

**Modelagem do Transporte e Dispersão de  
Óleo no Mar - FPSO RIO DE JANEIRO,  
Campo de Espadarte**

**Revisão 03  
Setembro / 2006**



**E&P**







## ÍNDICE GERAL

RESUMO .....	1
I INTRODUÇÃO .....	I-1
I.1 ÁREA DE ESTUDO.....	I-2
I.1.1 PADRÕES DE CIRCULAÇÃO NA REGIÃO.....	I-2
I.1.2 CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS DA REGIÃO .....	I-4
II MODELO HIDRODINÂMICO .....	II-1
II.1 DESCRIÇÃO DO PRINCETON OCEAN MODEL .....	II-1
II.1.1 EQUAÇÕES BÁSICAS DO POM .....	II-2
II.1.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO ADOTADAS .....	II-5
II.2 DESCRIÇÃO DO MODELO PARALLEL OCEAN CIRCULATION MODEL .....	II-6
II.3 DOMÍNIO MODELADO E DADOS DE ENTRADA DO MODELO .....	II-7
II.3.1 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO E BATIMETRIA .....	II-7
II.3.2 DADOS DE VENTO E MARÉ.....	II-10
II.3.3 ESTRUTURA TERMOHALINA.....	II-10
III CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO .....	III-1
III.1 CALIBRAÇÃO PARA O NÍVEL DO MAR .....	III-2
III.2 CALIBRAÇÃO PARA AS CORRENTES .....	III-3
III.3 RESUMO DA BASE HIDRODINÂMICA UTILIZADA.....	III-6
IV MODELAGEM DE DERRAME DE ÓLEO .....	IV-1
IV.1 MODELO OILMAP .....	IV-1
IV.2 FORMULAÇÃO DO MODELO .....	IV-4
IV.3 DADOS DE ENTRADA .....	IV-18
V MODELAGEM DE DERIVA DE ÓLEO PARA UM POTENCIAL ACIDENTE NO CAMPO DE ESPADARTE, FPSO-RIO DE JANEIRO .....	V-1
V.1 DADOS DE ENTRADA .....	V-1
V.1.1 CAMPO DE CORRENTES.....	V-2
V.1.2 DADOS DE VENTO .....	V-2
V.1.3 PONTO DE RISCO E VOLUMES .....	V-4

---

V.1.4	CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO UTILIZADO .....	V-5
V.2	RESUMO DOS CENÁRIOS SIMULADOS PARA O FPSO-RIO DE JANEIRO .....	V-6
VI	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM POTENCIAL ACIDENTE NO CAMPO DE ESPADARTE, FPSO-RIO DE JANEIRO .....	VI-1
VI.1	SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS.....	VI-1
VI.2	CENÁRIOS DETERMINÍSTICOS CRÍTICOS .....	VI-22
VII	BIBLIOGRAFIA .....	VII-1
VIII	EQUIPE TÉCNICA.....	VIII-1

**TABELAS**

<b>TABELAS</b>	<b>PÁG.</b>
<b>Tabela II.2-1</b> - Resumo dos dados de entrada do <i>Parallel Ocean Climate Model</i> (POCM).	II-7
<b>Tabela V.1.2-1</b> - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento para o ano de 1992, na Baía de Campos.	V-3
<b>Tabela V.1.3-1</b> - Coordenadas (SAD 69) do ponto de risco que representa o FPSO-RIO DE JANEIRO, localizado no campo de Espadarte, Baía de Campos.	V-4
<b>Tabela V.1.4-1</b> - Tipo de óleo utilizado nas simulações.	V-5
<b>Tabela V.1.4-2</b> - Características do óleo tipo ESPADARTE-II.	V-5
<b>Tabela V.2-1</b> - Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derrames de óleo para o FPSO-RIO DE JANEIRO.	V-7
<b>Tabela VI.1-1</b> – Municípios com probabilidade de serem atingidos por derrame de óleo do FPSO-RIO DE JANEIRO superior a 10%, simulados em condições de inverno.	VI-11
<b>Tabela VI.1-2</b> - Extensão da linha de costa com probabilidade de ser atingida pelo derrame de óleo a partir do FPSO-RIO DE JANEIRO, simulados em condições de inverno e verão.	VI-22
<b>Tabela VI.1-3</b> - Resumo dos resultados da modelagem probabilística de pior caso ocorrendo durante os meses de inverno (junho a agosto) para o FPSO-RIO DE JANEIRO.	VI-22
<b>Tabela VI.2-1</b> - Resumo dos cenários determinísticos críticos de inverno e de verão para o FPSO-RIO DE JANEIRO.	VI-23

## FIGURAS

FIGURA	PÁG.
<b>Figura I.1-1</b> - Localização do FPSO-RIO DE JANEIRO no campo de Espadarte, Bacia de Campos.	I-2
<b>Figura I.1.2-1</b> - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento à 10 m no período de verão (Reanálises do ECMWF).	I-5
<b>Figura I.1.2-2</b> - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento à 10 m no período de inverno (Reanálises do ECMWF).	I-5
<b>Figura II.3.1-1</b> - Grade computacional utilizada nas simulações da circulação hidrodinâmica da Bacia de Campos.	II-8
<b>Figura II.3.1-2</b> - Batimetria discretizada do domínio considerado na Bacia de Campos.	II-9
<b>Figura II.3.3-1</b> - Campos termohalinos da Climatologia LEVITUS: (a) temperatura no verão; (b) temperatura no inverno.	II-10
<b>Figura II.3.3-2</b> - Campos termohalinos da Climatologia LEVITUS: (a) salinidade no verão e (b) salinidade no inverno.	II-11
<b>Figura III.1-1</b> - Série temporal de maré (azul) e a elevação calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 19 e 21 de agosto de 1992.	III-2
<b>Figura III.2-1</b> - Séries temporais da elevação FEMAR (azul) e das componentes $u$ (E-W) e $v$ (N-S) dos dados PETROBRAS (azul) e as reproduzidas pelo modelo (vermelho).	III-3
<b>Figura III.2-2</b> - Espectros de amplitude das componentes $u$ (E-W) (azul) e $v$ (N-S) (vermelho) dos dados de corrente da PETROBRAS.	III-4
<b>Figura III.2-3</b> - Séries temporais do sinal de baixa frequência das componentes $u$ (E-W) e $v$ (N-S) dos dados de corrente da PETROBRAS (azul) e as calculadas pelo modelo (vermelho) entre os dias 14 e 19 de agosto de 1992.	III-5
<b>Figura III.2-4</b> - Séries temporais do sinal de baixa frequência das componentes $u$ (E-W) e $v$ (N-S) dos dados PETROBRAS (azul) e calculada pelo modelo (vermelho), entre os dias 22 de julho e 2 de setembro de 1992, utilizados na calibração da corrente média residual.	III-6
<b>Figura III.3-1</b> - Exemplo ilustrativo de campo de velocidades obtidos com o modelo hidrodinâmico no ano de 1992.	III-7
<b>Figura V.1-1</b> - Grade definindo os contornos de terra (grade <i>land-water</i> ) para a modelagem de deriva de óleo na Bacia de Campos.	V-1

FIGURA	PÁG.
<b>Figura V.1.2-1</b> - Diagrama de dispersão do vento para o ano de 1992, na Bacia de Campos.	V-3
<b>Figura VI.1-1</b> - Cenário FPSO-RJ_INV_8_20MGL. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 8 m <sup>3</sup> após 1 hora atingindo 20 mg/l.	VI-2
<b>Figura VI.1-2</b> - Cenário FPSO-RJ_INV_200_6HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m <sup>3</sup> após 6 horas.	VI-3
<b>Figura VI.1-3</b> - Cenário FPSO-RJ_INV_PIORCASO_6HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 304.475,5 m <sup>3</sup> após 6 horas.	VI-4
<b>Figura VI.1-4</b> - Cenário FPSO-RJ_INV_PIORCASO_9HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 304.475,5 m <sup>3</sup> após 9 horas.	VI-5
<b>Figura VI.1-5</b> - Cenário FPSO-RJ_INV_PIORCASO_12HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 304.475,5 m <sup>3</sup> após 12 horas.	VI-6
<b>Figura VI.1-6</b> - Cenário FPSO-RJ_INV_PIORCASO_36HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 304.475,5 m <sup>3</sup> após 36 horas.	VI-7
<b>Figura VI.1-7</b> - Cenário FPSO-RJ_INV_PIORCASO_60HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 304.475,5 m <sup>3</sup> após 60 horas.	VI-8
<b>Figura VI.1-8</b> - Cenário FPSO-RJ_INV_PIORCASO_30DIAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 304.475,5 m <sup>3</sup> após 30 dias.	VI-9

<b>FIGURA</b>	<b>PÁG.</b>
<b>Figura VI.1-9-</b> Cenário FPSO-RJ_INV_PIORCASO_30DIAS_SHORE. Probabilidades de toque na costa para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 304.475,5 m <sup>3</sup> após 30 dias.	VI-10
<b>Figura VI.1-10</b> - Cenário FPSO-RJ_INV_PIORCASO_30DIAS_OLEOMED. Volume médio de óleo por km que chega à costa no período de inverno (junho a agosto).	VI-12
<b>Figura VI.1-11</b> - Cenário FPSO-RJ_INV_PIORCASO_30DIAS_OLEOMAX. Volume máximo de óleo por km que chega à costa no período de inverno (junho a agosto).	VI-13
<b>Figura VI.1-12</b> - Cenário FPSO-RJ_VER_8_20MGL. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 8 m <sup>3</sup> após 1 hora atingindo 20 mg/l.	VI-14
<b>Figura VI.1-13</b> - Cenário FPSO-RJ_VER_200_6HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 200 m <sup>3</sup> após 6 horas.	VI-15
<b>Figura VI.1-14</b> - Cenário FPSO-RJ_VER_PIORCASO_6HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 304.475,5 m <sup>3</sup> após 6 horas.	VI-16
<b>Figura VI.1-15</b> - Cenário FPSO-RJ_VER_PIORCASO_9HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 304.475,5 m <sup>3</sup> após 9 horas.	VI-17
<b>Figura VI.1-16</b> - Cenário FPSO-RJ_VER_PIORCASO_12HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 304.475,5 m <sup>3</sup> após 12 horas.	VI-18
<b>Figura VI.1-17</b> - Cenário FPSO-RJ_VER_PIORCASO_36HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 304.475,5 m <sup>3</sup> após 36 horas.	VI-19

FIGURA	PÁG.
<b>Figura VI.1-18</b> - Cenário FPSO-RJ_VER_PIORCASO_60HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 304.475,5 m <sup>3</sup> após 60 horas.	VI-20
<b>Figura VI.1-19</b> - Cenário FPSO-RJ_VER_PIORCASO_30DIAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 304.475,5 m <sup>3</sup> após 30 dias.	VI-21
<b>Figura VI.2-1</b> - Cenário determinístico de pior caso para um derrame ocorrido no FPSO-RIO DE JANEIRO, no período de inverno.	VI-24
<b>Figura VI.2-2</b> - Balanço de massa para o cenário de pior caso de vazamento no inverno, no FPSO-RIO DE JANEIRO.	VI-25
<b>Figura VI.2-3</b> - <i>Stick plot</i> para os dados de vento medidos em Albacora e utilizados na simulação determinística de inverno.	VI-26
<b>Figura VI.2-4</b> - Cenário determinístico de pior caso para um derrame ocorrido no FPSO-RIO DE JANEIRO, no período de verão.	VI-27
<b>Figura VI.2-5</b> - Balanço de massa para o cenário de pior caso de vazamento no verão, no FPSO-RIO DE JANEIRO.	VI-28
<b>Figura VI.2-6</b> - <i>Stick-plot</i> dos dados de vento medido em Albacora e utilizados na simulação determinística de verão.	VI-28



## RESUMO

O sistema de modelos OILMAP da *Applied Science Associates (ASA)* foi utilizado para definir a área potencialmente ameaçada por derramamentos de óleo, decorrentes das atividades no campo de Espadarte, Bacia de Campos, a partir de simulações de derrame de óleo do FPSO-RIO DE JANEIRO.

A caracterização dos padrões de circulação na região foi obtida a partir da combinação dos resultados de dois modelos. O primeiro, baseado no *Princeton Ocean Model (POM)*, implementado para simular as condições na plataforma continental, e o segundo baseado no *Parallel Ocean Climate Model (POCM)* para simular as condições no talude continental e oceano profundo.

Foram conduzidas simulações probabilísticas para determinar contornos de probabilidade da mancha atingir a área de estudo a partir de 3 (três) classes de derrame, como definido na Resolução CONAMA nº 293/01: pequeno, com 8 m<sup>3</sup>; médio, com 200 m<sup>3</sup>, e pior caso, com 304.475,5 m<sup>3</sup>, correspondente ao afundamento do FPSO-RIO DE JANEIRO. A partir dos resultados dessas simulações probabilísticas foram selecionados os cenários determinísticos de “pior caso” para condições de verão e inverno, utilizando como critério o menor tempo de chegada do óleo na costa.

Os resultados da modelagem revelaram uma forte correlação entre a trajetória de uma mancha simulada e o padrão de circulação na região. As condições meteorológicas e oceanográficas da região onde se localiza o FPSO-RIO DE JANEIRO, Bacia de Campos, mostram que sobre a plataforma, o padrão de circulação predominante está relacionado ao campo de vento e à maré, com eventuais intrusões da Corrente do Brasil (CB). A partir do talude, e em oceano profundo, os mesmos padrões são observados, mas com predomínio sensível de correntes médias superficiais para sul-sudoeste, relacionadas à presença da CB.

Este trabalho representa uma iniciativa pioneira da PETROBRAS na caracterização ambiental e utilização do estado-da-arte em ferramentas computacionais para a modelagem hidrodinâmica e do transporte e dispersão de óleo no mar, decorrente de potenciais acidentes com derramamento de petróleo na Bacia de Campos.



## I INTRODUÇÃO

Com o objetivo de dar suporte a PETROBRAS no desenvolvimento de Estudos Ambientais na Bacia de Campos, apresentamos este trabalho de modelagem computacional da trajetória e intemperismo de óleo no campo de Espadarte, decorrente de um potencial acidente com derramamento de petróleo a partir do FPSO-RIO DE JANEIRO.

As modelagens foram conduzidas através da utilização de um sistema de modelos conhecido como OILMAP, desenvolvido pela **Applied Science Associates (ASA)**. A **ASA** tem mais de 20 anos de experiência com utilização de ferramentas computacionais para estudos de impacto ambiental causados por acidentes com petróleo.

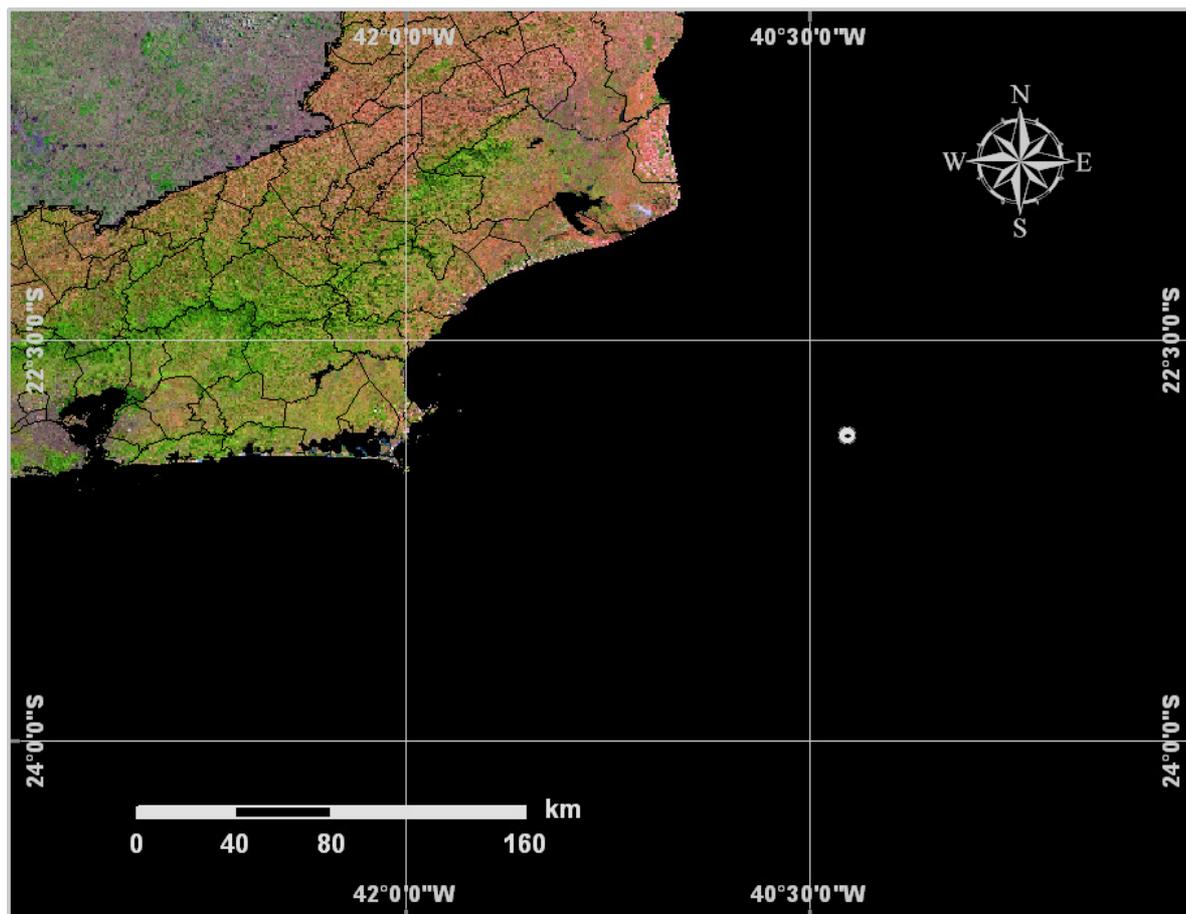
Para estudos de modelagem como o realizado neste trabalho, são necessários: (a) um conhecimento detalhado das características geomorfológicas do local (morfologia da linha de costa e fundo oceânico), (b) padrões de circulação local e em larga escala, e (c) séries temporais de vento de longa duração (preferencialmente de bóias *offshore* e/ou estação meteorológica costeira).

Para a modelagem de transporte da mancha de óleo foram utilizados dados de vento obtidos da bóia oceanográfica da PETROBRAS localizada no campo de Albacora, nas coordenadas 22°30'S e 40°W. A caracterização dos padrões de circulação na região foi realizada a partir de resultados de um modelo desenvolvido pela equipe da **ASA SOUTH AMERICA**, baseado no *Princeton Ocean Model* (POM), para simular as condições na plataforma continental, e resultados do *Parallel Ocean Climate Model* (POCM) para simular as condições no talude continental e oceano profundo.

O Capítulo I discute o propósito do estudo e fornece informações sobre a área de estudo. O Capítulo II descreve o modelo hidrodinâmico e o Capítulo III apresenta a calibração do mesmo. O Capítulo IV descreve o modelo OILMAP utilizado na modelagem dos cenários acidentais de óleo. O Capítulo V apresenta os cenários simulados, suas características e os dados de entrada. Os resultados das simulações probabilísticas e determinísticas são apresentados no Capítulo VI.

## I.1 ÁREA DE ESTUDO

A figura I.1-1 apresenta a localização do FPSO-RIO DE JANEIRO no campo de Espadarte, Bacia de Campos, a partir de onde foram realizadas as simulações de um potencial acidente com derramamento de petróleo.



**Figura I.1-1 - Localização do FPSO-RIO DE JANEIRO no campo de Espadarte, Bacia de Campos.**

### I.1.1 Padrões de Circulação na Região

A circulação oceânica nesta área é determinada por forças variadas, que se sobrepõem de modo diferenciado, dependendo de fatores morfológicos e dinâmicos locais. Sobre a plataforma há amplificação natural do sinal de maré e

intensificação dos padrões meteorológicos locais, *i.e.*, brisa marinha. Sobreposto a estes sinais existe a presença energética da passagem de frentes, com pronunciada causalidade remota. No oceano profundo a composição da passagem de frentes e do fluxo determinado pela Corrente do Brasil (CB) é preponderante. Considerando-se o relativo conhecimento existente sobre a circulação da maré na região, o principal padrão no oceano a ser descrito é a CB.

Parte significativa do fluxo da CB passa através dos canais dos Bancos de Abrolhos e divide-se em dois ramos. Um deles flui afastado da costa, além da isóbata de 3.000 m (Stramma *et al.*, 1990), enquanto o outro flui seguindo a linha de quebra da plataforma (Signorini, 1978).

As primeiras medições diretas foram feitas por Evans & Signorini (1985), nas latitudes de 20°30'S e 23°S, as quais apresentaram um fluxo confinado aos primeiros 400 m de profundidade, com uma contra-corrente no sentido norte abaixo destes 400 m iniciais. Na parte norte da área, acima do Cabo de São Tomé, a direção da corrente é para 180°, variando para 220° na região de Cabo Frio. Esta mudança afeta significativamente a CB, induzindo a formação de vórtices e meandros. O volume estimado transportado pela CB na região da quebra da plataforma e do talude na latitude de 22°S é de  $5,5 \pm 2,6$  Sv (Lima, 1997).

Imagens AVHRR, usadas por Garfield (1990), indicam um padrão de meandramento regular entre o Cabo de São Tomé e Cabo Frio, com a separação ocasional de vórtices ciclônicos. Nos primeiros 100 m da coluna d'água, em algumas regiões sobre o talude continental, a velocidade da corrente pode chegar a 1,0 m/s (Castro & Miranda, 1998).

A corrente que flui para sudoeste durante o verão é reforçada pelos ventos predominantes, que provêm principalmente de nordeste nessa estação, devido à influência da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). No inverno, entretanto, a alta incidência de sistemas frontais induz a ocorrência de correntes com direção nordeste nas porções interna e média da plataforma (Castro & Miranda, 1998). Outra conseqüência do predomínio dos ventos de NE é a “ressurgência” de águas frias (ACAS) em regiões costeiras. Esses eventos são muito comuns na região de Cabo Frio.

## ***1.1.2 Características Meteorológicas da Região***

A circulação atmosférica de baixos níveis na região sudeste do Brasil é dominada pela ação da ASAS, pela passagem de sistemas frontais sobre a região e por circulações locais.

A variabilidade sazonal do padrão de ventos na região sudeste devido ao deslocamento da ASAS é caracterizado pelo predomínio de ventos de nordeste no verão e ventos de leste no inverno. Este padrão é ilustrado na figura I.1.2-1 e na figura I.1.2-2, que apresentam o comportamento sazonal da circulação atmosférica obtida através da média de 12 anos (1990 – 2001) das reanálises do modelo de circulação geral do ECMWF (*European Centre for Medium-range Weather Forecast*). Nessa análise foram utilizados dados de vento na altura de 10 m. Observa-se a mudança do posicionamento sazonal da ASAS e o padrão de ventos gerados por esse sistema.

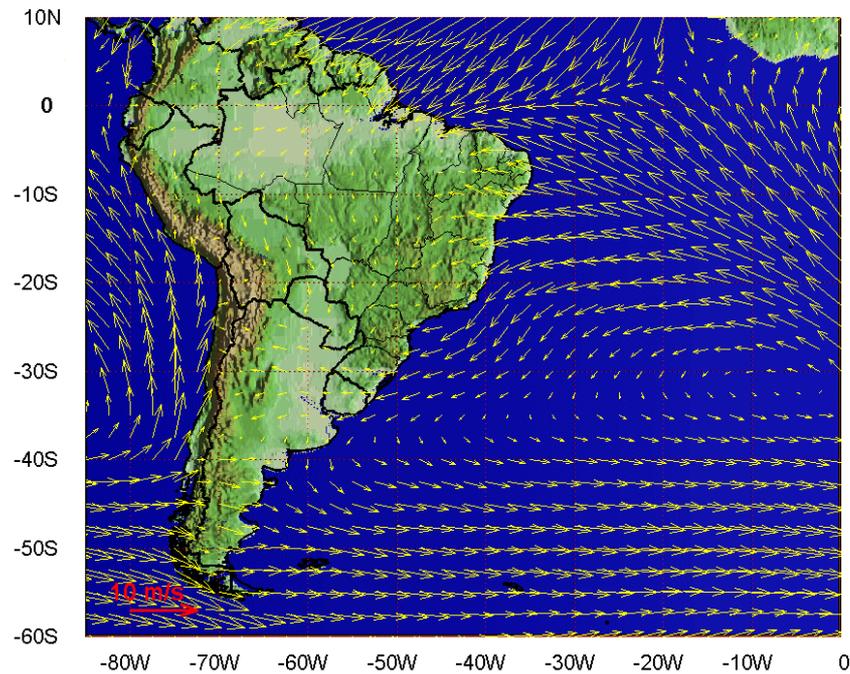
Os sistemas frontais atuam durante o ano todo sobre o Brasil com freqüências maiores nas latitudes mais altas e menores nas latitudes mais baixas, como se pode notar no estudo de Oliveira (1986).

De acordo com o Boletim de Monitoramento e Análise Climática (Climanálise, 1996), que apresentou uma estatística de sistemas frontais que atuaram no litoral do Brasil entre os anos de 1975 a 1984 e 1987 a 1995, a média ficou entre 4 e 7 sistemas mensais atuando sobre a costa do sudeste brasileiro, com valores máximos nos meses de inverno e valores mínimos nos meses de verão.

O deslocamento desses sistemas está associado ao escoamento ondulatório de grande escala. A intensificação ou dissipação dos mesmos está relacionada com as características atmosféricas sobre o continente. Algumas regiões do Brasil, tais como as Regiões Sul e Sudeste, são regiões frontogenéticas, ou seja, são regiões onde as frentes podem se intensificar ou se formar (Satyamurty & Mattos, 1989).

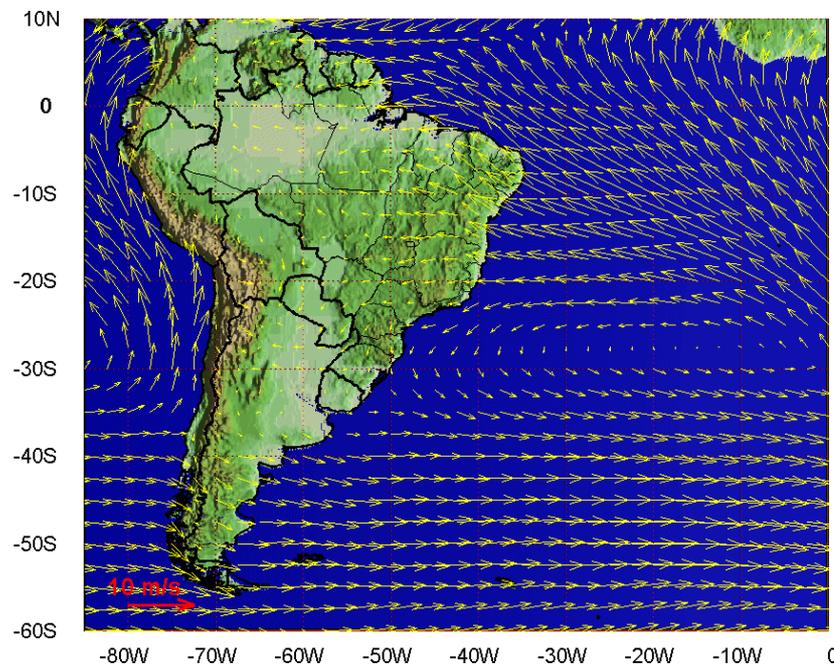
Em meso e micro escalas, o escoamento de baixos níveis sobre a plataforma continental está fortemente influenciado pelo efeito de circulações termicamente induzidas (brisas marinha e terrestre).

## Janeiro - Fevereiro - Março



**Figura I.1.2-1** - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento à 10 m no período de verão (Reanálises do ECMWF).

## Junho - Julho - Agosto



**Figura I.1.2-2** - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento à 10 m no período de inverno (Reanálises do ECMWF).



## II MODELO HIDRODINÂMICO

Nesta etapa do trabalho foi implementada uma estrutura numérica (i.e. modelos hidrodinâmicos), visando simular o campo de correntes na plataforma e talude continentais da costa sul-sudeste brasileira, englobando as Bacias do Espírito Santo, Campos e Santos. Neste intuito, foi utilizado o código baseado no POM para simular as condições na plataforma continental e resultados do POCM para simular as condições no talude continental e oceano profundo.

### II.1 DESCRIÇÃO DO PRINCETON OCEAN MODEL

O modelo numérico hidrodinâmico utilizado para a simular as condições na plataforma continental foi baseado no POM, desenvolvido por Blumberg & Mellor (1987), e implementado pelo grupo de modelagem da **ASA SOUTH AMERICA**. O código fonte desse modelo é de domínio público, obtido via Internet no endereço: [www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom](http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom).

A formulação deste modelo possui estrutura tridimensional, não linear, com as equações hidrodinâmicas escritas na forma de fluxo, sob as aproximações de Boussinesq e hidrostáticas. Este modelo permite também a utilização de grades curvilíneas, de coordenadas  $\sigma$  na vertical e a resolução das camadas turbulentas de superfície e de fundo, por meio de um submodelo de fechamento turbulento de 2ª ordem.

No sistema de coordenadas  $\sigma$ , a coordenada  $z$  é escalonada de acordo com a profundidade da coluna d'água local, conforme mostra a equação abaixo, onde  $D$  é a profundidade local,  $\eta$  a elevação da superfície e  $H$  a profundidade média local:

$$\sigma = \frac{z - \eta}{D} \quad (\text{II.1-1})$$

onde

$$D(x, y, t) = H(x, y) + \eta(x, y, t).$$

Nesta formulação também está incluído um submodelo de fechamento turbulento, para o cálculo dos coeficientes de mistura turbulenta vertical. O fechamento turbulento de 2ª ordem utiliza os resultados das equações da energia cinética turbulenta e da escala de comprimento de turbulência, no cálculo dos coeficientes cinemáticos de viscosidade e de difusão turbulenta de calor e sal na vertical (Mellor & Yamada, 1982). Esses cálculos são efetuados com base em relações empíricas, que utilizam constantes estabelecidas em experimentos de laboratório e em observações de campo. Com o fechamento turbulento de 2ª ordem, o modelo reproduz de maneira mais realística as camadas de Ekman, de superfície e de fundo.

Além dos aspectos específicos acima mencionados, o modelo adota soluções largamente utilizadas na literatura, como gradeamento do tipo *C* de Arakawa e métodos de integração diferentes na horizontal e na vertical – integração horizontal e temporal explícita e vertical implícita. Por meio desses procedimentos, elimina-se a restrição temporal na vertical, permitindo o uso de maior resolução nas camadas de Ekman de superfície e de fundo.

O modelo apresenta uma superfície livre e dois intervalos de tempo distintos, um para o modo de oscilação externo e outro para o interno. O modo externo (barotrópico) usa um intervalo de tempo menor, baseado na condição de estabilidade computacional de Courant-Friedrichs-Levy (CFL). O modo interno (baroclínico) usa um intervalo de tempo mais longo (*splitting mode*).

### **II.1.1 Equações Básicas do POM**

O modelo hidrodinâmico aqui descrito é baseado em uma formulação tridimensional prognóstica com aproximação hidrostática. As variáveis potencialmente prognósticas são: as componentes da velocidade ( $u$ ,  $v$  e  $w$ ), a temperatura ( $T$ ), a salinidade ( $S$ ), a energia cinética turbulenta ( $q^2/2$ ), a escala turbulenta ( $l$ ), e a elevação da superfície ( $\eta$ ).

O conjunto de equações básicas utilizadas no código é descrito abaixo. Consideremos um sistema de coordenadas cartesianas ortogonais, com  $x$

crescendo para Leste,  $y$  para Norte e  $z$  para cima, no qual as coordenadas horizontais (i.e.  $x, y$ ) referem-se ao espaço computacional. A superfície livre está localizada em  $z = \eta(x, y, t)$  e o fundo em  $z = -H(x, y)$ . Neste sistema as equações de conservação e a equação de estado são escritas como:

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.1.1-1})$$

Equação de Reynolds para conservação da quantidade de movimento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} - fV = & -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( 2A_M \frac{\partial U}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[ A_M \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (\text{II.1.1-2})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} + fU = & -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial V}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_M \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2A_M \frac{\partial V}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (\text{II.1.1-3})$$

$$\rho g = -\frac{\partial P}{\partial z} \quad (\text{II.1.1-4})$$

Conservação de Temperatura Potencial:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + U \frac{\partial \Theta}{\partial x} + V \frac{\partial \Theta}{\partial y} + W \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_H \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right) + F(\Theta) \quad (\text{II.1.1-5})$$

Conservação de Salinidade:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial S}{\partial x} + V \frac{\partial S}{\partial y} + W \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S \quad (\text{II.1.1-6})$$

Equação de Estado:

$$\rho = \rho(S, \Theta, P) \quad (\text{II.1.1-7})$$

Equação da Energia Cinética Turbulenta:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q^2}{\partial t} + U \frac{\partial q^2}{\partial x} + V \frac{\partial q^2}{\partial y} + W \frac{\partial q^2}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \right) + 2K_M \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] \\ + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{2q^3}{B_1 l} + F_{q^2} \end{aligned} \quad (\text{II.1.1-8})$$

Equação da Turbulência em Macro Escala:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (q^2 l) + U \frac{\partial}{\partial x} (q^2 l) + V \frac{\partial}{\partial y} (q^2 l) + W \frac{\partial}{\partial z} (2q^2 l) = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_q \frac{\partial}{\partial z} (q^2 l) \right] \\ + l E_1 K_M \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{l E_1 g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{q^3}{B_1} \tilde{W} + F_{q^2 l} \end{aligned} \quad (\text{II.1.1-9})$$

sendo,

$$F_{q^2, q^2 l} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_H \frac{\partial q^2, q^2 l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_H \frac{\partial q^2, q^2 l}{\partial y} \right) \quad (\text{II.1.1-10})$$

$$(L)^{-1} \equiv (\eta - z)^{-1} + (H + z)^{-1} \quad (\text{II.1.1-11})$$

$$\tilde{W} \equiv 1 + E_2 \left( \frac{l}{kL} \right)^2 \quad (\text{II.1.1-12})$$

onde

$U, V, W$  = componentes do vetor velocidade (m/s);

$F$  = parâmetro de Coriolis ( $s^{-1}$ );

$\rho_0$  = densidade de referência ( $kg/m^3$ );

$\rho$  = densidade *in situ* ( $kg/m^3$ );

$P$  = pressão ( $N/m^2$ );

$K_M$  = coeficiente cinemático vertical de viscosidade turbulenta ( $m^2/s$ );

$K_H$  = coeficiente cinemático vertical de difusão turbulenta de calor e sal ( $m^2/s$ );

$g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$\Theta$  = temperatura potencial ( $^{\circ}C$ );

$S$  = salinidade (PSU);

$A_M$  = coeficiente cinemático horizontal de viscosidade turbulenta ( $m^2/s$ );

$A_H$  = coeficiente cinemático horizontal de difusão turbulenta de calor e sal ( $m^2/s$ );

$q^2/2$  = energia cinética turbulenta;

$L$  = escala característica de comprimento para o movimento turbulento;

$\tilde{W}$  = função proximidade-do-contorno;

$K$  = constante de von Karman ( $k=0,4$ );

$F_{q^2, q^2l}$  = termos horizontais de mistura para  $q^2$  e  $q^2l$ .

## II.1.2 Condições de Contorno Adotadas

As condições de contorno naturais do modelo são dadas pela velocidade normal nula nos contornos terrestres. Em áreas com aporte fluvial significativo para a escala do domínio, os valores de vazão, temperatura e salinidade dos rios são diretamente especificados nos contornos.

Na superfície livre, além das condições dinâmicas locais (Mellor & Yamada, 1982), é também considerada a tensão de cisalhamento do vento. Opcionalmente, fluxos de calor e sal (evaporação) podem ser incluídos. No fundo, são aplicadas as condições dinâmicas descritas em Mellor & Yamada (op. cit.). A velocidade de arrasto é calculada como uma função empírica da energia cinética turbulenta, por sua vez decorrente do fechamento turbulento de segunda ordem.

Nos contornos artificiais são aplicadas, ao modelo, condições de contorno para a definição do comportamento das propriedades modeladas nos limites oceânicos do domínio estudado. Essas condições de contorno são definidas para elevação da superfície do mar, velocidades do modo externo (2D), velocidades do modo interno (3D), temperatura, salinidade, velocidade vertical e energia cinética turbulenta.

Nas componentes perpendiculares à fronteira são aplicadas condições radiacionais em função da elevação, do tipo  $H\bar{U} \pm C_e \eta = BC^2$ , onde  $C_e = \sqrt{gH}$  é a velocidade de fase da onda que chega ao sistema,  $\eta$  é a elevação do nível do mar e  $B$ , um coeficiente, empírico. Nos casos da temperatura e da salinidade, disponibiliza-se esquema que permita advecção através da fronteira, condição esta descrita por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \text{ (condição análoga aplicada à salinidade)} \quad (\text{II.1.2-1})$$

## **II.2 DESCRIÇÃO DO MODELO PARALLEL OCEAN CIRCULATION MODEL**

O modelo hidrodinâmico utilizado para fornecer o campo de correntes ao largo do talude foi o *Parallel Ocean Circulation Model* (POCM), desenvolvido pelo Office of Naval Research dos Estados Unidos. Este modelo utiliza como forçantes fluxos de calor e ventos gerados pelo ECMWF.

O modelo POCM é considerado pela comunidade oceanográfica do WOCE<sup>1</sup> o mais sofisticado para descrever a circulação oceânica, sendo capaz de reproduzir os fluxos da CB que afetam diretamente a Bacia de Campos. A tabela II.2-1 apresenta um resumo dos dados de entrada utilizados pelo modelo POCM.

O modelo POCM apresenta uma resolução global média de 0,25º e já foi utilizado em vários artigos publicados, como em Tokmakian & Challenor (1999).

**Tabela II.2-1 - Resumo dos dados de entrada do Parallel Ocean Climate Model (POCM).**

DADOS DE ENTRADA	DESCRIÇÃO
Fluxos de Calor	Dados de reanálise do ECMWF.
Ventos	Dados de reanálise do ECMWF.
Temperatura e Salinidade da água	Interpolados da Climatologia LEVITUS <sup>2</sup> , e depois simulado por um período de 33 anos para ajuste dos campos termohalinos.

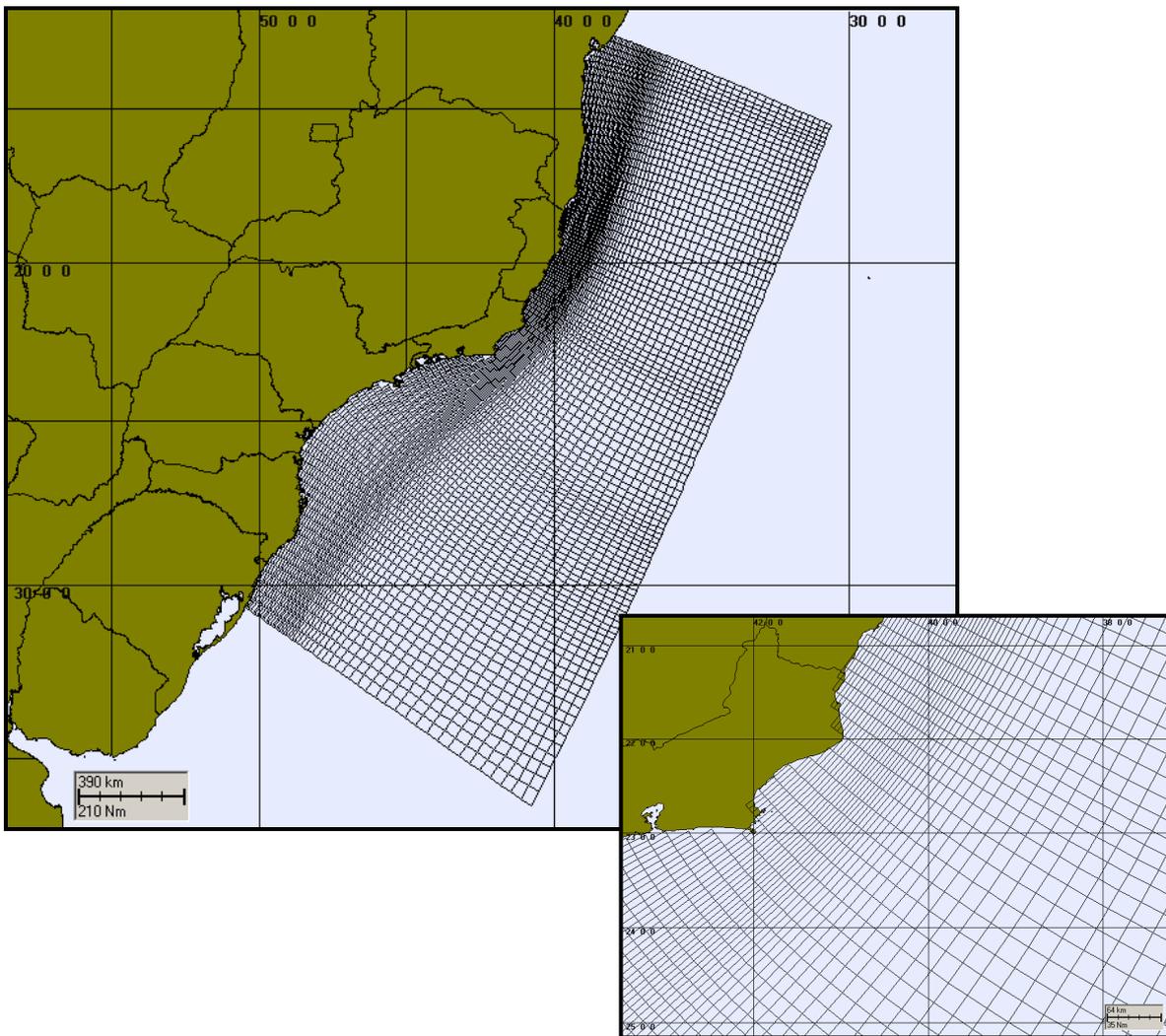
## II.3 DOMÍNIO MODELADO E DADOS DE ENTRADA DO MODELO

### II.3.1 Discretização do Domínio e Batimetria

A grade final gerada para a região da Bacia de Campos possui dimensão horizontal máxima de 70x100 pontos, com resolução média de aproximadamente 3.000 m (figura II.3.1-1). A grade geral implementada representou um compromisso entre os objetivos do projeto, a capacidade computacional para o período de execução do modelo e a descrição dos processos hidrodinâmicos relevantes para a região de interesse (forçantes de maré e ventos sobre a plataforma continental, e Corrente do Brasil no talude continental).

<sup>1</sup> World Ocean Circulation Experiment.

<sup>2</sup> <http://ingrid.ldgo.columbia.edu/SOURCES/.LEVITUS94>.



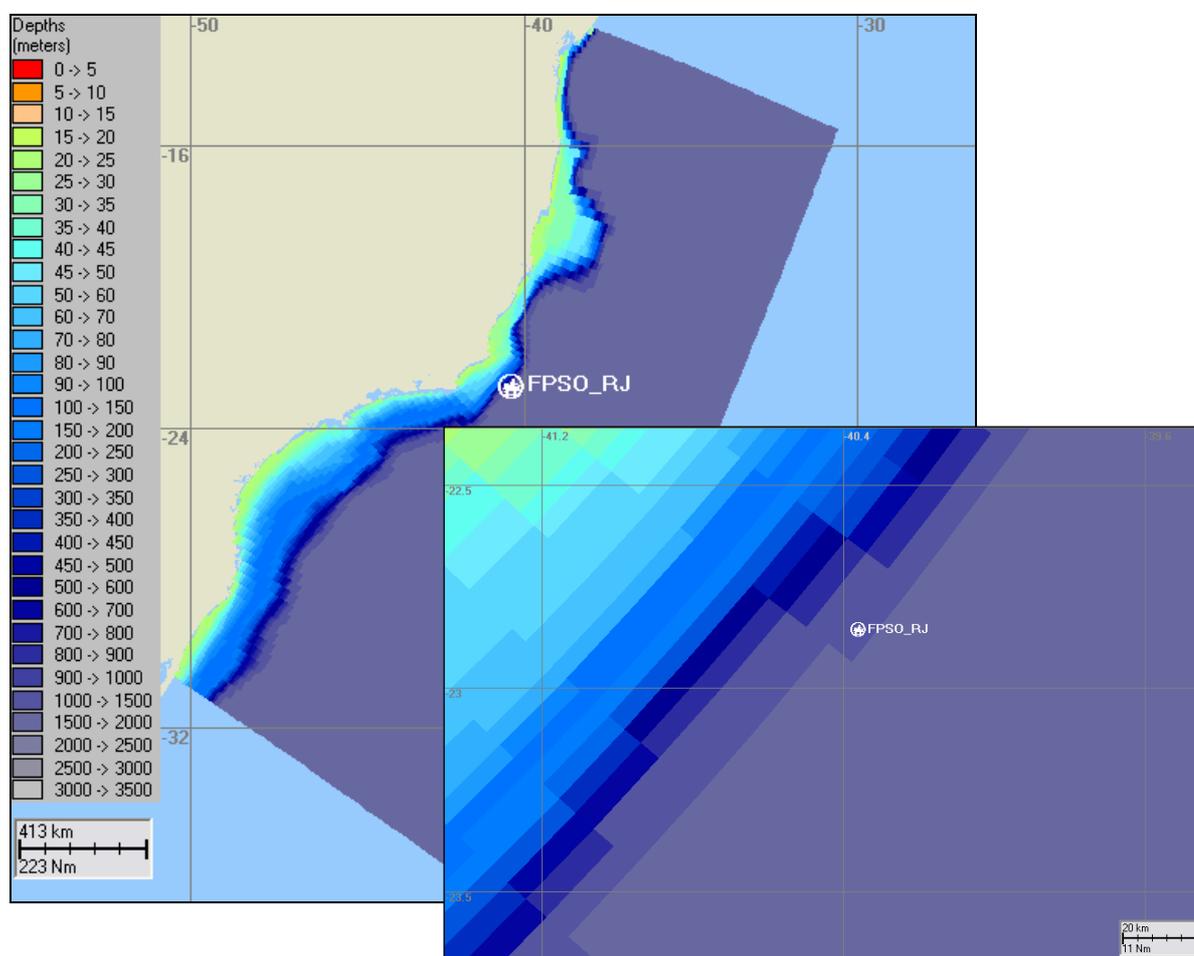
**Figura II.3.1-1** - Grade computacional utilizada nas simulações da circulação hidrodinâmica da Bacia de Campos.

Os dados de profundidade projetados no modelo hidrodinâmico e subsequentemente inseridos no modelo de óleo são provenientes de bases de dados da **ASA**, obtidas nesta região através da digitalização de cartas náuticas da DHN<sup>3</sup>. Para a região da plataforma continental, os pontos digitalizados foram extraídos das cartas náuticas da DHN números 70, 1.100, 1.131, 1.400, 1.420, 1.700, 1.800, 1.820 e 1.824. Para a representação topográfica da região do talude

<sup>3</sup> Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha.

e planície abissal foi também utilizada a base de dados do ETOPO 2, do NGDC/NOAA<sup>4</sup>, reamostrada para um espaçamento de 10'.

Em relação a discretização da batimetria no domínio modelado, agregam-se às características dinâmicas e morfológicas locais, questões relacionadas à ausência e/ou baixa qualidade de dados batimétricos/altimétricos da região. Em regiões não hidrografadas ou com baixa qualidade/resolução nos dados foram usados recursos como o georreferenciamento de fotos de satélite, relatos de navegantes, entre outros, para complementar os níveis requeridos à base de dados da **ASA SOUTH AMERICA** na região, visando o ajuste fino da batimetria à linha de costa (figura II.3.1-2).



**Figura II.3.1-2 - Batimetria discretizada do domínio considerado na Bacia de Campos.**

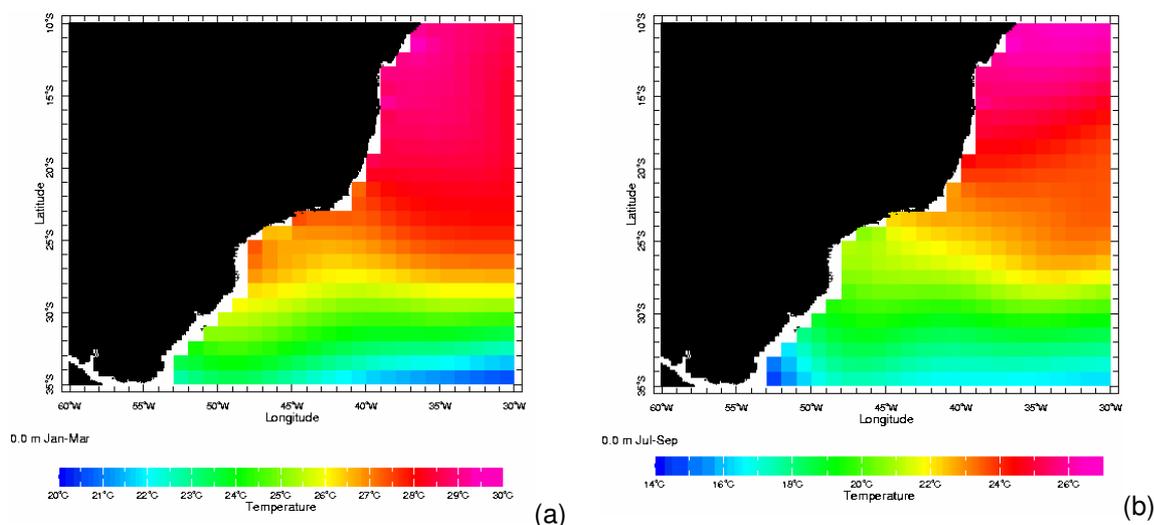
<sup>4</sup> National Geophysical Data Center da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

### II.3.2 Dados de Vento e Maré

A modelagem hidrodinâmica utilizou dados de vento provenientes de reanálises do NCEP para o ano de 1992, interpolados na grade. O campo de elevação do nível do mar foi incorporado ao modelo hidrodinâmico, utilizando-se como forçante nos contornos os dados do modelo global de maré do CSR<sup>5</sup>.

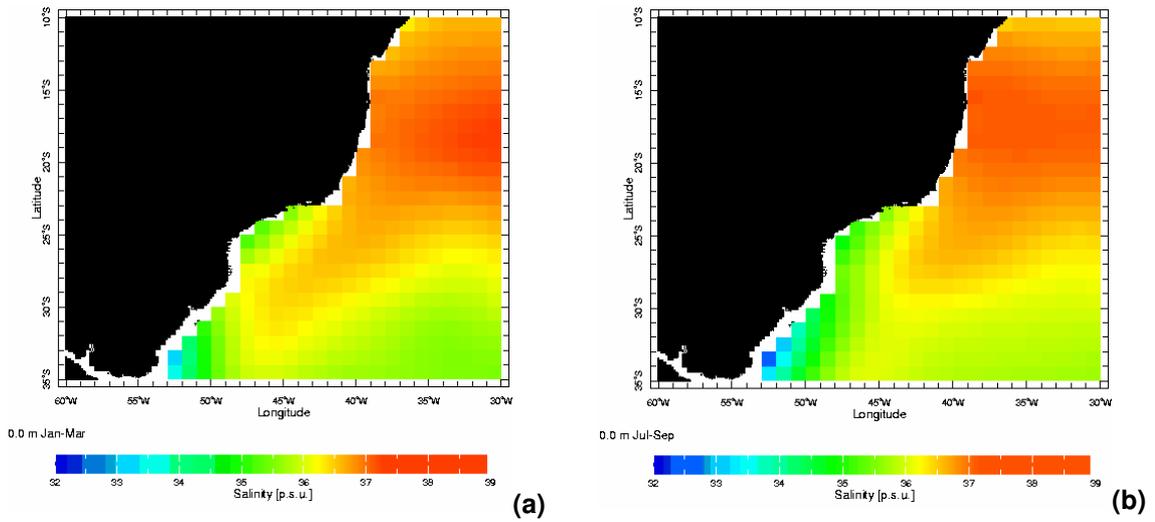
### II.3.3 Estrutura Termohalina

Os campos de temperatura e salinidade usados para inicialização do campo baroclínico do POCM foram obtidos através da Climatologia LEVITUS. As figuras II.3.3-1 e II.3.3-2 ilustram estes dados para a superfície, nos períodos de verão e inverno.



**Figura II.3.3-1** - Campos termohalinos da Climatologia LEVITUS: (a) temperatura no verão; (b) temperatura no inverno.

<sup>5</sup> Center for Space Research da Universidade do Texas.



**Figura II.3.3-2 - Campos termohalinos da Climatologia LEVITUS: (a) salinidade no verão e (b) salinidade no inverno.**



### III CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

A metodologia de calibração fundamenta-se essencialmente na avaliação do modelo quanto à sua capacidade de reprodução da circulação observada em conjuntos de dados disponíveis para a região de interesse.

Para comparação com os resultados do modelo, a PETROBRAS autorizou a utilização de dados de correntes pertencentes ao seu banco de dados. Estes dados foram coletados na Bacia de Campos, nas coordenadas 22°43'0,12"S e 41°16'0,12"W, e abrangem o período de 12 de julho a 2 de setembro de 1992.

Para a calibração do nível do mar foi utilizada uma série obtida através de reconstituição harmônica, a partir de constantes fornecidas pela FEMAR6 para a região do Cabo de São Tomé, nas coordenadas 22°07'42"S e 41°03'12"W.

Foi adotada a seguinte metodologia para calibração: (1) como no sinal de corrente a energia contida na baixa frequência corresponde a 83,6% da energia da corrente total, optou-se por inicialmente verificar o ajuste do modelo para a baixa frequência; (2) a seguir verificou-se o erro percentual para a corrente residual média (comparação entre as médias) e, finalmente, (3) verificou-se o ajuste do modelo para a alta frequência associada aos períodos de maré.

Por baixa frequência entendemos os sinais com período acima de 25 horas, incluindo assim a influência de sistemas frontais, e por alta os sinais com período entre 11 horas e 13 horas, sendo influenciado principalmente pela componente de maré.

O coeficiente de ajuste para as séries foi baseado em Hess & Bosley (1992), cuja formulação é comumente utilizada na literatura científica para a comparação de duas séries com periodicidades relativamente definidas. O coeficiente é definido pela normalização do erro quadrático médio:

$$\frac{RMS}{A} \quad (III-1)$$

<sup>6</sup> Fundação de Estudos do Mar.

onde

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

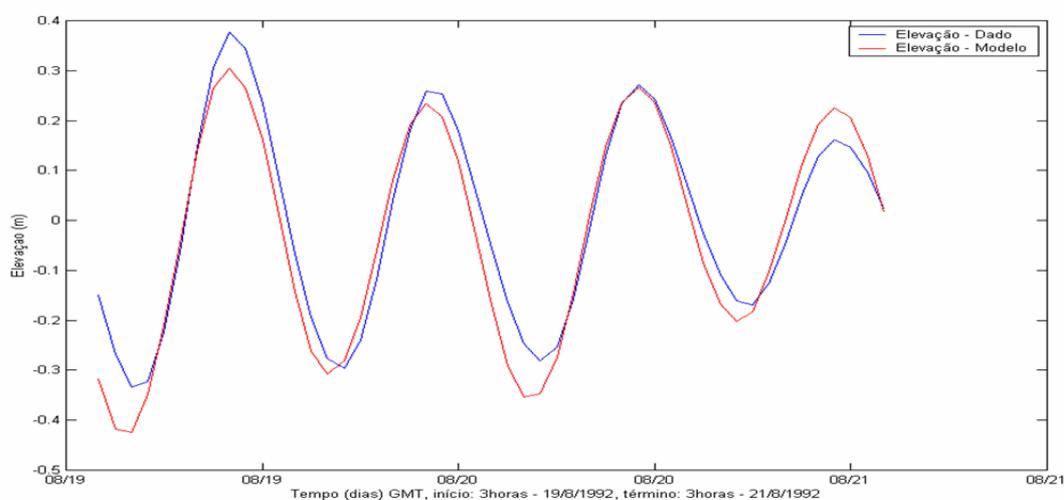
$\bar{A}$  = range médio do dado;

$P$  = previsão;

$O$  = observação.

### III.1 CALIBRAÇÃO PARA O NÍVEL DO MAR

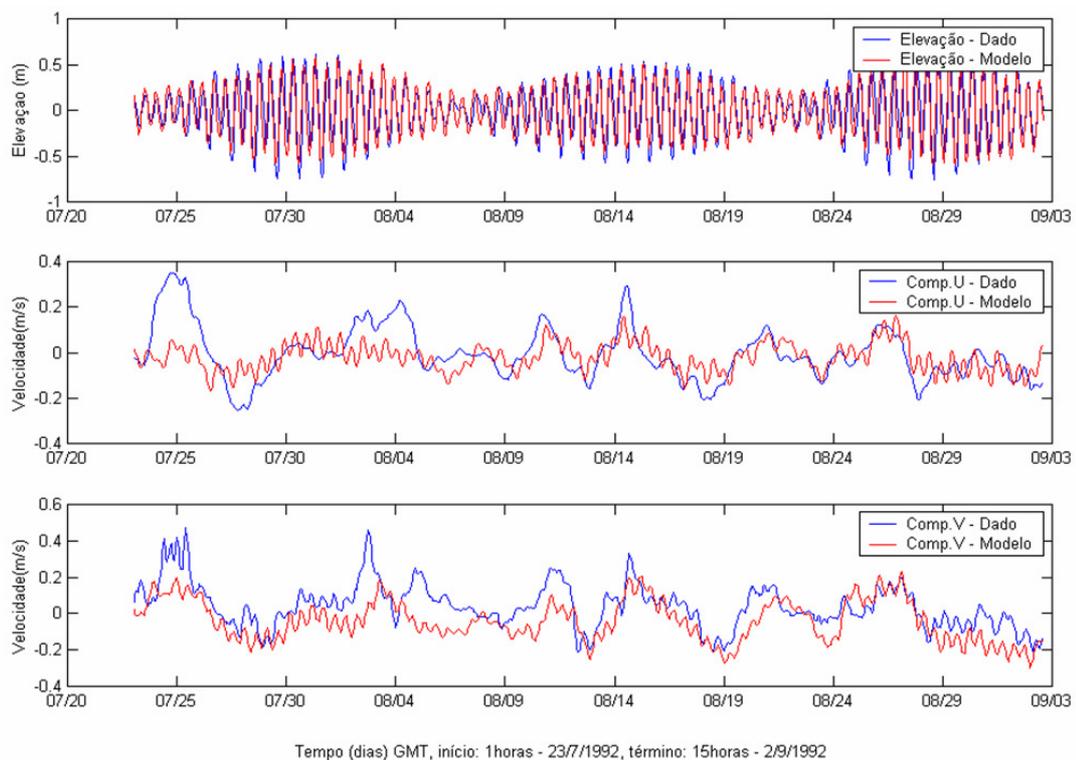
Para a calibração do nível do mar, foi realizada uma previsão a partir da tabela de constantes harmônicas da FEMAR para o Cabo de São Tomé. O coeficiente de ajuste obtido para o período de 19 a 21 de agosto de 1992 (figura III.1-1) foi de 13,70%, segundo a equação (III-1).



**Figura III.1-1** - Série temporal de maré (azul) e a elevação calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 19 e 21 de agosto de 1992.

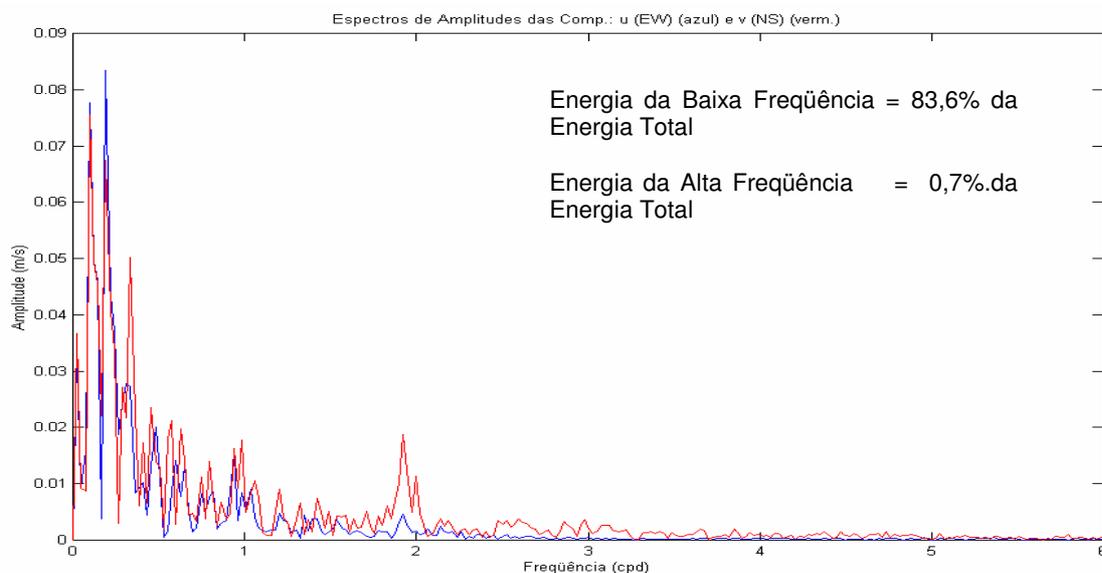
### III.2 CALIBRAÇÃO PARA AS CORRENTES

Estão reproduzidas, na figura III.2-1, as séries temporais dos dados versus os resultados do modelo. São apresentados os campos de corrente (componentes  $u$  (E-W) e  $v$  (N-S)) e, também, a comparação dos resultados de elevação do modelo e a recomposição harmônica da maré.



**Figura III.2-1** - Séries temporais da elevação FEMAR (azul) e das componentes  $u$  (E-W) e  $v$  (N-S) dos dados PETROBRAS (azul) e as reproduzidas pelo modelo (vermelho).

Especificamente no ponto de medição (PC), o sinal da corrente de baixa frequência, associada à passagem de sistemas frontais, contém 83,6% da energia total do sinal. Sinais de alta frequência (maré semidiurna) são menos intensos em águas profundas, como pode ser observado na figura III.2-2.

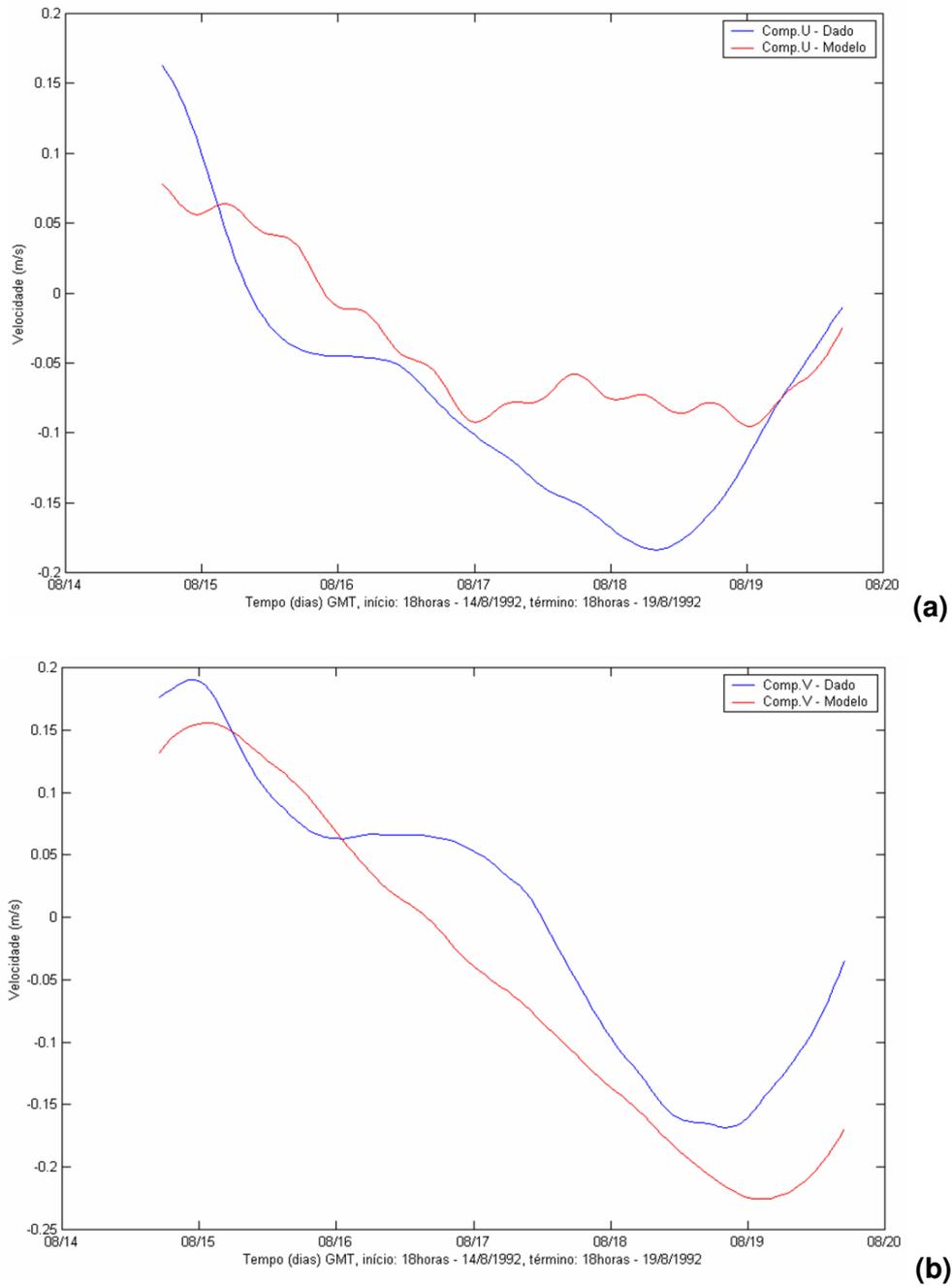


**Figura III.2-2** - Espectros de amplitude das componentes  $u$  (E-W) (azul) e  $v$  (N-S) (vermelho) dos dados de corrente da PETROBRAS.

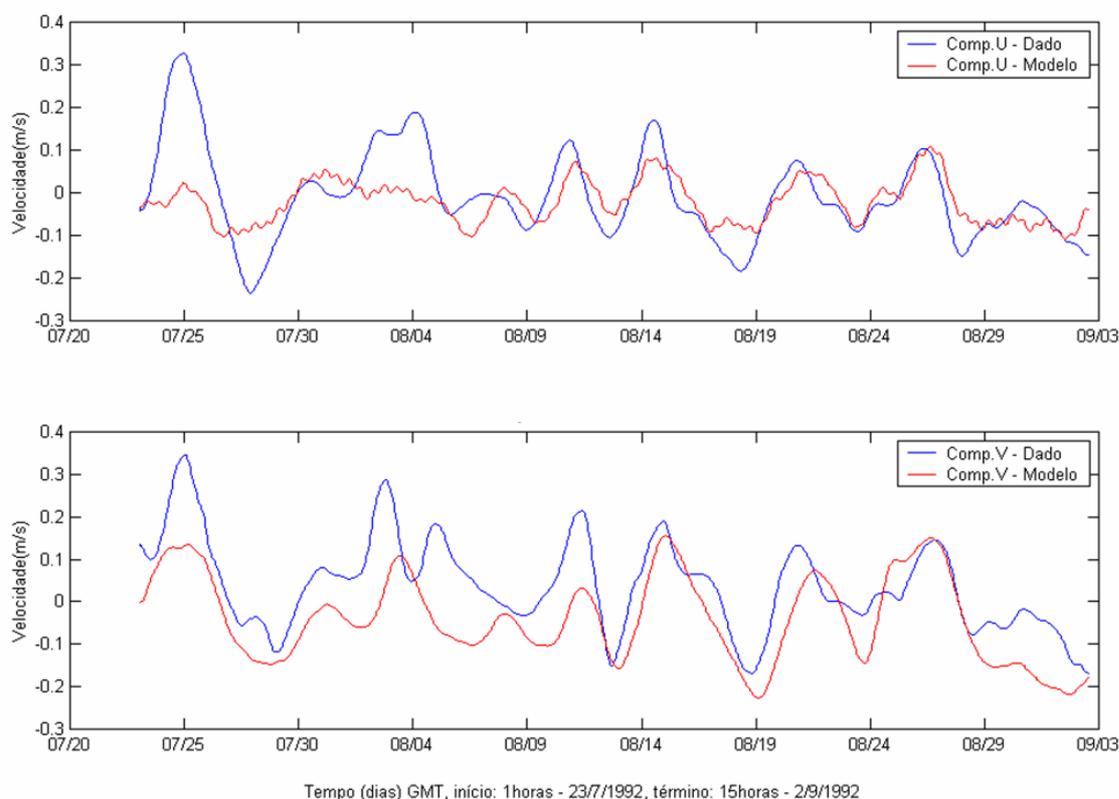
Deste modo, priorizou-se o ajuste do modelo na baixa frequência. Os coeficientes de ajuste (equação III-1) foram de 28,47% para a componente  $u$  e 16,91% para a componente  $v$ , considerando o período de 5 dias compreendido entre 14 e 19 de agosto de 1992 às 18 horas (figura III.2-3).

Na calibração do modelo para a corrente residual média considerou-se a diferença entre a corrente residual média do modelo e dos dados (para o período que se dispunha de dados), e calculou-se o erro percentual relativo à corrente média residual dos dados. Os ajustes obtidos foram de 1,46% para a componente zonal e 7,67% para a meridional. Tal resultado encontra-se ilustrado na figura III.2-3.

Embora com baixa energia relativa neste ponto, observa-se presença significativa do sinal da maré nos dados fornecidos. Para validar o modelo também nessa frequência, foram isolados os sinais de alta frequência (marés) dos dados e do modelo. A comparação para um período de 48 horas, compreendido entre 19 e 21 de agosto de 1992 às 3 horas, forneceu um coeficiente de ajuste de 24,18% para a componente zonal e 18,47% para a componente meridional, conforme a equação (III-1).



**Figura III.2-3 - Séries temporais do sinal de baixa frequência das componentes  $u$  (E-W) e  $v$  (N-S) dos dados de corrente da PETROBRAS (azul) e as calculadas pelo modelo (vermelho), entre os dias 14 e 19 de agosto de 1992.**



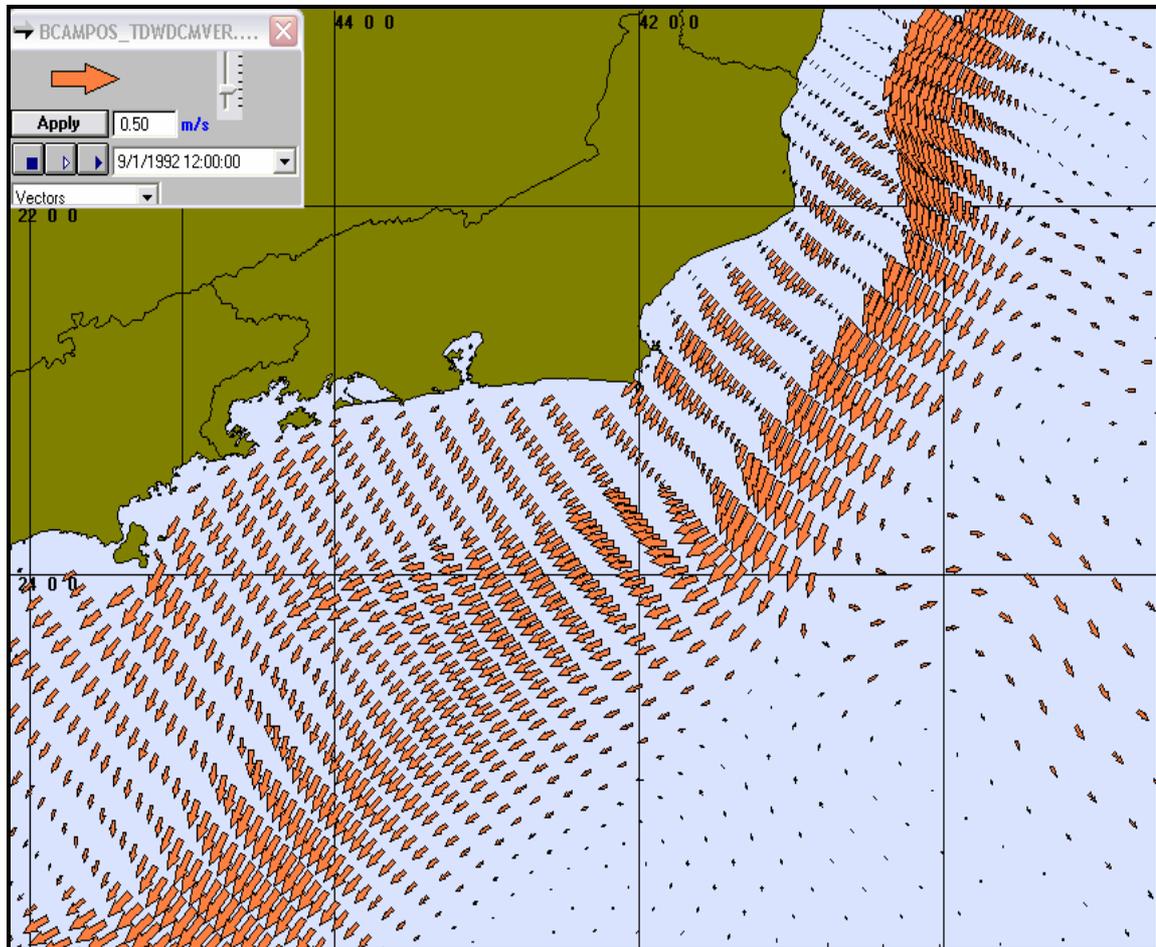
**Figura III.2-4** - Séries temporais do sinal de baixa freqüência das componentes  $u$  (E-W) e  $v$  (N-S) dos dados PETROBRAS (azul) e calculada pelo modelo (vermelho), entre os dias 22 de julho e 2 de setembro de 1992, utilizados na calibração da corrente média residual.

### III.3 RESUMO DA BASE HIDRODINÂMICA UTILIZADA

Os resultados obtidos através da simulação numérica na Bacia de Campos encontram-se resumidamente representados na figura III.3-1, que apresenta um instantâneo da corrente de superfície no período considerado para as simulações com o modelo de óleo.

Estes resultados consideram as principais forçantes locais e remotas que apresentam influência significativa nos padrões de circulação observados sobre a plataforma continental e em oceano profundo.

Eles são resumidos basicamente pelas forçantes de bordas artificiais – maré e campos médios de velocidade (efeito remoto) – e sobre o domínio completo, *i.e.* vento (superfície), campo termohalino (na coluna d'água).



**Figura III.3-1** - Exemplo ilustrativo de campo de velocidades obtidos com o modelo hidrodinâmico no ano de 1992.



## IV MODELAGEM DE DERRAME DE ÓLEO

Na modelagem do derrame de óleo foi utilizado o modelo OILMAP, desenvolvido pela **ASA**. Este modelo é uma ferramenta utilizada para o acompanhamento e previsão do deslocamento e transformações químicas (*trajectory and fates*) de qualquer tipo de óleo derramado em acidentes com petróleo.

O OILMAP é um sistema de modelos, que pode ser utilizado em Planos de Contingência (Lima *et al.*, 2003, ASA 2003a,b,c), Planos de Emergência com acompanhamento em tempo real (Pereira *et al.*, 2005), Planos de Emergência Individuais (ASA, 2003d, 2004), Relatório de Controle Ambiental (ASA, 2005a) e Estudos de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) no Brasil (ASA, 2005b) e em qualquer região do mundo (Jayko & Howlett, 1992; Spaulding *et al.*, 1992a,b).

### IV.1 MODELO OILMAP

O OILMAP foi projetado em uma configuração modular de forma que diferentes tipos de modelos, bem como um conjunto de ferramentas sofisticadas de dados ambientais, podem ser acoplados dependendo do problema e da situação em estudo. Através de sua interface gráfica, o OILMAP permite ao usuário a especificação dos cenários; animação das trajetórias, correntes e vento; importar e exportar dados ambientais; a definição da grade computacional para qualquer área dentro do domínio; gerar correntes médias ou de maré; incluir ou editar as características dos óleos registrados no banco de dados; apresentar dados contidos em objetos georreferenciados (GIS); e determinar o impacto ambiental em recursos naturais. As funções do GIS permitem ao usuário a entrada, manipulação e exibição de objetos na tela através de pontos, linhas, e polígonos georreferenciados ao domínio definido pelo cenário. A cada objeto podem ser atribuídos dados em formato de texto, valores numéricos ou arquivos a partir de *links* externos.

O sistema OILMAP inclui os seguintes modelos: um modelo de deriva e intemperismo (*trajectory and fates*) para óleo de superfície e subsuperfície, um modelo de resposta a derramamento de óleo, modelo probabilístico, e um modelo receptor que através do método inverso localiza a origem do derramamento a partir de informações da posição da mancha.

Para elaboração de cenários de deriva para acidentes com petróleo deve ser definido um conjunto de duas grades computacionais, sobrepostas ao mapa digital da área de estudo. Uma das grades, compreendendo apenas a região de água, define o campo de circulação, podendo neste caso ser baseada em resultados de um modelo hidrodinâmico implementado na região de estudo. A outra grade (*land-water*) define quais as células ou blocos correspondem à área de terra e quais à área de água, com a interface definida pela linha de costa. A linha de costa é representada por uma série de blocos que limita a extensão em que a mancha de óleo pode se movimentar em uma determinada direção, dependendo do tipo de costa (e.g. manguezais, costões rochosos, praias, etc.).

O modelo de deriva de óleo prevê o transporte e intemperismo do óleo a partir de derrames instantâneos e contínuos. As estimativas demonstram a localização e concentração do óleo de superfície *versus* o tempo. O modelo estima a variação temporal da cobertura de área, espessura da mancha e viscosidade do óleo. O modelo também estima o balanço da massa de óleo ou a quantidade de óleo sobre a superfície do mar, na coluna de água, evaporado, na costa, e fora da área de estudo *versus* o tempo. Os processos de transformações biogeoquímicas no modelo incluem dispersão, evaporação, entranhamento ou arrastamento, dispersão natural ou por suspensão e emulsificação. Em versão opcional, o OILMAP pode também calcular as interações do óleo com a camada de sedimentos e, no balanço de massa, a sedimentação associada a este processo.

A advecção e a dispersão são os processos físicos associados ao deslocamento e espalhamento do óleo, resultantes da ação combinada do vento, das ondas, da maré e dos fluxos induzidos por gradiente de densidade. O processo de advecção é modelado usando uma formulação lagrangiana e o processo de dispersão é modelado usando uma formulação do tipo *random walk*. A dispersão e

o espalhamento da mancha são representados no modelo pela formulação espesso-fino de Mackay *et al.* (1980a, 1982), utilizando-se a abordagem de mancha espessa dos mesmos autores.

O processo de evaporação baseia-se na formulação analítica parametrizada em termos de exposição à evaporação (Mackay *et al.*, 1980b, 1982). O modelo de Exposição à Evaporação (Stiver & Mackay, 1984) é uma aproximação analítica para a previsão do volume evaporado. O modelo utiliza informações da curva de destilação para estimar os parâmetros necessários à equação analítica.

Os processos de entranhamento e arrastamento são modelados utilizando-se a formulação de Delvigne & Sweeney (1988) que, explicitamente, representa índices de injeção de óleo para dentro da coluna d'água por gotículas de óleo. O coeficiente de entranhamento ou arrastamento, como uma função da viscosidade do óleo, baseia-se em Delvigne & Hulsen (1994).

O processo de emulsificação do óleo, em função de perdas de evaporação e alterações na porcentagem de água na mistura, baseia-se em Mackay *et al.* (1980a, 1982) e depende da composição do óleo e do estado do mar. O método de emulsificação de Mackay *et al.* (1982) é implementado pelo usuário através dos valores dos parâmetros de entrada do coeficiente de viscosidade do *mousse* e uma taxa de emulsificação que podem ser usados para diminuir a taxa em que a emulsificação está prevista para ocorrer.

A interação do óleo com o litoral e a linha de costa é modelada com base em uma versão simplificada de Reed *et al.* (1989), que formula o problema em termos de uma capacidade de retenção dependendo do tipo da costa e de um índice de remoção exponencial.

Utilizando-se o OILMAP em modo probabilístico, é possível considerar a variabilidade das forçantes ambientais. As simulações de derrame são realizadas através da variação aleatória do início do mesmo dentro do período para o qual se dispõe de dados meteorológicos e oceanográficos. Tanto os ventos quanto as correntes, ou ambos, podem variar estocasticamente. As múltiplas trajetórias são, então, utilizadas para a produção de curvas de contorno, demonstrando a probabilidade da presença de óleo em cada ponto da grade computacional (área

de estudo). As probabilidades de presença de óleo e tempo de deslocamento da mancha podem ser correlacionadas a recursos naturais armazenados no banco de dados (GIS), de forma a auxiliar na avaliação de impactos ambientais em termos da probabilidade da presença de óleo em recursos importantes.

## IV.2 FORMULAÇÃO DO MODELO

O sistema OILMAP inclui um modelo de trajetória e intemperismo (*trajectory and fates*) para óleo de superfície que prevê o transporte e a degradação do óleo a partir de derrames instantâneos e contínuos.

No OILMAP, a mancha de óleo é considerada como um conjunto de partículas lagrangianas contendo, cada uma delas, massa conhecida. O vetor posição ( $\overset{p}{X}_t$ ) de uma dada partícula, num determinado instante  $t$ , é definido como:

$$\overset{p}{X}_t = \overset{p}{X}_{t-\Delta t} + \Delta t \overset{p}{U}_{oil} \quad (\text{IV.1.1-1})$$

onde

$\Delta t$  = passo de tempo (s);

$\overset{p}{X}_{t-\Delta t}$  = posição em  $t - \Delta t$ ;

$\overset{p}{U}_{oil}$  = velocidade da mancha (m/s).

A velocidade advectiva da partícula,  $\overset{p}{U}_{oil}$  (m/s), é definida por:

$$\overset{p}{U}_{oil} = \overset{p}{U}_w + \overset{p}{U}_t + \overset{p}{U}_r + \alpha \overset{p}{U}_e + \beta \overset{p}{U}_p \quad (\text{IV.1.1-2})$$

onde

$\overset{p}{U}_w$  = componente da velocidade devido ao vento e às ondas (m/s);

$\overset{p}{U}_t$  = componente da velocidade devido às correntes de maré (m/s);

$\overset{p}{U}_r$  = componente da velocidade devido ao fluxo residual (m/s);

$\dot{U}_e$  = componente da velocidade devido ao fluxo de Ekman (m/s);

$\dot{U}_p$  = componente da velocidade devido ao *blowout* (m/s);

$\alpha$  = 0 para derrame de superfície, 1 para sub-superfície;

$\beta$  = 0 para derrame sem *blowout*, 1 para *blowout*.

A componente da velocidade advectiva devida às correntes de maré,  $\dot{U}_t^p$ , e ao fluxo residual,  $\bar{U}_r$ , são provenientes do modelo hidrodinâmico. A velocidade de deriva devida ao vento,  $u_{wc}$  e  $v_{wc}$  (m/s), componentes Leste-Oeste e Norte-Sul, respectivamente, são:

$$u_{wc} = C_1 u_w \quad (\text{IV.1.1-3})$$

$$v_{wc} = C_1 v_w \quad (\text{IV.1.1-4})$$

onde

$u_w$  = componente Leste-Oeste da velocidade do vento (m/s);

$v_w$  = componente Norte-Sul da velocidade do vento (m/s);

$C_1$  = fator de deriva (%).

O fator de deriva,  $C_1$ , é constante (Lange & Hühnerfuss, 1978), podendo variar entre 1,0 e 4,5%, baseado em observações. Valores de 3 a 3,5% são mais freqüentemente utilizados para ventos moderados em áreas de mar aberto. Valores menores são mais utilizados em zonas costeiras protegidas, como estuários e baías. O valor *default* no modelo é 3,5%. Se as correntes de superfície, fornecidas pelo modelo hidrodinâmico (ou dados observacionais), já são forçadas pelo vento, então o fator de deriva deve ser reduzido.

O ângulo de deriva é no sentido anti-horário da direção do vento (Hemisfério Sul). Assim, a velocidade de deriva devida ao vento,  $u_{wd}$  e  $v_{wd}$  (m/s), componentes Leste-Oeste e Norte-Sul, respectivamente, são:

$$u_{wd} = u_{wc} \cos \theta + v_{wc} \operatorname{sen} \theta \quad (\text{IV.1.1-5})$$

$$v_{wd} = u_{wc} \operatorname{sen} \theta + v_{wc} \cos \theta \quad (\text{IV.1.1-6})$$

onde

$u_{wd}$  = componente Leste-Oeste da velocidade devida à deriva do vento (m/s);

$v_{wd}$  = componente Norte-Sul da velocidade devida à deriva do vento (m/s);

$\theta$  = ângulo de deriva ( $^\circ$ ) constante ( $\theta = C_c$ ). O valor *default* é zero.

Utilizando a formulação *random walk* para a dispersão horizontal, é possível simular os processos dispersivos que ocorrem numa escala de movimento inferior à escala de resolução do campo de corrente fornecido pelos dados e ou modelo hidrodinâmico (Okubo, 1971; Okubo & Ozmidov, 1970). As componentes da velocidade de dispersão da mancha,  $u_{dd}$  e  $v_{dd}$ , (m/s), são definidas (Bear & Verruijt, 1987) por:

$$u_{dd} = \gamma \sqrt{\frac{6D_x}{\Delta t}} \quad (\text{IV.1.1-7})$$

$$v_{dd} = \gamma \sqrt{\frac{6D_y}{\Delta t}} \quad (\text{IV.1.1-8})$$

onde

$D_x$  = coeficiente de dispersão horizontal na direção Leste-Oeste ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$D_y$  = coeficiente de dispersão horizontal na direção Norte-Sul ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

$\Delta t$  = passo de tempo (s);

$\gamma$  = número aleatório entre (-1) e (1).

Os coeficientes de dispersão horizontal nas direções Leste-Oeste ( $D_x$ ) e Norte-Sul ( $D_y$ ) são, geralmente, iguais.

O processo de espalhamento da mancha é representado pela formulação espesso-fino de Mackay *et al.* (1980a,b, 1982), utilizando-se a abordagem de

mancha espessa. O OILMAP modela apenas a mancha espessa que contém mais de 90% da massa associada a mancha. A taxa de mudança da área superficial para o espalhamento da mancha espessa (Mackay *et al.*, 1980a),  $\tilde{A}_{tk}$  (m<sup>2</sup>/s), é definido por:

$$\tilde{A}_{tk} = \frac{dA_{tk}}{dt} = K_1 A_{tk}^{1/3} \left( \frac{V_m}{A_{tk}} \right)^{4/3} \quad (\text{IV.1.1-9})$$

onde

$A_{tk}$  = área superficial da mancha (m<sup>2</sup>);

$K_1$  = taxa de espalhamento constante (s<sup>-1</sup>);

$V_m$  = volume da superfície da mancha (m<sup>3</sup>);

$t$  = tempo (s).

A análise de sensibilidade deste algoritmo demonstrou que a solução é sensível ao número de partículas utilizadas. Com o objetivo de minimizar esta dependência, Kolluru (1992) derivou uma formulação, normalizando a solução para diferentes números de partículas superficiais.

A taxa de mudança da área superficial de uma única partícula (m<sup>2</sup>/s), é dada por:

$$\tilde{A}_{tk} = \frac{dA_{tk}}{dt} = K_1 A_{tk}^{1/3} \left( \frac{V_m}{A_{tk}} \right)^{4/3} \left( \frac{R_s}{R_e} \right)^{4/3} \quad (\text{IV.1.1-10})$$

onde

$A_{tk}$  = área superficial de uma partícula (m<sup>2</sup>);

$K_1$  = taxa de espalhamento constante (s<sup>-1</sup>);

$V_m$  = volume de óleo de uma partícula (m<sup>3</sup>);

$R_s$  = raio de uma partícula (m);

$R_e$  = raio efetivo da superfície da mancha (m).

O raio efetivo da superfície da mancha  $R_e$  (m), (Kolluru, 1992) é dado por:

$$R_e \left[ \left( \frac{1}{\pi} \right) \sum_{n=1}^N A_{tk} \right]^{1/2} \quad (\text{IV.1.1-11})$$

onde

$A_{tk}$  = área superficial de uma partícula ( $\text{m}^2$ );

$N$  = número de partículas usadas para representar a superfície da mancha.

O processo de evaporação baseia-se na formulação analítica parametrizada em termos de exposição à evaporação (Mackay *et al.*, 1980b, 1982).

O modelo de Exposição à Evaporação (Stiver & Mackay, 1984) é uma aproximação analítica para a previsão do volume evaporado. O modelo utiliza informações da curva de destilação do óleo (curva PEV) para estimar os parâmetros necessários a esta equação analítica. A fração evaporada,  $F_v$ , é definida por:

$$F_v = \frac{\ln[1 + B(T_G/T)\theta \exp(A - BT_0/T)]}{[T/BT_G]} \quad (\text{IV.1.1-12})$$

onde

$T_0$  = ponto de ebulição inicial (K);

$T_G$  = gradiente da curva de destilação modificada;

$T$  = temperatura do ambiente (K);

$A, B$  = constantes adimensionais;

$\theta$  = exposição à evaporação.

A exposição à evaporação,  $\theta$ , é definida por:

$$\theta = \left( \frac{K_m A_t}{V_0} \right) \quad (\text{IV.1.1-13})$$

onde

$K_m$  = coeficiente de transferência de massa (m/s);

$A$  = área da mancha (m<sup>2</sup>);

$t$  = tempo (s);

$V_0$  = volume do derrame de óleo (m<sup>3</sup>).

Dados da curva de destilação ( $T_0$ ,  $T_G$ ,  $A$ ,  $B$ ), para óleo cru, podem ser obtidos no Environment Canada's Oil Catalog (Whiticar *et al.*, 1992), ou através dos seguintes procedimentos:

1.  $T_0$  (ponto de ebulição inicial) e  $T_G$  (gradiente) são obtidos plotando-se a temperatura de ebulição ( $T_B$ ) com a fração do volume destilado ( $F_v$ ) para um determinado tipo de óleo, como se segue:

$$T_B = T_0 + T_G F_v \quad (\text{IV.1.1-14})$$

2.  $A$  (ponto de intersecção com o eixo y) e  $B$  (declividade) são obtidos plotando-se o logaritmo natural da constante da Lei de Henry,  $H$ , com a temperatura de ebulição ( $T_B$ ). A constante da Lei de Henry,  $H$ , é definida como a razão da concentração do óleo na fase de vapor com a fase líquida. É uma constante adimensional obtida através de experimentos em laboratórios e definida por:

$$H = PV / RT \quad (\text{IV.1.1-15})$$

onde

$P$  = pressão do vapor do óleo (atm);

$V$  = volume do óleo ( $m^3$ );

$R$  = constante universal dos gases;

$T$  = temperatura ambiente (K).

$H$  é comumente fornecido em unidades de atm -  $m^3/mol$ , devendo ser dividido por  $RT$  para adimensionalizá-lo. A relação entre  $H$  e  $T_B$  é:

$$\ln H = A - B \left( \frac{T_B}{T} \right) \quad (IV.1.1-16)$$

Os valores de  $A$  e  $B$  são fornecidos no banco de dados do OILMAP e variam de 1 a 20 e de 7 a 18, respectivamente.

Os processos de entranhamento e arrastamento são modelados utilizando-se a formulação de Delvigne & Sweeney (1988) que, explicitamente, representa índices de injeção de óleo para dentro da coluna de água por gotículas de óleo. O coeficiente de entranhamento ou arrastamento, como uma função da viscosidade do óleo, baseia-se em Delvigne & Hulsen (1994).

Delvigne & Sweeney (1988) desenvolveram uma relação para a taxa de entranhamento do óleo como uma função do tamanho da partícula de óleo,  $Q_d$  ( $kg/m^2s$ ), expressa como:

$$Q_d = C * D_d^{0,57} S F d^{0,7} \Delta d \quad (IV.1.1-17)$$

onde

$C^*$  = constante empírica de entranhamento que depende do tipo de óleo e do estado do tempo;

$D_d$  = energia dissipada da arrebentação da onda por unidade de área superficial ( $J/m^2$ );

$S$  = fração da superfície do mar coberta pelo óleo;

- $F$  = fração da superfície do mar atingida pela arrebentação das ondas;  
 $d$  = diâmetro da partícula de óleo (m);  
 $\Delta d$  = intervalo de diâmetro da partícula de óleo (m).

A constante de entranhamento,  $C^*$ , foi ajustada aos dados relatados em Delvigne & Hulsen (1994) como:

$$C^* = \exp(a \ln(\mu / \rho) + b) \quad (\text{IV.1.1-18})$$

onde

$\mu$  = viscosidade do óleo (cP);

$\rho$  = densidade do óleo (g/cm<sup>3</sup>);

$a = -0,1023$ ,  $b = 07,572$  para  $(\mu / \rho) < 132$  cSt;

$a = -1,8927$ ,  $b = 16,313$  para  $(\mu / \rho) > 132$  cSt.

O diâmetro médio da partícula,  $d_{50}$  ( $\mu\text{m}$ ), é definido por:

$$d_{50} = 1818(E)^{-0,5} \left( \frac{\mu}{\rho_0} \right)^{0,34} \quad (\text{IV.1.1-19})$$

onde

$E$  = taxa de dissipação da energia da onda por unidade de volume (J/m<sup>3</sup>s), com  $10^3$  a  $10^4$  para ondas em zona de arrebentação, 1 a 10 para camada superficial,  $10^{-1}$  a 1 para estuários e  $10^{-4}$  a  $10^{-2}$  para oceano profundo;

$\mu$  = viscosidade do óleo (cP);

$\rho$  = densidade do óleo (g/cm<sup>3</sup>).

O processo de entranhamento é muito sensível aos valores mínimo ( $d_{\min}$ ) e máximo ( $d_{\max}$ ) do diâmetro da partícula ( $\mu\text{m}$ ), sendo:

$$d_{\min} = 0,1d_{50} \quad (\text{IV.1.1-20})$$

$$d_{\max} = 2,0d_{50} \quad (\text{IV.1.1-21})$$

A energia dissipada da onda,  $D_d$  ( $\text{J}/\text{m}^2$ ), é:

$$D_d = 3,4 \times 10^{-3} \rho_w g H^2 \quad (\text{IV.1.1-22})$$

onde

$\rho_w$  = densidade da água ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m}/\text{s}^2$ );

$H$  = raiz quadrada média da altura da arrebentação da onda (m).

A fração da superfície marinha impactada pela arrebentação das ondas por unidade de tempo,  $F$ , é:

$$F = 0,032(U_w - U_t)/T_w \quad (\text{IV.1.1-23})$$

onde

$U_w$  = velocidade do vento 10 m acima da superfície do mar ( $\text{m}/\text{s}$ );

$U_t$  = valor limite do vento para a quebra da onda ( $\sim 5 \text{ m}/\text{s}$ );

$T_w$  = período de onda significativo (s).

O total da massa que sofre entranhamento na coluna d'água,  $M_e$  (kg), é:

$$M_e = Adt \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} Q_d dd \quad (\text{IV.1.1-24})$$

onde

$A$  = área superficial da mancha ( $m^2$ );

$dt$  = passo de tempo (s);

$Q_d$  = taxa de entranhamento ( $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ ).

A profundidade de intrusão,  $z_m$  (m), é:

$$z_m = 1,5H_b \quad (IV.1.1-25)$$

onde

$H_b$  = altura da quebra da onda (m).

A velocidade de ascensão para cada tamanho de gotícula,  $W_i$  (m/s), é:

$$W_i = d_i^2 g (1 - \rho_0 / \rho_w) / 18\nu_w \quad (IV.1.1-26)$$

onde

$d_i$  = diâmetro da gotícula (m);

$g$  = constante gravitacional ( $m/s^2$ );

$\rho_0$  = densidade do óleo ( $kg/m^3$ );

$\rho_w$  = densidade da água ( $kg/m^3$ );

$\nu_w$  = viscosidade da água ( $m^2/s$ ).

Esta relação usa a Lei de Stokes e é válida para baixos valores de números de Reynolds ( $R_e < 20$ ).

A profundidade de mistura para cada tamanho de partícula,  $Z_i$  (m), é:

$$Z_i = \max\left(\frac{D_v}{W_i}, Z_m\right) \quad (IV.1.1-27)$$

onde

$D_v$  = coeficiente de dispersão vertical ( $m^2/s$ ).

O coeficiente de dispersão vertical,  $D_v$  ( $m^2/s$ ), é definido como:

$$D_v = 0,0015W_{10} \quad (\text{IV.1.1-28})$$

onde

$W_{10}$  = velocidade do vento a 10 m de altura (m/s).

A fração da massa que volta à superfície para cada tamanho de partícula,  $R_i$ , é dada por:

$$R_i = \frac{W_i dt}{Z_i} \quad (\text{IV.1.1-29})$$

onde

$dt$  = passo de tempo (s).

O processo de emulsificação do óleo, em função de perdas de evaporação e alterações na porcentagem de água na mistura, baseia-se em Mackay *et al.* (1980a, 1982) e depende da composição do óleo e do estado do mar.

O método de emulsificação de Mackay *et al.* (1982) é implementado pelo usuário através dos valores dos parâmetros de entrada do coeficiente de viscosidade do *mousse* e uma taxa de emulsificação, que podem ser usados para diminuir a taxa em que a emulsificação está prevista para ocorrer.

O aumento exponencial do algoritmo da formação do *mousse* é apresentado em Mackay *et al.* (1980a, 1982). A taxa de água que é incorporada ao óleo,  $\tilde{F}_{wc}$  ( $s^{-1}$ ), é dada por:

$$\tilde{F}_{wc} = \frac{dF_{wc}}{dt} = C_1 U_w^2 \left( 1 - \frac{F_{wc}}{C_2} \right) \quad (\text{IV.1.1-30})$$

onde

$U_w$  = velocidade do vento (m/s);

$C_1$  = constante empírica ( $2 \times 10^{-6}$  para o óleo emulsificado; 0 para outros);

$C_2$  = constante que controla a quantidade máxima de água (0,7 para óleo combustível pesado e óleo cru);

$F_{wc}$  = fração máxima de água no óleo (valor de entrada para caracterização do óleo) ( $s^{-1}$ ).

A viscosidade do óleo emulsificado,  $\mu$  (cP), é dada por:

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{2,5F_{wc}}{1 - C_0 F_{wc}}\right) \quad (\text{IV.1.1-31})$$

onde

$\mu_0$  = viscosidade inicial do óleo (cP);

$F_{wc}$  = fração máxima de água no óleo;

$C_0$  = constante de emulsificação ( $\sim 0,65$ ).

O efeito da evaporação na viscosidade,  $\mu$  (cP), é dada por:

$$\mu = \mu_0 \exp(C_4 F_v) \quad (\text{IV.1.1-32})$$

onde

$\mu_0$  = viscosidade inicial do óleo (cP);

$C_4$  = constante (1 para óleo leve e 10 para óleo pesado);

$F_v$  = fração evaporada da superfície da mancha.

A interação do óleo com o litoral e linha de costa é modelada com base em uma versão simplificada de Reed *et al.* (1989), que formula o problema em termos de uma capacidade de retenção dependendo do tipo da costa e de um índice de remoção exponencial. Estes processos foram parametrizados no OILMAP da seguinte forma:

- A grade que representa a linha de costa do OILMAP (grade *land-water*) pode conter diferentes informações sobre as capacidades de retenção de óleo para cada elemento de grade. A deposição ocorre quando uma partícula de óleo cruza a linha de costa e termina quando a capacidade de absorção da superfície especificada é atingida. As partículas de óleo que posteriormente atingem um elemento de grade costeira já saturada não permanecem na superfície da costa;
- O óleo depositado na linha de costa é exponencialmente removido com o tempo, retornando à coluna d'água numa maré enchente suficientemente alta para umedecer a superfície com o óleo, aliada a ação do vento;
- A fração de massa disponível para deposição na linha de costa,  $F_{sh}$ , é:

$$F_{sh} = \frac{A_{lg}}{A_s} \quad (\text{IV.1.1-33})$$

onde

$A_{lg}$  = área de um elemento de grade;

$A_s$  = área de uma partícula na superfície.

- A massa é depositada na grade costeira apenas se o total de massa acumulada é menor do que a capacidade de absorção de determinado elemento de grade. Esta capacidade de absorção para um determinado tipo de costa  $i$ ,  $M_{h,i}$  (kg), é:

$$M_{h,i} = \rho_0 t_i W_i L_{gi} \quad (\text{IV.1.1-34})$$

onde

$i$  = parâmetro do tipo de costa;

$\rho_0$  = densidade do óleo depositado ( $\text{kg/m}^3$ );

$t_i$  = espessura máxima do óleo que pode ser depositada na costa (varia de acordo com o tipo de costa e viscosidade do óleo);

$W_i$  = largura do elemento de grade atingido pelo óleo;

$L_{gi}$  = comprimento do elemento de grade atingido pelo óleo.

- A massa de óleo restante na costa em qualquer instante,  $M_R$  (kg), é

$$M_R = M_0 (1 - \exp[-t/T]) \quad (\text{IV.1.1-35})$$

onde

$M_0$  = massa inicial do óleo depositado na costa (kg);

$t$  = tempo (dias);

$T$  = tempo de remoção dependente do tipo de costa (dias).

### **IV.3 DADOS DE ENTRADA**

Os conjuntos de dados de entrada e parâmetros do modelo que definem um cenário são:

- ✓ localização geográfica do ponto de derrame;
- ✓ data e horário;
- ✓ duração do derrame;
- ✓ volume derramado;
- ✓ tipo de óleo;
- ✓ duração da simulação;
- ✓ opções de resposta (*e.g.*, barreiras, sobrevôo, dispersantes);
- ✓ campo de correntes;
- ✓ arquivo de dados meteorológicos;
- ✓ opções de saída;
- ✓ parâmetros de simulação:
  - número de partículas,
  - fator de vento,
  - coeficiente de dispersão horizontal,
  - passo de tempo do modelo,
  - passo de tempo do arquivo de saída.

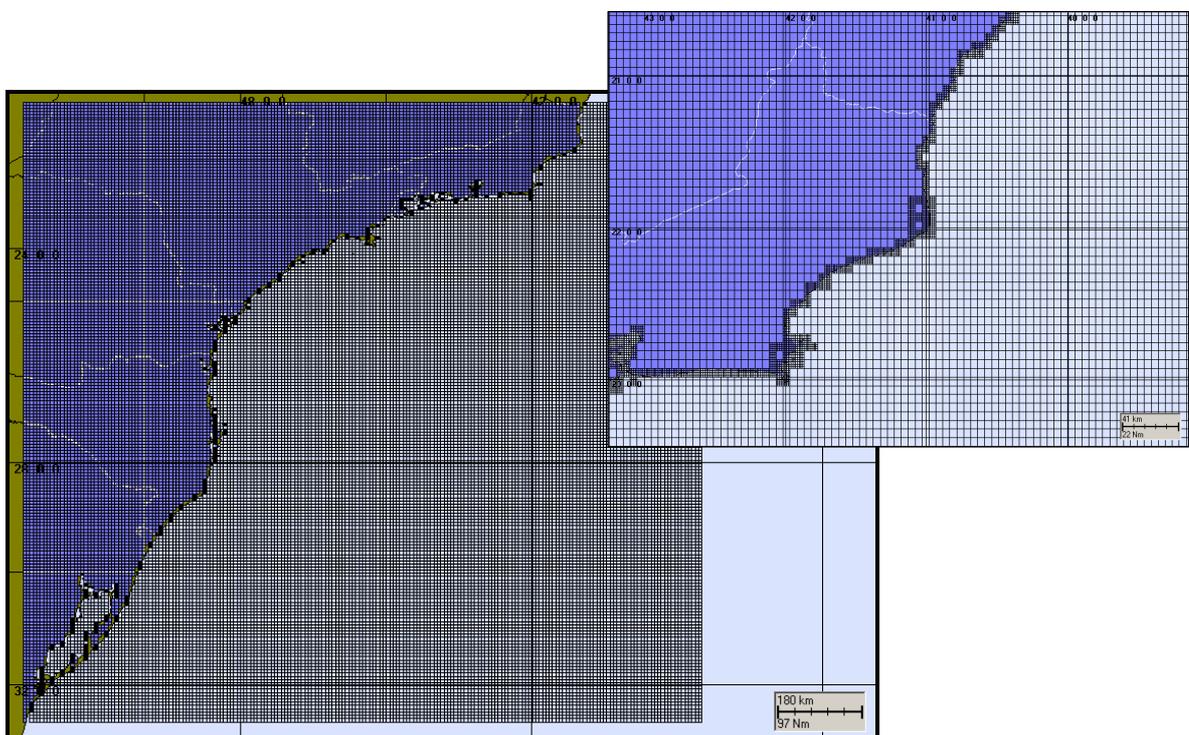
Os resultados de cada simulação correspondem, então, a um único cenário, definido pelo arquivo de entrada de dados e parâmetros do modelo.

## V MODELAGEM DE DERIVA DE ÓLEO PARA UM POTENCIAL ACIDENTE NO CAMPO DE ESPADARTE, FPSO-RIO DE JANEIRO

As simulações de deriva de óleo a partir do FPSO-RIO DE JANEIRO utilizaram a base hidrodinâmica descrita no Capítulo II e a grade *land-water* descrita a seguir. A PETROBRAS definiu o óleo, aqui denominado tipo Espadarte-II, como o óleo que ocorre na região.

### V.1 DADOS DE ENTRADA

Para a elaboração dos cenários de deriva para acidentes com petróleo no FPSO-RIO DE JANEIRO, Bacia de Campos, foi definida uma grade *land-water* com dimensões de 250x250 pontos (figura V.1-1).



**Figura V.1-1** - Grade definindo os contornos de terra (grade *land-water*) para a modelagem de deriva de óleo na Bacia de Campos.

### **V.1.1 Campo de Correntes**

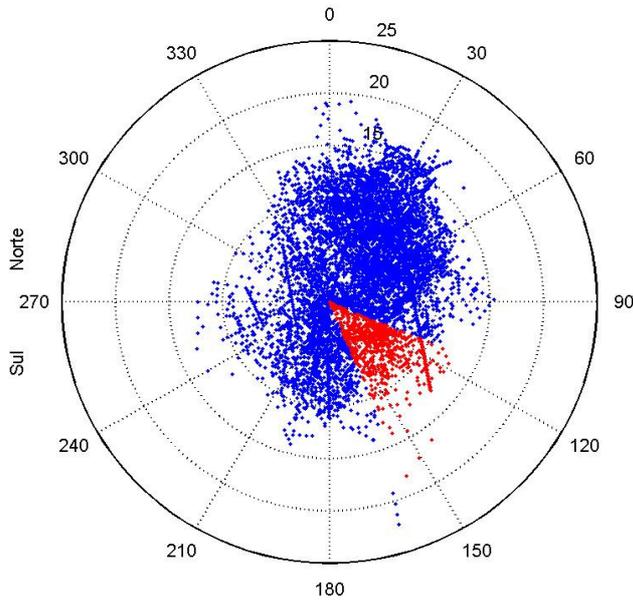
Os campos de correntes utilizados na modelagem do transporte e dispersão de óleo foram gerados a partir da modelagem hidrodinâmica, como descrito no Capítulo II. Para avaliar a sazonalidade das forçantes ambientais nos padrões de circulação e transporte, foram definidos dois campos hidrodinâmicos de 3 meses: para verão (janeiro a março) e inverno (junho a agosto).

### **V.1.2 Dados de Vento**

Para a modelagem de deriva de óleo, foram utilizados dados de vento medidos por uma bóia oceanográfica localizada no campo de Albacora (Bacia de Campos). Esses dados foram fornecidos pelo Centro de Pesquisas da PETROBRAS (CENPES), para o ano de 1992, com intervalo de amostragem de 3 horas. A figura V.1.2-1 apresenta o diagrama de dispersão para a série temporal fornecida, onde foi adotada a convenção meteorológica, isto é, a direção do vento corresponde à direção de onde este vem.

A tabela V.1.2-1 apresenta a distribuição de ocorrência conjunta de intensidades e direções do vento para os dados fornecidos. Observa-se que os ventos mais frequentes são de NE (17,4%) e NNE (16,9%). Os ventos com velocidades médias máximas (9,8 m/s) vieram de NNE; e os ventos mais fortes registrados foram provenientes de SSE (22,3 m/s) e N (19,3 m/s). Do total de registros dos ventos, 90% têm intensidades iguais ou inferiores a 14,0 m/s, como indicam os percentis apresentados na tabela.

Diagrama de dispersão dos vetores de vento (m/s) (convenção meteorológica)



Percentual de ventos neste setor (%): 11.0096

**Figura V.1.2-1 - Diagrama de dispersão do vento para o ano de 1992, na Bacia de Campos.**

**Tabela V.1.2-1 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento para o ano de 1992, na Bacia de Campos.**

Ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do Vento.  
Obs.: a direção é medida em graus e para o sentido utiliza-se a convenção meteorológica que é de onde o vento vem .

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total	%	Dir.méd.
0.0- 1.0	9	13	7	9	11	15	21	13	14	17	10	8	8	10	9	3	177	2.0	156
1.0- 2.0	10	24	15	18	20	25	8	7	20	29	17	19	15	13	10	12	262	3.0	153
2.0- 3.0	18	17	15	24	28	39	24	18	28	45	26	15	16	11	17	27	368	4.2	147
3.0- 4.0	24	27	39	55	66	36	43	90	73	42	16	18	10	12	20	28	599	6.8	126
4.0- 5.0	27	49	113	91	46	53	78	65	47	49	19	25	9	12	19	30	732	8.4	95
5.0- 6.0	30	45	105	129	49	107	108	53	64	40	24	13	6	4	26	20	823	9.4	97
6.0- 7.0	75	113	102	154	87	76	54	61	48	43	22	17	10	2	14	28	906	10.3	74
7.0- 8.0	61	124	123	154	104	28	43	44	51	32	27	12	15	6	10	24	858	9.8	65
8.0- 9.0	93	210	382	225	52	38	38	33	47	59	13	19	6	3	10	36	1264	14.4	51
9.0-10.0	105	135	146	142	26	49	19	17	46	17	2	7	11	2	4	28	756	8.6	48
10.0-11.0	94	150	167	90	17	25	11	5	30	14	0	4	6	0	0	30	643	7.3	38
11.0-12.0	85	149	100	66	11	6	17	11	7	6	1	0	2	0	0	14	475	5.4	36
12.0-13.0	57	147	78	26	11	5	12	7	5	3	0	2	2	0	0	11	366	4.2	32
13.0-14.0	26	101	60	15	12	0	0	5	0	4	0	2	0	0	0	9	234	2.7	32
14.0-15.0	14	83	34	2	6	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	141	1.6	30
15.0-16.0	7	65	21	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	94	1.1	26
16.0-17.0	2	17	8	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	0.3	29
17.0-18.0	3	8	7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0.2	28
18.0-19.0	4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0.1	9
19.0-20.0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.0	21
20.0-21.0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0	162
21.0-22.0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0	163
22.0-23.0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0	163
Total	746	1477	1522	1200	547	502	477	436	480	401	177	161	116	75	139	300	8756		
Porc.	8.5	16.9	17.4	13.7	6.2	5.7	5.4	5.0	5.5	4.6	2.0	1.8	1.3	0.9	1.6	3.4			
Vel.méd.	9.0	9.8	8.6	7.5	6.4	5.9	5.9	5.9	6.0	5.6	4.8	5.2	5.3	3.6	4.6	6.9			
Vel.máx.	19.3	18.0	17.6	14.8	15.3	12.6	16.3	22.3	13.0	14.1	11.4	13.1	12.4	9.9	9.7	13.8			
Percts (0,9)	12.0	14.0	12.0	10.0	10.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	7.0	8.0	9.0	7.0	7.6	11.0			

### V.1.3 Ponto de Risco e Volumes

As coordenadas do FPSO-RIO DE JANEIRO foram especificadas pela PETROBRAS conforme a tabela V.1.3-1.

**Tabela V.1.3-1** - Coordenadas (SAD 69) do ponto de risco que representa o FPSO-RIO DE JANEIRO, localizado no campo de Espadarte, Bacia de Campos.

UNIDADE	LATITUDE	LONGITUDE	LÂMINA D'ÁGUA (m)
FPSO-RIO DE JANEIRO	22°51'26,9"S	40°21'37,1"W	1.370

Fonte: Petrobras.

Os volumes utilizados nas simulações foram definidos segundo a Resolução CONAMA nº 293/01:

- Pequeno: 8 m<sup>3</sup>
- Médio: 200 m<sup>3</sup>
- Pior caso: 304.475,49 m<sup>3</sup>

Tendo como objetivo identificar o cenário acidental que proporcionaria a vazão de “pior caso” para as simulações, foram realizadas avaliações quanto a perda de controle dos poços produtores, sendo a maior vazão encontrada no poço P3-H. A vazão estimada para o poço em questão é de 565 m<sup>3</sup>/d, resultando em um volume total de 16.950 m<sup>3</sup> após 30 dias de blowout. Devido ao fato de que todo o vazamento seria no fundo do mar, o inventário da plataforma não seria comprometido pela perda de controle do poço.

Considerando que deve ser simulada a hipótese acidental de “pior caso” com relação a volume de vazamento e que a análise de risco indica a possibilidade de afundamento da unidade por outras causas, que não a perda de controle do poço; considerando que o afundamento da unidade poderia levar a perda de seu inventário, equivalente a 304.475,5 m<sup>3</sup>, valor este muito superior ao volume de

blowout de 30 dias, adotou-se como “pior caso” nas simulações o volume resultante de afundamento da unidade FPSO-RIO DE JANEIRO.

Nas simulações de “pior caso”, o derrame de todo o volume foi considerado ao longo de 24 horas.

Nas simulações realizadas com os volumes pequeno ( $8 \text{ m}^3$ ) e médio ( $200 \text{ m}^3$ ), considerou-se o vazamento de todo o volume de óleo instantaneamente, ou seja, no instante inicial da simulação.

### V.1.4 Características do Produto Utilizado

Com base nas informações disponíveis para a área em estudo foram realizadas simulações com o óleo tipo Espadarte-II (tabela V.1.4-1).

**Tabela V.1.4-1** - Tipo de óleo utilizado nas simulações.

NOME	GRAU API
Espadarte II	19

Fonte: Petrobras.

As características definidas para o óleo cru tipo Espadarte-II, utilizado nas simulações, são apresentadas na tabela V.1.4-2.

**Tabela V.1.4-2** - Características do óleo tipo ESPADARTE-II.

Parâmetro	Valor
Nome do óleo	ESPADARTE-II
Densidade	$0,940 \text{ g/cm}^3$
Viscosidade dinâmica a $25^\circ\text{C}$	974,9 cP
Tensão interfacial	20,0 din/cm
Conteúdo máximo de água	1%
Ponto de ebulição inicial	450,0 K
Gradiente da curva de evaporação	680,0
Constante de evaporação A	8,8
Constante de evaporação B	12,6

---

## **V.2 RESUMO DOS CENÁRIOS SIMULADOS PARA O FPSO-RIO DE JANEIRO**

As simulações probabilísticas foram realizadas através da variação aleatória do momento de início do derrame dentro do período para o qual se dispunha de dados de vento (1<sup>o</sup> de janeiro a 31 de dezembro de 1992), divididas em dois períodos correspondendo ao verão (janeiro a março) e ao inverno (junho a agosto).

Para que se pudesse incorporar a variabilidade das forçantes meteorológicas e oceanográficas, foi realizada com o modelo OILMAP uma série de 300 simulações em cada cenário probabilístico.

A tabela V.2-1 apresenta os cenários simulados neste estudo para o FPSO-RIO DE JANEIRO. O critério de parada adotado nas simulações de “pior caso” foi o período de 30 dias. Para as simulações que consideraram os volumes de 8 e 200 m<sup>3</sup> foi considerado como critério de parada o instante que a mancha atinge a concentração calculada de 20 mg/l. No caso das simulações com o volume de 8 m<sup>3</sup>, foi observado que a mancha atinge 20 mg/l em menos de 1 hora e para o volume de 200 m<sup>3</sup> foi observado que a mancha atinge 20 mg/l em menos de 6 horas.

**Tabela V.2-1 - Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derrames do óleo para o FPSO-RIO DE JANEIRO.**

CENÁRIOS	PRODUTO (PETRÓLEO)	VOLUME (m <sup>3</sup> )	ESTAÇÃO DO ANO	TEMPO
FPSO-RJ_INV_8_20MGL	ESPADARTE-II	8	Inverno	1 hora
FPSO-RJ_INV_200_6HORAS	ESPADARTE-II	200	Inverno	6 horas
FPSO-RJ_INV_PIORCASO_6HORAS	ESPADARTE-II	304.475,5	Inverno	6 horas
FPSO-RJ_INV_PIORCASO_9HORAS	ESPADARTE-II	304.475,5	Inverno	9 horas
FPSO-RJ_INV_PIORCASO_12HORAS	ESPADARTE-II	304.475,5	Inverno	12 horas
FPSO-RJ_INV_PIORCASO_36HORAS	ESPADARTE-II	304.475,5	Inverno	36 horas
FPSO-RJ_INV_PIORCASO_60HORAS	ESPADARTE-II	304.475,5	Inverno	60 horas
FPSO-RJ_INV_PIORCASO_30DIAS	ESPADARTE-II	304.475,5	Inverno	30 dias
FPSO-RJ_VER_8_20MGL	ESPADARTE-II	8	Verão	1 hora
FPSO-RJ_VER_200_6HORAS	ESPADARTE-II	200	Verão	6 horas
FPSO-RJ_VER_PIORCASO_6HORAS	ESPADARTE-II	304.475,5	Verão	6 horas
FPSO-RJ_VER_PIORCASO_9HORAS	ESPADARTE-II	304.475,5	Verão	9 horas
FPSO-RJ_VER_PIORCASO_12HORAS	ESPADARTE-II	304.475,5	Verão	12 horas
FPSO-RJ_VER_PIORCASO_36HORAS	ESPADARTE-II	304.475,5	Verão	36 horas
FPSO-RJ_VER_PIORCASO_60HORAS	ESPADARTE-II	304.475,5	Verão	60 horas
FPSO-RJ_VER_PIORCASO_30DIAS	ESPADARTE-II	304.475,5	Verão	30 dias



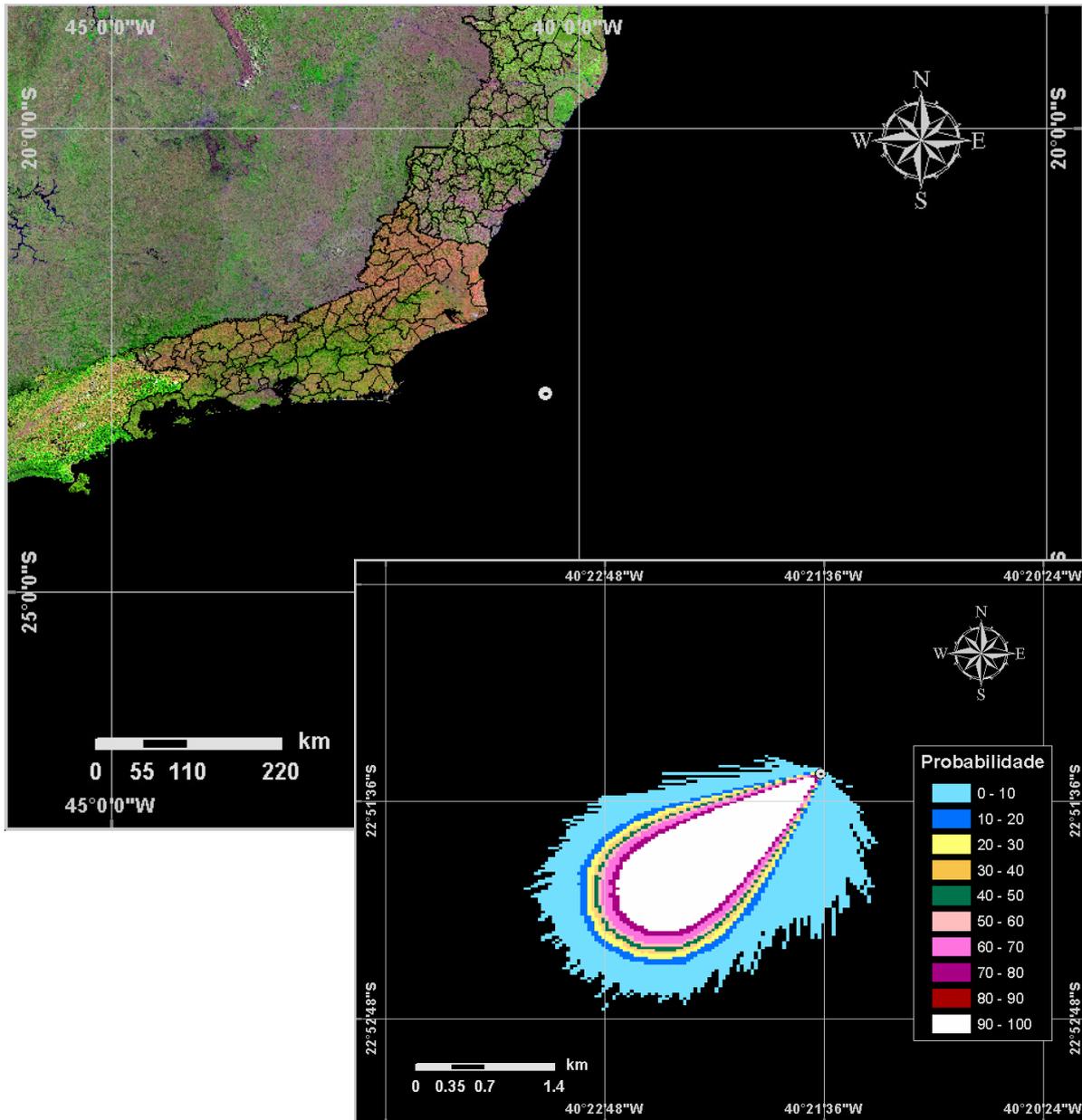
## **VI RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM POTENCIAL ACIDENTE NO CAMPO DE ESPADARTE, FPSO-RIO DE JANEIRO**

### **VI.1 SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS**

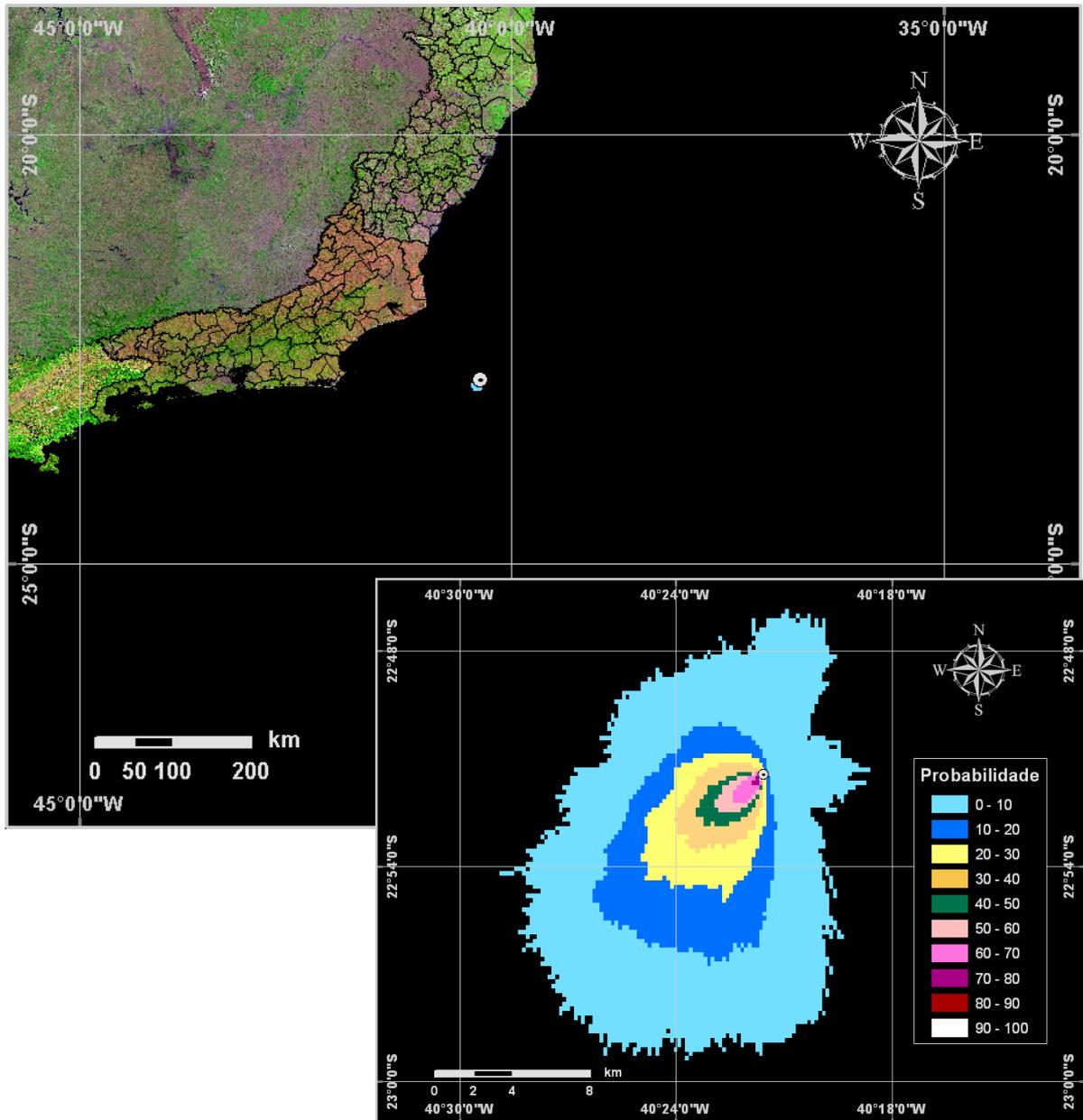
O modelo OILMAP foi utilizado para simular os cenários descritos na seção anterior e produzir as curvas de contorno, demonstrando a probabilidade da presença de óleo em cada ponto da área de estudo. Para incorporar a variabilidade das forçantes oceanográficas e meteorológicas foram realizadas 300 simulações (para cada um dos pontos de risco) considerando os padrões de circulação e transporte obtidos através da modelagem hidrodinâmica (Capítulo II) e os dados de vento medidos na Bacia de Campos (Item V.1.2) para o ano de 1992.

Da figura VI.1-1 até a figura VI.1-19 são apresentados os contornos de probabilidade da presença de óleo na água e na costa e os volumes médios e máximos por km de costa, para os cenários de acidentes no FPSO-RIO DE JANEIRO ocorrendo durante os meses de inverno (junho a agosto) e verão (janeiro a março). Praticamente em todas as simulações a mancha se deslocou para sudoeste, seguindo a orientação da Corrente do Brasil. Todas as simulações realizadas não levam em conta as ações provenientes de Planos de Contingência e Planos de Ações Emergenciais.

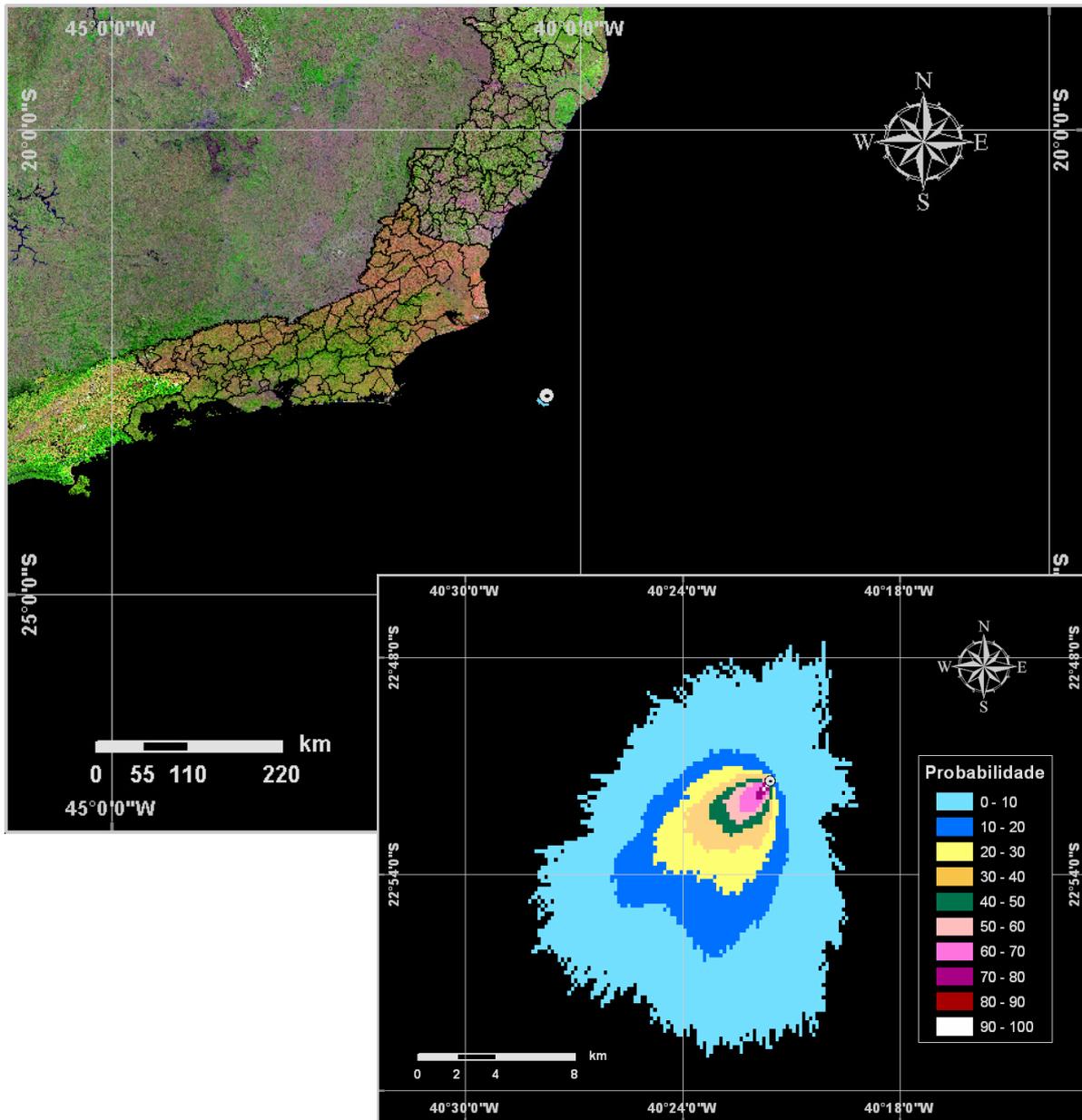
Cabe aqui ressaltar que em todas as ilustrações de contornos de probabilidade de óleo na água, o valor correspondente ao limite superior dos intervalos da escala de cores está incluído na classe. Assim, por exemplo, no intervalo de probabilidade de 10-20% estão incluídas as probabilidades superiores a 10% e menores ou iguais a 20%.



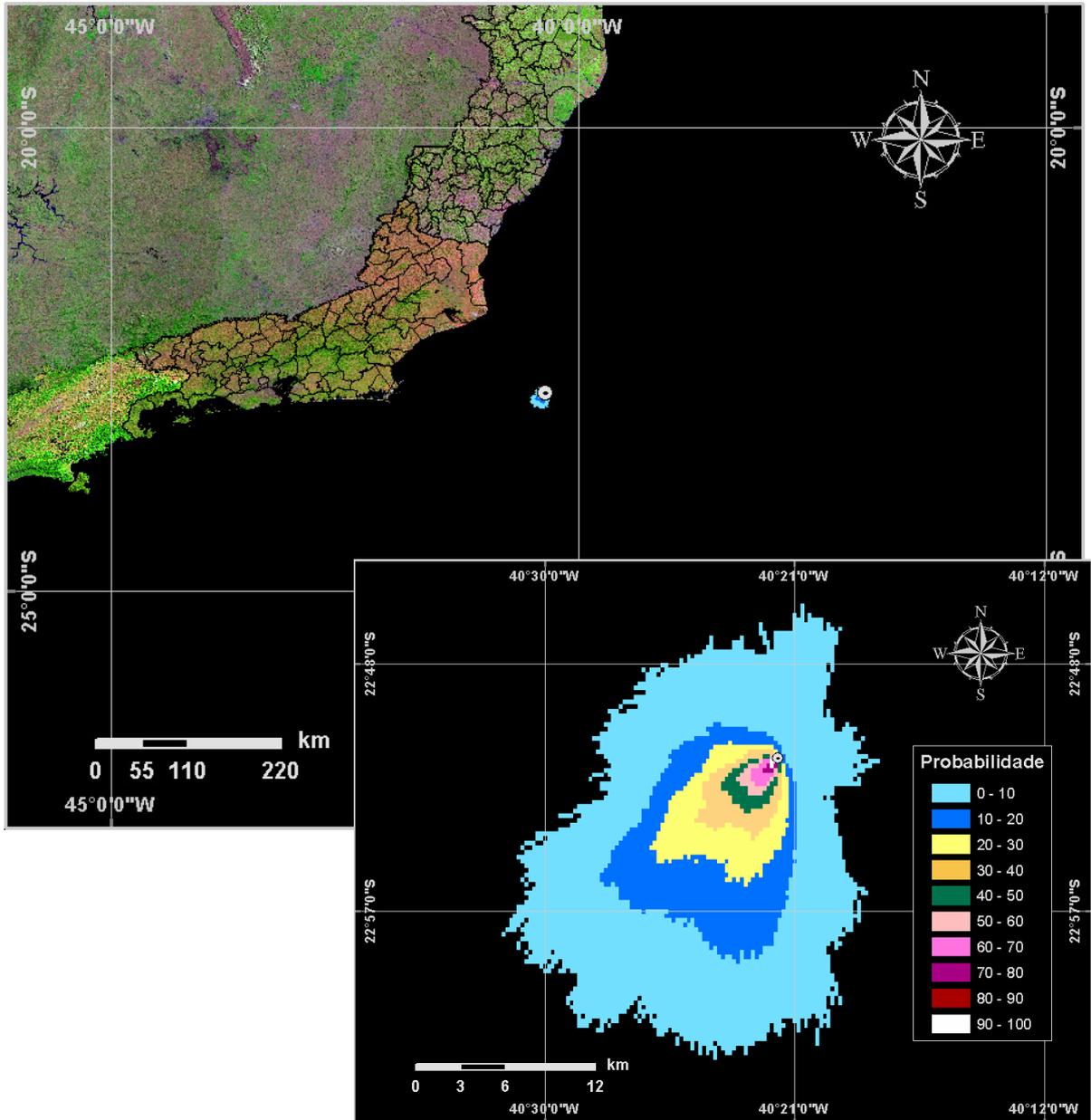
**Figura VI.1-1** - Cenário FPSO-RJ\_INV\_8\_20MGL. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 8 m<sup>3</sup> após 1 hora atingindo 20 mg/l.



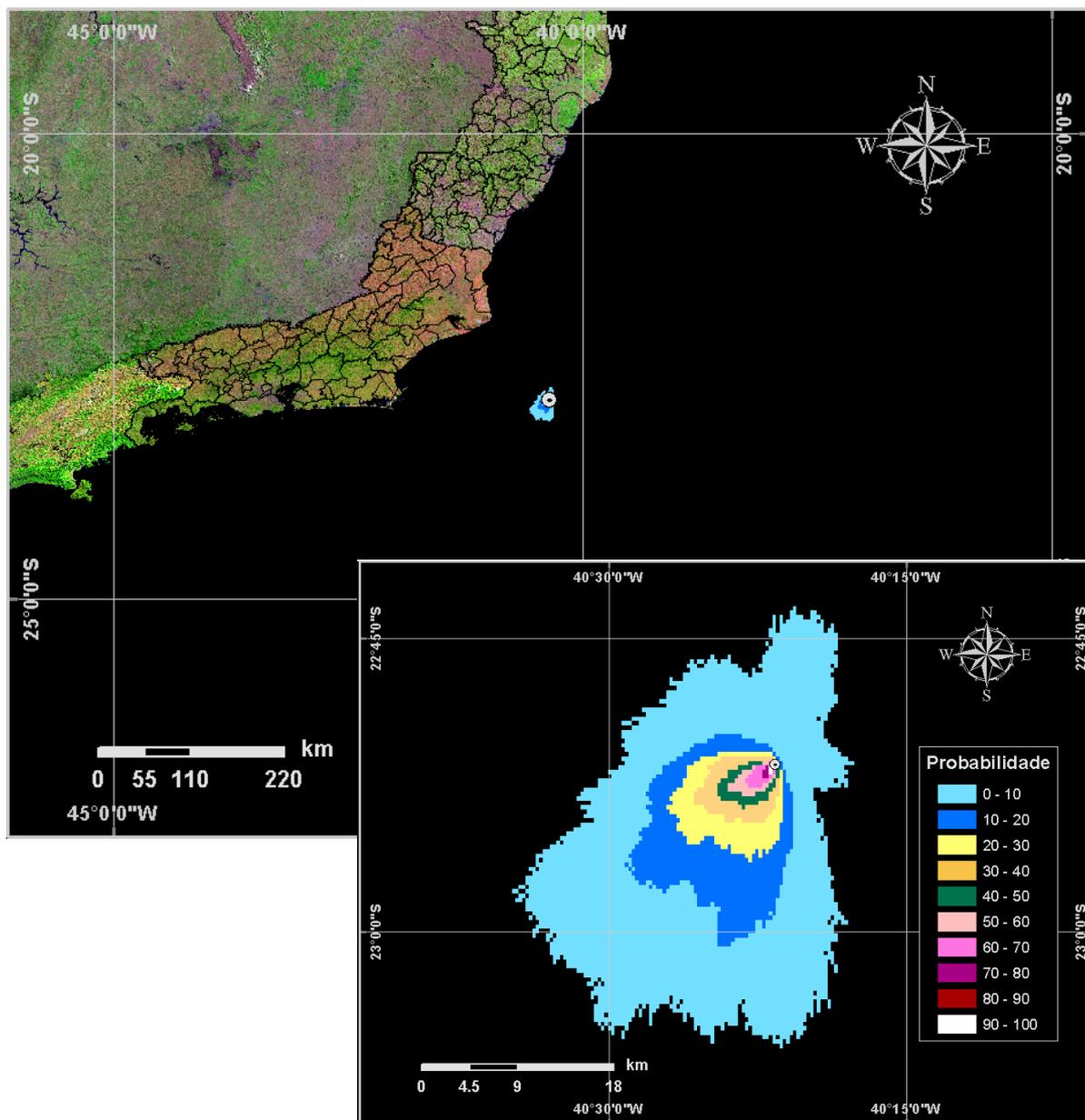
**Figura VI.1-2 - Cenário FPSO-RJ\_INV\_200\_6HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m<sup>3</sup> após 6 horas.**



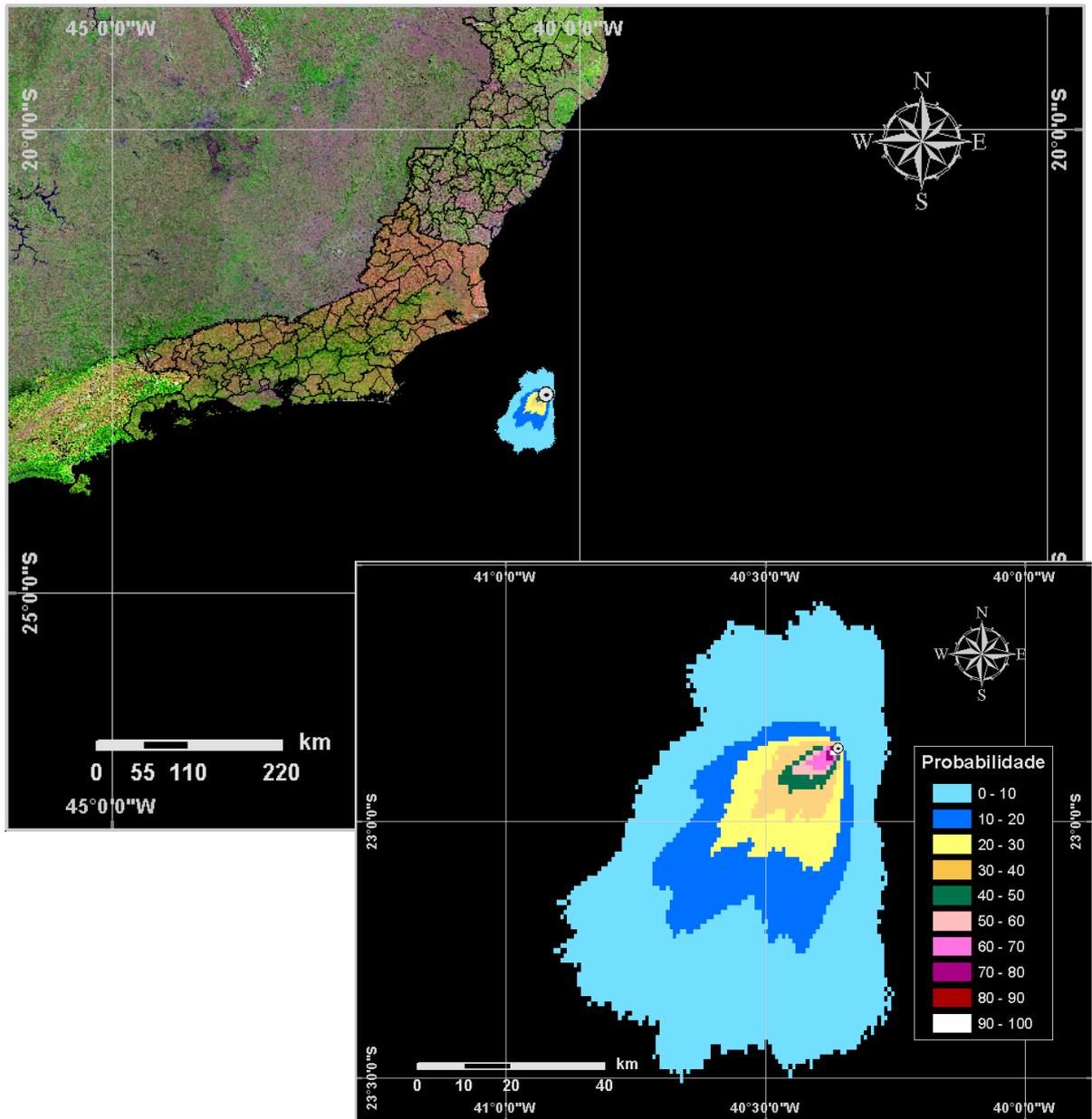
**Figura VI.1-3 - Cenário FPSO-RJ\_INV\_PIORCASO\_6HORAS.** Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 304.475,5 m<sup>3</sup> após 6 horas.



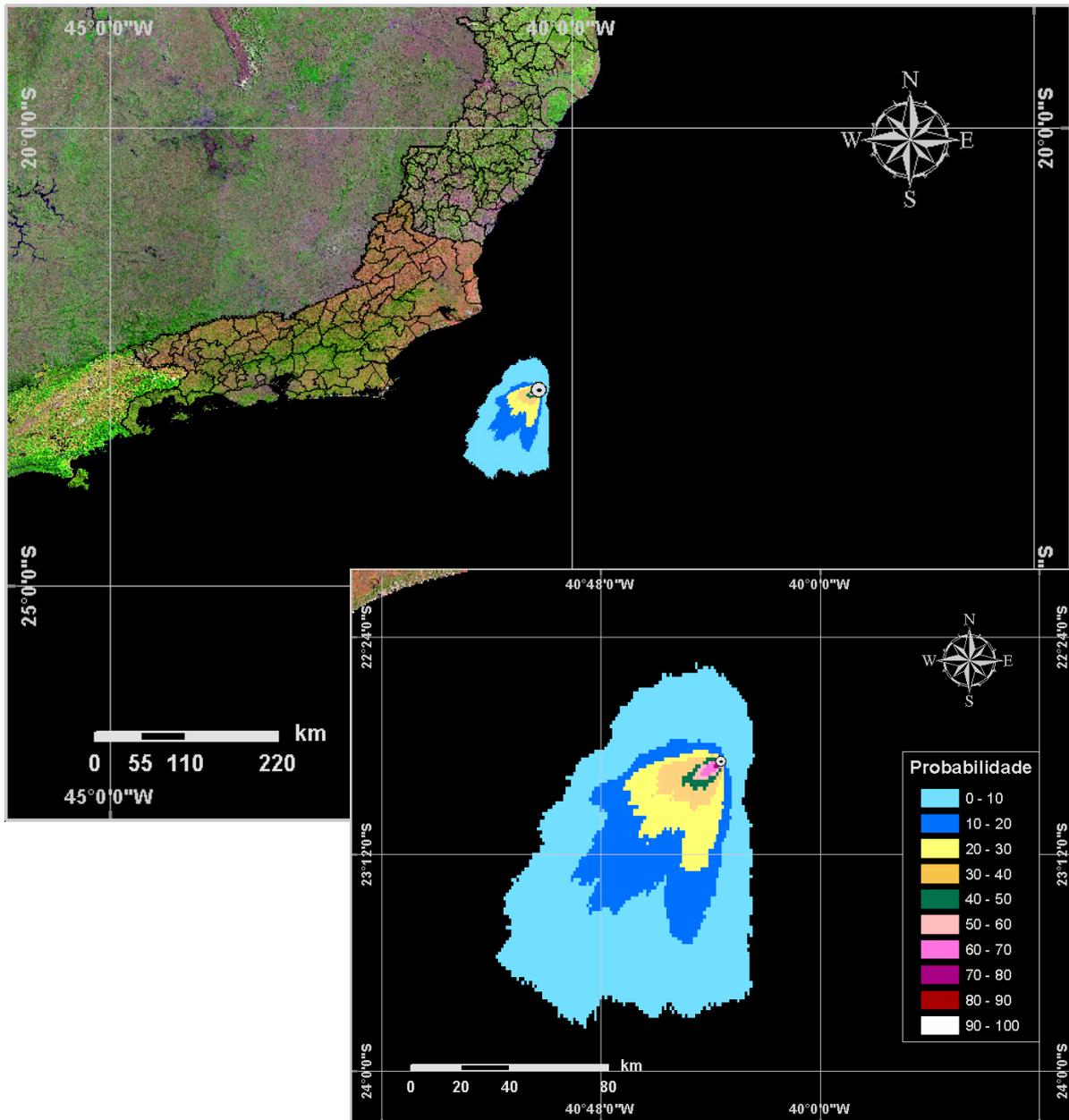
**Figura VI.1-4 - Cenário FPSO-RJ\_INV\_PIORCASO\_9HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 304.475,5 m<sup>3</sup> após 9 horas.**



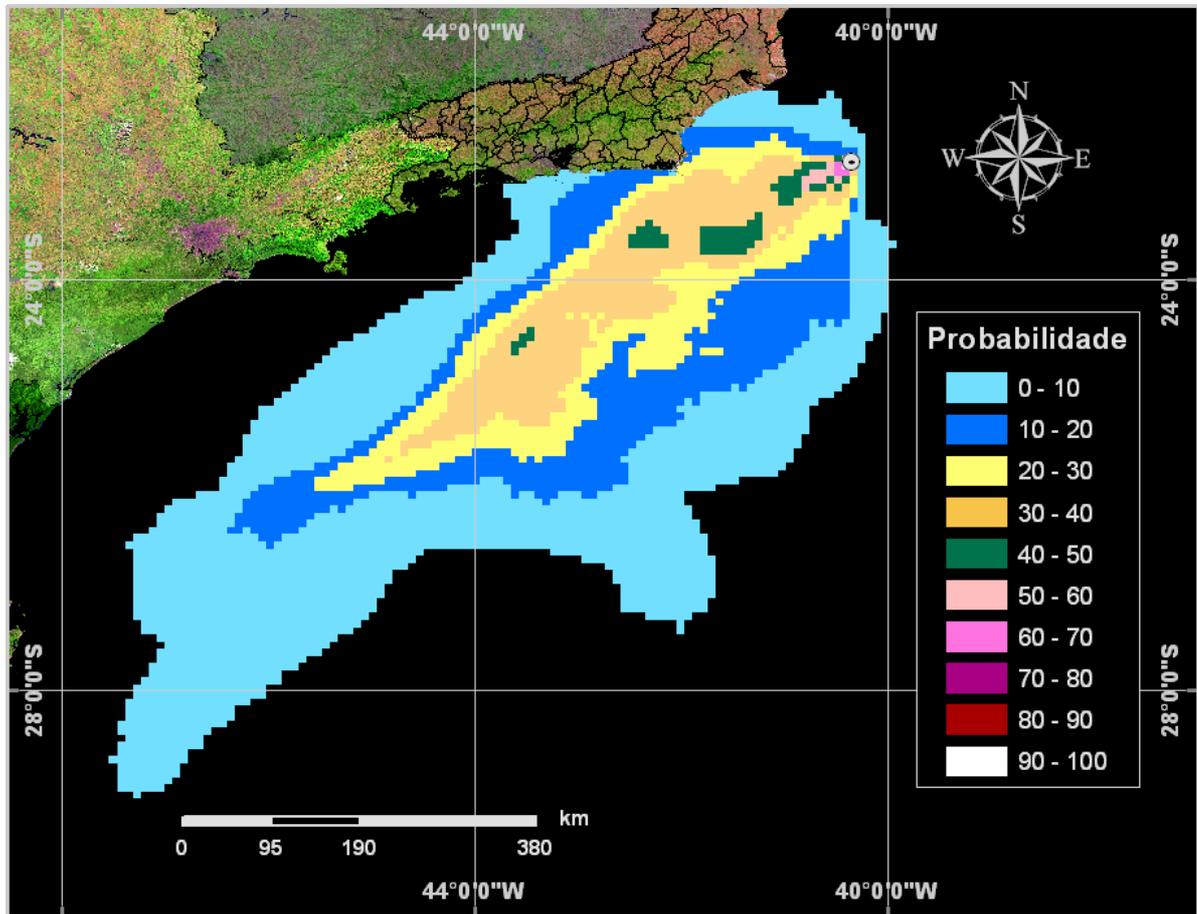
**Figura VI.1-5 - Cenário FPSO-RJ\_INV\_PIORCASO\_12HORAS.** Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 304.475,5 m<sup>3</sup> após 12 horas.



**Figura VI.1-6** - Cenário FPSO-RJ\_INV\_PIORCASO\_36HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 304.475,5 m<sup>3</sup>/h após 36 horas.

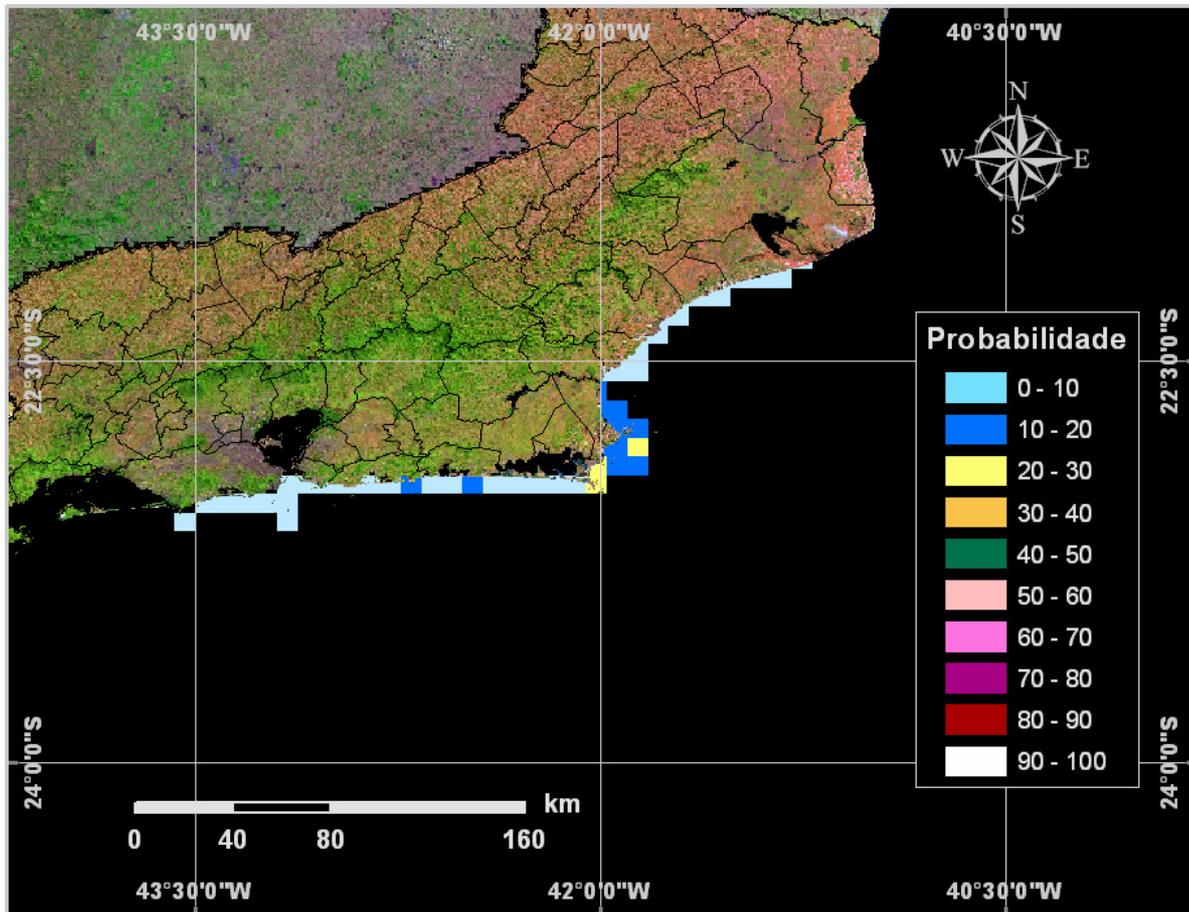


**Figura VI.1-7 - Cenário FPSO-RJ\_INV\_PIORCASO\_60HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 304.475,5 m<sup>3</sup> após 60 horas.**



**Figura VI.1-8** - Cenário FPSO-RJ\_INV\_PIORCASO\_30DIAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 304.475,5 m<sup>3</sup> após 30 dias.

Na figura VI.1-9 são apresentadas as faixas de probabilidade de toque na costa, para o FPSO-RIO DE JANEIRO, durante o inverno. Pode se observar que essa probabilidade engloba uma área que se estende do município do Rio de Janeiro (RJ) ao município de Quissamã (RJ). Nota-se que a maior probabilidade de toque (entre 20 e 30%) ocorre nos municípios de Arraial do Cabo e Cabo Frio.



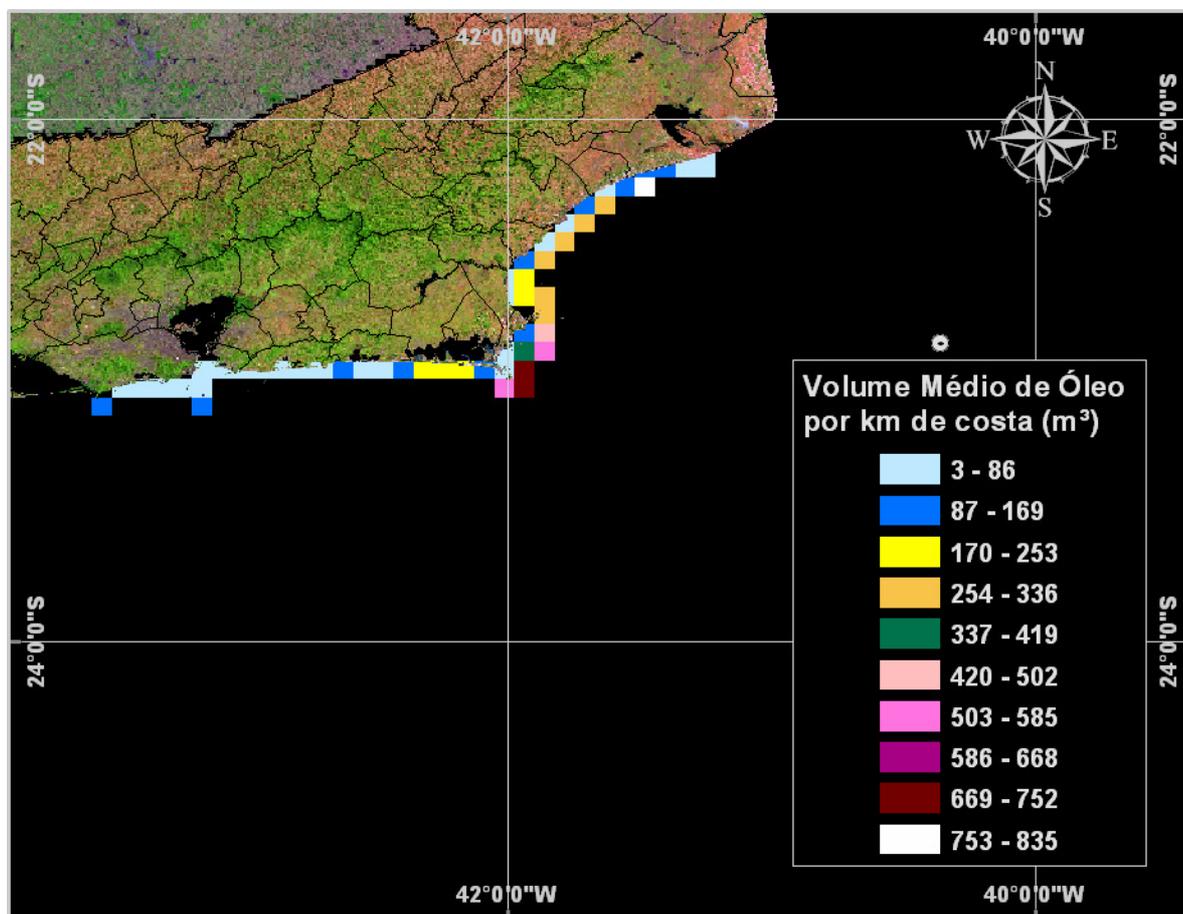
**Figura VI.1-9 - Cenário FPSO-RJ\_INV\_PIORCASO\_30DIAS\_SHORE. Probabilidades de toque na costa para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 304.475,5 m<sup>3</sup> após 30 dias.**

A tabela VI.1-1 apresenta os municípios com probabilidade de toque superior a 10% em condições de inverno.

**Tabela VI.1-1** - Municípios com probabilidade de serem atingidos por derrame de óleo do FPSO-RIO DE JANEIRO superior a 10%, simulados em condições de inverno.

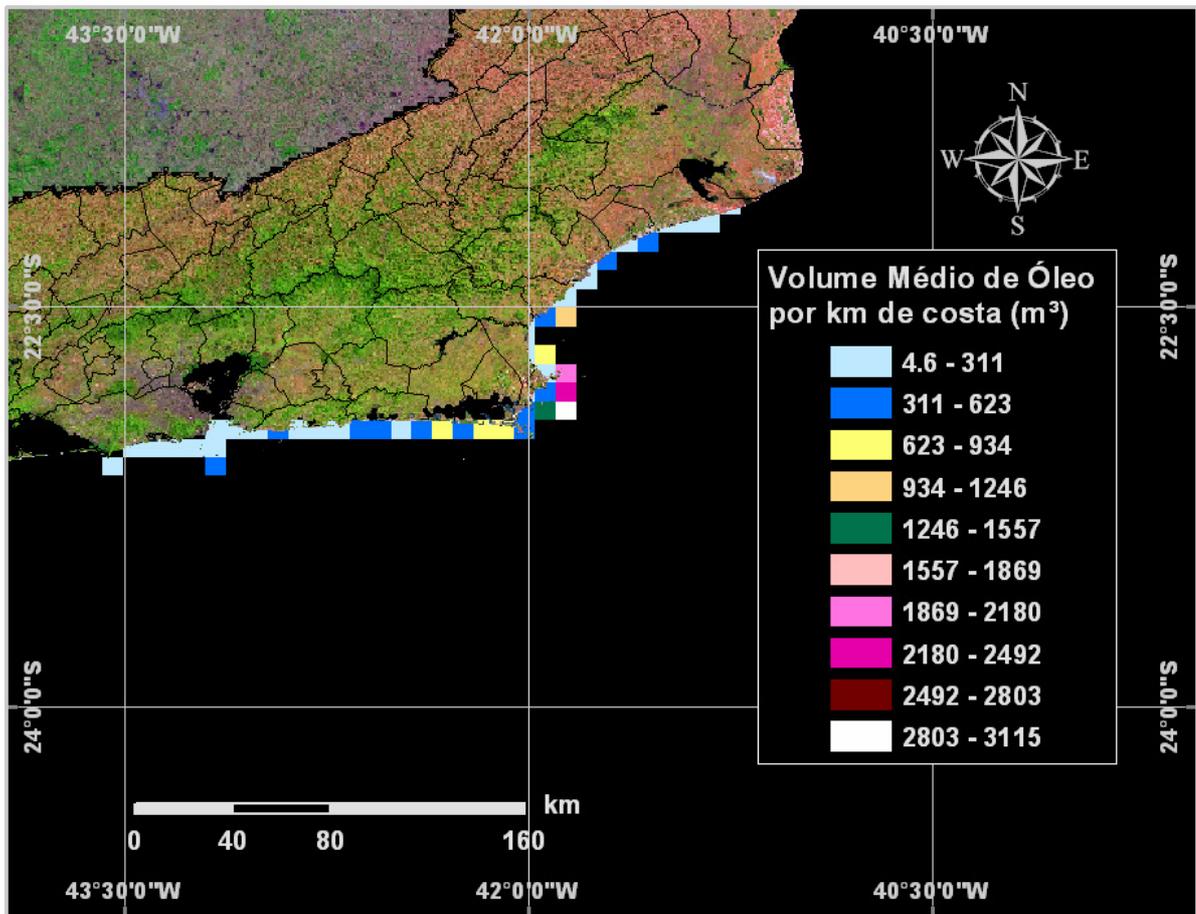
MUNICÍPIO	PROBABILIDADE DE TOQUE (%)
Cabo Frio	20 – 30
Arraial do Cabo	20 – 30
Marica	10 – 20
Armação dos Búzios	10 – 20
Saquarema	10 – 20

A figura VI.1-10 apresenta o volume médio de óleo por km de costa atingida para 30 dias de simulações em condições de inverno. Observa-se que os municípios de Arraial do Cabo (RJ) e Macaé (RJ) destacam-se com um volume entre 669 e 835 m<sup>3</sup>.

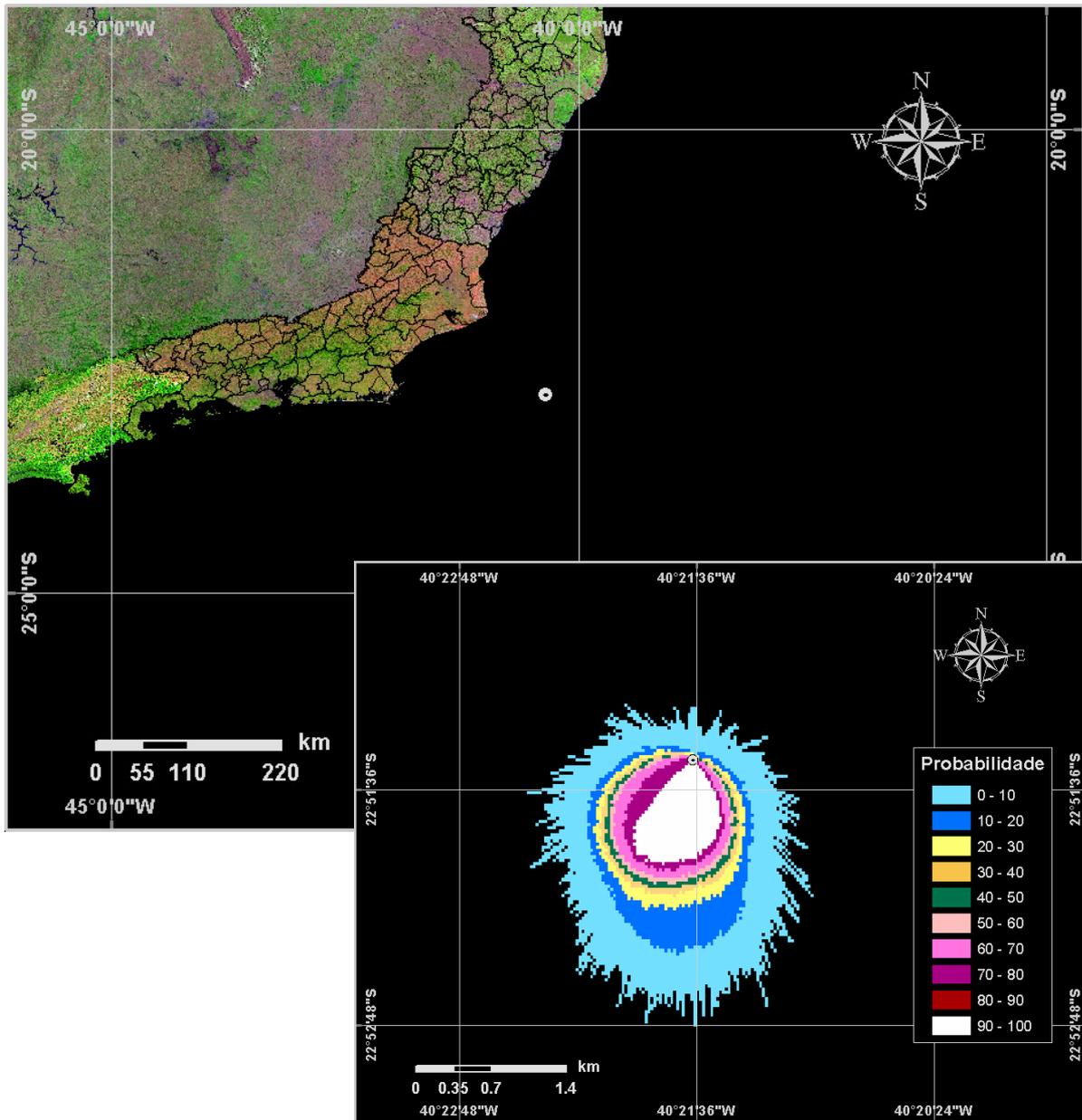


**Figura VI.1-10** - Cenário FPSO-RJ\_INV\_PIORCASO\_30DIAS\_OLEOMED. Volume médio de óleo por km que chega à costa no período de inverno (junho a agosto).

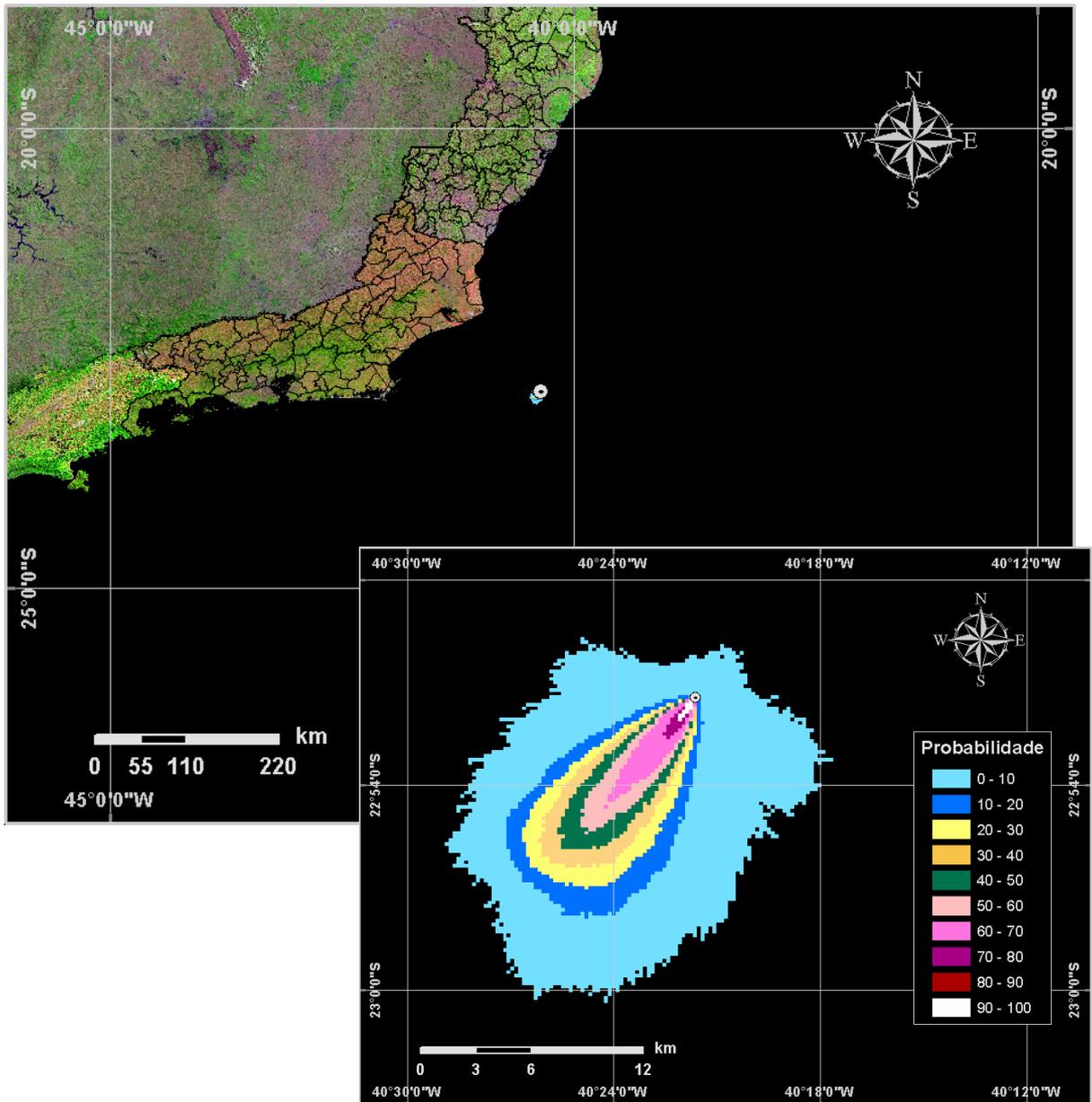
A figura VI.1-11 apresenta o volume máximo de óleo por km de costa atingida para simulações em condições de inverno e após 30 dias de simulação. Observa-se que o município de Armação de Búzios (RJ) destaca-se com volumes entre 2.803 e 3.115 m<sup>3</sup>.



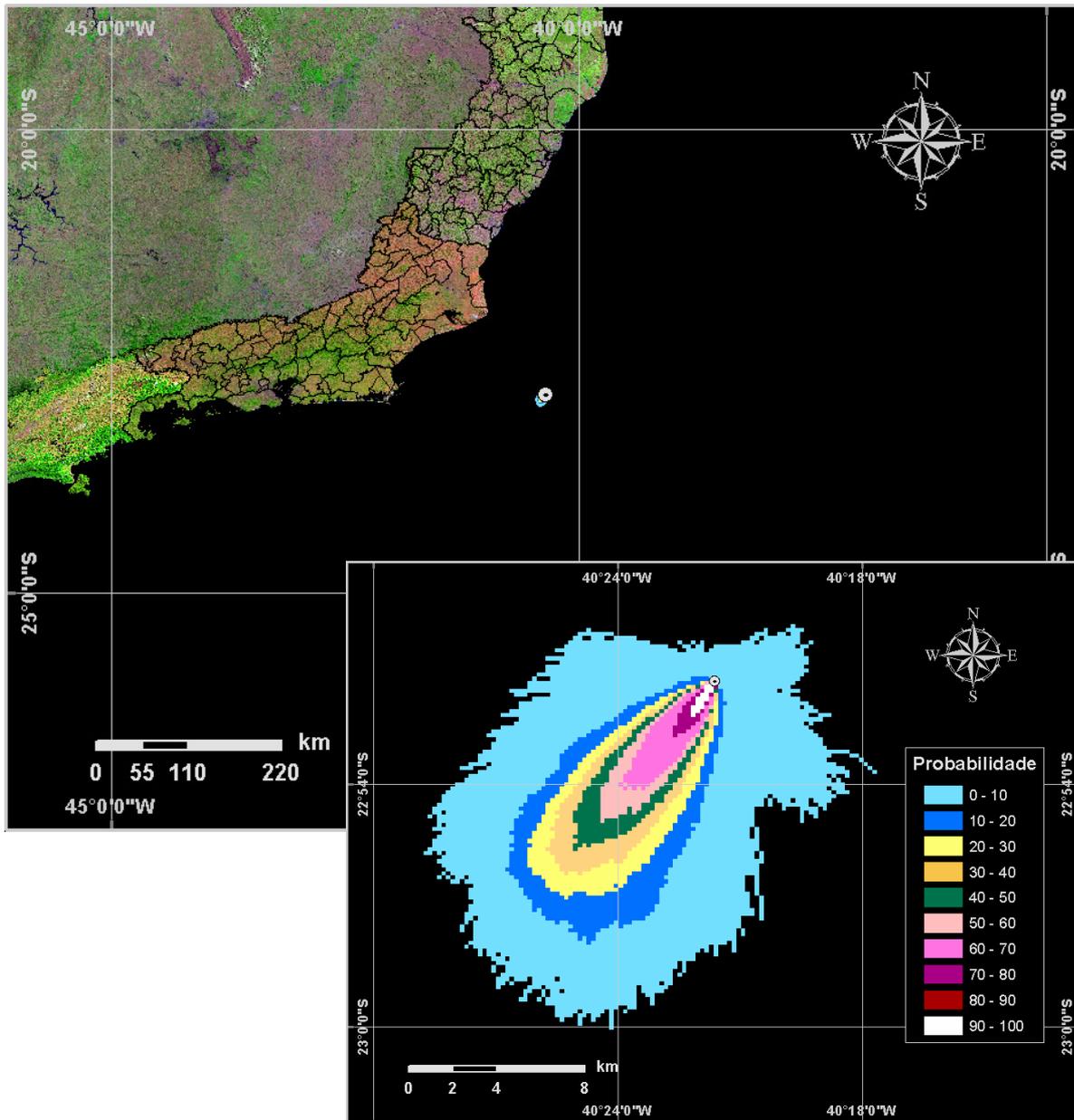
**Figura VI.1-11** - Cenário FPSO-RJ\_INV\_PIORCASO\_30DIAS\_OLEOMAX. Volume máximo de óleo por km que chega à costa no período de inverno (junho a agosto).



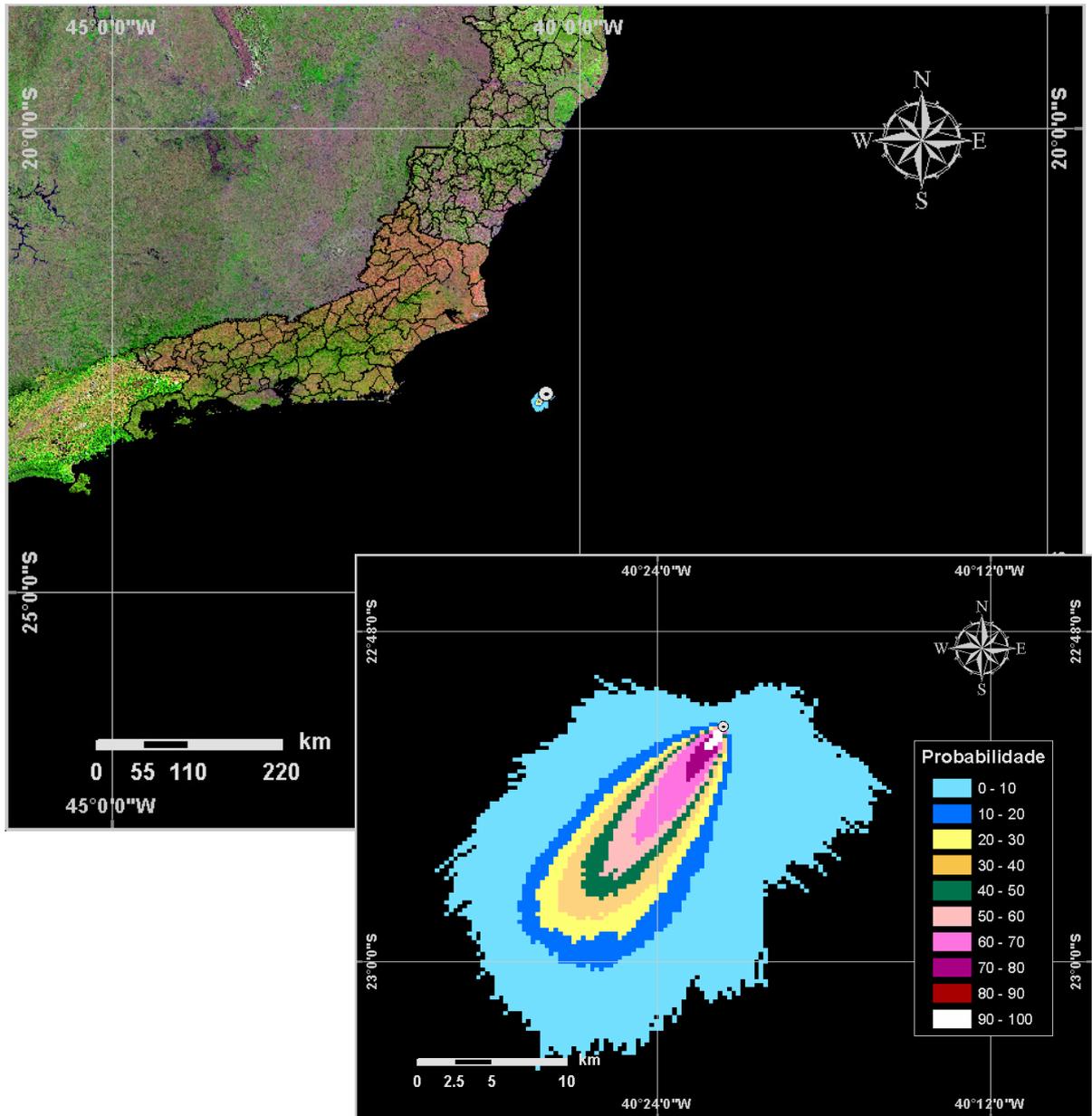
**Figura VI.1-12 - Cenário FPSO-RJ\_VER\_8\_20MGL. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 8 m<sup>3</sup> após 1 hora atingindo 20 mg/l.**



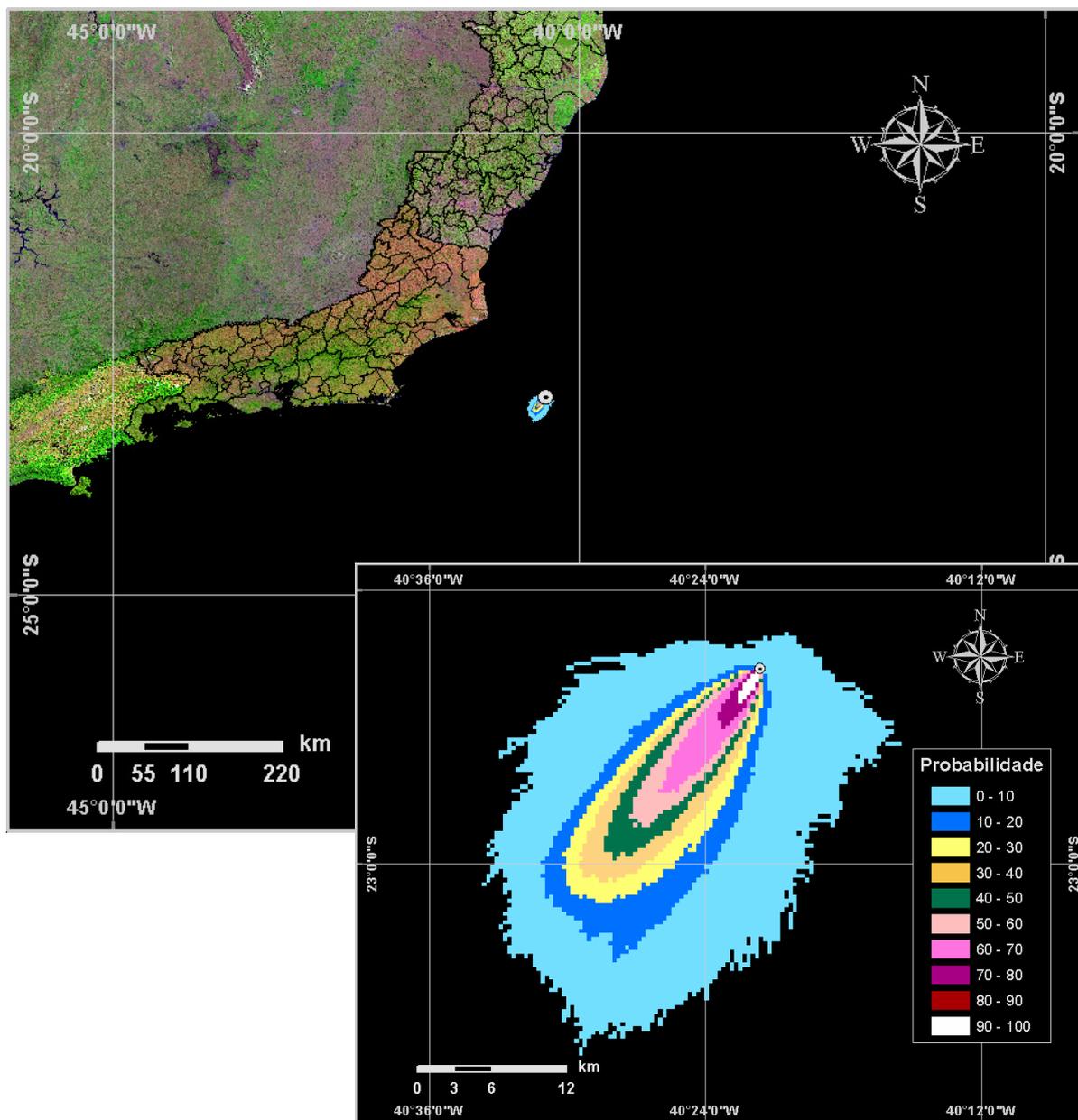
**Figura VI.1-13 - Cenário FPSO-RJ\_VER\_200\_6HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 200 m<sup>3</sup> após 6 horas.**



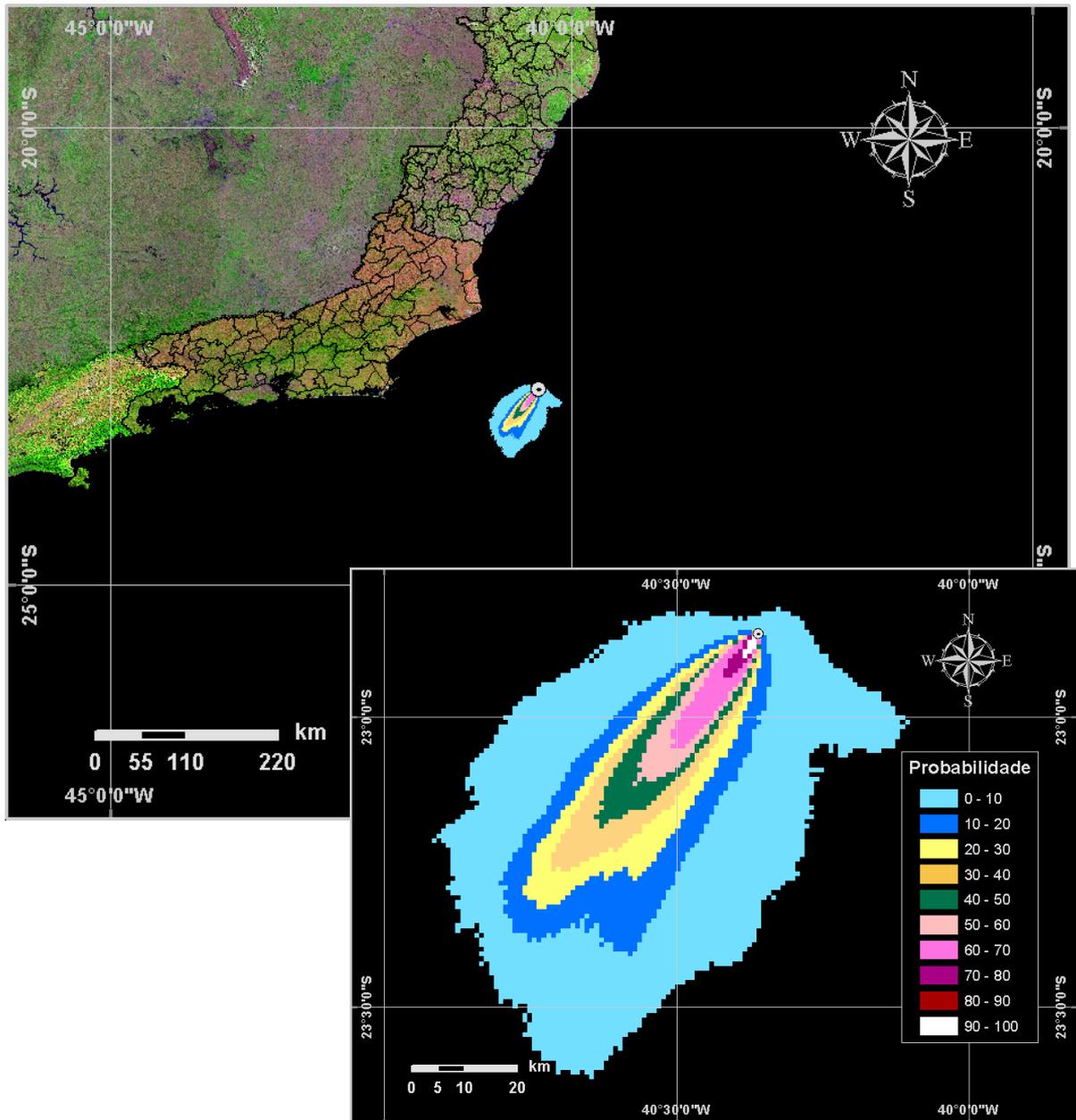
**Figura VI.1-14 - Cenário FPSO-RJ\_VER\_PIORCASO\_6HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 304.475,5 m<sup>3</sup> após 6 horas.**



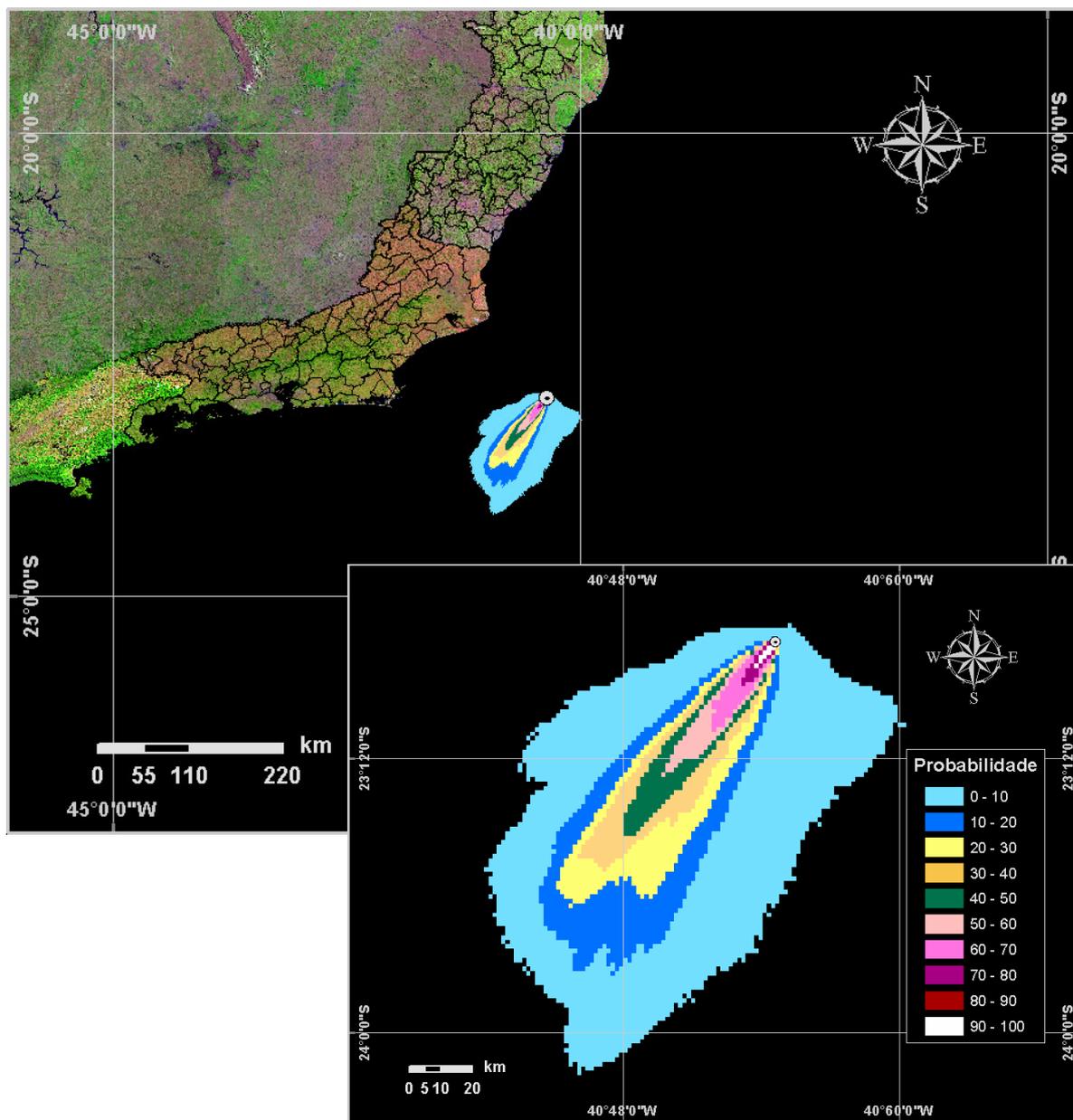
**Figura VI.1-15 - Cenário FPSO-RJ\_VER\_PIORCASO\_9HORAS.** Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 304.475,5 m<sup>3</sup> após 9 horas.



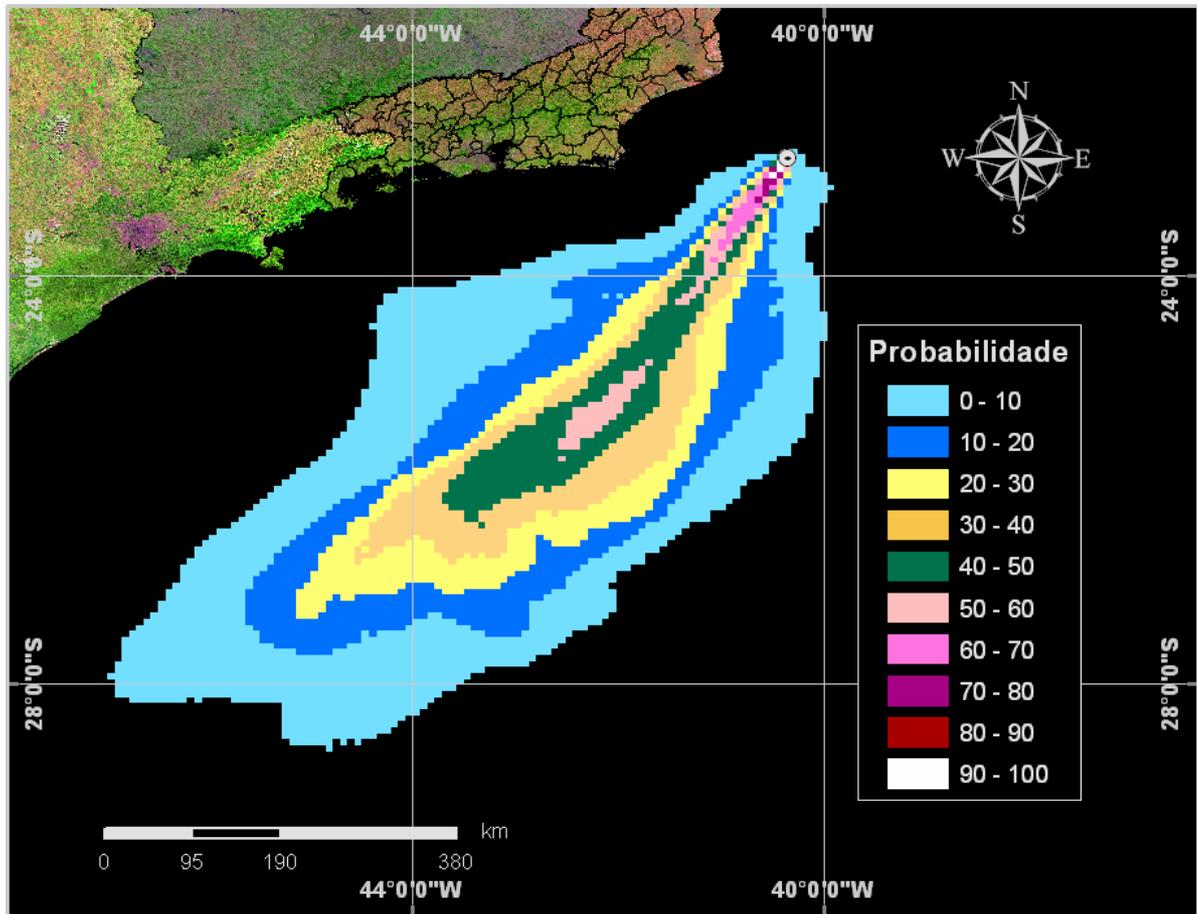
**Figura VI.1-16 - Cenário FPSO-RJ\_VER\_PIORCASO\_12HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 304.475,5 m<sup>3</sup> após 12 horas.**



**Figura VI.1-17 - Cenário FPSO-RJ\_VER\_PIORCASO\_36HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 304.475,5 m<sup>3</sup> após 36 horas.**



**Figura VI.1-18 - Cenário FPSO-RJ\_VER\_PIORCASO\_60HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 304.475,5 m<sup>3</sup> após 60 horas.**



**Figura VI.1-19 -** Cenário FPSO-RJ\_VER\_PIORCASO\_30DIAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO-RIO DE JANEIRO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 304.475,5 m<sup>3</sup> após 30 dias.

A tabela VI.1-2 apresenta a extensão de linha de costa atingida nos derrames de óleo simulados para o FPSO-RIO DE JANEIRO, no campo de Espadarte, Bacia de Campos.

**Tabela VI.1-2** - Extensão da linha de costa com probabilidade de ser atingida pelo derrame de óleo a partir do FPSO-RIO DE JANEIRO, simulados em condições de inverno e verão.

CENÁRIOS	EXTENSÃO DE LINHA DE COSTA COM PROBABILIDADE DE TOQUE (km)
FPSO-RJ_INV_PIORCASO_30DIAS	273
FPSO-RJ_VER_PIORCASO_30DIAS	-

A tabela VI.1-3 apresenta o percentual de simulações que impactaram a linha de costa, o menor período de tempo para atingir a costa e o tempo médio para o óleo atingir a costa, para o acidente simulado a partir do FPSO-RIO DE JANEIRO, ocorrendo durante os meses de inverno (junho a agosto).

**Tabela VI.1-3** - Resumo dos resultados da modelagem probabilística de pior caso ocorrendo durante os meses de inverno (junho a agosto) para o FPSO-RIO DE JANEIRO.

CENÁRIOS	TEMPO MÍNIMO PARA ATINGIR A COSTA (HORAS)	TEMPO MÉDIO PARA ATINGIR A COSTA (HORAS)	PERCENTAGEM DE SIMULAÇÕES COM TOQUE NA COSTA (%)
FPSO-RJ_INV_PIORCASO_30DIAS	184	356	35

## VI.2 CENÁRIOS DETERMINÍSTICOS CRÍTICOS

A análise dos resultados das simulações probabilísticas permitiu identificar os cenários determinísticos críticos de verão e inverno. Para essas simulações foram considerados como mais críticos os cenários que apresentaram o menor tempo para o primeiro toque do óleo na costa. No caso do cenário de pior caso de verão, como não houve toque na costa, foi considerado como cenário determinístico crítico aquele cenário onde a mancha de óleo mais se aproximou da costa. Em ambos os cenários foram considerados o vazamento de 304.475,5 m<sup>3</sup>.

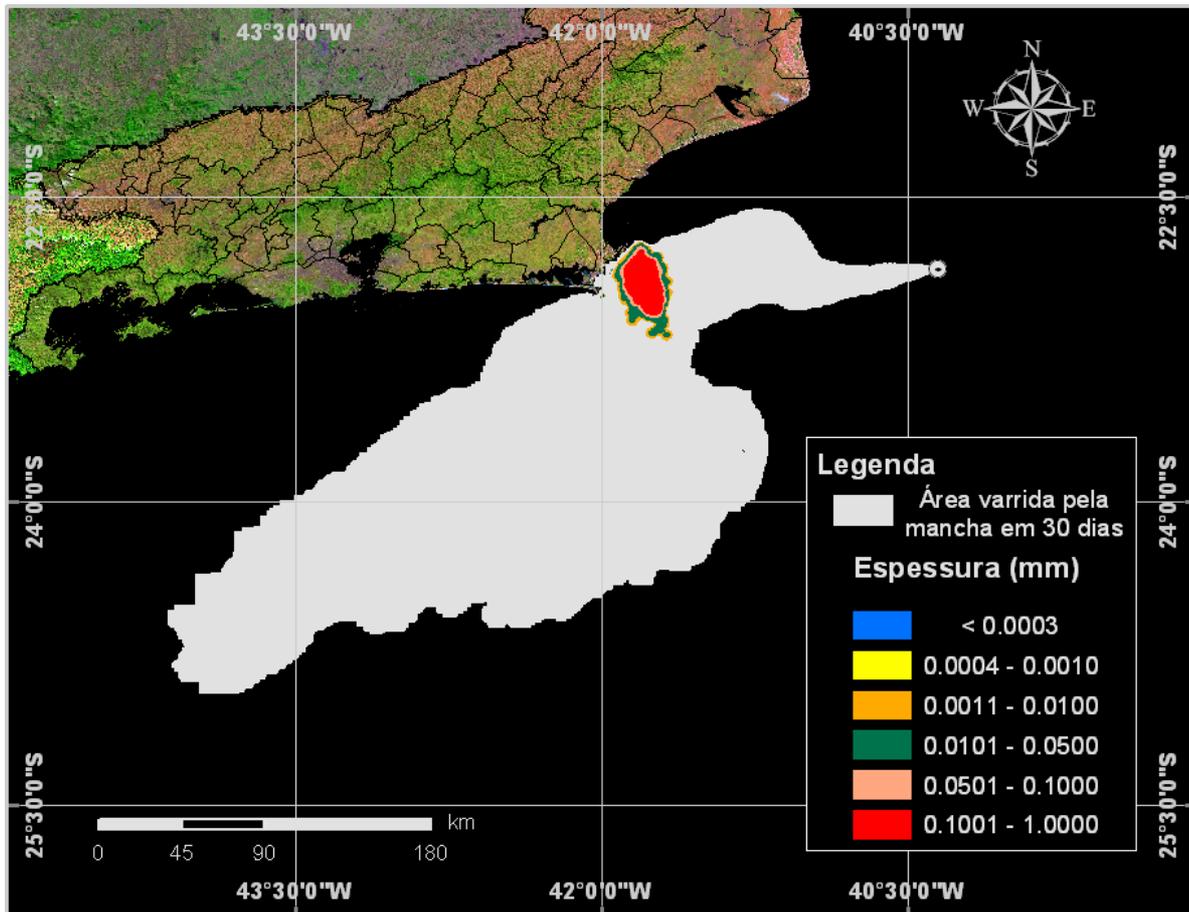
A tabela VI.2-1 apresenta um resumo do cenários críticos de inverno e verão obtidos para o FPSO-RIO DE JANEIRO.

**Tabela VI.2-1 - Resumo dos cenários determinísticos críticos de inverno e de verão para o FPSO-RIO DE JANEIRO.**

CENÁRIOS	DATA DE INÍCIO	VOLUME FINAL DE ÓLEO QUE CHEGA À COSTA (m <sup>3</sup> )	TEMPO PARA CHEGAR À COSTA (HORAS)
FPSO-RJ_INV_PIORCASO_30DIAS	04/07/92 – 23:00h	4.342	185
FPSO-RJ_VER_PIORCASO_30DIAS	01/03/92 – 08:00h	-	-

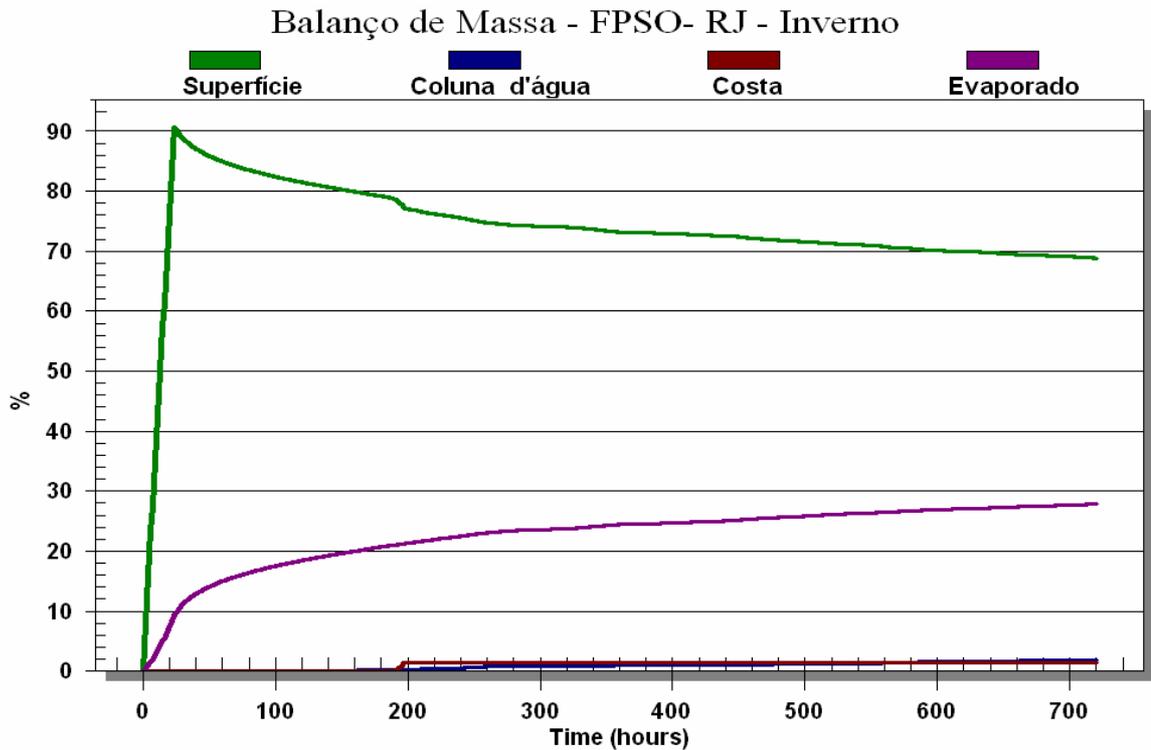
Nas figuras VI.2-1 e VI.2-3 são apresentados os contornos de espessura no instante do primeiro toque na linha de costa, das simulações dos cenários críticos de inverno e verão, respectivamente, para o FPSO-RIO DE JANEIRO. Nestas figuras são destacados os limites de 0,0003 mm (limite para ambientes sensíveis) e 0,05 mm (limite de recolhimento). A cor cinza representa a região por onde a mancha se deslocou durante os 30 dias de duração do derrame e, portanto, não está associada a uma espessura. A mancha final é aquela representada pela escala de cores indicada nas legendas.

Na simulação determinística crítica de inverno (figura VI.2-1), observa-se que a forma da trajetória da mancha (cinza) está associada à incidência de sistemas frontais durante o período da simulação.



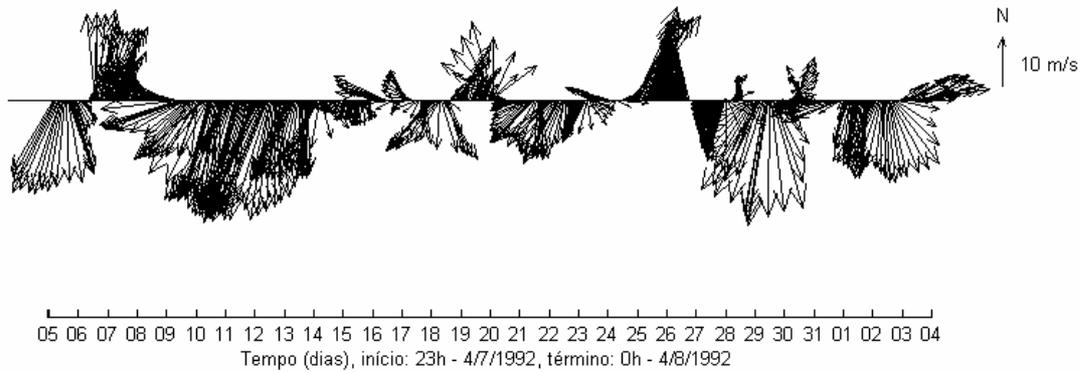
**Figura VI.2-1** - Cenário determinístico de pior caso para um derrame ocorrido no FPSO-RIO DE JANEIRO, no período de inverno.

A figura VI.2-2 apresenta um gráfico com o balanço de massa (óleo na superfície, na costa, evaporado e na coluna d'água) para a simulação de pior caso no período de inverno. Observa-se que a evaporação é o principal processo na redução da massa de óleo nesse período.



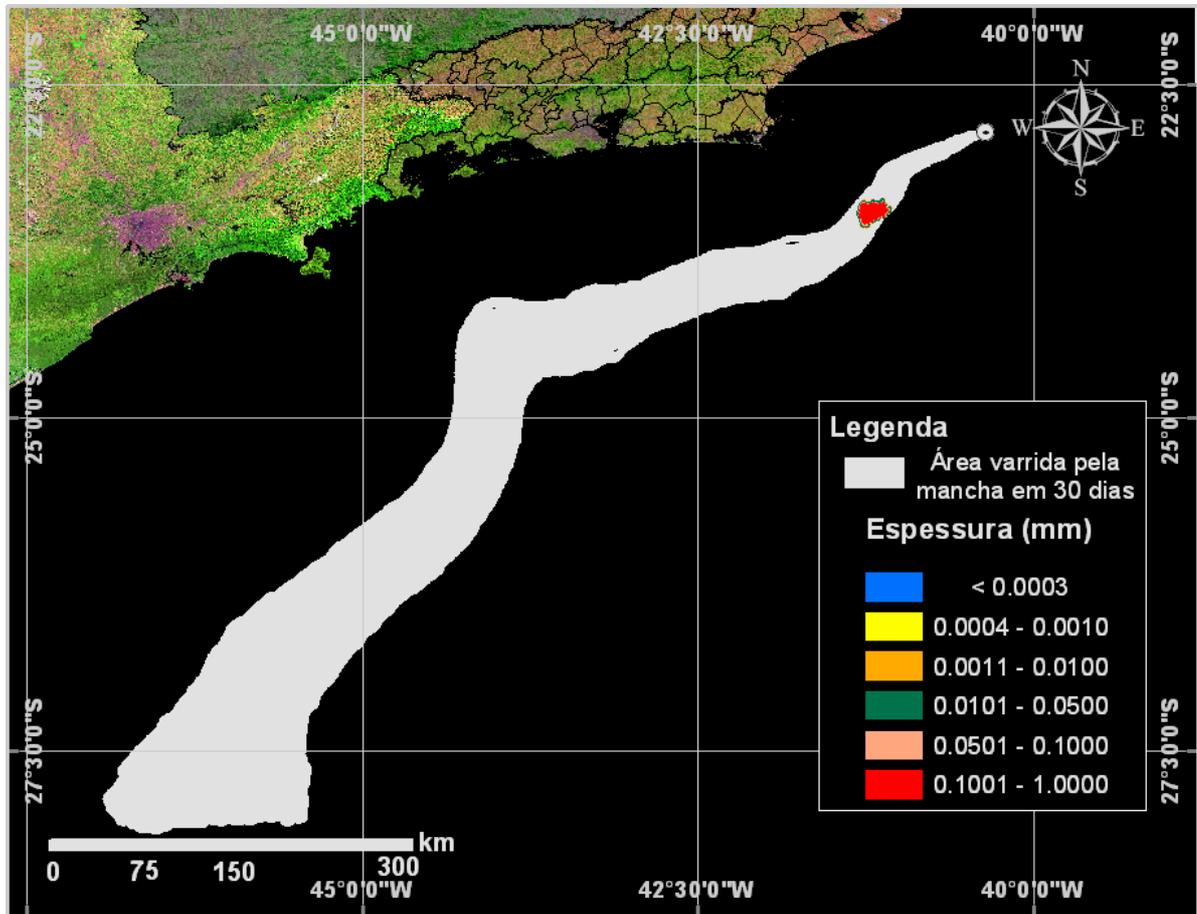
**Figura VI.2-2** - Balanço de massa para o cenário de pior caso de vazamento no inverno, no FPSO-RIO DE JANEIRO.

A figura VI.2-3 apresenta o *stick plot* para os dados de vento medidos em Albacora (conforme descrito no item V.1.2) entre os dias 04/07/1992 e 04/08/1992 e usados na simulação de inverno de pior caso, durante 30 dias.



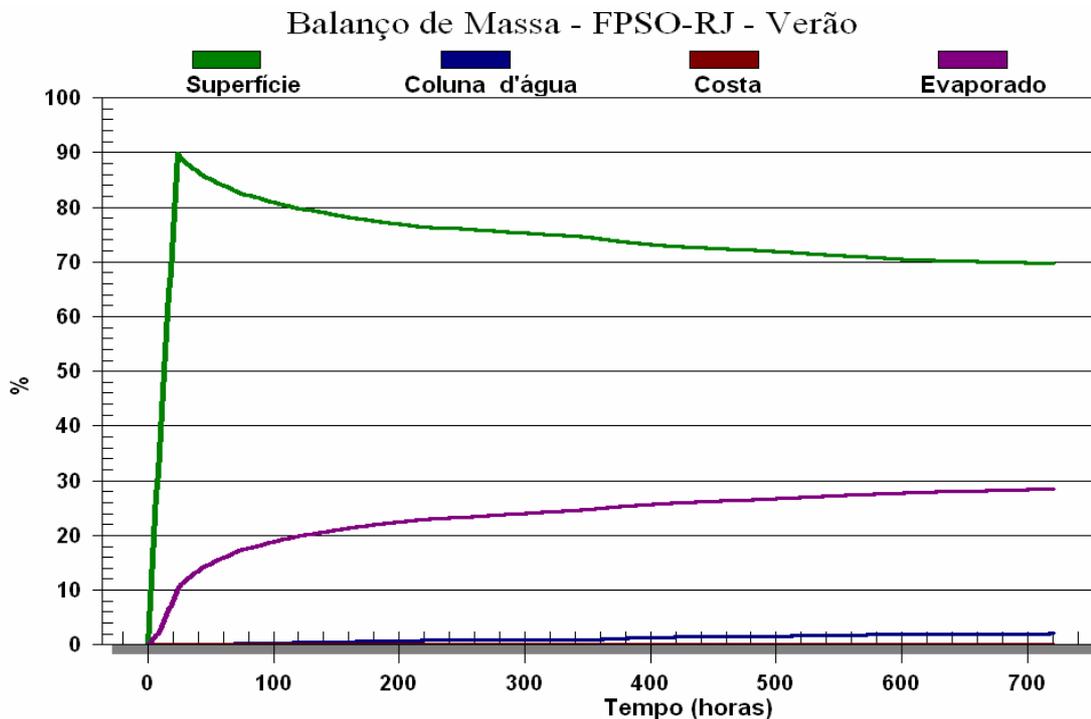
**Figura VI.2-3** - *Stick plot para os dados de vento medidos em Albacora e utilizados na simulação determinística de inverno.*

Na simulação determinística crítica de verão (figura VI.2-4), observa-se que a menor distância da pluma em relação à costa (município de Arraial do Cabo) é de, aproximadamente, 80 km.



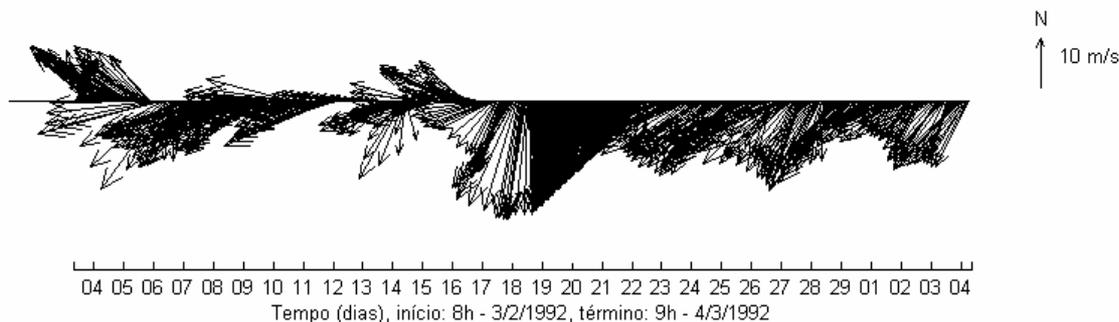
**Figura VI.2-4** - Cenário determinístico de pior caso para um derrame ocorrido no FPSO-RIO DE JANEIRO, no período de verão.

A figura VI.2-5 apresenta um gráfico com o balanço de massa (óleo na superfície, na costa, evaporado e na coluna d'água) para a simulação de pior caso no período de verão. Observa-se que a evaporação apresenta um importante papel na redução da massa de óleo nesse período.



**Figura VI.2-5 -** Balanço de massa para o cenário de pior caso de vazamento no verão, no FPSO-RIO DE JANEIRO.

A figura VI.2-6 apresenta o *stick-plot* para os dados de vento medidos em Albacora (conforme descrito no item V.1.2) entre os dias 03/02/1992 e 04/03/1992 e usados na simulação de verão de pior caso, durante 30 dias.



**Figura VI.2-6 -** Stick-plot dos dados de vento medido em Albacora e utilizados na simulação determinística de verão.

---

## **VII BIBLIOGRAFIA**

ASA (Applied Science Associates South America), 2003a. Cenários de Acidentes com Petróleo no Terminal de Alemoa (SP). Relatório Técnico (janeiro de 2003). 57pp.

ASA (Applied Science Associates South America), 2003b. Cenários de Acidentes com Petróleo no Terminal de Paranaguá (PR). Relatório Técnico (janeiro de 2003). 51pp.

ASA (Applied Science Associates South America), 2003c. Cenários de Acidentes com Petróleo na Refinaria de Presidente Bernardes – RPBC (SP). Relatório Técnico (dezembro de 2003). 47pp.

ASA (Applied Science Associates South America), 2003d. Estudos de Deriva para Acidentes com Produtos Derivados de Petróleo no Terminal de São Luís (MA). Relatório Técnico (dezembro de 2003). 196pp.

ASA (Applied Science Associates South America), 2004. Estudos de Deriva para Acidentes com Produtos Derivados de Petróleo na Base Vila do Conde (PA). Relatório Técnico (janeiro de 2004). 207pp.

ASA (Applied Science Associates South America), 2005a. Modelagem do Transporte e Dispersão de Óleo no Mar para o Bloco BM-CAL-6. Relatório Técnico, Revisão 01 (outubro de 2005). 212pp.

ASA (Applied Science Associates South America), 2005b. Modelagem do Transporte e Dispersão de Óleo no Mar para o FPSO Capixaba, Campo de Golfinho, Bacia do Espírito Santo. Relatório Técnico (abril de 2005). 107pp.

---

BEAR, J. & A. VERRUIJT, 1987. Modeling groundwater flow and pollution with computer programs for sample cases. *Kluwer Academic Publishers*.

BLUMBERG, A.F. & G.L. MELLOR, 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: N.S. Heaps (Ed.), **Coastal and Estuarine Sciences 4: Three-dimensional Coastal Ocean Models**. American Geophysical Union, pp. 1-16.

CASTRO FILHO, B.M.C. & L.B. MIRANDA, 1998. Physical Oceanography of the Western Atlantic Continental Shelf located between 40° N and 34° S. **The Sea**. John Wiley & Sons, Inc. 11: p. 209-251.

CLIMANÁLISE, 1996. Boletim de Monitoramento e Análise Climática. Edição comemorativa de 10 anos. Outubro.

DELVIGNE, G.A.L. & C.E. SWEENEY, 1988. Natural dispersion of oil. **Oil & Chemical Pollution** 4 (1988): p. 281-310.

DELVIGNE, G.A.L. & L.J.M. HULSEN, 1994. Simplified laboratory measurement of oil dispersion coefficient – Application in computations of natural oil dispersion. **Proceedings of the Seventeenth Arctic and Marine Oil Spill Program, Technical Seminar**, June 8-10, 1994, Vancouver, BC Canada, pp.173-187.

EVANS, D.L. & S.R. SIGNORINI, 1985. Vertical structure of the Brazil Current. *Nature*, 315, p. 48-50.

GARFIELD III, N., 1990. The Brazil Current at subtropical latitudes. Tese de Doutorado, University of Rhode Island. 121pp.

HESS, K.W. & K.T. BOSLEY, 1992. Methodology for Validation of a Tampa Bay Circulation Model. **Proceedings, 2nd International Conference on Estuarine and Coastal Modeling**, Tampa, Florida, November 11-13, 1991. p. 83-94.

JAYKO, K. & E.HOWLETT, 1992. OILMAP an interactive oil spill model. In: **OCEANS 92**, October 22-26, 1992, Newport, RI.

KOLLURU, V.S., 1992. Influence of number of spilletts on spill model predictions. Applied Science Associates internal report, Narragansett, RI.

LANGE, P. & H. HÜHNERFUSS, 1978. Drift response of mono-molecular slicks to wave and wind action. **Journal of Physical Oceanography**, v. 8, p. 142-150.

LIMA, J.A.M., 1997. Oceanic Circulation on the Brazilian Shelf Break and Continental Slope at 22°S. Tese de doutorado. University of New South Wales, Austrália.

LIMA, J.A.; A. SARTORI, E.A. YASSUDA, J.E. PEREIRA & E. ANDERSON, 2003. Development of oil spill scenarios for contingency planning along the Brazilian coast. In: **International Oil Spill Conference**, 2003, Vancouver, BC, Canada.

MACKAY, D., S. PATERSON. & K. TRUDEL, 1980a. A mathematical model of oil spill behavior, Department of Chemical Engineering, University of Toronto, Canada, 39pp.

MACKAY, D., S. PATERSON & K. TRUDEL, 1980b. Oil spill processes and models Report EE-8, **Environmental Protection Service**, Canada.

MACKAY, D., W. SHUI, K. HOUSSAIN, W. STIVER, D. McCURDY & S. PATERSON, 1982. Development and calibration of an oil spill behavior model, Report No. CG-D027-83, US Coast Guard Research and Development Center, Groton, CT.

MELLOR, G.L. & T. YAMADA, 1982. Development of a turbulence closure models for geophysical fluid problems. **Rev. Geophys. Space Phys.**, 20, n. 4, 851-875.

OLIVEIRA, A.S. 1986. Interações entre Sistemas Frontais na América do Sul e Convecção na Amazônia. INPE-4008-TDL/239.

OKUBO, A. & R.V. OZMIDOV, 1970. Empirical dependence of the coefficient of horizontal turbulent diffusion on the ocean in the scale of the phenomenon in question. **Atmospheric and Ocean Physics**, 6(5): p. 534-536

OKUBO, A., 1971. Oceanic diffusion diagrams. **Deep Sea Research**, v. 8, p. 789-802

OLIVEIRA, A.S., 1986. Interações entre Sistemas Frontais na América do Sul e Convecção na Amazônia. INPE-4008-TDL/239.

PEREIRA, J.E.; YASSUDA, E.A. & CAMPOS, E. 2005. Development of an operational metocean modelling system, with applications in South America. In: 9<sup>th</sup> **International Conference on Estuarine and Coastal Modelling**, 2005. Charleston, SC, USA.

REED, M., E. GUNDLACH, & T. KANA, 1989. A coastal zone oil spill model: development and sensitivity studies, **Oil and Chemical Pollution**, Vol. 5, p. 411-449.

SATYAMURTI, P. & L.F. MATTOS, 1989. Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. *Mon. Wea. Rev.*, 108:410-520.

SIGNORINI, S.S., 1978. On the Circulation and volume transport of the Brazil Current between Cape of São Tomé and Guanabara Bay. **Deep Sea Res.**, 25, p. 481-490.3.

SPAULDING, M. L., HOWLETT, E., ANDERSON, E. & JAYKO, K., 1992a. OILMAP a global approach to spill modeling. **15th Arctic and Marine Oil Spill Program, Technical Seminar**, June 9-11, 1992, Edmonton, Alberta, Canada, p. 15-21.

SPAULDING, M.L., E. HOWLETT, E. ANDERSON & K. JAYKO, 1992b. Oil spill software with a shell approach. **Sea Technology**, April 1992. P. 33-40.

STIVER, W. & D. MACKAY, 1984. Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures. **Environmental Science and Technology**, 18:834-840.

STRAMMA, L.; Y. IKEDA. & R.G. PETERSEN, 1990. Geostrophic transport in the Brazil Current region, **Deep-Sea. Res.**, 37(12): p. 1875-1886.

TOKMAKIAN. R.T. & P.G CHALLENGOR, 1999. On the joint estimation of model and satellite sea surface height anomalies. **Ocean Modelling**, 1, 39-52.

WHITICAR, S., M. BOBRA, M. FINGAS, P. JOKUTY, P. LIUZZO, S. CALLAGHAN, S. ACKERMAN & J. CAO, 1992. A catalogue of crude oil and oil product properties 1992 (edition), Report #EE-144, Environment Canada, Ottawa, Canada.



## VIII EQUIPE TÉCNICA

### *Equipe da Empresa Consultora Applied Science Consultoria Ltda.*

<b>Profissional</b>	Ana Carolina da Rocha
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria Ltda
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	325047
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	IV, V e VI
<b>Assinatura</b>	

<b>Profissional</b>	Andrea Gallo Xavier
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria Ltda
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	58617
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	TODAS
<b>Assinatura</b>	

<b>Profissional</b>	Carlos Eduardo Simão
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	434226
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	IV, V e VI
<b>Assinatura</b>	

<b>Profissional</b>	Daniel Constantino Zacharias
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria Ltda
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	638533
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	I e II
<b>Assinatura</b>	

<b>Profissional</b>	Eduardo Yassuda
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria Ltda
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	060.184.738.5
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	94066
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	TODAS
<b>Assinatura</b>	

<b>Profissional</b>	Erika Naomi de Souza Tominaga
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria Ltda
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	980855
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	IV
<b>Assinatura</b>	

<b>Profissional</b>	Gabriel Clauzet
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria Ltda
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	1031373
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	I e II
<b>Assinatura</b>	

<b>Profissional</b>	José Edson Pereira
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria Ltda
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	326336
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	I, II e III
<b>Assinatura</b>	_____

<b>Profissional</b>	Maria Regina Fonseca Guimarães
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria Ltda
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	434231
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	I, II e III
<b>Assinatura</b>	_____

<b>Profissional</b>	Marco Antônio Corrêa
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria Ltda.
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	434236
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	I, II e III
<b>Assinatura</b>	_____

<b>Profissional</b>	Maurício Person Lammardo
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria Ltda.
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	272165
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	II, IV e V
<b>Assinatura</b>	_____

<b>Profissional</b>	Rafael Bonanata da Rocha
<b>Empresa</b>	ASA Consultoria Ltda.
<b>Registro no Conselho de Classe</b>	000.000.000-0
<b>Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental</b>	434253
<b>Responsável pela(s) Capítulo (s)</b>	II
<b>Assinatura</b>	