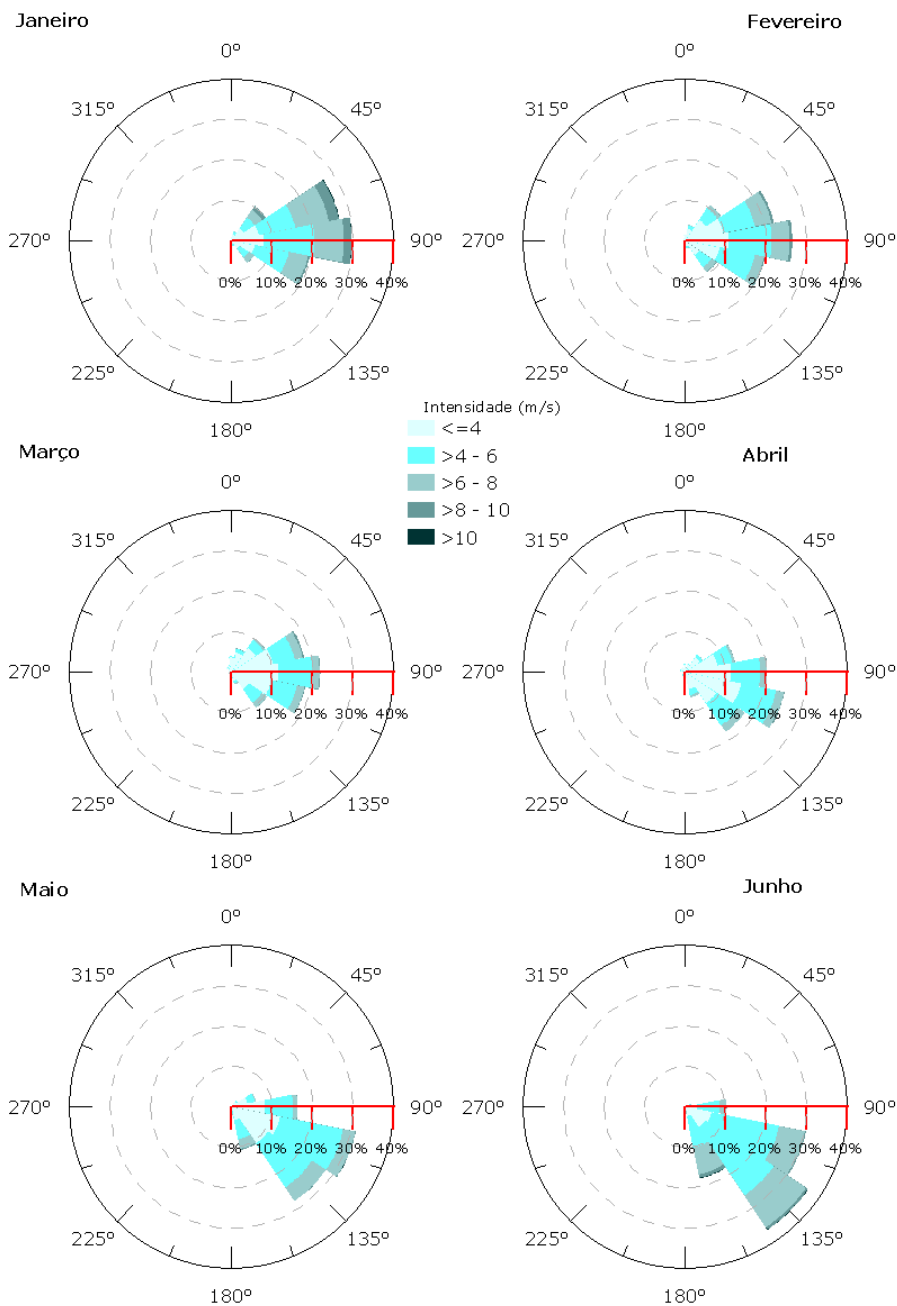
previsão, pós-processamento e armazenamento. Conseqüentemente, o processo se tornou propenso a erros humanos. Neste contexto, surgiu a Reanálise 2 (R-2), que além de minimizar os erros humanos no processamento, incorporou atualizações no modelo de previsão e diagnóstico (Kanamitsu *et al.*, 2002). Outro fator determinante para o desenvolvimento da R-2, foi o aumento significativo da quantidade e da qualidade dos dados coletados a partir do final dos anos 70. Assim, ao contrário da R-1 que está disponível de 1948 até os dias de hoje, a R-2 encontra-se disponível a partir de 1/1/1979 (CAMPOS, 2009).

O projeto R-2 (NCEP - DOE AMIP-II Reanalysis) trata-se de uma série global atualizada, de 1979 até 2008, que corrige os erros de processamento da R-1, utilizando um modelo de previsão e um sistema de assimilação de dados mais robustos. Assim, é gerada uma reanálise mais consistente e recomendada para usuários que eram afetados por alguns erros presentes na R-1. Dentre estes erros, podemos citar as análises de transientes no Hemisfério Sul; o uso de temperaturas próximas à superfície e cobertura de neve sobre os continentes no Hemisfério Norte durante o inverno; análise da umidade dos solos; análises do balanço de neve; e sensibilidade das análises à mudanças no modelo de assimilação (Kanamitsu *et al.*, 2002).

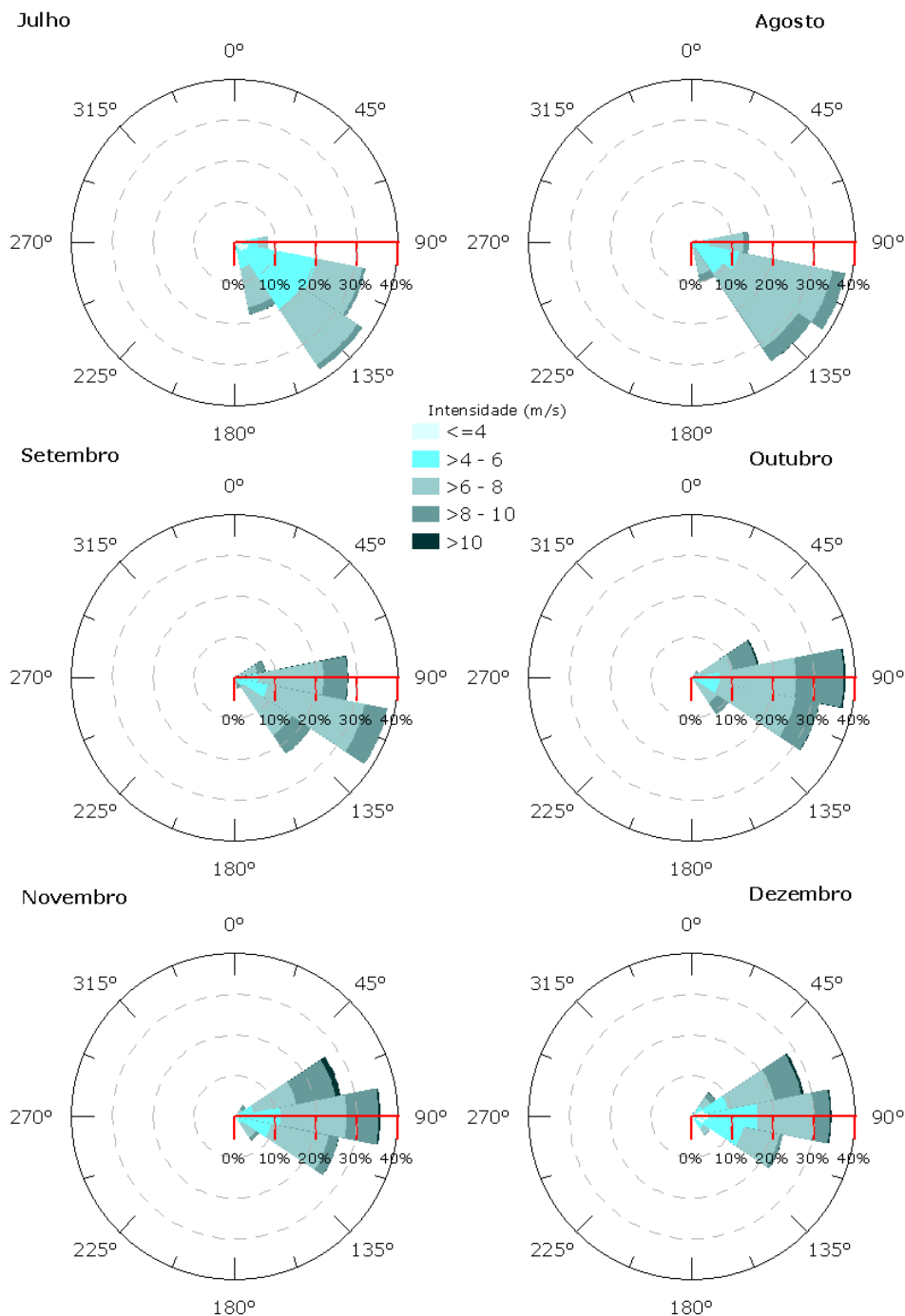
Deve ser ressaltado que a R-2, embora tenha passado por melhorias significativas, trata-se de uma atualização da R-1, e não uma nova geração da reanálise. Os produtos da R-2 estão disponíveis para o público através do Centro de Diagnósticos Climáticos do NCAR, e através da página: <http://www.cdc.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>.

Para este estudo foram tratados 30 anos de dados (1979 a 2008) da R-2, com uma frequência temporal de 6 horas (4 dados por dia). A resolução espacial na área em questão é de aproximadamente 1.8°. Essa análise subsidiou a definição de dois períodos com características distintas na direção do vento, fato que influencia diretamente o transporte do óleo. A seguir, são apresentadas as rosas dos ventos, elaboradas para o período analisado, na região dos blocos BM-POT-16-17 (Figura II.6.2.2.4-1 e Figura II.6.2.2.4-2).





**Figura II.6.2.2.4-1 - Rosa dos ventos dos meses de janeiro a junho na região dos blocos BM-POT-16-17.**



**Figura II.6.2.2.4-2 - Rosa dos ventos dos meses de julho a dezembro na região dos blocos BM-POT-16-17.**

A análise dos 30 anos de vento do NCEP possibilitou uma caracterização da sazonalidade do vento na região dos Blocos BM-POT-16 e 17. Entre os meses de outubro a março, a maior ocorrência é de ventos de leste, com

eventos extremos associados à direção nordeste, para o estudo em questão, esse período foi definido como verão. Já entre os meses de abril a setembro, a maior ocorrência é de ventos de sudeste, portanto, esse período foi definido como de inverno.

Os dados de correntes utilizados foram obtidos da base de dados da PROOCEANO. Nesse estudo foi analisada uma série temporal de 1 ano de dados, sendo utilizado na modelagem um período de 6 meses, característicos para cada situação sazonal.

Uma descrição detalhada dos mesmos encontra-se no Relatório de Modelagem Hidrodinâmica, onde é descrita a dinâmica oceânica dessa região.

### **II.6.2.2.5 - 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 e 2.400m<sup>3</sup>, para os cenários de verão e inverno.

Para a obtenção destes resultados foram realizadas 1.500 diferentes simulações para cada cenário (verão e inverno) nos diferentes volumes de vazamento 8, 200 e 2.400m<sup>3</sup>, totalizando 9.000 possíveis cenários ambientais de vazamento.

O cenário de pior caso, para ser simulado no modo determinístico, será definido através da análise dos resultados sazonais, sendo escolhida a situação onde o óleo atinja a costa no menor período de tempo possível após o início do vazamento.

No modo determinístico também será apresentada a trajetória seguida pelo óleo em condições meteo-oceanográficas dominantes na região.

O intemperismo do óleo será apresentado ao final do estudo, através de gráficos que apresentam o balanço de massa do constituinte ao longo da simulação.

A Tabela II.6.2.2.5-1, a seguir, resume a forma como os resultados serão apresentados.

#### ***Tabela II.6.2.2.5-1 - Ordem de apresentação dos resultados.***

**Modo Probabilístico**

---

**Vazamentos instantâneos (8 e 200 m<sup>3</sup>)\***

---

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo

Tabela comparativa de probabilidade e tempo de chegada do óleo, entre os cenários

---

**Blow-out \***

---

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo

Histogramas de Tempo de Chegada de Óleo

Volume Máximo de Óleo na Costa

Tabela comparativa de probabilidade, tempo e volume de óleo, entre os cenários

---

**Modo Determinístico \***

---

Pior caso

Condições Meteo-oceanográficas frequentes

Evolução Temporal de Volume de Óleo Acumulado na Costa

Intemperismo

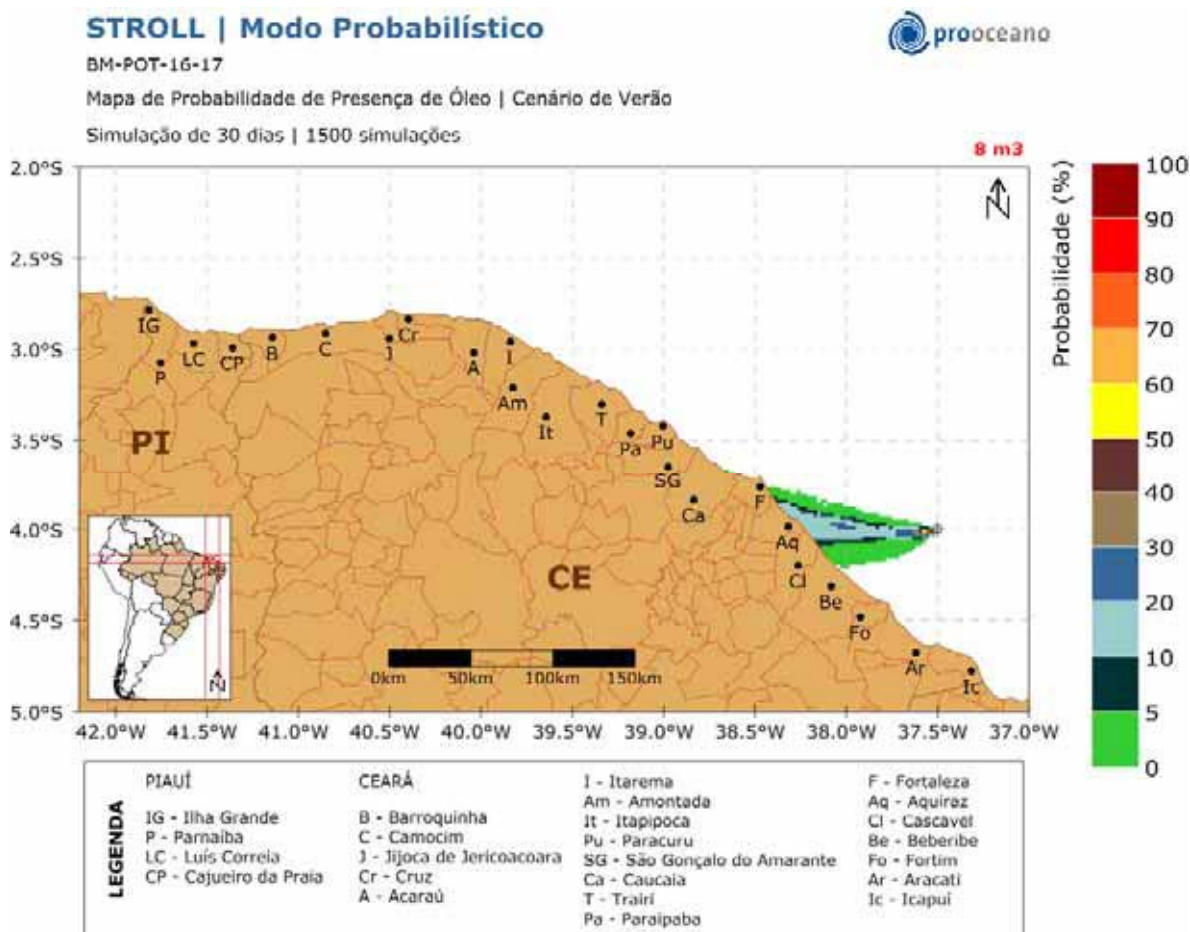
\* cenário de verão e inverno.

## **II.6.2.2.5.1 - Modo probabilístico**

### **II.6.2.2.5.1.1 - Vazamento de 8m<sup>3</sup>**

#### **II.6.2.2.5.1.1.1 - 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.6.2.2.5-1, enquanto o tempo mínimo de chegada encontra-se na Figura II.6.2.2.5-2.



**Figura II.6.2.2.5-1 - 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).**

Observa-se que a deriva do óleo ocorreu rumo a oeste do poço, podendo atingir desde Caucaia até Beberibe, estado do Ceará. A maior probabilidade, 20-10%, foi registrada em Aquiraz e Cascavel.

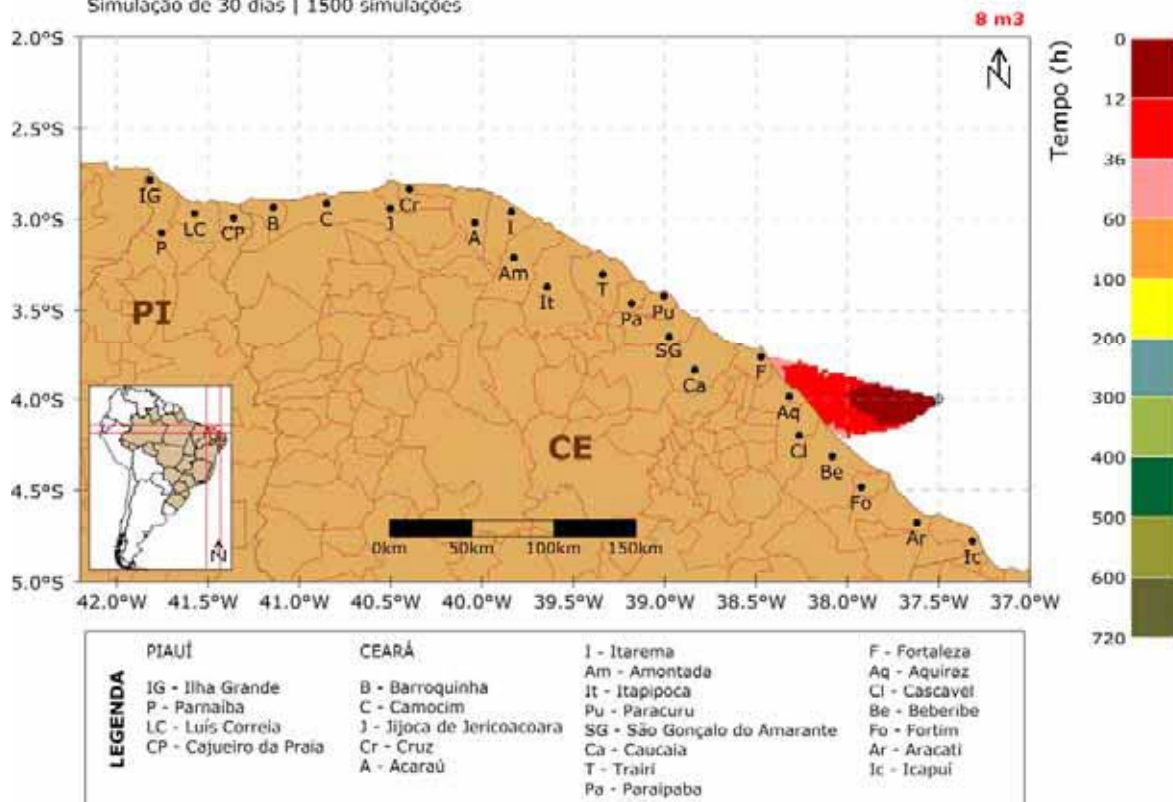
### STROLL | Modo Probabilístico



BM-POT-16-17

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada do Óleo | Cenário de Verão

Simulação de 30 dias | 1500 simulações

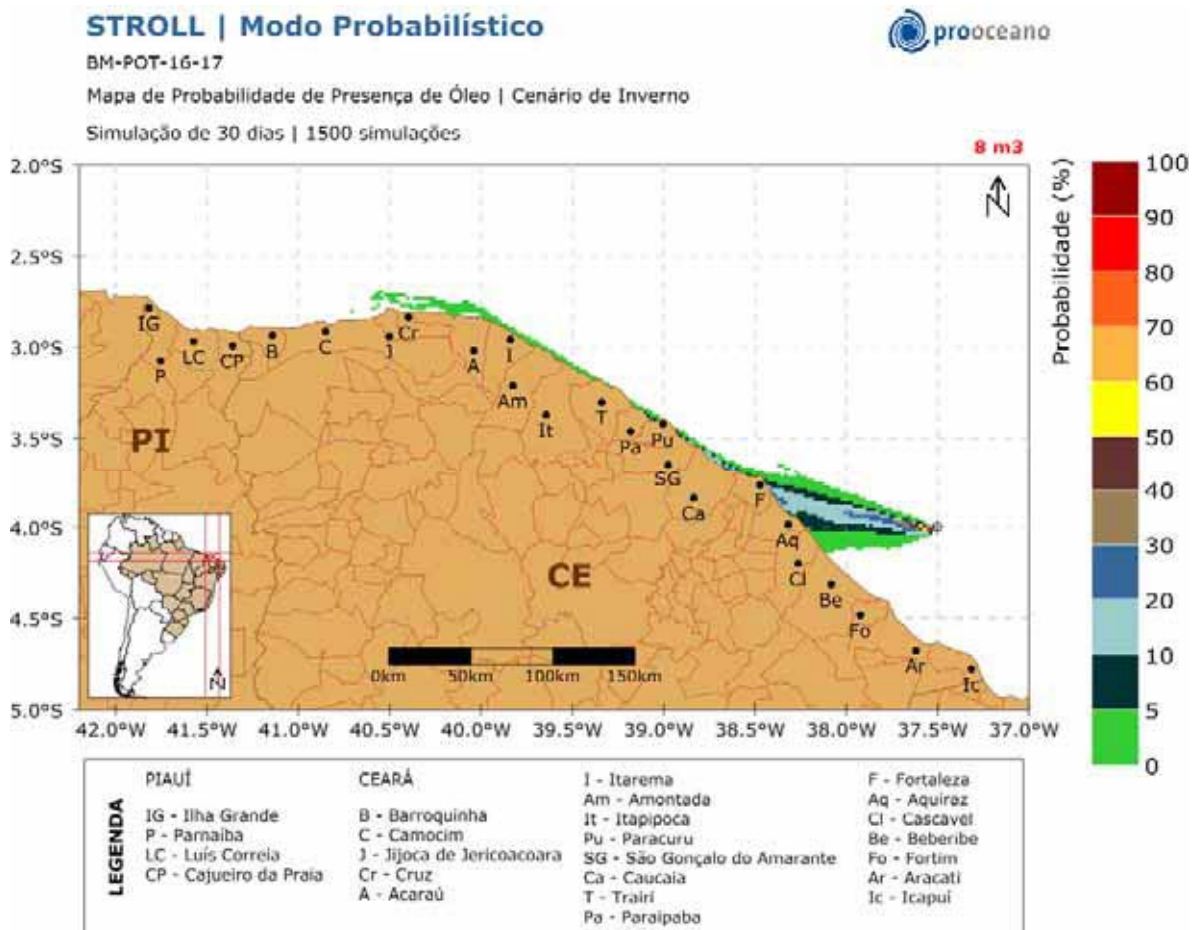


**Figura II.6.2.2.5-2 - Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo, para vazamento de 8 m<sup>3</sup>, no cenário de verão. Simulação de 720 horas (30 dias).**

O tempo mínimo de toque na costa foi de 12-36 horas, desde Aquiraz até Beberibe - CE.

#### **II.6.2.2.5.1.1.2 - Inverno**

O Mapa de Probabilidade de presença de óleo para o vazamento de 8 m<sup>3</sup> no cenário de inverno encontra-se na Figura II.6.2.2.5-3, enquanto o tempo mínimo de chegada encontra-se na Figura II.6.2.2.5-4.



**Figura II.6.2.2.5-3 - 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).**

Neste cenário a deriva do óleo atingiu uma maior extensão de costa, desde Beberibe até Cruz, ainda no Ceará. A maior probabilidade, 30-20%, ficou restrita entre os municípios de Caucaia e Aquiraz.

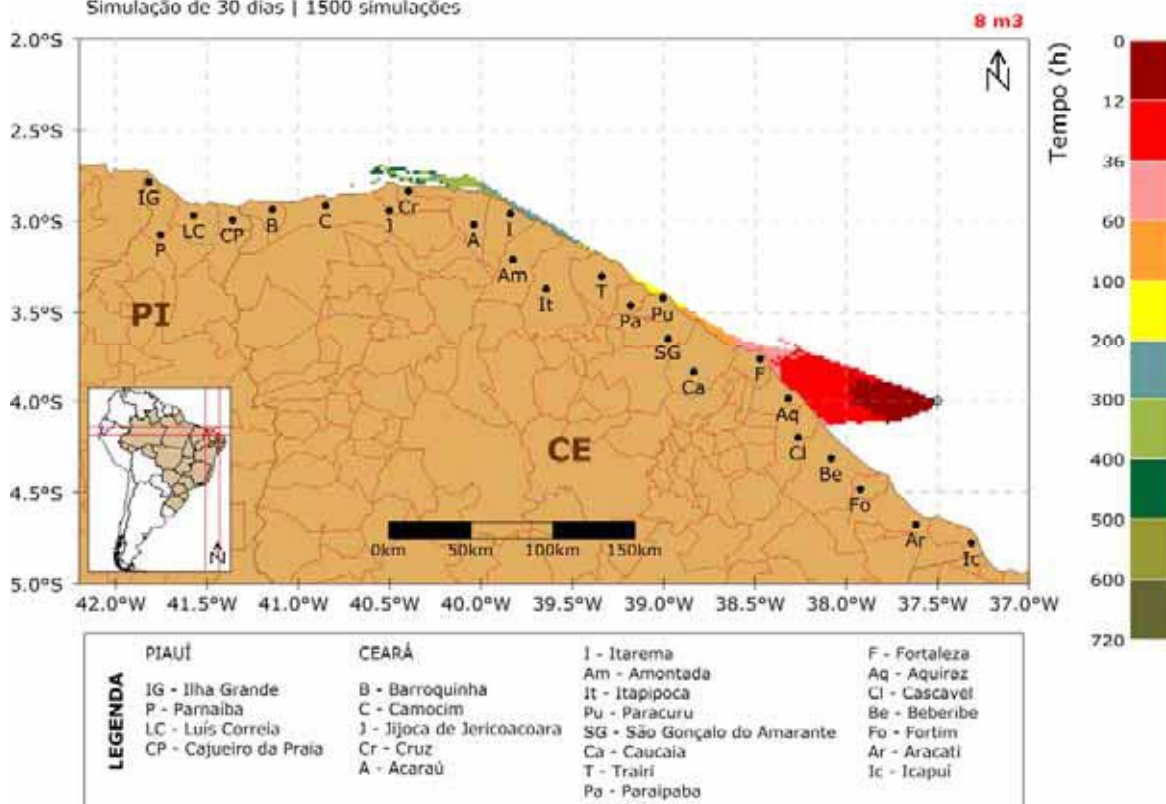
**STROLL | Modo Probabilístico**



BM-POT-16-17

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada do Óleo | Cenário de Inverno

Simulação de 30 dias | 1500 simulações



**Figura II.6.2.2.5-4 - 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).**

O tempo mínimo de chegada de óleo na costa também foi de 12-36 horas, na região de Aquiraz e Cascavel. Cruz, o último município a oeste que pode ser atingido pelo óleo, apresentou tempo mínimo de 300-400 horas.

A seguir, na Tabela II.6.2.2.5-2, serão apresentadas as classes de probabilidade e de tempo mínimo de chegada de óleo de cada município com possibilidade de ser atingido pelo óleo em um derrame de pequeno volume (8 m<sup>3</sup>).



**Tabela II.6.2.2.5-2 - Probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um evento de derrame de pequeno volume, nos cenários de verão e inverno.**

MUNICÍPIOS		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo de Toque (h)	
		VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
CE	Cruz	-	5-0	-	300-400
	Acaraú	-	5-0	-	200-300
	Itarema	-	5-0	-	200-300
	Amontada	-	5-0	-	200-300
	Itapipoca	-	5-0	-	100-200
	Trairi	-	10-5	-	100-200
	Paraipaba	-	10-5	-	100-200
	Paracuru	-	20-10	-	100-200
	São Gonçalo do Amarante	-	20-10	-	60-100
	Caucaia	5-0	30-20	60-100	60-100
	Fortaleza	5-0	30-20	36-60	36-60
	Aquiraz	20-10	30-20	12-36	12-36
	Cascavel	20-10	5-0	12-36	12-36
	Beberibe	10-5	5-0	12-36	36-60

### II.6.2.2.5.1.2 - Vazamento de 200m<sup>3</sup>

#### II.6.2.2.5.1.2.1 - Verão

O Mapa de Probabilidade de presença de óleo para o vazamento de médio porte (200 m<sup>3</sup>), no cenário de verão, 6 horas após o início do vazamento encontra-se na Figura II.6.2.2.5-5, e em 720 horas (30 dias) na Figura II.6.2.2.5-6. O tempo mínimo de chegada encontra-se na Figura II.6.2.2.5-7.

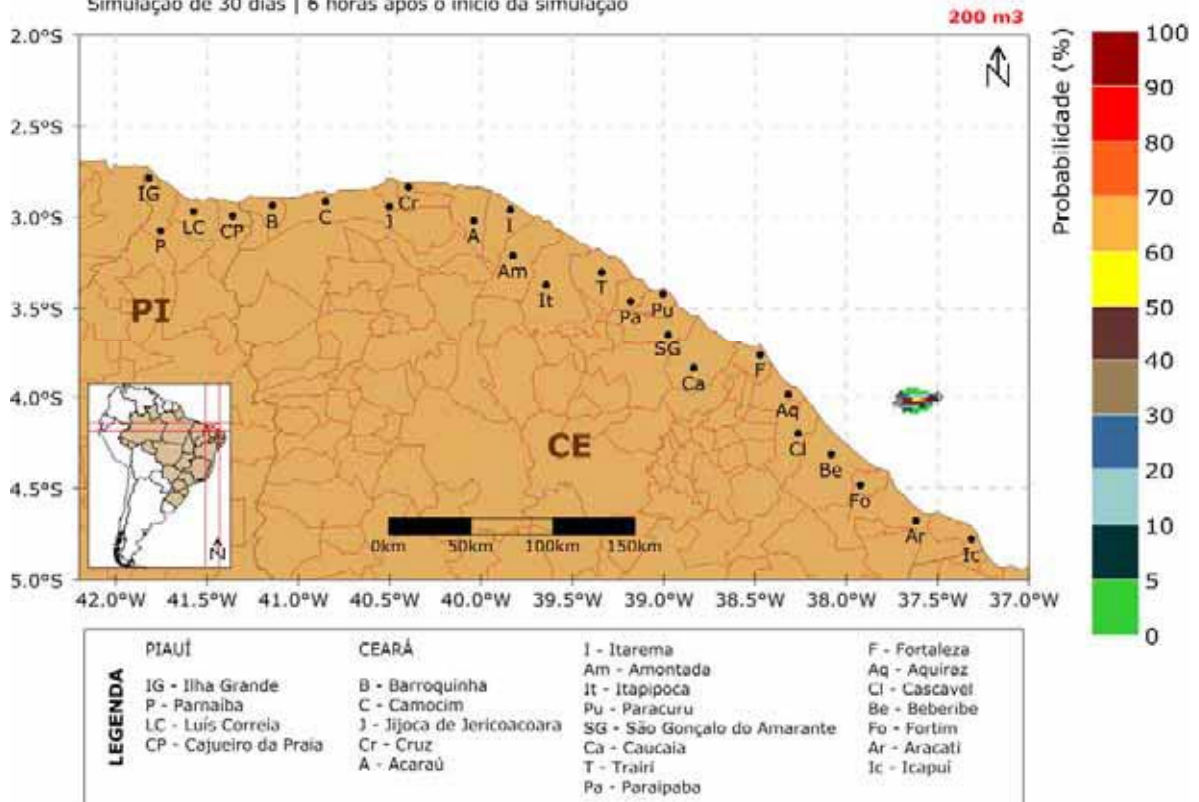
**STROLL | Modo Probabilístico**



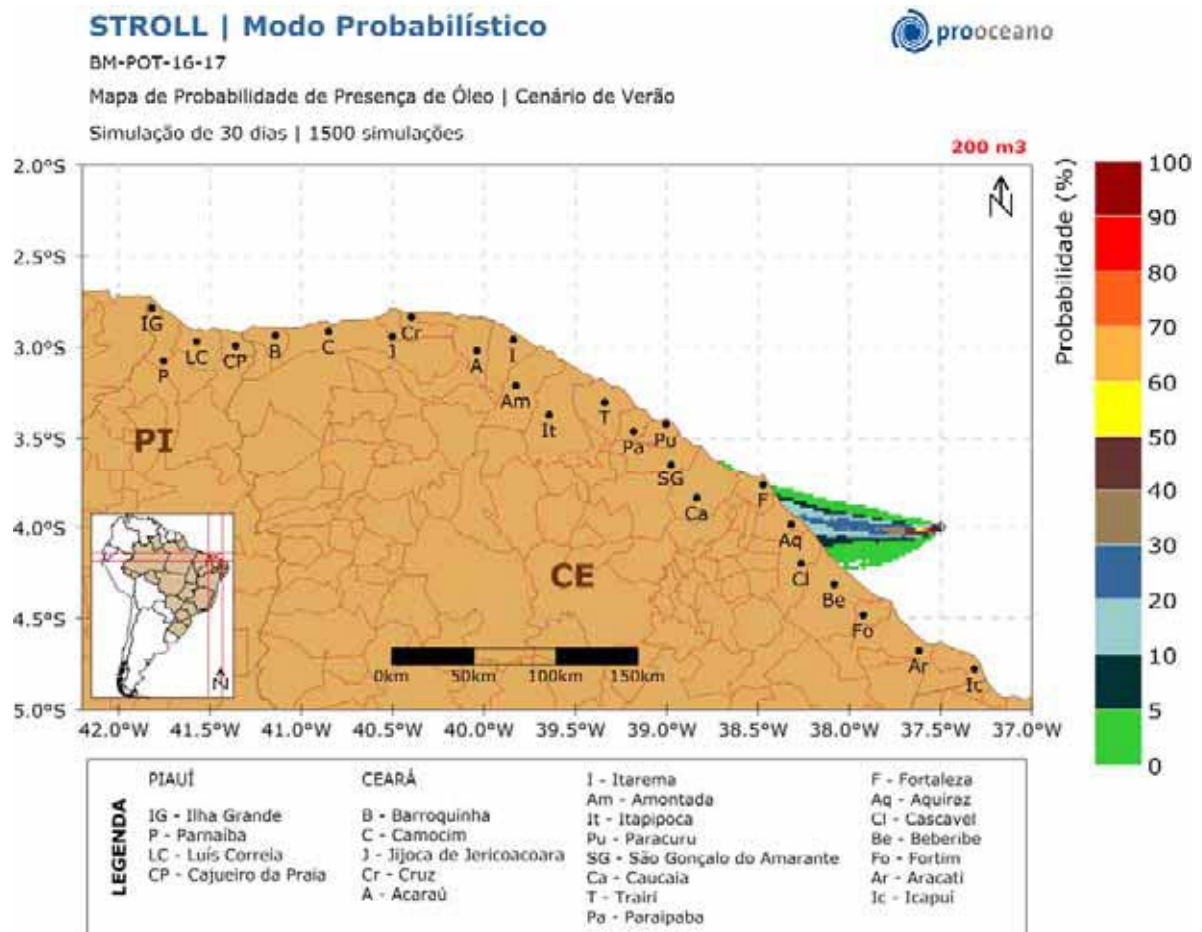
BM-POT-16-17

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo | Cenário de Verão

Simulação de 30 dias | 6 horas após o início da simulação

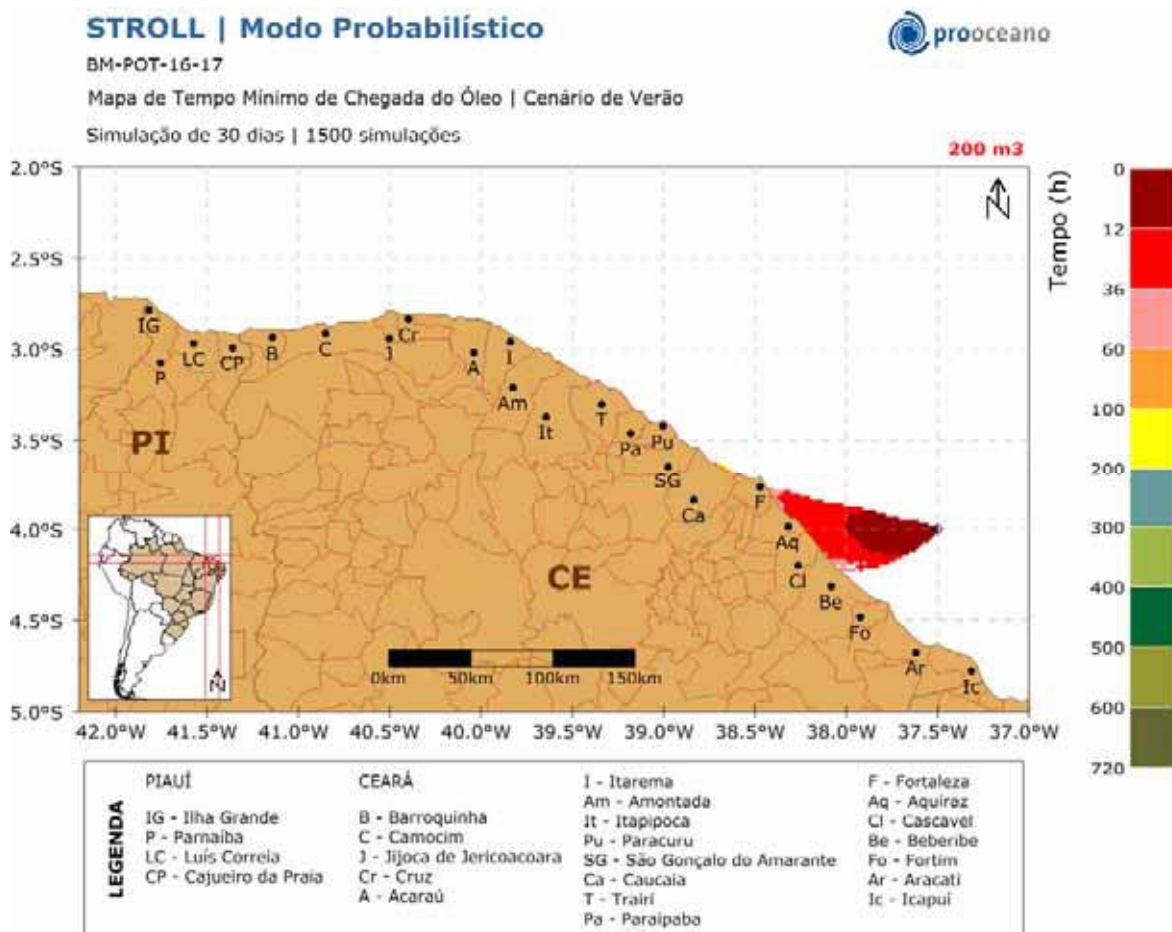


**Figura II.6.2.2.5-5 - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de 200 m<sup>3</sup>, no cenário de verão. Simulação de 6 horas.**



**Figura II.6.2.2.5-6 - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de 200 m<sup>3</sup>, no cenário de verão. Simulação de 720 horas.**

Observa-se no Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo, que a deriva do óleo ocorreu rumo a oeste do poço. O óleo pode atingir a costa desde Beberibe até Caucaia, estado do Ceará. Aquiraz é o município que apresentou a maior probabilidade de presença de óleo, 30-20%.



**Figura II.6.2.2.5-7 - Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo, para vazamento de 200 m<sup>3</sup>, no cenário de verão. Simulação de 720 horas.**

O tempo mínimo de toque na costa ocorreu em 12-36 horas após o início do vazamento, de Beberibe até Aquiraz.

### II.6.2.2.5.1.2.2 - Inverno

O Mapa de Probabilidade de presença de óleo para o vazamento de médio porte (200 m<sup>3</sup>), no cenário de inverno, em 6 horas após o início do vazamento encontra-se na Figura II.6.2.2.5-8, e em 720 horas (30 dias) na Figura II.6.2.2.5-9. O tempo mínimo de chegada encontra-se na Figura II.6.2.2.5-10.

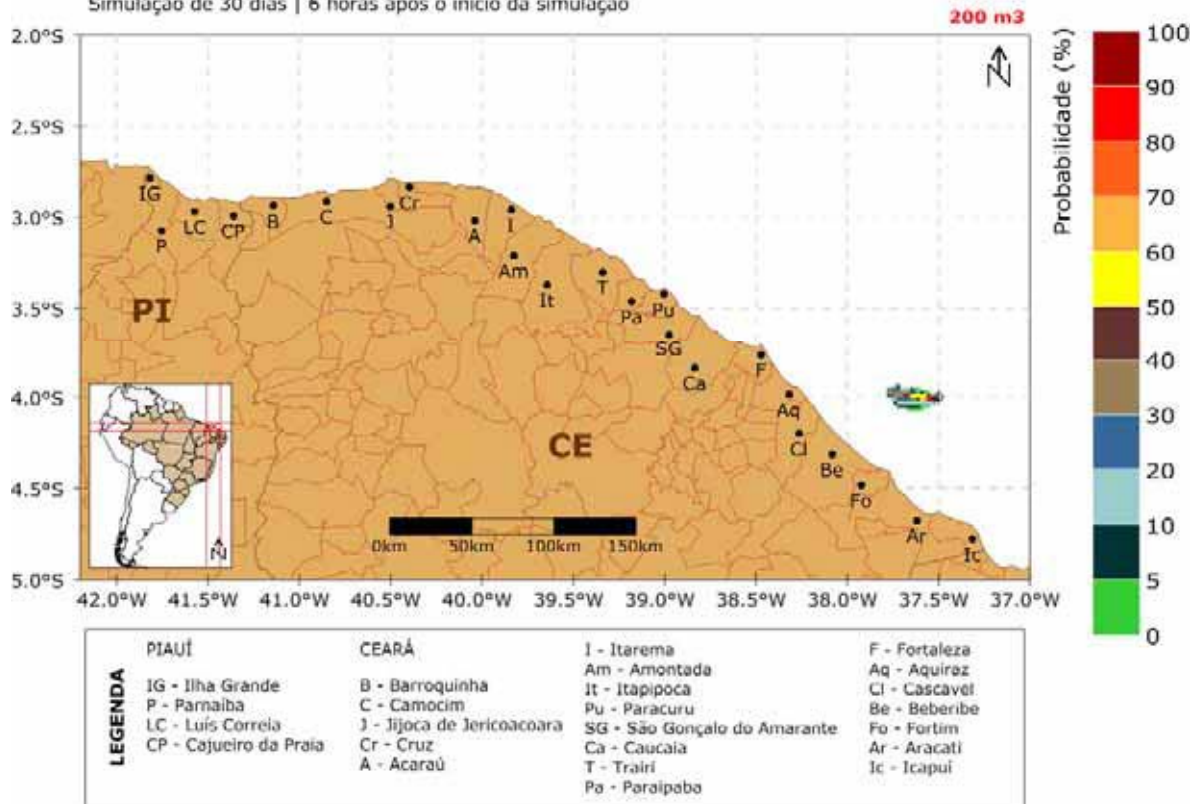
**STROLL | Modo Probabilístico**



BM-POT-16-17

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo | Cenário de Inverno

Simulação de 30 dias | 6 horas após o início da simulação



**Figura II.6.2.2.5-8 - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de 200 m<sup>3</sup>, no cenário de inverno. Simulação de 6 horas.**

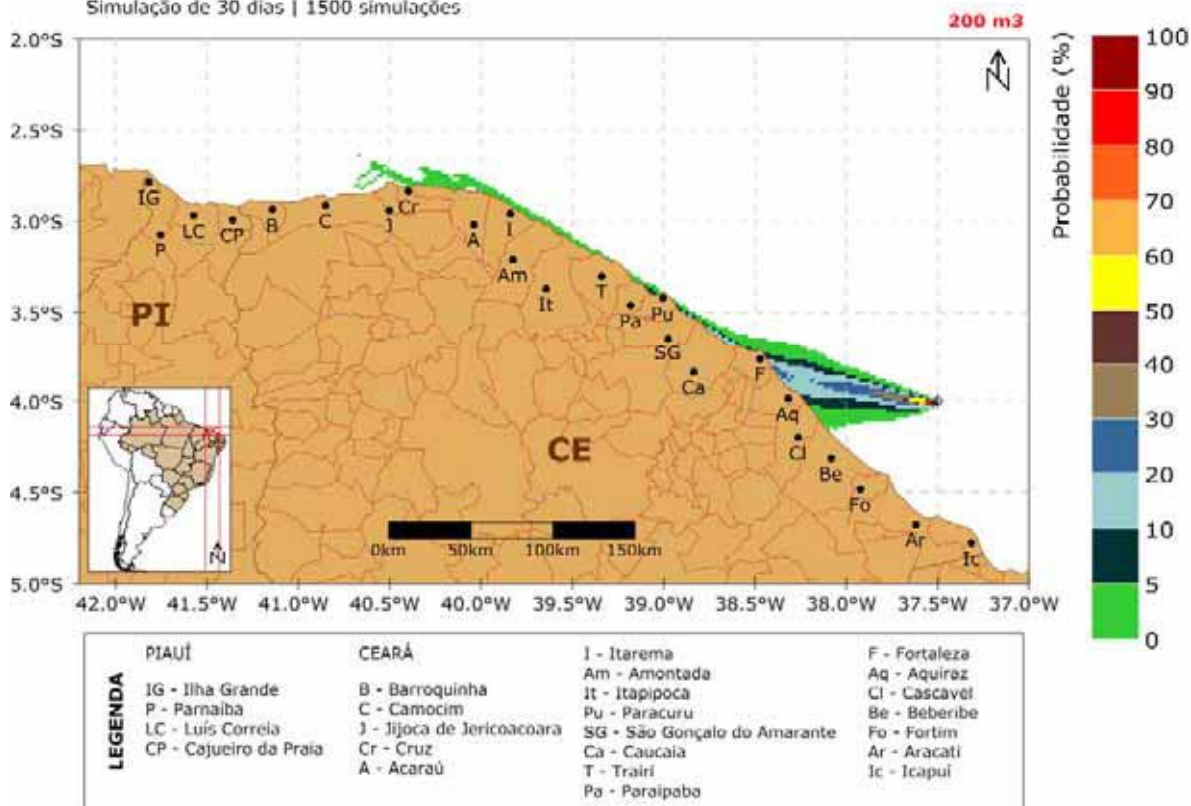
### STROLL | Modo Probabilístico



BM-POT-16-17

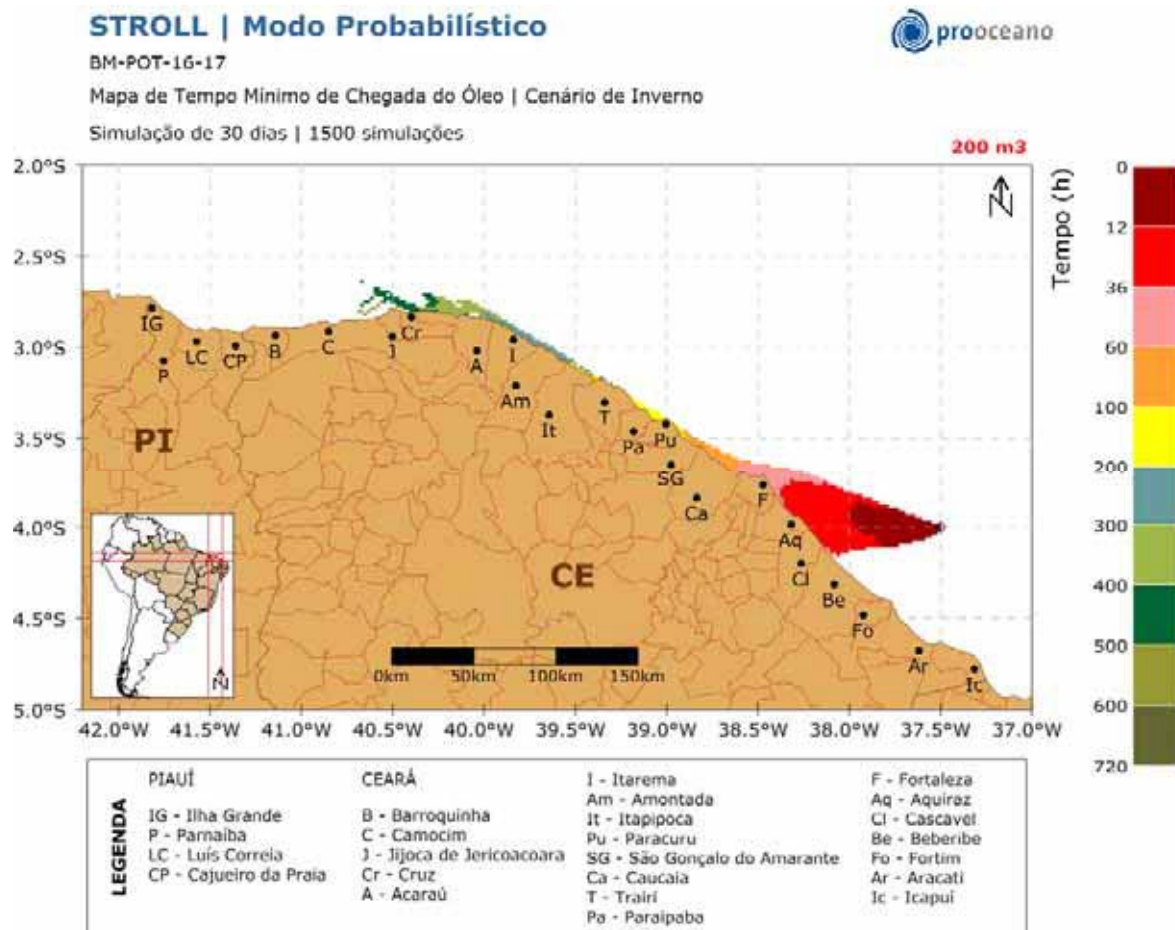
Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo | Cenário de Inverno

Simulação de 30 dias | 1500 simulações



**Figura II.6.2.2.5-9 - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para vazamento de 200 m<sup>3</sup>, no cenário de inverno. Simulação de 720 horas.**

Observa-se no Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo, que a deriva também ocorreu para oeste do poço, porém, atingiu longitudes menores. A maior probabilidade, 30-20%, foi registrada em Fortaleza e Aquiraz.



**Figura II.6.2.2.5-10 - Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo, para vazamento de 200 m<sup>3</sup>, no cenário de inverno. Simulação de 720 horas.**

O tempo mínimo de toque na costa também foi de 12-36 horas na mesma região observada no cenário de verão, de Beberibe até Aquiraz.

A seguir, na Tabela II.6.2.2.5-3, serão apresentadas as classes de probabilidade e de tempo mínimo de chegada de óleo de cada município com possibilidade de ser atingido pelo óleo em um derrame de médio volume (200 m<sup>3</sup>).

**Tabela II.6.2.2.5-3 - Volume Máximo, Probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um evento derrame de médio volume, nos cenários de verão e inverno.**

	MUNICÍPIOS	Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo de Toque (h)	
		VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
CE	<b>Cruz</b>	-	5-0	-	400-500
	<b>Acaraú</b>	-	5-0	-	200-300
	<b>Itarema</b>	-	5-0	-	200-300
	<b>Amontada</b>	-	5-0	-	200-300
	<b>Itapipoca</b>	-	5-0	-	100-200
	<b>Trairi</b>	-	10-5	-	100-200
	<b>Paraipaba</b>	-	10-5	-	100-200
	<b>Paracuru</b>	-	10-5	-	100-200
	<b>São Gonçalo do Amarante</b>	-	20-10	-	60-100
	<b>Caucaia</b>	5-0	20-10	60-100	36-60
	<b>Fortaleza</b>	5-0	30-20	36-60	36-60
	<b>Aquiraz</b>	30-20	30-20	12-36	12-36
	<b>Cascavel</b>	20-10	10-5	12-36	12-36
	<b>Beberibe</b>	10-5	5-0	12-36	12-36

### II.6.2.2.5.1.3 - Blow-out

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nas simulações probabilísticas de *blow-out*. Para esses cenários foi considerado um vazamento contínuo durante 30 (trinta) dias. O tempo simulado abrange os 30 dias de vazamento e mais 30 dias após o término do mesmo, totalizando 60 dias de simulação.

#### II.6.2.2.5.1.3.1 - Verão

O Mapa de Probabilidade e o Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo para um cenário de *blow-out* com volume vazado de 2.400m<sup>3</sup>, no período de verão são apresentados na Figura II.6.2.2.5-14 e Figura II.6.2.2.5-15, respectivamente.

Os Mapas de Probabilidade em 12, 36 e 60 horas após o início do vazamento encontram-se na Figura II.6.2.2.5-11, Figura II.6.2.2.5-12 e Figura II.6.2.2.5-13, respectivamente.



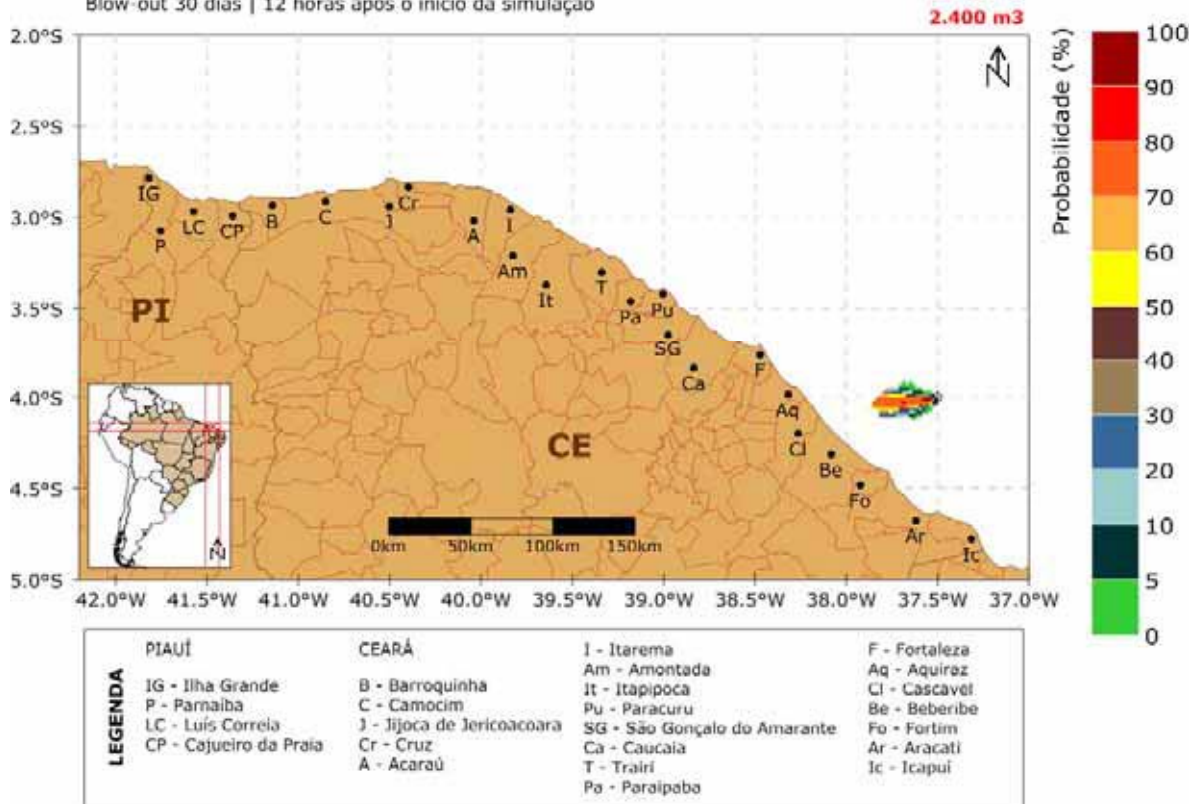
**STROLL | Modo Probabilístico**



BM-POT-16-17

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo | Cenário de Verão

Blow-out 30 dias | 12 horas após o início da simulação



**Figura II.6.2.2.5-11 - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para uma simulação de 12 horas no cenário de verão.**

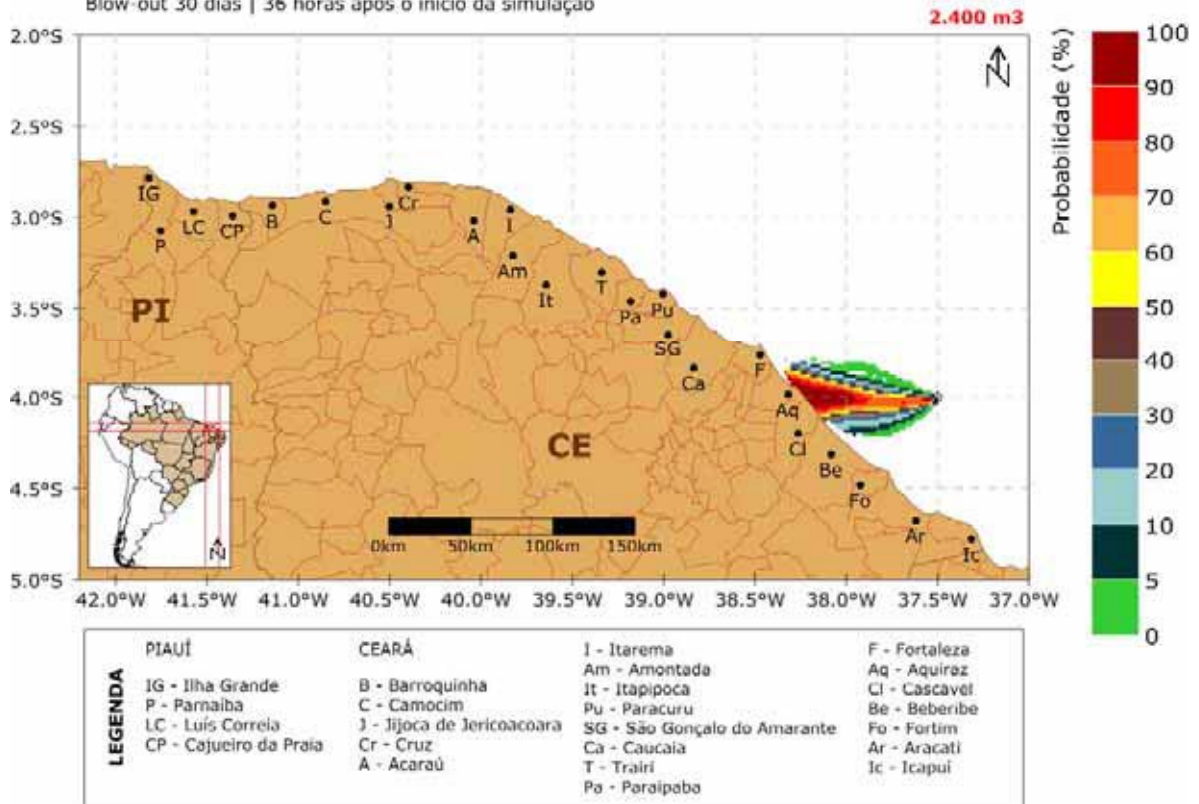
**STROLL | Modo Probabilístico**



BM-POT-16-17

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo | Cenário de Verão

Blow-out 30 dias | 36 horas após o início da simulação



**Figura II.6.2.2.5-12 - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para uma simulação de 36 horas no cenário de verão.**

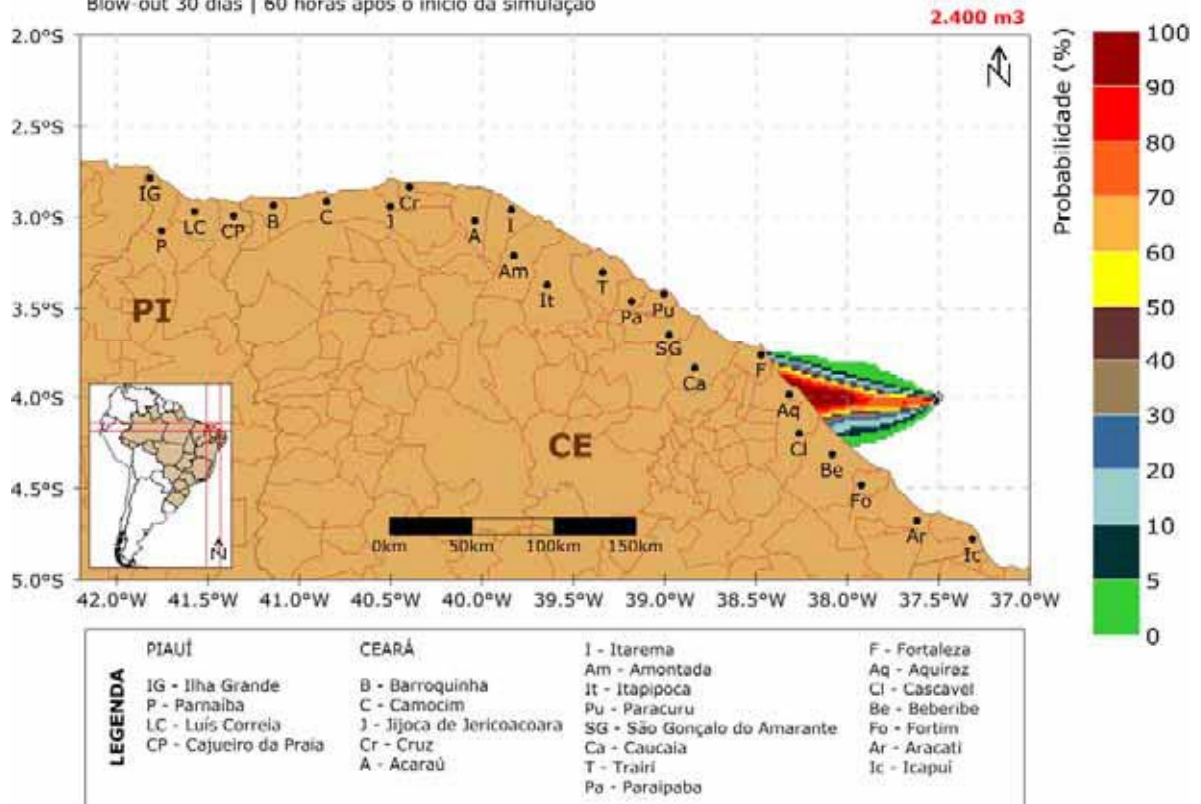
**STROLL | Modo Probabilístico**



BM-POT-16-17

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo | Cenário de Verão

Blow-out 30 dias | 60 horas após o início da simulação



**Figura II.6.2.2.5-13 - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para uma simulação de 60 horas no cenário de verão.**

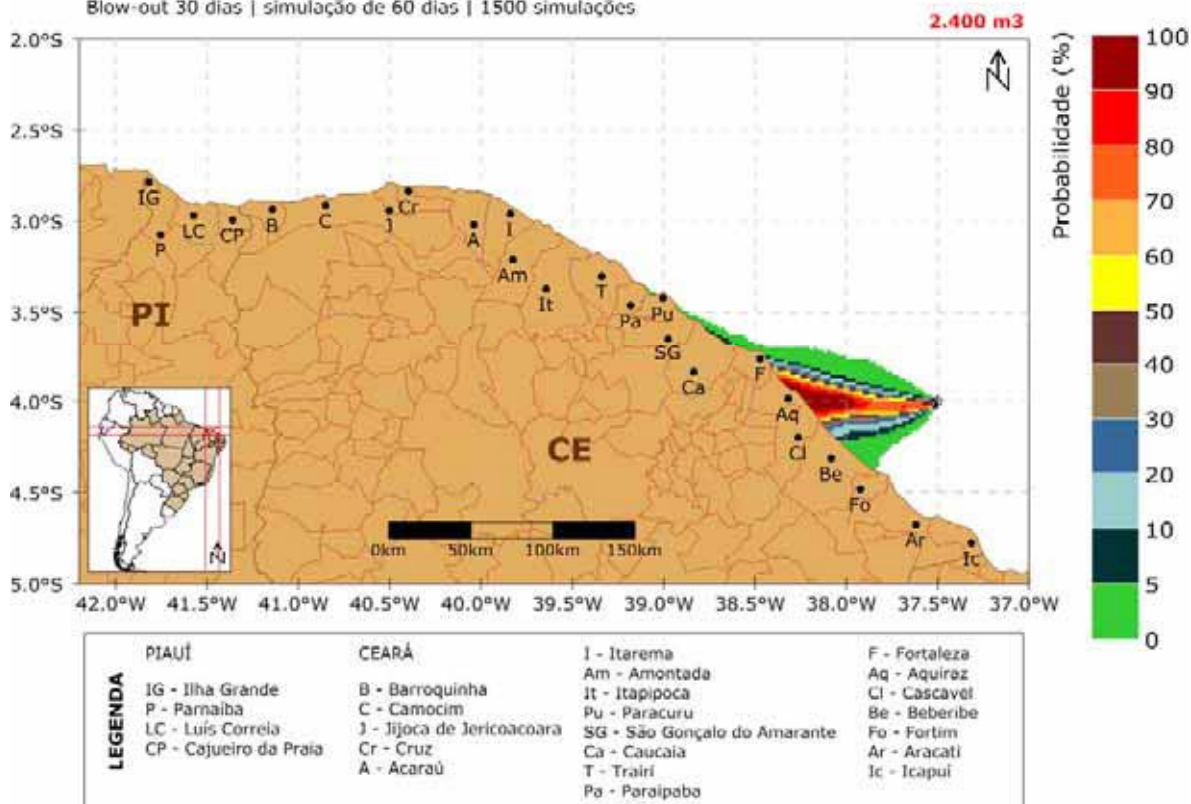
### STROLL | Modo Probabilístico



BM-POT-16-17

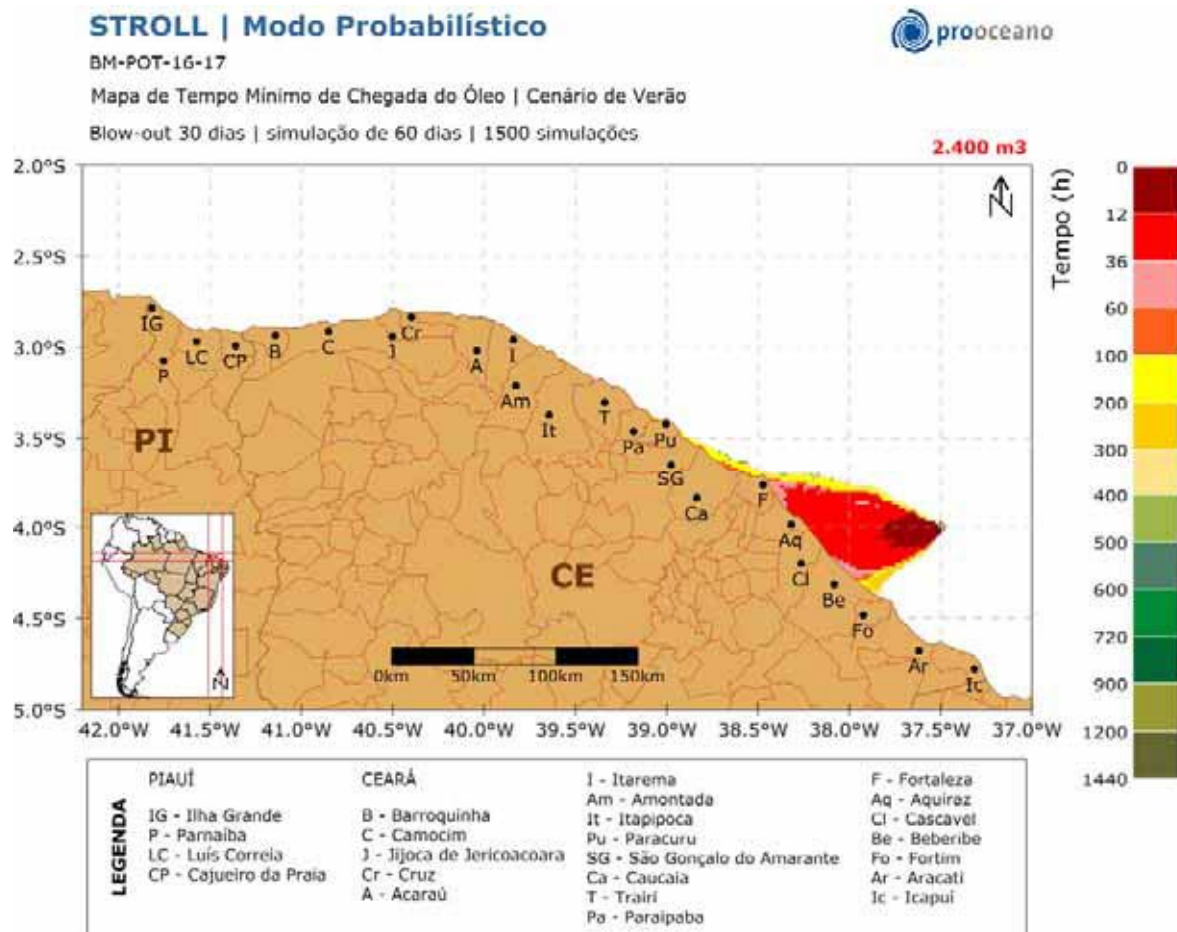
Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo | Cenário de Verão

Blow-out 30 dias | simulação de 60 dias | 1500 simulações



**Figura II.6.2.2.5-14 - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão.**

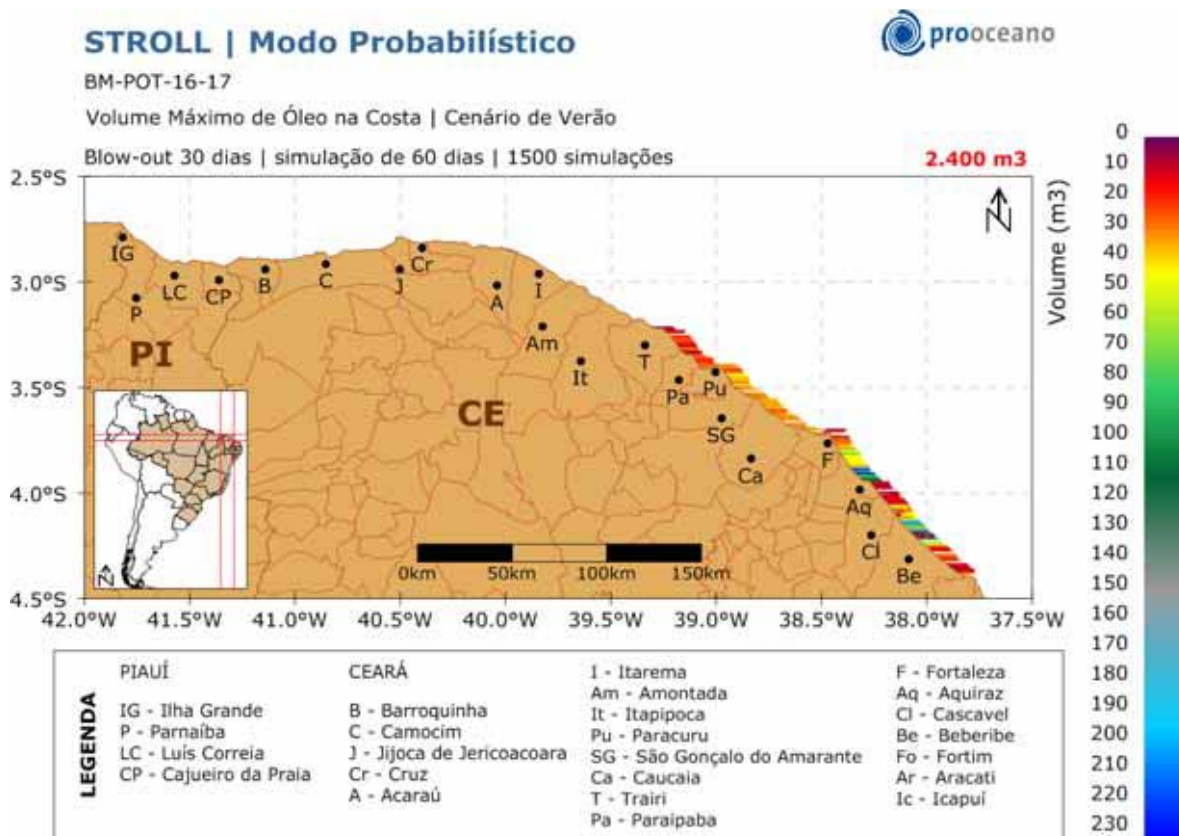
O resultado probabilístico indica uma deriva preferencial para oeste, com probabilidades de até 100-90 % do óleo atingir a costa. O toque na costa ocorre desde Beberibe, até Trairi, ambos no Estado do Ceará.



**Figura II.6.2.2.5-15 - Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de óleo, para um vazamento de 30 dias, no cenário de verão.**

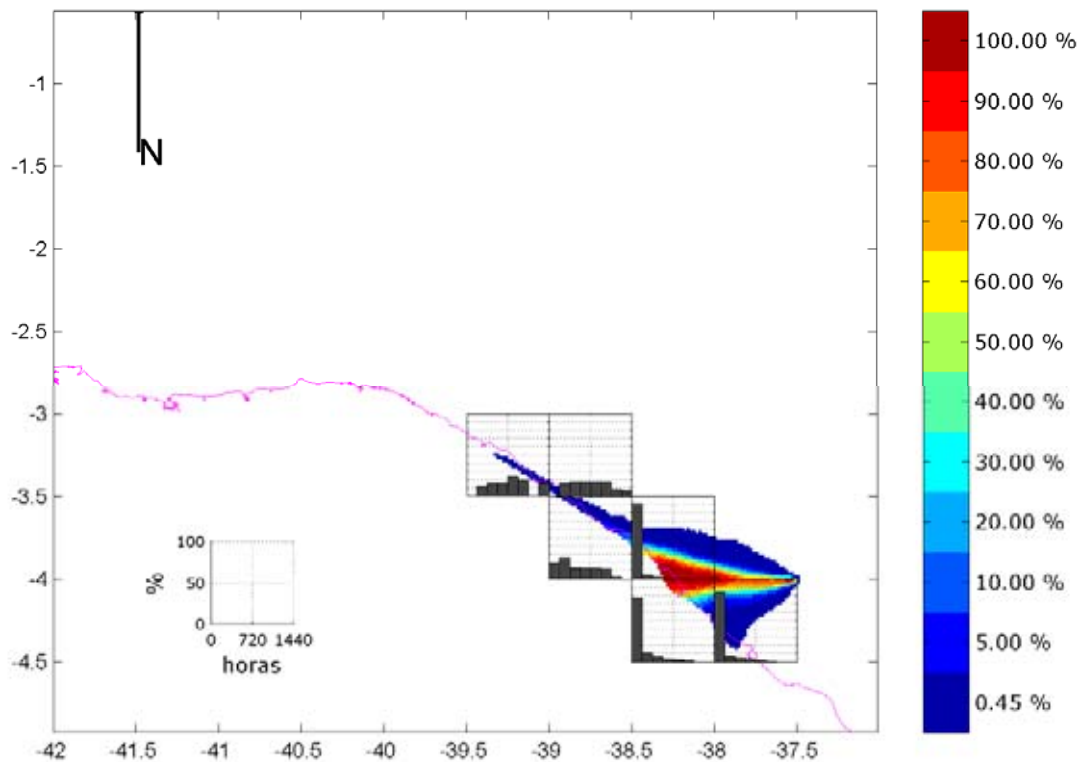
O tempo mínimo de toque na costa, nesse cenário, ocorre entre 12-36 horas, em Cascavel e Aquiraz, ambos no Ceará.

Analisando o volume máximo de óleo que atinge a costa (Figura II.6.2.2.5-16), observa-se que pode chegar a 237,01 m<sup>3</sup> no município de Aquiraz - CE.



**Figura II.6.2.2.5-16 - Volume máximo de óleo na costa, após as simulações de 60 dias no cenário de verão.**

Para uma melhor análise dos tempos de chegada de óleo na costa foram gerados histogramas com as frequências de ocorrência das classes de tempo mínimo de chegada de óleo na costa para toda a simulação probabilística (Figura II.6.2.2.5-17). O gráfico de probabilidade com os histogramas de tempo de chegada facilita a análise integrada dos resultados.



**Figura II.6.2.2.5-17 - Histogramas de tempo de chegada de óleo próximo à costa no cenário de verão.**

Os histogramas de tempo de chegada, no cenário de verão mostram que, nas regiões com mais alta probabilidade de toque, os tempos de chegada concentram-se na 1ª metade da simulação (0 - 720h).

### **II.6.2.2.5.1.3.2 - Inverno**

O Mapa de Probabilidade e o Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de Óleo para um cenário de *blow-out* com volume vazado de  $2.400\text{m}^3$ , no período de inverno são apresentados na Figura II.6.2.2.5-21 e Figura II.6.2.2.5-22, respectivamente.

Os Mapas de Probabilidade em 12, 36 e 60 horas após o início do vazamento encontram-se nas Figura II.6.2.2.5-18, Figura II.6.2.2.5-19 e Figura II.6.2.2.5-20, respectivamente.

**STROLL | Modo Probabilístico**

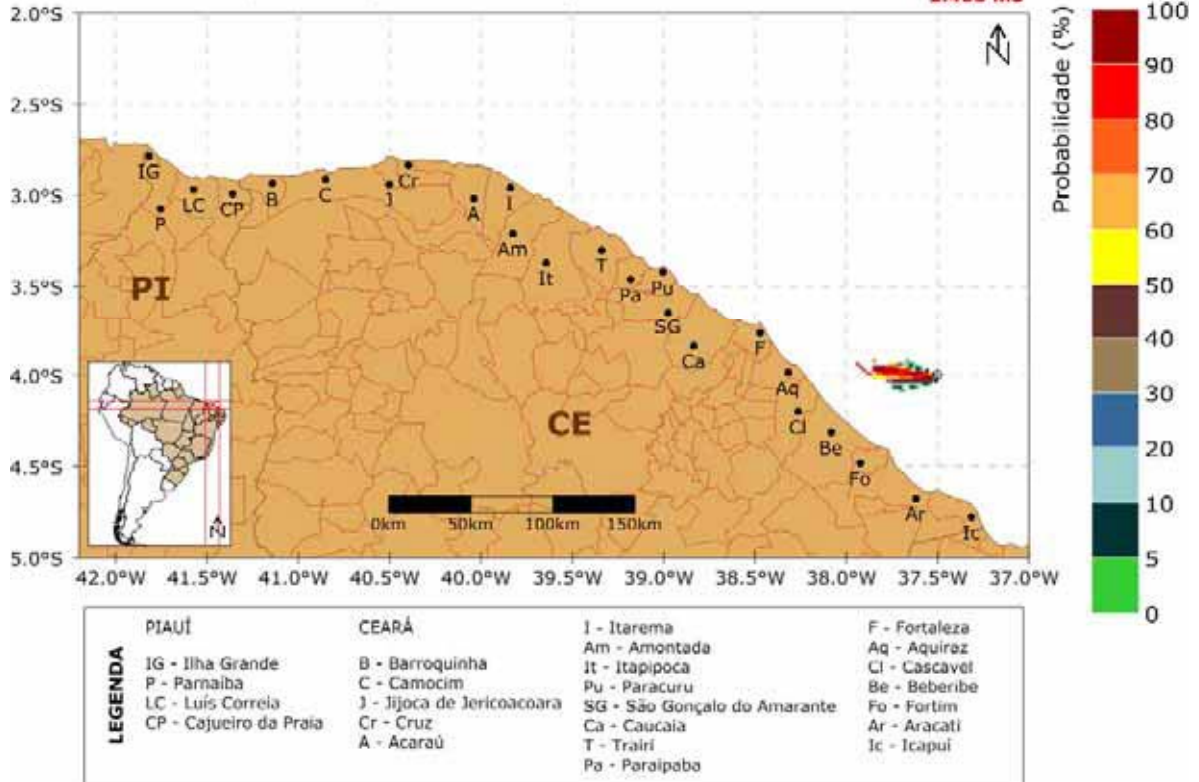


BM-POT-16-17

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo | Cenário de Inverno

Blow-out 30 dias | 12 horas após o início da simulação

2.400 m<sup>3</sup>



**Figura II.6.2.2.5-18 - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para uma simulação de 12 horas no cenário de inverno.**



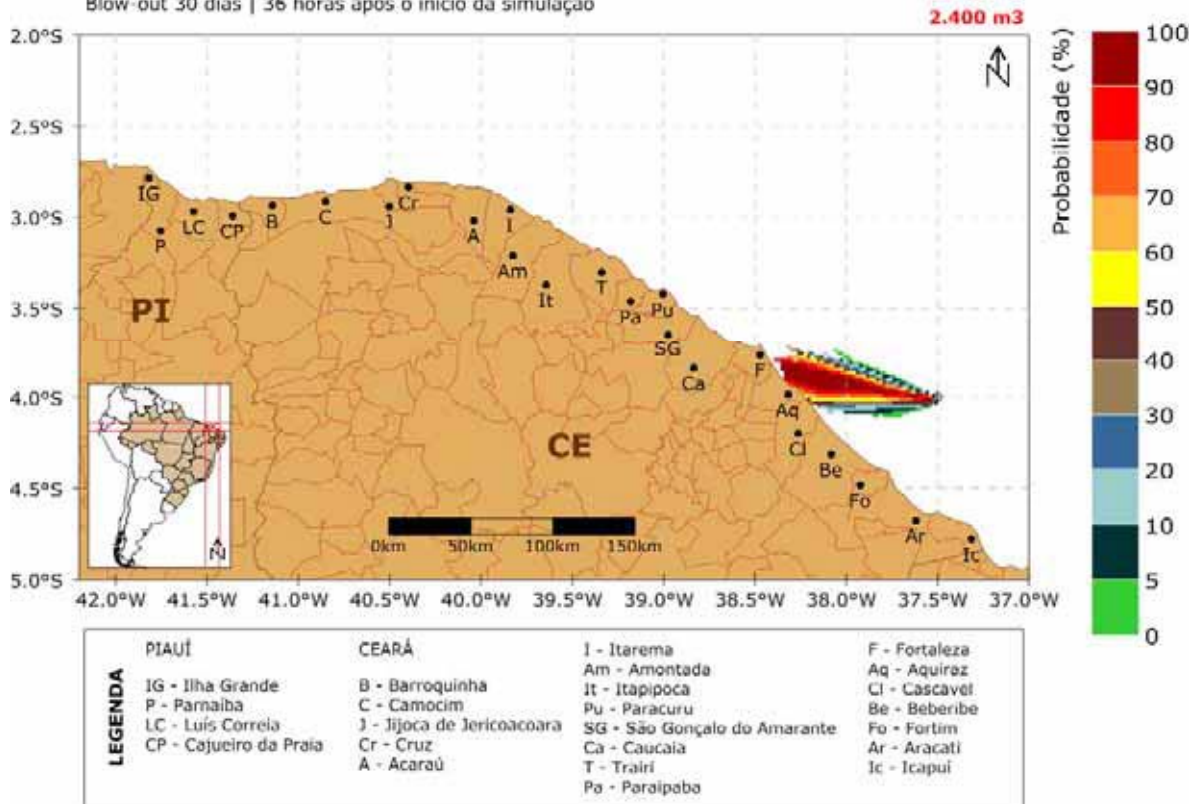
**STROLL | Modo Probabilístico**



BM-POT-16-17

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo | Cenário de Inverno

Blow-out 30 dias | 36 horas após o início da simulação



**Figura II.6.2.2.5-19 - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para uma simulação de 36 horas no cenário de inverno.**

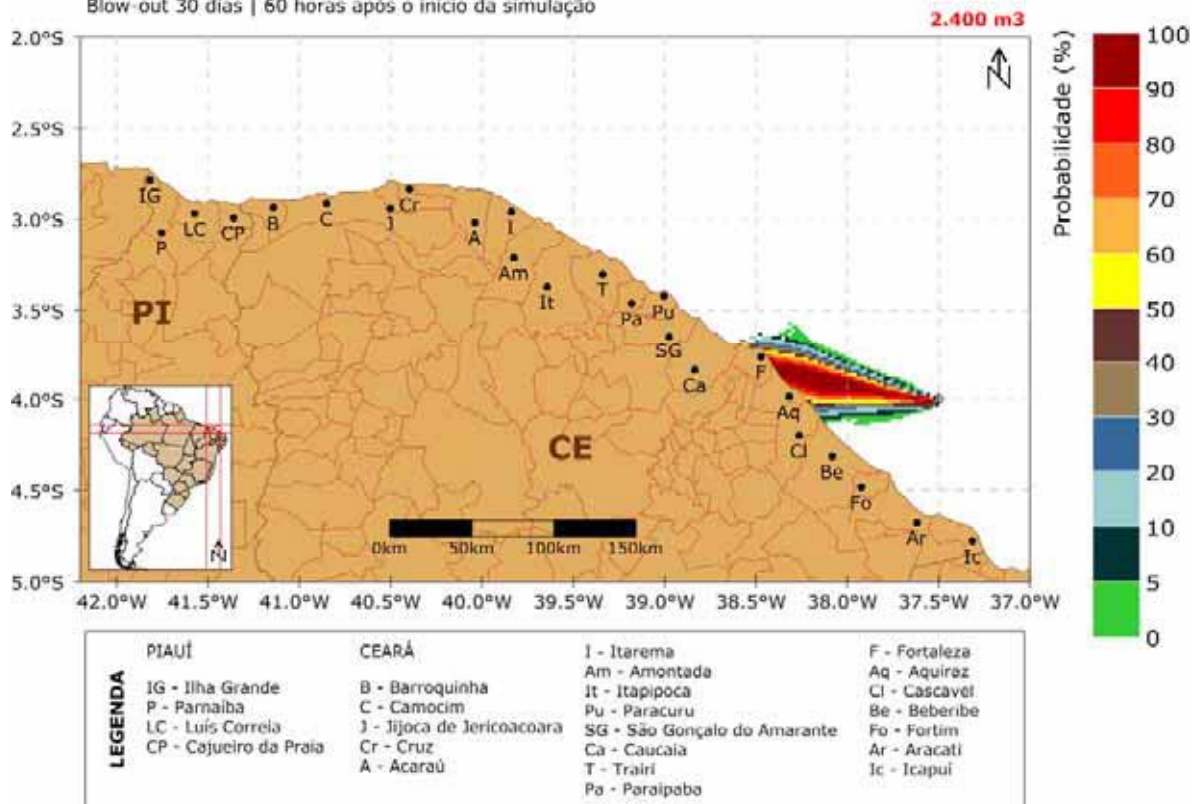
### STROLL | Modo Probabilístico



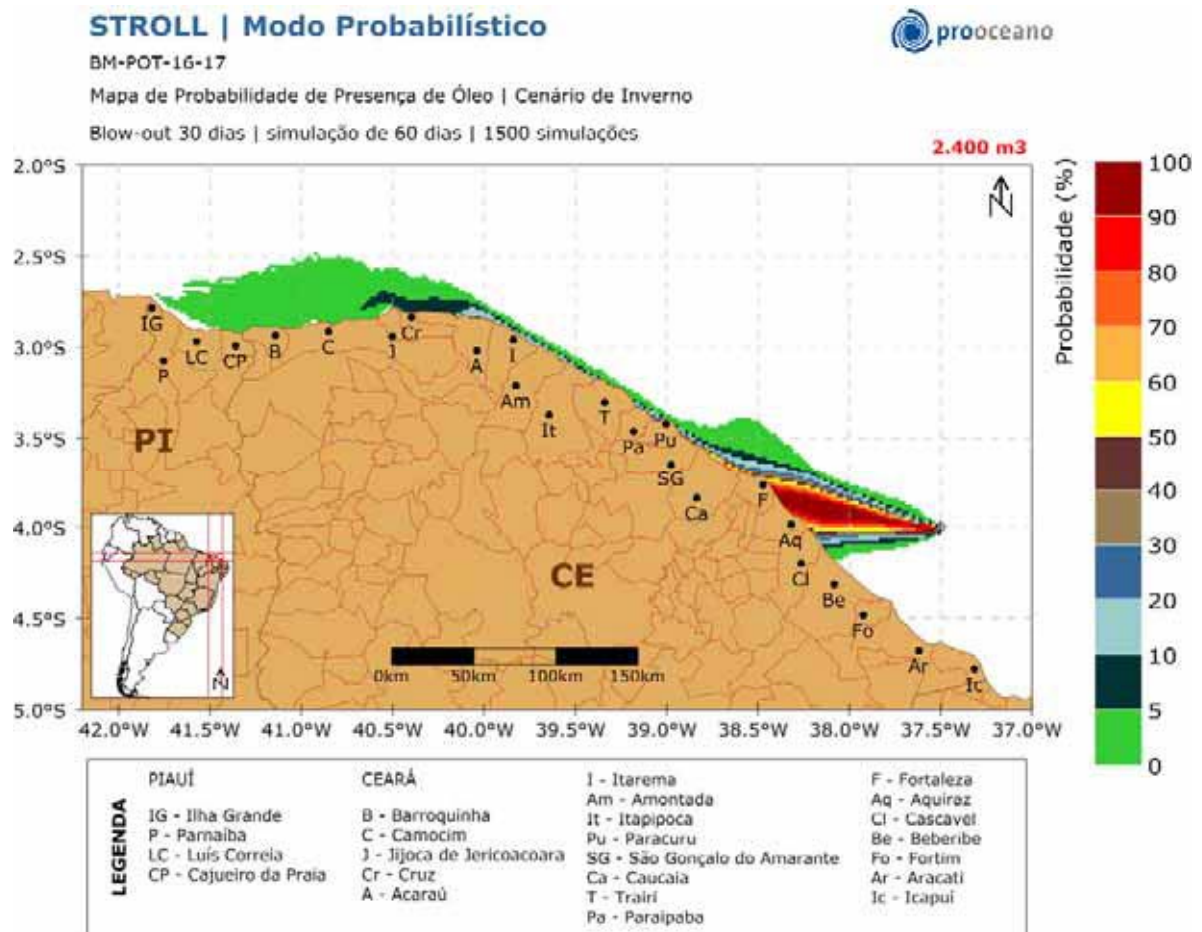
BM-POT-16-17

Mapa de Probabilidade de Presença de Óleo | Cenário de Inverno

Blow-out 30 dias | 60 horas após o início da simulação



**Figura II.6.2.2.5-20 - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para uma simulação de 60 horas no cenário de inverno.**



**Figura II.6.2.2.5-21 - Mapa de Probabilidade de presença de óleo, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno.**

No cenário de inverno também existem probabilidades de 100-90 % do óleo atingir a costa, em Fortaleza e Aquiraz. A área de costa com probabilidade de ser atingida pelo óleo vai de Luís Correia – PI a Beberibe – CE.

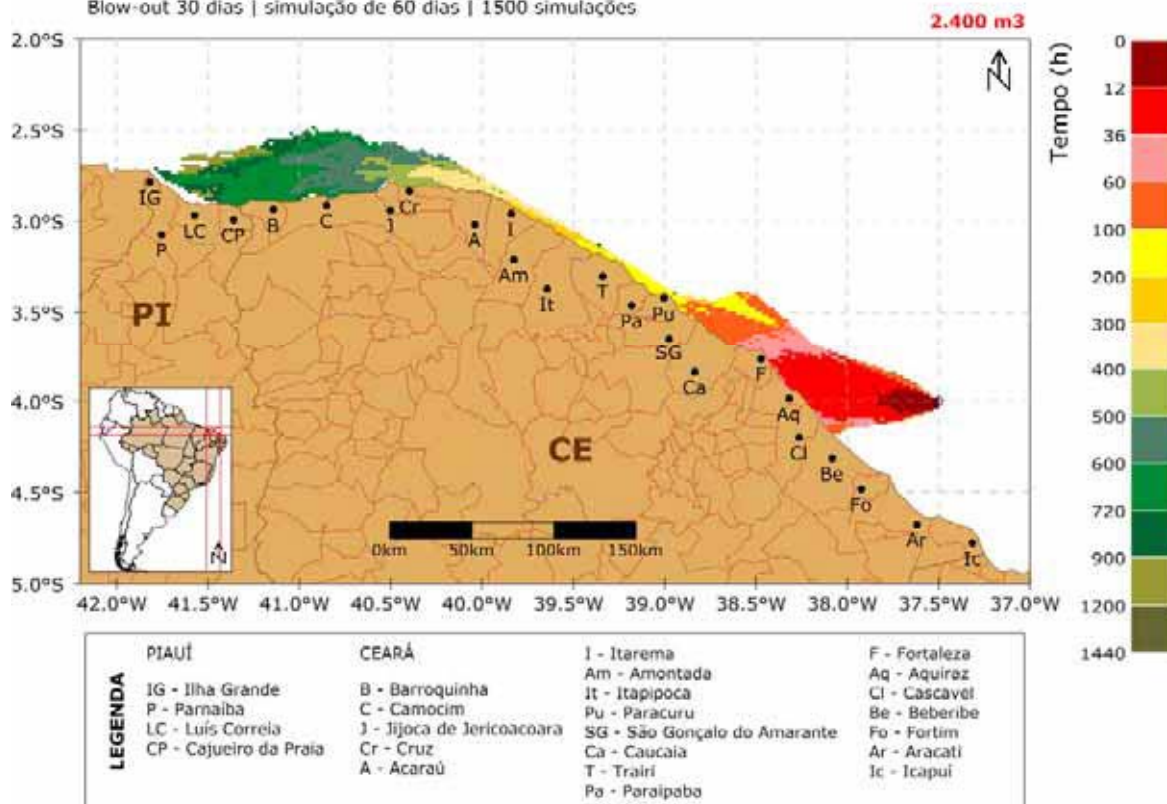
### STROLL | Modo Probabilístico



BM-POT-16-17

Mapa de Tempo Mínimo de Chegada do Óleo | Cenário de Inverno

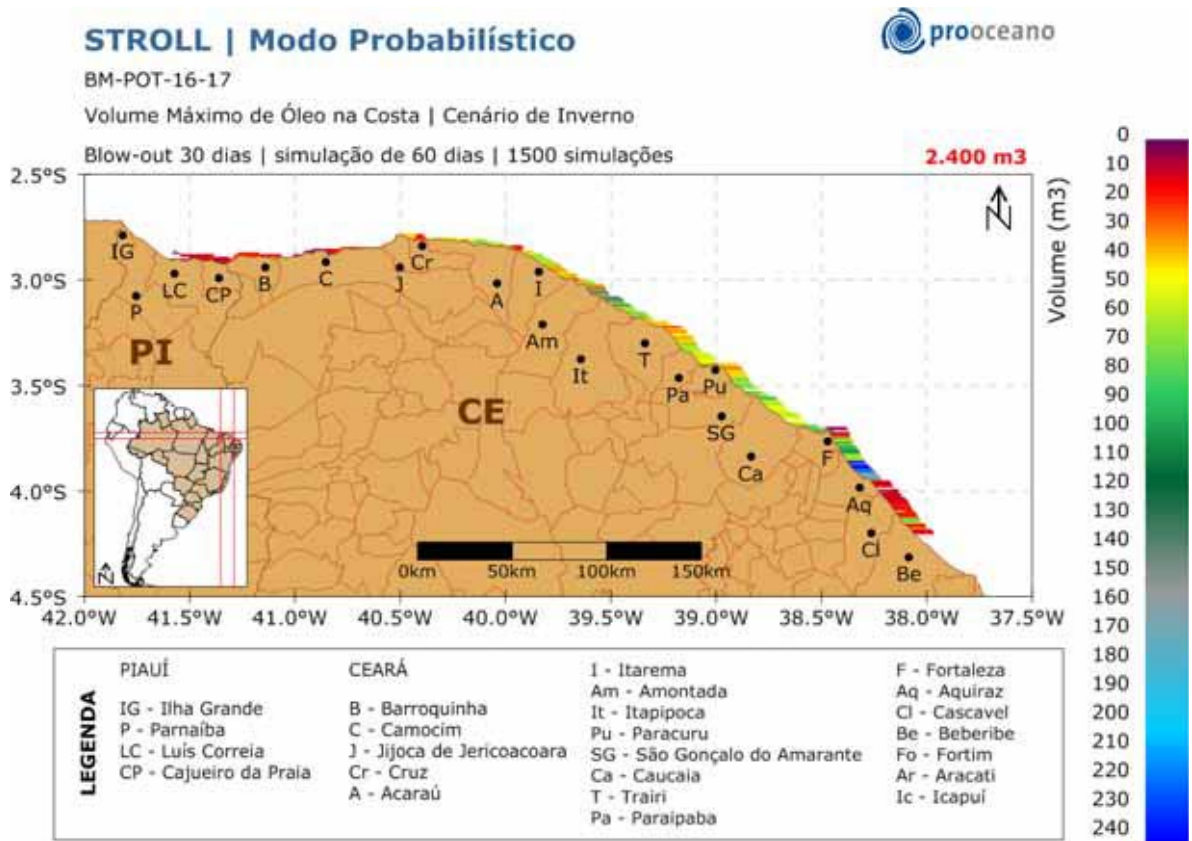
Blow-out 30 dias | simulação de 60 dias | 1500 simulações



**Figura II.6.2.2.5-22 - Mapa de Tempo Mínimo de Chegada de óleo, para um vazamento de 30 dias, no cenário de inverno.**

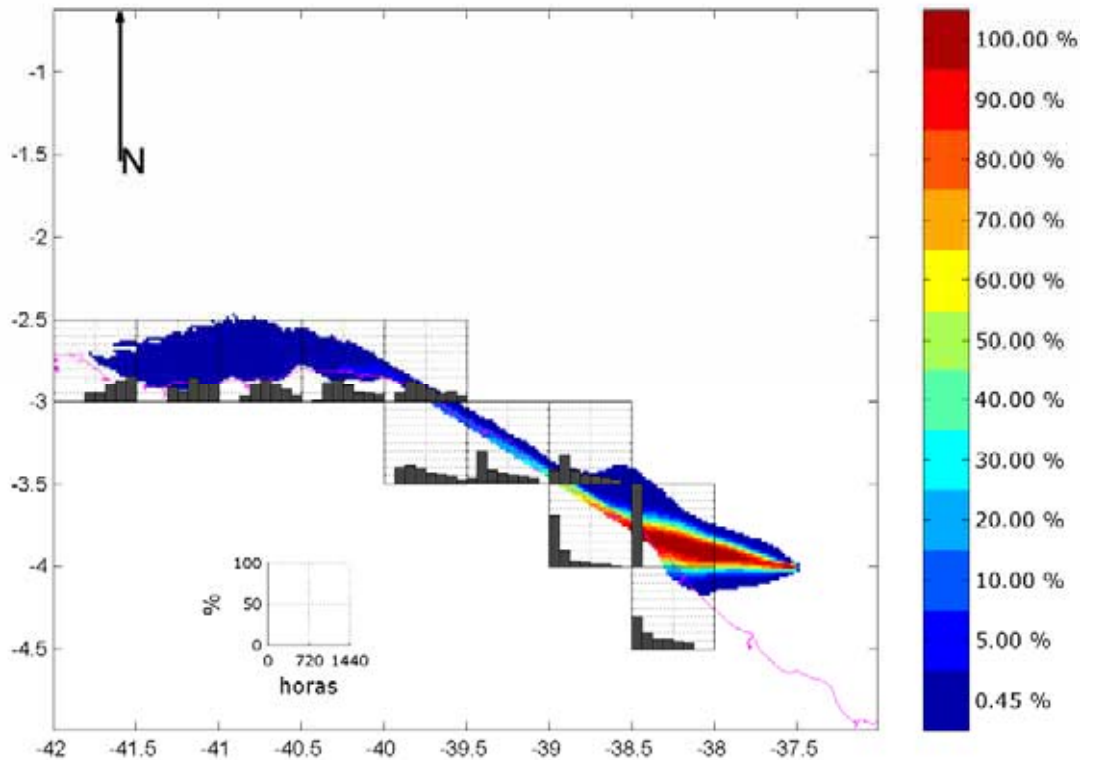
No cenário de inverno, o óleo também pode atingir a costa no tempo mínimo de 36 -12 horas, ocorrendo de Cascavel a Fortaleza, ambos no Ceará.

Analisando o volume máximo de óleo que atinge a costa (Figura II.6.2.2.5-23), observa-se que pode chegar a 246,64 m<sup>3</sup> no município de Aquiraz - CE.



**Figura II.6.2.2.5-23 - Volume máximo de óleo na costa, após as simulações de 60 dias no cenário de inverno.**

Assim como no verão, neste cenário os histogramas de tempo de chegada (Figura II.6.2.2.5-24), também mostram que, nas regiões com alta probabilidade de toque, os tempos de chegada concentraram-se na 1ª metade da simulação (0 -720h).



**Figura II.6.2.5-24 - Histogramas de tempo de chegada de óleo próximo à costa no cenário de inverno.**

A seguir, na Tabela II.6.2.5-4, serão apresentados os volumes máximos, as classes de probabilidade e tempo mínimo de chegada de óleo de cada município com possibilidade de ser atingido pelo óleo em um evento de *blow-out*.

**Tabela II.6.2.5-4 - Volume Máximo, Probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um evento de *blow-out*, nos cenários de verão e inverno.**

	MUNICÍPIOS	Volume Máximo (m <sup>3</sup> )		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo de Toque (h)	
		VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
PI	Luís Correia	-	16,62	-	5-0	-	600-720
	Cajueiro da Praia	-	13,88	-	5-0	-	600-720
CE	Barroquinha	-	59,92	-	5-0	-	600-720
	Camocim	-	59,91	-	5-0	-	500-600
	Jijoca de Jericoacoara	-	45,17	-	10-5	-	400-500
	Cruz	-	30,51	-	10-5	-	400-500
	Acaraú	-	78,36	-	20-10	-	300-400
	Itarema	-	71,17	-	20-10	-	200-300
	Amontada	-	144	-	30-20	-	200-300
	Itapipoca	-	144,3	-	30-20	-	100-200
	Trairi	29,52	68,23	5-0	40-30	200-300	100-200
	Paraipaba	36,62	105,32	5-0	50-40	200-300	100-200
	Paracuru	46,46	77,23	5-0	60-50	100-200	100-200
	São Gonçalo do Amarante	46,46	91,16	5-0	70-60	100-200	60-100
	Caucaia	37,49	90,62	20-10	90-80	60-100	60-100
	Fortaleza	78,26	106,85	40-30	100-90	36-60	12-36
	Aquiraz	237,01	246,64	100-90	100-90	12-36	12-36
Cascavel	153,13	61,11	100-90	50-40	12-36	12-36	
Beberibe	192,6	76,48	70-80	10-5	36-60	36-60	

### II.6.2.2.5.2 - Modo determinístico

Com base nos resultados obtidos nas simulações probabilísticas foi identificado o cenário de pior caso para ocorrência de um evento de *blow-out* decorrente da atividade de perfuração nos Blocos BM-POT-16 e 17. Ambos os cenários sazonais apresentaram tempo mínimo de toque na costa de 12-36 horas, portanto será apresentada a trajetória de pior caso ocorrida em cada cenário.

Também serão apresentadas duas trajetórias que representarão a deriva do óleo nas condições meteo-oceanográficas mais frequentes na região. Devido às características locais foram necessários dois cenários sazonais para representar as condições meteo-oceanográficas dominantes. No período de verão observa-se na região uma maior ocorrência de ventos de leste, com alguns eventos extremos de nordeste, já no período de inverno, a maior ocorrência é de ventos de sudeste. Ao longo de todo o ano a dinâmica oceânica é regida pela forte influência da Corrente Norte do Brasil, modulada pela componente de maré, principalmente sobre a Plataforma. Sendo assim,

foram simulados cenários com essas características para representar as condições meteo-oceanográficas da região.

## VERÃO

### Pior Caso

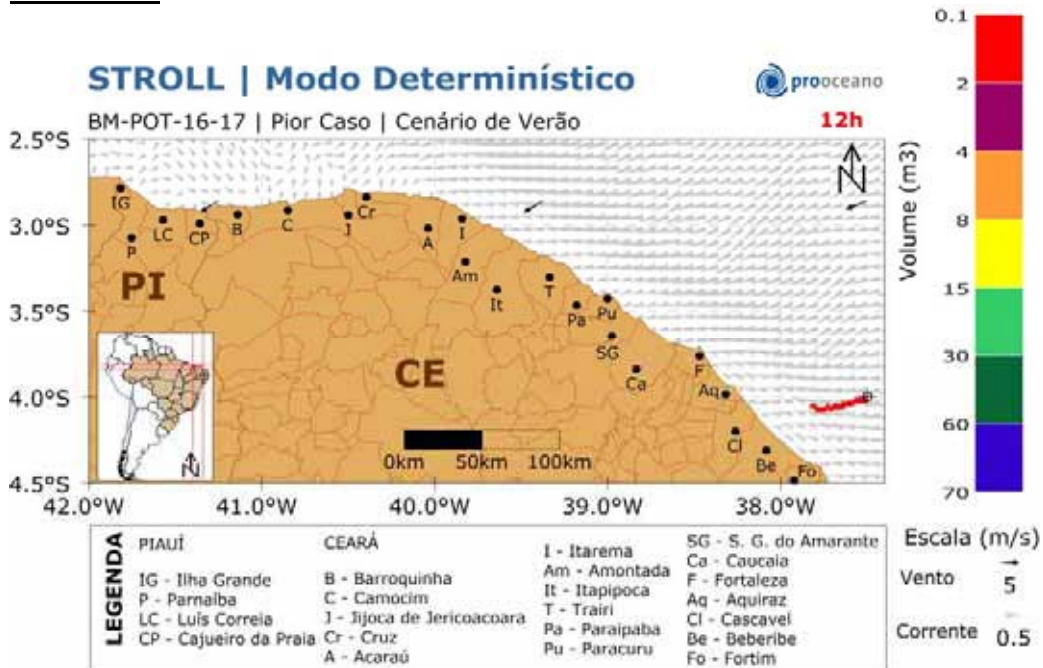
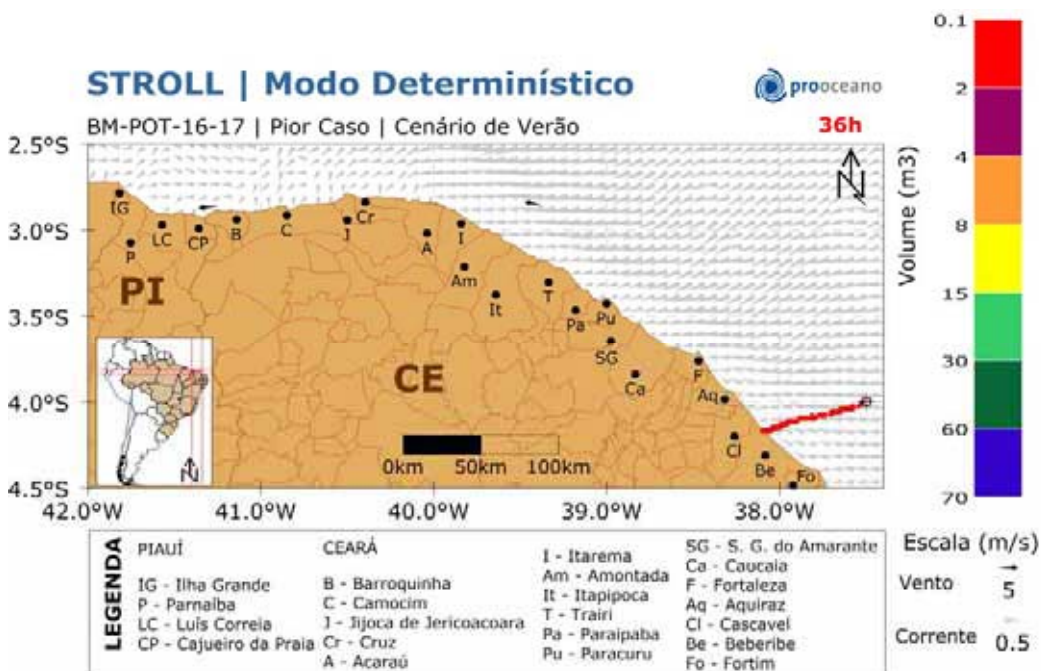
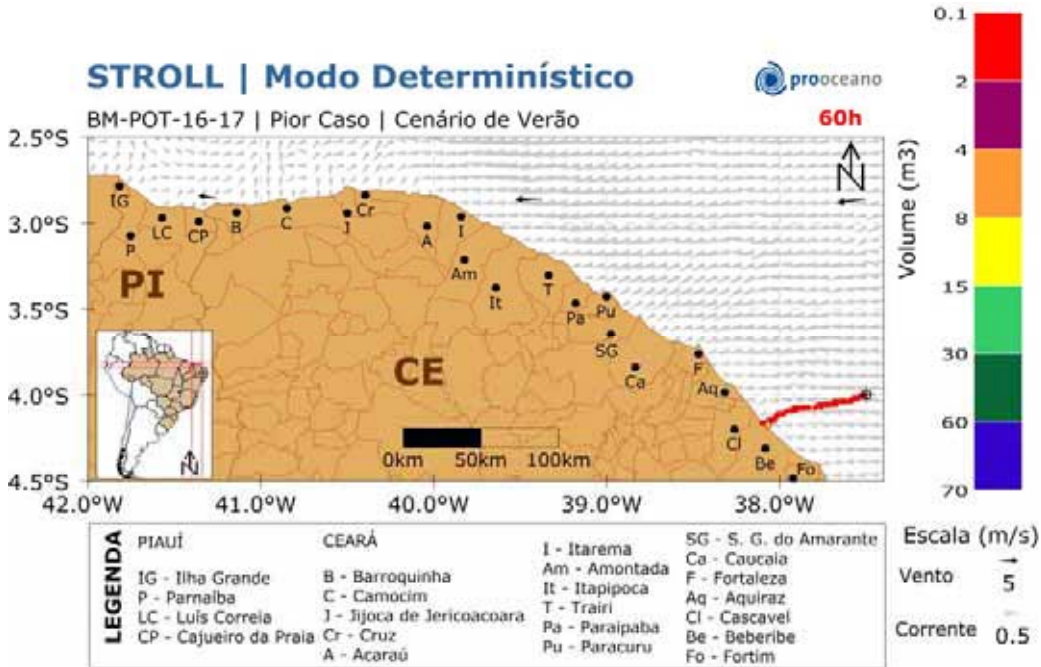


Figura II.6.2.2.5-25 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 12 horas de simulação.

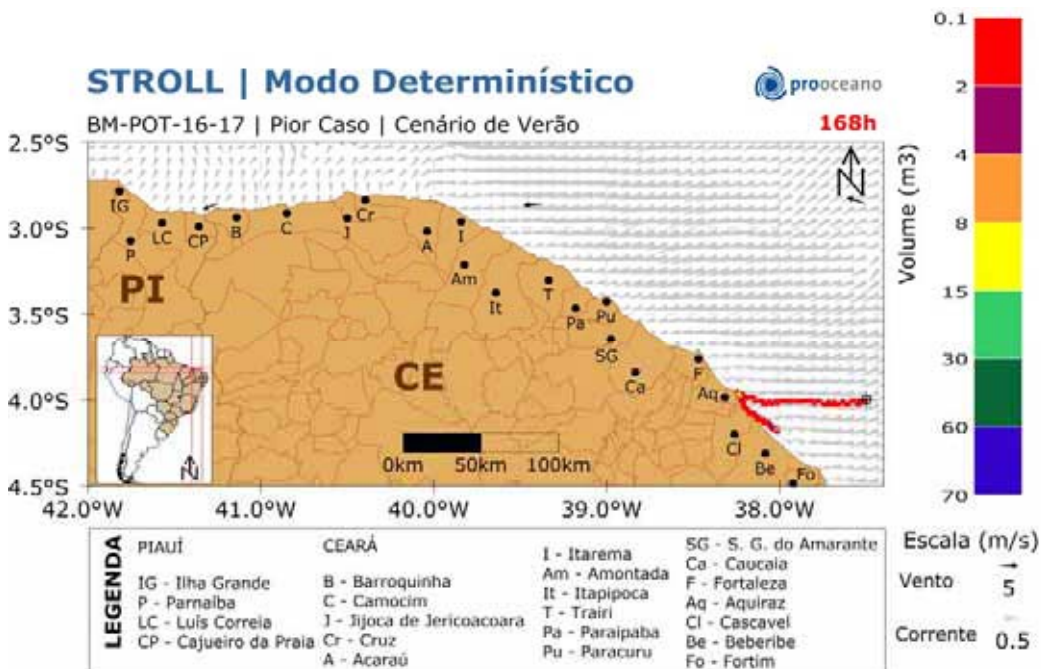




**Figura II.6.2.2.5-26 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 36 horas de simulação.**



**Figura II.6.2.2.5-27 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 60 horas de simulação.**



**Figura II.6.2.2.5-28 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 1 semana (7 dias) de simulação.**

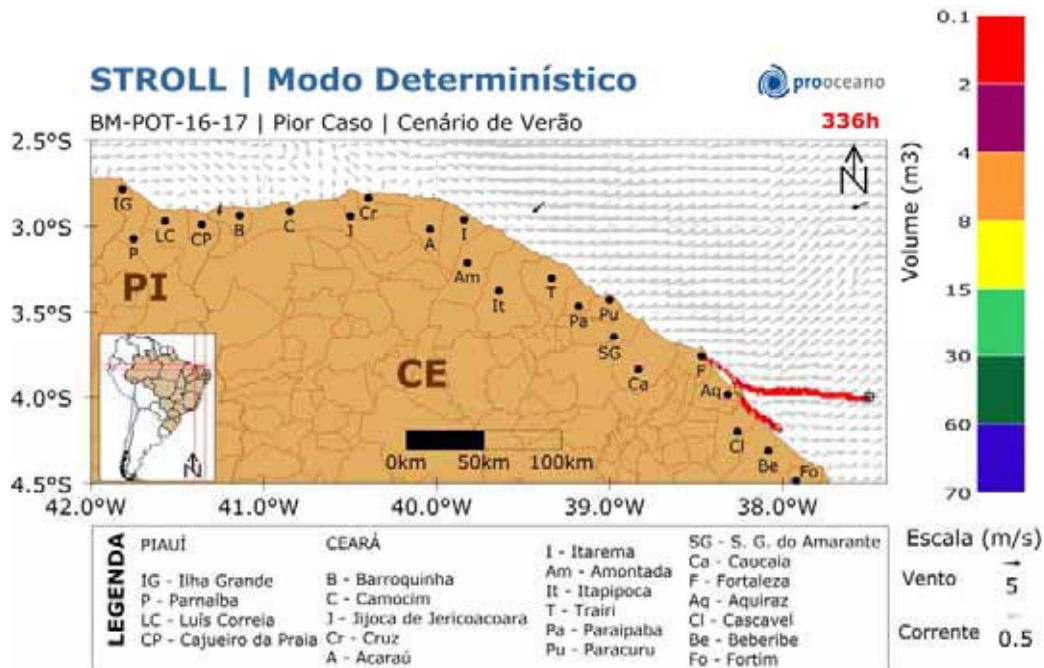


Figura II.6.2.5-29 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 2 semanas (14 dias) de simulação.

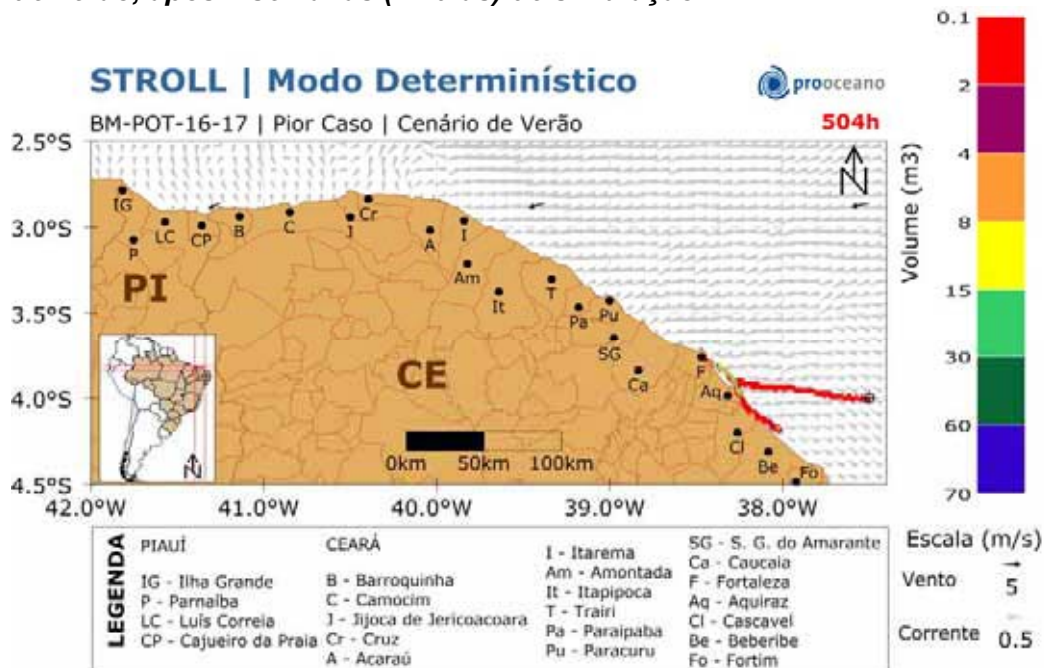


Figura II.6.2.5-30 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 3 semanas (21 dias) de simulação.

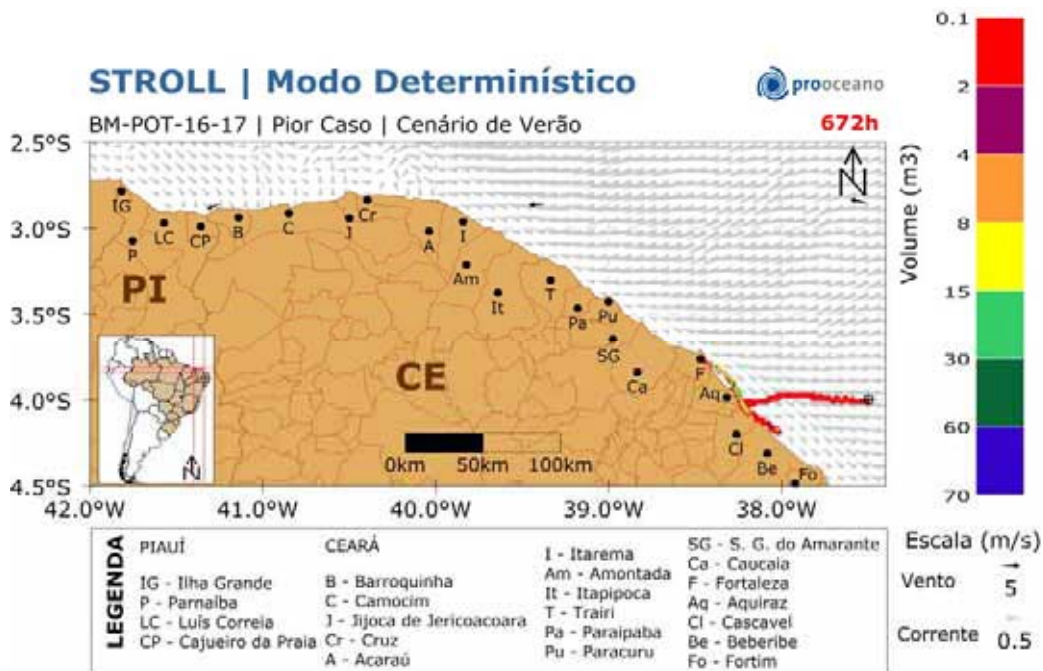


Figura II.6.2.2.5-31 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 4 semanas (28 dias) de simulação.

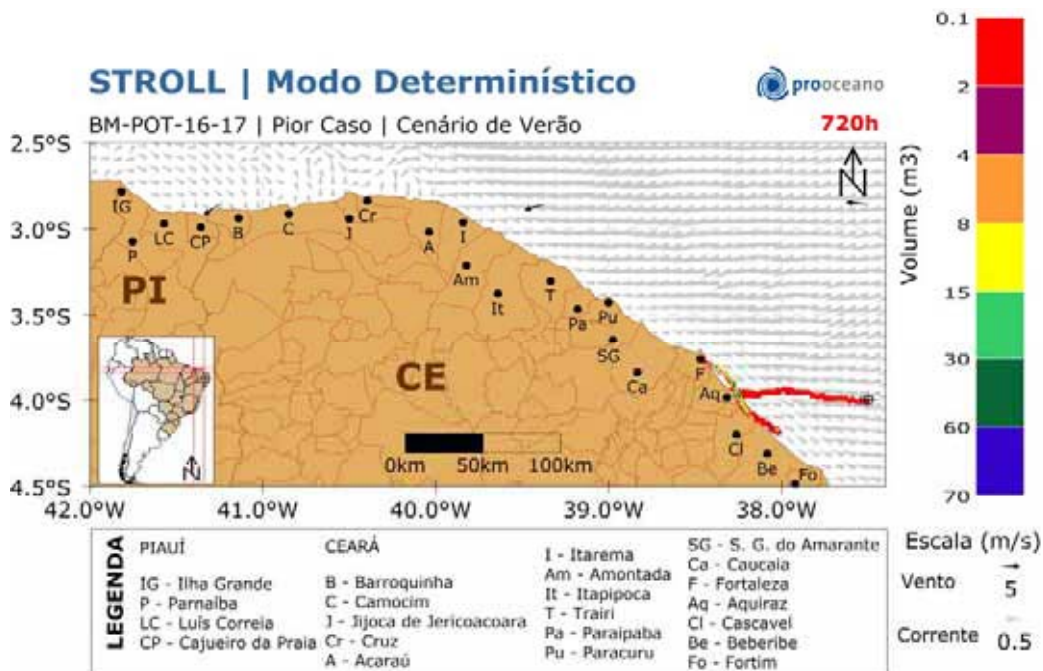


Figura II.6.2.2.5-32 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 30 dias de simulação.

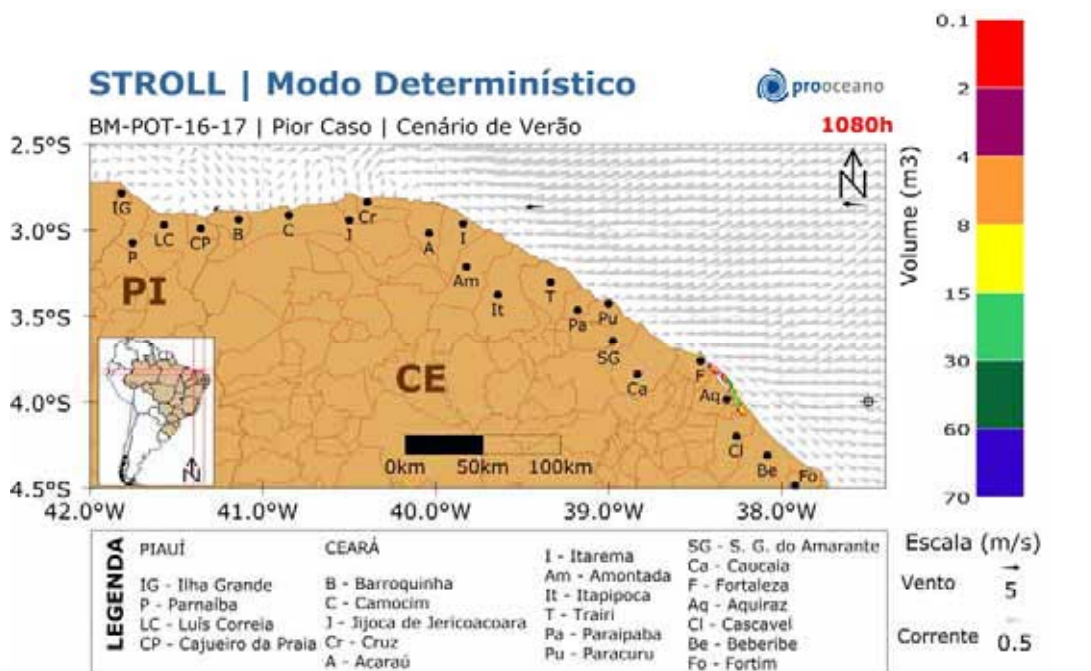


Figura II.6.2.5-33 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 45 dias de simulação.

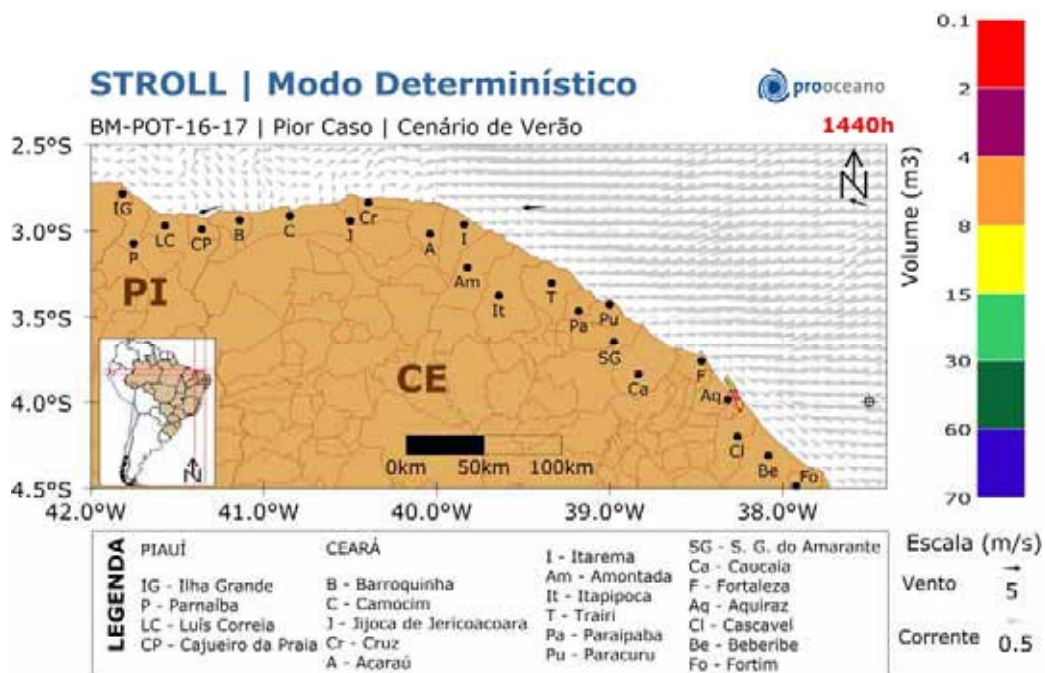
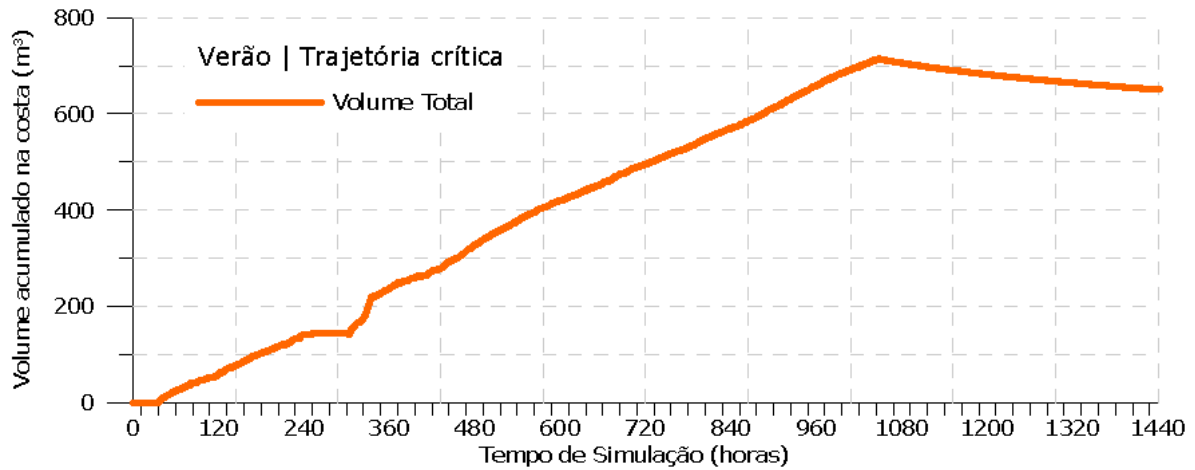


Figura II.6.2.5-34 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de verão, após 60 dias de simulação.

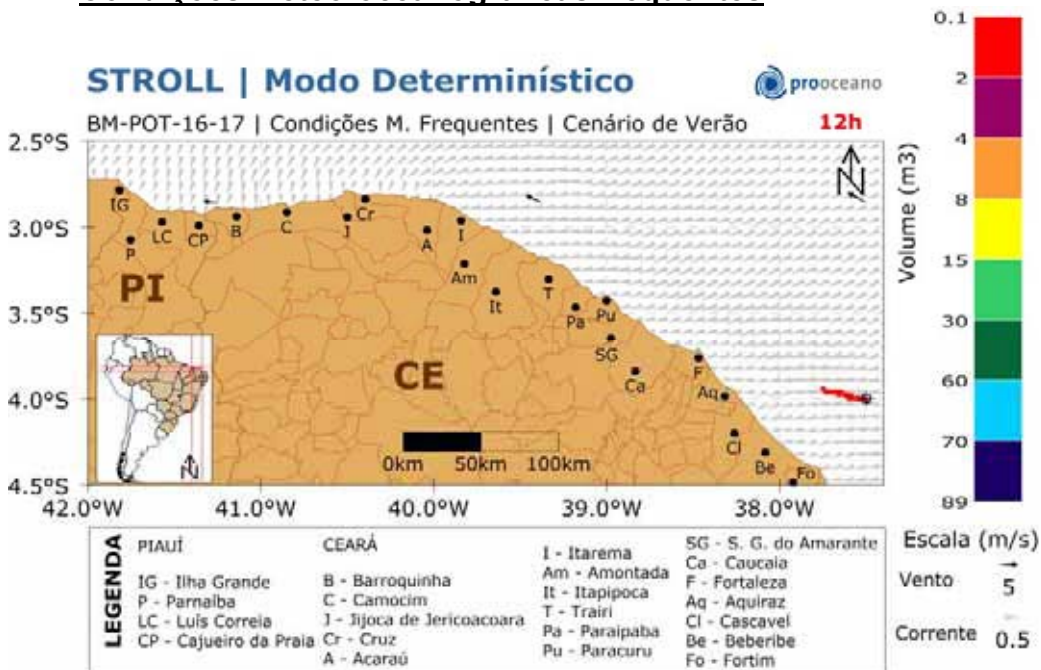
A deriva do óleo ocorre rumo a oeste e, em 36 horas, já se encontra na costa do município de Beberibe – CE.

No gráfico (Figura II.6.2.2.5-35), a seguir, é apresentada a evolução temporal do volume de óleo acumulado na costa ao longo da simulação.



**Figura II.6.2.2.5-35 - Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória crítica no cenário de verão.**

**Condições meteo-oceanográficas frequentes**



**Figura II.6.2.2.5-36 - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 12 horas de simulação.**

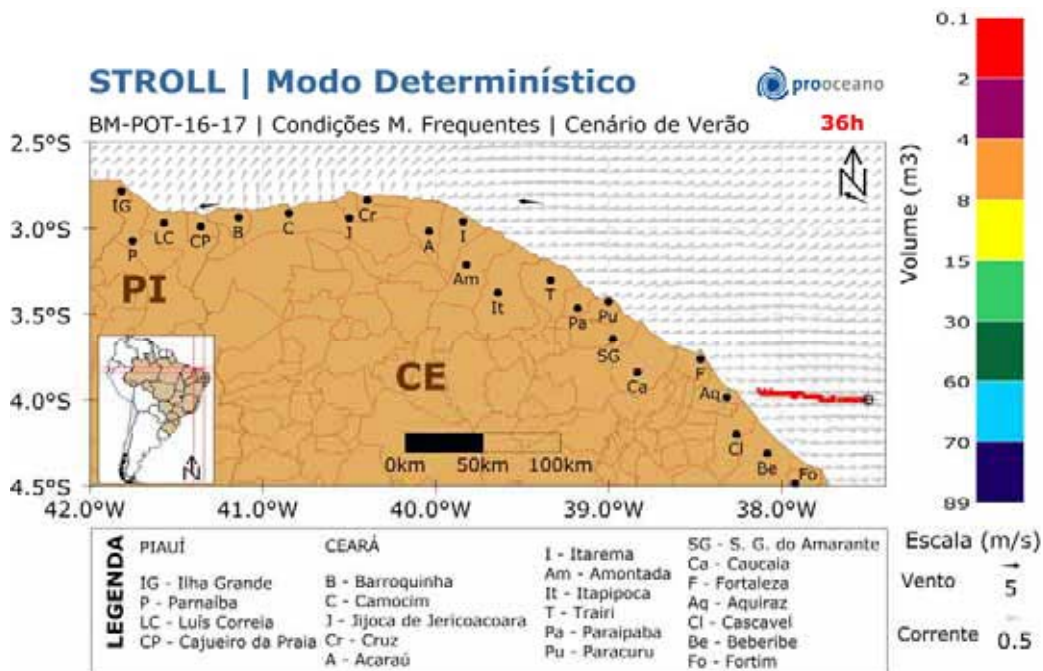


Figura II.6.2.5-37 - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de verão, após 36 horas de simulação.

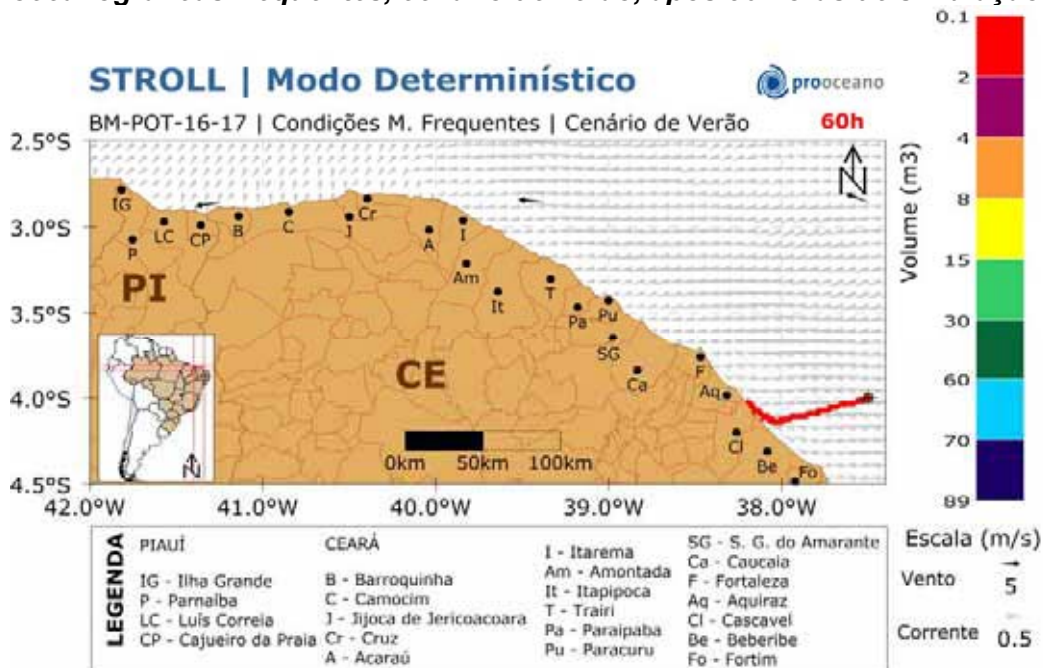
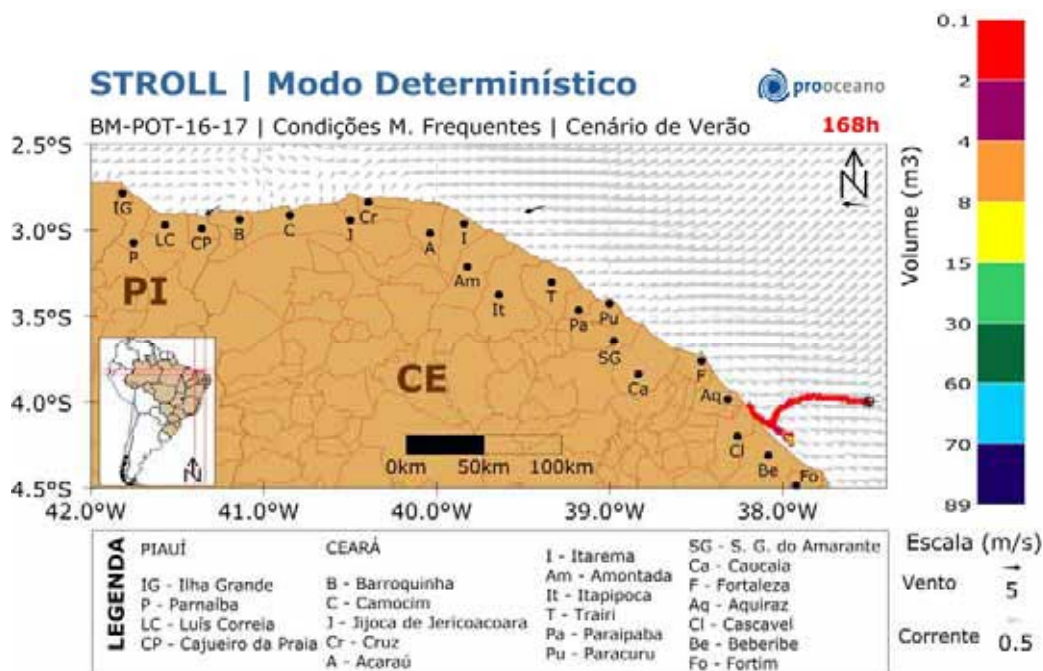
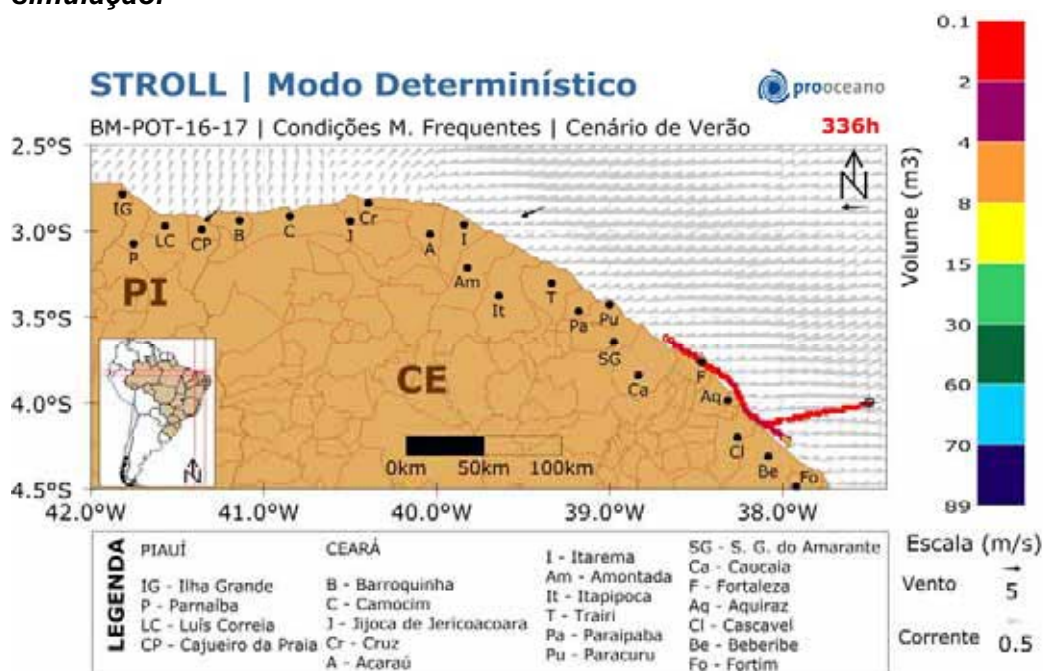


Figura II.6.2.5-38 - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de verão, após 60 horas de simulação.



**Figura II.6.2.5-39 - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de verão, após 1 semana (7 dias) de simulação.**



**Figura II.6.2.5-40 - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de verão, após 2 semanas (14 dias) de simulação.**

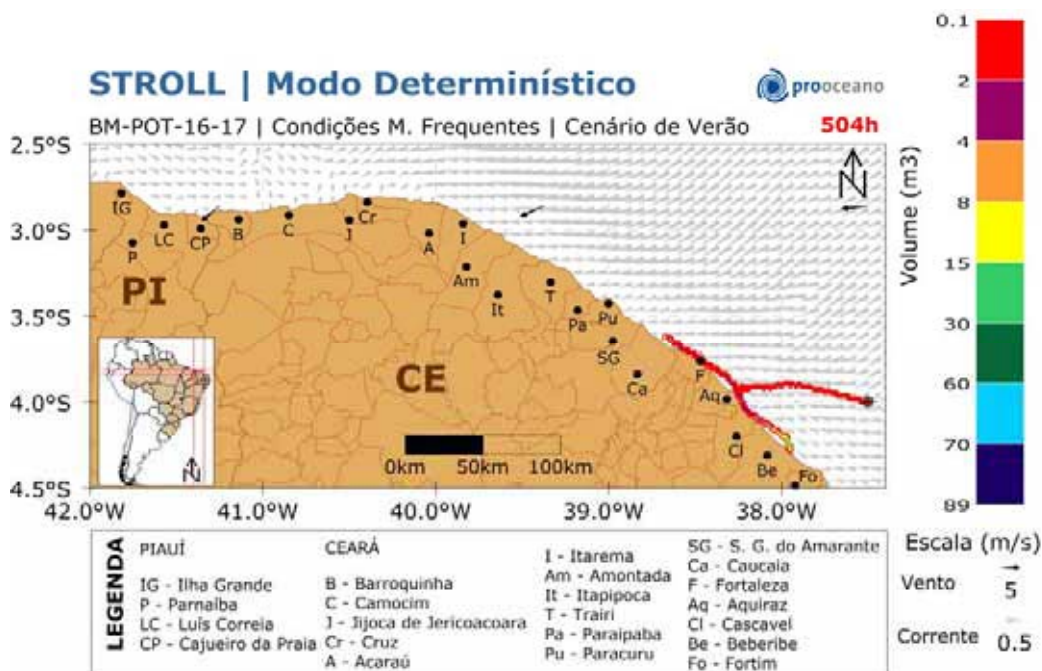


Figura II.6.2.2.5-41 - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de verão, após 3 semanas (21 dias) de simulação.

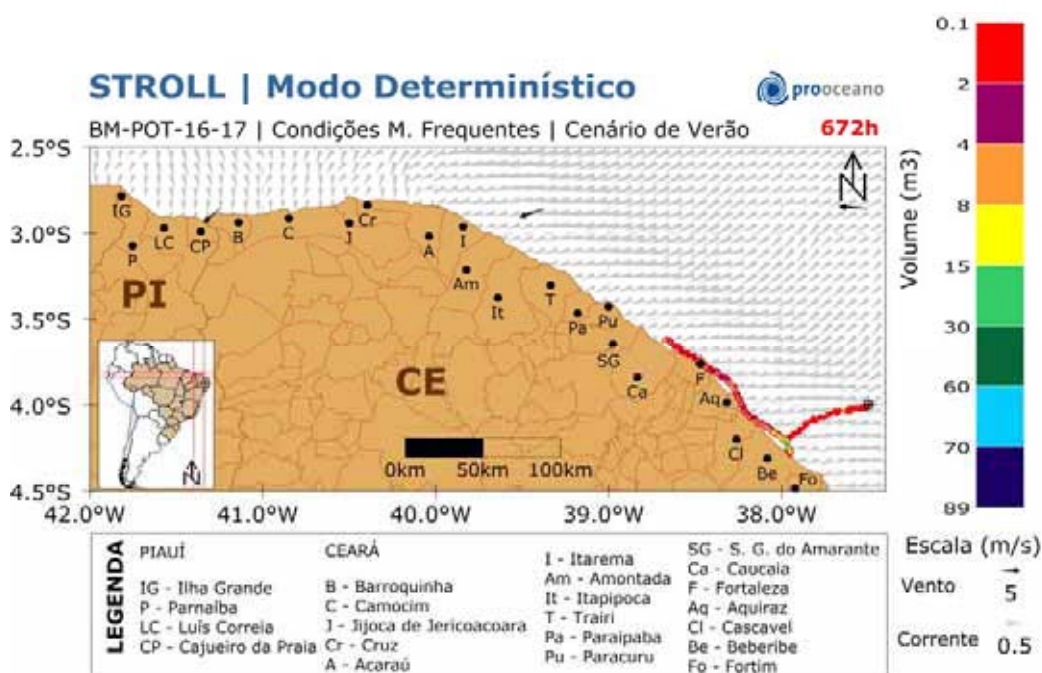


Figura II.6.2.2.5-42 - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de verão, após 4 semanas (28 dias) de simulação.



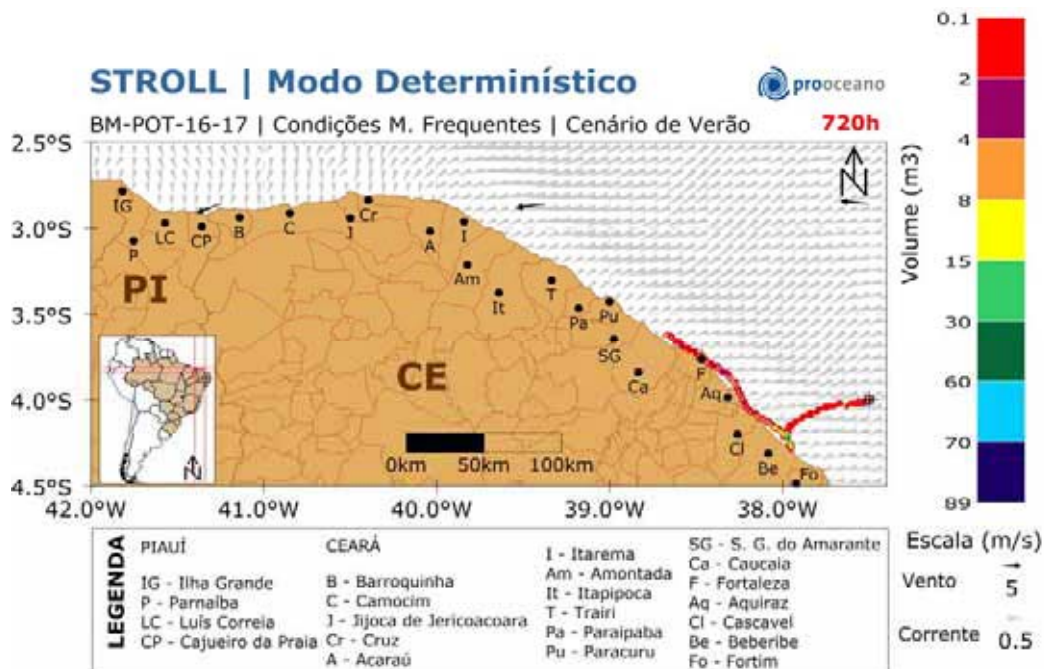


Figura II.6.2.2.5-43 - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de verão, após 30 dias de simulação.

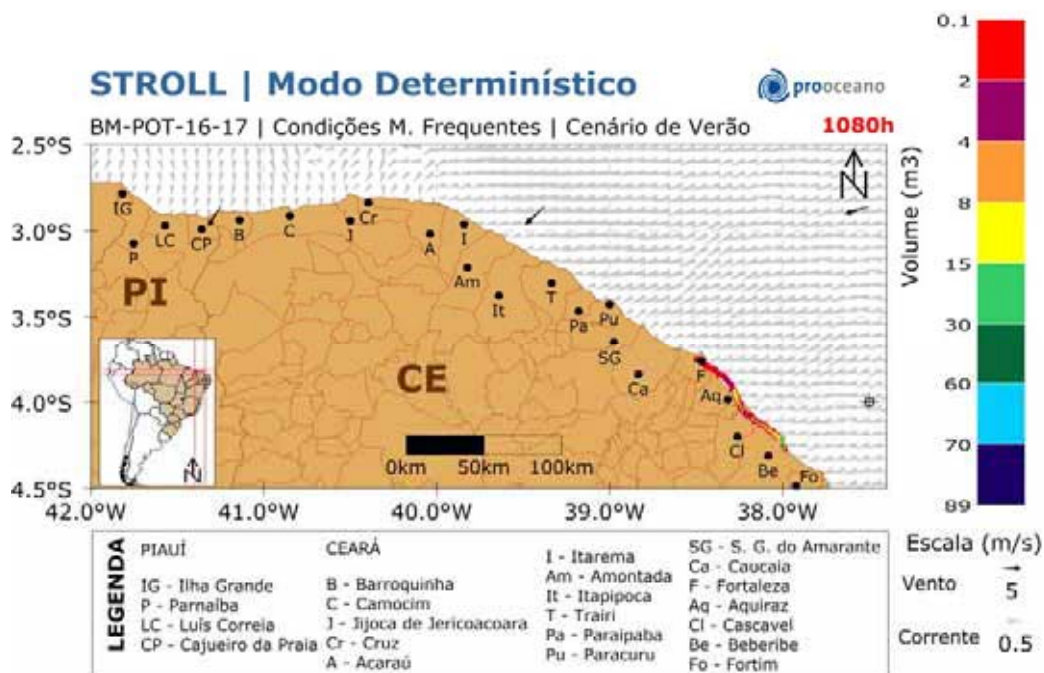
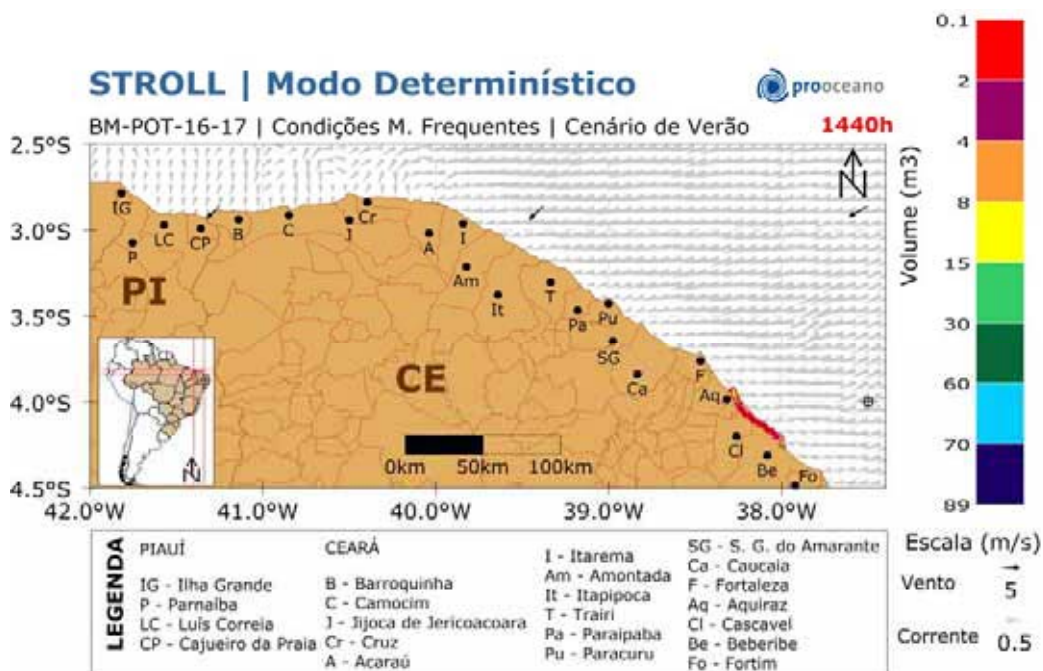


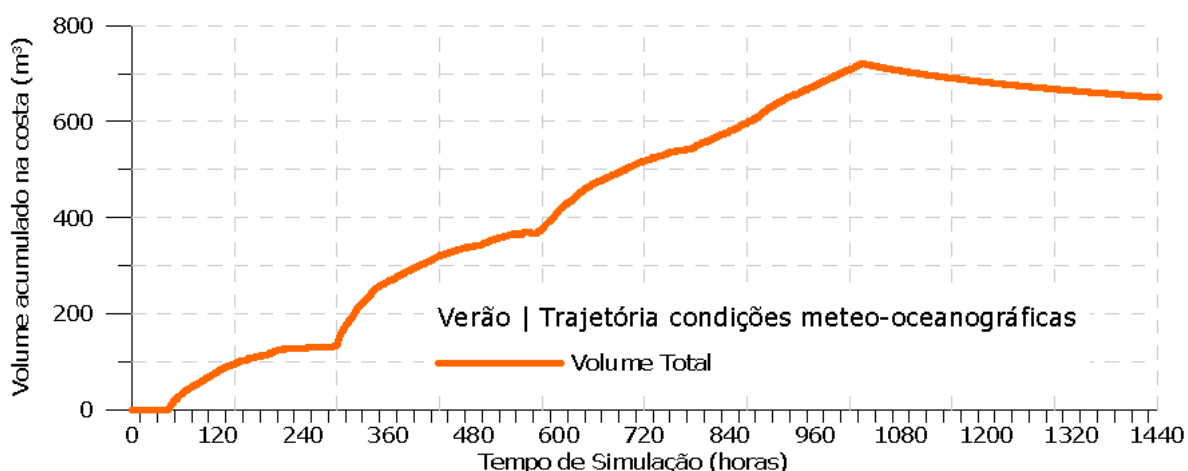
Figura II.6.2.2.5-44 - Resultado da simulação determinística de condições meteorológicas frequentes, cenário de verão, após 45 dias de simulação.



**Figura II.6.2.2.5-45 - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de verão, após 60 dias de simulação.**

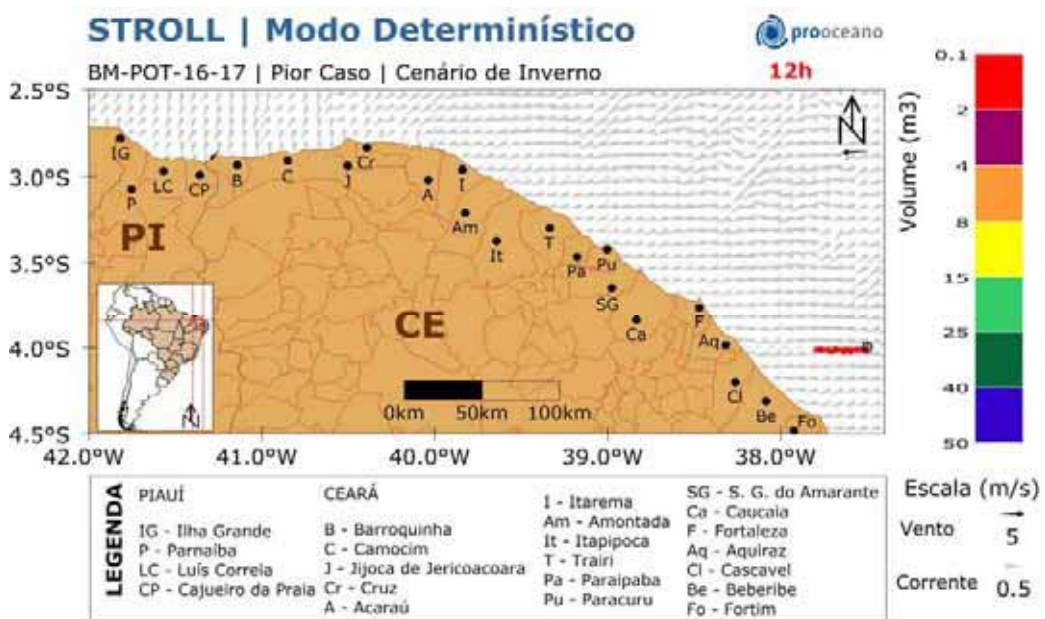
A deriva do óleo ocorre rumo a oeste/sudoeste e, em 60 horas, já se encontra na costa do município de Cascavel – CE.

No gráfico (Figura II.6.2.2.5-46), a seguir, é apresentada a evolução temporal do volume de óleo acumulado na costa ao longo da simulação.



**Figura II.6.2.2.5-46 - Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória meteo-oceanográfica no cenário de verão.**

**INVERNO**  
**Pior Caso**



**Figura II.6.2.2.5-47 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 12 horas de simulação.**

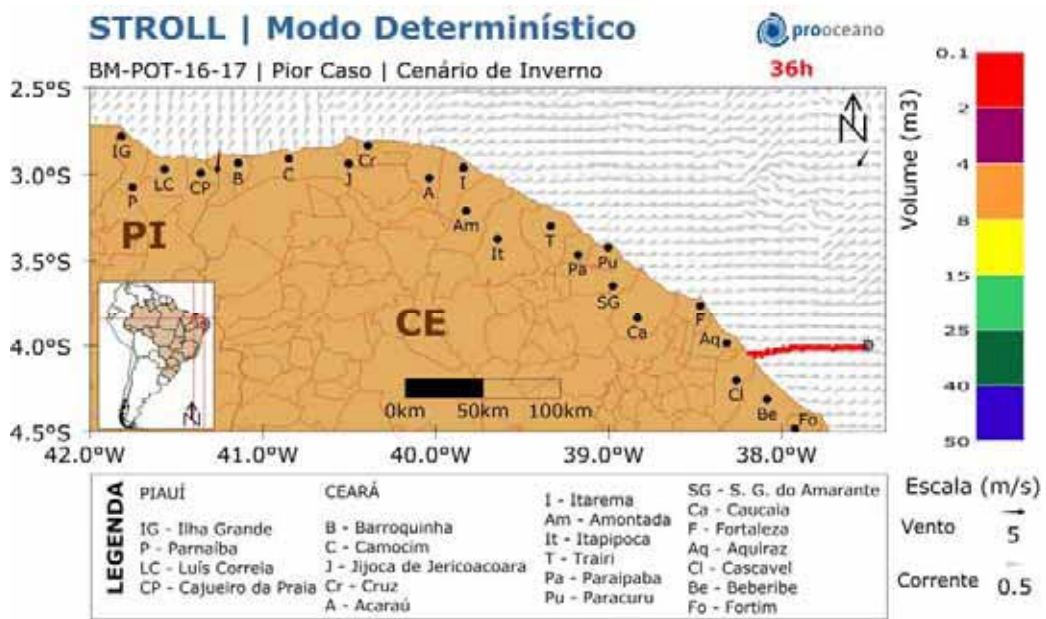


Figura II.6.2.2.5-48 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 36 horas de simulação.

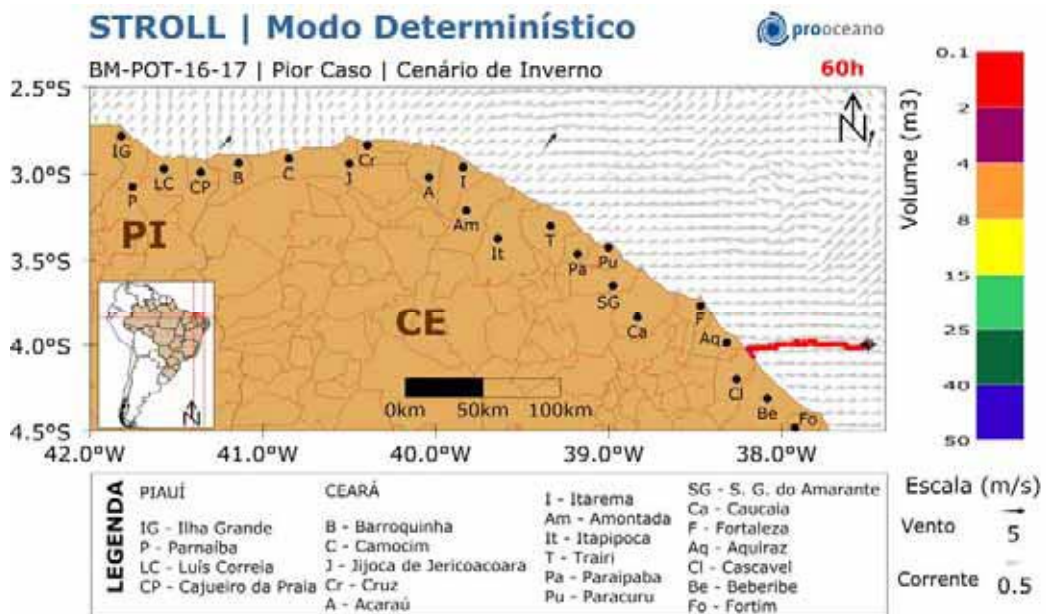


Figura II.6.2.2.5-49 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 60 horas de simulação.

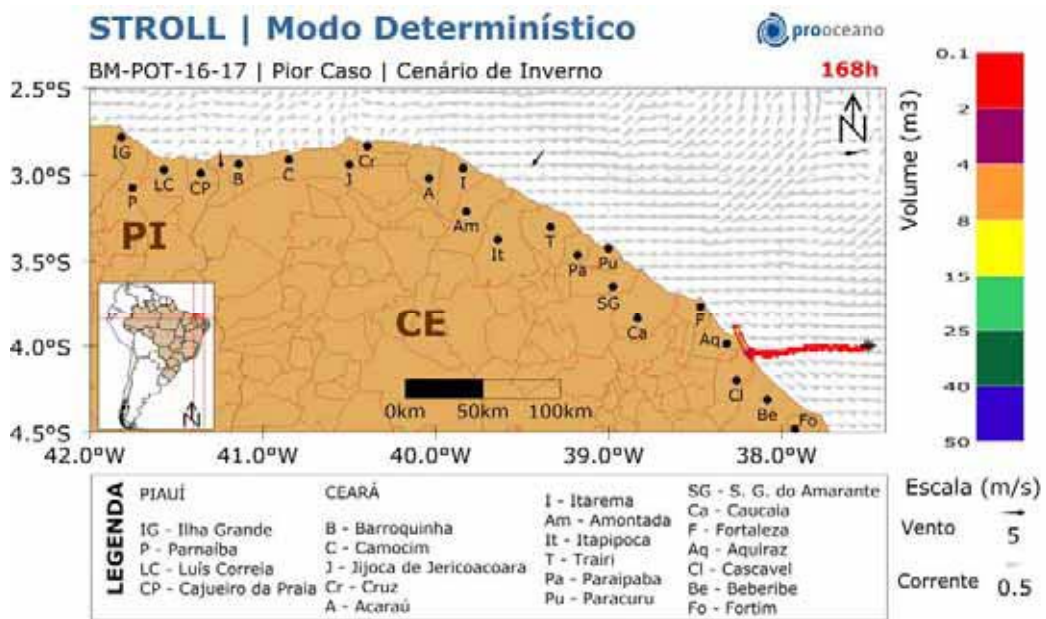


Figura II.6.2.2.5-50 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 1 semana (7 dias) de simulação.

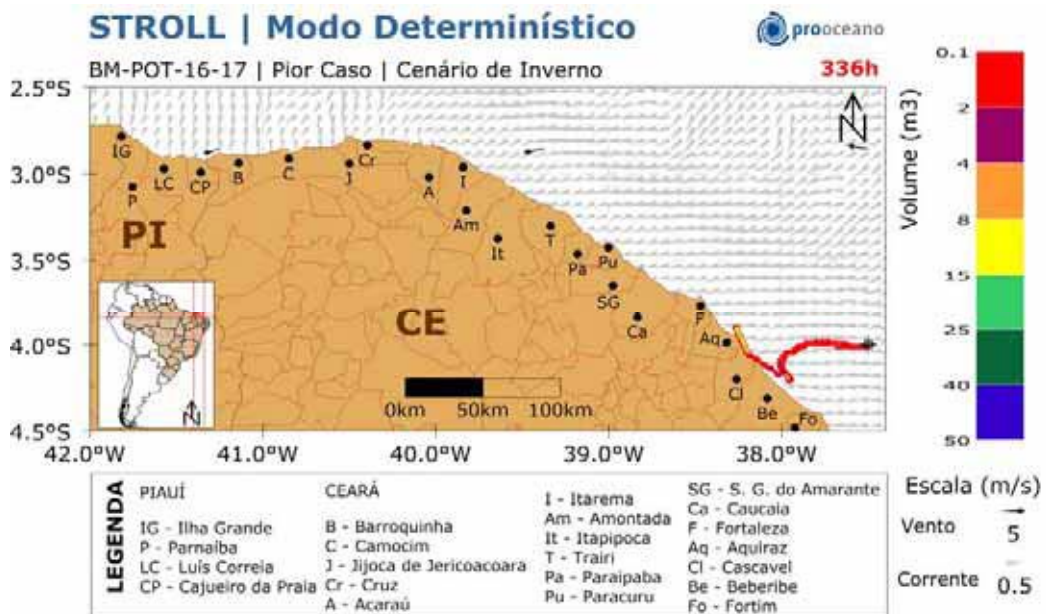
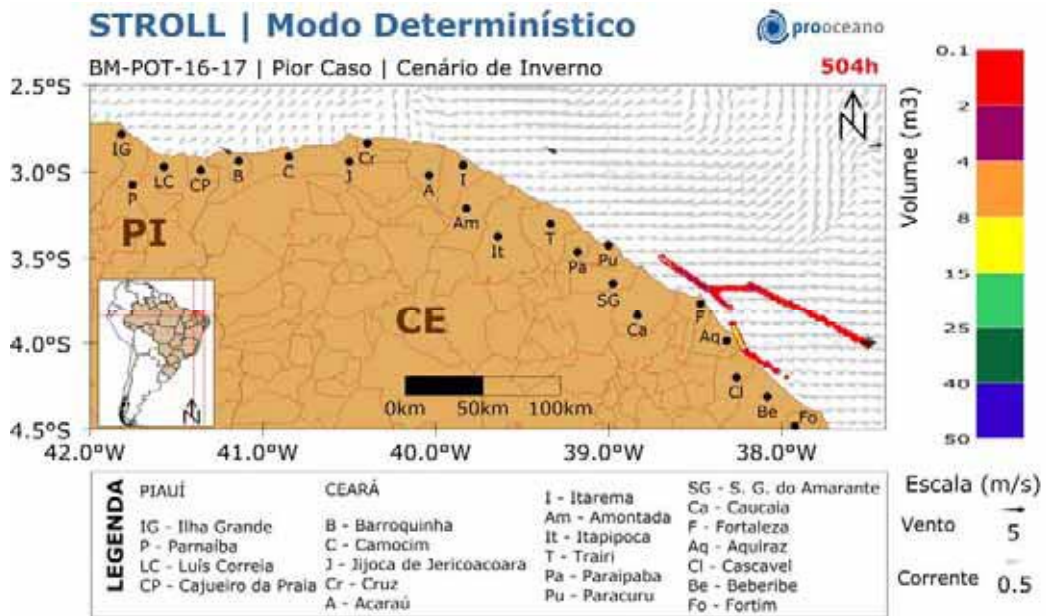
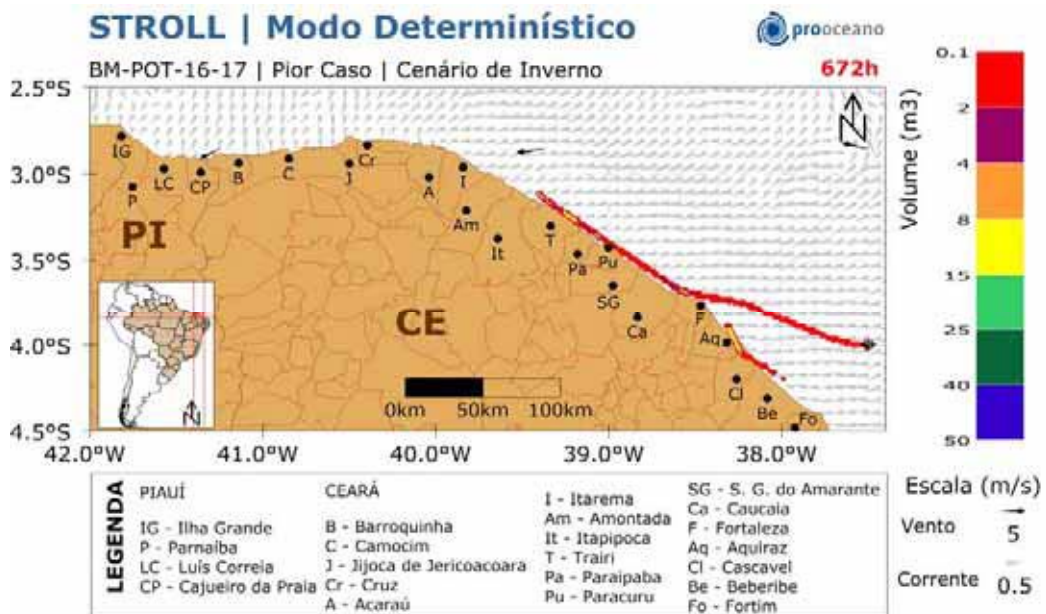


Figura II.6.2.2.5-51 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 2 semanas (14 dias) de simulação.



**Figura II.6.2.2.5-52 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 3 semanas (21 dias) de simulação.**



**Figura II.6.2.2.5-53 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 4 semanas (28 dias) de simulação.**

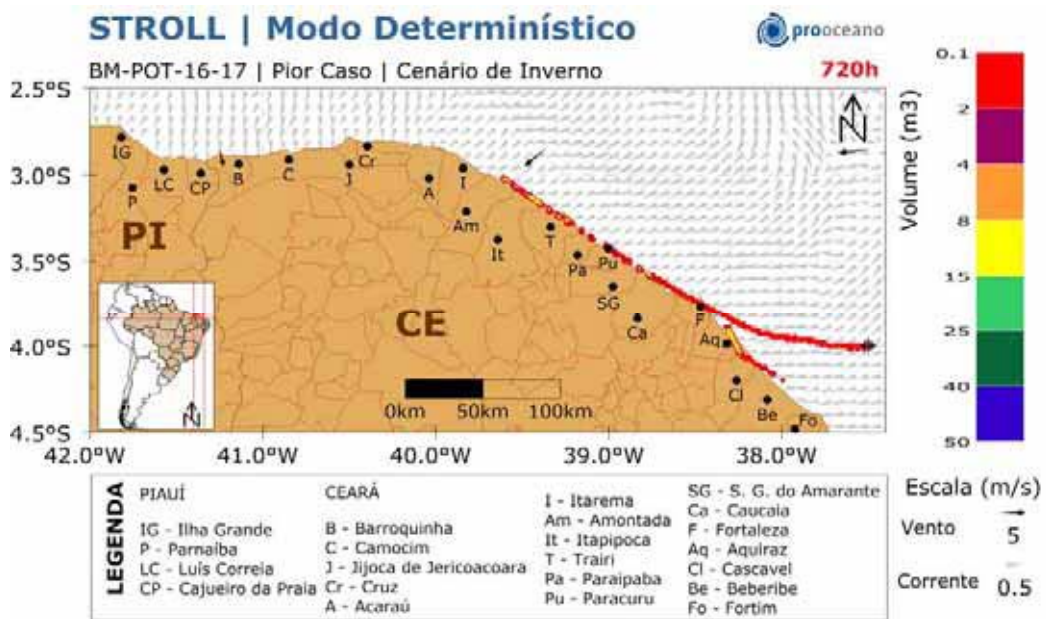


Figura II.6.2.2.5-54 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 30 dias de simulação.

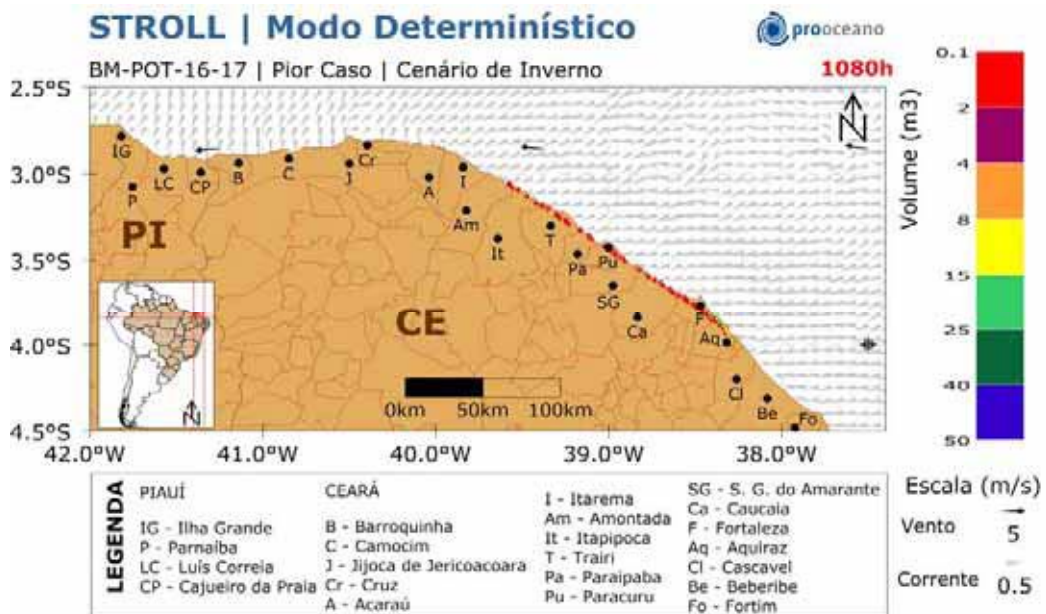
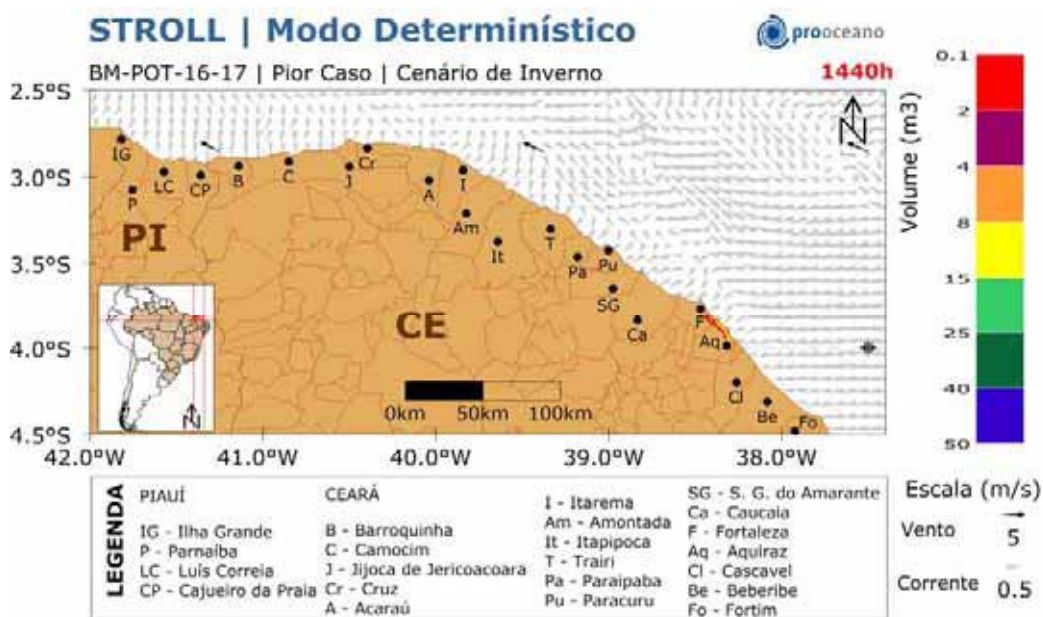


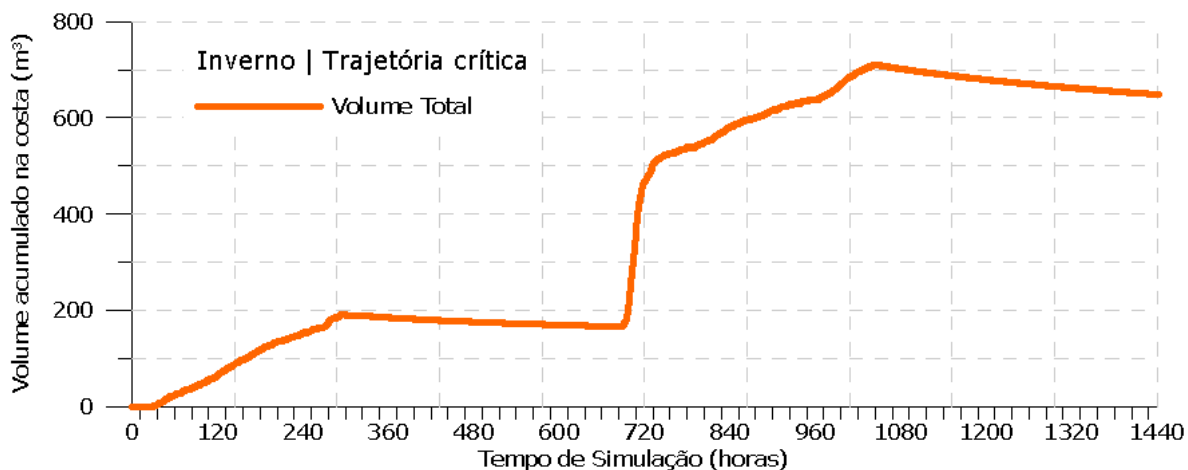
Figura II.6.2.2.5-55 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 45 dias de simulação.



**Figura II.6.2.2.5-56 - Resultado da simulação determinística de pior caso, cenário de inverno, após 60 dias de simulação.**

A deriva do óleo ocorre rumo a oeste e, em 36 horas, já se encontra na costa do município de Cascavel – CE.

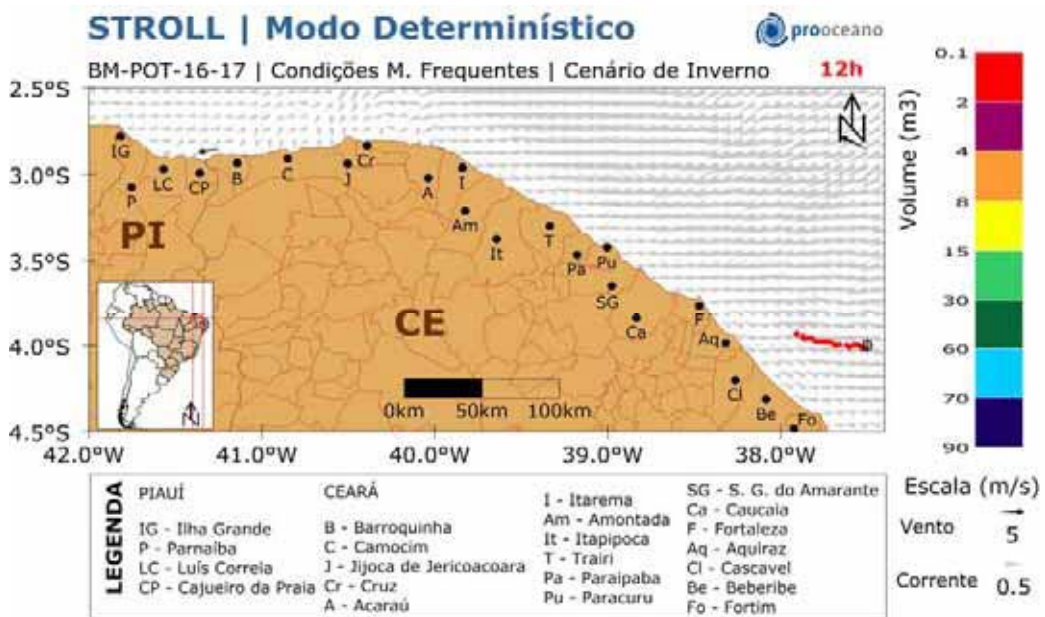
No gráfico (Figura II.6.2.2.5-57), a seguir, é apresentada a evolução temporal do volume de óleo acumulado na costa ao longo da simulação.



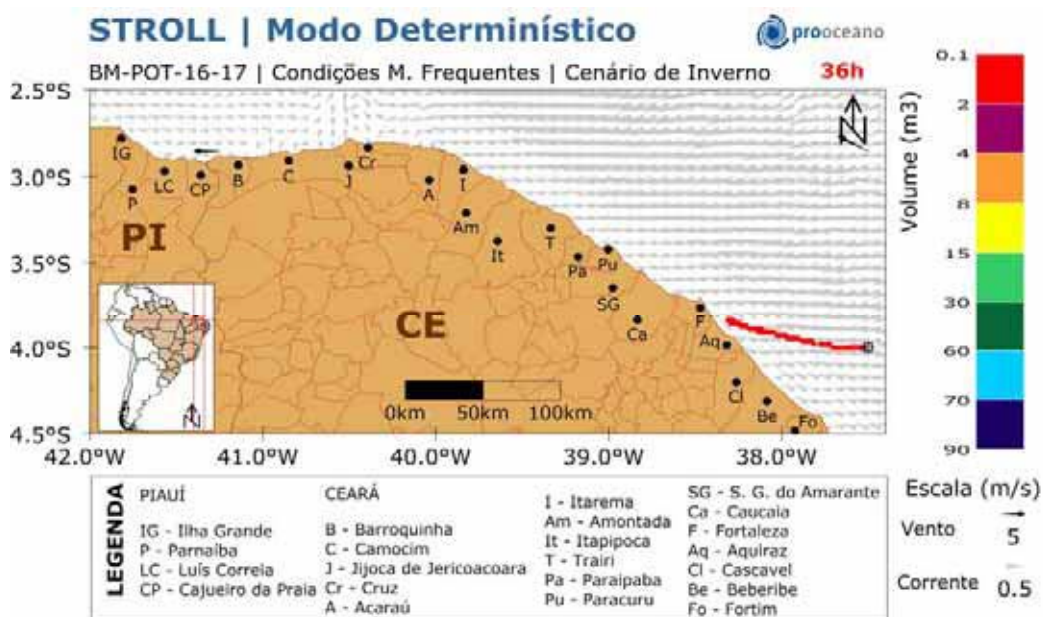
**Figura II.6.2.2.5-57 - Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória crítica no cenário de inverno.**



**Condições meteo-oceanográficas frequentes**



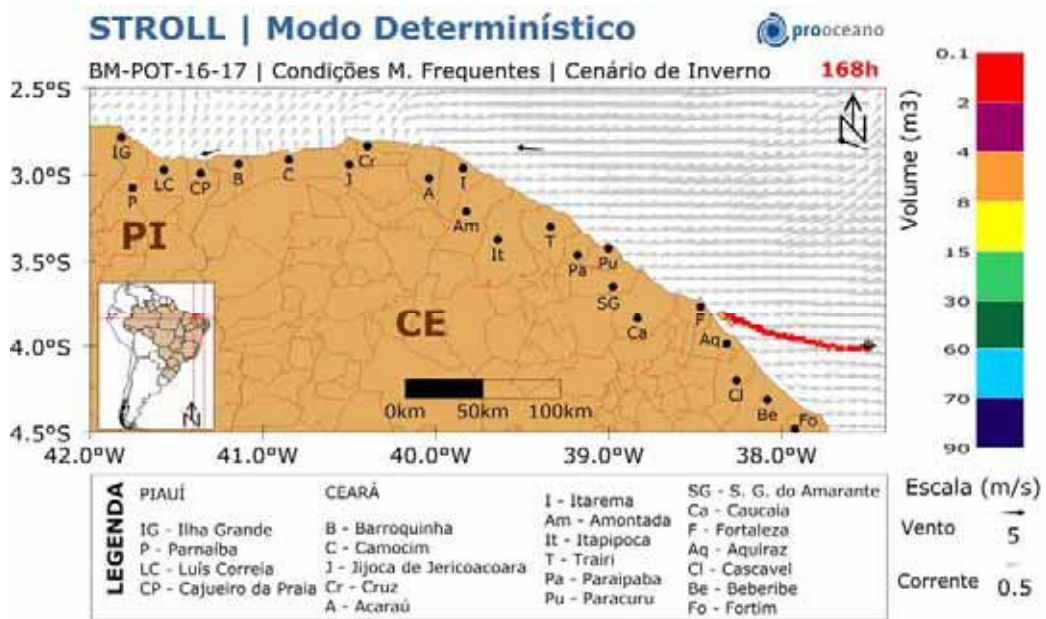
**Figura II.6.2.2.5-58 - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 12 horas de simulação.**



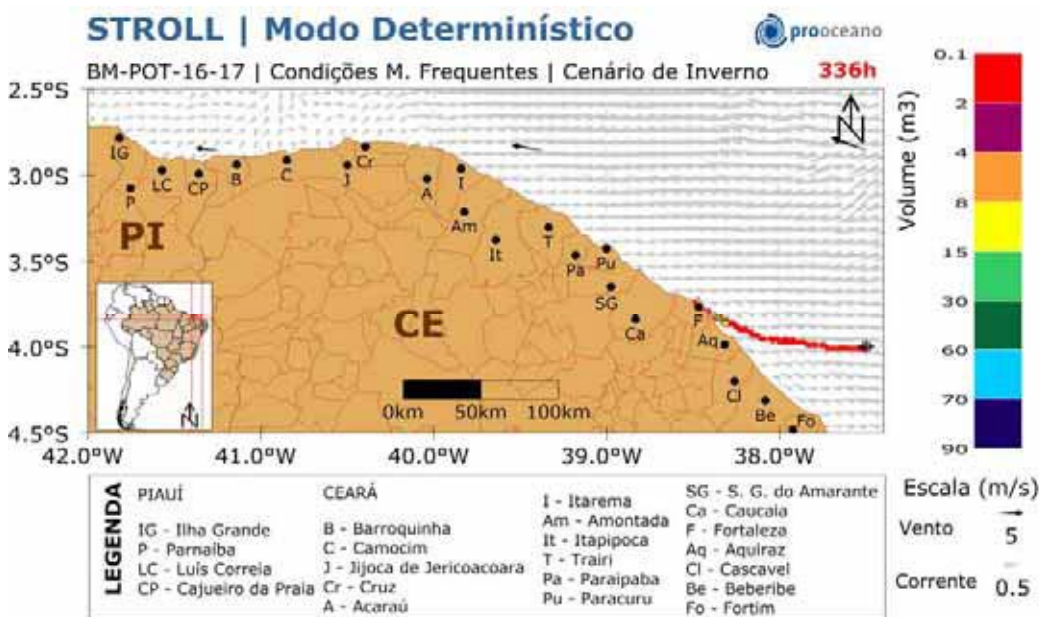
**Figura II.6.2.2.5-59 - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 36 horas de simulação.**



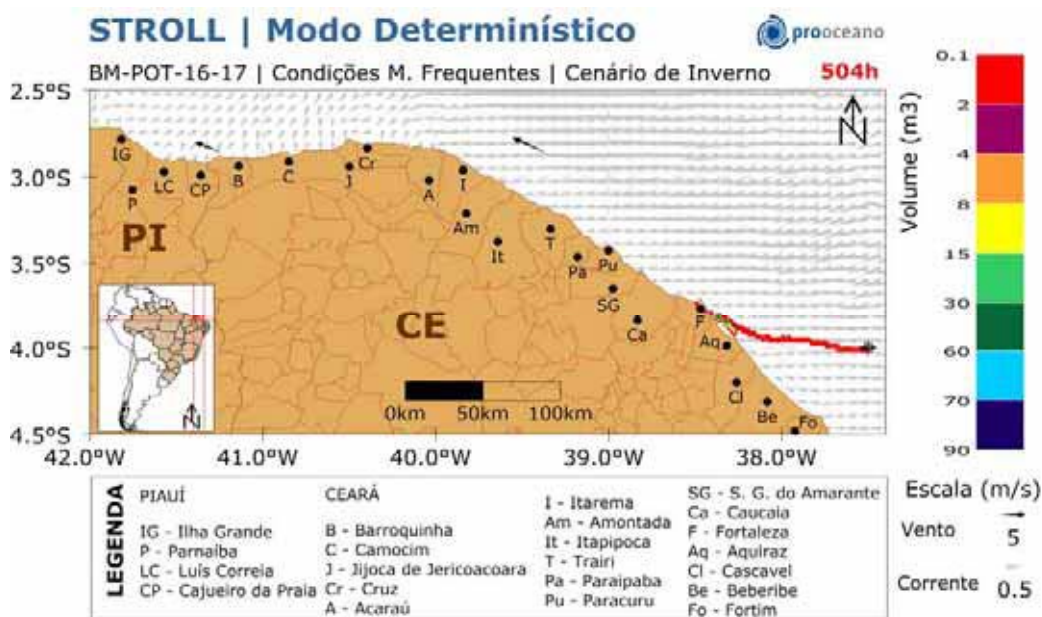
**Figura II.6.2.2.5-60 - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 60 horas de simulação.**



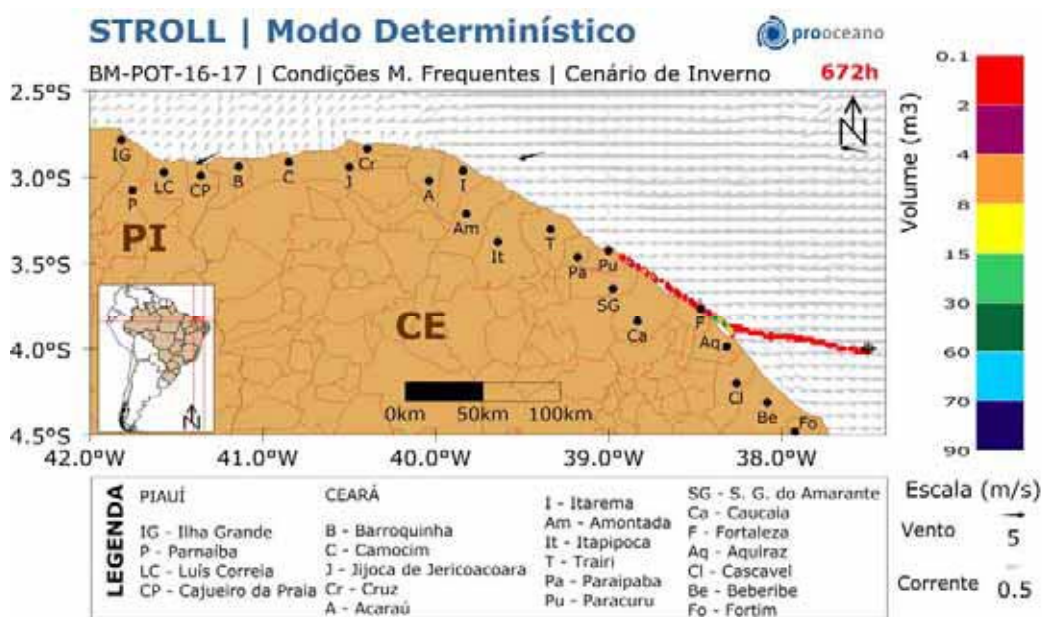
**Figura II.6.2.2.5-61 - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 1 semana (7 dias) de simulação.**



**Figura II.6.2.2.5-62 - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 2 semanas (14 dias) de simulação.**



**Figura II.6.2.2.5-63 - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 3 semanas (21 dias) de simulação.**



**Figura II.6.2.2.5-64 - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 4 semanas (28 dias) de simulação.**

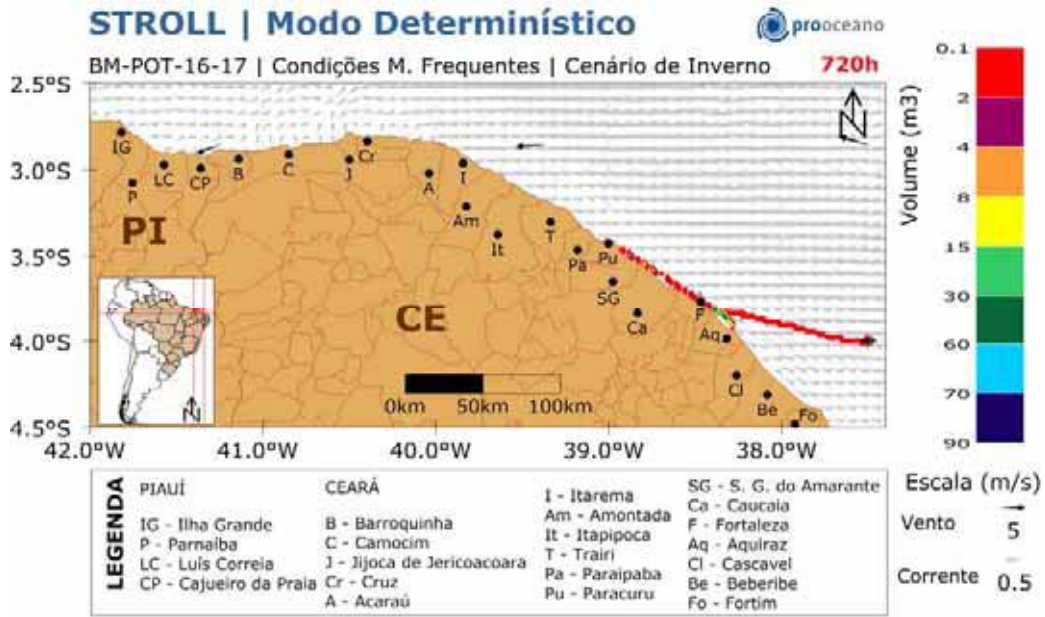


Figura II.6.2.2.5-65 - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 30 dias de simulação.

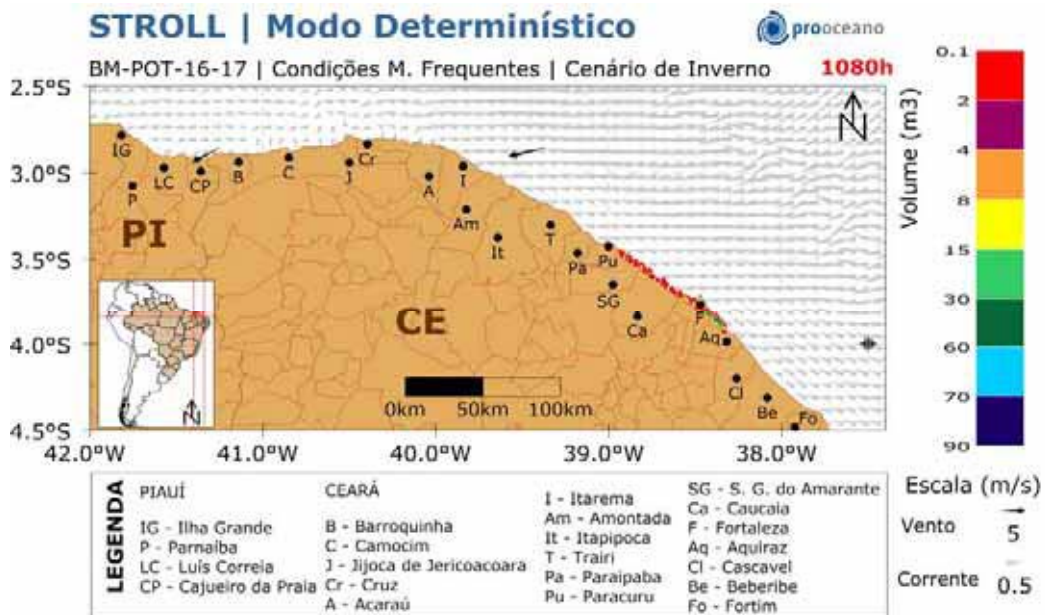
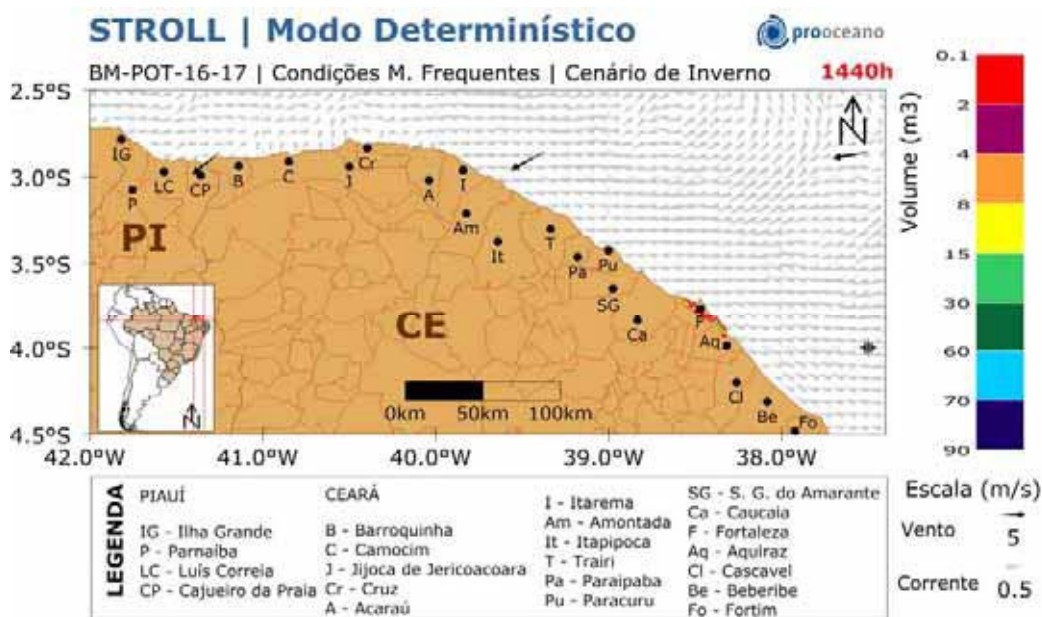


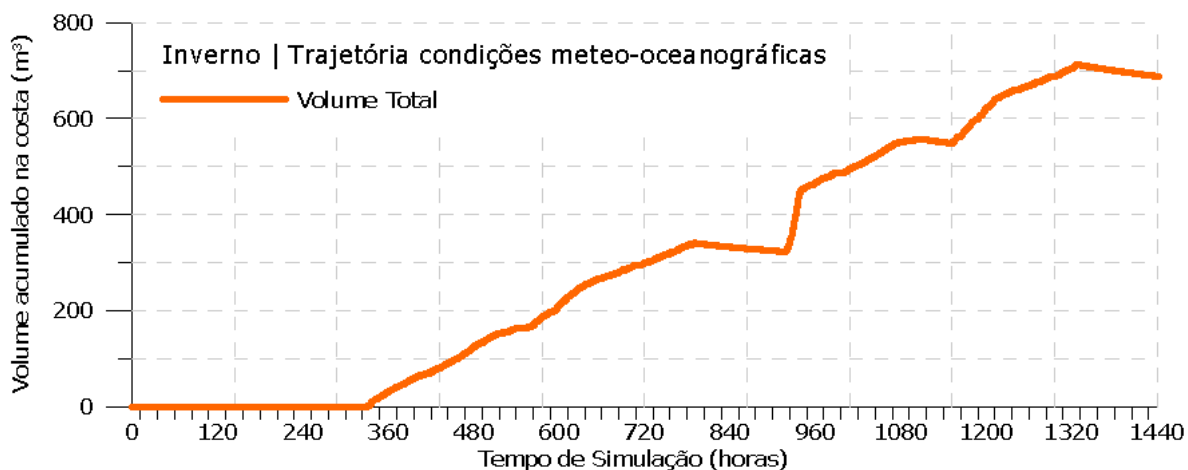
Figura II.6.2.2.5-66 - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 45 dias de simulação.



**Figura II.6.2.2.5-67 - Resultado da simulação determinística de condições meteo-oceanográficas frequentes, cenário de inverno, após 60 dias de simulação.**

A deriva do óleo ocorre rumo a oeste/noroeste e, após 2 semanas, encontra-se no litoral da capital Fortaleza.

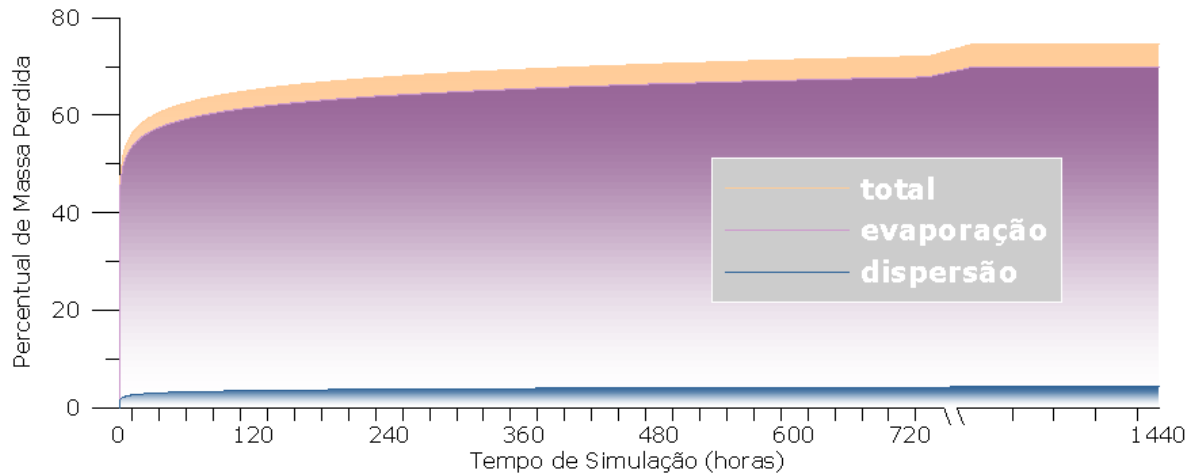
No gráfico (Figura II.6.2.2.5-68), a seguir, é apresentada a evolução temporal do volume de óleo acumulado na costa ao longo da simulação.



**Figura II.6.2.2.5-68 - Volume acumulado na costa durante a simulação da trajetória meteo-oceanográfica no cenário de inverno.**

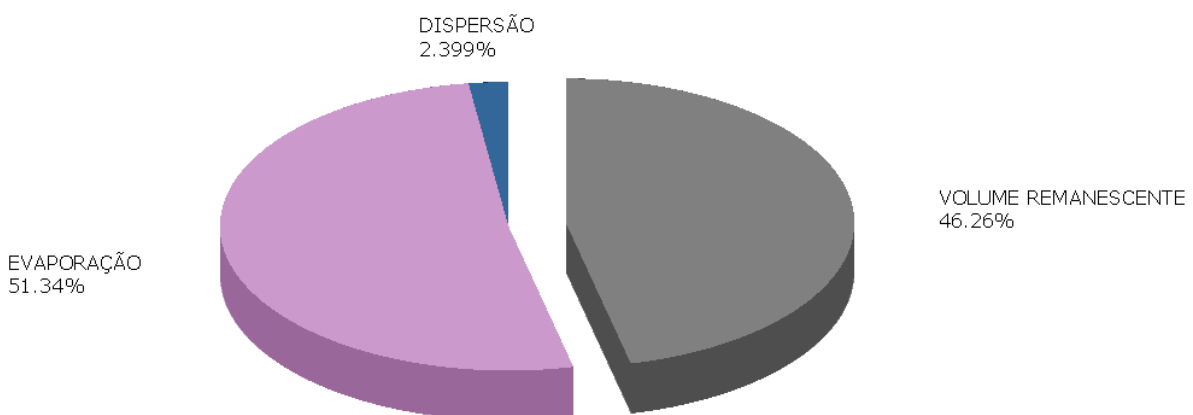
### II.6.2.2.5.3 - Balanços de massa (ou processos do intemperismo)

A evolução temporal do balanço de massa obtido nas simulações é apresentada na Figura II.6.2.2.5-69.

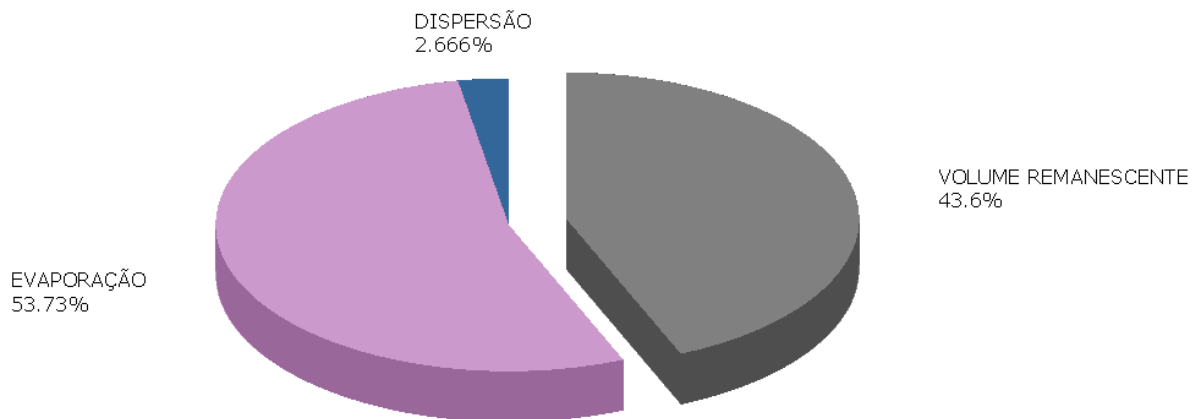


**Figura II.6.2.2.5-69 - Evolução Temporal do Balanço de Massa ao longo da Simulação.**

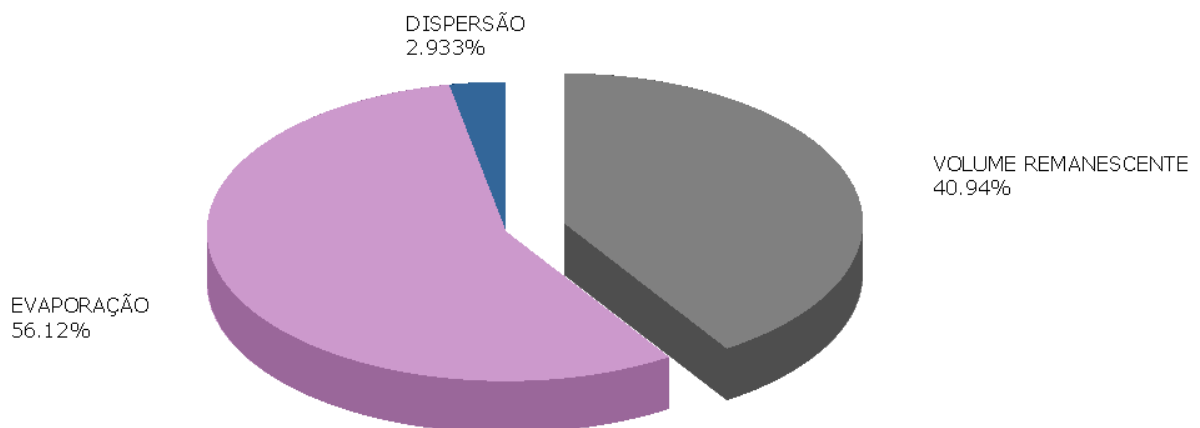
Ao longo da simulação, a massa total de óleo perdida é de 74,5 %. A perda total por evaporação é o processo mais efetivo, consumindo 70 % da massa, sendo essa porcentagem alcançada 1440 horas após a disponibilização do óleo na água. A perda de massa por dispersão consumiu uma parcela menor, de 4,5 %. O balanço de massa ao longo do tempo pode ser observado da Figura II.6.2.2.5-70 à Figura II.6.2.2.5-76.



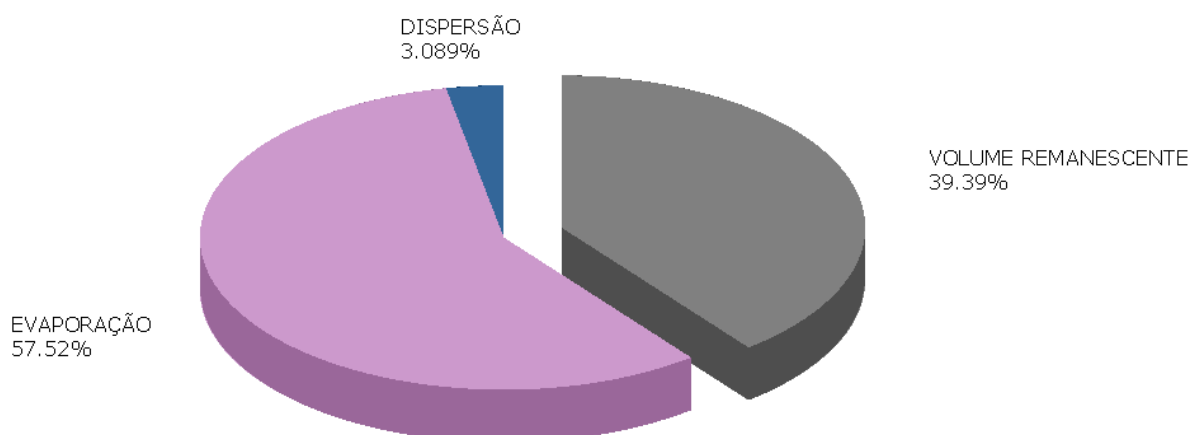
**Figura II.6.2.2.5-70 - Balanço de Massa, após 6 horas de simulação.**



**Figura II.6.2.2.5-71 - Balanço de Massa, após 12 horas de simulação.**

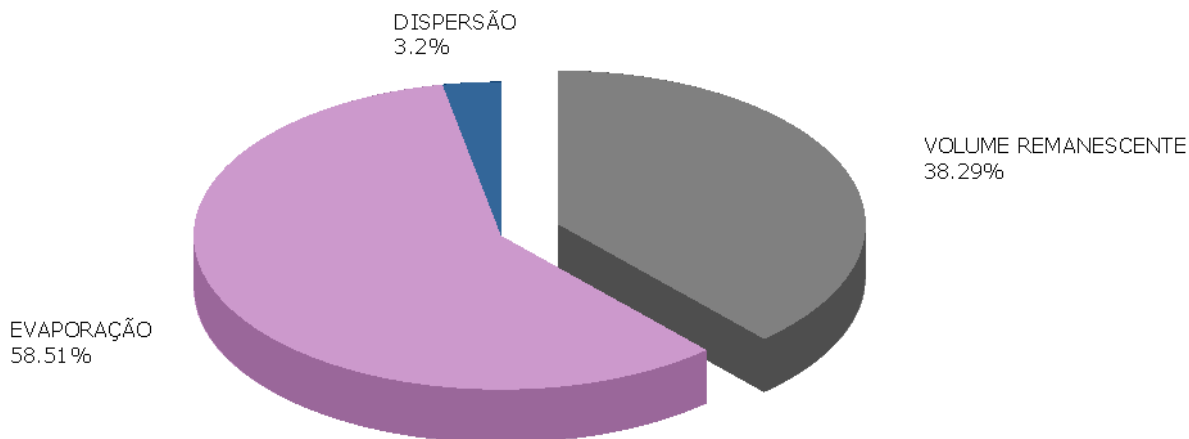


**Figura II.6.2.2.5-72 - Balanço de Massa, após 24 horas de simulação.**

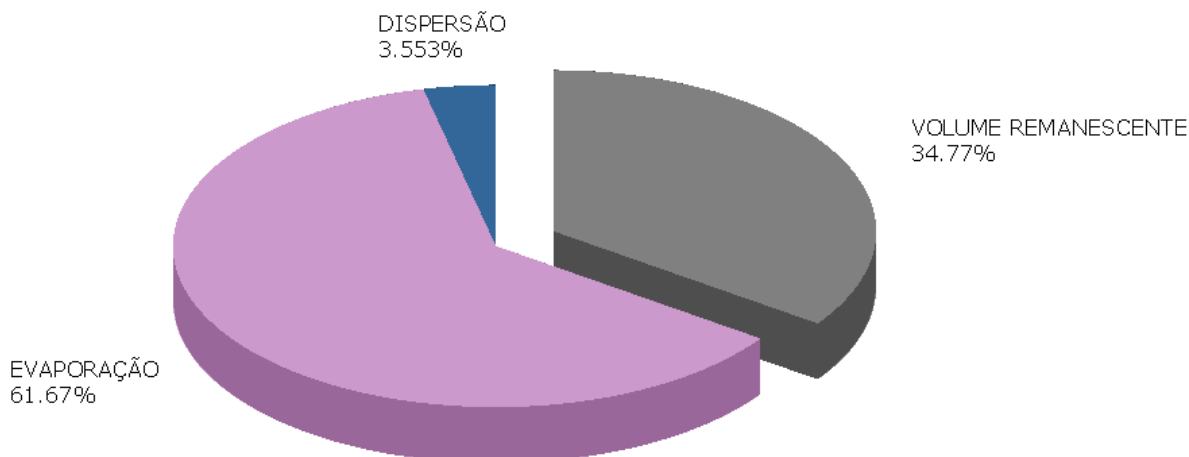


**Figura II.6.2.2.5-73 - Balanço de Massa, após 36 horas de simulação.**

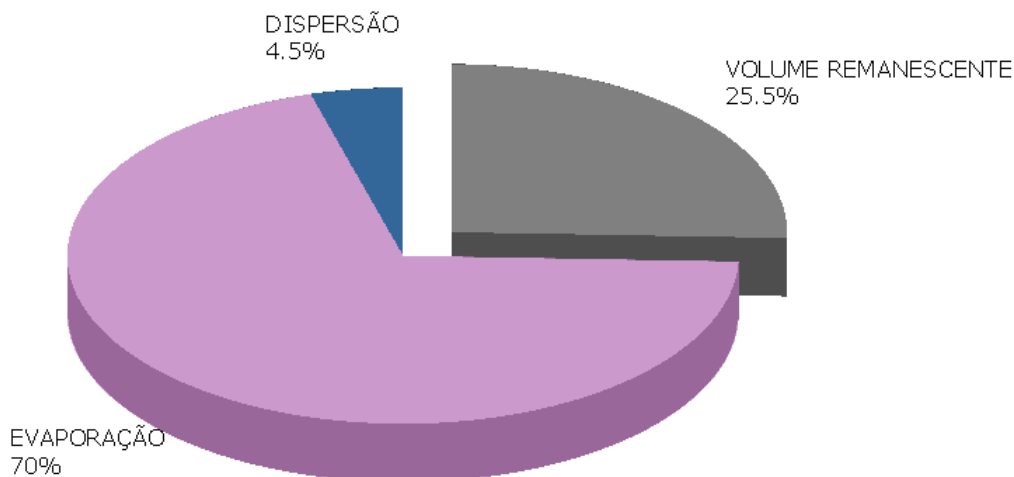




**Figura II.6.2.2.5-74 - Balanço de Massa, após 48 horas de simulação.**



**Figura II.6.2.2.5-75 - Balanço de Massa, após 120 horas de simulação.**



**Figura II.6.2.2.5-76 - Balanço de Massa, após 1440 horas de simulação.**

### II.6.2.2.6 - Conclusão

Em todas as simulações probabilísticas a deriva do óleo foi preferencial para oeste do poço, havendo em todas elas, a possibilidade do óleo atingir a costa. Os cenários de *blow-out* apresentaram os resultados mais severos, com 100-90 % de probabilidade de óleo na costa. O volume máximo de óleo acumulado na costa ocorreu no município de Aquiraz, em ambos cenários sazonais, alcançando 237,01 m<sup>3</sup> e 246,64 m<sup>3</sup>, respectivamente nos cenários de verão e inverno.

Em relação ao tempo mínimo de chegada, os dois cenários sazonais apresentaram o resultado de 12 – 36 horas como mais crítico, podendo ocorrer entre os municípios de Cascavel a Fortaleza.

Foram conduzidas quatro simulações determinísticas e em todas elas foi observado a ocorrência de óleo na costa.

Em relação ao balanço de massa foi mostrado que o processo que atua de forma mais expressiva é a evaporação, que consome cerca de 70 % do óleo. A massa total de óleo perdida foi de 74,5 %, tendo sido 4,5 % consumido pela dispersão.

#### **II.6.2.2.7 - Bibliografia**

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

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

DELVIGNE G.A.L., Hulsén 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., 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.

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.

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

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.

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.

SOTO, Y. J. M. A modelagem hidrodinâmica como apoio a tomada de decisão em caso de derrame de óleo na parte interna do complexo estuarino Antonina-Paranaguá-PR. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Paraná. 2004.

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