

# Modelagem do Transporte e Dispersão de Óleo no Mar para o FPSO Cidade de Niterói, Campo de Marlim Leste, Bacia de Campos



E&P

Revisão 00  
Out/2007



**PETROBRAS**



# **Modelagem do Transporte e Dispersão de Óleo no Mar para o FPSO Cidade de Niterói, Campo de Marlim Leste, Bacia de Campos**

**Revisão 00  
Outubro / 2007**



**E&P**







## ÍNDICE GERAL

RESUMO .....	1
I INTRODUÇÃO .....	I-1
I.1 ÁREA DE ESTUDO.....	I-2
I.1.1 CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS DA REGIÃO .....	I-3
I.1.2 CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS DA REGIÃO .....	I-5
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 CONTOURNO 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-9
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-2
III.3 RESUMO DA BASE HIDRODINÂMICA UTILIZADA.....	III-6
IV MODELAGEM DE DERRAME DE ÓLEO .....	IV-1
IV.1 MODELO OILMAP .....	IV-1
IV.1.1 FORMULAÇÃO DO MODELO .....	IV-4
IV.2 DADOS DE ENTRADA .....	IV-16
IV.2.1 CAMPO DE CORRENTES.....	IV-17
IV.2.2 DADOS DE VENTO .....	IV-18
IV.2.3 PONTO DE RISCO E VOLUMES .....	IV-21
IV.2.4 CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO UTILIZADO .....	IV-21
IV.3 CRITÉRIOS DE PARADA ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES .....	IV-22
IV.4 RESUMO DOS CENÁRIOS SIMULADOS .....	IV-23
V RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE DERRAME DE ÓLEO .....	V-1
V.1 SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS .....	V-1

---

V.2	CENÁRIOS DETERMINÍSTICOS CRÍTICOS .....	V-21
V.3	CENÁRIOS DETERMINÍSTICOS PARA AS CONDIÇÕES METEORÓLOGICAS E OCEANOGRÁFICAS MAIS FREQUENTES	V-33
VI	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	VI-1
VII	BIBLIOGRAFIA .....	VII-1
VIII	EQUIPE TÉCNICA.....	VIII-1



## TABELAS

TABELA	PÁG.
<b>Tabela I.1.2-1</b> - Amplitude (cm) e fase local (°) das principais componentes harmônicas para a estação maregráfica Porto de Macaé (RJ). Fonte: FEMAR (2000).	I-6
<b>Tabela II.2-1</b> - Resumo dos dados de entrada do <i>Parallel Ocean Climate Model</i> (POCM).	II-7
<b>Tabela IV.2.2-1</b> - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento para o período de verão do ano de 1992, na Bacia de Campos.	IV-20
<b>Tabela IV.2.2-2</b> - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento para período de inverno do ano de 1992, na Bacia de Campos.	IV-20
<b>Tabela IV.2.3-1</b> - Coordenadas (SAD 69) do ponto de risco localizado no Campo de Marlim Leste, Bacia de Campos.	IV-21
<b>Tabela IV.2.4-1</b> - Tipo de óleo utilizado nas simulações.	IV-22
<b>Tabela IV.2.4-2</b> - Características do óleo utilizado nas simulações.	IV-22
<b>Tabela IV.4-1</b> - Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derrames do óleo a partir do FPSO Cidade de Niterói, Bacia de Campos.	IV-24
<b>Tabela V.1-1</b> - Menor distância da mancha de óleo em relação à costa para o derrame de óleo durante o período de verão.	V-19
<b>Tabela V.1-2</b> - Extensão da linha de costa com probabilidade de ser atingida pelo derrame de óleo durante o período de inverno.	V-19
<b>Tabela V.1-3</b> - Resumo dos resultados da modelagem probabilística de pior caso ocorrendo durante os meses de inverno para o FPSO Cidade de Niterói.	V-19
<b>Tabela V.1-4</b> - Percentual de simulações com toque na costa para os cenários de inverno.	V-20
<b>Tabela V.1-5</b> - Lista de municípios com probabilidade de toque para os cenários de derrame de óleo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante o período de inverno.	V-20
<b>Tabela V.2-1</b> - Resumo do cenário determinístico crítico de verão.	V-21
<b>Tabela V.2-2</b> - Resumo do cenário determinístico crítico de inverno.	V-21
<b>Tabela V.3-1</b> - Resumo dos cenários determinísticos de verão e de inverno para as condições meteorológicas e oceanográficas mais frequentes de derrame de óleo a partir do FPSO Cidade de Niterói.	V-35



## FIGURAS

FIGURA	PÁG.
<b>Figura I.1-1</b> - Localização do FPSO Cidade de Niterói, Campo de Marlim Leste, na Bacia de Campos.	I-2
<b>Figura I.1.1-1</b> - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento NCEP no período de verão.	I-3
<b>Figura I.1.1-2</b> - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento NCEP no período de inverno.	I-4
<b>Figura I.1.1-3</b> - Campo de vento e pressão atmosférica obtidos das reanálises do NCEP para o dia 15 de junho de 2003, às 18GMT (deslocamento de um sistema frontal).	I-5
<b>Figura I.1.2-1</b> - Mapa cotidal de amplitude (cores) e fase (linhas) para a componente $M_2$ .	I-7
<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> - Base batimétrica para a modelagem hidrodinâmica.	II-8
<b>Figura II.3.1-3</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; (c) salinidade no verão e (d) salinidade no inverno.	II-10
<b>Figura III.1-1</b> - Comparação entre as séries temporais provenientes da previsão de maré (azul) e do modelo hidrodinâmico (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-3
<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-4
<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-5
<b>Figura III.3-1</b> - Exemplo ilustrativo de campo de velocidades obtidos com o modelo hidrodinâmico no ano de 1992.	III-6

FIGURA	PÁG.
<b>Figura V.1-1</b> - Grade definindo os contornos de terra (grade <i>land-water</i> ) para a modelagem de deriva de óleo a partir do FPSO Cidade de Niterói.	IV-17
<b>Figura IV.2.2-1</b> - Diagrama <i>stick plot</i> dos valores médios diários de dados de vento durante o período de janeiro a dezembro de 1992 (convenção vetorial).	IV-18
<b>Figura IV.2.2-2</b> - Histograma direcional dos vetores de vento para (a) verão (Jan.-Mar.) e (b) inverno (Jun.-Ago.), Bacia de Campos.	IV-19
<b>Figura V.1-1</b> - Cenário FPSO_CN_VER_8_30D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 8 m <sup>3</sup> (instantâneo) após 30 dias de simulação.	V-2
<b>Figura V.1-2</b> - Cenário FPSO_CN_VER_200_6H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 200 m <sup>3</sup> (instantâneo), após 6 horas de simulação.	V-3
<b>Figura V.1-3</b> - Cenário FPSO_CN_VER_200_30D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 200 m <sup>3</sup> (instantâneo), após 30 dias de simulação.	V-4
<b>Figura V.1-4</b> - Cenário FPSO_CN_VER_PC_12H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 294.549 m <sup>3</sup> (durante 24 horas), após 12 horas de simulação.	V-5
<b>Figura V.1-5</b> - Cenário FPSO_CN_VER_PC_36H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 294.549 m <sup>3</sup> (durante 24 horas), após 36 horas de simulação.	V-6
<b>Figura V.1-6</b> - Cenário FPSO_CN_VER_PC_60H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 294.549 m <sup>3</sup> (durante 24 horas), após 60 horas de simulação.	V-7
<b>Figura V.1-7</b> - Cenário FPSO_CN_VER_PC_31D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 294.549 m <sup>3</sup> (durante 24 horas), após 31 dias de simulação.	V-8
<b>Figura V.1-8</b> - Cenário FPSO_CN_INV_8_30D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 8 m <sup>3</sup> (instantâneo), após 30 dias de simulação.	V-9

FIGURA	PÁG.
<b>Figura V.1-9</b> - Cenário FPSO_CN_INV_200_6H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m <sup>3</sup> (instantâneo), após 6 horas de simulação.	V-10
<b>Figura V.1-10</b> - Cenário FPSO_CN_INV_200_30D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m <sup>3</sup> (instantâneo), após 30 dias de simulação.	V-11
<b>Figura V.1-11</b> - Cenário FPSO_CN_INV_PC_12H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 294.549 m <sup>3</sup> (durante 24 horas), após 12 horas de simulação.	V-12
<b>Figura V.1-12</b> - Cenário FPSO_CN_INV_PC_36H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 294.549 m <sup>3</sup> (durante 24 horas), após 36 horas de simulação.	V-13
<b>Figura V.1-13</b> - Cenário FPSO_CN_INV_PC_60H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 294.549 m <sup>3</sup> (durante 24 horas), após 60 horas de simulação.	V-14
<b>Figura V.1-14</b> - Cenário FPSO_CN_INV_PC_31D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 294.549 m <sup>3</sup> (durante 24 horas), após 31 dias de simulação.	V-15
<b>Figura V.1-15</b> - Cenário FPSO_CN_INV_PC_31D_SHORE. Probabilidades de toque na costa para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 294.549 m <sup>3</sup> (durante 24 horas), após 31 dias de simulação.	V-16
<b>Figura V.1-16</b> - Cenário FPSO_CN_INV_PC_31D_SHOREMED. Volume médio de óleo por km de costa para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 294.549 m <sup>3</sup> (durante 24 horas), após 31 dias de simulação.	V-17
<b>Figura V.1-17</b> - Cenário FPSO_CN_INV_PC_31D_SHOREMAX. Volume máximo de óleo por km de costa para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 294.549 m <sup>3</sup> (durante 24 horas), após 31 dias de simulação.	V-18
<b>Figura V.2-1</b> - Cenário determinístico crítico para um derrame de óleo ocorrido a partir do FPSO Cidade de Niterói, no período de verão.	V-22

FIGURA	PÁG.
<b>Figura V.2-2</b> - Balanço de massa para o cenário determinístico crítico de verão.	V-23
<b>Figura V.2-3</b> - Diagrama <i>stick plot</i> dos vetores de vento para o cenário determinístico crítico de verão, a partir do início da simulação até o instante de maior proximidade da costa.	V-23
<b>Figura V.2-4</b> - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística crítica de verão.	V-24
<b>Figura V.2-5</b> - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo 69 horas após o início da simulação determinística crítica de verão.	V-25
<b>Figura V.2-6</b> - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo 132 horas após o início da simulação determinística crítica de verão.	V-26
<b>Figura V.2-7</b> - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante de maior proximidade da costa para a simulação determinística crítica de verão.	V-27
<b>Figura V.2-8</b> - Cenário determinístico crítico para um derrame de óleo ocorrido a partir do FPSO Cidade de Niterói, no período de inverno.	V-28
<b>Figura V.2-9</b> - Balanço de massa para o cenário determinístico crítico de inverno.	V-29
<b>Figura V.2-10</b> - Diagrama <i>stick plot</i> dos vetores de vento para o cenário determinístico crítico de inverno, a partir do início da simulação até o primeiro toque na costa.	V-29
<b>Figura V.2-11</b> - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística crítica de inverno.	V-30
<b>Figura V.2-12</b> - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo 42 horas após o início da simulação determinística crítica de inverno.	V-31
<b>Figura V.2-13</b> - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo 156 horas após o início da simulação determinística crítica de inverno.	V-32
<b>Figura V.2-14</b> - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante de primeiro toque na costa da simulação determinística crítica de inverno.	V-33
<b>Figura V.3-1</b> - Frequência de ocorrência das direções de correntes extraídas do modelo hidrodinâmico durante os meses de verão.	V-34
<b>Figura V.3-2</b> - Frequência de ocorrência das direções de correntes extraídas do modelo hidrodinâmico durante os meses de inverno.	V-34

FIGURA	PÁG.
<b>Figura V.3-3</b> - Cenário determinístico mais freqüente para um derrame de óleo ocorrido a partir do FPSO Cidade de Niterói, no período de verão.	V-36
<b>Figura V.3-4</b> - Balanço de massa para o cenário determinístico freqüente de verão.	V-37
<b>Figura V.3-5</b> - Diagrama <i>stick plot</i> dos vetores de vento para o cenário determinístico mais freqüente de verão, a partir do início da simulação até o instante de maior proximidade da costa.	V-37
<b>Figura V.3-6</b> - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística mais freqüente de verão.	V-38
<b>Figura V.3-7</b> - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo 28 horas após o início da simulação determinística mais freqüente de verão.	V-39
<b>Figura V.3-8</b> - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante de maior proximidade da costa para a simulação determinística mais freqüente de verão.	V-40
<b>Figura V.3-9</b> - Cenário determinístico mais freqüente para um derrame de óleo ocorrido a partir do FPSO Cidade de Niterói, no período de inverno.	V-41
<b>Figura V.3-10</b> - Balanço de massa para o cenário determinístico freqüente de verão.	V-42
<b>Figura V.3-11</b> - Diagrama <i>stick plot</i> dos vetores de vento para o cenário determinístico mais freqüente de inverno, a partir do início da simulação até o instante de maior proximidade da costa.	V-42
<b>Figura V.3-12</b> - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística mais freqüente de inverno.	V-43
<b>Figura V.3-13</b> - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo 22 horas após o início da simulação determinística mais freqüente de inverno.	V-44
<b>Figura V.3-14</b> - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante de maior proximidade da costa para a simulação determinística mais freqüente de inverno.	V-45





## RESUMO

O sistema de modelos OILMAP da *Applied Science Associates (ASA), Inc.* foi utilizado para definir a área potencialmente ameaçada por derrames de óleo, decorrentes das atividades de desenvolvimento da produção do Módulo II do Campo de Marlim Leste, Bacia de Campos, a partir do FPSO Cidade de Niterói.

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 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 294.549 m<sup>3</sup> derramados ao longo de 24 horas, correspondente ao afundamento do FPSO Cidade de Niterói. A partir dos resultados dessas simulações probabilísticas foram selecionados os cenários determinísticos críticos para condições de verão e inverno, utilizando como critérios a menor distância da mancha em relação à costa e o menor tempo de chegada do óleo na costa, respectivamente. Adicionalmente, foram realizadas simulações determinísticas de verão e inverno considerando as condições meteorológicas e oceanográficas mais frequentes.

O critério de parada adotado nas simulações foi o tempo de 30 dias para o acompanhamento de cada partícula. Além deste critério de parada propriamente dito, foi adotado o corte de espessuras inferiores a 300 nm nas simulações e apresentações de resultados.

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 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.

Os resultados das simulações probabilísticas mostraram que não houve toque na costa durante o período de verão e que, no inverno, a probabilidade de toque é igual ou inferior a 20%.

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 à HABTEC/PETROBRAS no desenvolvimento de Estudos Ambientais na Bacia de Campos, apresenta-se este trabalho de modelagem computacional da trajetória e intemperismo de óleo decorrente de um potencial acidente com derrame de petróleo a partir do FPSO Cidade de Niterói, no âmbito do desenvolvimento da produção do Módulo II do Campo de Marlim Leste.

As modelagens foram conduzidas através da utilização de um sistema de modelos conhecido como OILMAP, desenvolvido pela **Applied Science Associates (ASA), Inc.** 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, (c) séries temporais de vento de longa duração (preferencialmente de bóias *offshore* e/ou estação meteorológica costeira) e (d) caracterização físico-química do óleo.

Foram conduzidas simulações probabilísticas para determinar contornos de probabilidade da mancha atingir a área de estudo a partir de três classes de derrame, como definido na Resolução CONAMA nº 293/01 (Brasil, 2001): pequeno, com 8 m<sup>3</sup>; médio, com 200 m<sup>3</sup>; e pior caso, com 294.549 m<sup>3</sup> derramados ao longo de 24 horas, correspondente ao afundamento do FPSO Cidade de Niterói. A partir dos resultados dessas simulações probabilísticas foram selecionados os cenários determinísticos críticos para condições de verão e inverno, utilizando como critérios a menor distância da mancha em relação à costa e o menor tempo de chegada do óleo na costa, respectivamente. Adicionalmente, foram realizadas simulações determinísticas de verão e inverno considerando as condições meteorológicas e oceanográficas mais frequentes.

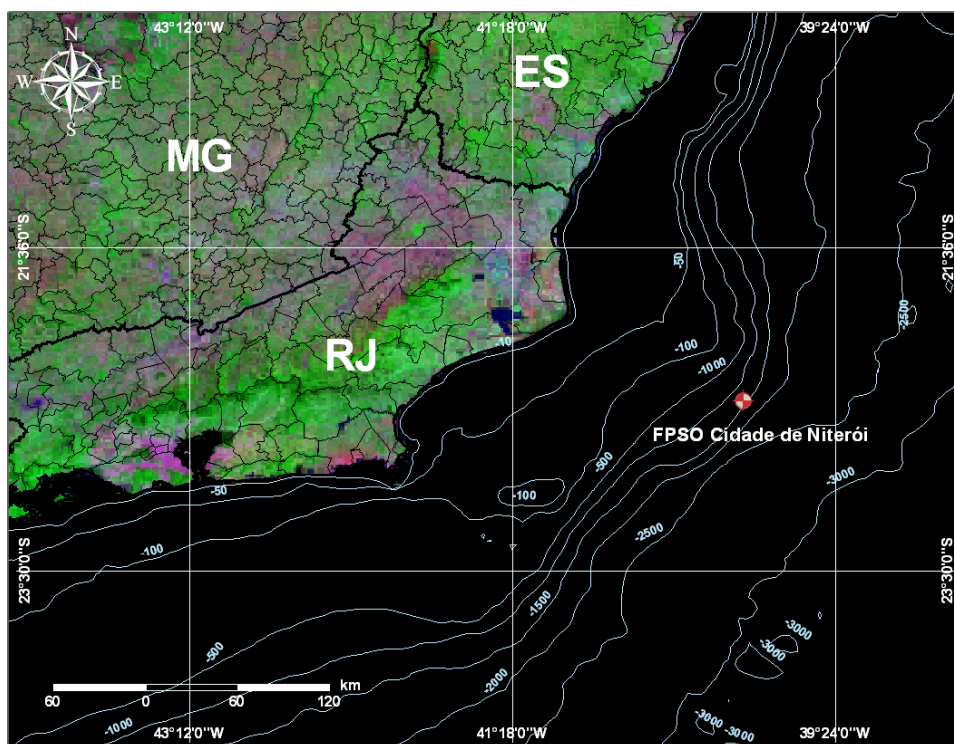
Para a modelagem de transporte da mancha de óleo foram utilizados dados de vento obtidos da bóia oceanográfica da PETROBRAS localizada no Campo de Albacora. A caracterização dos padrões de circulação na região foi realizada a

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. Por fim, o Capítulo VII apresenta as considerações finais para o presente estudo.

## I.1 ÁREA DE ESTUDO

A figura I.1-1 apresenta a localização do FPSO Cidade de Niterói no Campo de Marlim Leste, Bacia de Campos, para o qual foram realizadas as simulações numéricas de potenciais acidentes com derrame de petróleo.

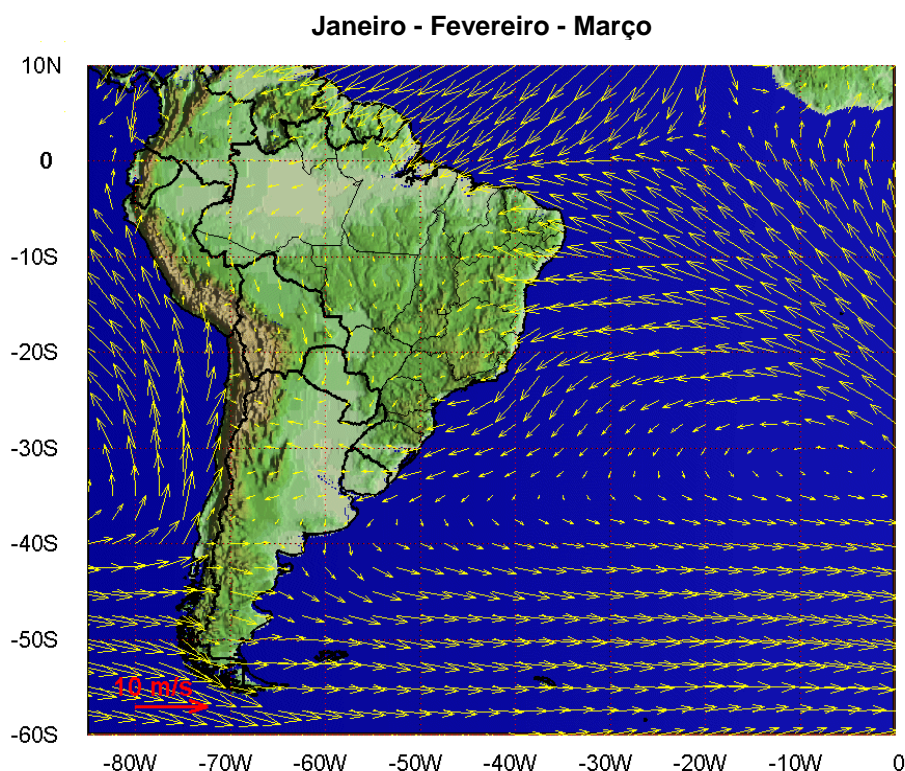


**Figura I.1-1** - Localização do FPSO Cidade de Niterói, Campo de Marlim Leste, na Bacia de Campos.

### I.1.1 Características Meteorológicas da Região

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

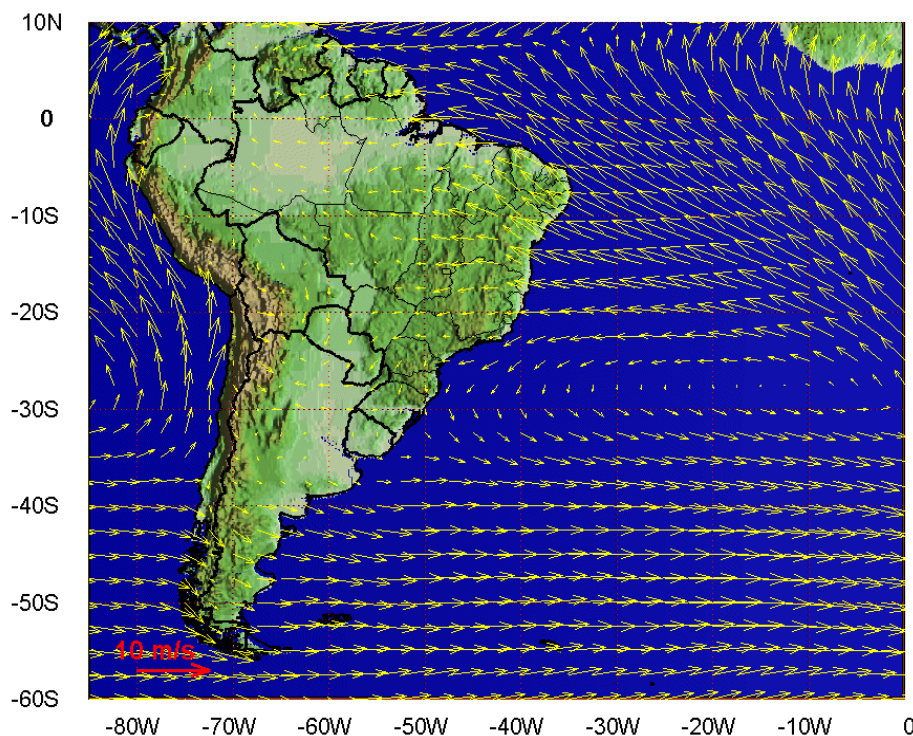
A variabilidade sazonal do padrão de ventos na região sudeste devido ao deslocamento da ASAS é caracterizado pelo predomínio de ventos de nordeste no verão e ventos de leste no inverno (embora próximo à costa, ainda predominem os ventos de nordeste). Este padrão é ilustrado na figura I.1.1-1 e na figura I.1.1-2, 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 NCEP<sup>1</sup>. 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.



**Figura I.1.1-1** - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento NCEP no período de verão.

<sup>1</sup> National Centers for Environmental Prediction – dados de reanálise fornecidos por NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, a partir do Web site em <http://www.cdc.noaa.gov/>.



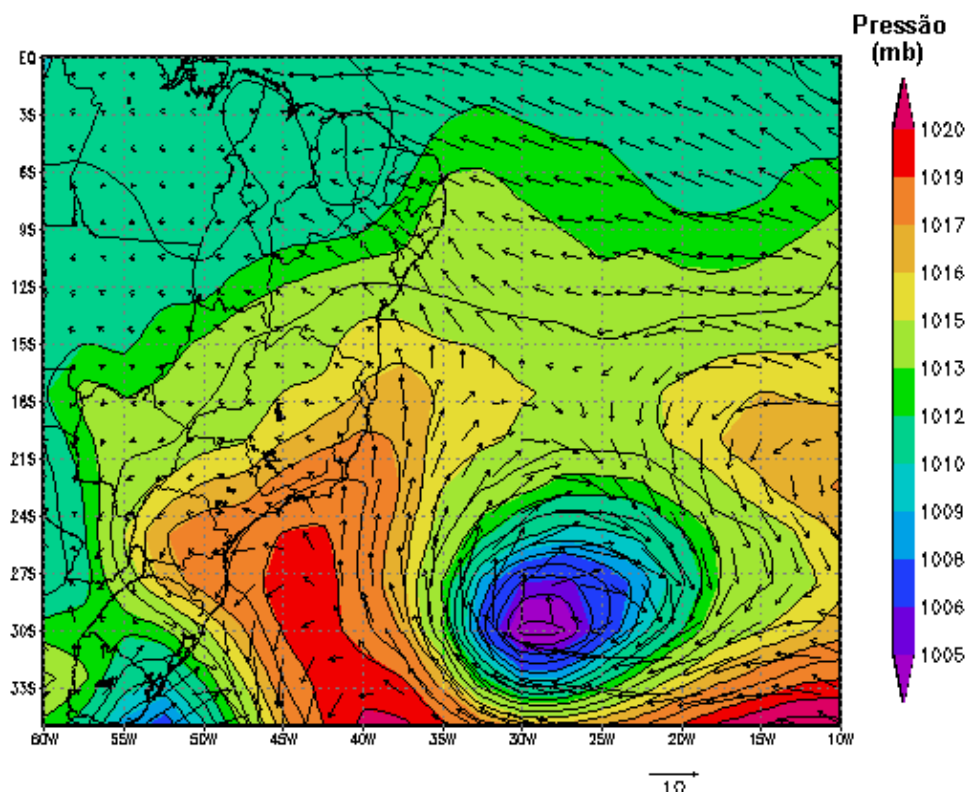
**Junho - Julho - Agosto**

**Figura I.1.1-2** - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento NCEP no período de inverno.

Os sistemas frontais atuam durante o ano todo sobre o Brasil com frequências maiores nas latitudes mais altas e menores nas latitudes mais baixas, como se nota 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. A figura I.1.1-3 ilustra um instantâneo do vento NCEP a 10 m de altura para a América do Sul, em situação de deslocamento de um sistema frontal.

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).



**Figura I.1.1-3** - Campo de vento e pressão atmosférica obtidos das reanálises do NCEP para o dia 15 de junho de 2003, às 18GMT (deslocamento de um sistema frontal).

### **I.1.2 Características Oceanográficas da Região**

A circulação oceânica nesta área é determinada por forçantes 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.

A maré astronômica na região é predominantemente semidiurna, conforme indicam as constantes harmônicas para a estação maregráfica Porto de Macaé da FEMAR<sup>2</sup> (22°23,0'S e 41°47,0'W), apresentadas na tabela I.1.2-1. Observa-se que as principais componentes para a região são  $M_2$  e  $S_2$ , com amplitudes de 36,9 cm e 19,1 cm, respectivamente. A componente  $O_1$  tem amplitude de 10,0 cm e todas as demais componentes apresentam amplitude inferior a 6,0 cm.

**Tabela I.1.2-1 - Amplitude (cm) e fase local (°) das principais componentes harmônicas para a estação maregráfica Porto de Macaé (RJ). Fonte: FEMAR (2000).**

Nome da Estação :		PORTO MACAÉ – RJ			
Localização :		No Terminal de Imbitiba da Petrobras			
Organ. Responsável :		PETROBRÁS / CENPES			
Latitude :		22° 23,0' S	Longitude :		41° 47,0' W
Período Analisado :		13/01392 a 14/01/93		Nº de Componentes : 50	
Análise Harmônica :		Método Almirante Santos Franco			
Classificação :		Maré de Desigualdades Diurnas			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		- H - min	Nível Médio (Zo):		- cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :		- cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		- cm acima do NR.
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :		- cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		- cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) Graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU <sub>2</sub>	1,4	100
Ssa	-	-	N <sub>2</sub>	4,6	102
Mm	-	-	NU <sub>2</sub>	-	-
Mf	-	-	M <sub>2</sub>	36,9	082
MTM	-	-	L <sub>2</sub>	-	-
Msf	-	-	T <sub>2</sub>	-	-
Q <sub>1</sub>	2,6	062	S <sub>2</sub>	19,1	091
O <sub>1</sub>	10,0	092	K <sub>2</sub>	5,4	081
M <sub>1</sub>	0,9	108	MO <sub>3</sub>	0,3	028
P <sub>1</sub>	2,1	135	M <sub>3</sub>	0,4	129
K <sub>1</sub>	5,9	148	MK <sub>3</sub>	0,2	071
J <sub>1</sub>	-	-	MN <sub>4</sub>	1,2	342
OO <sub>1</sub>	-	-	M <sub>4</sub>	2,4	025
MNS <sub>2</sub>	-	-	SN <sub>4</sub>	0,2	051
2N <sub>2</sub>	1,0	105	MS <sub>4</sub>	1,1	113
Referências de Nível: Não informadas					
Obs: Observação feita com marégrafo digital, e estudo realizado pelo IOUSP Não disponíveis outros dados					

Código BNDO: NC

- 177 -

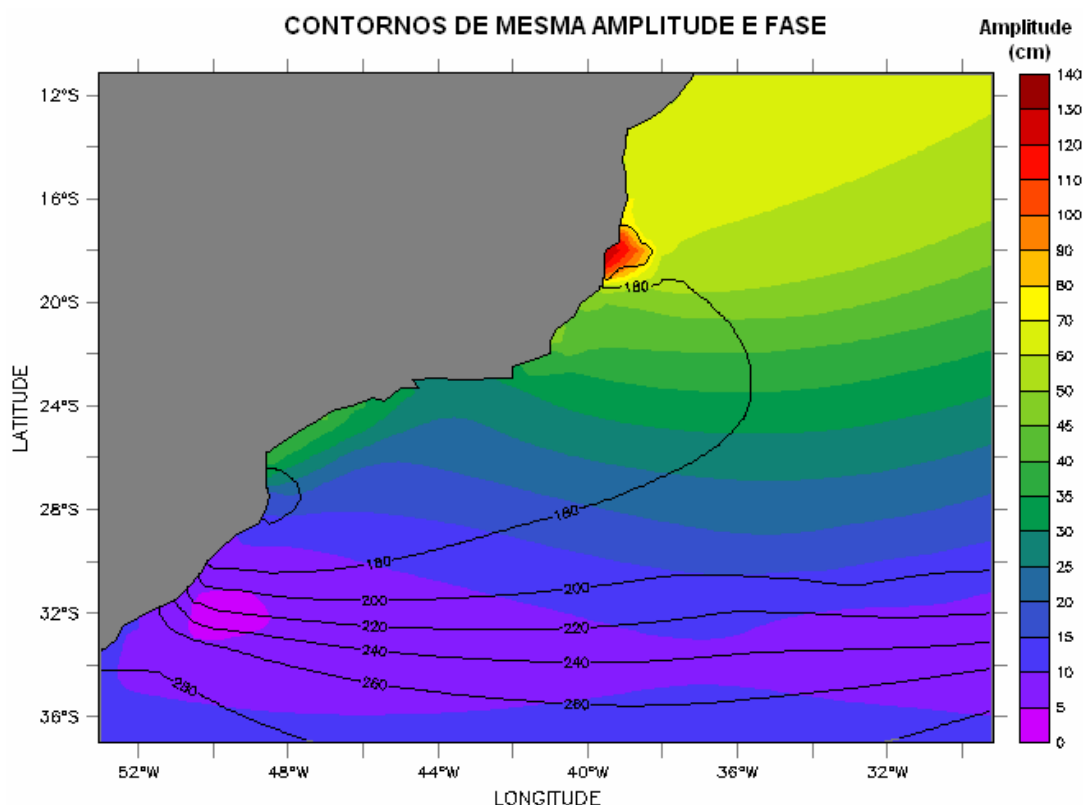
Código BNDO: NC

- 177 -

<sup>2</sup> Fundação de Estudos do Mar.



A figura I.1.2-1 apresenta o mapa cotidal, com as isolinhas de fase sobrepostas à amplitude de maré para a costa sul-sudeste brasileira (CSR3<sup>3</sup>). Observa-se ser esta uma região de pequena resposta a forçante astronômica da maré, fato esperado pela relativamente pequena largura da plataforma continental. Exceção feita ao platô de Abrolhos e região interna da Bacia de Santos, onde há evidente amplificação do sinal de maré.



**Figura I.1.2-1** - Mapa cotidal de amplitude (cores) e fase (linhas) para a componente  $M_2$ .

Com relação à CB, sabe-se que parte significativa de seu fluxo passa através dos canais dos Bancos de Abrolhos e se divide 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 da CB 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

<sup>3</sup> Center for Space Research da Universidade do Texas ([www.csr.utexas.edu](http://www.csr.utexas.edu)).

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 consequência 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.

## II MODELO HIDRODINÂMICO

Nesta etapa do trabalho foi implementada uma estrutura numérica (*i.e.* modelos hidrodinâmicos), visando simular os campos 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.

O campo de correntes obtido foi o resultado de uma soma ponderada dos vetores de velocidade obtidos a partir de simulações com o POM e o POCM, para os períodos de verão e inverno. Em região de plataforma continental foi considerado um peso maior aos resultados do POM, que diminuiu em direção à região de águas profundas, onde o peso maior foi dado aos resultados do POCM.

### II.1 DESCRIÇÃO DO PRINCETON OCEAN MODEL

O modelo numérico hidrodinâmico utilizado para a simular as condições na plataforma continental foi baseado no *Princeton Ocean Model* (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 está incluído o 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 acima mencionados, o modelo adota soluções largamente utilizadas na literatura, como gradeamento do tipo C de Arakawa e métodos de integração diferenciados 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 três 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:

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

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,

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

$$\tilde{W} \equiv 1 + E_2 \left( \frac{l}{kL} \right)^2 \quad (\text{II.1.1-11})$$

$$(L)^{-1} \equiv (\eta - z)^{-1} + (H + z)^{-1} \quad (\text{II.1.1-12})$$

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 sal ( $m^2/s$ );
$F_H$ , $F_S$	=	parametrização (em termos de processos de mistura horizontal) para processos de pequena escala não resolvidos diretamente pela grade do modelo.
$q^2 / 2$	=	energia cinética turbulenta;
$l$	=	escala característica de comprimento para o movimento turbulento;
$\tilde{W}$	=	função proximidade-do-contorno;
$k$	=	constante de von Karman ( $k=0,4$ );
$F_{q^2, q^2 l}$	=	termos horizontais de mistura para $q^2$ e $q^2 l$ .

### 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 no talude continental e oceano profundo 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<sup>4</sup>.

O modelo POCM é considerado pela comunidade oceanográfica do WOCE<sup>5</sup> o mais sofisticado para descrever a circulação oceânica, sendo capaz de reproduzir os fluxos da CB que afetam diretamente a região sudeste. 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 0,25° e já foi utilizado em vários artigos publicados, como em Tokmakian & Challenor (1999).

<sup>4</sup> European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

<sup>5</sup> World Ocean Circulation Experiment.



**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>6</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

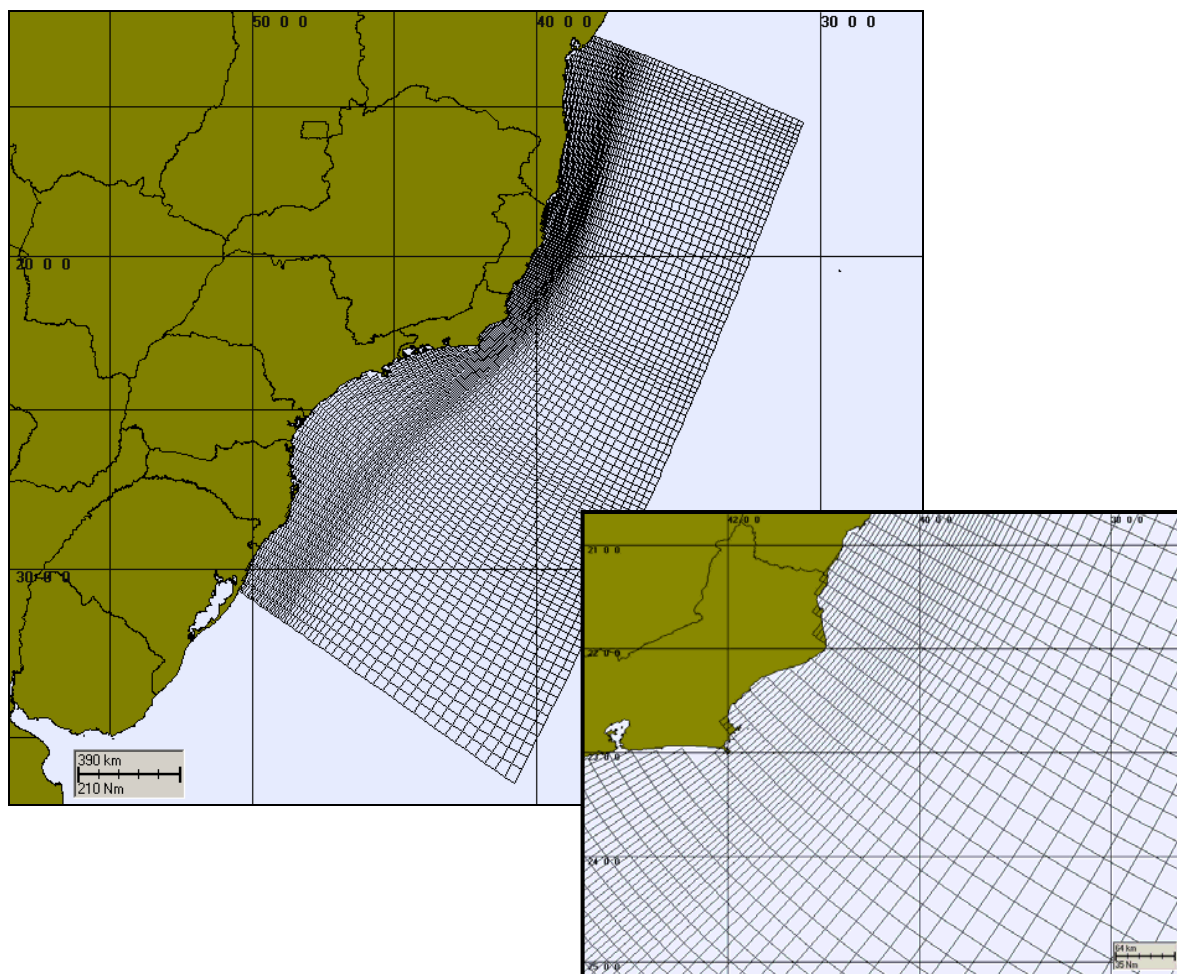
A grade final gerada para a região da Bacia de Campos possui dimensão horizontal máxima de 70x100 pontos, com resolução média de aproximadamente 3.000 m (figura II.3.1-1). A grade geral implementada representou um compromisso entre os objetivos do projeto, a capacidade computacional para o período de 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 CB no talude continental).

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>7</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 e planície abissal foi também utilizada a base de dados do ETOPO 2, do NGDC/NOAA<sup>8</sup>, reamostrada para um espaçamento de 10'. Esses pontos encontram-se ilustrados na figura II.3.1-2.

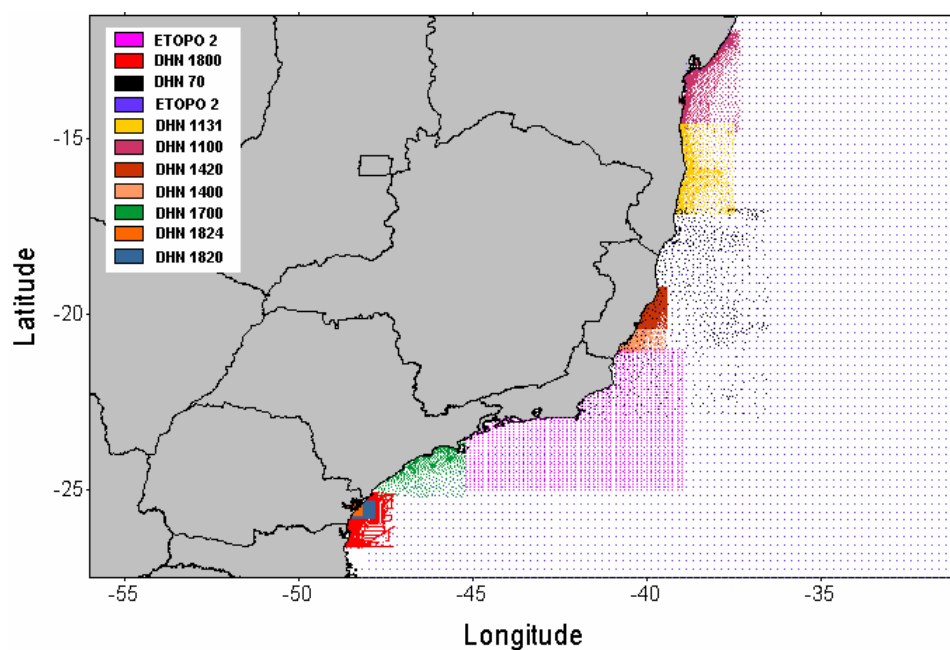
<sup>6</sup> <http://ingrid.lidgo.columbia.edu/SOURCES/.LEVITUS94>.

<sup>7</sup> Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha.

<sup>8</sup> National Geophysical Data Center da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

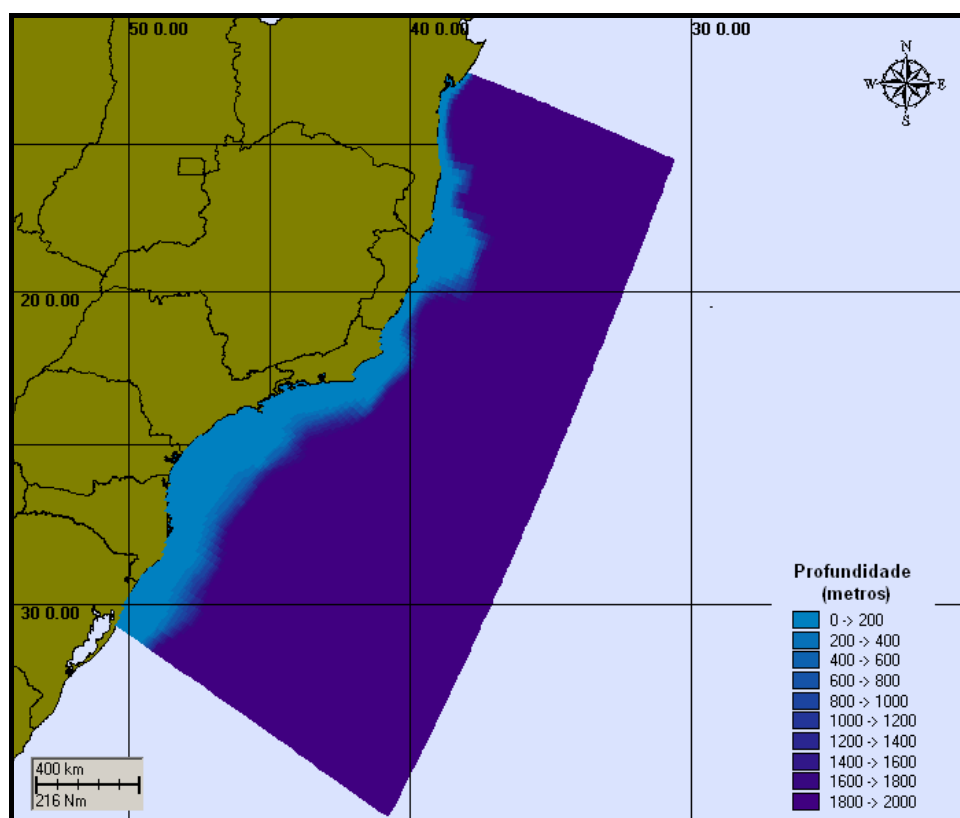


**Figura II.3.1-1** - Grade computacional utilizada nas simulações da circulação hidrodinâmica da Bacia de Campos.



**Figura II.3.1-2** - Base batimétrica para a modelagem hidrodinâmica.

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.3.1-3).



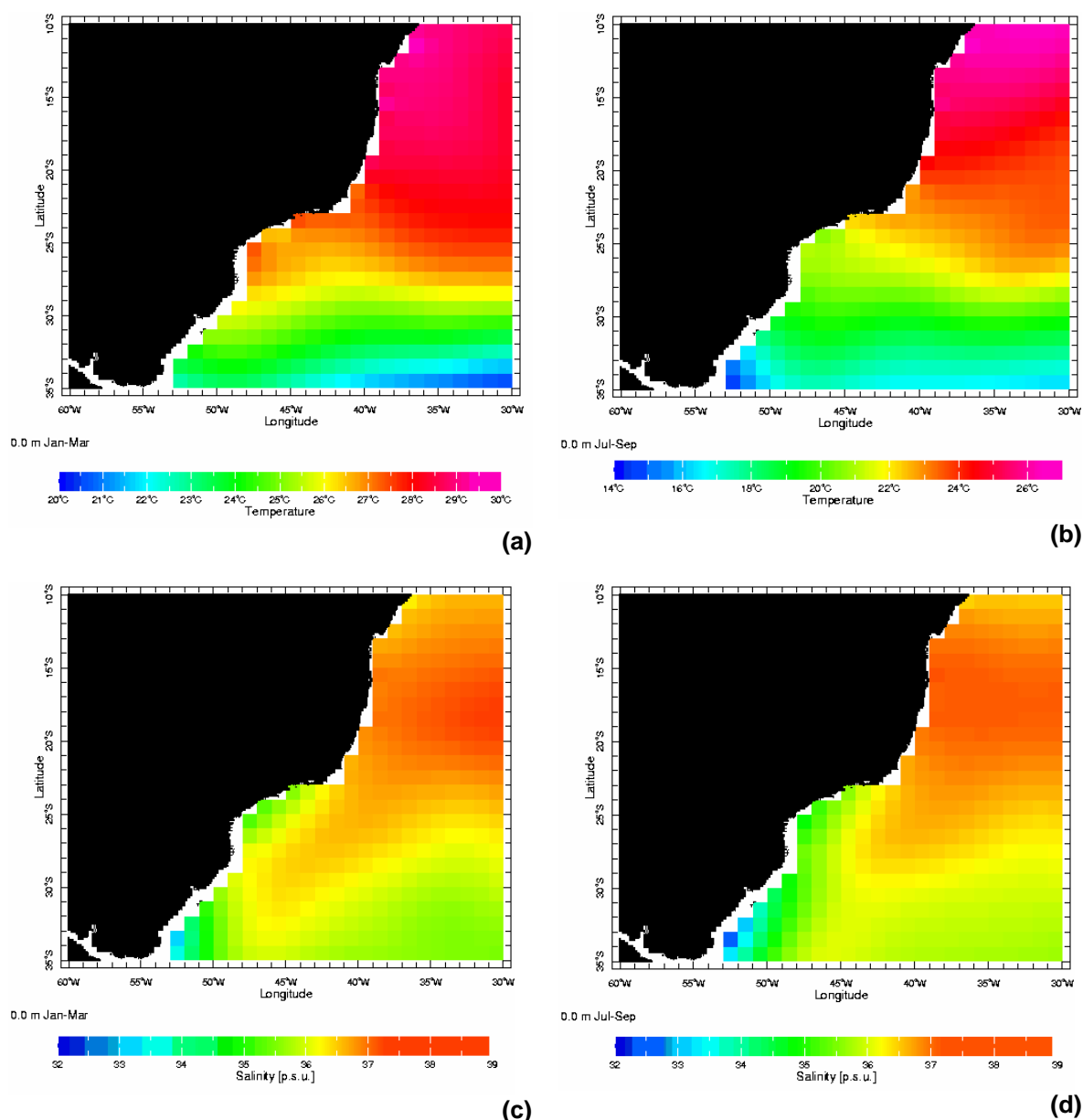
**Figura II.3.1-3** - Batimetria discretizada do domínio considerado na Bacia de Campos.

## 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. Nos contornos abertos foram utilizados campos (provenientes do CSR3) com variação espacial de amplitude e fase das componentes de maré mais significativas na região, com energia superior a 10% da energia da  $M_2$ .

### 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. A figura II.3.3-1 ilustra 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; (c) salinidade no verão e (d) salinidade no inverno.**

### III CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

Para comparação com os resultados do modelo foram selecionados dados de corrente coletados no Ponto C (PC), na Bacia de Campos, cujas coordenadas são 22°43'0,12"S e 41°16'0,12"W, pertencentes ao banco de dados da PETROBRAS. Esses dados abrangem o período compreendido entre 12 de julho e 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 FEMAR para a região do Cabo de São Tomé, nas coordenadas 22°07'42"S e 41°03'12"W.

Para a calibração do modelo foi adotada a seguinte metodologia: (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 25h, incluindo assim a influência de sistemas frontais, e por alta os sinais com período entre 11h e 13h, sendo influenciado principalmente pela componente de maré.

A comparação entre os resultados do modelo e as séries utilizadas (dados) foi quantificada através de um coeficiente utilizado como parâmetro de comparação, Hess & Bosley (1992), cuja formulação é comumente utilizada na literatura científica para a comparação de duas séries temporais com periodicidades relativamente definidas. O coeficiente de comparação é definido pela normalização do erro quadrático médio, dado pela fórmula:

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

onde

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

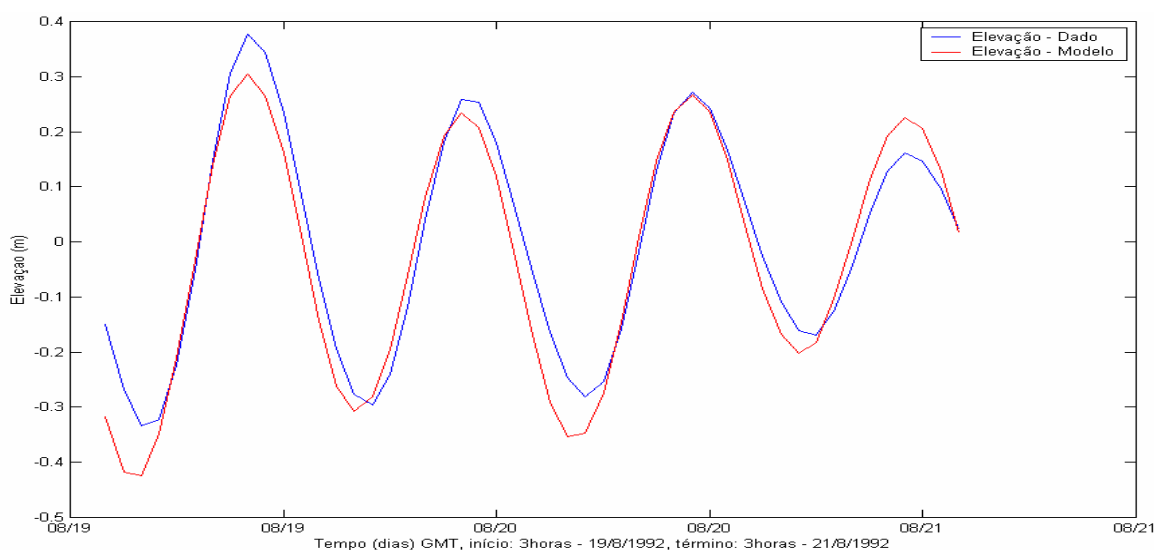
$\bar{A}$  = range médio do dado;

$P$  = 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 comparação 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.

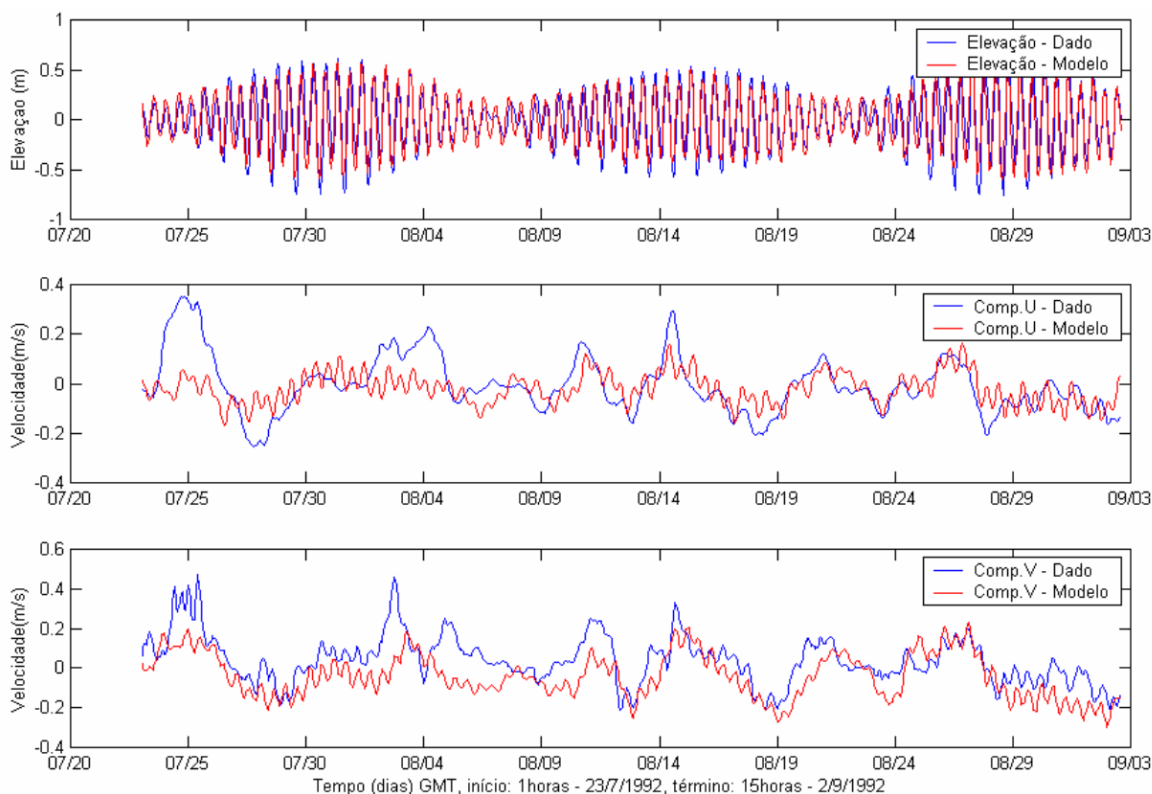


**Figura III.1-1** - Comparação entre as séries temporais provenientes da previsão de maré (azul) e do modelo hidrodinâmico (vermelho) entre os dias 19 e 21 de agosto de 1992.

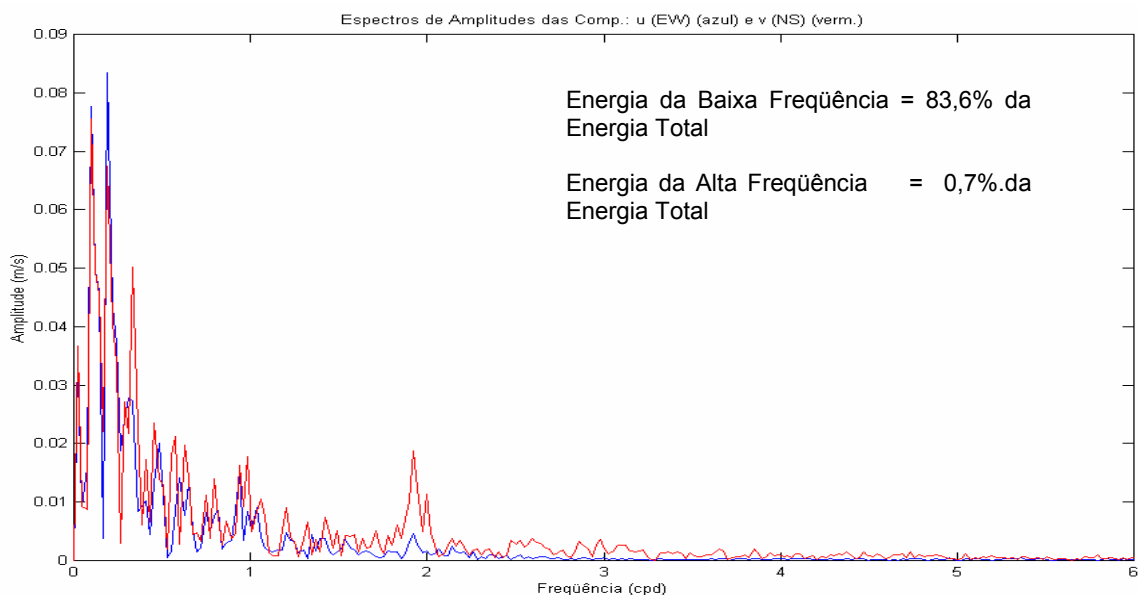
### III.2 CALIBRAÇÃO PARA AS CORRENTES

Na figura III.2-1 estão reproduzidas as séries temporais dos dados e 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.

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.



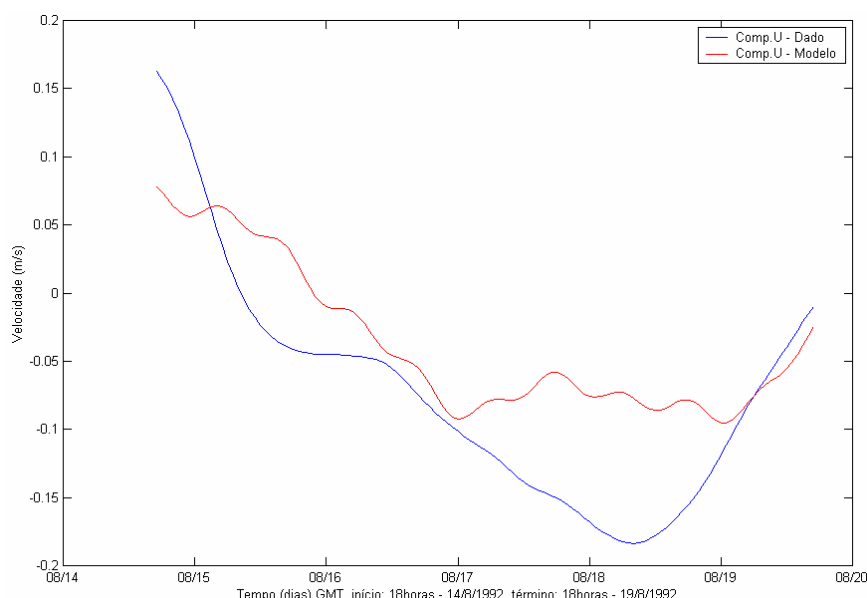
**Figura III.2-1** - Séries temporais da elevação FEMAR (azul) e das componentes *u* (E-W) e *v* (N-S) dos dados PETROBRAS (azul) e as reproduzidas pelo modelo (vermelho).



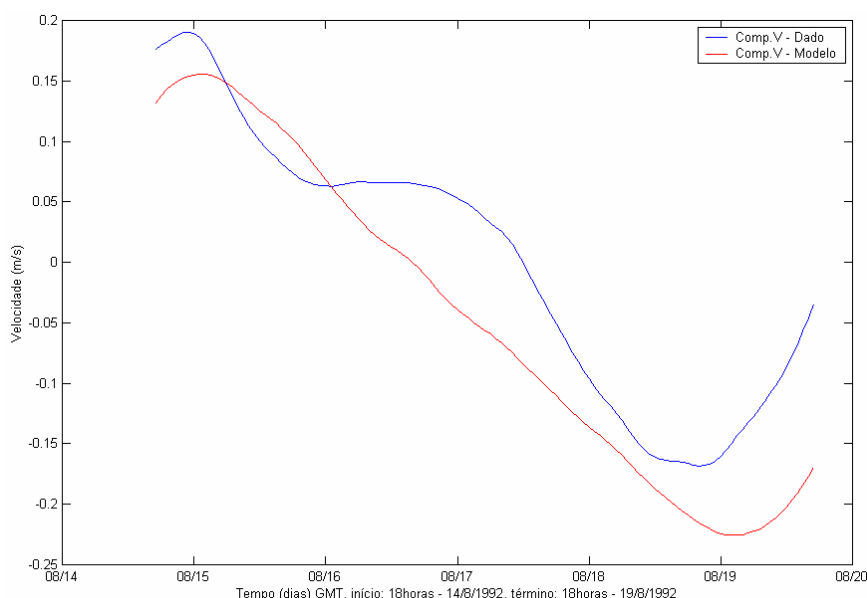
**Figura III.2-2** - Espectros de amplitude das componentes *u* (E-W) (azul) e *v* (N-S) (vermelho) dos dados de corrente da PETROBRAS.



Deste modo, priorizou-se o ajuste do modelo na baixa frequência. Os coeficientes de comparação (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).



(a)



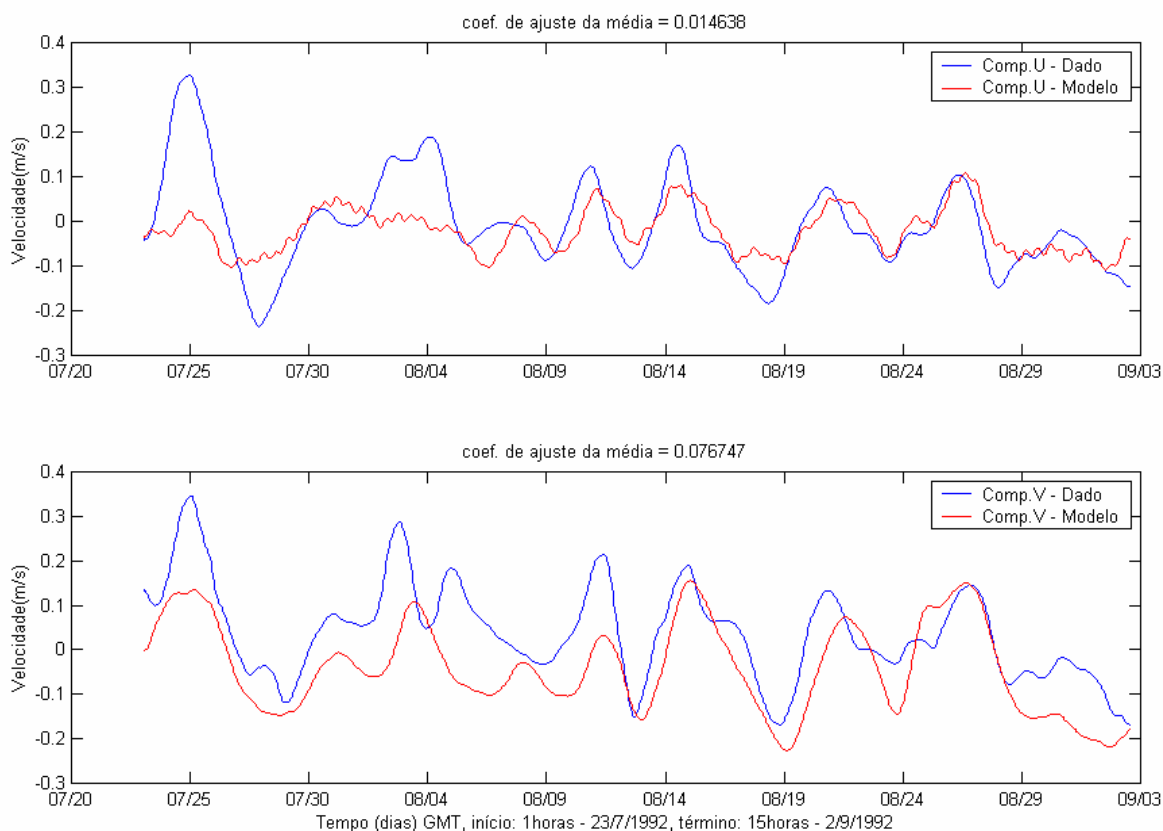
(b)

**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.**



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.2-4.

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.



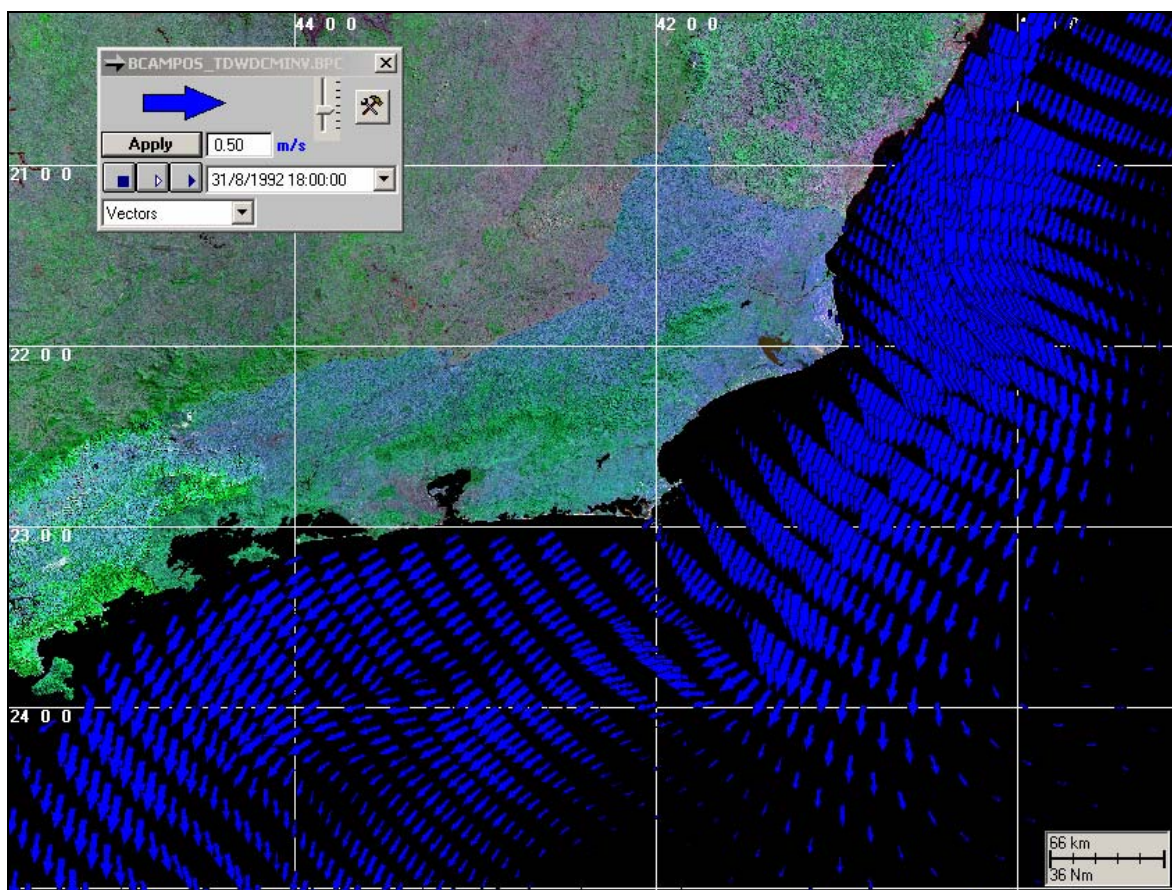
**Figura III.2-4** - Séries temporais do sinal de baixa frequência das componentes  $u$  (E-W) e  $v$  (N-S) dos dados PETROBRAS (azul) e calculada pelo modelo (vermelho), entre os dias 22 de julho e 2 de setembro de 1992, utilizados na calibração da corrente média residual.

### III.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.

Os índices de ajuste obtidos no processo de calibração, fato válido para qualquer estudo envolvendo modelagem numérica no oceano, devem ser compreendidos e analisados dentro de margens de erro pouco mensuráveis. Esses limites, usuais em qualquer simulação hidrodinâmica, são decorrentes da complexidade da circulação numa região específica, aliada à quantidade de informação anterior existente e ao fato da comparação entre os resultados do modelo e as medições realizarem-se sempre em pontos restritos no espaço e no tempo.

Embora se tenha conseguido bom ajuste do modelo hidrodinâmico à região, deve-se lembrar que seus resultados são específicos para um dado período e determinados pelo atual nível de conhecimento na área de estudo. A extrapolação desses resultados no espaço e no tempo é sempre possível, sendo esta uma das vantagens da utilização de ferramentas numéricas. No entanto, é recomendável manterem-se margens de segurança suficientes na análise dos resultados.

## 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.1.1 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 ( $\vec{X}_t$ ) de uma dada partícula, num determinado instante  $t$ , é definido como:

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

onde

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

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

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

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

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

onde

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

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

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

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

$\vec{U}_p$  = 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,  $\vec{U}_t$ , e ao fluxo residual,  $\vec{U}_r$ , 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:

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

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

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),  $\bar{A}_{tk}$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ), é definido por:

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

onde

$A_{tk}$  = área superficial da mancha ( $\text{m}^2$ );

$K_1$  = taxa de espalhamento constante ( $\text{s}^{-1}$ );

$V_m$  = volume da superfície da mancha ( $\text{m}^3$ );

$t$  = 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 ( $\text{m}^2/\text{s}$ ), 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 ( $\text{m}^2$ );

$K_1$  = taxa de espalhamento constante ( $\text{s}^{-1}$ );

$V_m$  = volume de óleo de uma partícula ( $\text{m}^3$ );

$R_s$  = 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 ( $\text{m}^3$ );

$R$  = constante universal dos gases;

$T$  = temperatura ambiente (K).

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

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

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,  $Q_d$  ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ), expressa como:

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

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 ( $\text{J/m}^2$ );

$S$  = 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 ( $\text{g/cm}^3$ );

$a = -0,1023$ ,  $b = 07,572$  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 ( $\text{J/m}^3\text{s}$ ), 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 ( $\text{g/cm}^3$ ).

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,  $D_d$  ( $\text{J/m}^2$ ), 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 ( $\text{kg/m}^3$ );

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

$H$  = 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 ( $\text{m/s}$ );

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

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

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

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

onde

$A$  = área superficial da mancha ( $\text{m}^2$ );

$dt$  = passo de tempo (s);

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

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

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

onde

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

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

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

onde

$d_i$  = diâmetro da gotícula (m);

$g$  = constante gravitacional ( $\text{m/s}^2$ );

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

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

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

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

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

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

onde

$D_v$  = coeficiente de dispersão vertical ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

O coeficiente de dispersão vertical,  $D_v$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ), 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.2 DADOS DE ENTRADA

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

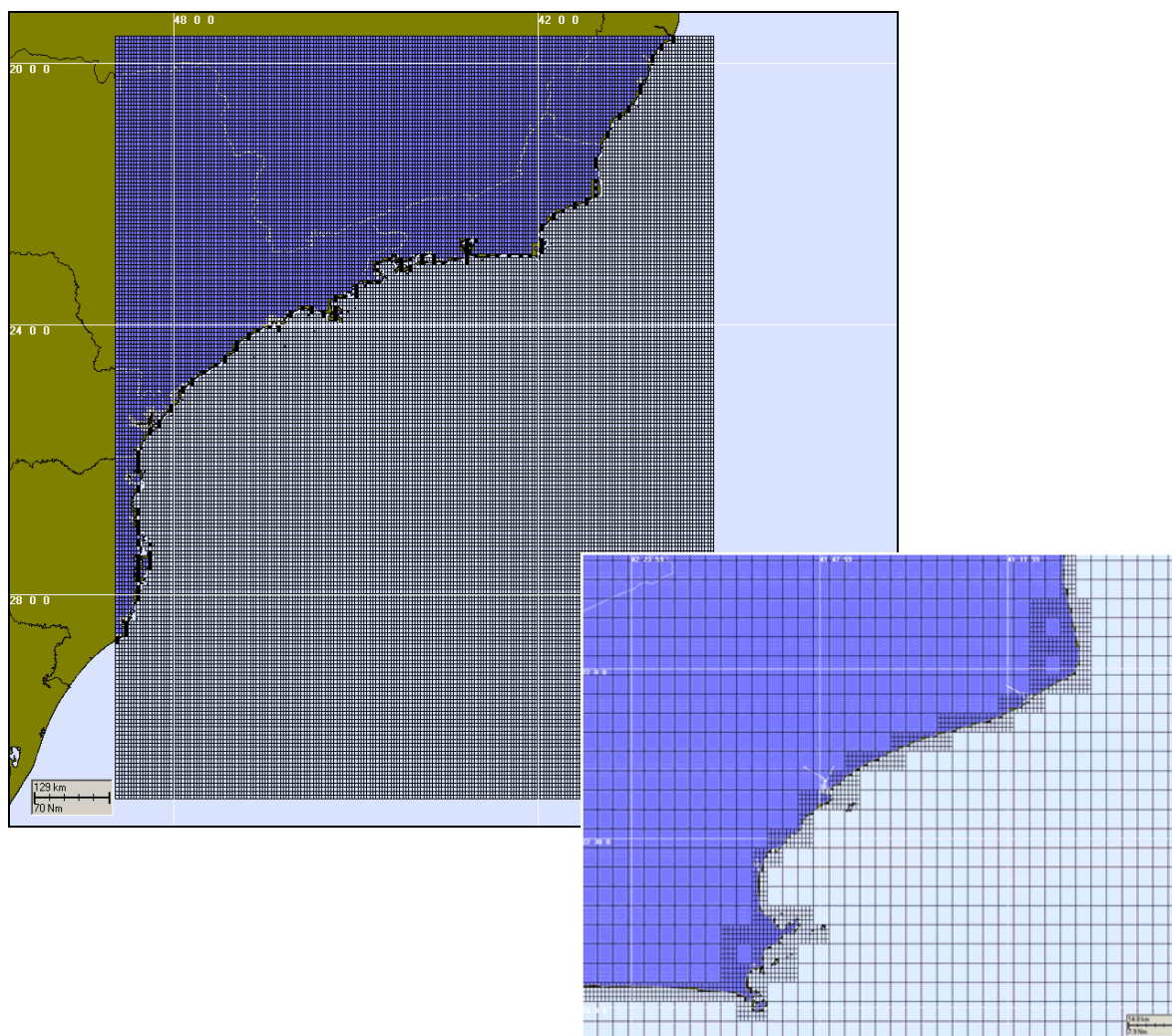
- ✓ localização geográfica do ponto de derrame;
- ✓ data e horário;
- ✓ duração do derrame;
- ✓ volume derramado;
- ✓ tipo de óleo;
- ✓ duração da simulação;
- ✓ opções de resposta (e.g., barreiras, sobrevôo, dispersantes);
- ✓ campo de correntes;
- ✓ arquivo de dados meteorológicos;
- ✓ opções de saída;
- ✓ 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.

### IV.2.1 Campo de Correntes

Os campos de correntes utilizados na modelagem do transporte e dispersão de óleo derramado a partir do FPSO Cidade de Niterói, Bacia de Campos, 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 três meses: verão (janeiro a março) e inverno (junho a agosto).

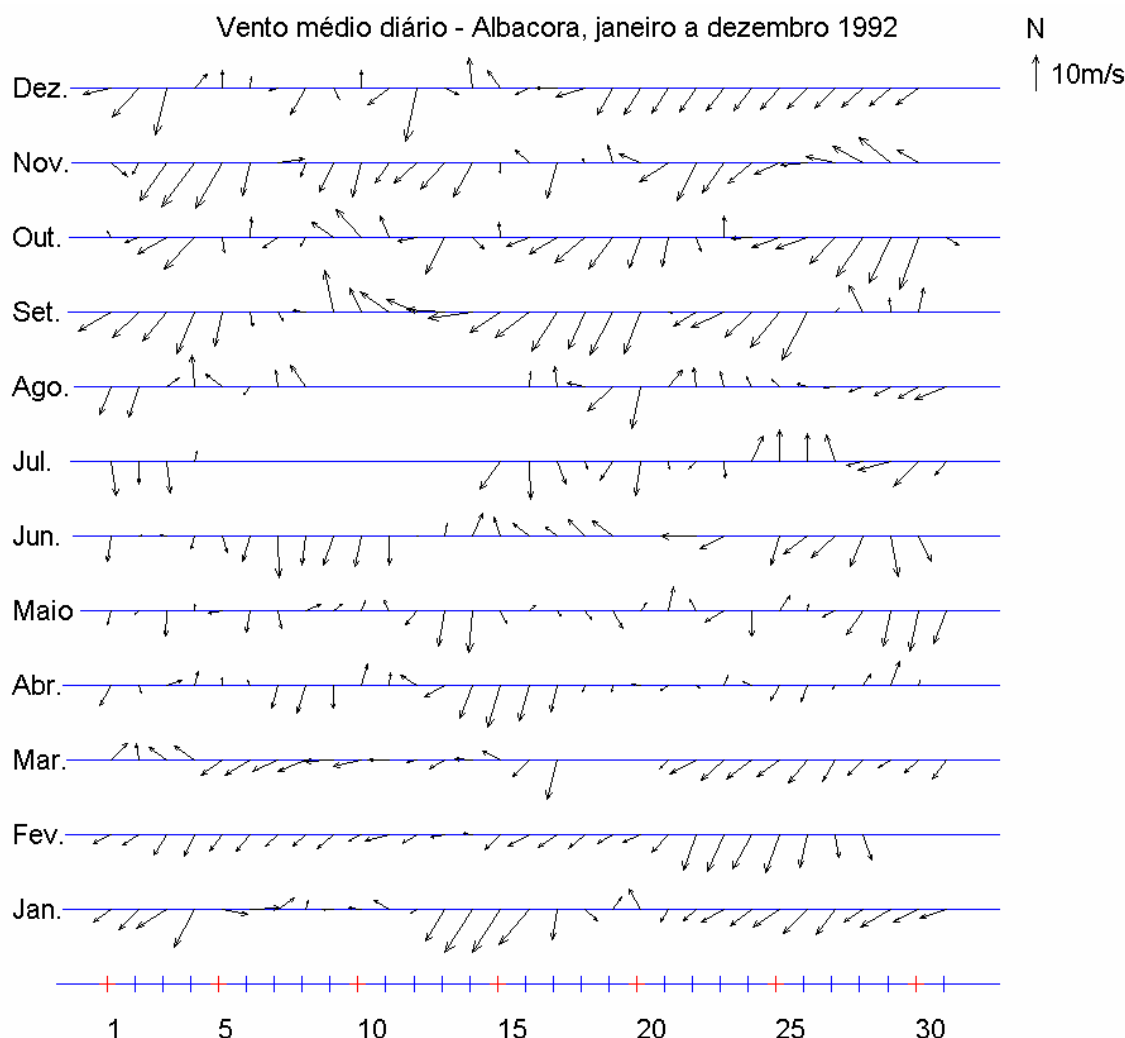
Para a elaboração dos cenários de deriva para acidentes com petróleo a partir do FPSO Cidade de Niterói foi definida uma grade *land-water* com dimensões de 250x250 pontos (figura IV.2.1-1).



**Figura V.1-1** - Grade definindo os contornos de terra (grade land-water) para a modelagem de deriva de óleo a partir do FPSO Cidade de Niterói.

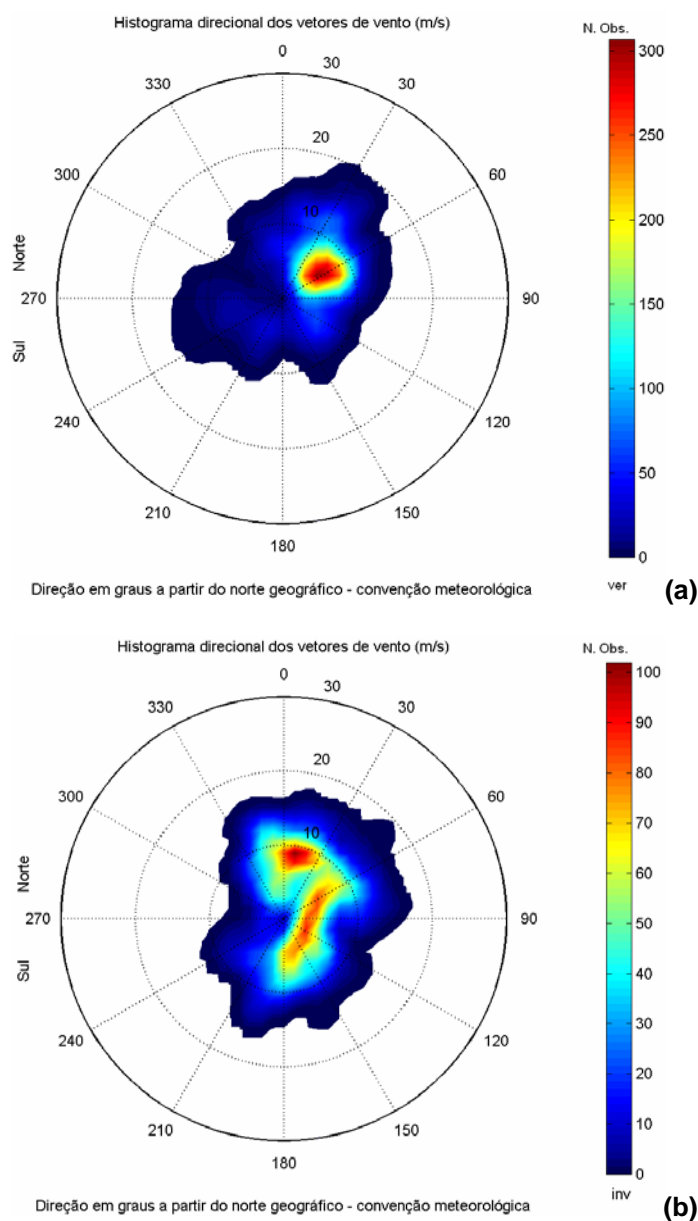
## IV.2.2 Dados de Vento

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, nas coordenadas 22°30'S e 40°W. Esses dados foram fornecidos pelo Centro de Pesquisas da PETROBRAS (CENPES), para o ano de 1992, com intervalo de amostragem de 3 horas. Há algumas lacunas nos dados, como indica a figura IV.2.2-1, que apresenta o *stick plot* dos valores médios diários para os mesmos. Para sua utilização na modelagem, estes dados foram interpolados.



**Figura IV.2.2-1** - Diagrama *stick plot* dos valores médios diários de dados de vento durante o período de janeiro a dezembro de 1992 (convenção vetorial).

A figura IV.2.2-2 apresenta os histogramas direcionais dos dados de vento para os períodos de (a) verão (janeiro a março) e (b) inverno (junho a agosto). A direção apresentada refere-se ao norte geográfico e segue a convenção meteorológica. A intensidade é apresentada em (m/s) e a escala de cores representa o número de observações (N.Obs.). Observam-se ventos predominantes de leste-nordeste nos meses de verão, e dos quadrantes norte e leste, nos meses de inverno.



**Figura IV.2.2-2** - Histograma direcional dos vetores de vento para (a) verão (Jan.-Mar.) e (b) inverno (Jun.-Ago.), Bacia de Campos.

A tabela IV.2.2-1 apresenta a distribuição de ocorrência conjunta de intensidades e direções do vento para o período de verão. As intensidades estão em (m/s) e as direções são apresentadas em graus a partir do Norte geográfico seguindo a convenção meteorológica. Observa-se que os ventos mais freqüentes são provenientes das direções ENE, NE e NNE (26,9%, 24,8% e 14,8%). Os ventos mais fortes registrados foram provenientes de NNE e NE (17,5 m/s).

**Tabela IV.2.2-1 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento para o período de verão do ano de 1992, na Bacia de Campos.**

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total	%	Dir. méd.
0,0- 1,0	0	1	1	1	3	4	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0,4	85
1,0- 2,0	1	1	1	3	4	7	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	22	1,0	70
2,0- 3,0	1	3	5	10	14	6	2	0	2	1	1	1	2	1	2	0	51	2,3	82
3,0- 4,0	0	4	24	23	10	9	6	1	8	1	1	0	1	1	1	1	91	4,2	76
4,0- 5,0	4	26	79	38	18	13	6	9	3	17	2	5	2	0	0	4	226	10,3	64
5,0- 6,0	5	24	72	85	13	22	17	5	0	10	5	4	2	0	2	2	268	12,3	64
6,0- 7,0	27	42	51	107	18	16	17	5	0	3	6	6	5	0	3	7	313	14,3	56
7,0- 8,0	10	35	84	97	32	8	9	4	0	5	4	5	9	1	2	4	309	14,1	55
8,0- 9,0	11	25	75	126	18	6	7	0	0	8	1	6	1	2	0	4	290	13,3	57
9,0-10,0	9	24	44	50	10	2	1	1	0	0	1	2	4	0	0	8	156	7,1	44
10,0-11,0	6	27	34	28	2	0	0	2	0	0	0	3	7	0	0	6	115	5,3	35
11,0-12,0	11	38	21	10	3	0	0	1	0	0	1	0	2	0	0	1	88	4,0	31
12,0-13,0	12	55	17	10	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	97	4,4	29
13,0-14,0	1	7	11	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	21	1,0	30
14,0-15,0	0	4	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0,6	36
15,0-16,0	0	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0,4	33
16,0-17,0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0,2	38
17,0-18,0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0,4	35
Total	98	324	542	598	142	92	66	28	14	45	22	35	37	6	12	39	2090		
Porc.	4,5	14,8	24,8	26,9	6,5	4,2	3,0	1,3	0,6	2,1	1,0	1,6	1,7	0,3	0,5	1,8			
Vel. méd.	8,4	9,0	7,7	7,2	6,1	5,0	5,8	6,2	3,3	5,6	6,3	7,5	8,0	5,2	4,6	7,6			
Vel. máx.	13,4	17,5	17,5	12,9	11,8	9,8	9,3	11,3	4,6	8,7	11,3	13,4	12,3	8,7	7,2	11,8			
Percts. (0,9)	12,0	12,0	11,0	9,0	9,0	7,0	8,0	9,7	4,0	8,0	8,3	10,0	10,8	8,0	7,0	10,0			

A tabela IV.2.2-2 apresenta a distribuição de ocorrência conjunta de intensidades e direções do vento para o período de inverno. Os ventos mais freqüentes foram de N, NNE e ENE (11,1%, 9,0% e 8,9%) e os ventos mais intensos observados foram provenientes de NE (16,5 m/s).

**Tabela IV.2.2-2 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento para período de inverno do ano de 1992, na Bacia de Campos.**

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total	%	Dir. méd.
0,0- 1,0	4	1	1	3	3	4	4	8	5	5	1	3	6	5	5	0	58	2,6	191
1,0- 2,0	2	3	0	3	5	5	4	3	1	2	5	11	6	4	5	4	63	2,9	256
2,0- 3,0	5	3	0	3	2	3	3	1	0	1	1	5	2	1	6	7	43	1,9	341
3,0- 4,0	10	8	4	12	34	22	30	22	4	3	1	1	0	1	4	8	164	7,4	103
4,0- 5,0	11	5	12	29	8	10	11	20	21	2	1	2	1	0	6	11	150	6,8	97
5,0- 6,0	13	5	15	25	9	4	15	9	24	6	7	1	0	0	5	8	146	6,6	96
6,0- 7,0	26	10	16	22	8	10	19	9	22	5	8	1	0	0	1	14	171	7,7	77
7,0- 8,0	16	17	10	8	1	4	14	12	14	5	8	3	0	0	0	14	126	5,7	79
8,0- 9,0	42	44	26	26	3	1	8	16	24	11	4	2	0	0	5	20	232	10,5	37
9,0-10,0	45	53	25	22	9	0	6	13	11	2	0	0	0	0	0	11	197	8,9	36
10,0-11,0	28	17	21	20	8	0	2	3	9	7	0	1	0	0	0	16	132	6,0	35
11,0-12,0	13	7	4	14	4	0	1	0	3	5	0	0	0	0	0	8	59	2,7	36
12,0-13,0	21	16	5	4	1	1	0	0	0	3	0	0	0	0	0	13	64	2,9	11
13,0-14,0	9	4	3	5	4	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0	3	32	1,4	33
14,0-15,0	0	6	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0,4	34
15,0-16,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	
16,0-17,0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,0	49
Total	245	199	144	197	100	64	117	117	138	60	36	30	15	11	37	137	1647		
Porc.	11,1	9,0	6,5	8,9	4,5	2,9	5,3	5,3	6,3	2,7	1,6	1,4	0,7	0,5	1,7	6,2			
Vel. méd.	8,4	8,8	8,2	7,3	5,9	4,1	5,3	5,7	6,7	7,4	5,5	3,3	1,3	1,1	3,6	7,8			
Vel. máx.	13,9	14,4	16,5	14,9	14,4	12,3	11,3	13,9	11,8	13,9	8,7	10,3	4,6	3,1	8,7	13,9			
Percts. (0,9)	12,0	12,0	10,1	11,0	10,5	6,1	8,0	9,0	9,0	11,5	7,9	7,5	2,0	2,4	8,0	12,0			



### IV.2.3 Ponto de Risco e Volumes

As coordenadas do ponto de risco (FPSO Cidade de Niterói) foram especificadas pela HABTEC/PETROBRAS conforme a tabela IV.2.3-1.

**Tabela IV.2.3-1** - Coordenadas (SAD 69) do ponto de risco localizado no Campo de Marlim Leste, Bacia de Campos.

PONTO	LATITUDE	LONGITUDE	LÂMINA D'ÁGUA (m)
FPSO Cidade de Niterói	22°29'45,956"S	39°56'13,258" W	1.370

Fonte: HABTEC/PETROBRAS.

Os volumes utilizados nas simulações foram definidos segundo a Resolução CONAMA<sup>9</sup> nº 293/01:

- Pequeno: 8 m<sup>3</sup>;
- Médio: 200 m<sup>3</sup>;
- Pior caso: 294.549 m<sup>3</sup>.

O volume de pior caso foi definido como o volume correspondente ao afundamento do FPSO Cidade de Niterói. Portanto, 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 m<sup>3</sup>) e médio (200 m<sup>3</sup>), considerou-se o vazamento de todo o volume de óleo instantaneamente, ou seja, no instante inicial da simulação.

### IV.2.4 Características do Produto Utilizado

Com base nas informações disponíveis para a área em estudo foram realizadas simulações com o óleo representativo da acumulação do Módulo II do Campo de Marlim Leste, conforme a tabela IV.2.4-1.

<sup>9</sup> Conselho Nacional do Meio Ambiente.



**Tabela IV.2.4-1 - Tipo de óleo utilizado nas simulações.**

NOME	GRAU API
Óleo representativo da acumulação do módulo II	28,1

Fonte: PETROBRAS.

As características definidas para o óleo cru, utilizado nas simulações, são apresentadas na tabela IV.2.4-2 e são provenientes dos bancos de dados da PETROBRAS e da [ASA](#).

**Tabela IV.2.4-2 - Características do óleo utilizado nas simulações.**

PARÂMETRO	VALOR
Nome do óleo	Óleo representativo da acumulação do módulo II
Densidade	0,8826 g/cm <sup>3</sup>
Viscosidade dinâmica a 25°C	21,521 cP
Tensão interfacial	25,2 din/cm
Conteúdo máximo de água para emulsões	70,0%
Espessura mínima	0,1 mm
Ponto de ebulição inicial	384,2 K
Gradiente da curva de evaporação	494,21
Constante de evaporação A	8,00
Constante de evaporação B	12,55

### IV.3 CRITÉRIOS DE PARADA ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES

Segundo o Termo de Referência CGPEG/DILIC/IBAMA N° 013/07 (TR 013/07), as simulações de derrame de óleo devem ser interrompidas caso sejam satisfeitas quaisquer das três condições, abaixo:

- não existência de óleo no mar com espessura superior ao valor mínimo de  $3 \times 10^{-7}$  m;
- todo óleo do vazamento remanescente no mar atinge a costa;
- tempo de simulação completa 30 dias após o final do vazamento.

Com base nessas condições, o critério de parada adotado nas simulações foi o tempo de 30 dias para o acompanhamento de cada partícula, ou seja, as simulações com volume de pior caso (afundamento de FPSO ao longo de 24 horas) foram de 31 dias, completando 30 dias após o final do vazamento. No caso dos volumes pequeno e médio (derrame instantâneo), as simulações foram conduzidas por 30 dias. Além deste critério de parada propriamente dito, foi adotado o corte de espessuras inferiores a 300 nm nas simulações e apresentações de resultados.

A associação do critério de parada adotado (30 dias para acompanhamento das partículas) com o corte de espessuras (300 nm) satisfaz as condições solicitadas pelo TR 013/07. Salienta-se que, quando a mancha atinge a espessura de 300 nm (mesmo num tempo inferior a 30 dias), o modelo OILMAP considera como se não houvesse passado óleo naquela determinada região.

#### **IV.4 RESUMO DOS CENÁRIOS SIMULADOS**

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 (1º 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 IV.4-1 apresenta os cenários simulados neste estudo de vazamento a partir do FPSO Cidade de Niterói. Observa-se que para as simulações com volume médio também foi considerado o tempo de 6 horas e que nas simulações com volume de pior caso também foram considerados os tempos intermediários de 12, 36 e 60 horas.

**Tabela IV.4-1 - Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derrames do óleo a partir do FPSO Cidade de Niterói, Bacia de Campos.**

CENÁRIOS	PRODUTO (ÓLEO)	VOLUME (m <sup>3</sup> )	ESTAÇÃO DO ANO	TEMPO DE SIMULAÇÃO
FPSO_CN_VER_8_30D	Módulo II de Marlim Leste	8	Verão	30 dias
FPSO_CN_VER_200_6H	Módulo II de Marlim Leste	200	Verão	6 horas
FPSO_CN_VER_200_30D	Módulo II de Marlim Leste	200	Verão	30 dias
FPSO_CN_VER_PC_12H	Módulo II de Marlim Leste	294.549	Verão	12 horas
FPSO_CN_VER_PC_36H	Módulo II de Marlim Leste	294.549	Verão	36 horas
FPSO_CN_VER_PC_60H	Módulo II de Marlim Leste	294.549	Verão	60 horas
FPSO_CN_VER_PC_31D	Módulo II de Marlim Leste	294.549	Verão	31 dias
FPSO_CN_INV_8_30D	Módulo II de Marlim Leste	8	Inverno	30 dias
FPSO_CN_INV_200_6H	Módulo II de Marlim Leste	200	Inverno	6 horas
FPSO_CN_INV_200_30D	Módulo II de Marlim Leste	200	Inverno	30 dias
FPSO_CN_INV_PC_12H	Módulo II de Marlim Leste	294.549	Inverno	12 horas
FPSO_CN_INV_PC_36H	Módulo II de Marlim Leste	294.549	Inverno	36 horas
FPSO_CN_INV_PC_60H	Módulo II de Marlim Leste	294.549	Inverno	60 horas
FPSO_CN_INV_PC_31D	Módulo II de Marlim Leste	294.549	Inverno	31 dias

## **V RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE DERRAME DE ÓLEO**

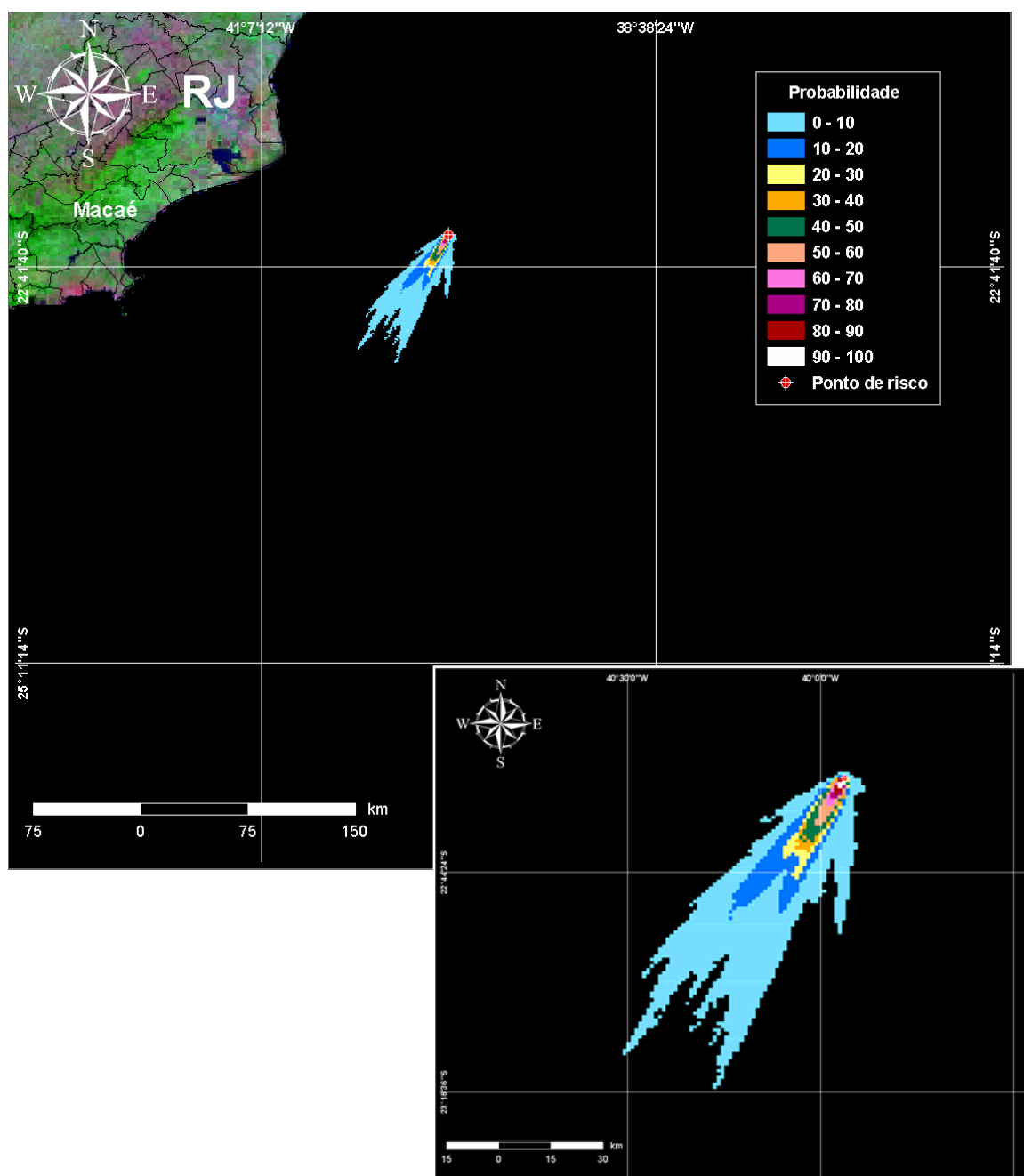
### **V.1 SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS**

O modelo OILMAP foi utilizado para simular os cenários descritos no Item IV.4 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 considerando os padrões de circulação e transporte obtidos através da modelagem hidrodinâmica (Capítulo II) e o campo de ventos apresentado no Sub-item IV.2.2, para o ano de 1992.

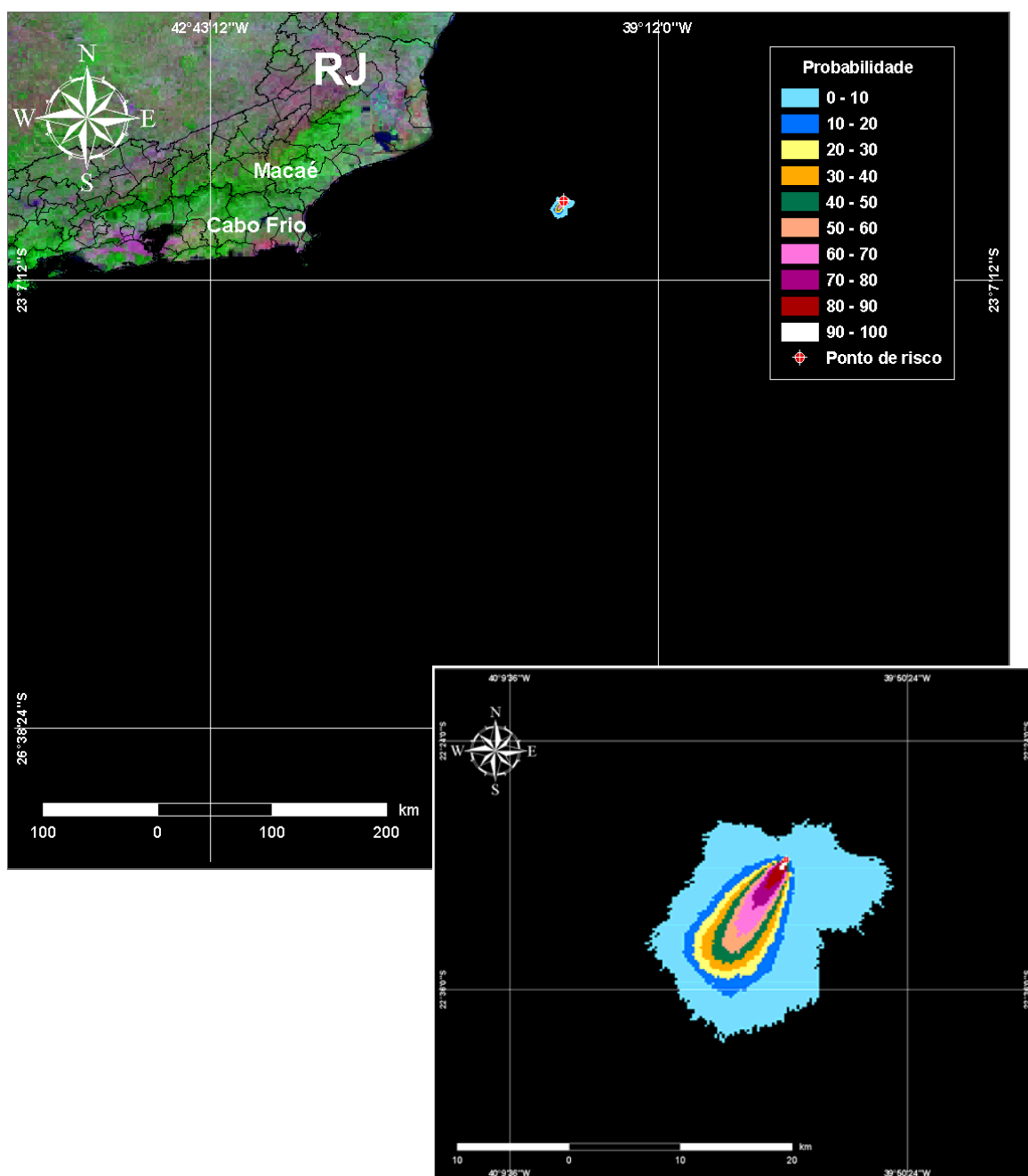
Nas figuras V.1-1 a V.1-17 são apresentados os contornos de probabilidade da presença de óleo na água e na costa, além dos volumes médios e máximos por km de costa, para os cenários de acidentes com petróleo a partir do FPSO Cidade de Niterói, ocorrendo durante os meses de verão e inverno. Praticamente em todas as simulações a mancha deslocou-se para sudoeste, seguindo a orientação da Corrente do Brasil. Nenhuma das simulações realizadas leva 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 e na costa, 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%.

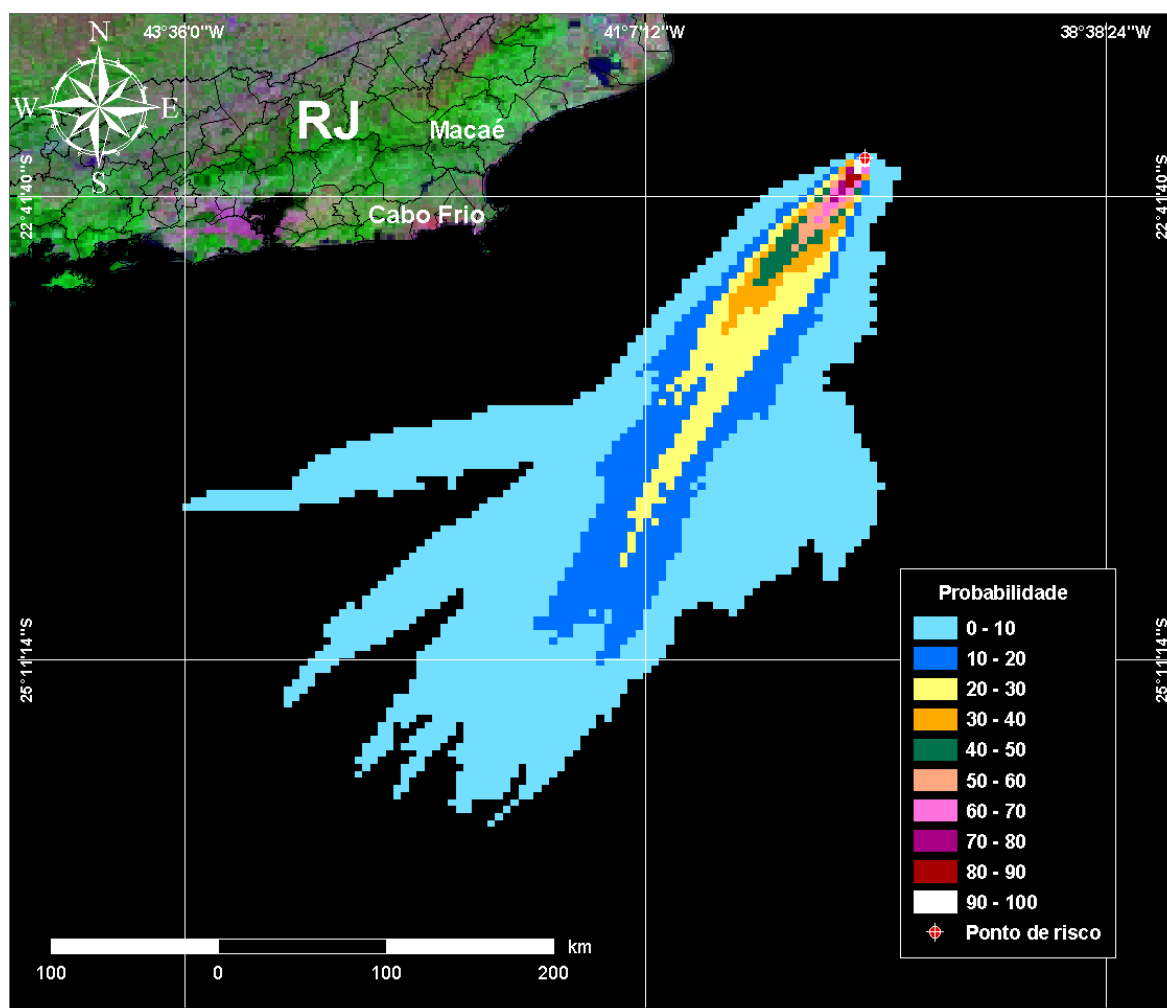
As figuras V.1-1 a V.1-7 apresentam os resultados para as simulações de acidentes a partir do FPSO Cidade de Niterói ocorrendo durante os meses de verão.



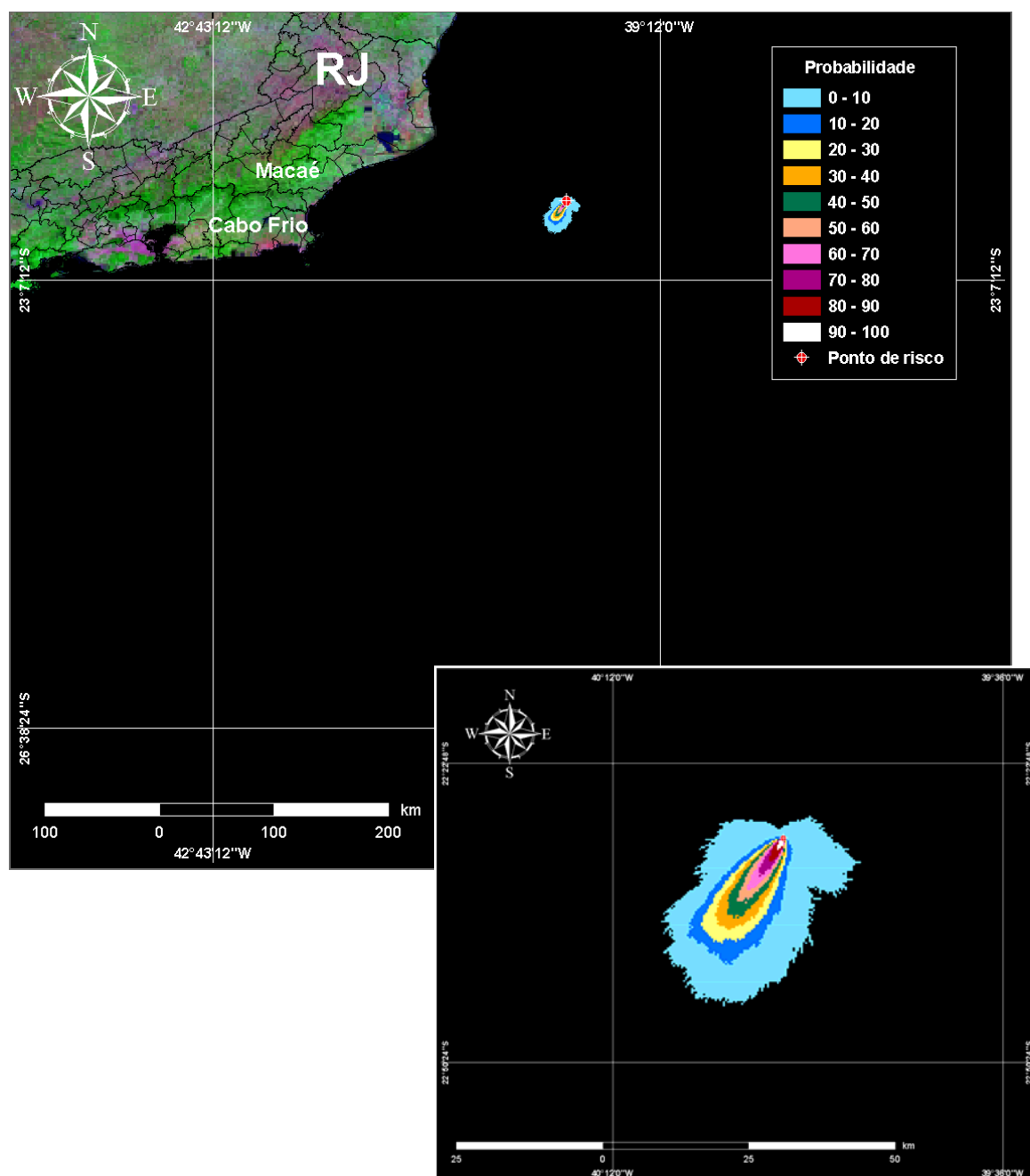
**Figura V.1-1** - Cenário FPSO\_CN\_VER\_8\_30D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 8 m<sup>3</sup> (instantâneo) após 30 dias de simulação.



**Figura V.1-2** - Cenário FPSO\_CN\_VER\_200\_6H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 200 m<sup>3</sup> (instantâneo), após 6 horas de simulação.

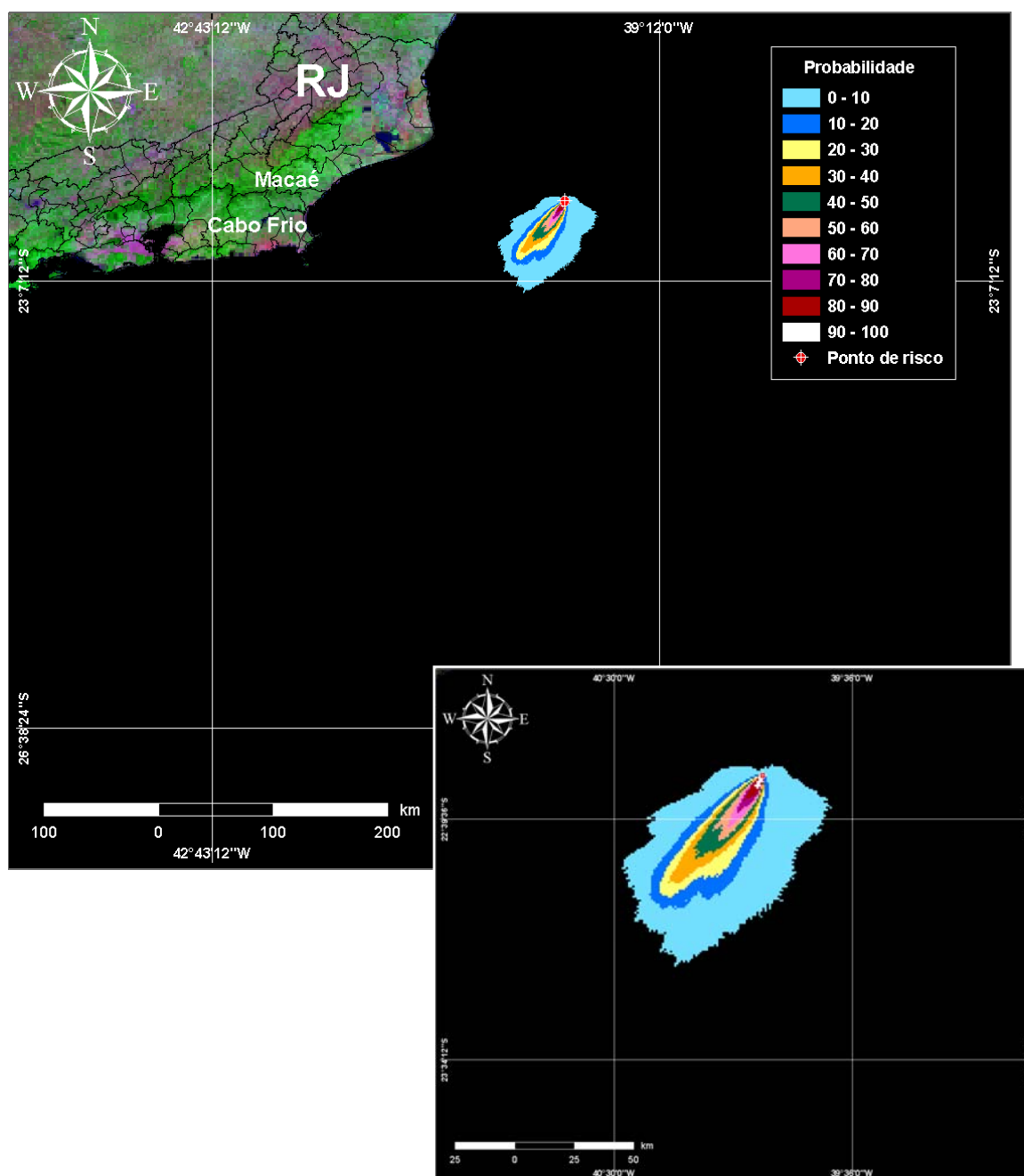


**Figura V.1-3 - Cenário FPSO\_CN\_VER\_200\_30D.** Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 200 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.

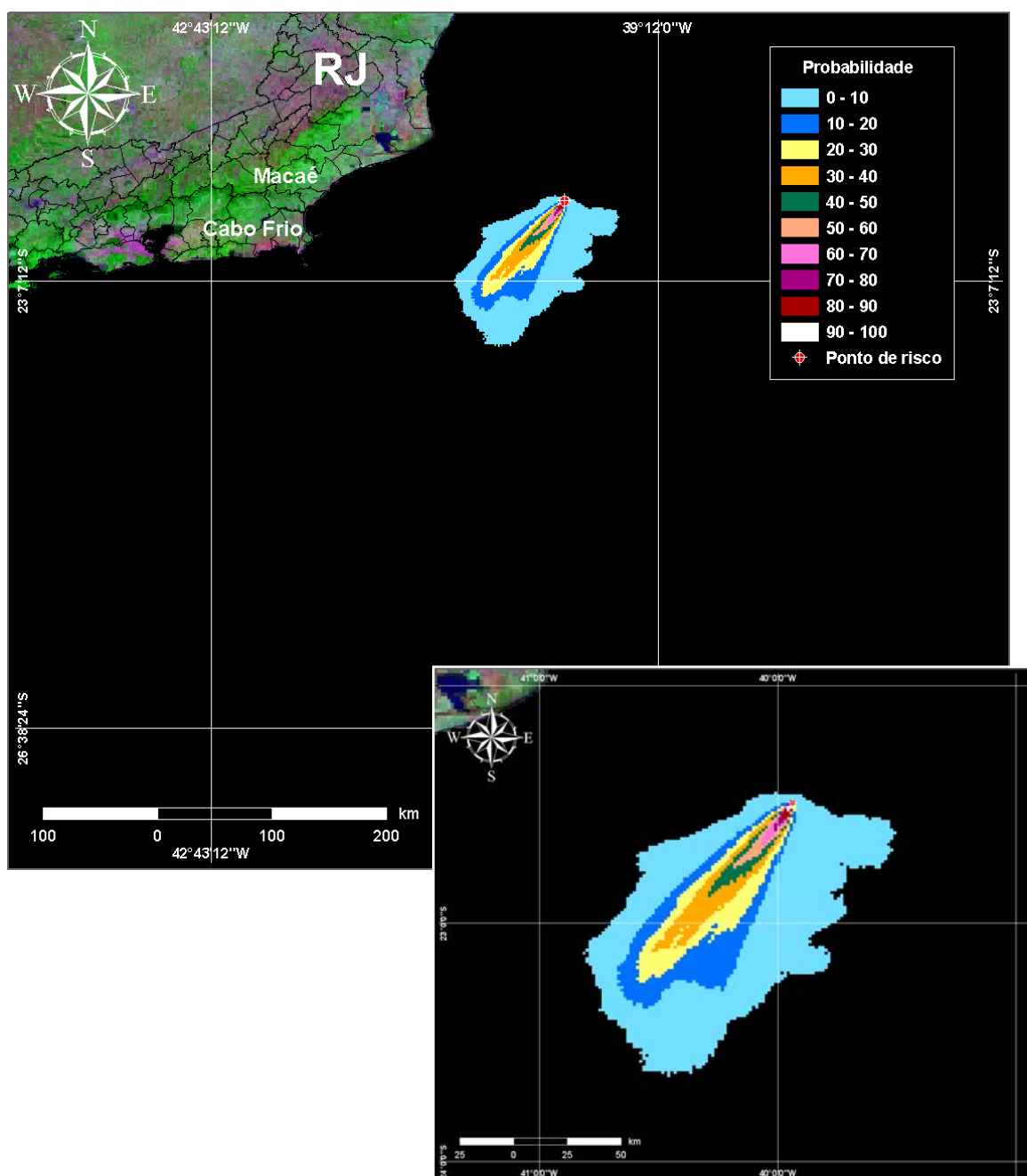


**Figura V.1-4** - Cenário FPSO\_CN\_VER\_PC\_12H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 294.549 m<sup>3</sup> (durante 24 horas), após 12 horas de simulação.



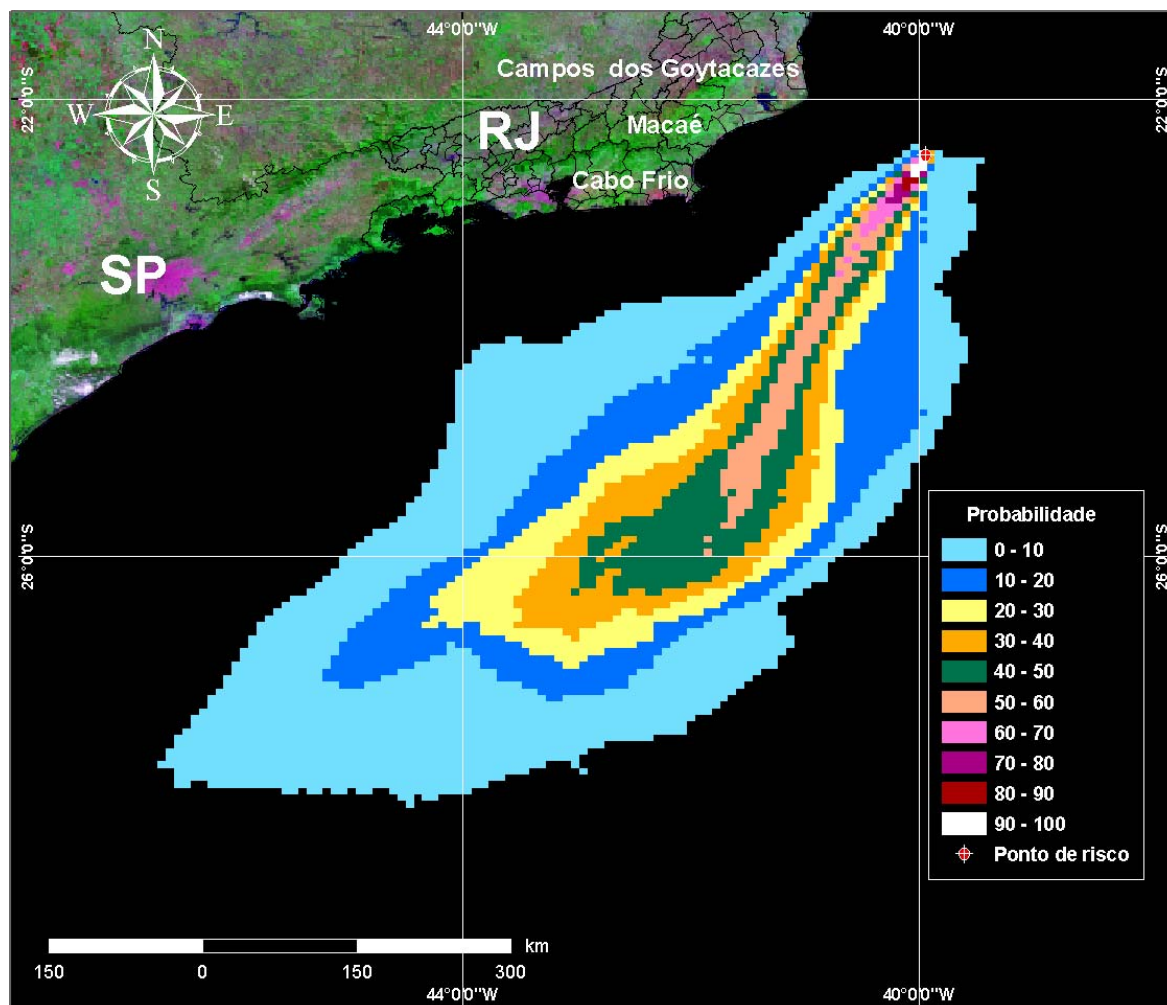


**Figura V.1-5** - Cenário FPSO\_CN\_VER\_PC\_36H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 294.549 m<sup>3</sup> (durante 24 horas), após 36 horas de simulação.



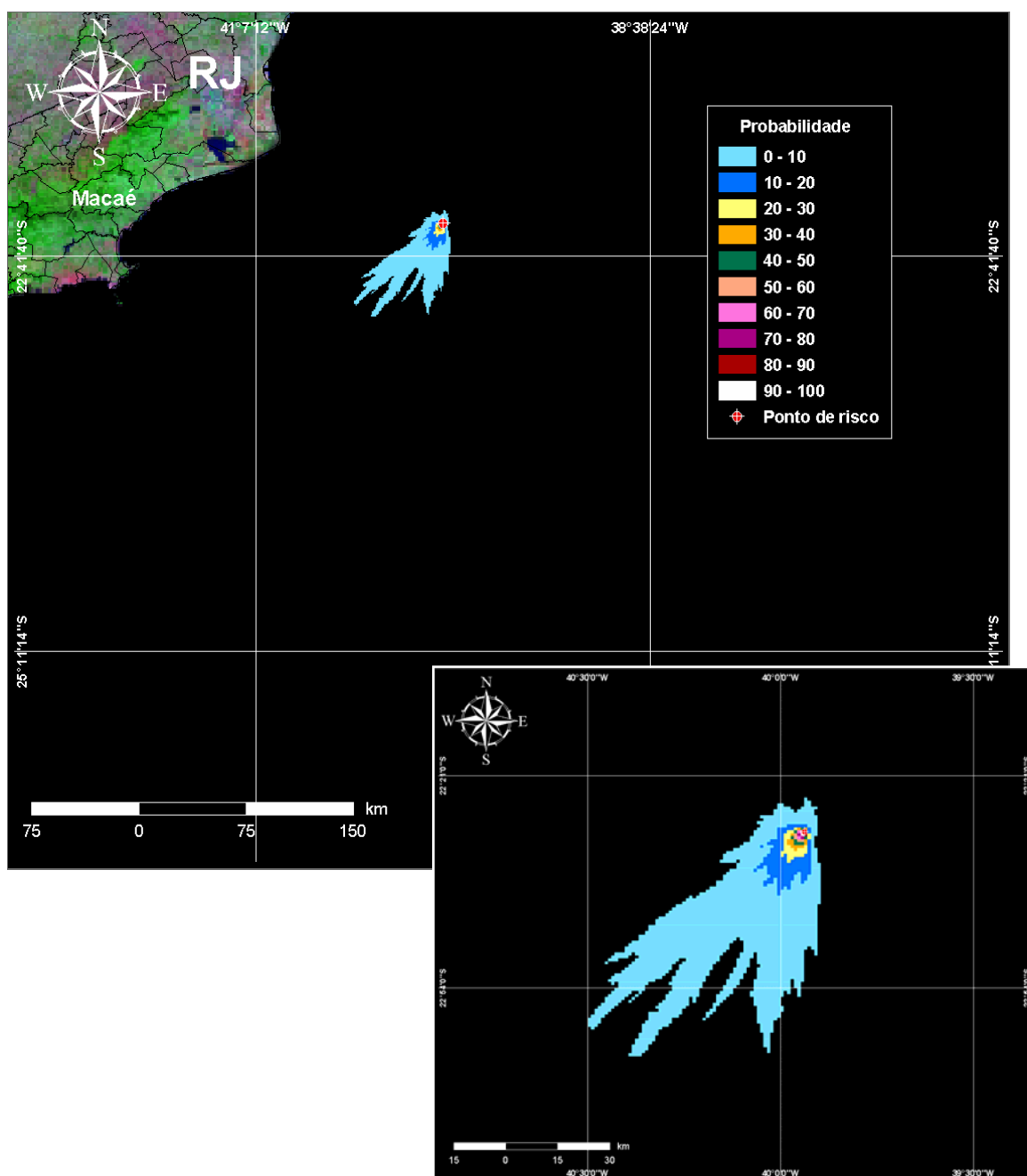
**Figura V.1-6** - Cenário FPSO\_CN\_VER\_PC\_60H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 294.549 m<sup>3</sup> (durante 24 horas), após 60 horas de simulação.

A figura V.1-7 apresenta os contornos de probabilidade de óleo na água para o cenário de pior caso de verão. Observa-se que não há probabilidade de toque na costa, sendo a menor distância em relação à esta de, aproximadamente, 81 km.

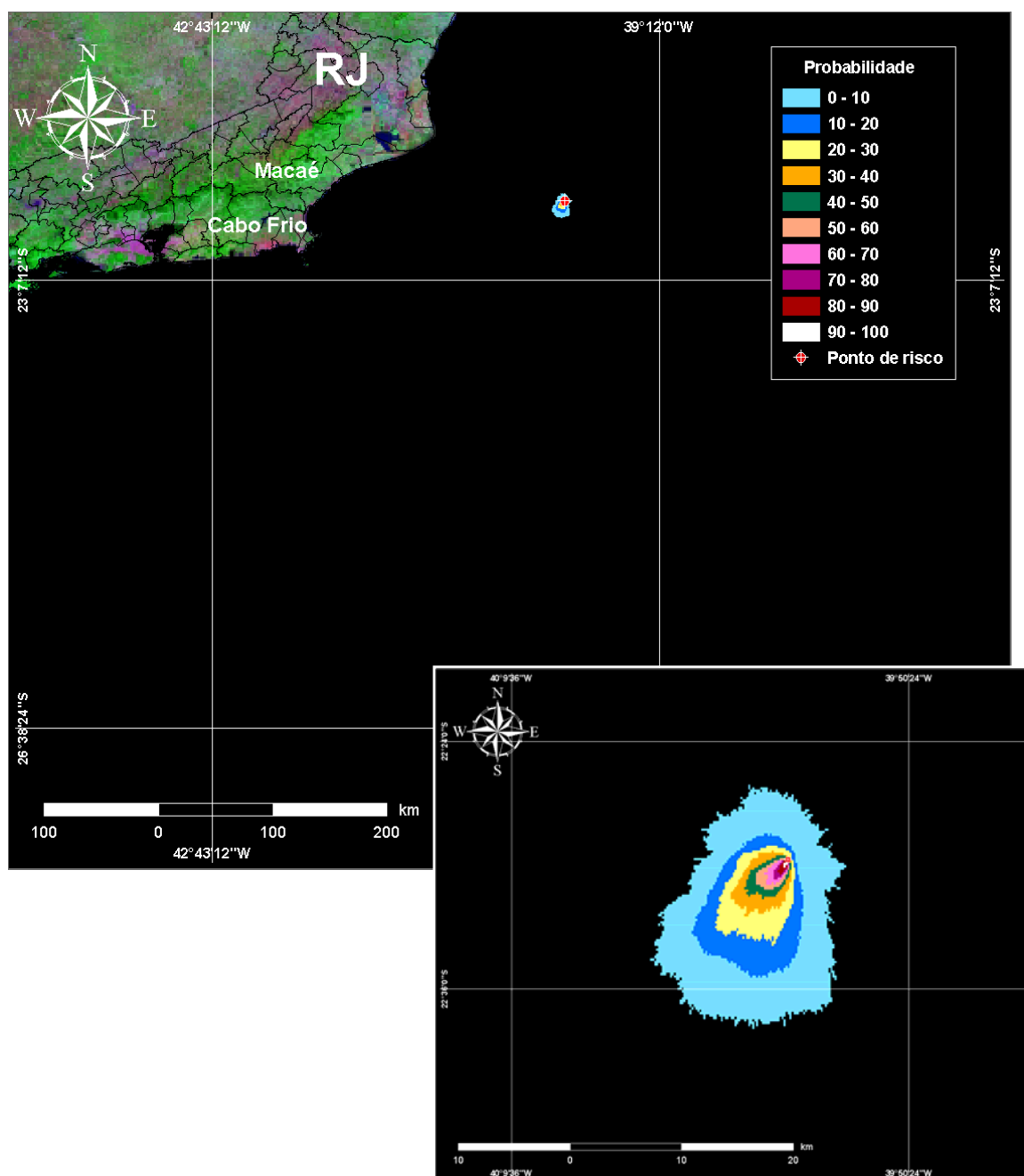


**Figura V.1-7 -** Cenário FPSO\_CN\_VER\_PC\_31D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 294.549 m<sup>3</sup> (durante 24 horas), após 31 dias de simulação.

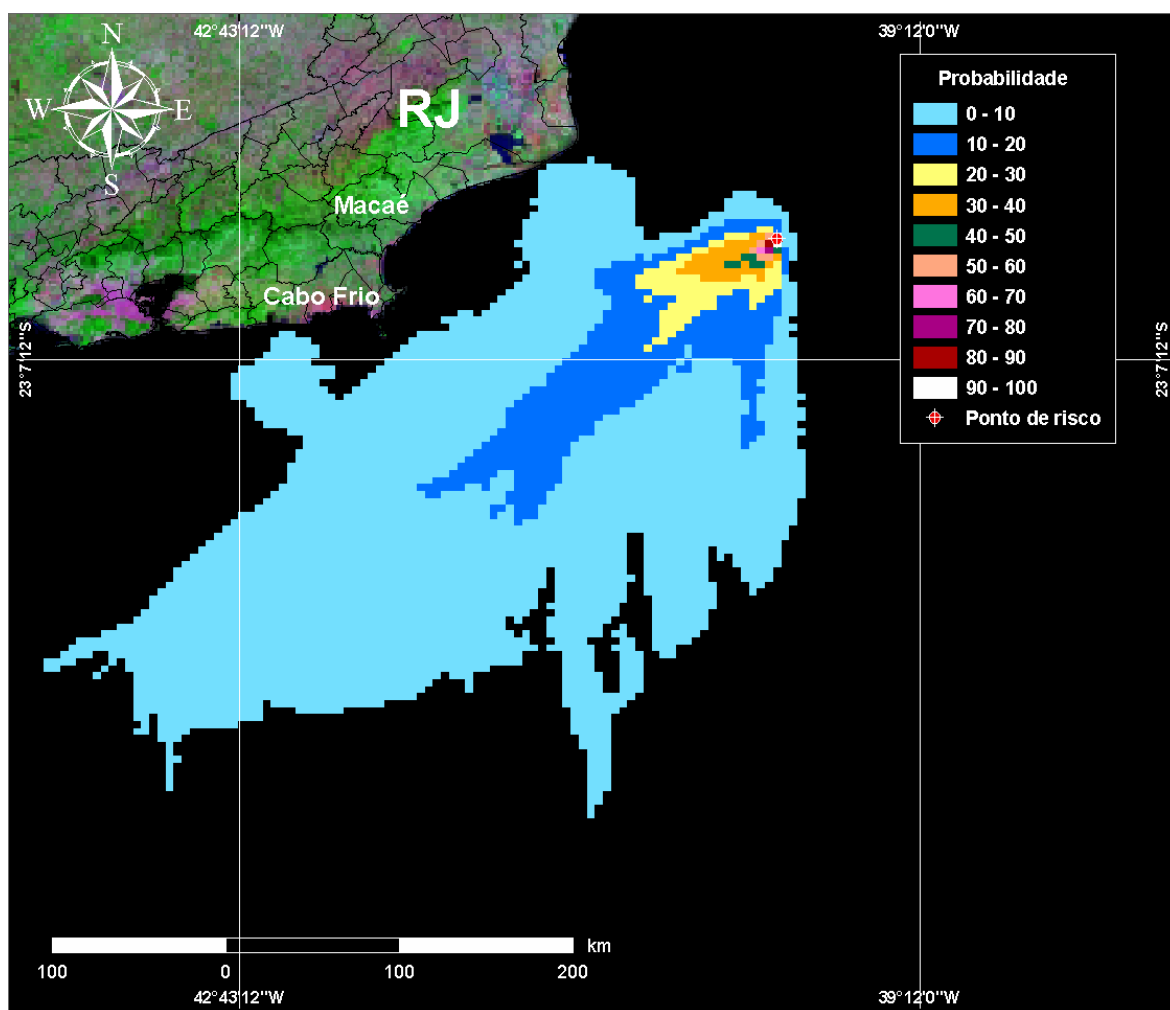
As figuras V.1-8 a V.1-17 apresentam os resultados para as simulações de acidentes a partir do FPSO Cidade de Niterói ocorrendo durante os meses de inverno.



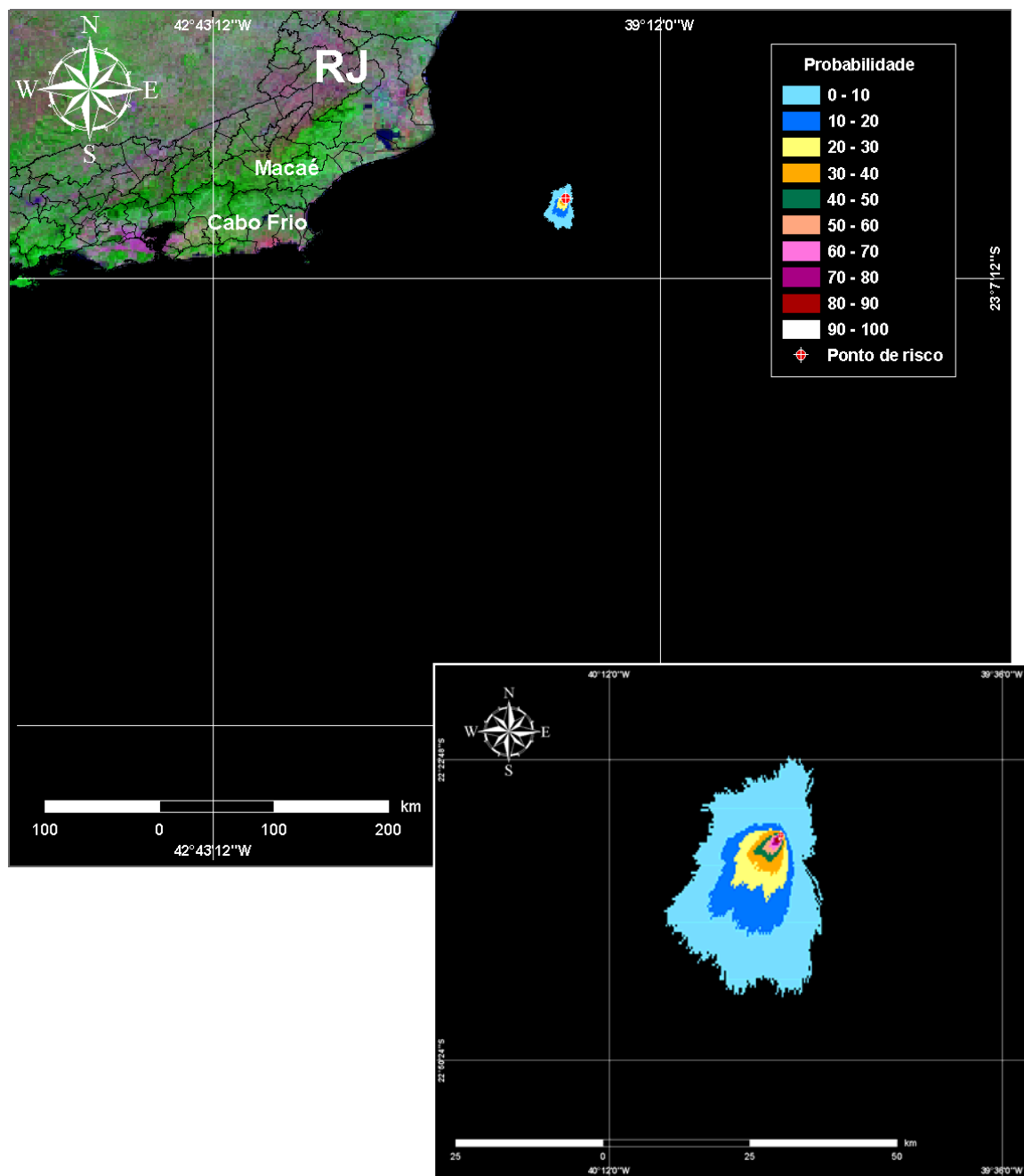
**Figura V.1-8** - Cenário FPSO\_CN\_INV\_8\_30D. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 8 m<sup>3</sup> (instantâneo), após 30 dias de simulação.



**Figura V.1-9** - Cenário FPSO\_CN\_INV\_200\_6H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m<sup>3</sup> (instantâneo), após 6 horas de simulação.

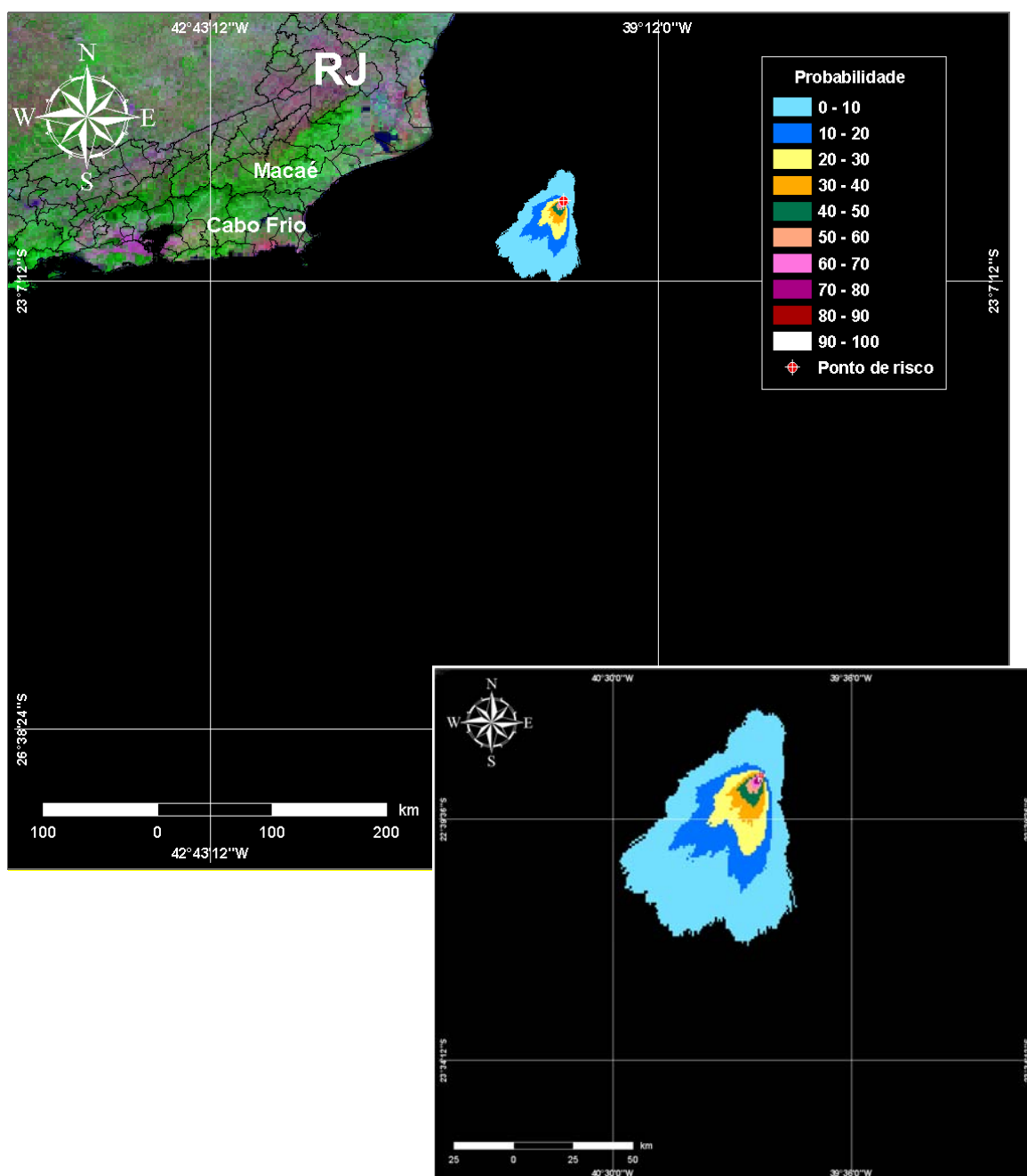


**Figura V.1-10 - Cenário FPSO\_CN\_INV\_200\_30D.** Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m³ (instantâneo), após 30 dias de simulação.

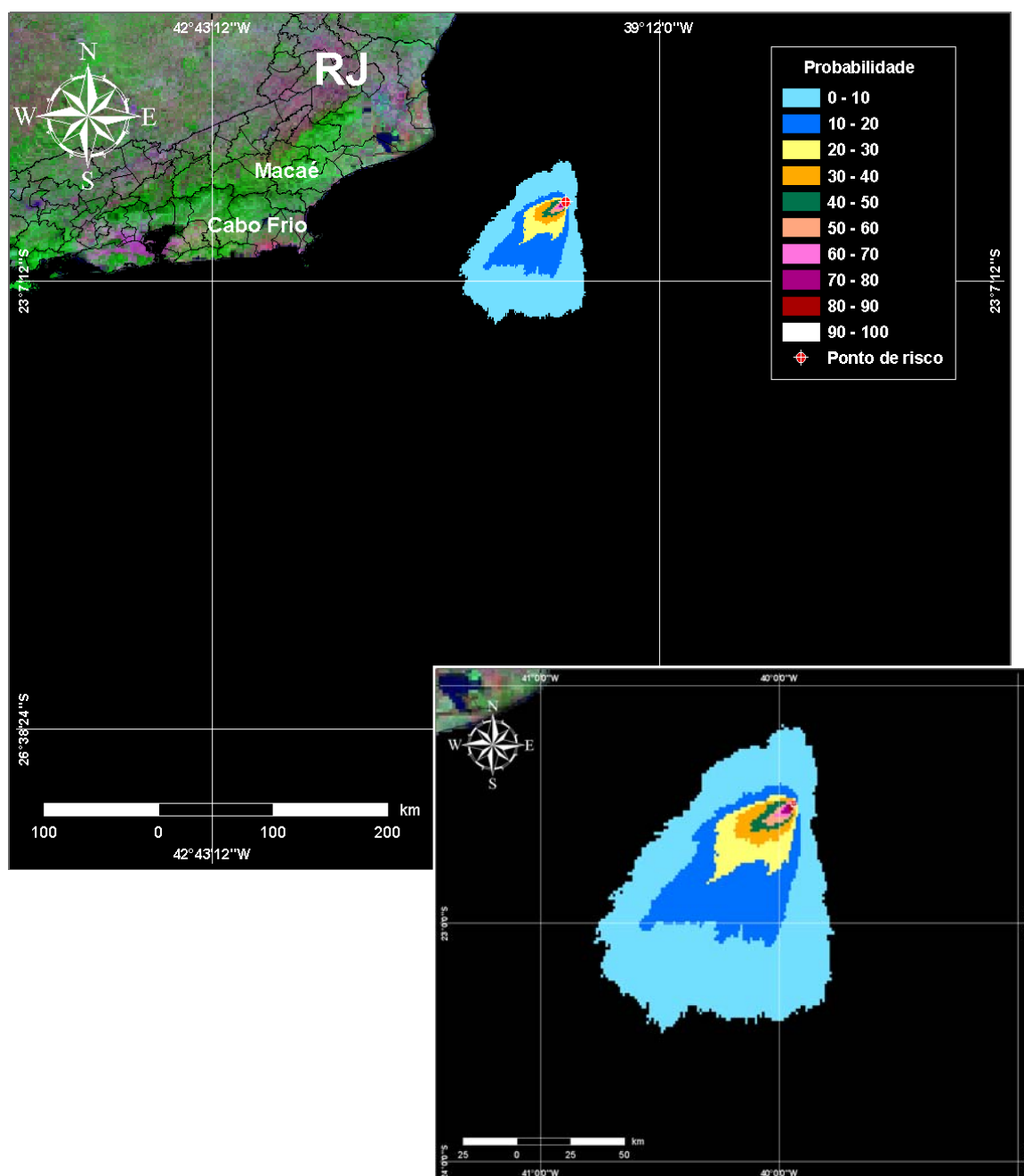


**Figura V.1-11 - Cenário FPSO\_CN\_INV\_PC\_12H.** Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de  $294.549 \text{ m}^3$  (durante 24 horas), após 12 horas de simulação.

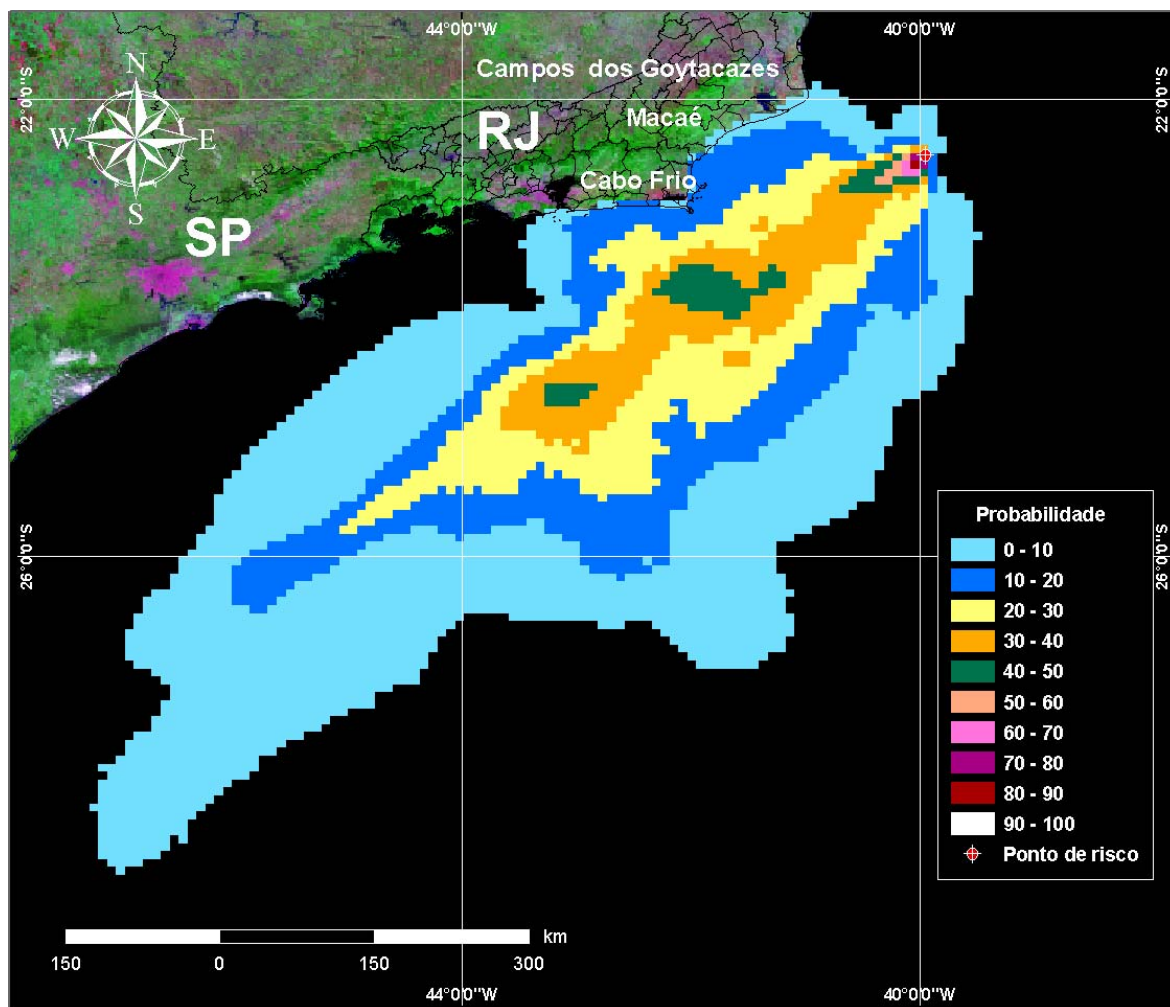




**Figura V.1-12** - Cenário FPSO\_CN\_INV\_PC\_36H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de  $294.549 \text{ m}^3$  (durante 24 horas), após 36 horas de simulação.

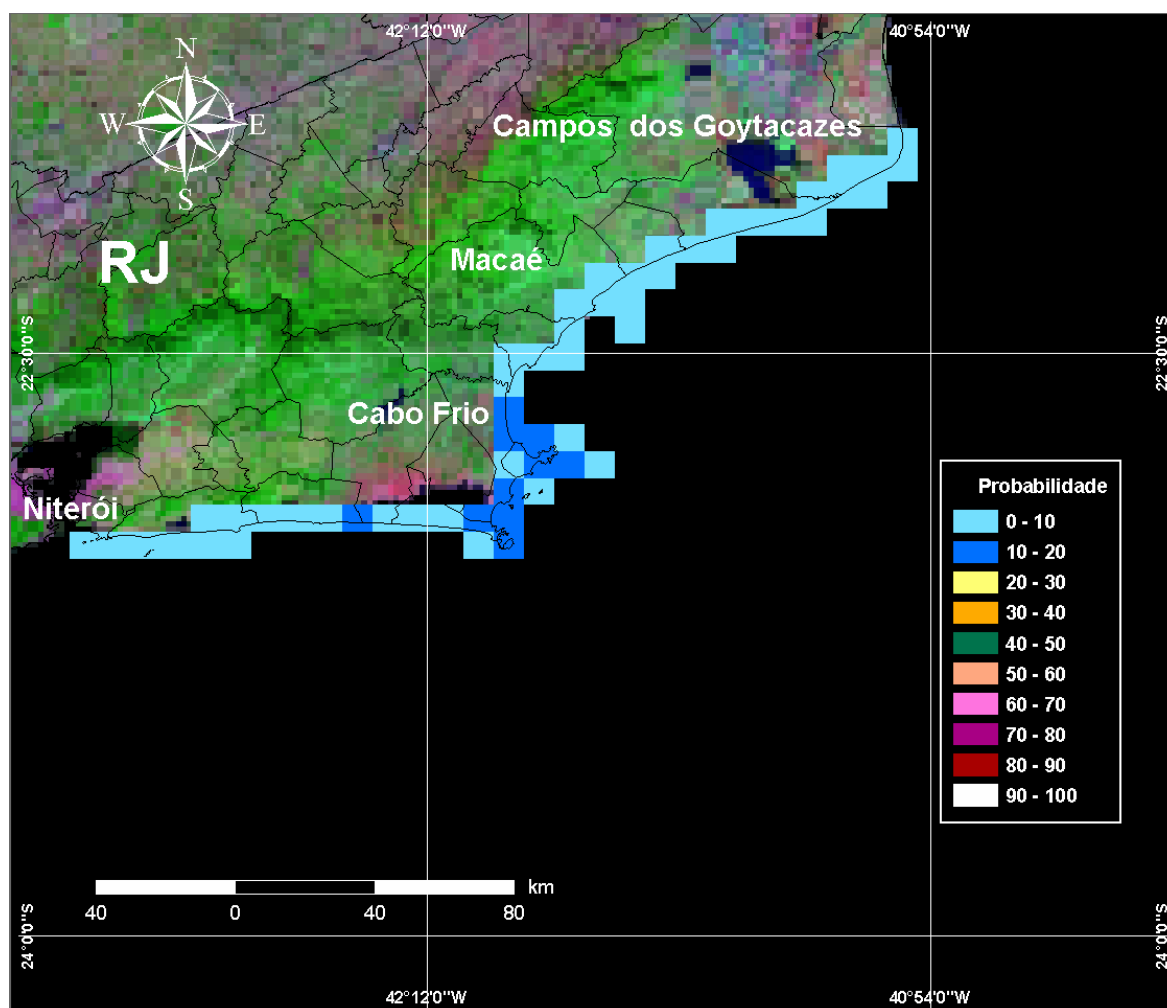


**Figura V.1-13 -** Cenário FPSO\_CN\_INV\_PC\_60H. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de  $294.549 \text{ m}^3$  (durante 24 horas), após 60 horas de simulação.



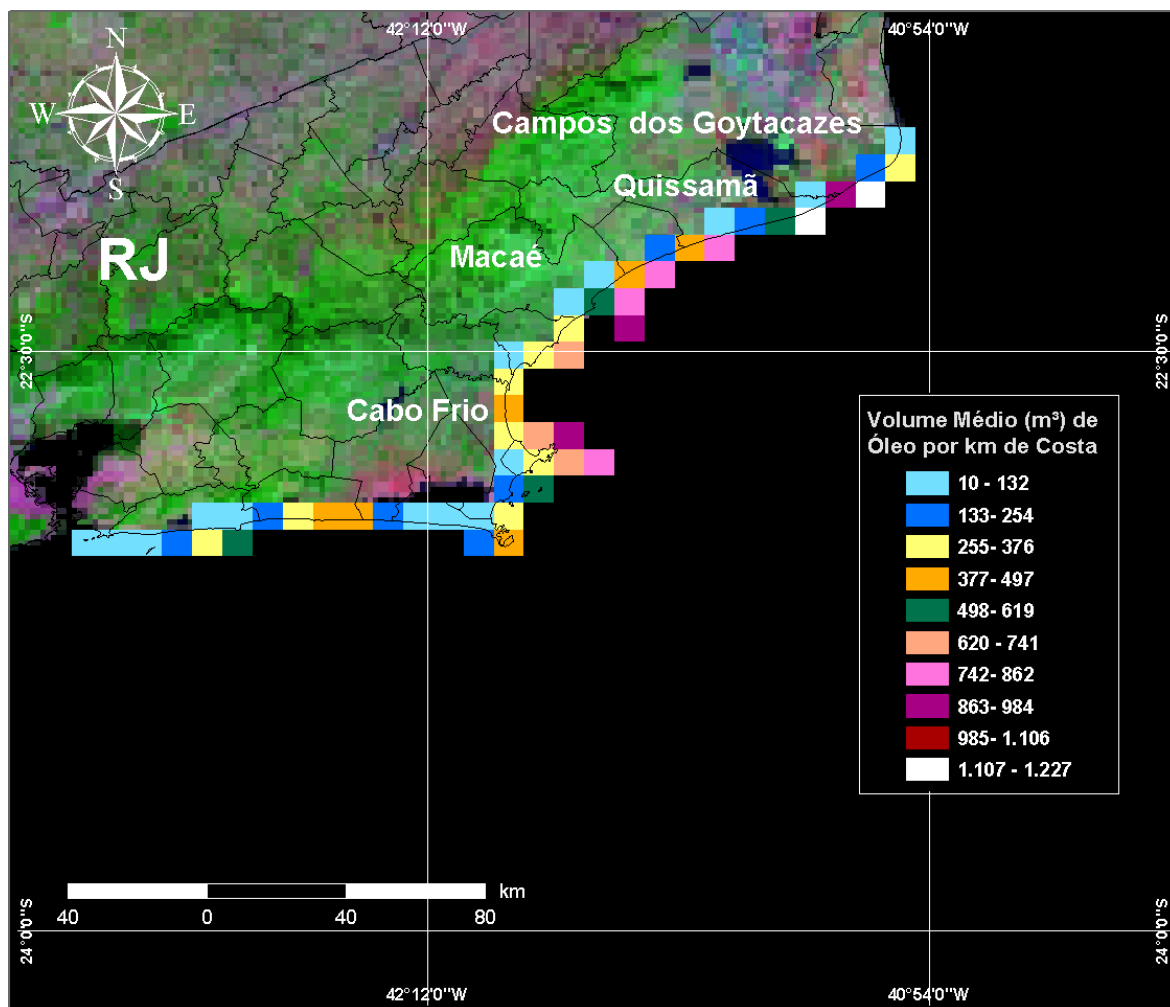
**Figura V.1-14 - Cenário FPSO\_CN\_INV\_PC\_31D.** Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 294.549 m³ (durante 24 horas), após 31 dias de simulação.

A figura V.1-15 apresenta a região da linha de costa com probabilidade de toque, para um derrame ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, em condições de inverno, após 31 dias de simulação. A probabilidade de toque se estende por 358 km no Estado do Rio de Janeiro, entre os municípios de Campos dos Goytacazes e Niterói. A região de maior probabilidade de toque (10-20%) ocorreu nos municípios de Cabo Frio, Armação dos Búzios, Arraial do Cabo, Araruama e Saquarema.



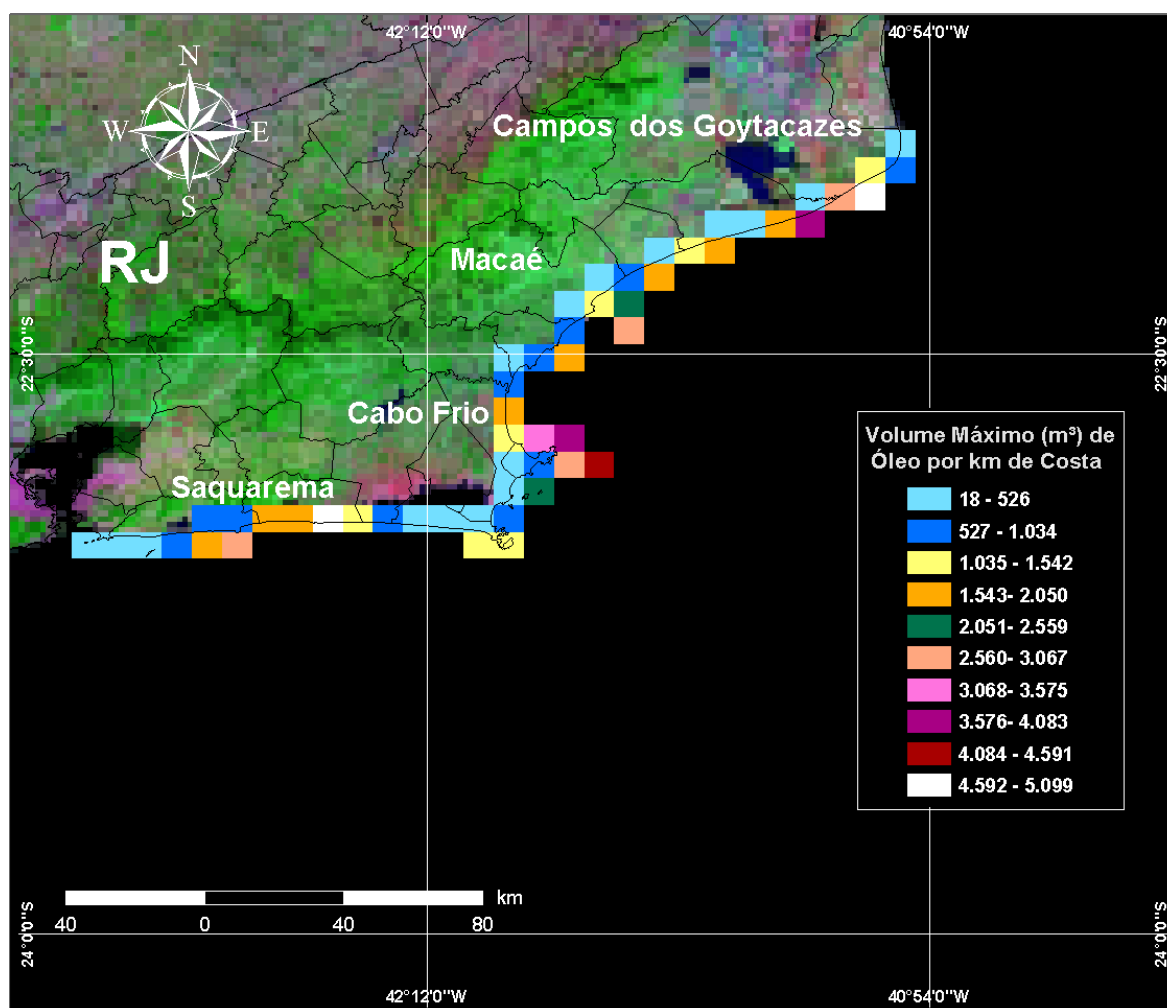
**Figura V.1-15 - Cenário FPSO\_CN\_INV\_PC\_31D\_SHORE.** Probabilidades de toque na costa para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 294.549 m<sup>3</sup> (durante 24 horas), após 31 dias de simulação.

A figura V.1-16 apresenta o volume médio de óleo por km de costa atingida para simulações em condições de inverno, para um derrame ao longo de 24 horas e um período de simulação de 31 dias. Observa-se que os municípios de Campos dos Goytacazes e Quissamã (RJ) apresentaram os maiores valores de volume médio de óleo por quilômetro de costa (1.107-1.227 m<sup>3</sup>/km).



**Figura V.1-16** - Cenário FPSO\_CN\_INV\_PC\_31D\_SHOREMED. Volume médio de óleo por km de costa para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 294.549 m³ (durante 24 horas), após 31 dias de simulação.

A figura V.1-17 apresenta o volume máximo de óleo por km de costa atingida para simulações em condições de inverno, para um derrame ao longo de 24 horas e um período de simulação de 31 dias. Observa-se que os municípios de Campos dos Goytacazes e Saquarema (RJ) apresentaram os maiores valores de volume máximo de óleo por quilômetro de costa (4.592-5.099 m³/km).



**Figura V.1-17 -** Cenário FPSO\_CN\_INV\_PC\_31D\_SHOREMAX. Volume máximo de óleo por km de costa para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 294.549 m<sup>3</sup> (durante 24 horas), após 31 dias de simulação.

A tabela V.1-1 apresenta a menor distância da mancha de óleo em relação à costa para um acidente ocorrendo a partir do FPSO Cidade de Niterói durante o verão. Já a tabela V.1-2 apresenta a extensão de linha de costa atingida durante o período de inverno.

**Tabela V.1-1** - Menor distância da mancha de óleo em relação à costa para o derrame de óleo durante o período de verão.

CENÁRIOS	MENOR DISTÂNCIA (km) DA MANCHA DE ÓLEO EM RELAÇÃO À COSTA
FPSO_CN_VER_PC_31D	81

**Tabela V.1-2** - Extensão da linha de costa com probabilidade de ser atingida pelo derrame de óleo durante o período de inverno.

CENÁRIOS	EXTENSÃO DE LINHA DE COSTA (km) COM PROBABILIDADE DE TOQUE
FPSO_CN_INV_PC_31D	358

A tabela V.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 derrame de óleo ocorrendo durante os meses de inverno.

**Tabela V.1-3** - Resumo dos resultados da modelagem probabilística de pior caso ocorrendo durante os meses de inverno para o FPSO Cidade de Niterói.

CENÁRIOS	TEMPO MÍNIMO PARA ATINGIR A COSTA (HORAS)	TEMPO MÉDIO PARA ATINGIR A COSTA (HORAS)	PERCENTAGEM DE SIMULAÇÕES COM TOQUE NA COSTA (%)
FPSO_CN_INV_PC_31D	208	425	34

A tabela V.1-4 apresenta o percentual de simulações que tocam na costa durante o período de inverno para determinados tempos (em horas). Não são apresentados tempos inferiores a 240 horas (6, 12, 36, 60 e 180h), pois o menor tempo de toque na costa ocorreu em 208 horas (8 dias e 16 horas).



**Tabela V.1-4 - Percentual de simulações com toque na costa para os cenários de inverno.**

INVERNO	TEMPOS (HORAS)	PERCENTUAL DE SIMULAÇÕES COM TOQUE NA COSTA (%)	
		EM RELAÇÃO AO TOTAL DE SIMULAÇÕES	EM RELAÇÃO À SIMULAÇÕES COM TOQUE
	240	3,2	9,4
	480	10,2	30
	720	20,6	60,6

A tabela V.1-5 apresenta a probabilidade de toque e o tempo mínimo de toque na linha de costa nos municípios atingidos, durante os meses de inverno.

**Tabela V.1-5 - Lista de municípios com probabilidade de toque para os cenários de derrame de óleo a partir do FPSO Cidade de Niterói, durante o período de inverno.**

NOME DO MUNICÍPIO	PROBABILIDADE (%)	TEMPO MÍNIMO DE TOQUE (HORAS)
Campos dos Goytacazes	0-10	258 (10 dias e 18 horas)
Quissamã	0-10	220 (9 dias e 4 horas)
Carapebus	0-10	223 (9 dias e 7 horas)
Macaé	0-10	221 (9 dias e 5 horas)
Rio das Ostras	0-10	234 (9 dias e 18 horas)
Casemiro de Abreu	0-10	251 (10 dias e 11 horas)
Cabo Frio	10-20	213 (8 dias e 21 horas)
Armação dos Búzios	10-20	208 (8 dias e 16 horas)
Arraial do Cabo	10-20	211 (8 dias e 19 horas)
Araruama	10-20	481 (20 dias e 1 hora)
Squarema	10-20	483 (20 dias e 3 horas)
Maricá	0-10	492 (20 dias e 12 horas)
Niterói	0-10	678 (28 dias e 6 horas)

## V.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 o cenário que atingiu a menor distância da costa para o verão e o que apresentou o menor tempo para o primeiro toque do óleo na costa para o inverno. Em ambos os cenários foram considerados vazamentos de 294.549 m<sup>3</sup> ao longo de 24 horas, simulados por 31 dias. As tabelas V.2-1 e V.2-2 apresentam um resumo dos cenários críticos de verão e inverno, respectivamente.

**Tabela V.2-1** - Resumo do cenário determinístico crítico de verão.

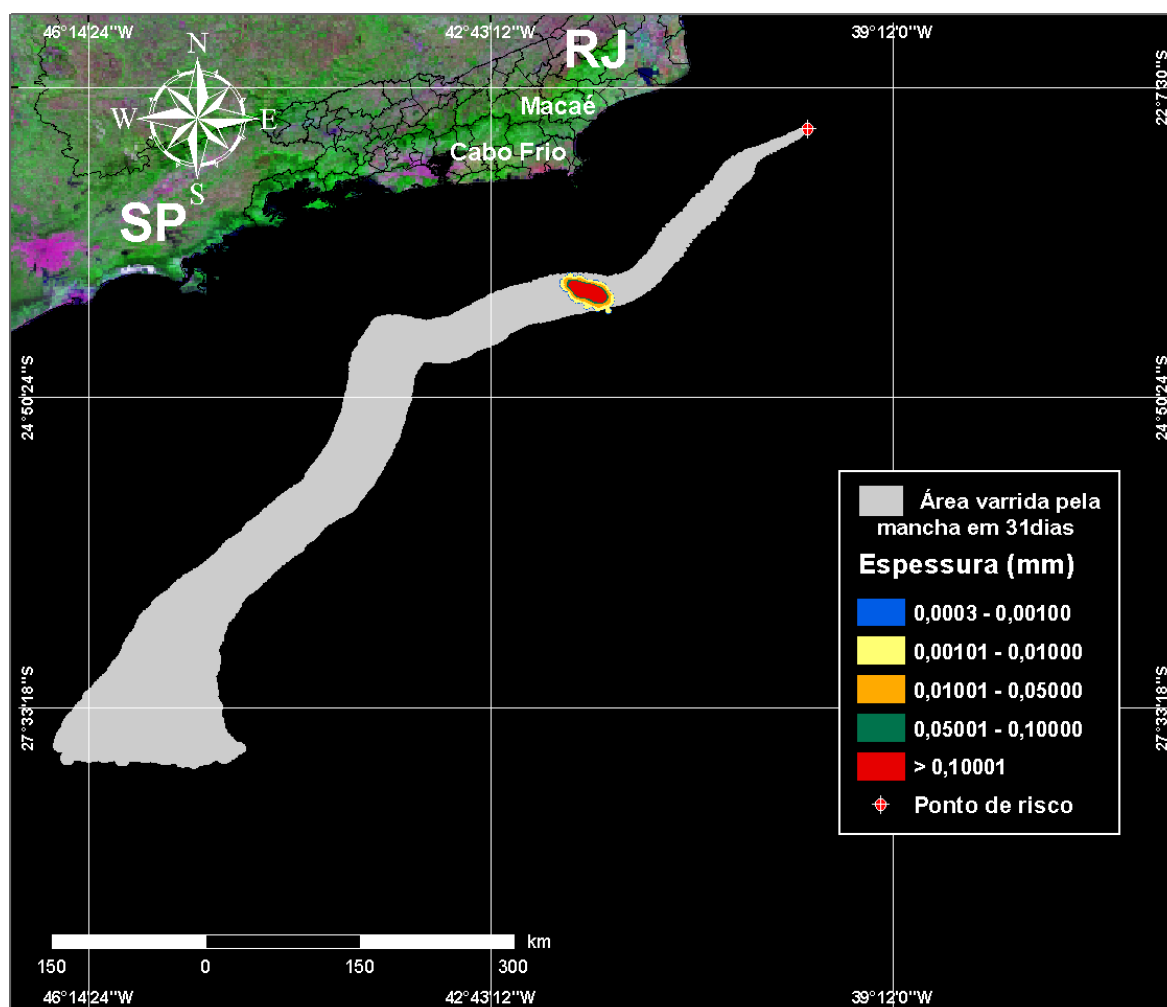
CENÁRIOS	DATA DE INÍCIO	MENOR DISTÂNCIA EM RELAÇÃO À COSTA (km)
DET_FPSO_CN_VER_PC_31D	01/03/1992 – 18:00 h	81

**Tabela V.2-2** - Resumo do cenário determinístico crítico de inverno.

CENÁRIOS	DATA DE INÍCIO	VOLUME FINAL DE ÓLEO QUE CHEGA À COSTA (m <sup>3</sup> )	TEMPO PARA CHEGAR À COSTA (HORAS)
DET_FPSO_CN_INV_PC_31D	04/07/1992 –21:00h	240	208

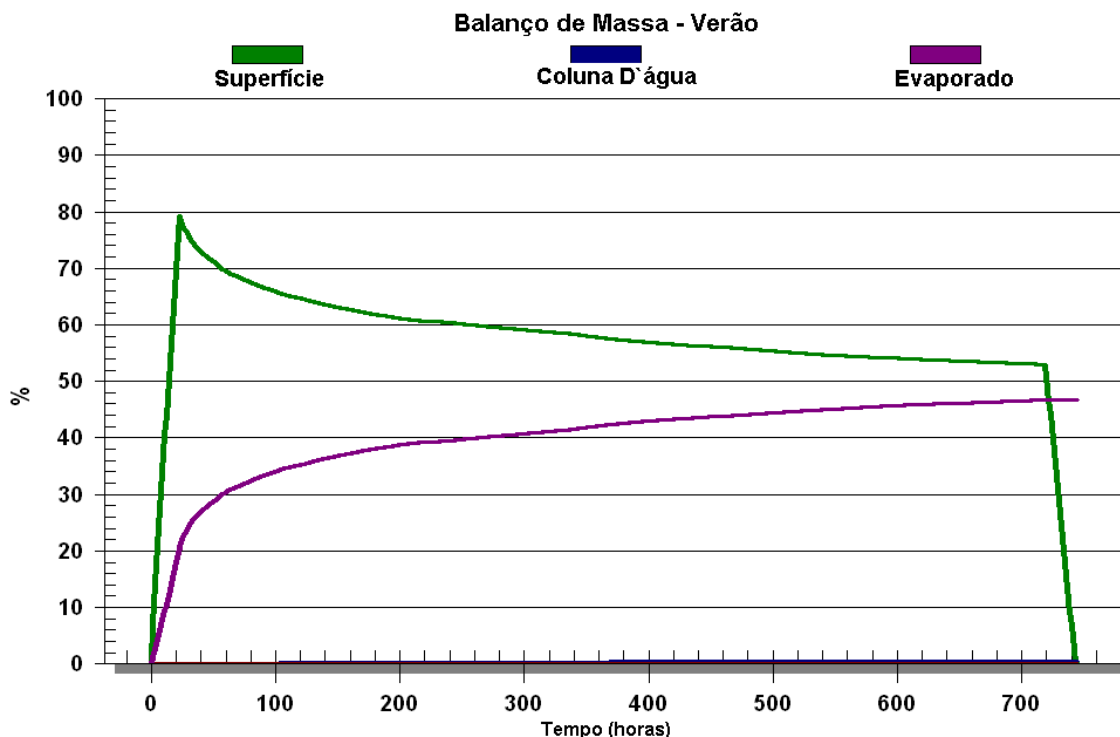
Nas figuras V.2-1 e V.2-8 são apresentados os contornos de espessura no instante de maior proximidade da mancha em relação à linha de costa para o verão e do primeiro toque na costa no cenário de inverno, respectivamente. Nestas figuras são destacados os limites de 0,0003 mm (limite para ambientes sensíveis), e 0,05 mm (limite de recolhimento). A cor cinza representa a região por onde a mancha se deslocou durante os 31 dias de duração da simulação e, portanto, não está associada a uma espessura. A mancha no instante de primeiro toque (ou maior proximidade da costa) é aquela representada pela escala de cores indicada nas legendas.

Na simulação determinística crítica de verão (figura V.2-1), a menor distância em relação à costa foi de, aproximadamente, 81 km na região do município de Arraial do Cabo (RJ).



**Figura V.2-1** - Cenário determinístico crítico para um derrame de óleo ocorrido a partir do FPSO Cidade de Niterói, no período de verão.

A figura V.2-2 apresenta um gráfico com o balanço de massa (óleo na superfície, evaporado e na coluna d'água) para a simulação determinística crítica de verão. Observa-se que a evaporação é o principal processo que atua na redução da massa de óleo nesse período.



**Figura V.2-2** - Balanco de massa para o cenário determinístico crítico de verão.

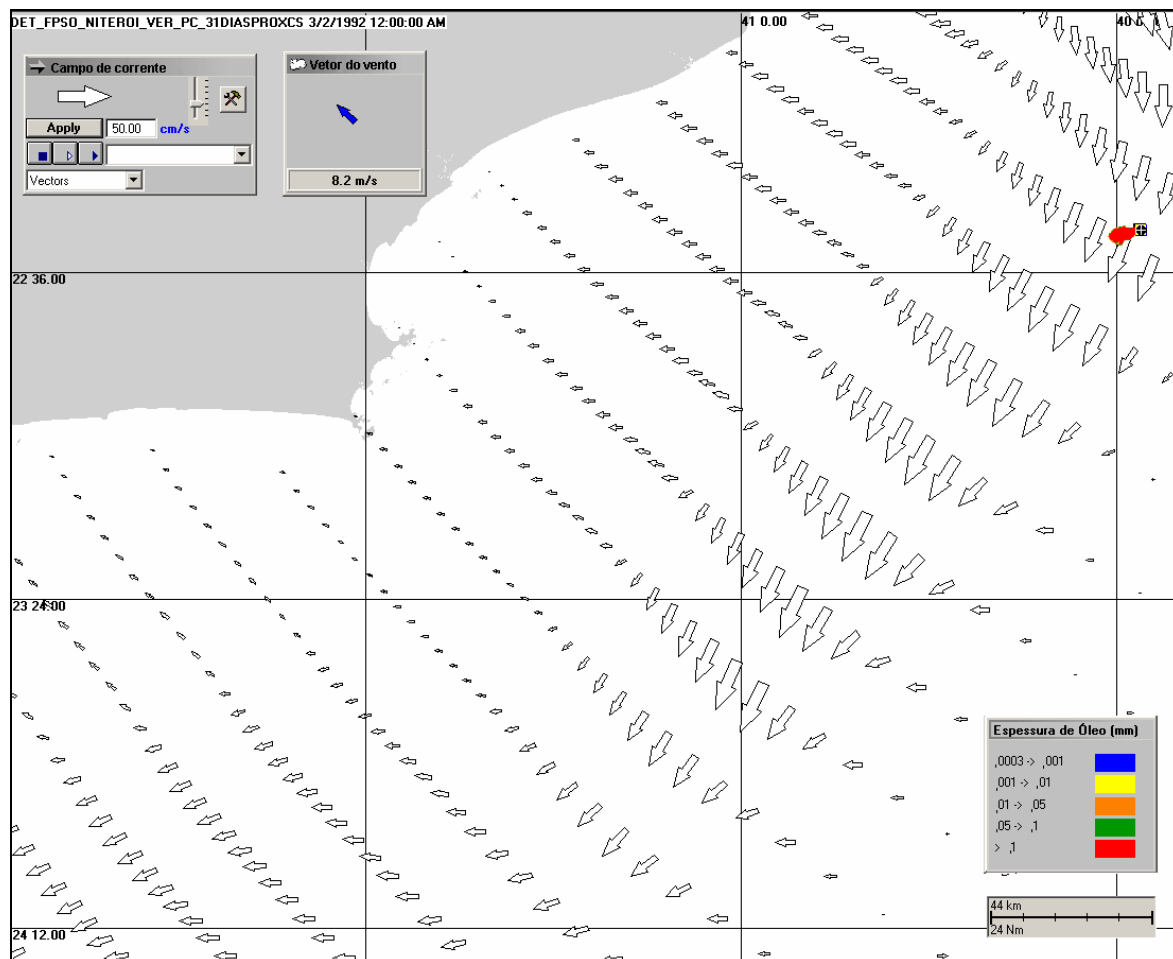
As figuras V.2-3 a V.2-7 apresentam as condições meteorológicas e oceanográficas que favoreceram a maior proximidade da mancha de óleo em relação à costa para o cenário determinístico crítico de verão.

A figura V.2-3 apresenta o diagrama *stick plot* dos vetores de vento utilizado na simulação determinística crítica de verão, para o período de 168 horas, a partir do início da simulação até o instante de maior proximidade da costa.

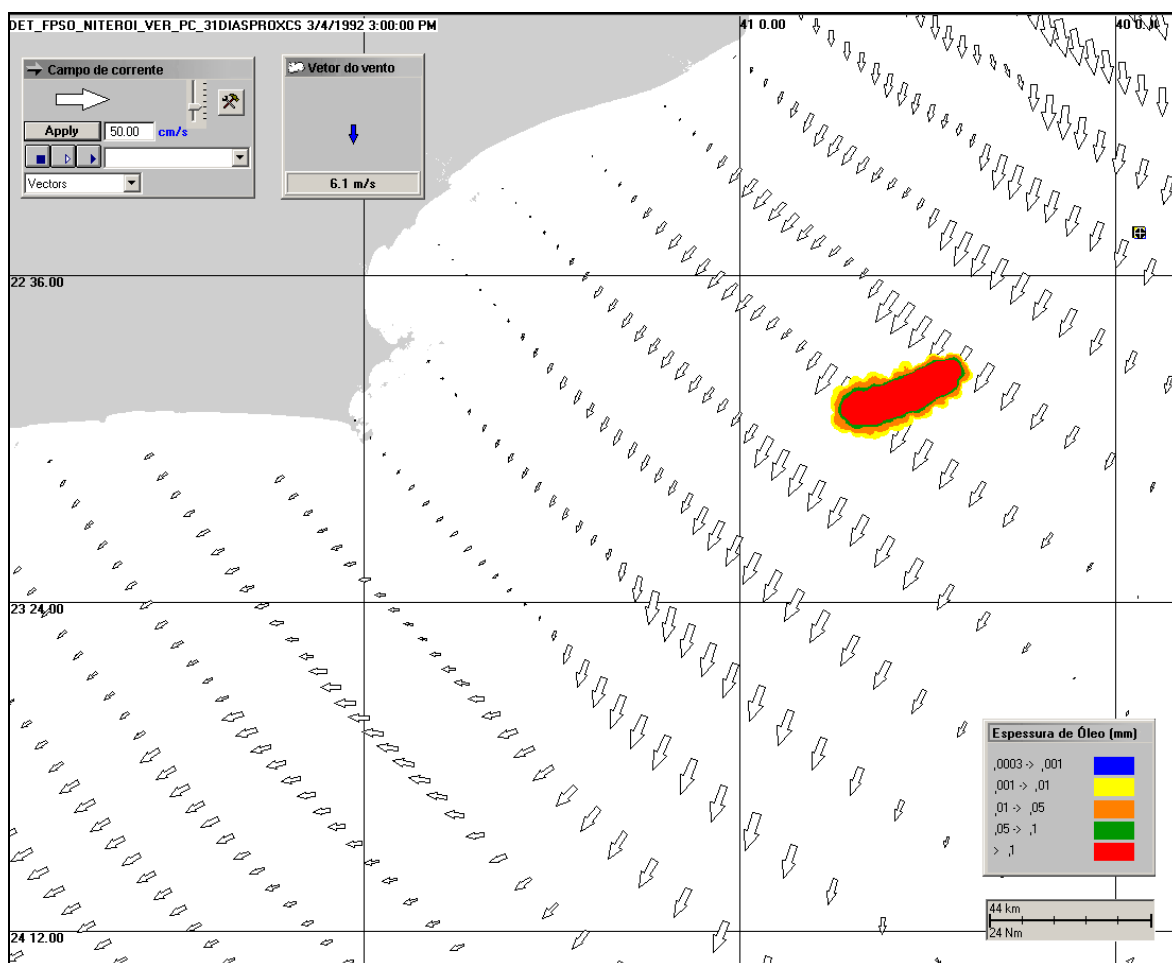


**Figura V.2-3** - Diagrama *stick plot* dos vetores de vento para o cenário determinístico crítico de verão, a partir do início da simulação até o instante de maior proximidade da costa.

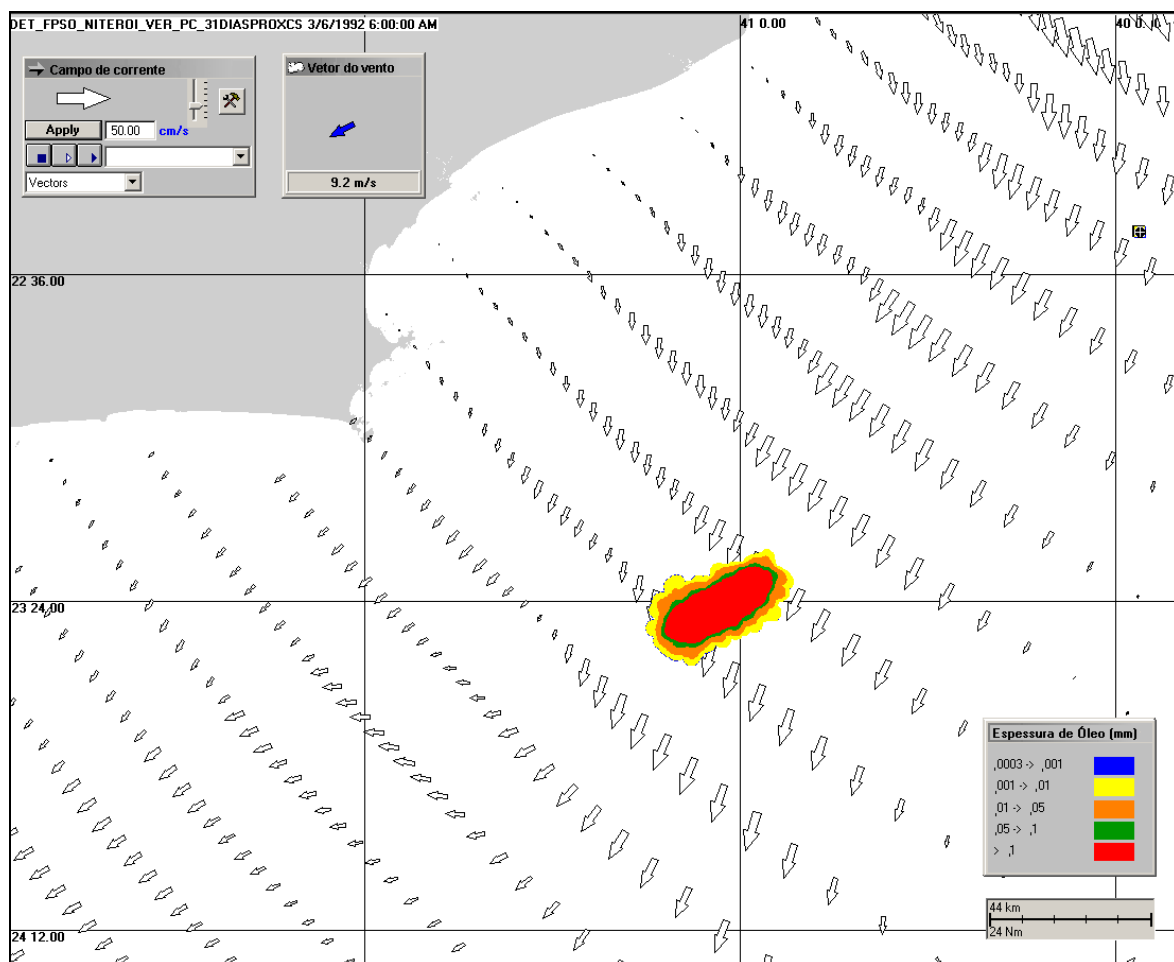
As figuras V.2-4 a V.2-6 apresentam ilustrações das condições meteorológicas e oceanográficas para alguns instantes do cenário determinístico crítico de verão, a partir do início do derrame até o instante de maior proximidade da costa.



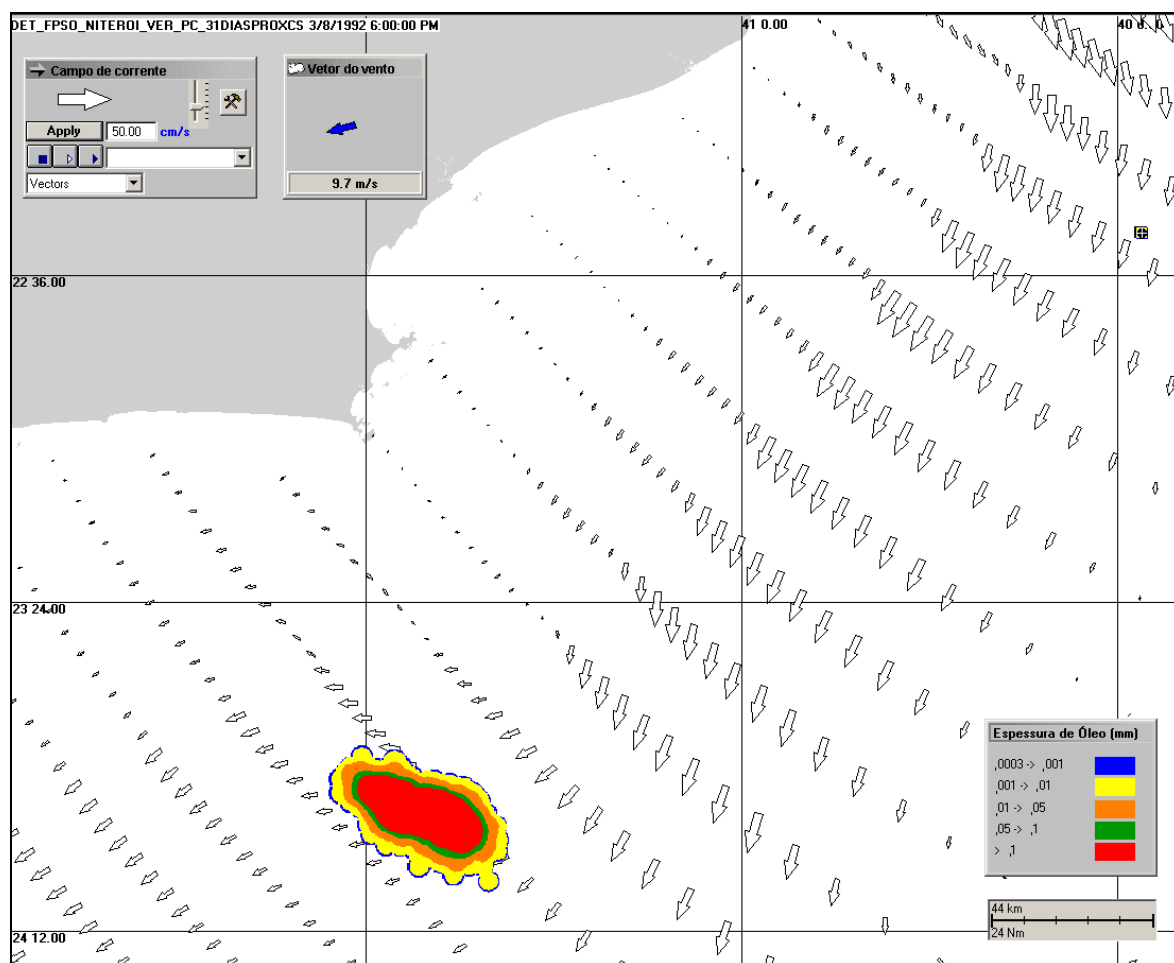
**Figura V.2-4 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística crítica de verão.**



**Figura V.2-5 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo 69 horas após o início da simulação determinística crítica de verão.**



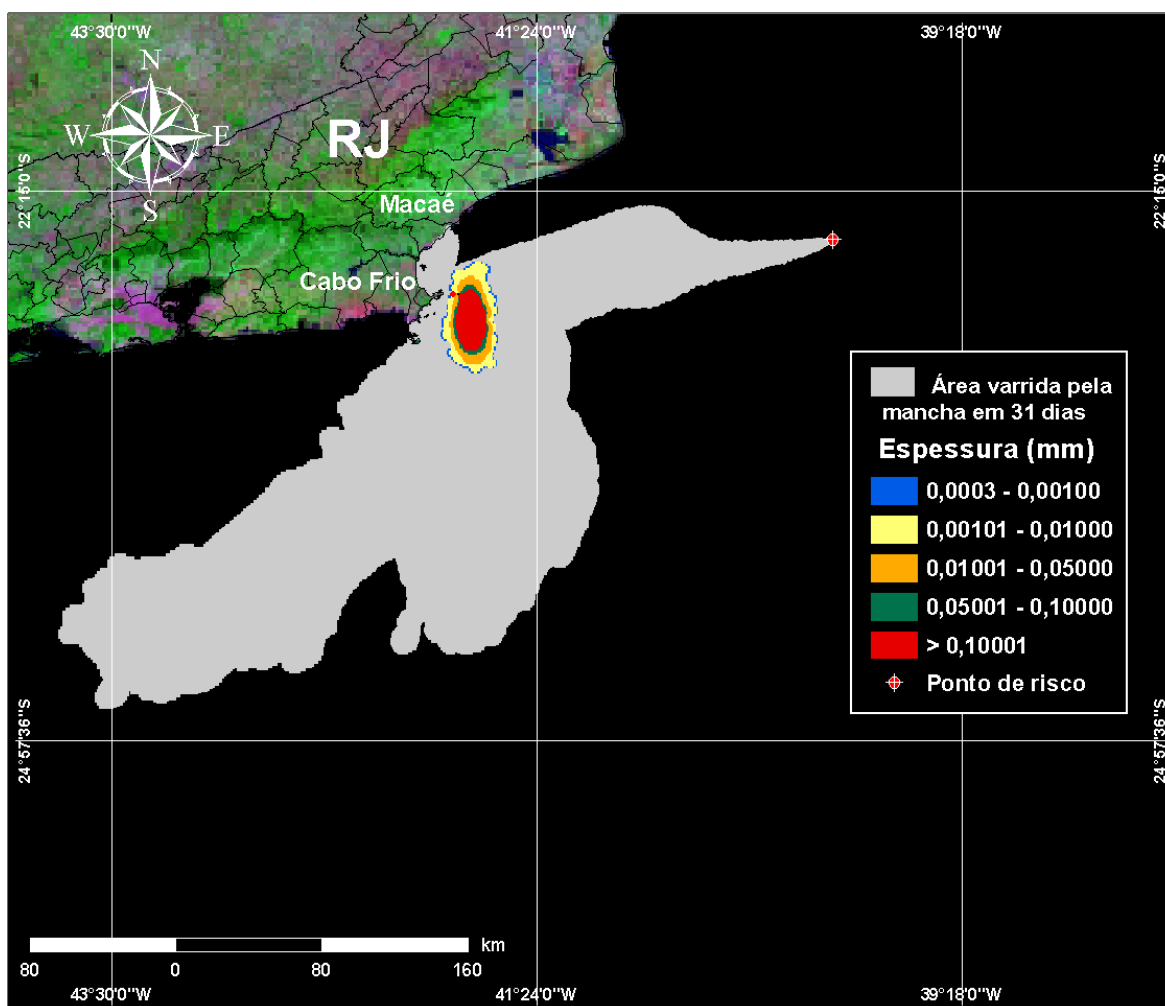
**Figura V.2-6 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo 132 horas após o início da simulação determinística crítica de verão.**



**Figura V.2-7** - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante de maior proximidade da costa para a simulação determinística crítica de verão.

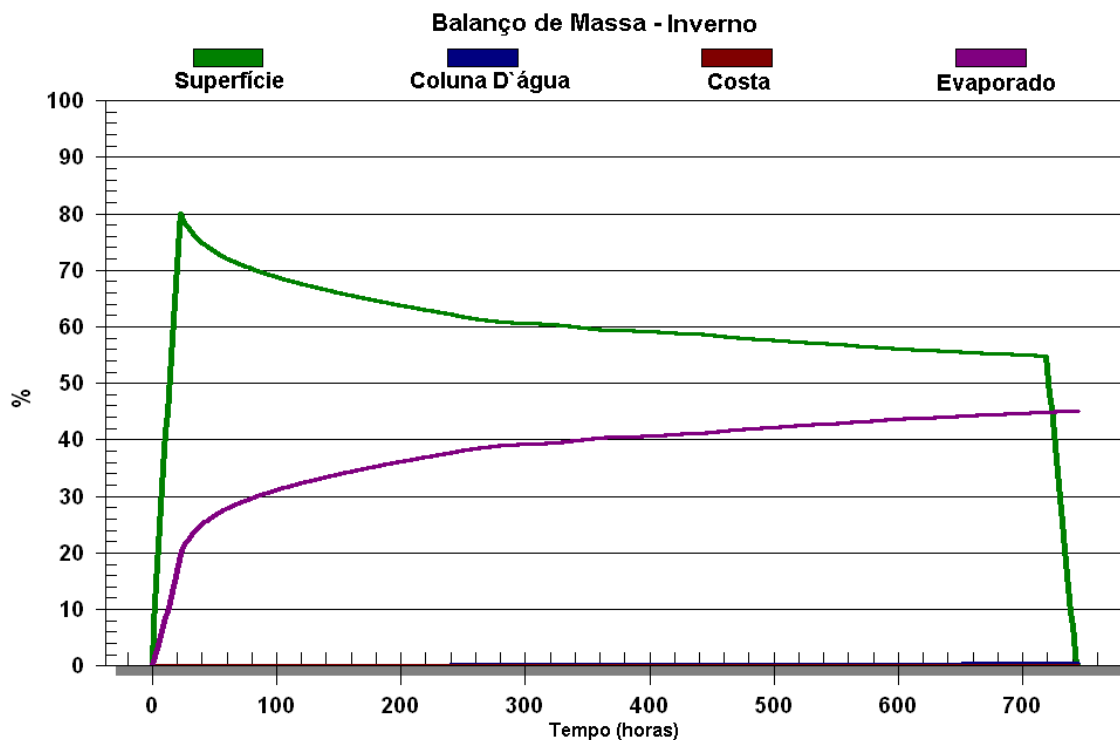
Na simulação determinística crítica de inverno (figura V.2-8) o menor tempo de chegada à costa é de 208 horas, sendo o primeiro toque na Ilha da Âncora, pertencente ao município de Armação dos Búzios, localizada aproximadamente 7 km a leste da costa do mesmo.





**Figura V.2-8** - Cenário determinístico crítico para um derrame de óleo ocorrido a partir do FPSO Cidade de Niterói, no período de inverno.

A figura V.2-9 apresenta um gráfico com o balanço de massa (óleo na superfície, na costa, evaporado e na coluna d'água) para a simulação determinística crítica de inverno. Observa-se que, assim como no verão, a evaporação é o principal processo que atua na redução da massa de óleo nesse período.



**Figura V.2-9** - Balanço de massa para o cenário determinístico crítico de inverno.

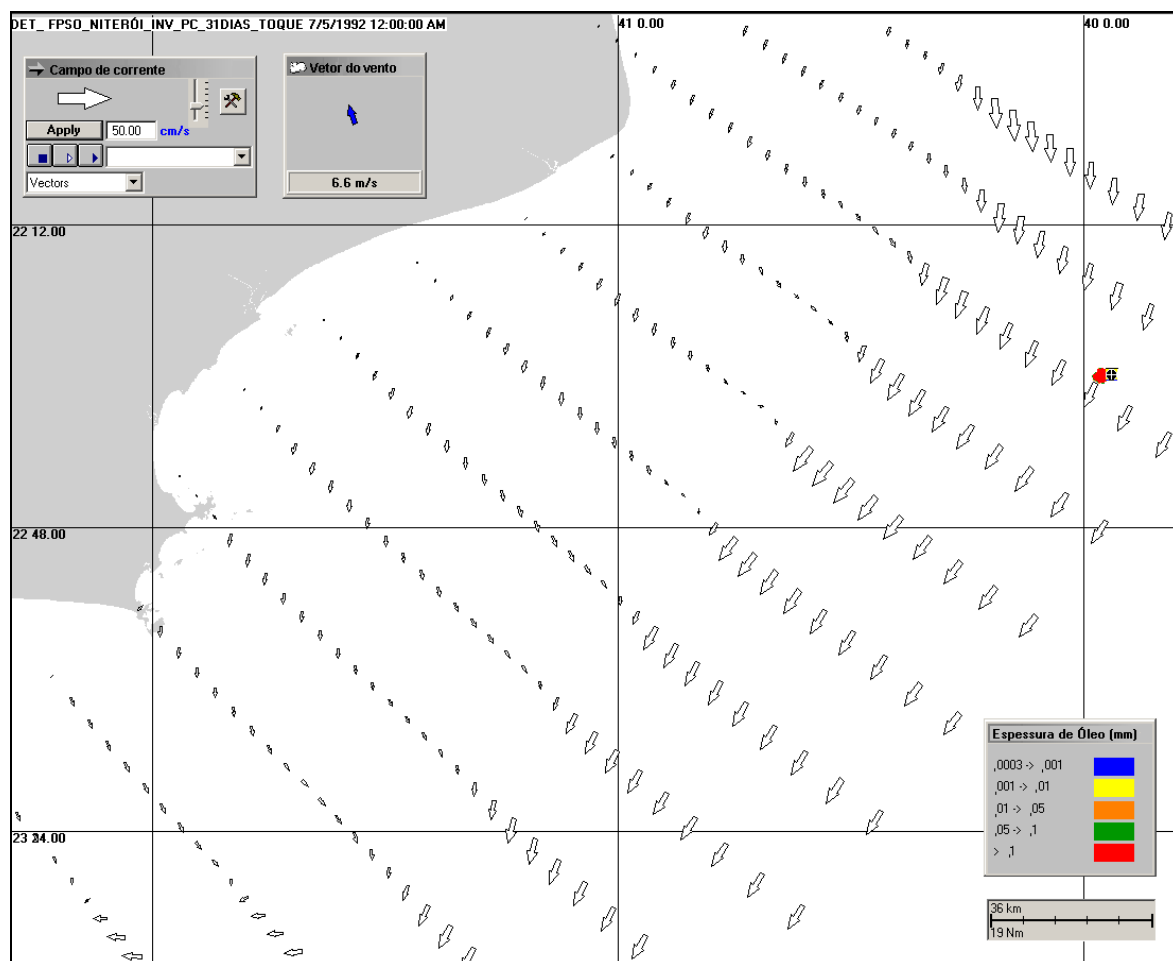
As figuras V.2-10 a V.2-14 apresentam as condições meteorológicas e oceanográficas que favoreceram à chegada do óleo à costa para o cenário determinístico crítico de inverno.

A figura V.2-10 apresenta o diagrama tipo *stick plot* para o período de 208 horas, a partir do início da simulação até o primeiro toque na costa, para o cenário determinístico crítico de inverno. Observa-se que este período inicia-se com a passagem de um sistema frontal, onde os vetores indicam ventos provenientes do quadrante sul, alternando para ventos do quadrante leste, condição esta que proporcionou o toque da mancha na costa em menor tempo.

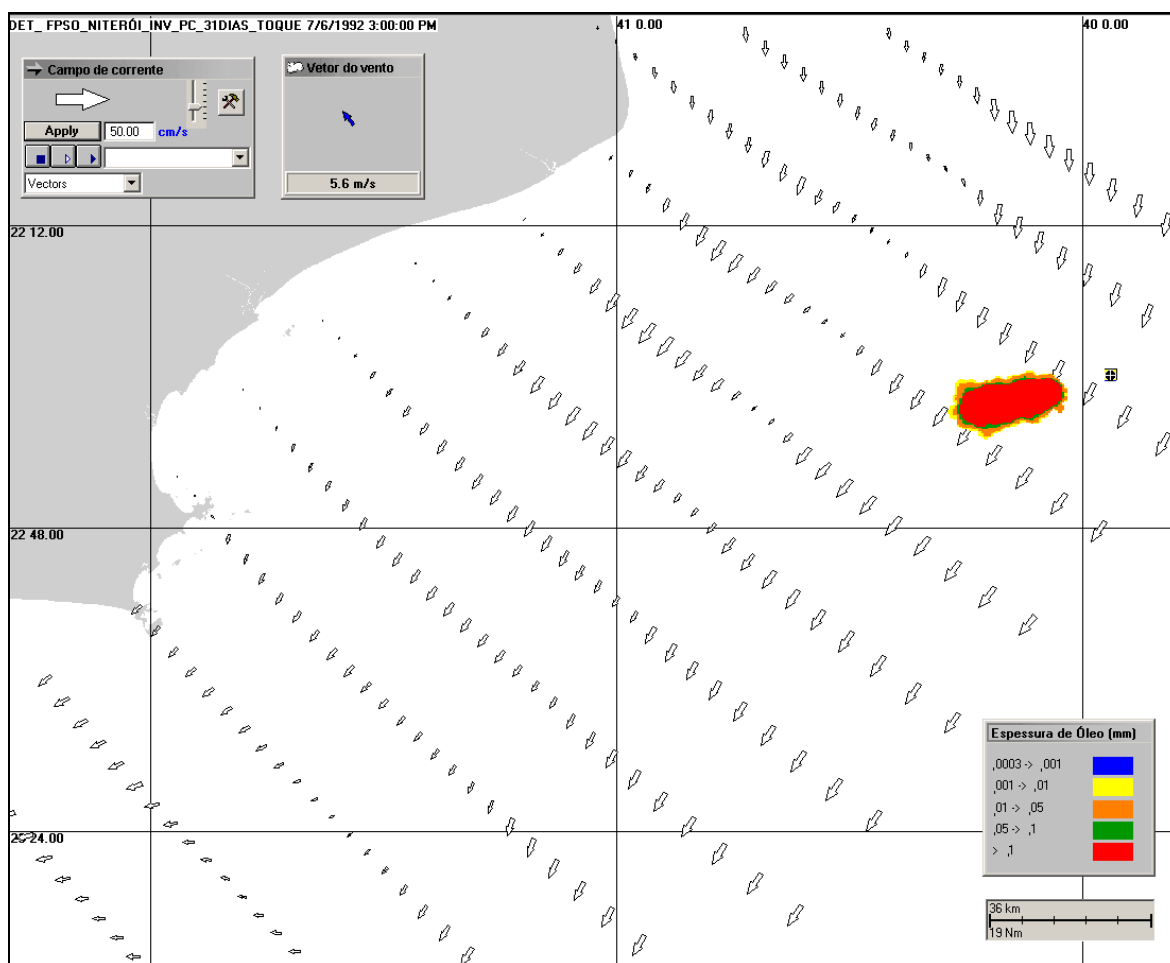


**Figura V.2-10** - Diagrama *stick plot* dos vetores de vento para o cenário determinístico crítico de inverno, a partir do início da simulação até o primeiro toque na costa.

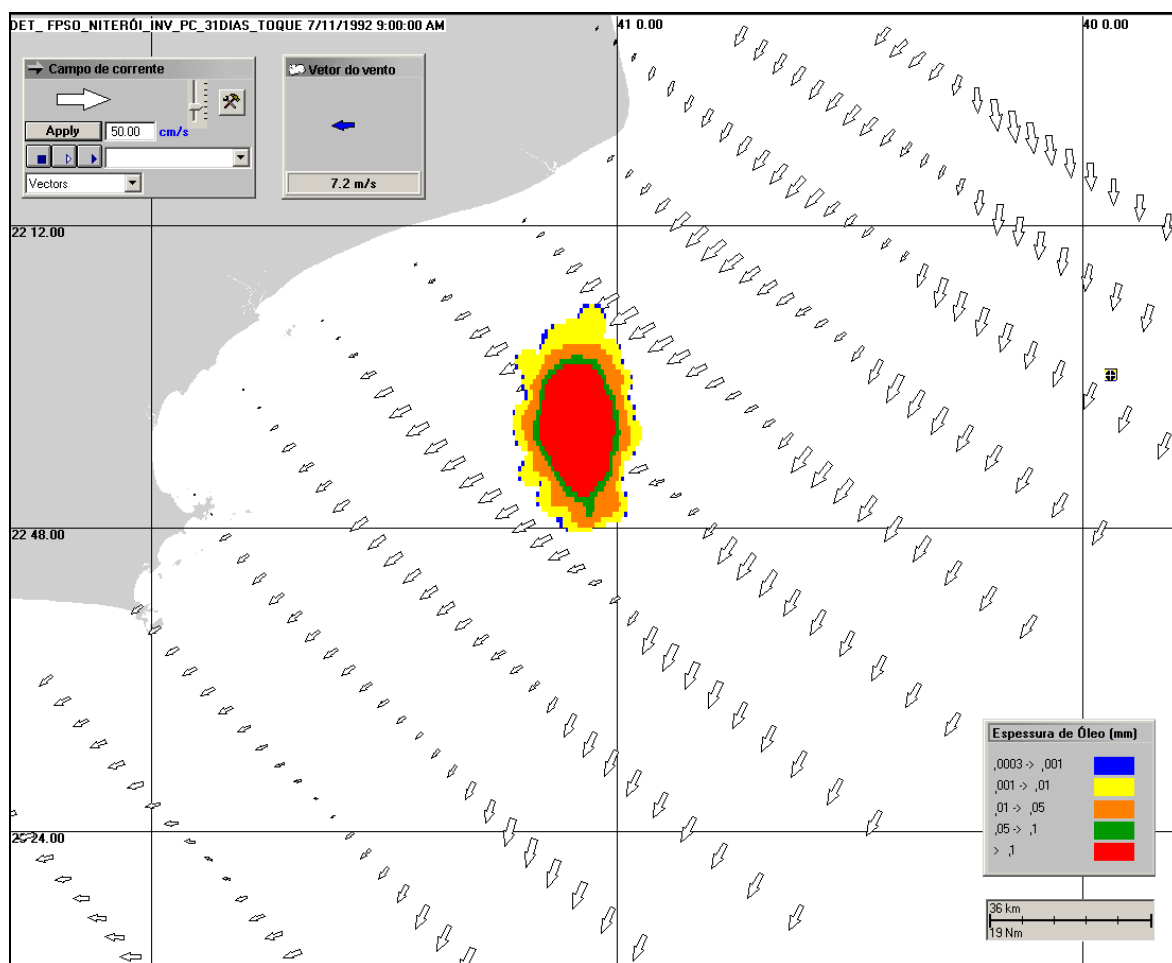
As figuras V.2-11 a V.2-14 apresentam ilustrações das condições meteorológicas e oceanográficas para alguns instantes do cenário determinístico crítico de inverno, a partir do início do derrame até o primeiro toque na costa.



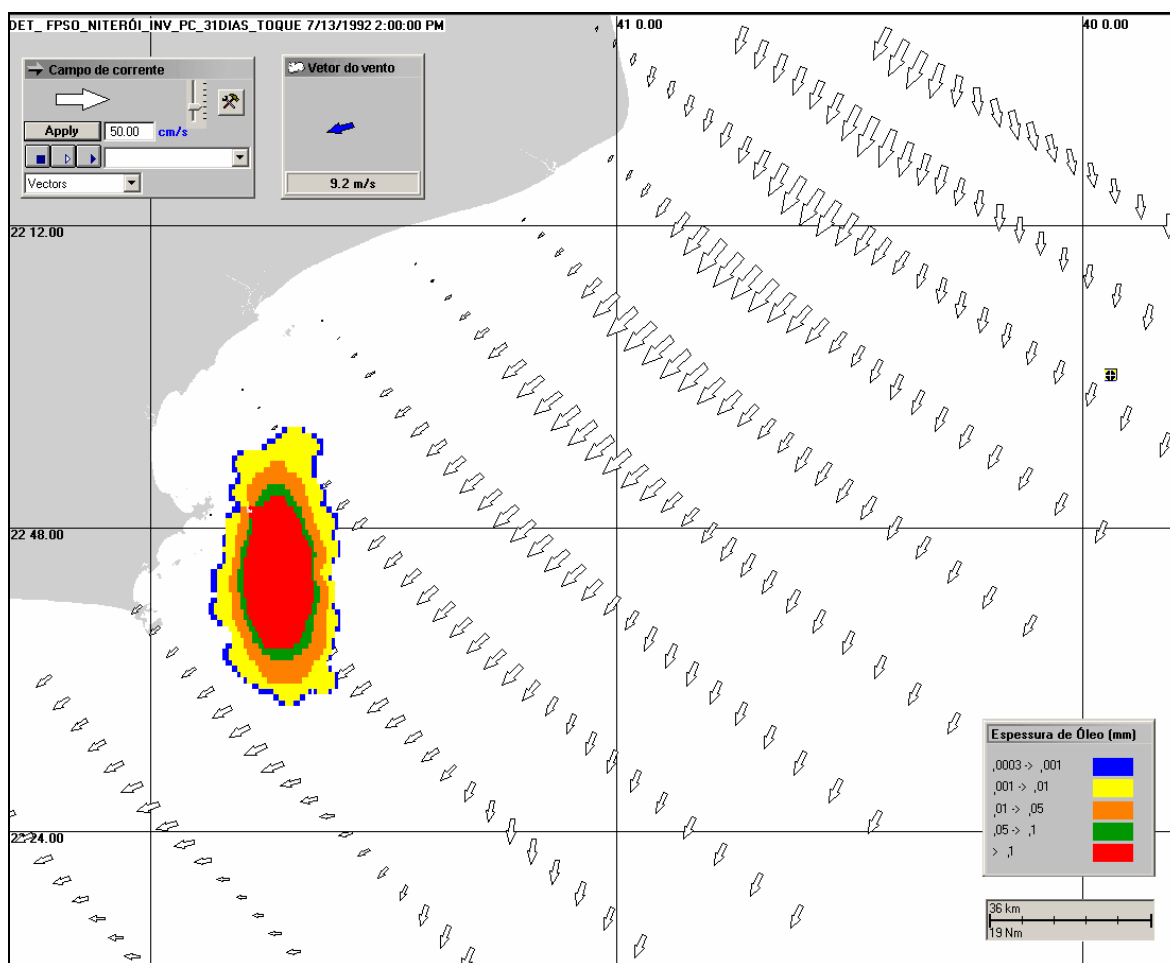
**Figura V.2-11 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística crítica de inverno.**



**Figura V.2-12 - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo 42 horas após o início da simulação determinística crítica de inverno.**



**Figura V.2-13** - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo 156 horas após o início da simulação determinística crítica de inverno.

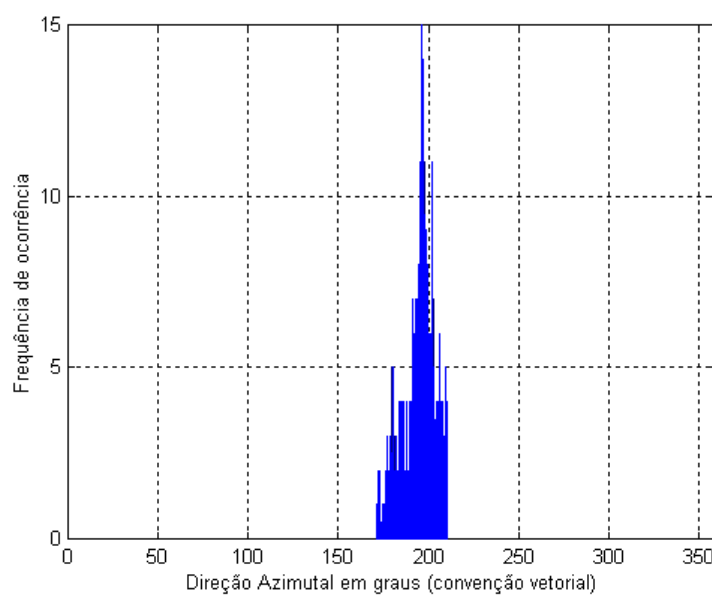


**Figura V.2-14** - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante de primeiro toque na costa da simulação determinística crítica de inverno.

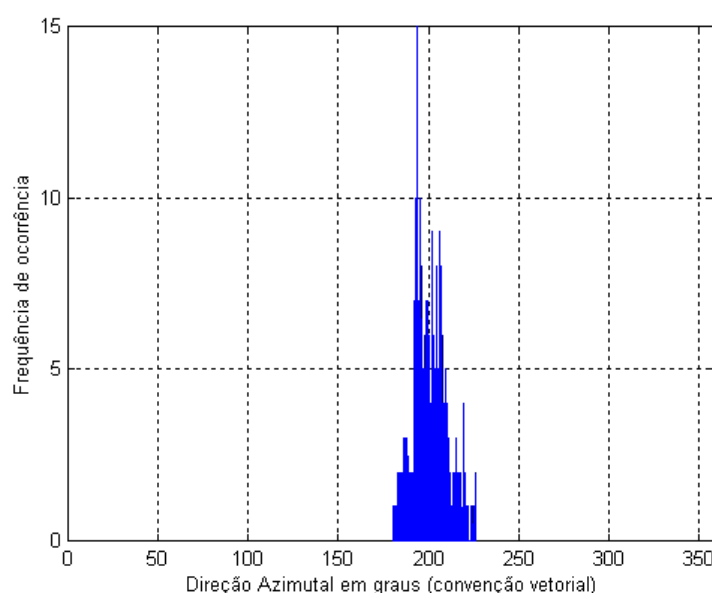
### V.3 CENÁRIOS DETERMINÍSTICOS PARA AS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS E OCEANOGRÁFICAS MAIS FREQUENTES

Os resultados das análises dos dados de vento utilizados na modelagem de derrame de óleo, realizadas no Sub-item IV.2.2, permitiu caracterizar e identificar as condições meteorológicas mais frequentes na região de estudo. Observou-se que, durante o período de verão, os ventos mais frequentes são provenientes das direções ENE, NE e NNE (tabela IV.2.2-1), e durante o inverno, os ventos mais frequentes são de N, NNE e ENE (tabela IV.2.2-2).

Para determinar as condições oceanográficas mais freqüentes, foram extraídas séries temporais das correntes de verão e inverno reproduzidas pelo modelo hidrodinâmico, cujos histogramas das direções são apresentados nas figuras V.3-1 e V.3-2. Observa-se que, em ambos os períodos de verão e inverno, as condições oceanográficas mais freqüentes são correntes para S e SSW.



**Figura V.3-1** - *Frequência de ocorrência das direções de correntes extraídas do modelo hidrodinâmico durante os meses de verão.*



**Figura V.3-2** - *Frequência de ocorrência das direções de correntes extraídas do modelo hidrodinâmico durante os meses de inverno.*

Para as condições meteorológicas e oceanográficas descritas acima, foram elaborados os cenários determinísticos, de verão e inverno, cujo instante inicial corresponde a uma condição mais freqüente, por um período de tempo maior. Nestes cenários mais freqüentes de verão e inverno, foram considerados vazamentos de 294.549 m<sup>3</sup> ao longo de 24 horas (afundamento do FPSO Cidade de Niterói), simulados por 31 dias.

A tabela V.3-1 apresenta um resumo dos cenários determinísticos para as condições meteorológicas e oceanográficas mais freqüentes simulados nos períodos de verão e de inverno.

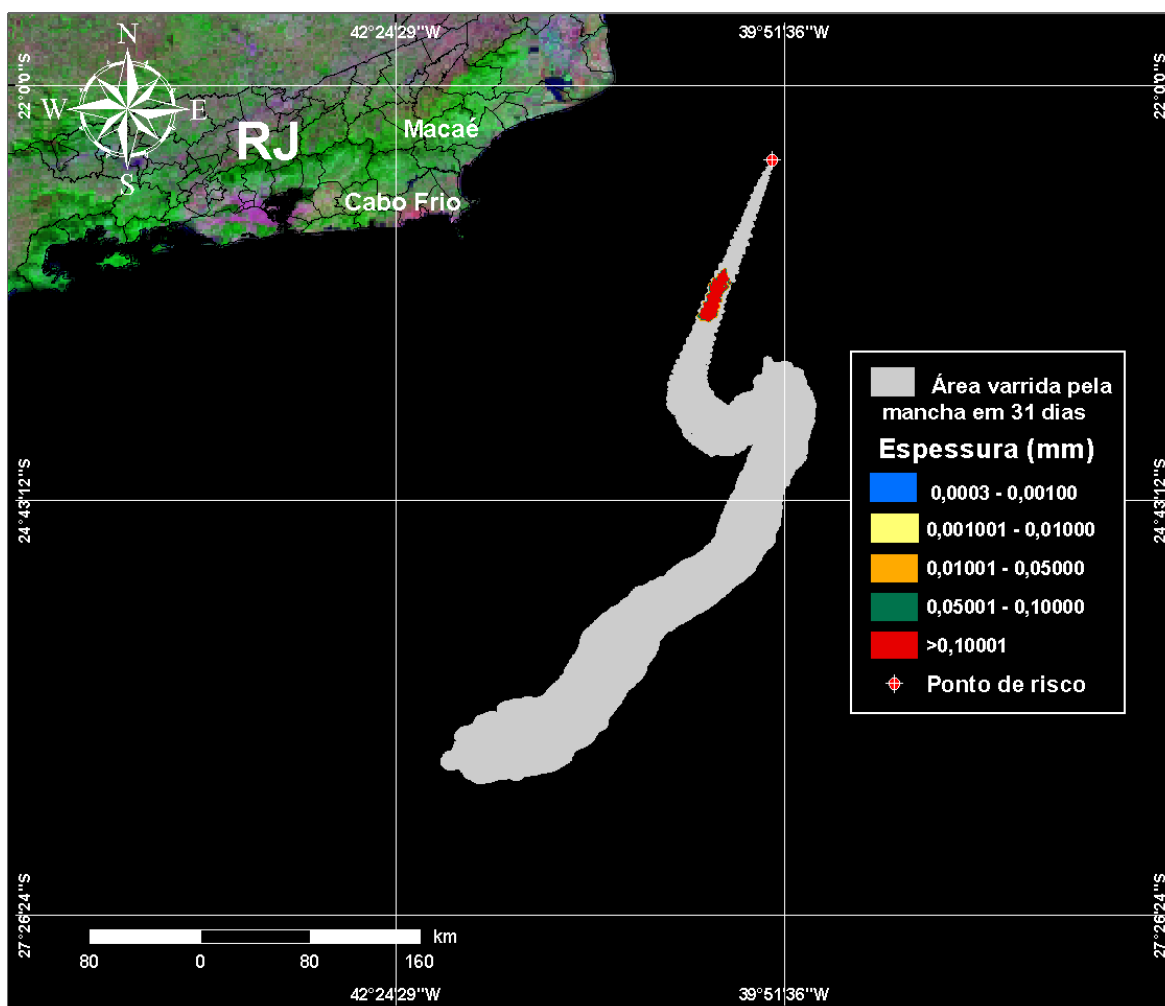
**Tabela V.3-1** - Resumo dos cenários determinísticos de verão e de inverno para as condições meteorológicas e oceanográficas mais freqüentes de derrame de óleo a partir do FPSO Cidade de Niterói.

CENÁRIOS	DATA DE INÍCIO	MENOR DISTÂNCIA EM RELAÇÃO À COSTA (km)
DET2_FPSO_CN_VER_PC_31D	12/01/1992 – 14:00h	166
DET2_FPSO_CN_INV_PC_31D	02/06/1992 – 17:00h	176

Nas figuras V.3-3 e V.3-9 são apresentados os contornos de espessura no instante de maior proximidade da mancha em relação à costa, para os cenários determinísticos mais freqüentes de verão e de inverno, respectivamente. 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 31 dias de duração da simulação e, portanto, não está associada a uma espessura. A mancha no instante de menor distância da costa é aquela representada pela escala de cores indicada nas legendas.

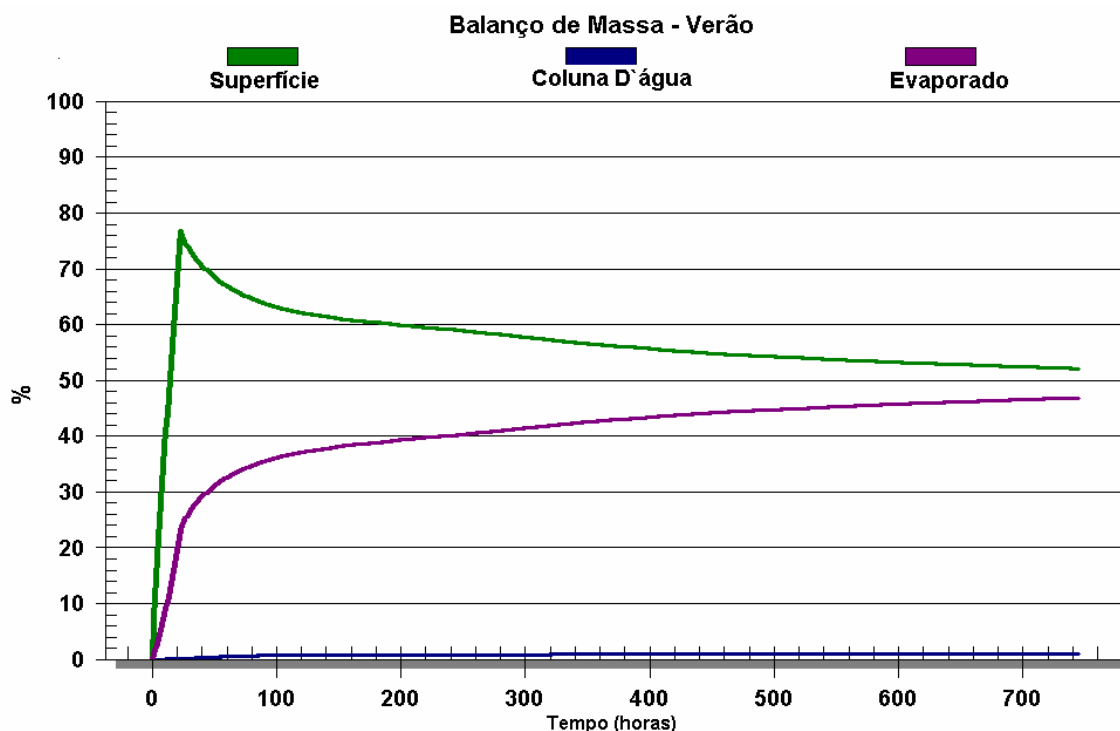
Na simulação determinística mais freqüente de verão (figura V.3-3), a menor distância da mancha em relação à costa foi de, aproximadamente, 166 km na região do município de Armação dos Búzios (RJ).





**Figura V.3-3** - Cenário determinístico mais freqüente para um derrame de óleo ocorrido a partir do FPSO Cidade de Niterói, no período de verão.

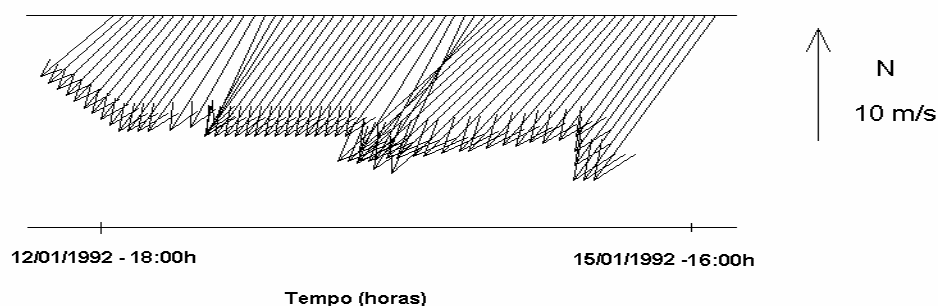
A figura V.3-4 apresenta um gráfico com o balanço de massa (óleo na superfície, evaporado e na coluna d'água) para a simulação determinística mais freqüente de verão. Observa-se na figura que a evaporação foi o principal fator responsável pela perda de massa de óleo.



**Figura V.3-4 - Balanco de massa para o cenário determinístico freqüente de verão.**

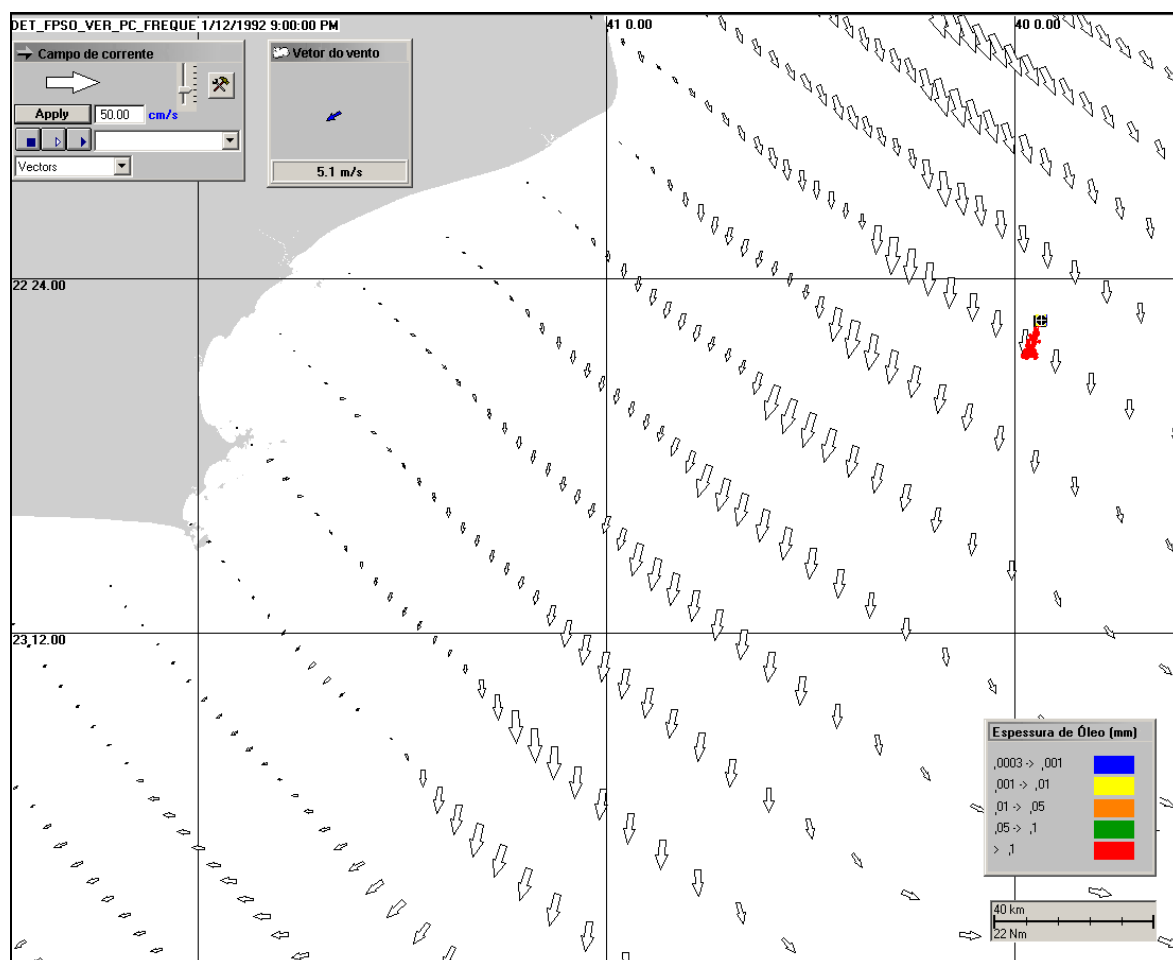
As figuras V.3-5 a V.3-8 apresentam as condições meteorológicas e oceanográficas durante o período de simulação do cenário determinístico mais freqüente de verão, para um vazamento a partir do FPSO Cidade de Niterói.

A figura V.3-5 apresenta o diagrama *stick plot* dos vetores de vento utilizado na simulação determinística mais freqüente de verão, para o período de 60 horas, a partir do início da simulação até o instante de maior proximidade da costa.

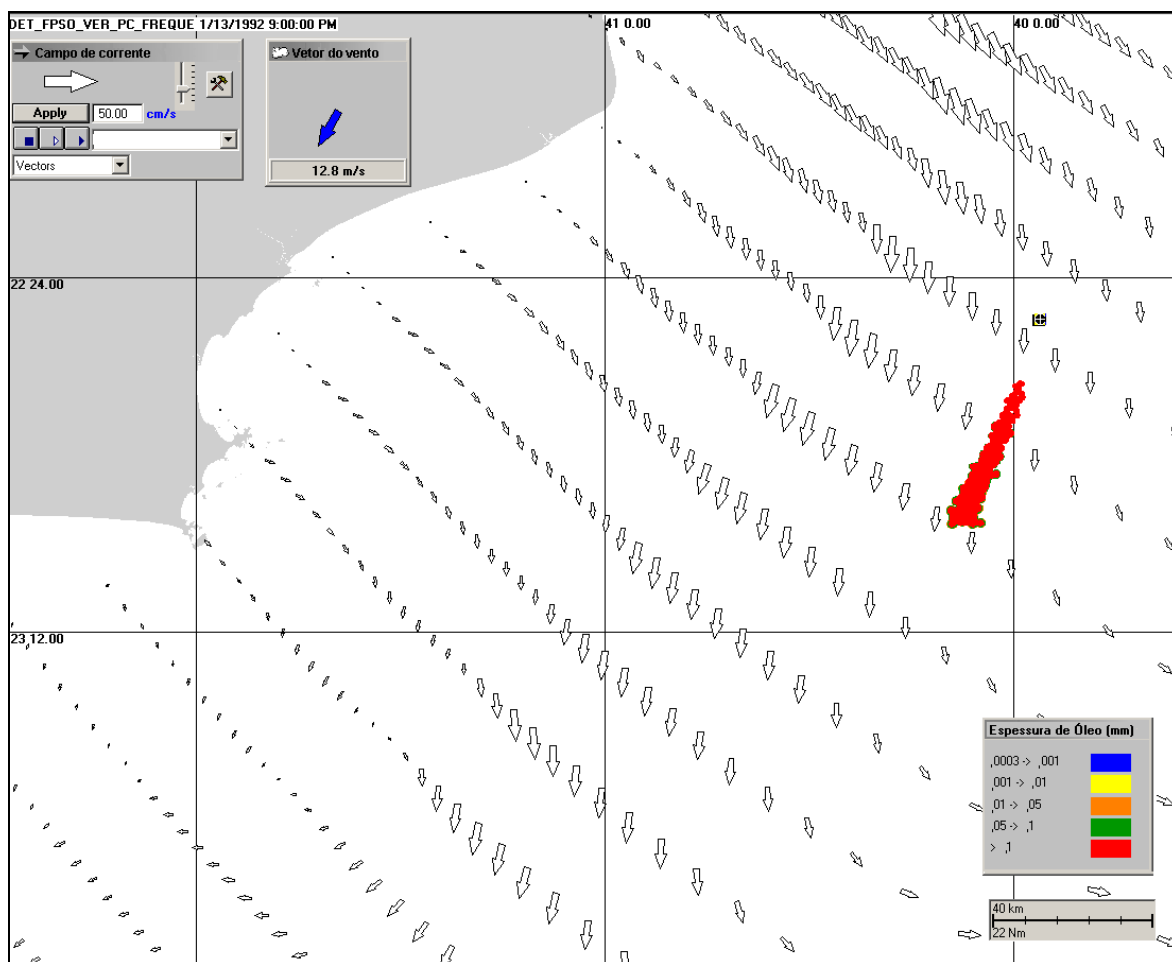


**Figura V.3-5 - Diagrama stick plot dos vetores de vento para o cenário determinístico mais freqüente de verão, a partir do início da simulação até o instante de maior proximidade da costa.**

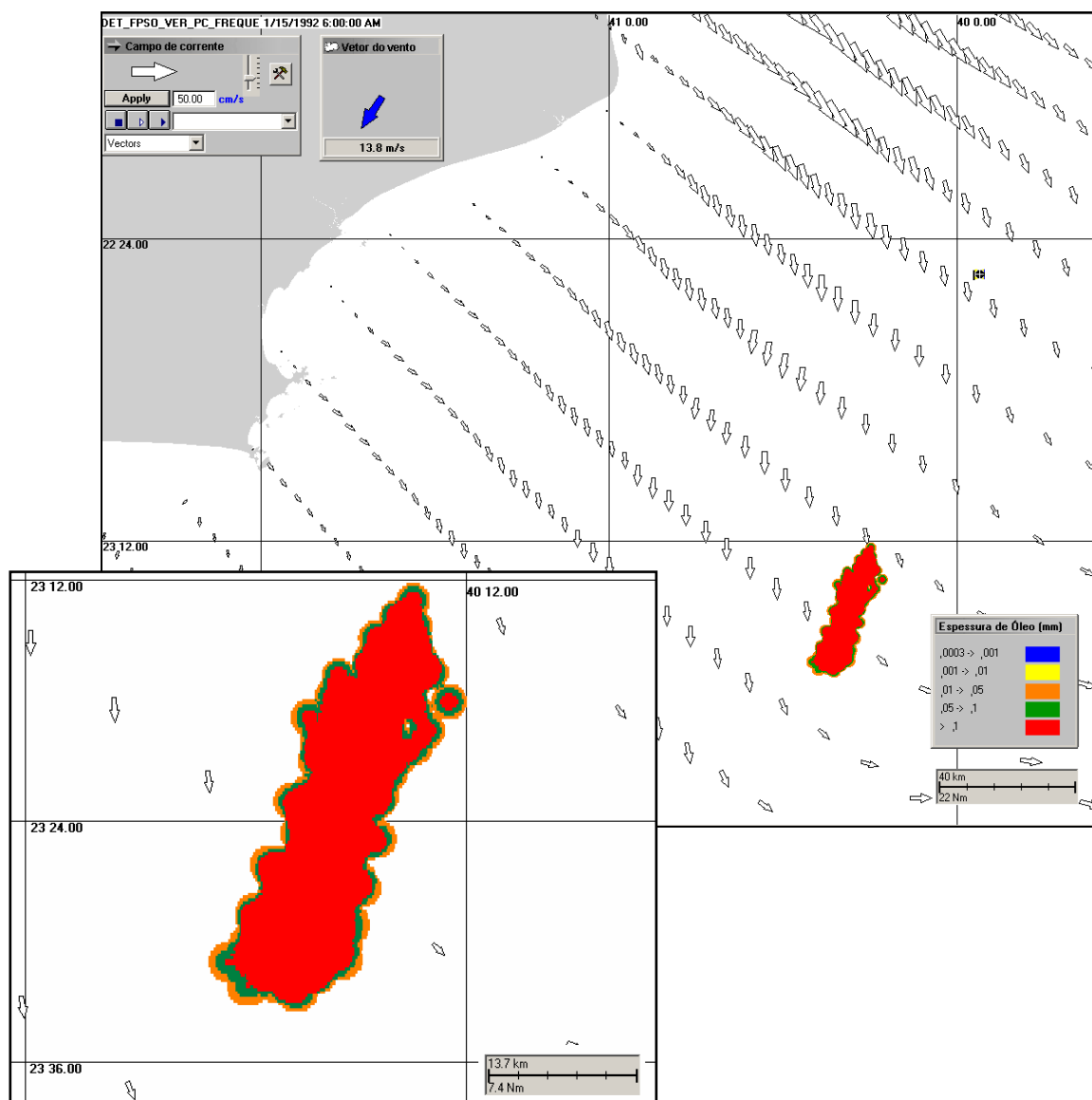
As figuras V.3-6 a V.3-8 apresentam ilustrações das condições meteorológicas e oceanográficas para alguns instantes do cenário determinístico mais freqüente de verão, a partir do início do derrame até o instante de maior proximidade da mancha de óleo em relação à costa.



**Figura V.3-6** - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística mais freqüente de verão.

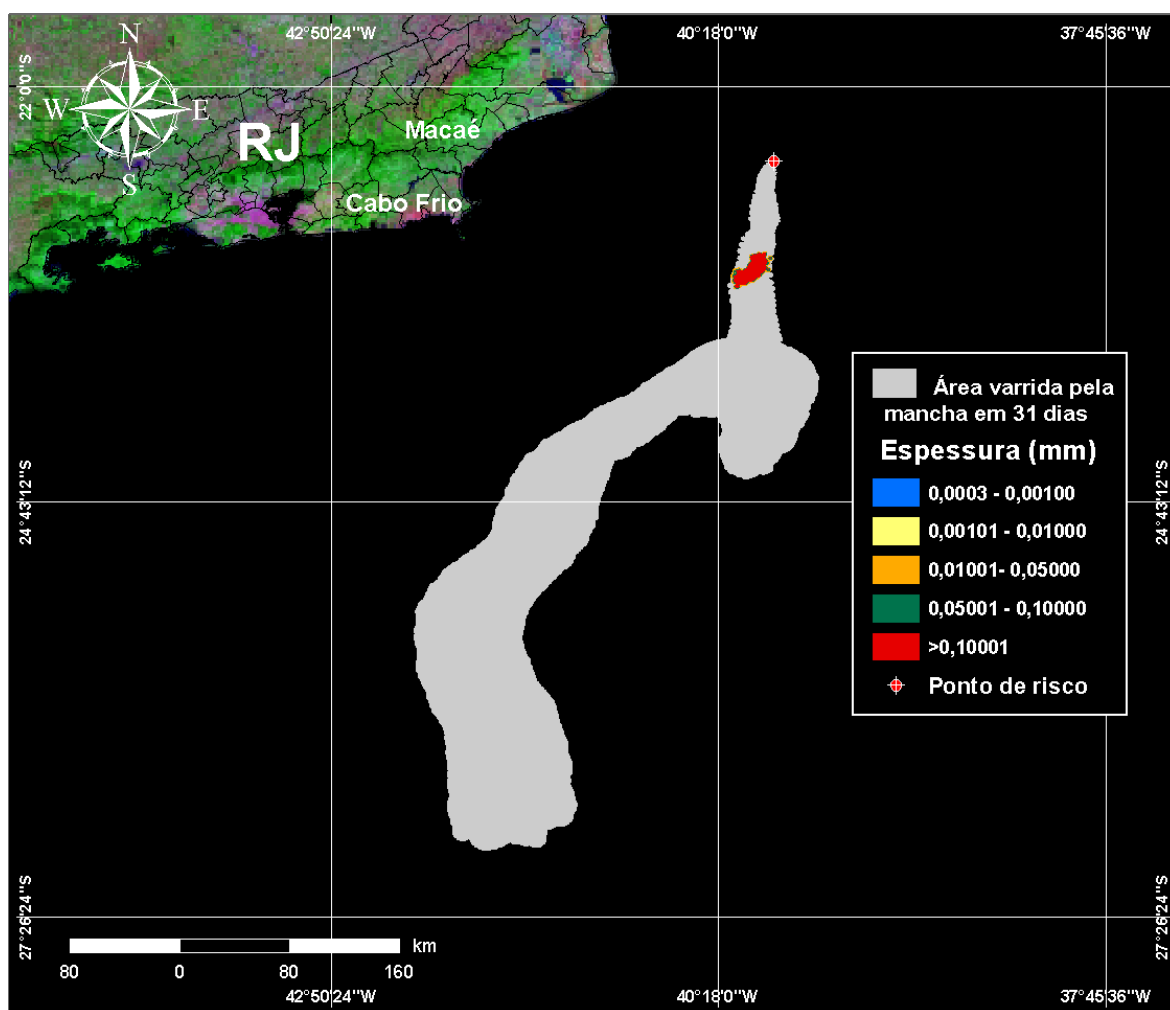


**Figura V.3-7 -** Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo 28 horas após o início da simulação determinística mais freqüente de verão.



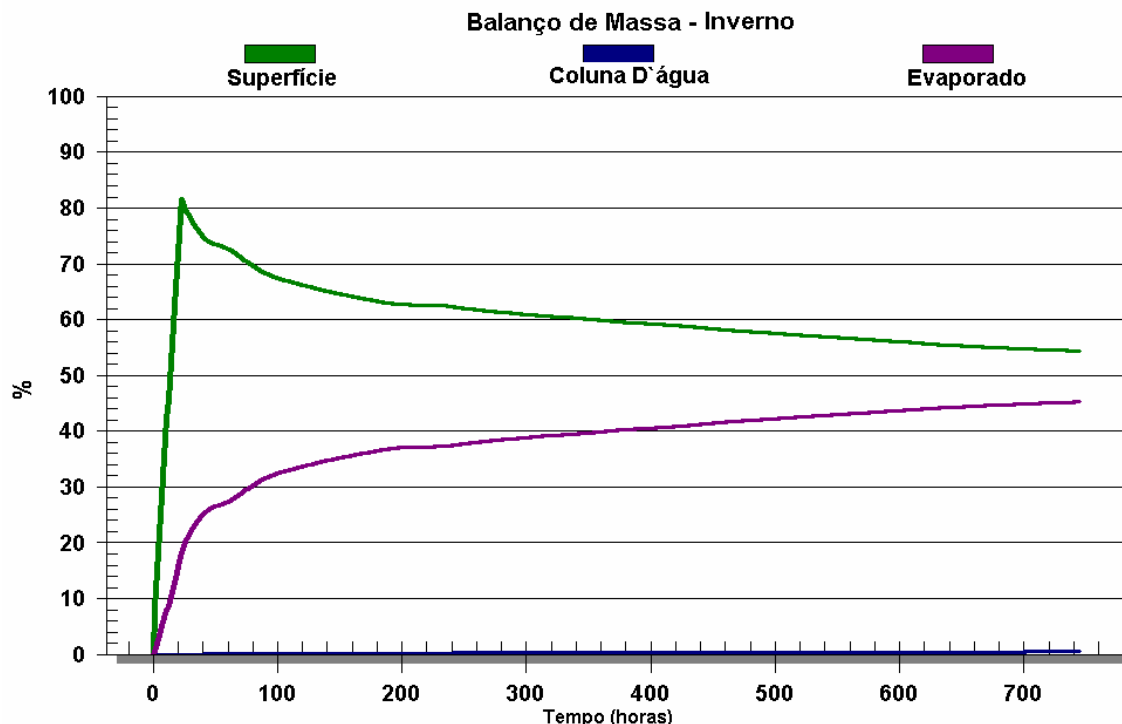
**Figura V.3-8** - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante de maior proximidade da costa para a simulação determinística mais freqüente de verão.

Na simulação determinística mais freqüente de inverno (figura V.3-9), a menor distância em relação à costa foi de, aproximadamente, 176 km na região do município de Armação dos Búzios (RJ).



**Figura V.3-9** - Cenário determinístico mais freqüente para um derrame de óleo ocorrido a partir do FPSO Cidade de Niterói, no período de inverno.

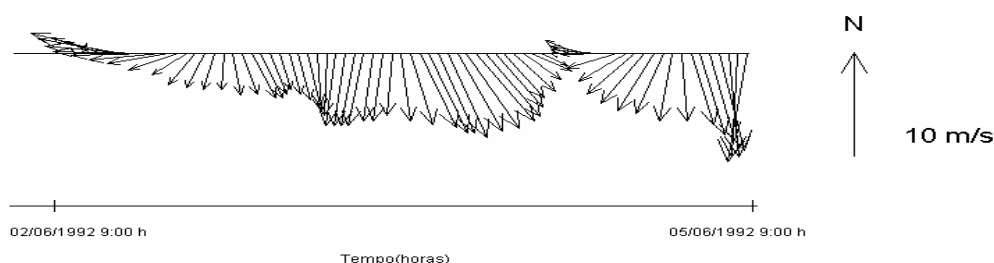
A figura V.3-10 apresenta um gráfico com o balanço de massa (óleo na superfície, evaporado e na coluna d'água) para a simulação de inverno. Assim como no verão, observa-se novamente que a evaporação foi o principal fator responsável pela redução da mancha de óleo.



**Figura V.3-10 - Balanco de massa para o cenário determinístico freqüente de verão.**

As figuras V.3-11 a V.3-14 apresentam as condições meteorológicas e oceanográficas durante o período de simulação do cenário determinístico mais freqüente de inverno, para um vazamento a partir do FPSO Cidade de Niterói.

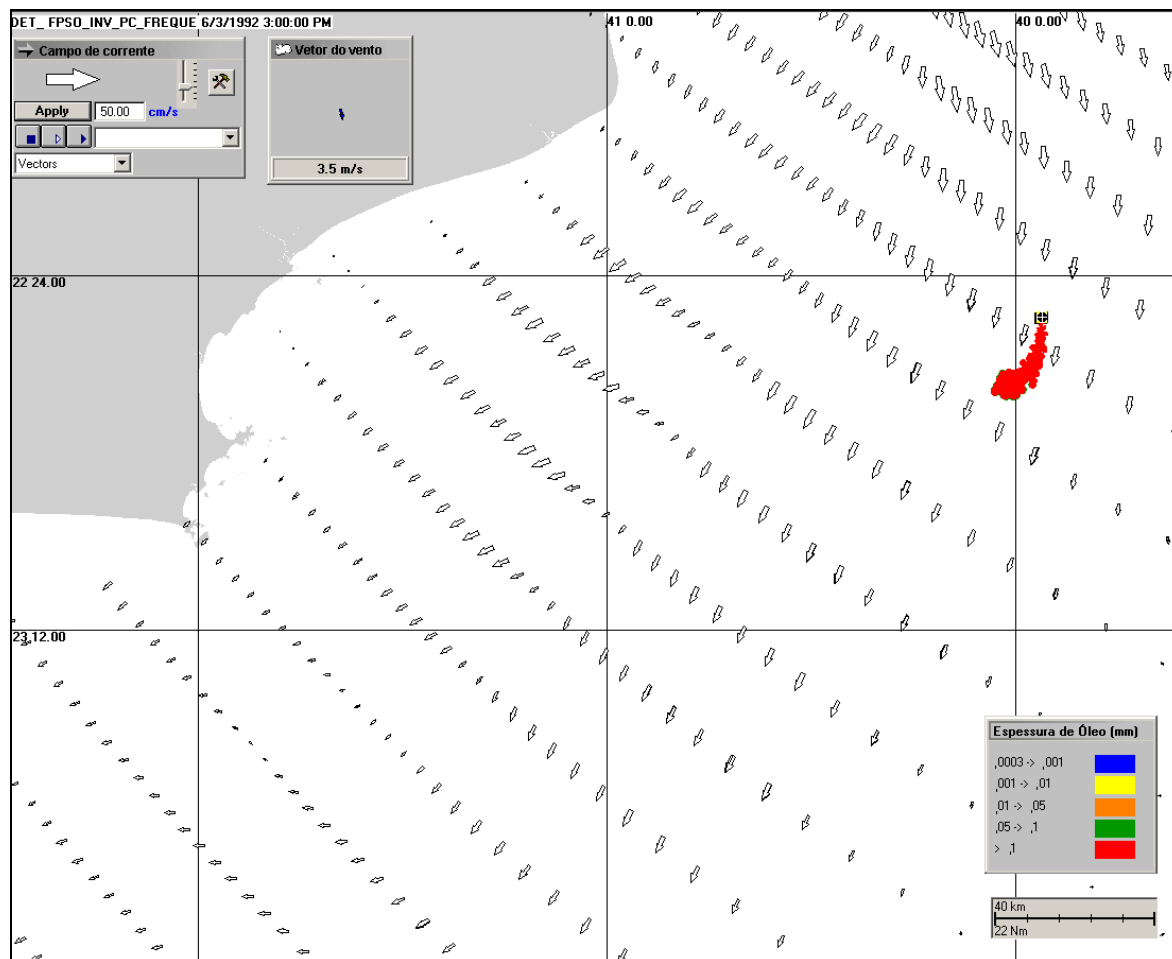
A figura V.3-11 apresenta o diagrama *stick plot* dos vetores de vento utilizado na simulação determinística mais freqüente de inverno, para o período de 54 horas, a partir do início da simulação até o instante de maior proximidade da costa.



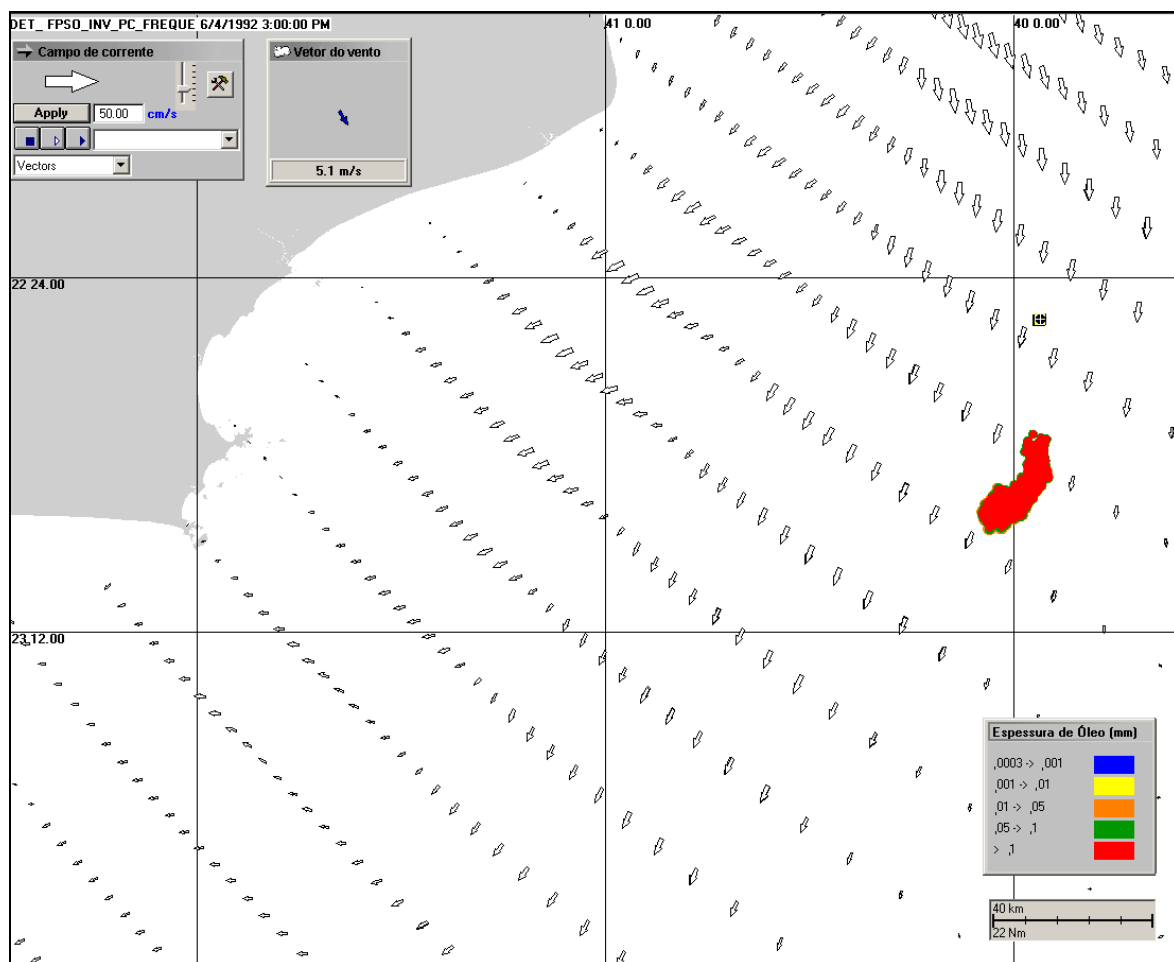
**Figura V.3-11 - Diagrama stick plot dos vetores de vento para o cenário determinístico mais freqüente de inverno, a partir do início da simulação até o instante de maior proximidade da costa.**



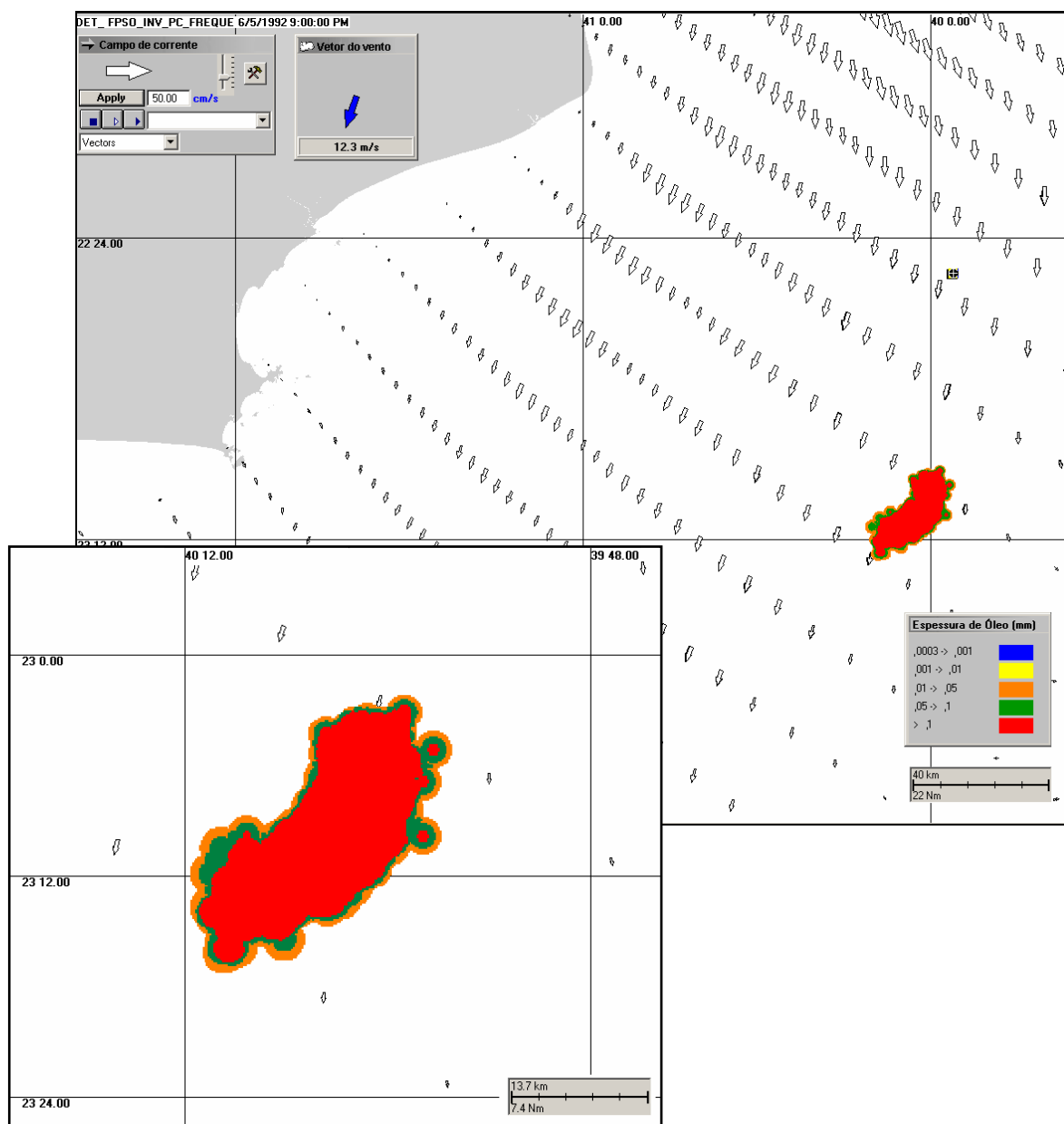
As figuras V.3-12 a V.3-14 apresentam ilustrações das condições meteorológicas e oceanográficas para alguns instantes do cenário determinístico mais freqüente de inverno, a partir do início do derrame até o instante de maior proximidade da mancha de óleo em relação à costa.



**Figura V.3-12** - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no início da simulação determinística mais freqüente de inverno.



**Figura V.3-13** - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo 22 horas após o início da simulação determinística mais freqüente de inverno.



**Figura V.3-14** - Condições meteorológicas e oceanográficas e espessuras da mancha de óleo no instante de maior proximidade da costa para a simulação determinística mais freqüente de inverno.

## **VI CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste relatório são apresentados os estudos realizados para a determinação da trajetória e intemperismo de um potencial acidente com petróleo a partir do FPSO Cidade de Niterói, Bacia de Campos, decorrentes das atividades de desenvolvimento da produção do Módulo II do Campo de Marlim Leste.

Foram conduzidas simulações probabilísticas para determinar contornos de probabilidade da mancha atingir a área de estudo a partir de 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 294.549 m<sup>3</sup> derramados ao longo de 24 horas, correspondente ao afundamento do FPSO Cidade de Niterói. A partir dos resultados dessas simulações probabilísticas foram selecionados os cenários determinísticos críticos para condições de verão e inverno, utilizando como critérios a menor distância da mancha em relação à costa e o menor tempo de chegada do óleo na costa, respectivamente. Adicionalmente, foram realizadas simulações determinísticas de verão e inverno considerando as condições meteorológicas e oceanográficas mais frequentes.

O critério de parada adotado nas simulações foi o tempo de 30 dias para o acompanhamento de cada partícula, ou seja, as simulações no caso de afundamento do FPSO foram de 31 dias, com o acompanhamento de cada partícula por 30 dias. Nos casos de derrames instantâneos (8 e 200 m<sup>3</sup>) a duração das simulações foi de 30 dias. Além deste critério de parada, foi adotado o corte de espessuras inferiores a 300 nm nas simulações e apresentações de resultados.

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 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 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.

Os resultados das simulações probabilísticas mostraram que não há probabilidade de toque na costa durante o período de verão, sendo a menor distância em relação à esta de cerca de 81 km, na região do município de Campos dos Goytacazes.

Os resultados das simulações probabilísticas de inverno mostraram que a probabilidade de toque estende-se por uma faixa de 358 km do litoral do Estado do RJ, desde Campos dos Goytacazes até Niterói. As maiores probabilidades de toque na costa (10-20%) ocorreram nos municípios de Cabo Frio, Armação dos Búzios, Arraial do Cabo, Araruama e Saquarema. Observa-se que na costa do município de Campos dos Goytacazes ocorreram tanto os maiores valores de volume médio de óleo ( $1.107-1.227 \text{ m}^3/\text{km}$ ) quanto os maiores valores de volume máximo de óleo ( $4.592-5.099 \text{ m}^3/\text{km}$ ). O menor tempo de toque na costa ocorreu cerca de 208 horas após o início da simulação, no município de Armação dos Búzios (na Ilha da Âncora).

Os resultados do cenário determinístico crítico de inverno mostraram que o volume final de óleo na linha de costa é de apenas  $240 \text{ m}^3$ .

Nos cenários determinísticos mais freqüentes, onde a simulação se inicia a partir de uma data correspondente às condições oceanográficas e meteorológicas mais freqüentes, não houve toque na costa, nem no período de verão nem no de inverno. A menor distância em relação à costa foi de 166 km no período de verão.

Finalmente, nas simulações apresentadas neste estudo, não foram consideradas quaisquer medidas de resposta ou controle para os potenciais acidentes simulados.

## 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.

BRASIL, 2001. Resolução CONAMA nº 293, de 12 de dezembro de 2001. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 29 abr. 2002.

CASTRO FILHO, B.M.C. & L.B. MIRANDA, 1998. Physical Oceanography of the Western Atlantic Continental Shelf located between 4°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.

FEMAR. 2000. Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras. Fundação de Estudos do Mar. Rio de Janeiro. 281pp.

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 spilllets 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.

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 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>	325047
<b>Responsável pelo(s) Capítulo(s)</b>	TODAS
<b>Assinatura</b>	

<b>Profissional</b>	Pedro Fabiano de Moraes Sarmento
<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>	1800416
<b>Responsável pelo(s) Capítulo(s)</b>	IV a VII
<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 pelo(s) Capítulo(s)</b>	TODAS
<b>Assinatura</b>	

<b>Profissional</b>	Gabriel Clauzet
<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>	1031373
<b>Responsável pelo(s) Capítulo(s)</b>	I a III
<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 pelo(s) Capítulo(s)</b>	I a 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 pelo(s) Capítulo(s)</b>	I a III
<b>Assinatura</b>	

<b>Profissional</b>	Marco Antonio 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 a VI
<b>Assinatura</b>	