

Modelagem do Transporte e Dispersão de Óleo no Mar para o Campo de Frade, Bacia de Campos

Revisão 00
Jul/2006

RELATÓRIO TÉCNICO – REVISÃO 00



Rua Purpurina, 155 - Conj. 97
Vila Madalena - São Paulo, SP
CEP 05435-030
Fone/Fax: (11) 3444-3748
www.appsci.com.br

Modelagem do Transporte e Dispersão de Óleo no Mar para o Campo de Frade – Bacia de Campos

AUTORES:

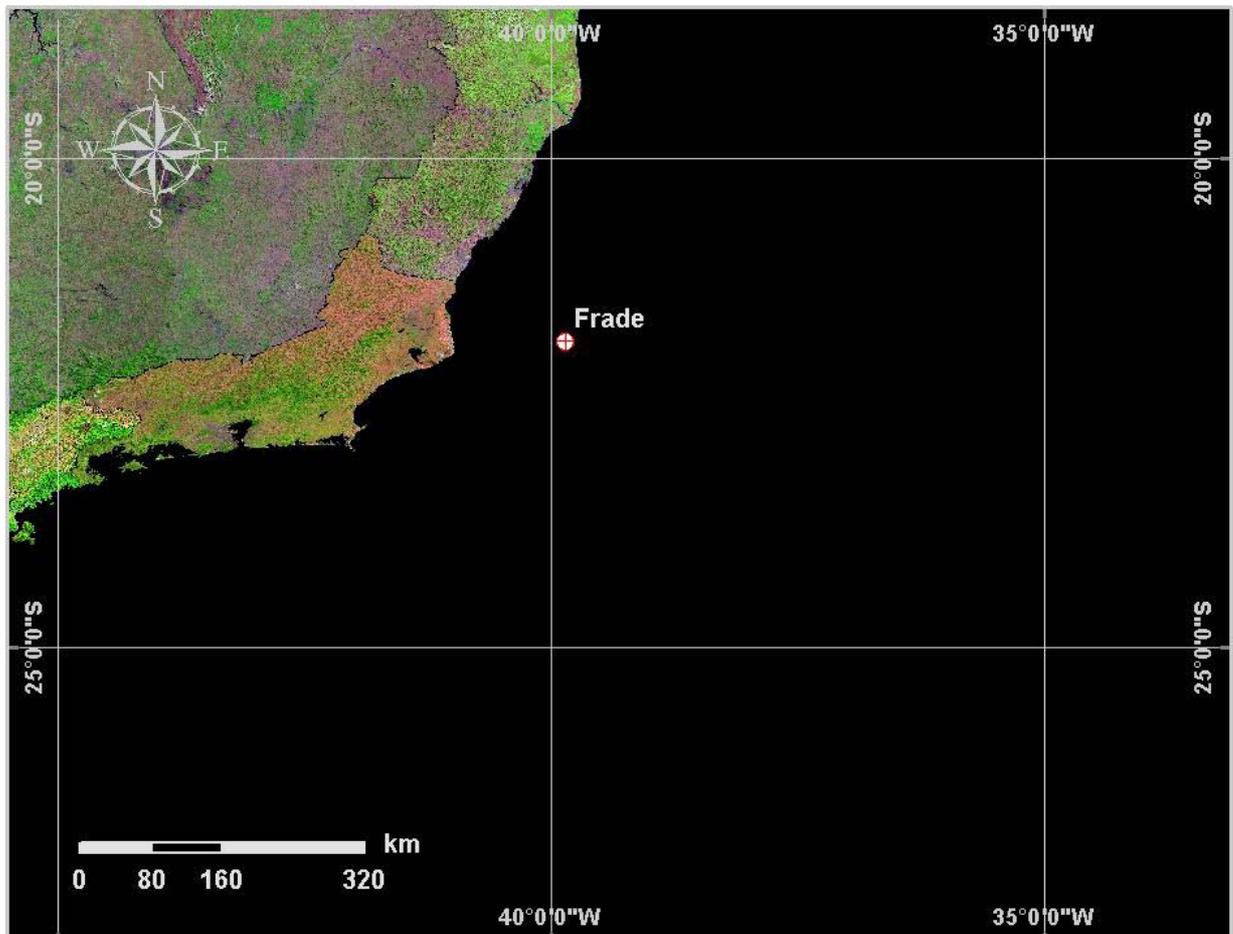
ASA SOUTH AMERICA

CLIENTE:

Chevron Texaco

DATA:

Julho, 2006





Applied Science Associates
Rua Purpurina, 155, cj 95
Vila Madalena – São Paulo –SP
CEP: 05435-030

ChevronTexaco

Chevron Texaco
Avenida República do Chile, 230 – 18º
Centro – Rio de Janeiro - RJ
CEP 20031-170

Modelagem do Transporte e Dispersão de Óleo no Mar para o Campo de Frade – Bacia de Campos

Equipe **ASA SOUTH AMERICA**:

ANA CAROLINA DA ROCHA	(Nº IBAMA : 325047)
ANDREA GALLO XAVIER	(Nº IBAMA : 058617)
CARLOS EDUARDO SIMÃO	(Nº IBAMA : 434226)
DANIEL CONSTANTINO ZACHARIAS	(Nº IBAMA : 638533)
EDUARDO YASSUDA	(Nº IBAMA : 094066)
ÉRIKA NAOMI TOMINAGA DE SOUZA	(Nº IBAMA : 980855)
JOSÉ EDSON PEREIRA	(Nº IBAMA : 326336)
MARCO ANTONIO CORRÊA	(Nº IBAMA : 434236)
MARIA REGINA F. GUIMARÃES	(Nº IBAMA : 434231)
MAURÍCIO PERSON LAMMARDO	(Nº IBAMA : 272165)
RONALDO MAIA DE JESUS PALMEIRA	(Nº IBAMA : 434269)

Revisão 00
Julho / 2006

ÍNDICE GERAL

RESUMO	1
I INTRODUÇÃO.....	I-1
I.1 ÁREA DE ESTUDO.....	I-2
I.1.1 PADRÕES DE CIRCULAÇÃO NA REGIÃO.....	I-3
I.1.2 CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS DA REGIÃO	I-4
II MODELO HIDRODINÂMICO.....	II-1
II.1 DESCRIÇÃO DO MODELO E SUAS HIPÓTESES.....	II-1
II.1.1 EQUAÇÕES BÁSICAS DO MODELO HIDRODINÂMICO	II-2
II.1.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO ADOTADAS	II-5
II.2 DESCRIÇÃO DO PARALLEL OCEAN CIRCULATION MODEL.....	II-6
II.3 DOMÍNIO MODELADO E DADOS DE ENTRADA DO MODELO	II-6
II.3.1 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO E BATIMETRIA	II-6
II.3.2 DADOS DE VENTO E MARÉ.....	II-8
II.3.3 ESTRUTURA TERMOHALINA.....	II-9
II.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO	II-10
III MODELAGEM DE DERRAMES DE ÓLEO	III-1
III.1 MODELO OILMAP	III-1
III.1.1 FORMULAÇÃO DO MODELO	III-4
III.2 DADOS DE ENTRADA	III-14
IV MODELAGEM DE DERIVA DE ÓLEO PARA UM POTENCIAL ACIDENTE NA BACIA DE CAMPOS.....	IV-1
IV.1 DADOS DE ENTRADA	IV-1
IV.1.1 CAMPO DE CORRENTES.....	IV-2
IV.1.2 DADOS DE VENTO	IV-2
IV.1.3 PONTO DE RISCO E VOLUMES	IV-3
IV.1.4 CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO UTILIZADO.....	IV-4
IV.2 RESUMO DOS CENÁRIOS SIMULADOS	IV-5
V RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM POTENCIAL ACIDENTE NA BACIA DE CAMPOS.....	V-1
V.1 SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS.....	V-1
V.2 CENÁRIOS DETERMINÍSTICOS CRÍTICOS	V-23

VI CONSIDERAÇÕES FINAIS VI-1
VII BIBLIOGRAFIA VII-1

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade e direção do vento para o ano de 1992, na Bacia de Campos.....	IV-3
Tabela 2 - Coordenadas do ponto de risco que representa o FPSO, localizado no campo de Frade, Bacia de Campos.....	IV-3
Tabela 3 - Tipo de óleo utilizado nas simulações.	IV-4
Tabela 4 - Características do óleo tipo Frade.	IV-5
Tabela 5 - Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derrames do óleo para o FPSO.	IV-6
Tabela 6 - Extensão da linha de costa com probabilidade de ser atingida pelo derrame de óleo do FPSO, simulado em condições de inverno.	V-22
Tabela 7 - Resumo dos resultados da modelagem probabilística de pior caso ocorrendo durante os meses de inverno (junho a agosto) para o FPSO. ...	V-23
Tabela 8 - Resumo dos cenários determinísticos críticos de verão e de inverno para o FPSO.....	V-23

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do ponto de risco, localizado no campo de Frade, Bacia de Campos.	I-2
Figura 2 - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento à 10 m no período de verão.....	I-5
Figura 3 - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento à 10 m no período de inverno.....	I-6
Figura 4 - Grade computacional utilizada nas simulações da circulação hidrodinâmica da Bacia de Campos.	II-7
Figura 5 - Batimetria discretizada do domínio considerado na Bacia de Campos.	II-8
Figura 6 - Campos termohalinos da Climatologia LEVITUS: (a) temperatura no verão; (b) temperatura no inverno; (c) salinidade no verão e (d) salinidade no inverno.....	II-9
Figura 7 - Série temporal de maré prevista (azul) e a elevação calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 19 e 21 de agosto de 1992.....	II-11
Figura 8 - 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).....	II-12
Figura 9 - Espectros de amplitude das componentes u (E-W) (azul) e v (N-S) (vermelho) dos dados de corrente da PETROBRAS.....	II-13
Figura 10 - 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.	II-14
Figura 11 - 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.	II-15
Figura 12 - Exemplo ilustrativo do campo de velocidade obtido com o modelo hidrodinâmico para a Bacia de Campos na camada superficial.	II-16
Figura 13 - Grade definindo os contornos de terra (grade land-water) para a modelagem de deriva de óleo no campo de Frade na Bacia de Campos. .	IV-1
Figura 14 - Histograma direcional dos vetores de vento NCEP para o ano de 1992, na Bacia de Campos.	IV-2

- Figura 15** - Cenário FRADE_VER_8_20MGL. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 8 m³ após 1 hora atingindo 20 mg/l. V-2
- Figura 16** - Cenário FRADE_VER_200_6HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 200 m³ após 6 horas. V-3
- Figura 17** - Cenário FRADE_VER_200_7HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 200 m³ após 7 horas. V-4
- Figura 18** - Cenário FRADE_VER_PIORCASO_6HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 10.480,3 m³/h após 6 horas. V-5
- Figura 19** - Cenário FRADE_VER_PIORCASO_9HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 10.480,3 m³/h após 9 horas. V-6
- Figura 20** - Cenário FRADE_VER_PIORCASO_12HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 10.480,3 m³/h após 12 horas. V-7
- Figura 21** - Cenário FRADE_VER_PIORCASO_36HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 251.526,5 m³ após 36 horas. V-8
- Figura 22** - Cenário FRADE_VER_PIORCASO_60HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 251.526,5 m³ após 60 horas. V-9
- Figura 23** - Cenário FRADE_VER_PIORCASO_30DIAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 251.526,5 m³ após 30 dias. V-10
- Figura 24** - Cenário FRADE_INV_8_20MGL. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 8 m³ após 1 hora atingindo 20 mg/l. V-11
- Figura 25** - Cenário FRADE_INV_200_6HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m³ após 6 horas. V-12

- Figura 26** - Cenário FRADE_INV_200_7HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m³ após 7 horas..... V-13
- Figura 27** - Cenário FRADE_INV_PIORCASO_6HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 10.480,3 m³/h após 6 horas..... V-14
- Figura 28** - Cenário FRADE_INV_PIORCASO_9HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 10.480,3 m³/h após 9 horas..... V-15
- Figura 29** - Cenário FRADE_INV_PIORCASO_12HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 10.480,3 m³/h após 12 horas..... V-16
- Figura 30** - Cenário FRADE_INV_PIORCASO_36HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 251.526,5 m³ após 36 horas..... V-17
- Figura 31** - Cenário FRADE_INV_PIORCASO_60HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 251.526,5 m³ após 60 horas..... V-18
- Figura 32** - Cenário FRADE_INV_PIORCASO_30DIAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 251.526,5 m³ após 30 dias..... V-19
- Figura 33** - Cenário FRADE_INV_PIORCASO_30DIAS_SHORE. Probabilidades de toque na costa para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 251.526,5 m³ após 30 dias..... V-20
- Figura 34** - Cenário FRADE_INV_PIORCASO_30DIAS_OLEOMED. Volume médio de óleo por km que chega à costa no período de inverno (junho a agosto)..... V-21
- Figura 35** - Cenário FRADE_INV_PIORCASO_30DIAS_OLEOMAX. Volume máximo de óleo por km que chega à costa no período de inverno (junho a agosto)..... V-22
- Figura 36** - Cenário determinístico de pior caso para um derrame ocorrido no FPSO, no período de verão..... V-24

Figura 37 - Balanço de massa para o cenário de pior caso de vazamento no verão, no FPSO.	V-25
Figura 38 - Cenário determinístico de pior caso para um derrame ocorrido no FPSO, no período de inverno.	V-26
Figura 39 - Balanço de massa para o cenário de pior caso de vazamento no inverno, no FPSO.	V-27

RESUMO

O sistema de modelos OILMAP da **APPLIED SCIENCE ASSOCIATES (ASA), INC.** foi utilizado para definir a área potencialmente ameaçada por derramamentos de óleo decorrentes da atividade de produção na Bacia de Campos, a partir de simulações de derrame de óleo de um FPSO¹ no campo do Frade.

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

Foram conduzidas simulações probabilísticas para determinar contornos de probabilidade da mancha atingir a área de estudo a partir de 3 (três) classes de derrame, como definido na Resolução CONAMA nº 293/01: pequeno, com 8 m³; médio, com 200 m³, e pior caso, com 251.526,5 m³ derramados ao longo de 24 horas, correspondente ao vazamento dos tanques de armazenagem da FPSO devido à colisão. A partir dos resultados dessas simulações probabilísticas foram selecionados os cenários determinísticos de “pior caso” para condições de verão e inverno, utilizando como critério o menor tempo de chegada do óleo na costa.

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

Este trabalho representa uma iniciativa pioneira da **ChevronTexaco** 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.

¹ *Floating, Production, Storage and Offloading*

I INTRODUÇÃO

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

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, e (c) séries temporais de vento de longa duração (preferencialmente de bóias *offshore* e/ou estação meteorológica costeira).

Para a modelagem de transporte da mancha de óleo foram utilizados dados de vento provenientes do modelo global NCEP². O NCEP disponibiliza um conjunto de resultados provenientes de aproximadamente 15 anos de análises globais de campos atmosféricos para suprir as necessidades de pesquisa na área de clima, sendo um conjunto de dados dos mais confiáveis disponíveis.

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

² *National Centers for Environmental Prediction.*

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.

1.1 ÁREA DE ESTUDO

A Figura 1 apresenta a localização do ponto de risco, no campo de Frade na Bacia de Campos, para o qual foram realizados simulações de um potencial acidente com derramamento de petróleo.

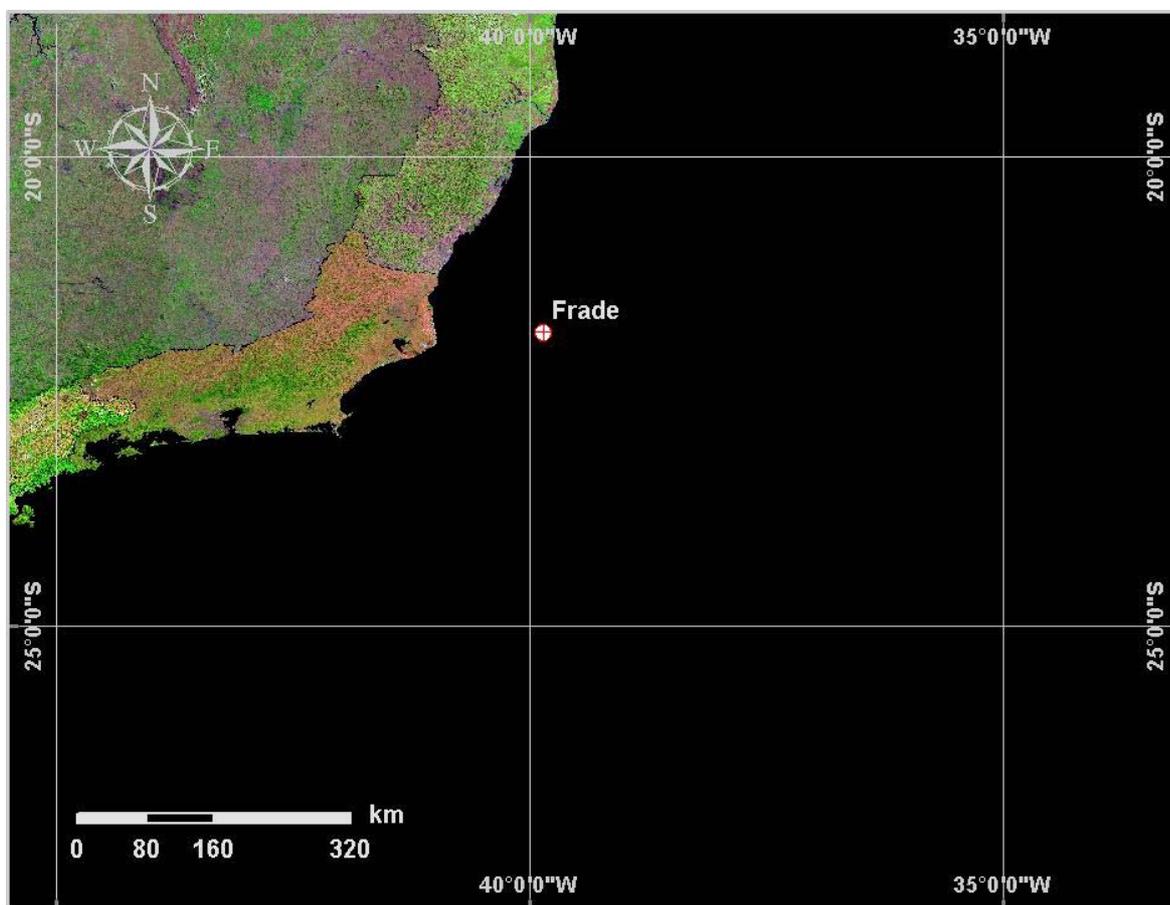


Figura 1 - Localização do ponto de risco, localizado no campo de Frade, Bacia de Campos.

1.1.1 Padrões de Circulação na 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. Considerando-se o relativo conhecimento existente sobre a circulação da maré na região, o principal padrão no oceano a ser descrito é a CB.

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

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

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

A corrente que flui para sudoeste durante o verão é reforçada pelos ventos predominantes, que provêm principalmente de nordeste nessa estação, devido à influência da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). No inverno, entretanto, a alta incidência de sistemas frontais induz a ocorrência de correntes com direção

nordeste nas porções interna e média da plataforma (Castro & Miranda, 1998). Outra 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.

1.1.2 Características Meteorológicas da Região

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

A variabilidade sazonal do padrão de ventos na região sudeste devido ao deslocamento da ASAS é caracterizado pelo predomínio de ventos de nordeste no verão e ventos de leste no inverno. Este padrão é ilustrado na Figura 2 e na Figura 3, 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. 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.

Janeiro - Fevereiro - Março

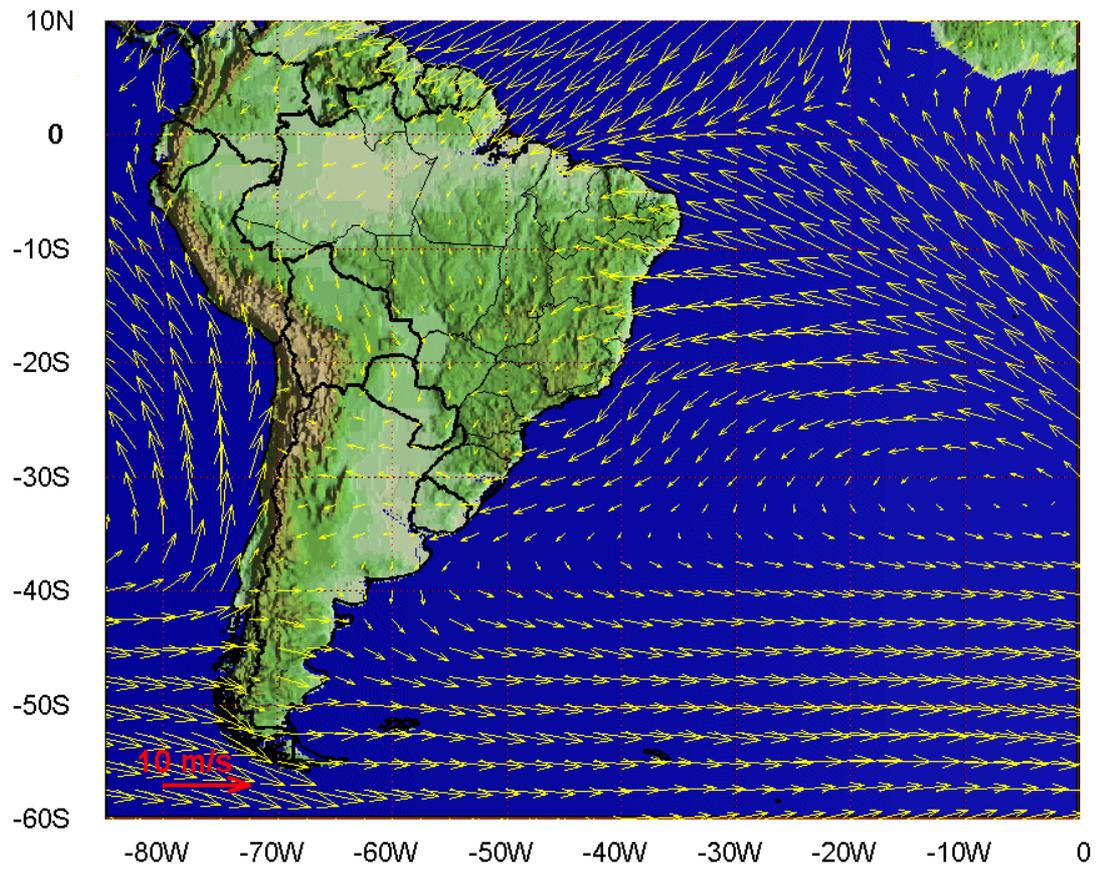


Figura 2 - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento à 10 m no período de verão.

Junho - Julho - Agosto

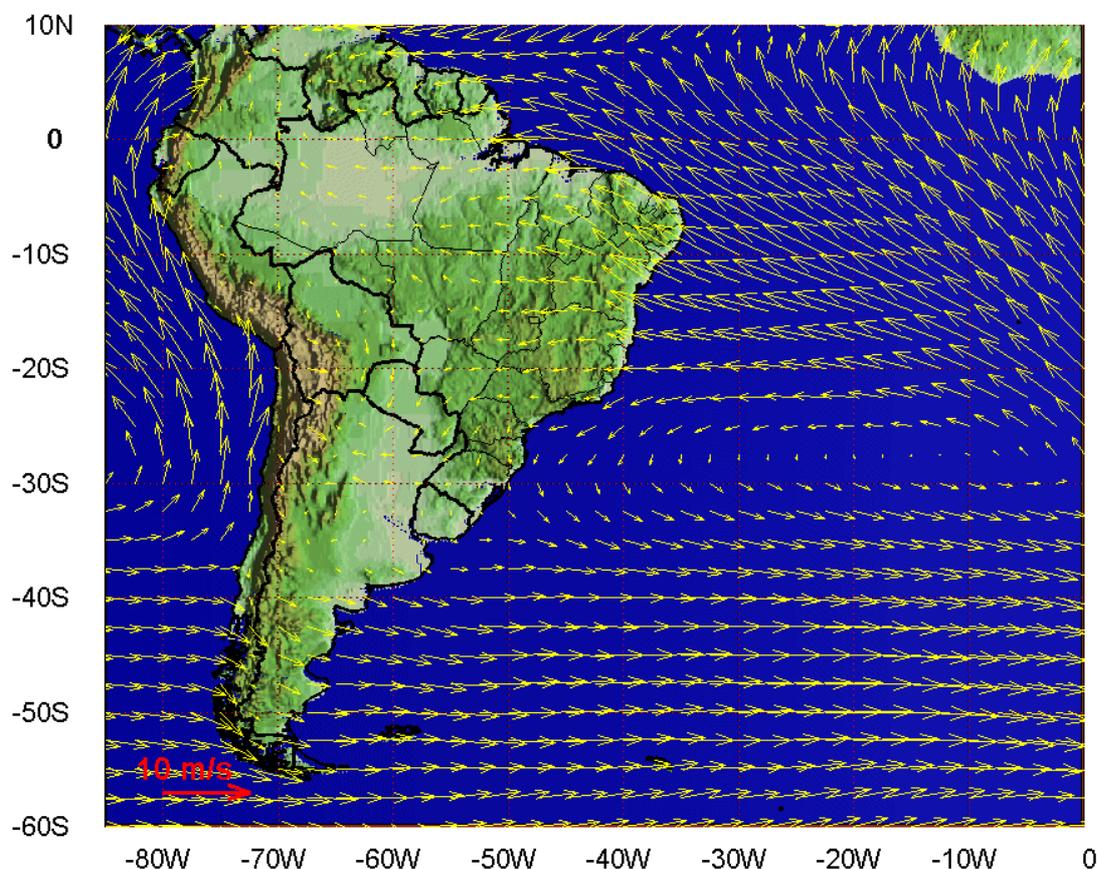


Figura 3 - Médias de 12 anos (1990 – 2001) do vento à 10 m no período de inverno.

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

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

O deslocamento desses sistemas está associado ao escoamento ondulatório de grande escala. A intensificação ou dissipação dos mesmos está relacionada com as características atmosféricas sobre o continente. Algumas regiões do Brasil, tais como as Regiões Sul e Sudeste, são regiões frontogenéticas, ou seja,

são regiões onde as frentes podem se intensificar ou se formar (Satyamurty & Mattos, 1989).

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

II MODELO HIDRODINÂMICO

Nesta etapa do trabalho descreve-se o modelo hidrodinâmico e sua implementação, visando simular o campo de correntes da costa sudeste brasileira. Com este intuito foi implementado um modelo baseado no *Princeton Ocean Model* (POM) (Blumberg & Mellor, 1987) para simular as condições na plataforma continental e resultados do *Parallel Ocean Circulation Model* (POCM) para simular as condições no talude continental e oceano profundo.

II.1 DESCRIÇÃO DO MODELO E SUAS HIPÓTESES

O modelo numérico hidrodinâmico tem 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 σ 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 σ , a coordenada z é escalonada de acordo com a profundidade da coluna d'água local, conforme mostra a Equação (1), onde D é a profundidade local, η a elevação da superfície e H a profundidade média local.

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

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

O uso das coordenadas σ facilita a representação da estrutura vertical do talude. O modelo inclui um submodelo de fechamento turbulento, para o cálculo dos coeficientes de mistura turbulenta vertical. O fechamento turbulento de 2ª ordem utiliza os resultados das equações da energia cinética turbulenta e da escala de comprimento de turbulência, no cálculo dos coeficientes cinemáticos de viscosidade e de difusão turbulenta de calor e sal na vertical (Mellor &

Yamada, 1982). Esses cálculos são efetuados com base em relações empíricas, que utilizam constantes estabelecidas em experimentos de laboratório e em observações de campo. Com o fechamento turbulento de 2ª ordem, o modelo reproduz de maneira mais realística as camadas de Ekman, de superfície e de fundo.

Além dos aspectos específicos acima mencionados, o modelo adota soluções largamente utilizadas na literatura, como gradeamento do tipo C de Arakawa e métodos de integração diferentes na horizontal e na vertical - integração horizontal e temporal explícita e vertical implícita. Através 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 os internos. O modo externo (barotrópico) é bidimensional e usa um intervalo de tempo menor, baseado na condição de estabilidade computacional de *Courant-Friedrichs-Levy* (CFL). Os modos internos (baroclínicos) são tridimensionais e usam um intervalo de tempo mais longo.

II.1.1 Equações Básicas do Modelo Hidrodinâmico

O modelo hidrodinâmico aqui descrito é baseado em uma formulação tridimensional prognóstica com aproximação hidrostática. As variáveis potencialmente prognósticas são: os 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 (η).

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:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

Equação de Reynolds para conservação da quantidade de movimento:

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} + fU = & -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial V}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_M \frac{\partial V}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\rho g = -\frac{\partial P}{\partial z} \quad (5)$$

Conservação de Temperatura Potencial:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + U \frac{\partial \Theta}{\partial x} + V \frac{\partial \Theta}{\partial y} + W \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_{(H)} \quad (6)$$

Conservação de Salinidade:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial S}{\partial x} + V \frac{\partial S}{\partial y} + W \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S \quad (7)$$

Equação de Estado:

$$\rho = \rho(S, \Theta, P) \quad (8)$$

Equação da Energia Cinética Turbulenta:

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

Equação da Turbulência em Macro Escala:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(q^2 l) + U \frac{\partial}{\partial x}(q^2 l) + V \frac{\partial}{\partial y}(q^2 l) + W \frac{\partial}{\partial z}(2q^2 l) = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_q \frac{\partial}{\partial z}(q^2 l) \right] \\ + l E_1 K_M \left[\left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{l E_1 g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{q^3}{B_1} \tilde{W} + F_{q^2 l} \end{aligned} \quad (10)$$

sendo,

$$F_{q^2, q^2 l} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial q^2, q^2 l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial q^2, q^2 l}{\partial y} \right) \quad (11)$$

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

$$\tilde{W} \equiv 1 + E_2 \left(\frac{l}{kL} \right)^2 \quad (13)$$

onde

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

F = parâmetro de *Coriolis* (s⁻¹);

ρ_0 = densidade de referência (kg/m³);

ρ = densidade *in situ* (kg/m³);

P = pressão (N/m²);

K_M = coeficiente cinemático vertical de viscosidade turbulenta (m²/s);

K_H = coeficiente cinemático vertical de difusão turbulenta de calor e sal (m²/s);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

Θ = temperatura potencial (°C);

S = salinidade (PSU);

A_M = coeficiente cinemático horizontal de viscosidade turbulenta (m²/s);

A_H = coeficiente cinemático horizontal de difusão turbulenta de calor e sal (m²/s);

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

L = escala característica de comprimento para o movimento turbulento;

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

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

$F_{q^2, q^2 l}$ = 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, 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 as variáveis: elevação da superfície do mar, velocidades do modo externo (2-D), velocidades do modo interno (3-D), 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, η é a elevação do nível do mar e B é um coeficiente empírico.

Nos casos da temperatura e da salinidade, disponibiliza-se um esquema que permite a advecção através da fronteira, condição esta descrita por $\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} = 0$ (condição análoga aplicada à salinidade).

II.2 DESCRIÇÃO DO PARALLEL OCEAN CIRCULATION MODEL

O modelo hidrodinâmico utilizado para fornecer o campo de correntes ao largo do talude foi o POCM, desenvolvido pelo Office of Naval Research dos Estados Unidos. Este modelo utiliza como forçantes fluxos de calor e ventos gerados pelo NCEP. Os campos de temperatura e salinidade utilizados como condição inicial foram interpolados da Climatologia LEVITUS³, e realizada uma simulação por um período de 33 anos para ajuste dos campos termohalinos.

O modelo POCM é considerado pela comunidade oceanográfica do *World Ocean Circulation Experiment* (WOCE) o mais sofisticado para descrever a circulação oceânica, sendo capaz de reproduzir os fluxos da CB que afetam diretamente a Bacia de Campos. Este modelo apresenta uma resolução global média de 0,25° e já foi utilizado em vários artigos publicados, como em Tokmakian & Challenor (1999).

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 4). A grade geral implementada representou um compromisso entre os objetivos do projeto, a capacidade computacional para o período de execução do modelo e a descrição dos processos hidrodinâmicos relevantes para a região de interesse (forçantes de maré e ventos sobre a plataforma continental, e Corrente do Brasil no talude continental).

³ <http://ingrid.ldgo.columbia.edu/SOURCES/.LEVITUS94>.

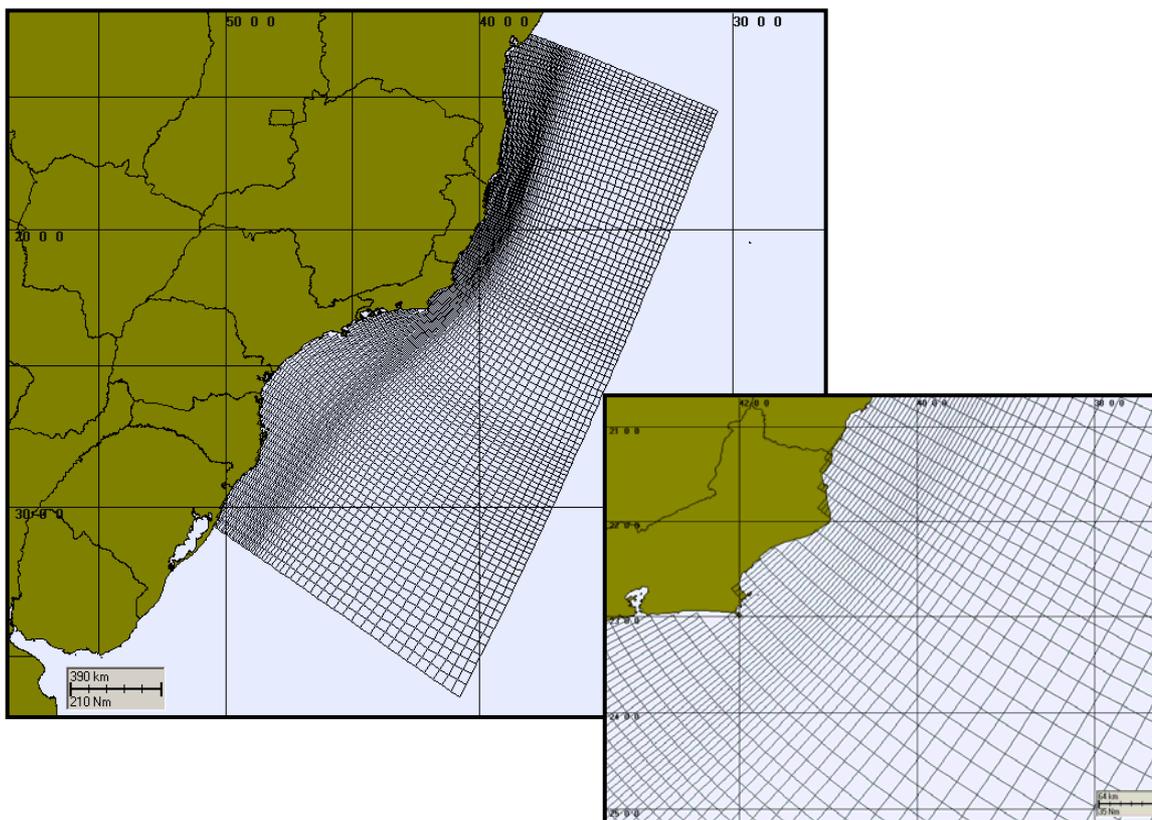


Figura 4 - Grade computacional utilizada nas simulações da circulação hidrodinâmica da Bacia de Campos.

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 5).

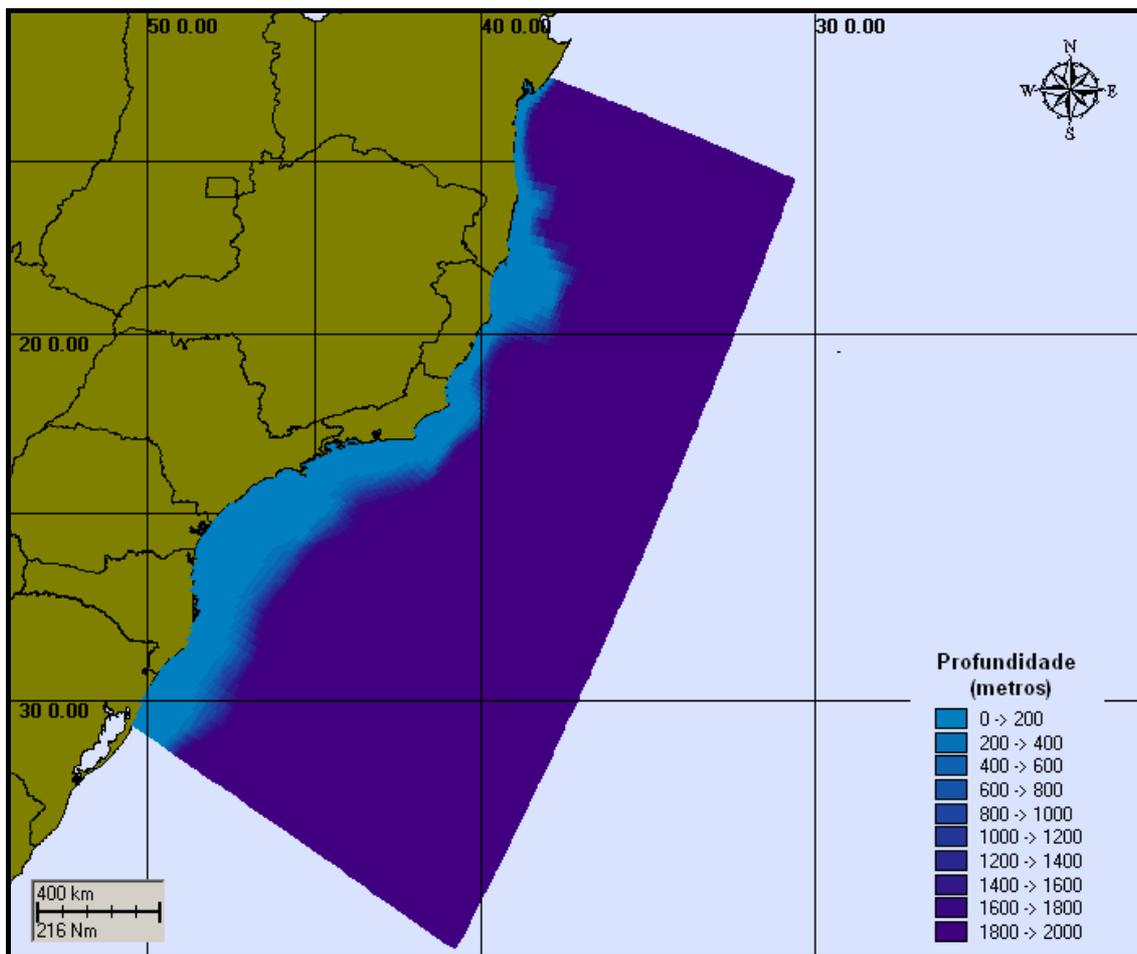


Figura 5 - Batimetria discretizada do domínio considerado na Bacia de Campos.

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.

O campo de elevação do nível do mar foi incorporado ao modelo hidrodinâmico, utilizando-se como forçante nos contornos os dados do modelo global de maré do Center for Space Research da Universidade do Texas - CSR3.

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 6 ilustra estes dados para a superfície, nos períodos de inverno e verão.

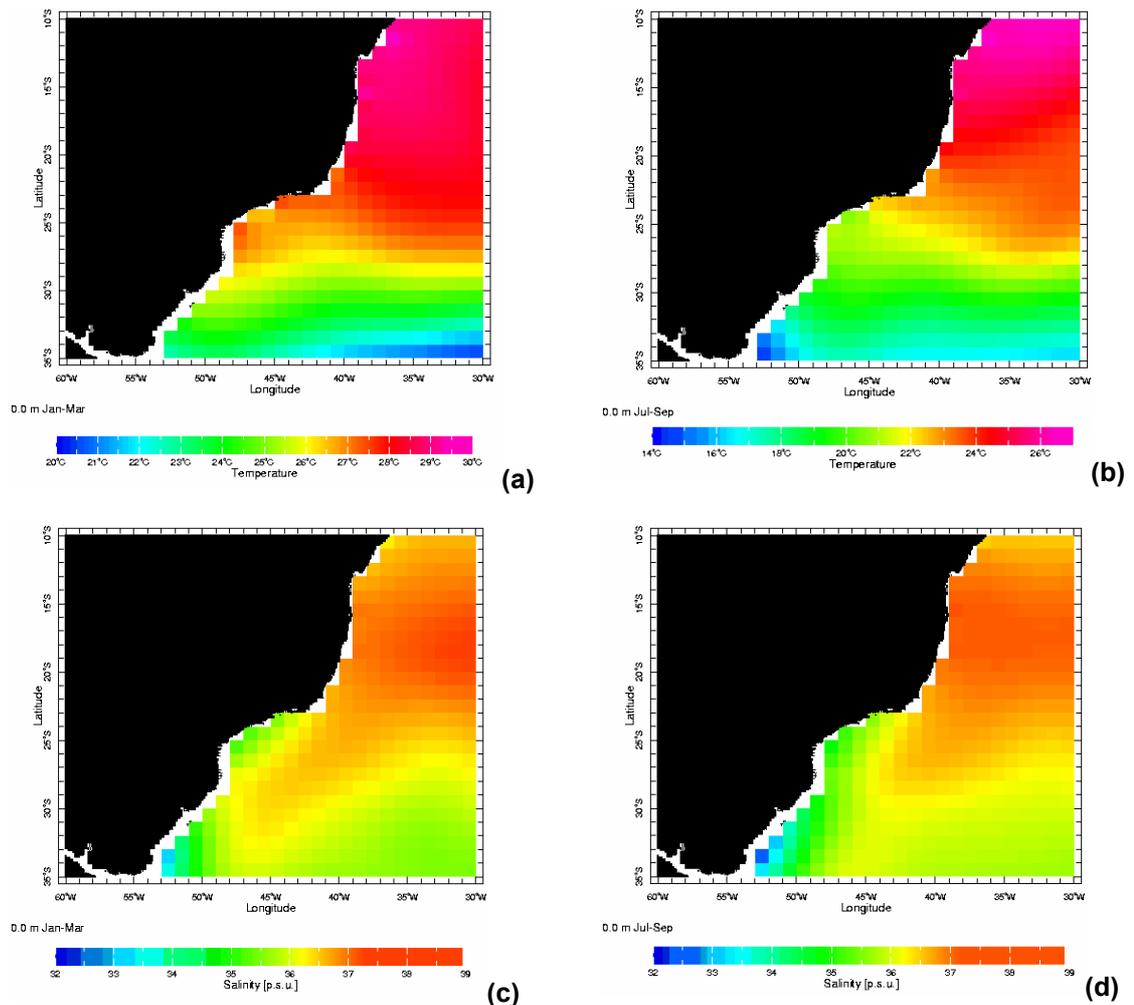


Figura 6 - Campos termohalinos da Climatologia LEVITUS: (a) temperatura no verão; (b) temperatura no inverno; (c) salinidade no verão e (d) salinidade no inverno.

II.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

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

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

Para a calibração do nível do mar foi utilizada uma série obtida através de reconstituição harmônica, a partir de constantes fornecidas pela FEMAR⁴ para a região do Cabo de São Tomé, nas coordenadas 22°07'42''S e 41°03'12''W.

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

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

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

$$\frac{RMS}{\bar{A}} \quad (14)$$

⁴ Fundação de Estudos do Mar.

onde

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

e \bar{A} é o range médio do dado, P = previsão e
O = observação.

A Figura 7 apresenta a comparação entre os resultados obtidos com o modelo e a previsão de maré para a região entre os dias 19 e 21 de agosto de 1992. O coeficiente de ajuste obtido para o período de 19 a 21 de agosto de 1992 (Figura 7) foi de 13,70%, segundo a Equação (14).

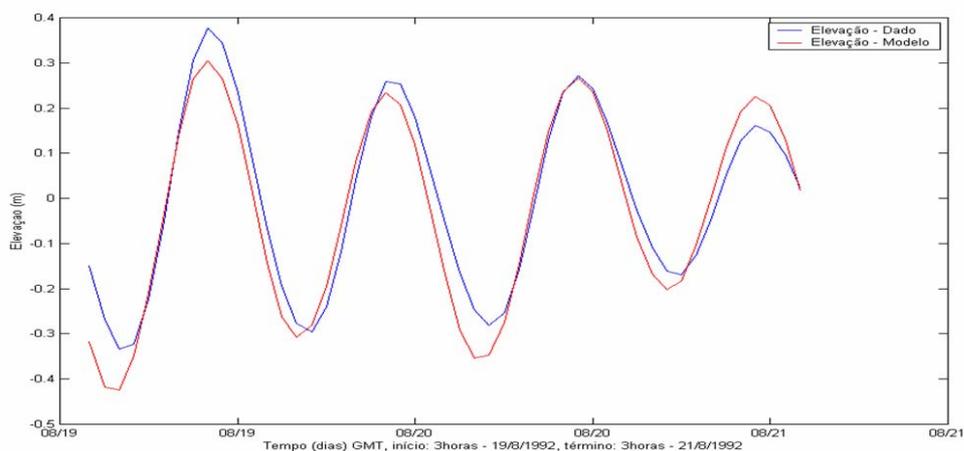


Figura 7 - Série temporal de maré prevista (azul) e a elevação calculada pelo modelo (vermelho) entre os dias 19 e 21 de agosto de 1992.

A Figura 8 apresenta as séries temporais dos dados de correntes versus os resultados do modelo. São apresentados os componentes u (E-W) e v (N-S) das velocidades, também, a comparação dos resultados de elevação do modelo e a recomposição harmônica da maré.

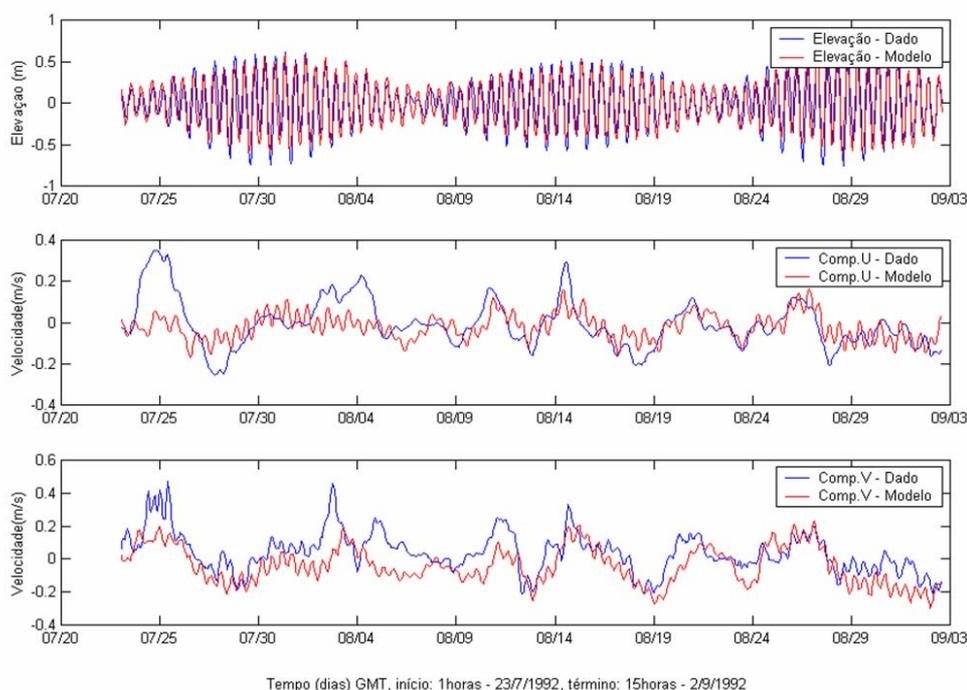


Figura 8 - Séries temporais da elevação FEMAR (azul) e das componentes u (E-W) e v (N-S) dos dados PETROBRAS (azul) e as reproduzidas pelo modelo (vermelho).

Especificamente no ponto de medição, 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 9.

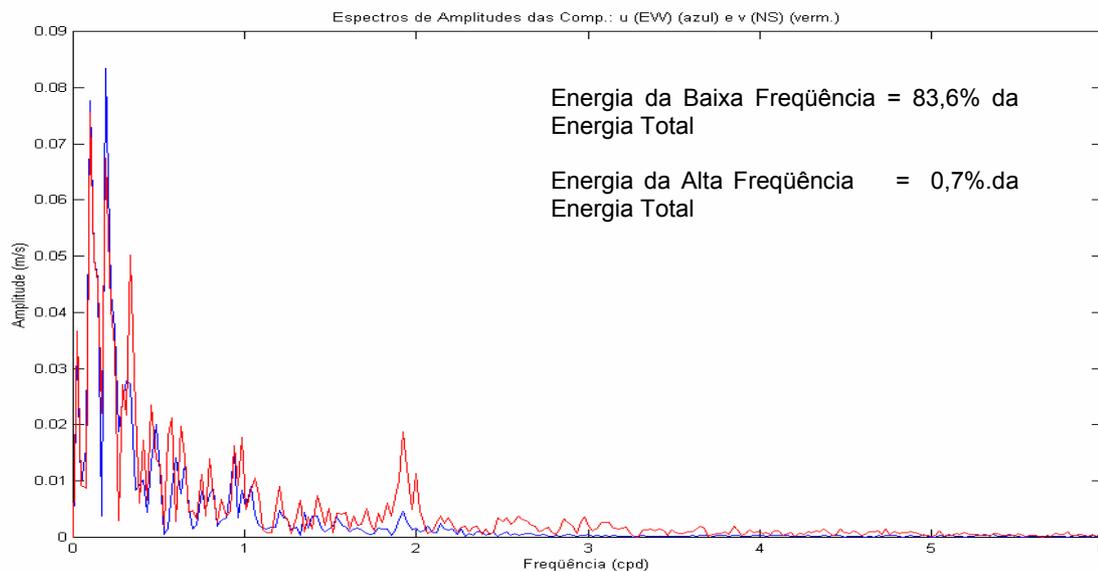
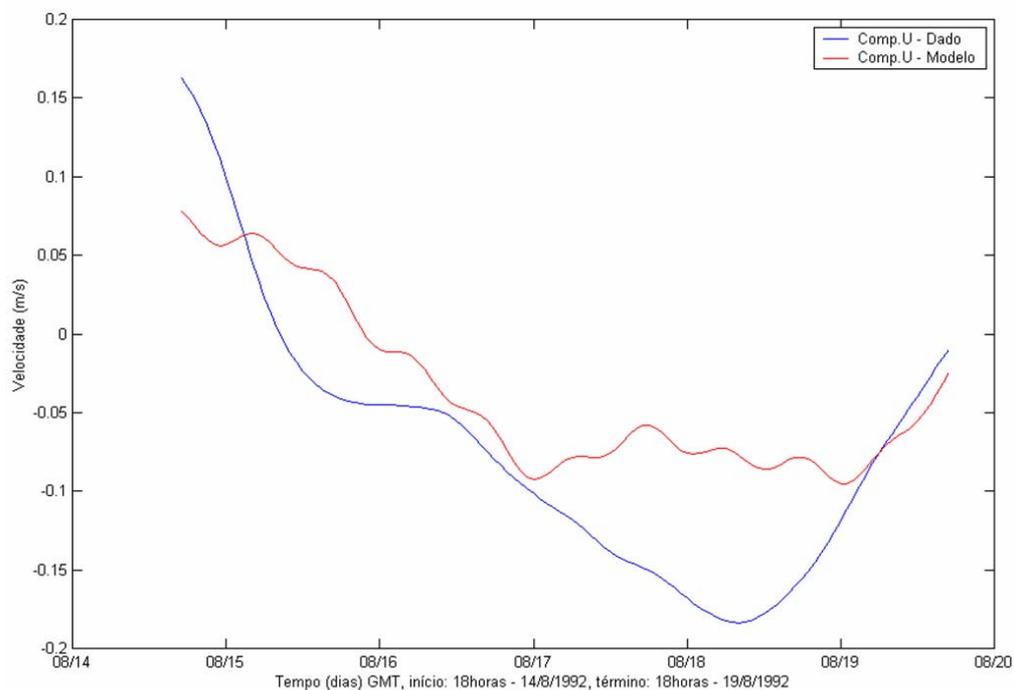


Figura 9 - Espectros de amplitude das componentes u (E-W) (azul) e v (N-S) (vermelho) dos dados de corrente da PETROBRAS.

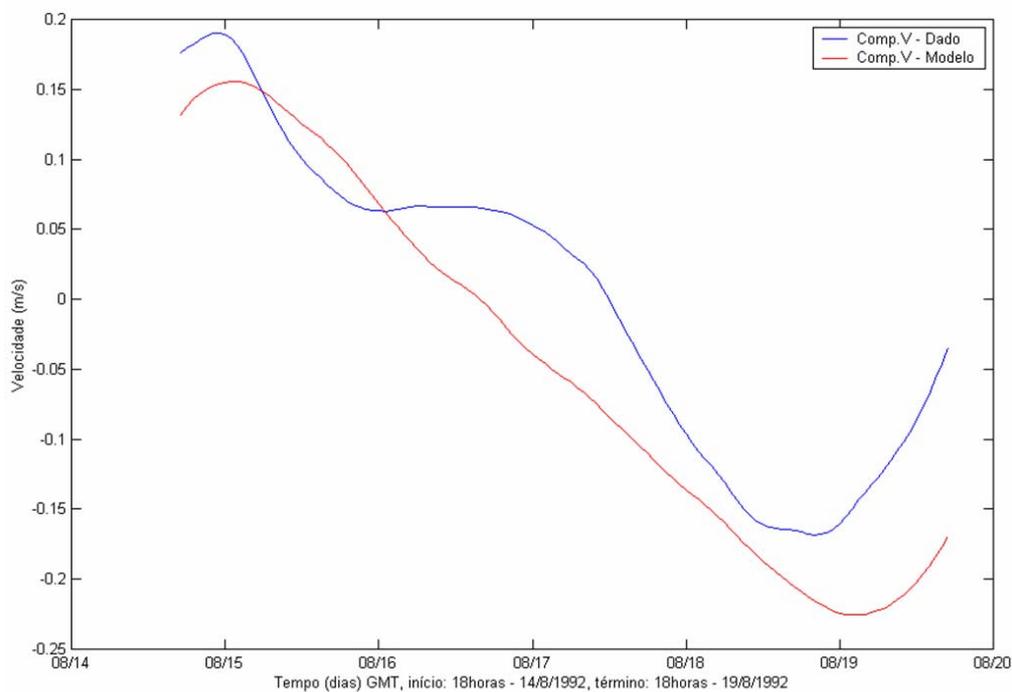
Deste modo, priorizou-se o ajuste do modelo na baixa frequência. Os coeficientes de ajuste (Equação 14) foram de 28,47% para a componente u e 16,91% para a componente v , considerando o período de 5 dias compreendido entre 14 e 19 de agosto de 1992 às 18 horas (Figura 10).

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 11.

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 (14).



(a)



(b)

Figura 10 - Séries temporais do sinal de baixa frequência das componentes u (E-W) e v (N-S) dos dados de corrente da PETROBRAS (azul) e as calculadas pelo modelo (vermelho), entre os dias 14 e 19 de agosto de 1992.

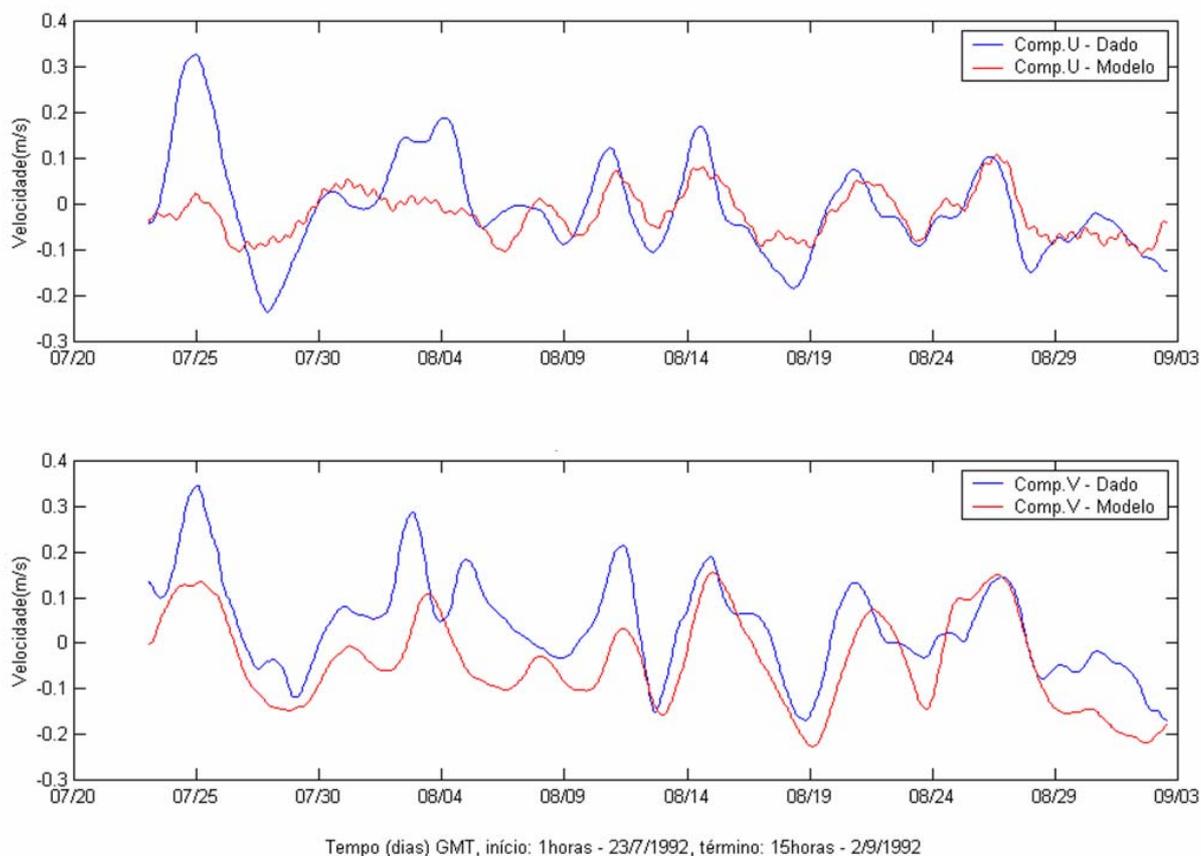


Figura 11 - Séries temporais do sinal de baixa frequência das componentes u (E-W) e v (N-S) dos dados PETROBRAS (azul) e calculada pelo modelo (vermelho), entre os dias 22 de julho e 2 de setembro de 1992, utilizados na calibração da corrente média residual.

Na Figura 12 é apresentado um exemplo do campo de velocidades típico observado nos resultados do modelo para a camada superficial. Nesta figura destaca-se a definição da Corrente do Brasil na quebra da plataforma e o sinal da maré e do vento nas zonas de menor profundidade.

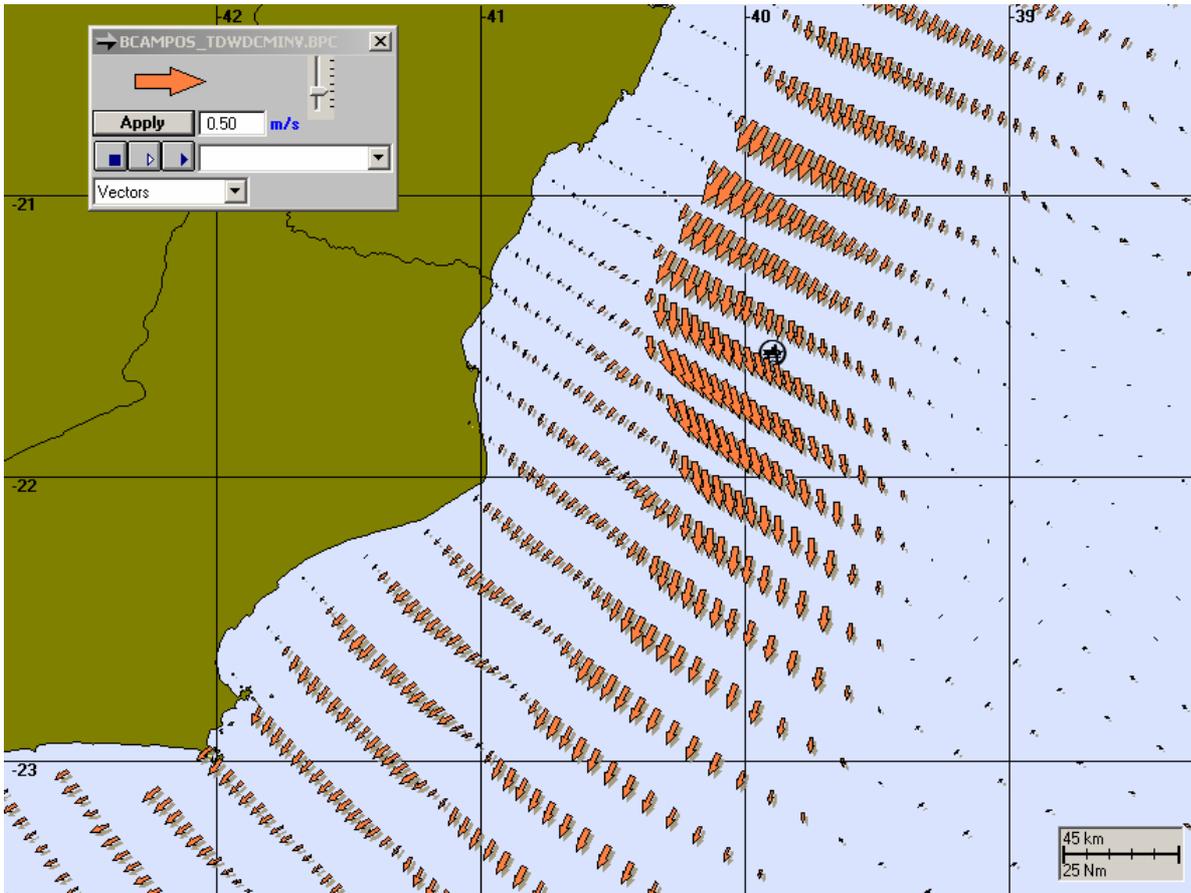


Figura 12 - Exemplo ilustrativo do campo de velocidade obtido com o modelo hidrodinâmico para a Bacia de Campos na camada superficial.

III MODELAGEM DE DERRAMES DE ÓLEO

Na modelagem de óleo foi utilizado o modelo OILMAP, desenvolvido pela **APPLIED SCIENCE ASSOCIATES (ASA), INC.**, que representa o estado da arte em modelagem computacional para acompanhamento e previsão do deslocamento e intemperismo de qualquer tipo de óleo derramado em acidentes com petróleo.

O OILMAP é um sistema de modelos, baseados em plataforma PC, que pode ser utilizado em Planos de Contingência, Planos de Emergência com acompanhamento em tempo real, Relatório de Controle Ambiental (RCA), e Estudos de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) em qualquer região do mundo (Jayko & Howlett, 1992; Spaulding *et al.*, 1992a,b).

III.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 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 sub-superfície, 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 (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 lagrangeana. 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.

III.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 lagrangeanas contendo, cada uma delas, massa conhecida. O vetor posição (\vec{X}_t) de uma dada partícula, num determinado instante t , é definido como:

$$\vec{X}_t = \vec{X}_{t-\Delta t} + \Delta t \vec{U}_{oil} \quad (15)$$

onde

Δt = 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:

$$\vec{U}_{oil} = \vec{U}_w + \vec{U}_t + \vec{U}_r + \alpha \vec{U}_e + \beta \vec{U}_p \quad (16)$$

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);

α = 0 para derrame de superfície, 1 para sub-superfície;

β = 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:

$$u_{wc} = C_1 u_w \quad (17)$$

$$v_{wc} = C_1 v_w \quad (18)$$

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:

$$u_{wd} = u_{wc} \cos \theta + v_{wc} \sin \theta \quad (19)$$

$$v_{wd} = -u_{wc} \sin \theta + v_{wc} \cos \theta \quad (20)$$

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);

θ = ângulo de deriva (°) 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:

$$u_{dd} = \gamma \sqrt{6 D_x \Delta t} \quad (21)$$

$$v_{dd} = \gamma \sqrt{6 D_y \Delta t} \quad (22)$$

onde

D_x = coeficiente de dispersão horizontal na direção Leste-Oeste (m^2/s);

D_y = coeficiente de dispersão horizontal na direção Norte-Sul (m^2/s);

Δt = passo de tempo (s);

γ = número aleatório entre (-1) e (1).

Os coeficientes de dispersão horizontal nas direções leste-oeste (X) e norte-sul (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 à mancha. A taxa de mudança da área superficial para o espalhamento da mancha espessa (Mackay *et al.*, 1980a), \bar{A}_{tk} (m^2/s), é definido por:

$$\bar{A}_{tk} = \frac{dA_{tk}}{dt} = K_1 A_{tk}^{1/3} \left(\frac{V_m}{A_{tk}} \right)^{4/3} \quad (23)$$

onde

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

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

V_m = volume da superfície da mancha (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 \bar{A}_{tk} (m^2/s), é dada por:

$$\bar{A}_{tk} = \frac{dA_{tk}}{dt} = K_1 A_{tk}^{1/3} \left(\frac{V_m}{A_{tk}} \right)^{4/3} \left(\frac{R_s}{R_e} \right)^{4/3} \quad (24)$$

onde

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

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

V_m = volume de óleo de uma partícula (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:

$$R_e = \left[\left(\frac{I}{\pi} \right) \sum_{n=1}^N A_{tk} \right]^{1/2} \quad (25)$$

onde

A_{tk} = área superficial de uma partícula (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:

$$F_v = \ln [1+B (T_G/T) \theta T \exp (A - BT_0 /T)] [T/(BT_G)] \quad (26)$$

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;

θ = exposição à evaporação.

A exposição à evaporação, θ , é definida por:

$$\theta = \left(\frac{K_m A t}{V_o} \right) \quad (27)$$

onde

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

A = área da mancha (m²);

t = tempo (s);

V_o = volume do derrame de óleo (m³).

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.

$$T_B = T_0 + T_G F_v \quad (28)$$

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:

$$H = P V / R T \quad (29)$$

onde

P = pressão do vapor do óleo (atm);

V = volume do óleo (m³);

R = constante universal dos gases;

T = temperatura ambiente (K).

H é comumente fornecido em unidades de atm – m³/mol, devendo ser dividido por RT para adimensionalizá-lo. A relação entre H e T_B é:

$$\ln H = A - B \left(\frac{T_B}{T} \right) \quad (30)$$

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

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

Delvigne & Sweeney (1988) desenvolveram uma relação para a taxa de entranhamento do óleo como uma função do tamanho da partícula de óleo, Q_d (kg/m²s), expressa como:

$$Q_d = C^* D_d^{0,57} S F d^{0,7} \Delta d \quad (31)$$

onde

C^* = constante empírica de entranhamento. Depende do tipo de óleo e do estado do tempo;

D_d = energia dissipada da arrebentação da onda por unidade de área superficial (J/m²);

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);

Δd = intervalo de diâmetro da partícula de óleo (m).

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

$$C^* = \exp(a \ln(\mu) + b) \quad (32)$$

onde

$a = -0,1023$, $b = 07,572$ para $\mu < 132$

$a = -1,8927$, $b = 16,313$ para $\mu > 132$

μ = viscosidade do óleo (cP)

O diâmetro médio da partícula, d_{50} (μm), é definido por:

$$d_{50} = 1818 (E)^{-0,5} \left(\frac{\mu}{\rho_0} \right)^{0,34} \quad (33)$$

onde

E = taxa de dissipação da energia da onda por unidade de volume (J/m³s);
igual a 1.000 J/m³s para ondas em zona de arrebentação;

- μ = viscosidade do óleo (cP);
 ρ = densidade do óleo (g/cm³).

O processo de entranhamento é muito sensível aos valores mínimo e máximo do diâmetro da partícula, sendo respectivamente: “ $d_{\min} = 0,1 \mu\text{m } d_{50}$ ” e “ $d_{\max} = 2,0 \mu\text{m } d_{50}$ ”.

A energia dissipada da onda, D_d (J/m²), é:

$$D_d = 3,4 \times 10^{-3} \rho_w g H^2 \quad (34)$$

onde

- ρ_w = densidade da água (kg/m³);
 g = aceleração da gravidade (m/s²);
 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:

$$F = 0,032 (U_W - U_T) / T_W \quad (35)$$

onde

- U_W = velocidade do vento 10 m acima da superfície do mar (m/s);
 U_T = valor limite do vento para a quebra da onda (~5 m/s);
 T_W = período de onda significativo (s).

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

$$M_e = A dt \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} Q_d \delta d \quad (36)$$

onde

- A = área superficial da mancha (m²);
 dt = passo de tempo (s);
 Q_d = taxa de entranhamento (kg/m².s).

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

$$z_m = 1,5 H_b \quad (37)$$

onde

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

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

$$W_i = d_i^2 g (1 - \rho_0 / \rho_w) / 18 \nu_w \quad (38)$$

onde

- d_i = diâmetro da gotícula (m);
- g = constante gravitacional (m/s^2);
- ρ_0 = densidade do óleo (kg/m^3);
- ρ_w = densidade da água (kg/m^3);
- ν_w = viscosidade da água (m^2/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:

$$Z_i = \max \left(\frac{D_v}{W_i}, Z_m \right) \quad (39)$$

onde

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

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

$$D_v = 0,0015 W_{10} \quad (40)$$

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:

$$R_i = \frac{W_i dt}{Z_i} \quad (41)$$

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, é dada por:

$$\bar{F}_{wc} = \frac{dF_{wc}}{dt} = C_1 U_w^2 \left(1 - \frac{F_{wc}}{C_2} \right) \quad (42)$$

onde

U_w = velocidade do vento (m/s);

C_1 = constante empírica: 2×10^{-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, μ (cP), é dada por:

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{2.5 F_{wc}}{1 - C_0 F_{wc}}\right) \quad (43)$$

onde

μ_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, μ (cP), é dada por:

$$\mu = \mu_0 \exp(C_4 F_v) \quad (44)$$

onde

μ_0 = viscosidade inicial do óleo (cP);

C_4 = constante: 1 - para óleo leve; 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:

$$F_{sh} = \frac{A_{lg}}{A_s} \quad (45)$$

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:

$$M_{h,i} = \rho_o t_i W_i L_{gi} \quad (46)$$

onde

i = parâmetro do tipo de costa;

ρ_o = densidade do óleo depositado (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

$$M_R = M_0 (1 - \exp[-t/T]) \quad (47)$$

onde

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

t = tempo (dias);

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

III.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 MODELAGEM DE DERIVA DE ÓLEO PARA UM POTENCIAL ACIDENTE NA BACIA DE CAMPOS

IV.1 DADOS DE ENTRADA

Para a elaboração dos cenários de deriva para acidentes com petróleo no campo de Frade, Bacia de Campos, foi definida uma grade *land-water* com dimensões de 250x250 pontos (Figura 13).

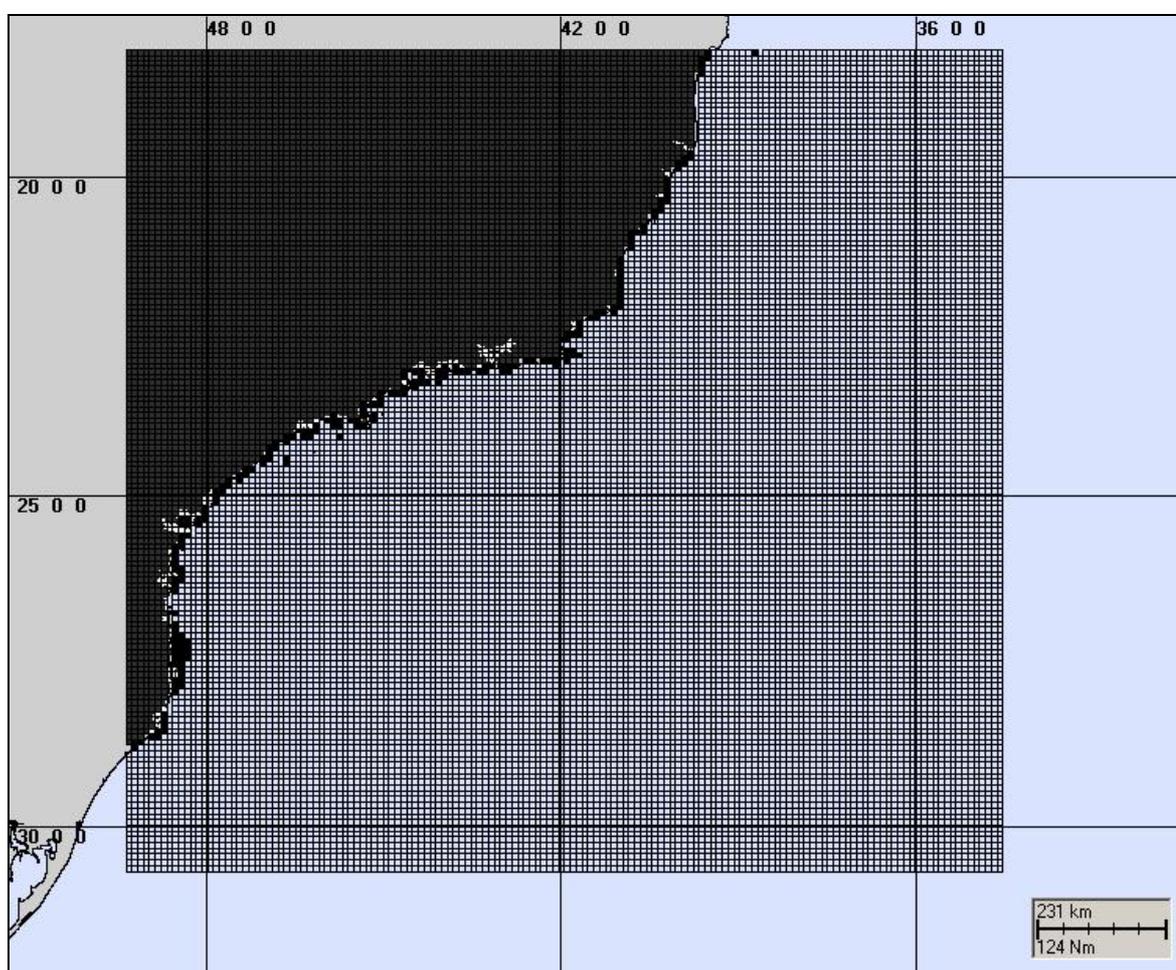


Figura 13 - Grade definindo os contornos de terra (*grade land-water*) para a modelagem de deriva de óleo no campo de Frade na Bacia de Campos.

IV.1.1 Campo de Correntes

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

IV.1.2 Dados de Vento

Para a modelagem de deriva de óleo, foram utilizados dados de vento obtidos do NCEP para a Bacia de Campos, para o ano de 1992, com intervalo de amostragem de 1 hora. A Figura 14 apresenta o histograma direcional para a série temporal, onde foi adotada a convenção meteorológica, isto é, a direção do vento corresponde à direção de onde este vem.

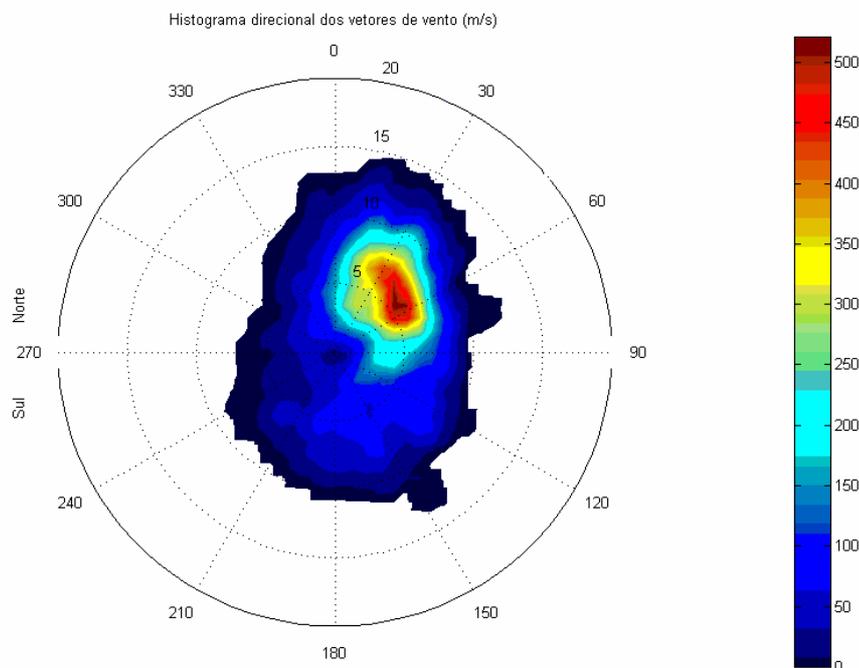


Figura 14 - Histograma direcional dos vetores de vento NCEP para o ano de 1992, na Bacia de Campos.

A Tabela 1 apresenta a distribuição de ocorrência conjunta de intensidades e direções do vento para os dados fornecidos. Observa-se que os ventos mais freqüentes são de NE (22,7%) e NNE (21,9%). Os ventos com velocidades médias máximas (7,1 m/s) vieram de NNE; e os ventos mais fortes registrados foram provenientes de SE (12,9 m/s) e N e SSE (12,5 m/s). Do total de registros dos ventos, 90% têm intensidades iguais ou inferiores a 10,0 m/s, como indicam os percentis apresentados na tabela.

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

Ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção do Vento.																			
Obs.: a direção é medida em graus a partir do Norte geográfico, convenção meteorológica.																			
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	ONW	NW	NNW	Total	Porc.	Dir. méd.
0.0- 1.0	8	7	5	3	3	1	4	8	10	4	3	5	5	6	14	3	89	1.0	315
1.0- 2.0	17	36	20	8	17	9	12	10	5	15	4	10	11	13	21	20	228	2.6	11
2.0- 3.0	34	48	64	33	41	44	52	26	14	12	12	10	13	15	25	28	471	5.4	64
3.0- 4.0	69	142	124	86	93	87	36	30	26	19	5	1	9	10	18	17	772	8.8	61
4.0- 5.0	88	153	199	168	122	71	56	35	47	14	14	11	2	6	13	55	1054	12.0	59
5.0- 6.0	105	208	297	295	112	68	52	56	47	45	22	7	6	4	6	31	1361	15.5	59
6.0- 7.0	107	292	416	284	125	53	49	59	46	25	31	5	3	0	3	20	1518	17.3	55
7.0- 8.0	96	308	323	186	100	71	74	64	40	24	6	2	0	0	1	24	1319	15.0	56
8.0- 9.0	69	236	242	89	52	53	61	49	37	13	2	0	0	0	0	14	917	10.4	55
9.0-10.0	64	234	152	14	0	9	31	21	14	0	0	0	0	0	0	3	542	6.2	36
10.0-11.0	39	139	106	4	0	2	0	16	2	0	0	0	0	0	0	0	308	3.5	31
11.0-12.0	21	65	38	3	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	131	1.5	28
12.0-13.0	6	40	6	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	56	0.6	26
13.0-14.0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0.2	17
14.0-15.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
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	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17.0-18.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18.0-19.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19.0-20.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	723	1926	1992	1173	665	468	429	380	288	171	99	51	49	54	101	215	8784		
Porc.	8.2	21.9	22.7	13.4	7.6	5.3	4.9	4.3	3.3	1.9	1.1	0.6	0.6	0.6	1.1	2.4			
Vel. méd.	6.4	7.1	6.7	5.9	5.4	5.4	6.2	5.8	5.1	5.0	3.6	2.9	2.7	2.8	4.8				
Vel. máx.	12.5	13.6	12.3	11.6	8.8	10.4	12.9	12.5	10.1	9.0	8.2	8.0	6.4	5.5	7.1	9.9			
Percts. (0,9)	9.0	10.0	9.0	7.0	7.0	8.0	8.0	9.0	8.0	7.0	6.0	6.0	5.0	4.0	4.4	7.0			

IV.1.3 Ponto de Risco e Volumes

As coordenadas do FPSO foram especificadas pela **ChevronTexaco** conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Coordenadas do ponto de risco que representa o FPSO, localizado no campo de Frade, Bacia de Campos.

POÇO	LATITUDE	LONGITUDE	LÂMINA D'ÁGUA (m)
Frade	21°53'09,06"S	39°51'18,64"W	1.082

Fonte: ChevronTexaco.

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

- a. Pequeno: 8 m³
- b. Médio: 200 m³
- c. Pior caso: 251.526,5 m³

O volume de “pior caso” foi definido como o volume resultante de uma colisão provocando o vazamento dos tanques de armazenagem da FPSO (251.526,5 m³). 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 m³) e médio (200 m³), considerou-se o vazamento de todo o volume de óleo instantaneamente, ou seja, no instante inicial da simulação.

IV.1.4 Características do Produto Utilizado

Com base nas informações disponíveis para a área em estudo foram realizadas simulações com o óleo tipo FRADE (Tabela 3).

Tabela 3 - Tipo de óleo utilizado nas simulações.

NOME	GRAU API
Frade	18,7

Fonte: ChevronTexaco.

As características definidas para o óleo cru tipo Frade, utilizado nas simulações, são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características do óleo tipo Frade.

PARÂMETRO	VALOR
Nome do óleo	FRADE
Densidade	0,9421 g/cm ³
Viscosidade dinâmica a 25°C	866,2 cP
Tensão interfacial	19,9 din/cm
Conteúdo máximo de água	0,1%
Ponto de ebulição inicial	450,0 K
Gradiente da curva de evaporação	680,0
Constante de evaporação A	8,8
Constante de evaporação B	12,6

IV.2 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 5 apresenta os cenários simulados neste estudo para o FPSO. O critério de parada adotado nas simulações de “pior caso” foi o período de 30 dias. Para as simulações que consideraram os volumes de 8 e 200 m³ foi considerado como critério de parada o instante que a mancha atinge a concentração calculada de 20 mg/l. No caso das simulações com o volume de 8 m³, foi observado que a mancha atinge 20 mg/l em menos de 1 hora e; para o volume de 200 m³ foi observado que a mancha atinge 20 mg/l em menos de 7 horas.

Tabela 5 - Cenários considerados nas simulações probabilísticas de derrames do óleo para o FPSO.

CENÁRIOS	PRODUTO (PETRÓLEO)	VOLUME (m ³)	ESTAÇÃO DO ANO	TEMPO
FRADE_VER_8_20MGL	FRADE	8	Verão	1 hora
FRADE_VER_200_6HORAS	FRADE	200	Verão	6 horas
FRADE_VER_200_7HORAS	FRADE	200	Verão	7 horas
FRADE_VER_PIORCASO_6HORAS	FRADE	251.526,5	Verão	6 horas
FRADE_VER_PIORCASO_9HORAS	FRADE	251.526,5	Verão	9 horas
FRADE_VER_PIORCASO_12HORAS	FRADE	251.526,5	Verão	12 horas
FRADE_VER_PIORCASO_36HORAS	FRADE	251.526,5	Verão	36 horas
FRADE_VER_PIORCASO_60HORAS	FRADE	251.526,5	Verão	60 horas
FRADE_VER_PIORCASO_30DIAS	FRADE	251.526,5	Verão	30 dias
FRADE_INV_8_20MGL	FRADE	8	Inverno	1 hora
FRADE_INV_200_6HORAS	FRADE	200	Inverno	6 horas
FRADE_INV_200_7HORAS	FRADE	200	Inverno	7 horas
FRADE_INV_PIORCASO_6HORAS	FRADE	251.526,5	Inverno	6 horas
FRADE_INV_PIORCASO_9HORAS	FRADE	251.526,5	Inverno	9 horas
FRADE_INV_PIORCASO_12HORAS	FRADE	251.526,5	Inverno	12 horas
FRADE_INV_PIORCASO_36HORAS	FRADE	251.526,5	Inverno	36 horas
FRADE_INV_PIORCASO_60HORAS	FRADE	251.526,5	Inverno	60 horas
FRADE_INV_PIORCASO_30DIAS	FRADE	251.526,5	Inverno	30 dias

V RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM POTENCIAL ACIDENTE NA BACIA DE CAMPOS

V.1 SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS

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

Da Figura 15 até a Figura 35 são apresentados os contornos de probabilidade da presença de óleo na água e na costa e os volumes médios e máximos por km de costa, para os cenários de acidentes no FPSO ocorrendo durante os meses de verão (janeiro a março) e inverno (junho a agosto). Praticamente em todas as simulações a mancha se deslocou para sudoeste, seguindo a orientação da CB. Todas as simulações realizadas não levam em conta as ações provenientes de Planos de Contingência e Planos de Ações Emergenciais.

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

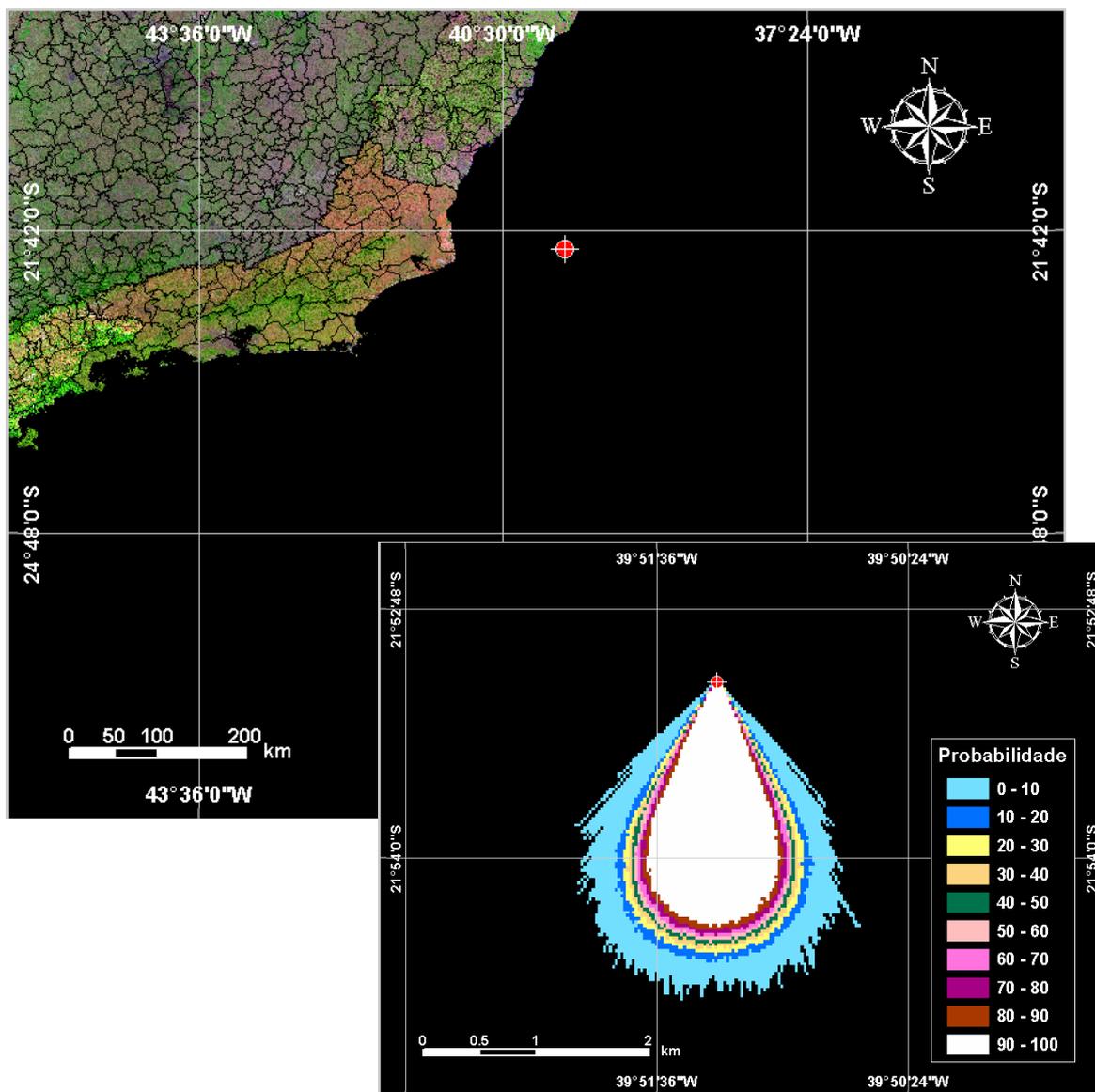


Figura 15 - Cenário FRADE_VER_8_20MGL. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 8 m^3 após 1 hora atingindo 20 mg/l .

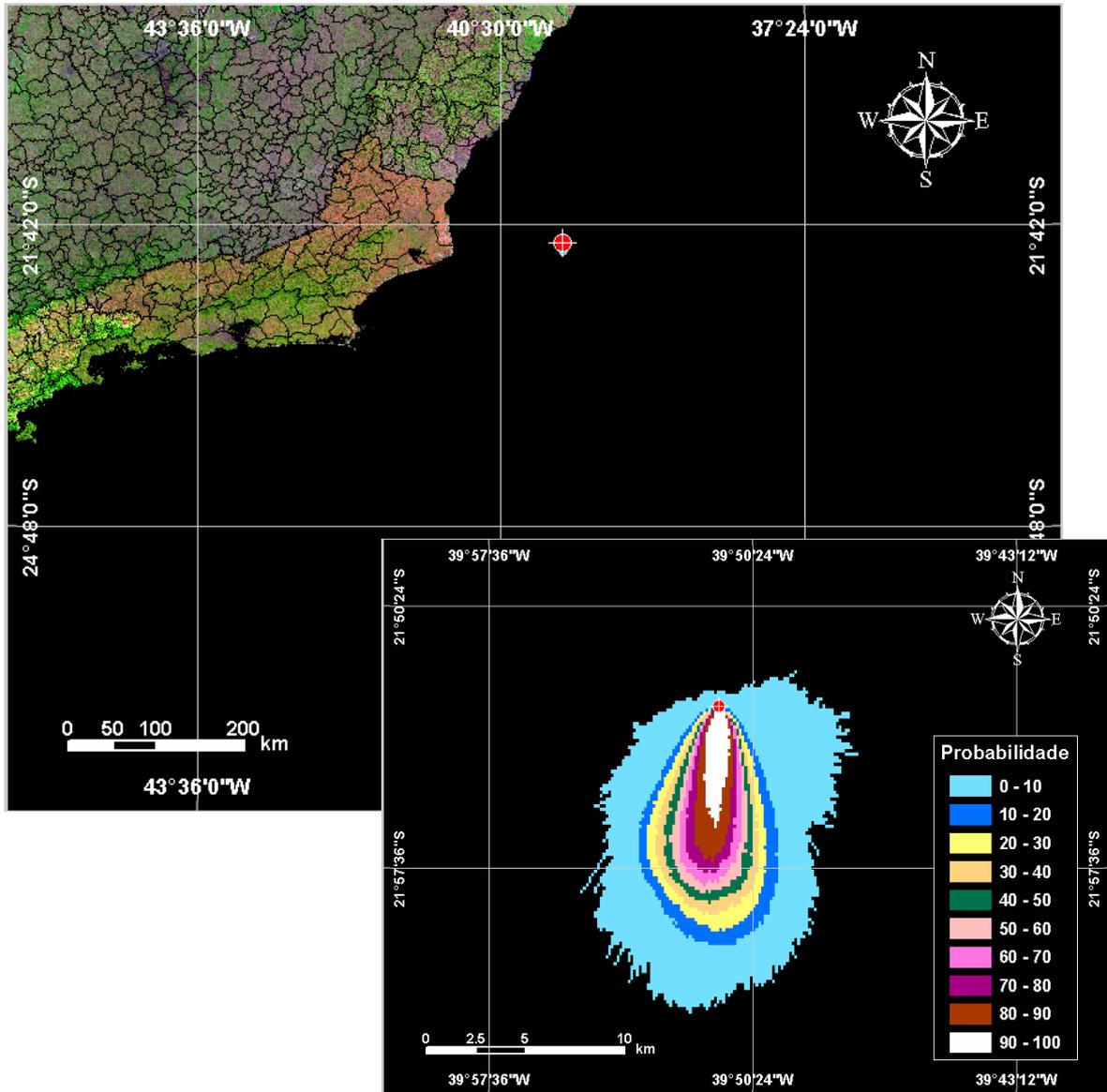


Figura 16 - Cenário FRADE_VER_200_6HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 200 m³ após 6 horas.

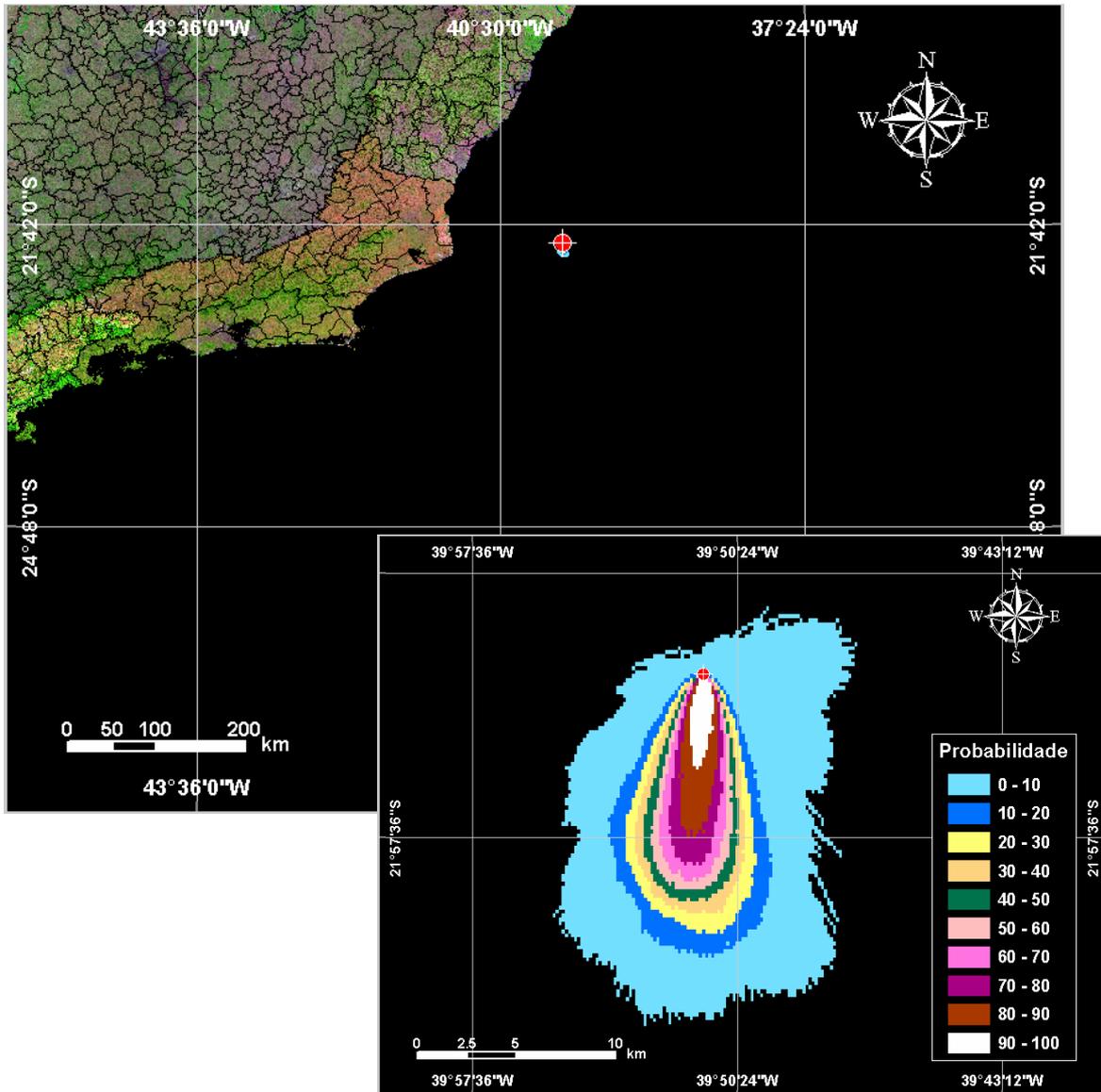


Figura 17 - Cenário FRADE_VER_200_7HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 200 m³ após 7 horas.

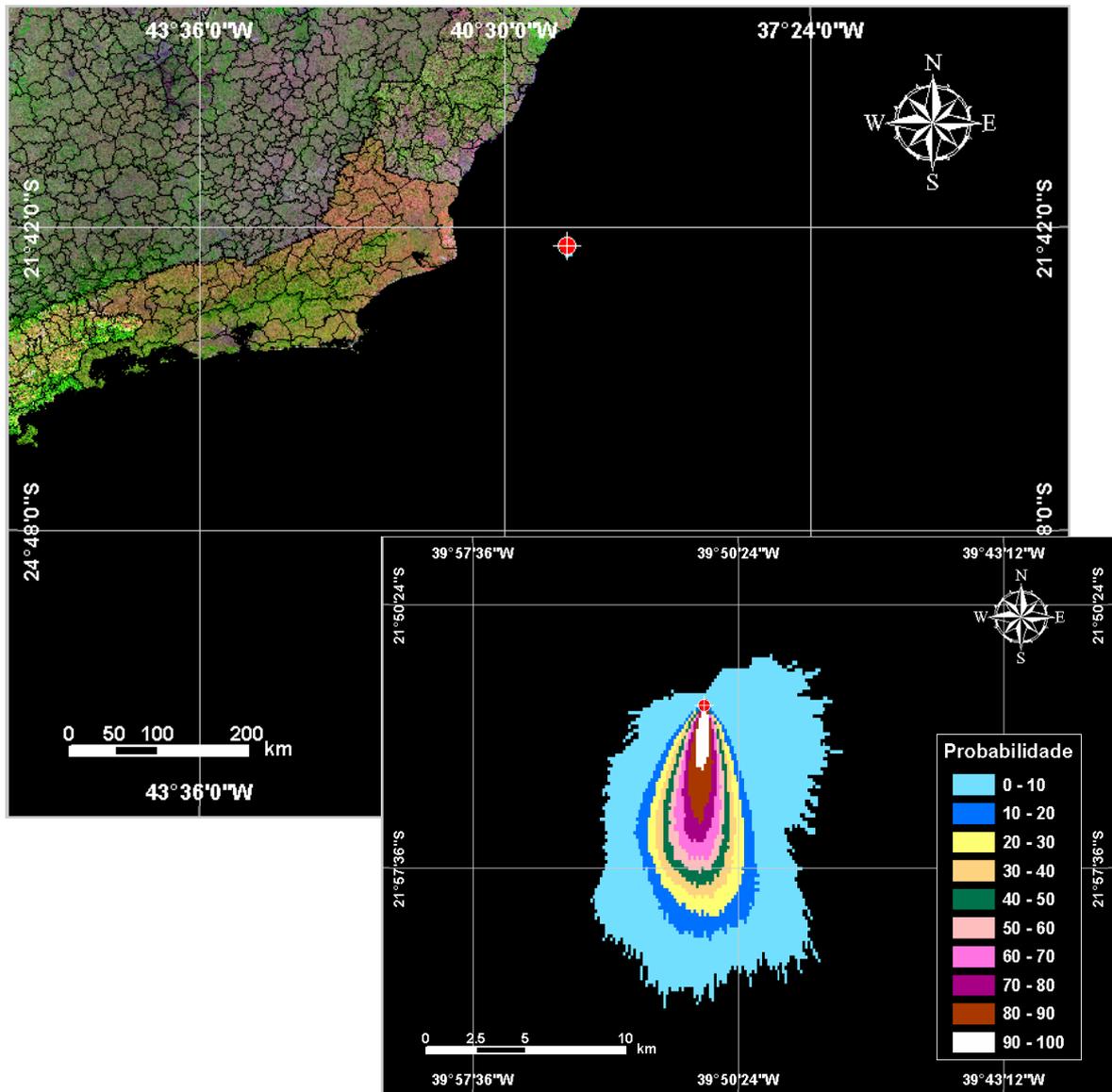


Figura 18 - Cenário FRADE_VER_PIORCASO_6HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 10.480,3 m³/h após 6 horas.

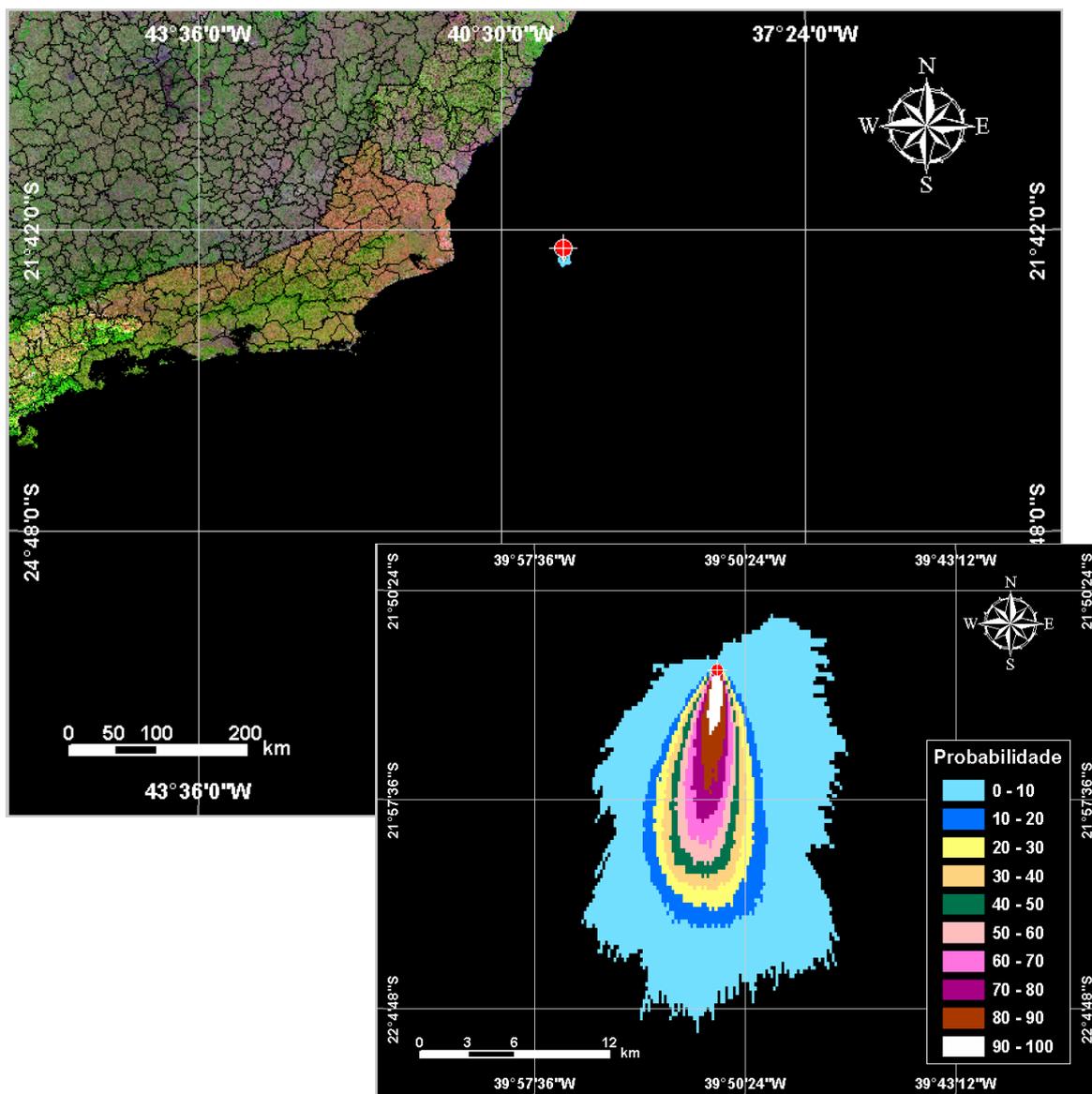


Figura 19 - Cenário FRADE_VER_PIORCASO_9HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 10.480,3 m³/h após 9 horas.

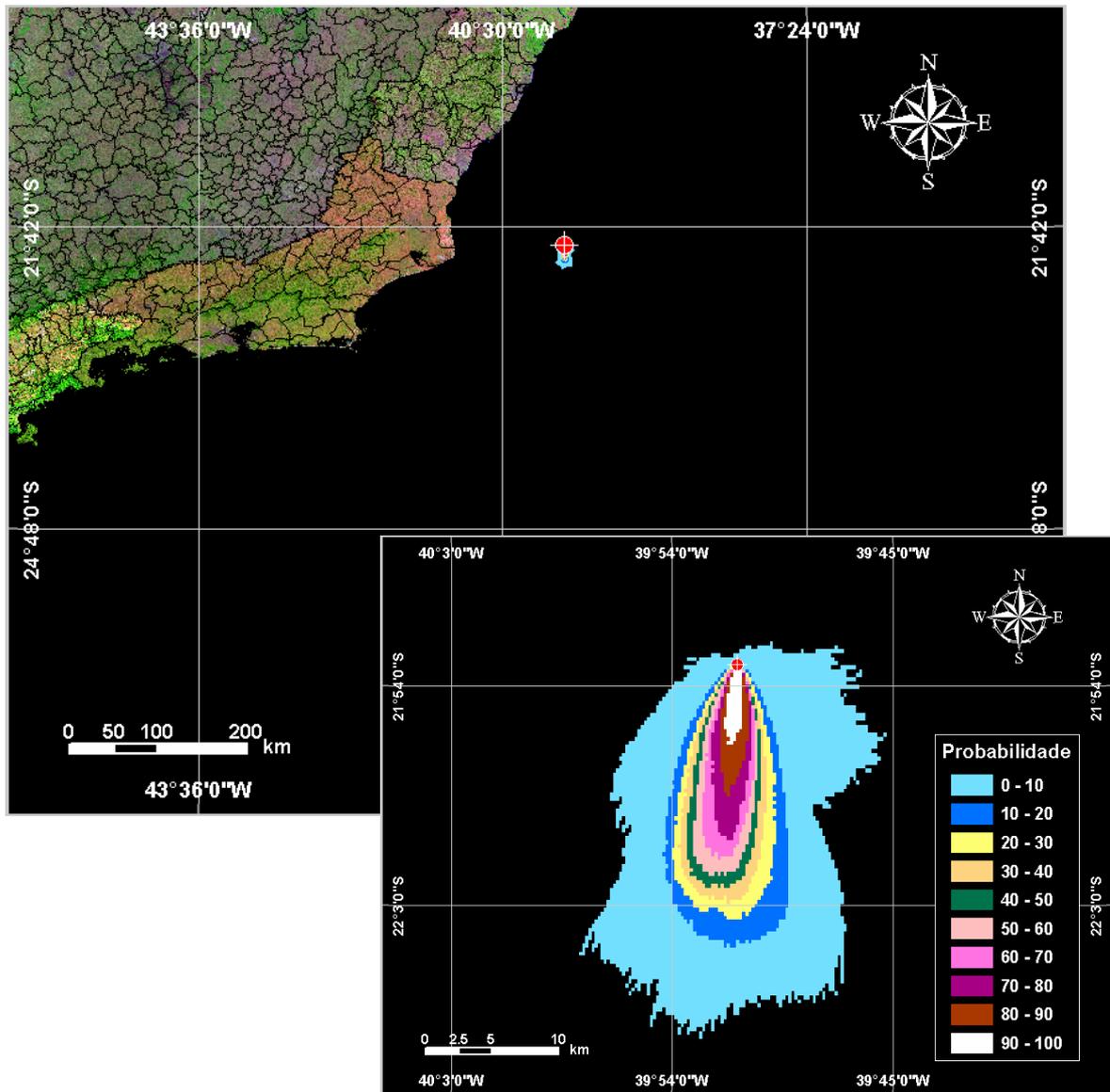


Figura 20 - Cenário FRADE_VER_PIORCASO_12HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 10.480,3 m³/h após 12 horas.

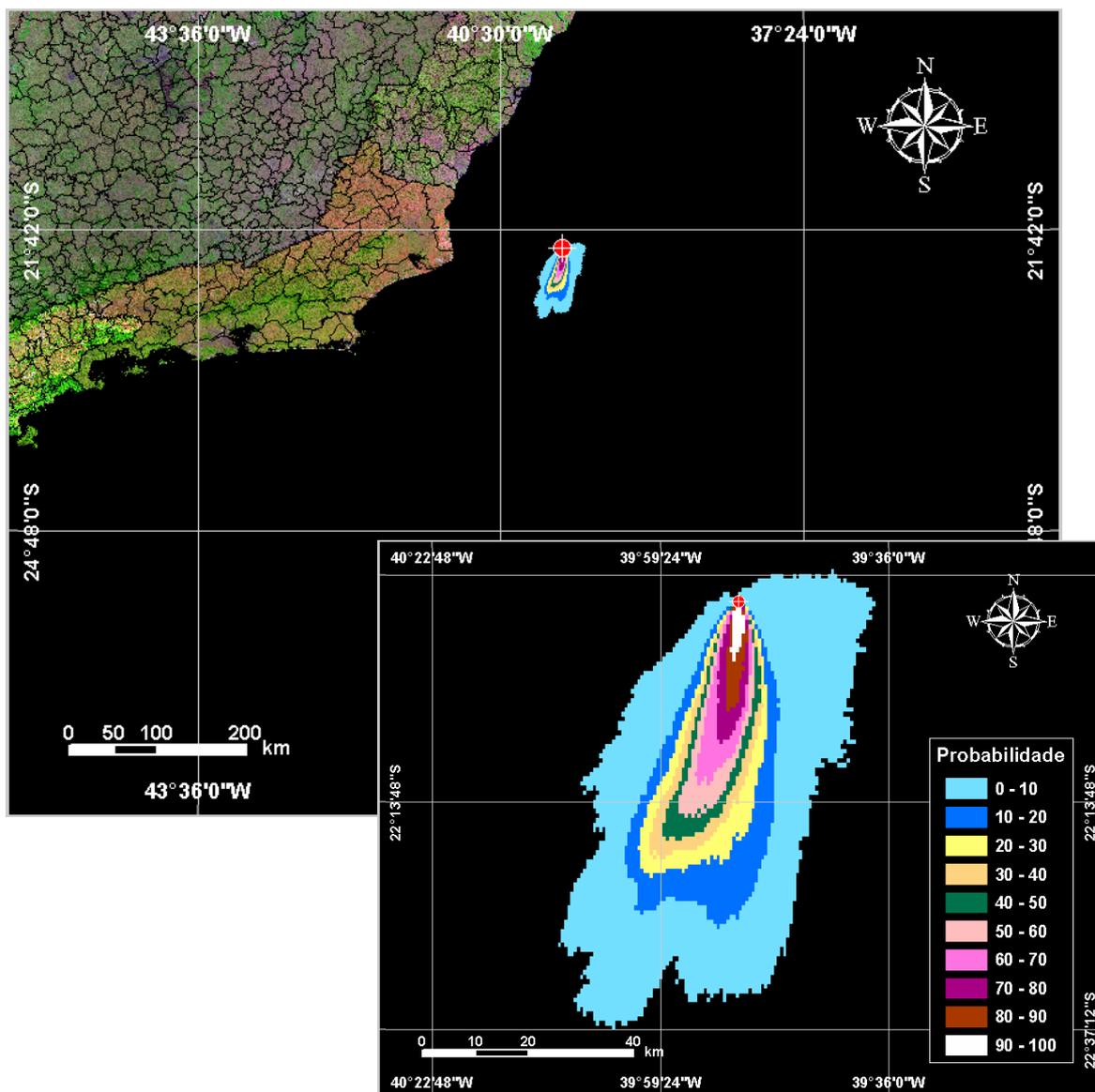


Figura 21 - Cenário *FRADE_VER_PIORCASO_36HORAS*. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 251.526,5 m³ após 36 horas.

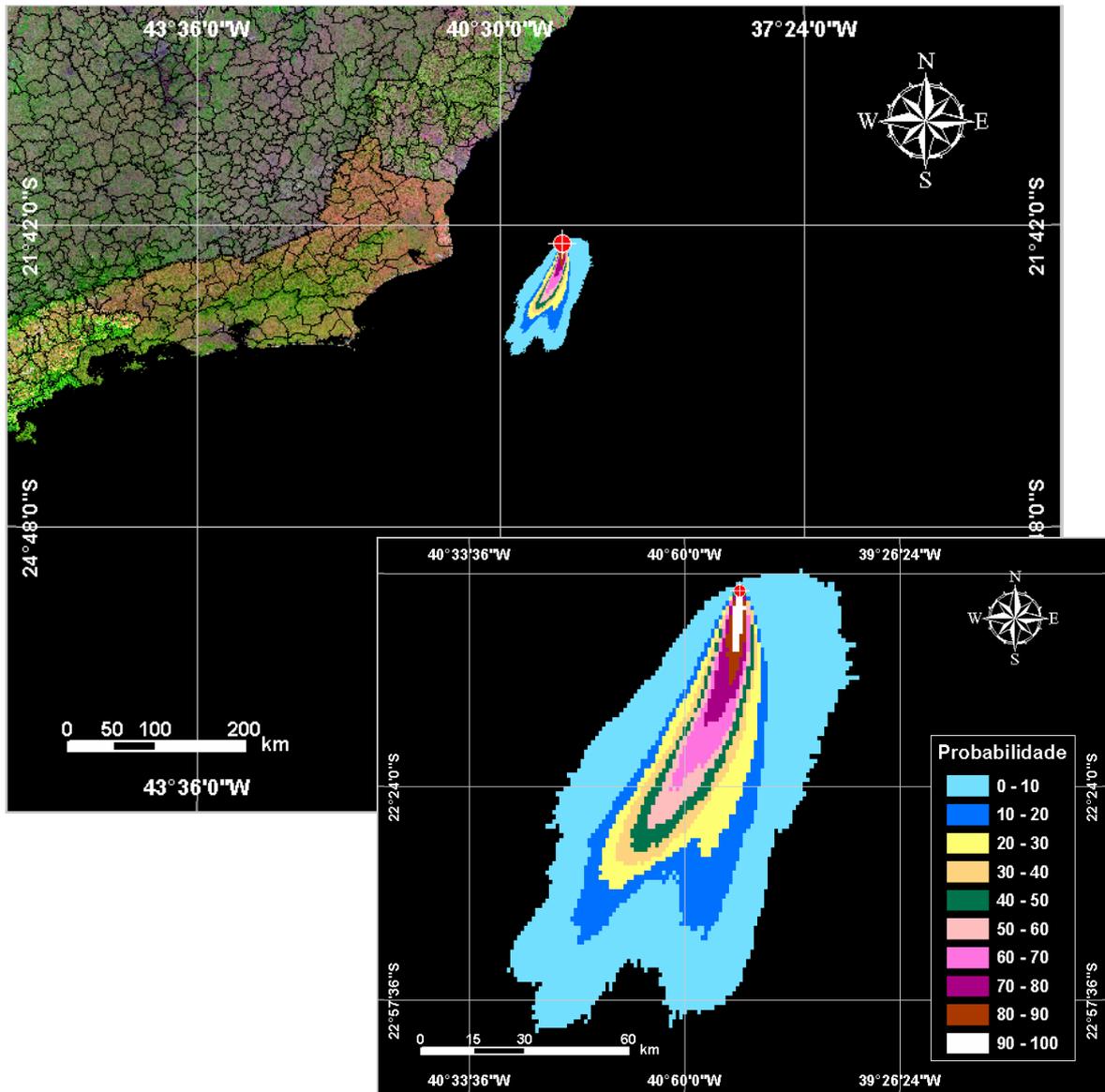


Figura 22 - Cenário FRADE_VER_PIORCASO_60HORAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 251.526,5 m³ após 60 horas.

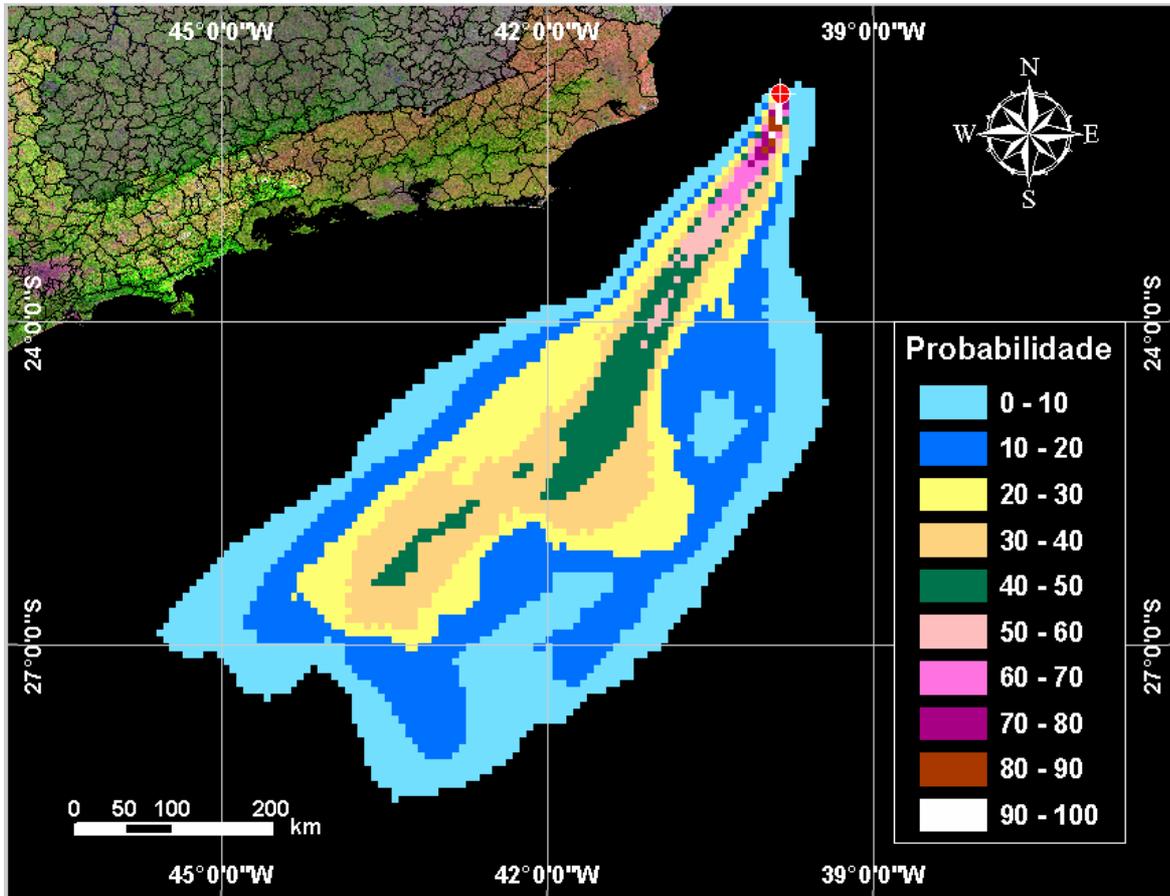


Figura 23 - Cenário FRADE_VER_PIORCASO_30DIAS. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de verão (janeiro a março), com derrame de 251.526,5 m³ após 30 dias.

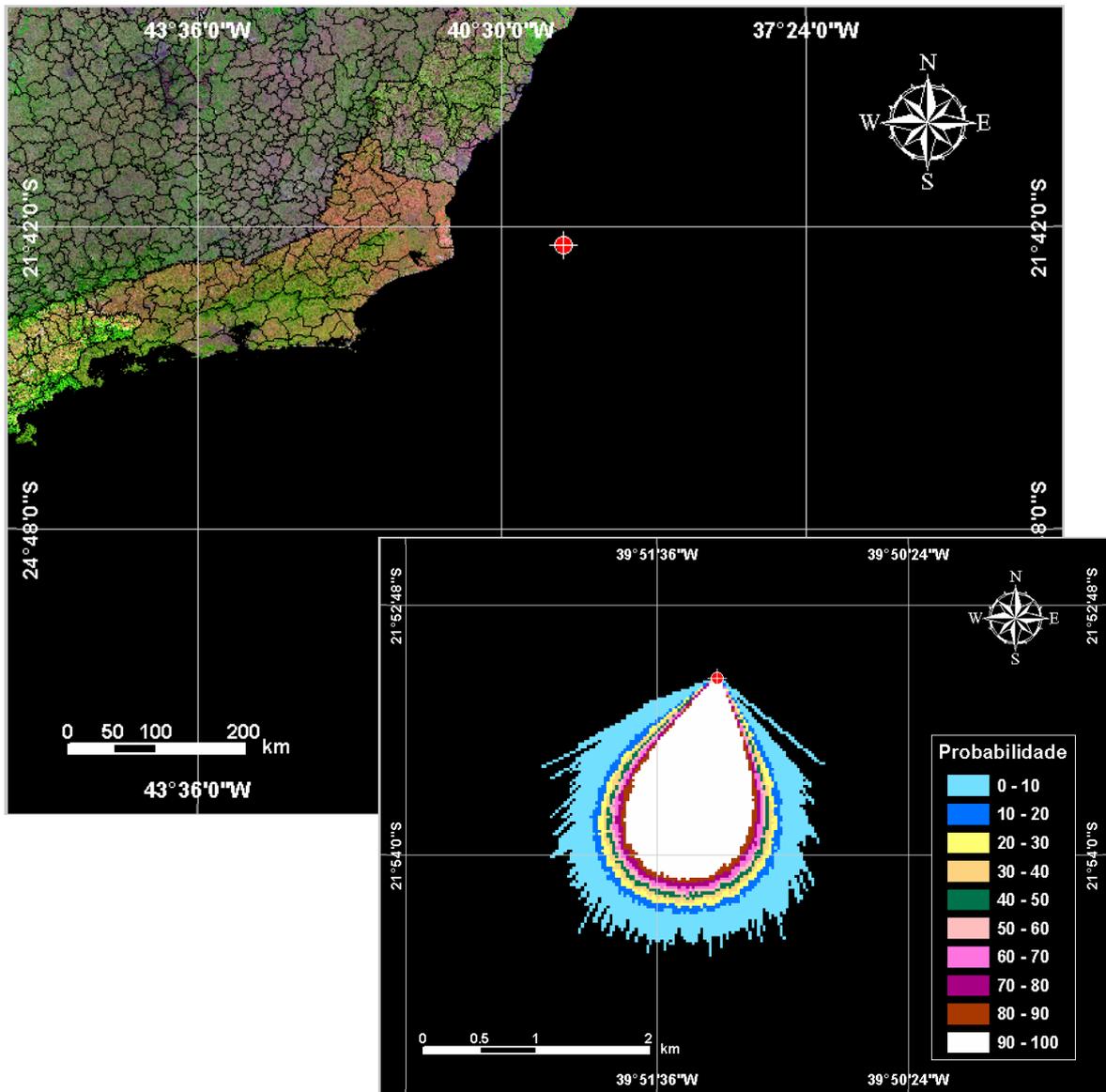


Figura 24 - Cenário FRADE_INV_8_20MGL. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 8 m³ após 1 hora atingindo 20 mg/l.

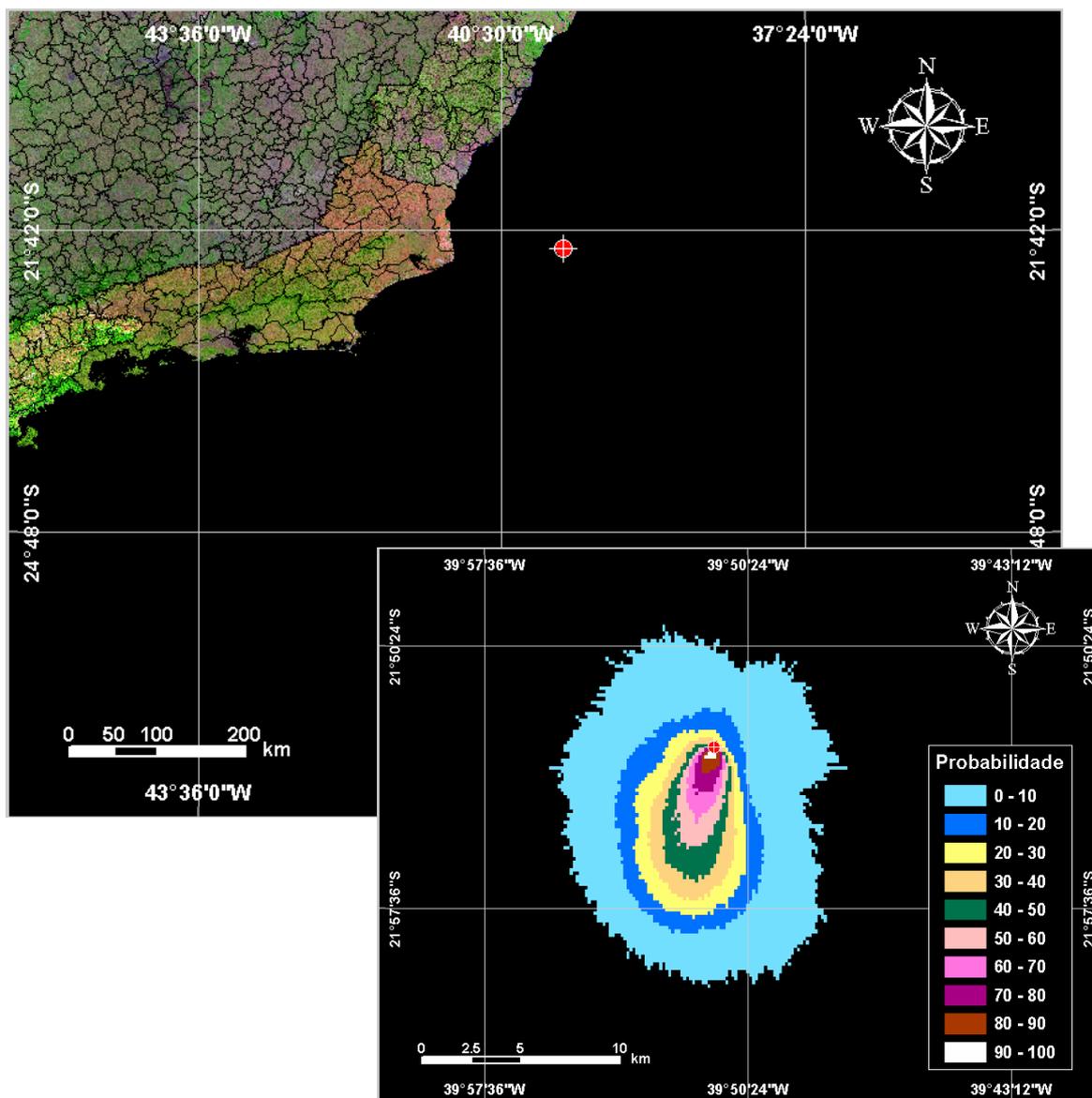


Figura 25 - Cenário *FRADE_INV_200_6HORAS*. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m³ após 6 horas.

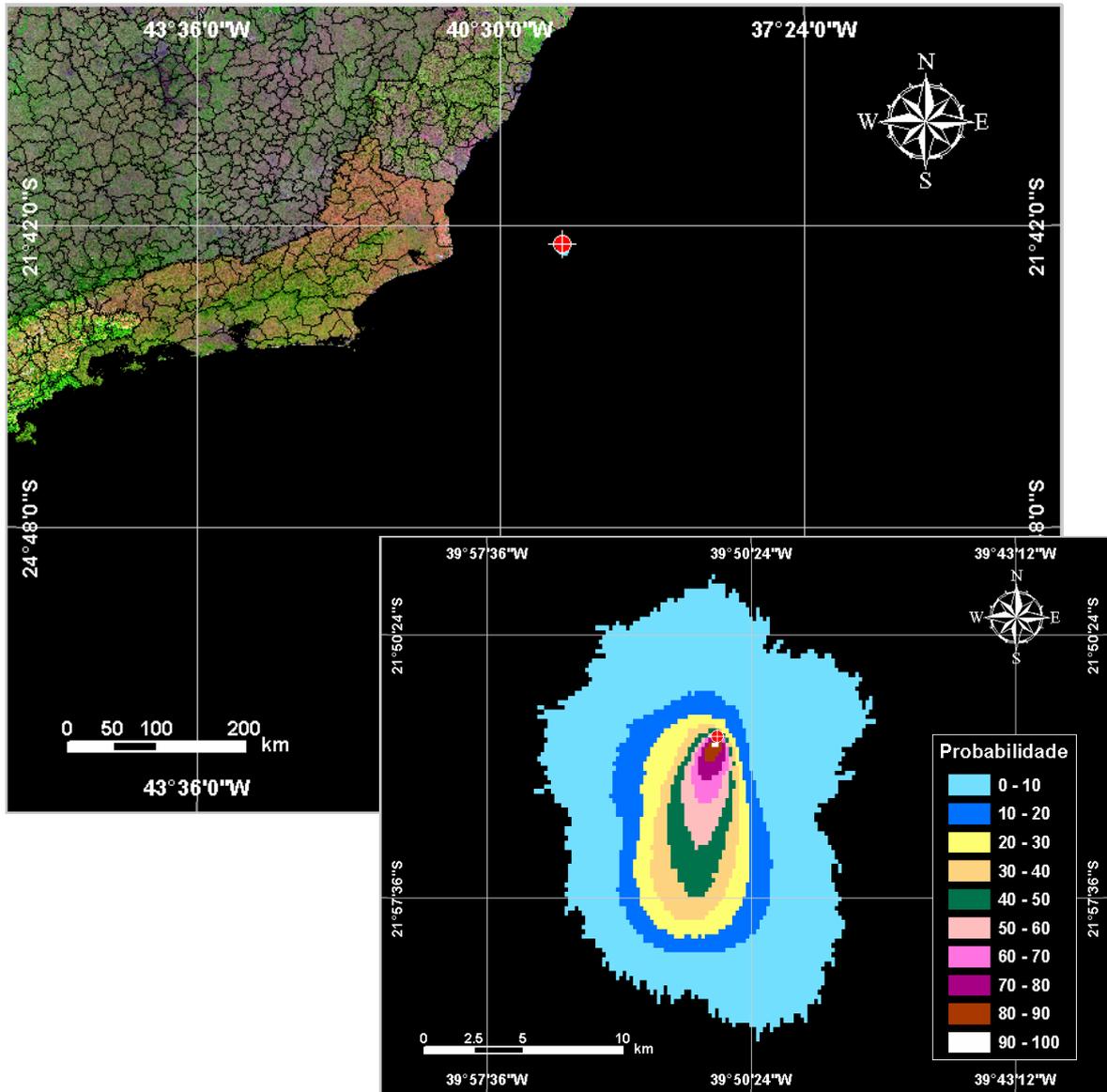


Figura 26 - Cenário *FRADE_INV_200_7HORAS*. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 200 m³ após 7 horas.

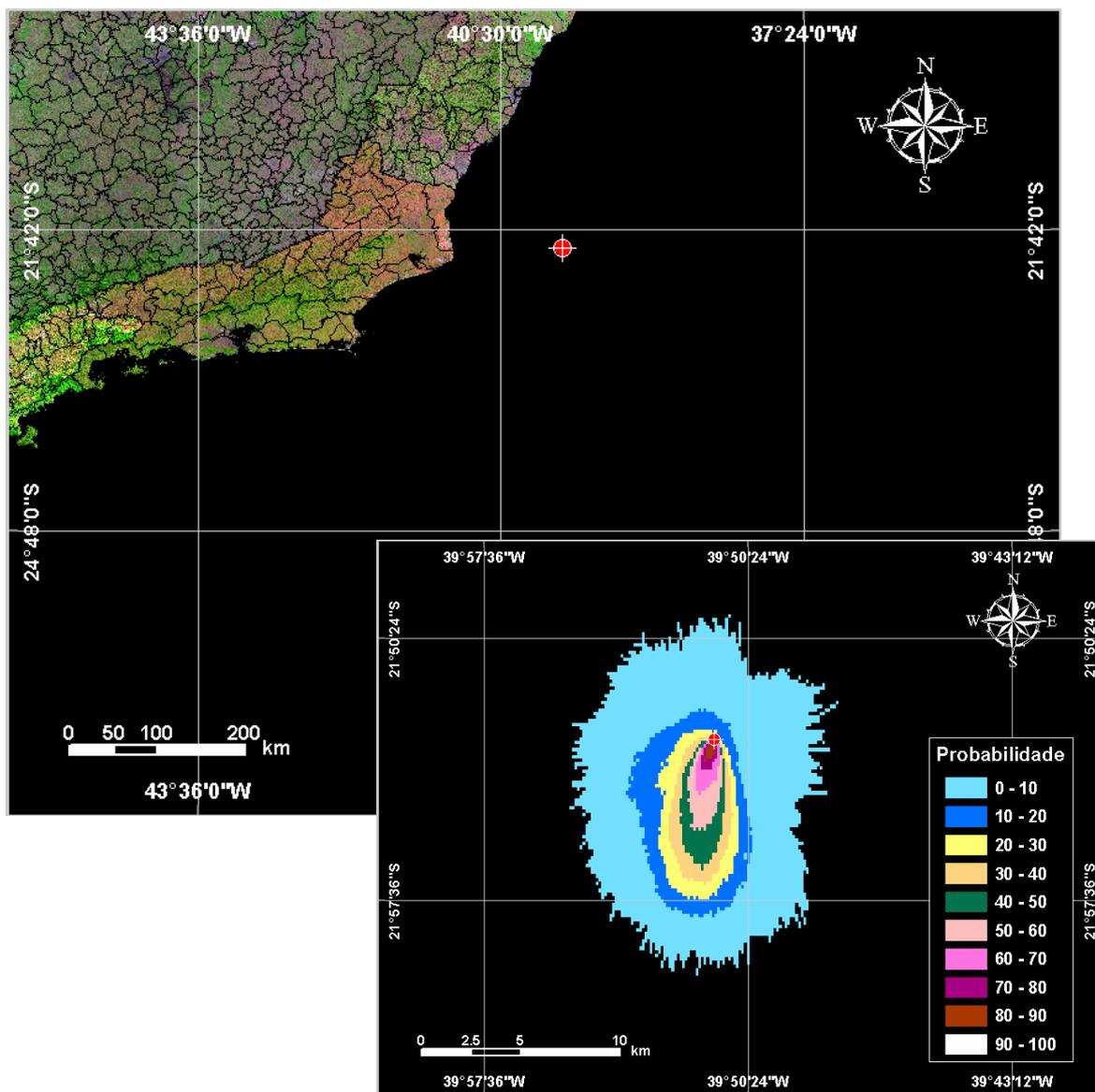


Figura 27 - Cenário *FRADE_INV_PIORCASO_6HORAS*. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 10.480,3 m³/h após 6 horas.

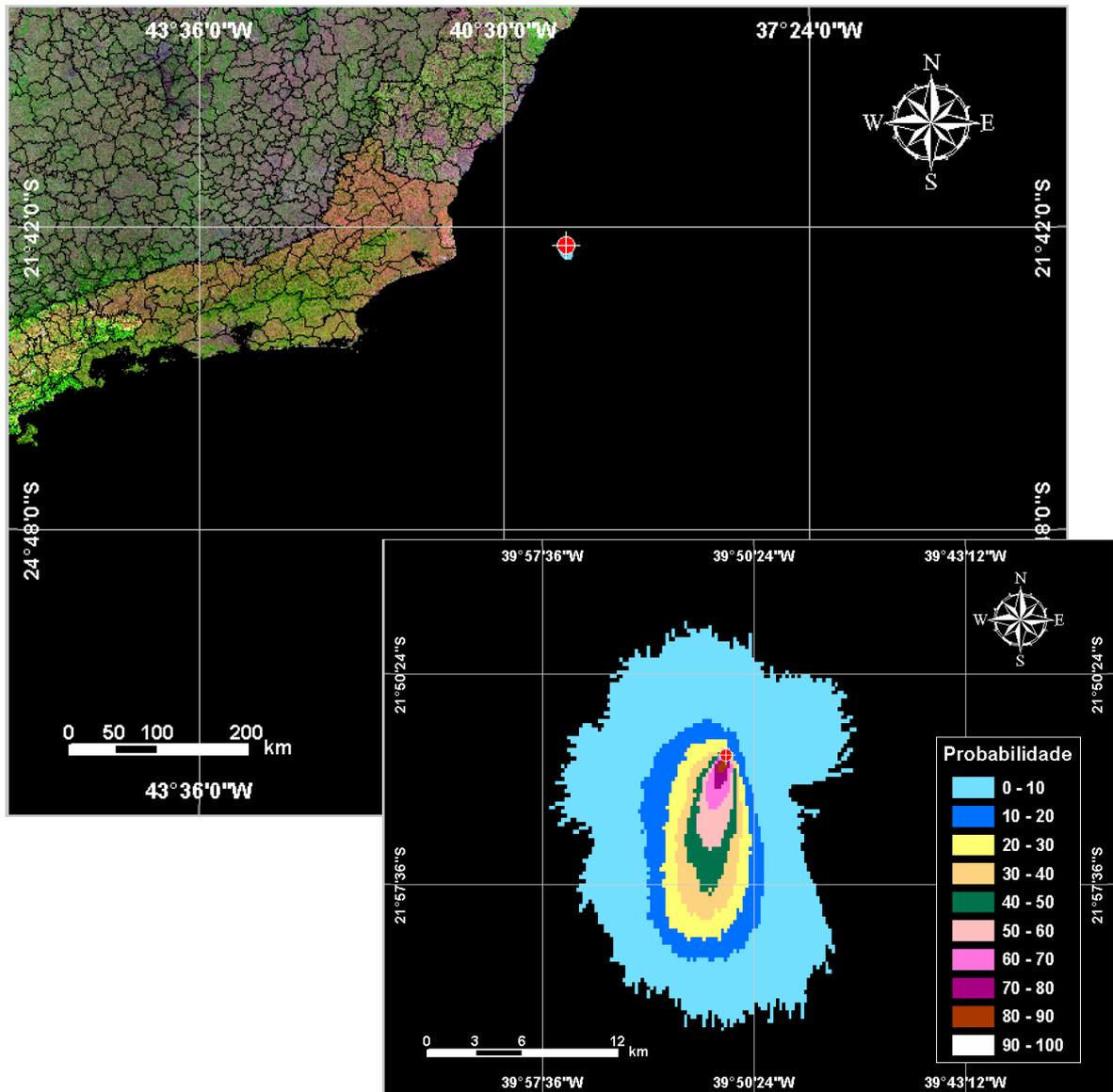


Figura 28 - Cenário *FRADE_INV_PIORCASO_9HORAS*. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 10.480,3 m³/h após 9 horas.

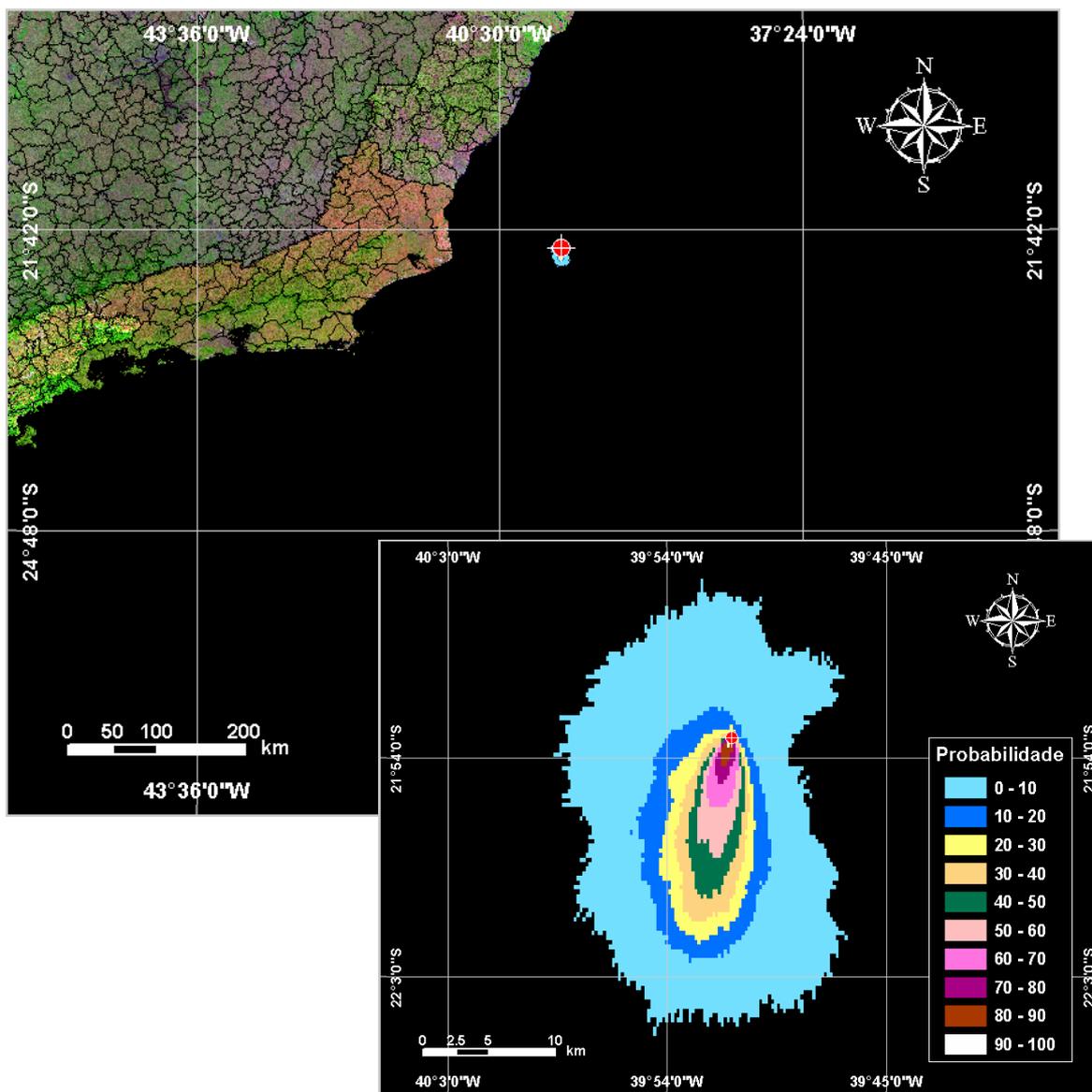


Figura 29 - Cenário *FRADE_INV_PIORCASO_12HORAS*. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 10.480,3 m³/h após 12 horas.

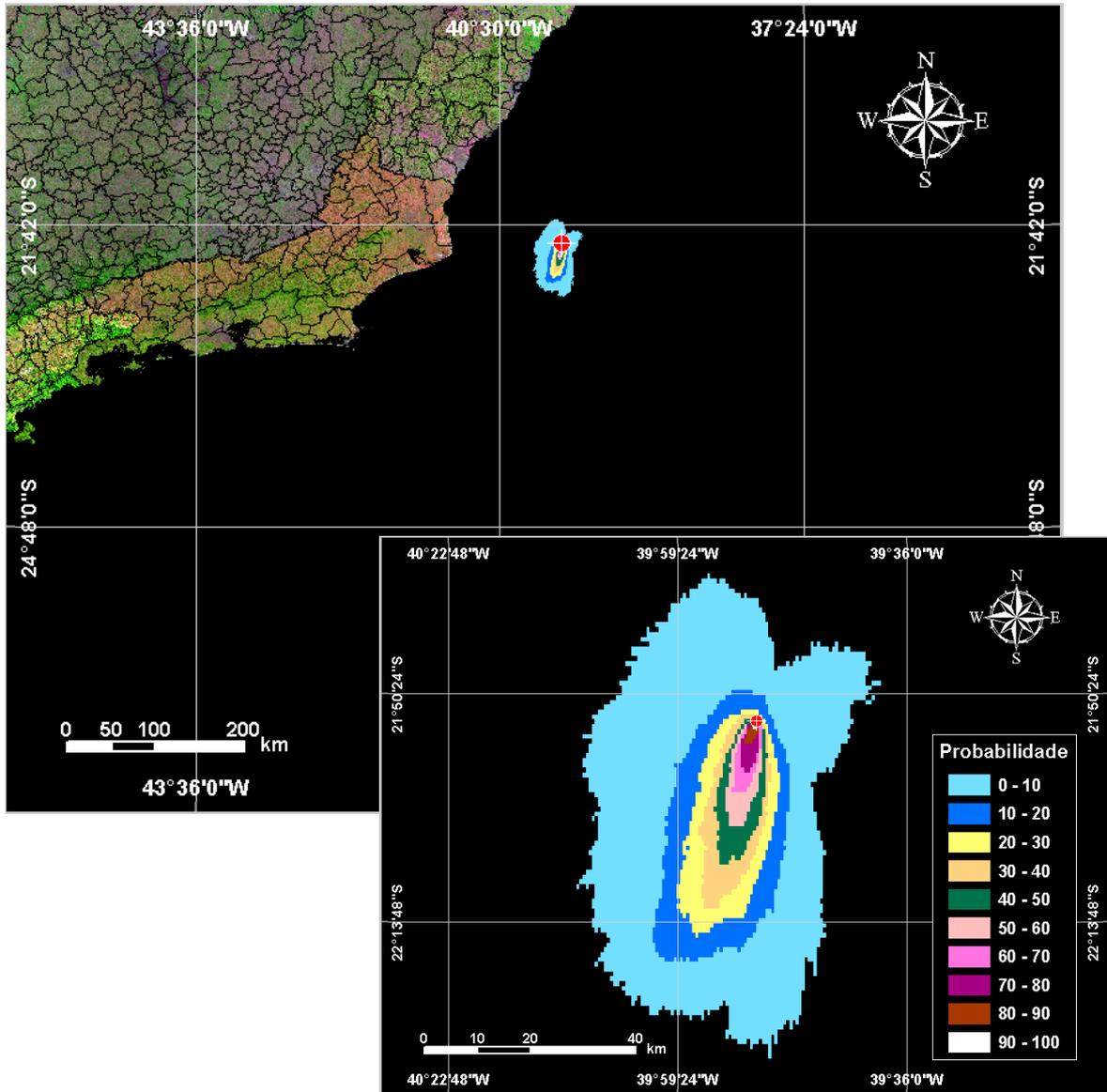


Figura 30 - Cenário *FRADE_INV_PIORCASO_36HORAS*. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 251.526,5 m³ após 36 horas.

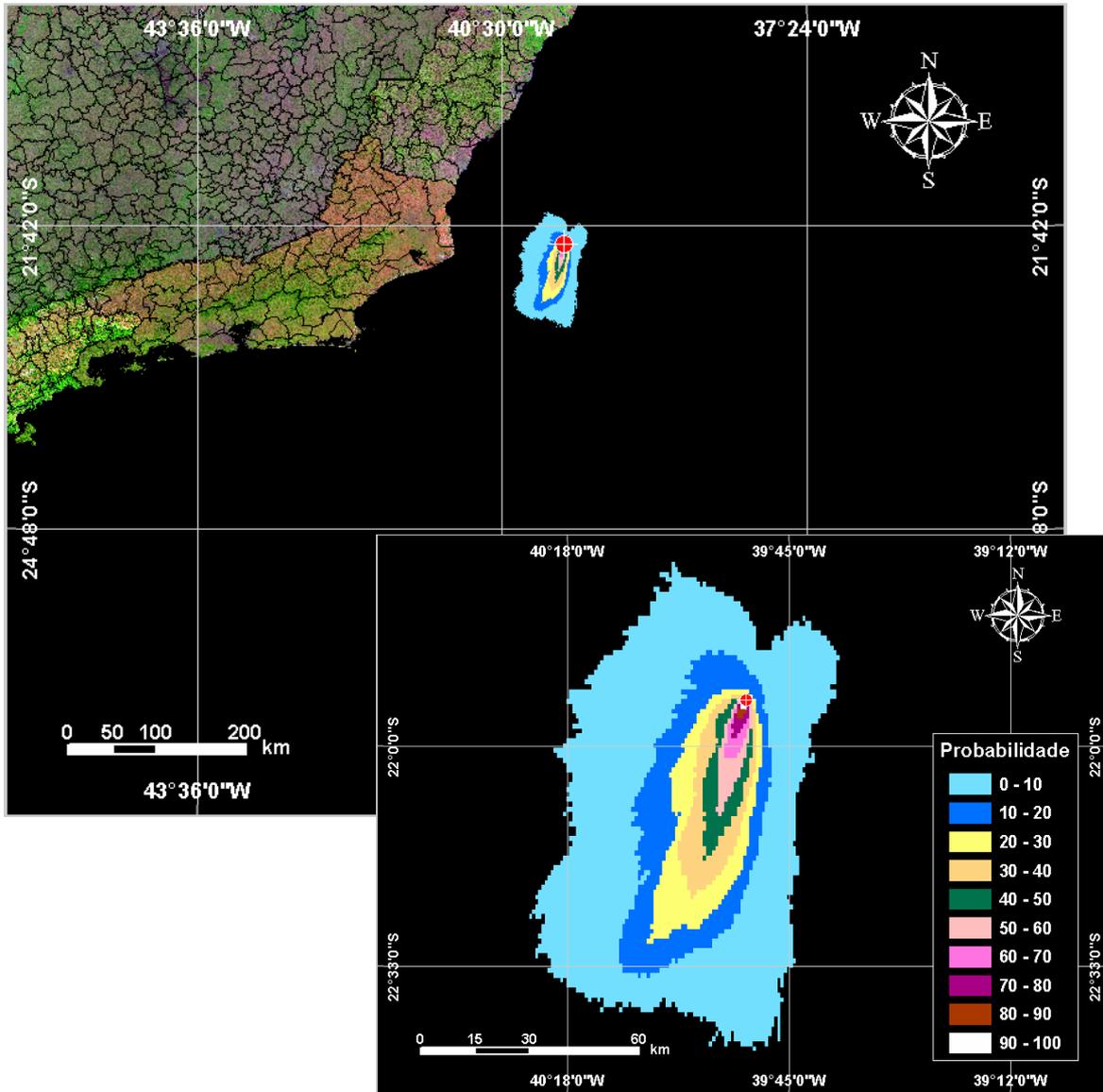


Figura 31 - Cenário *FRADE_INV_PIORCASO_60HORAS*. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 251.526,5 m³ após 60 horas.

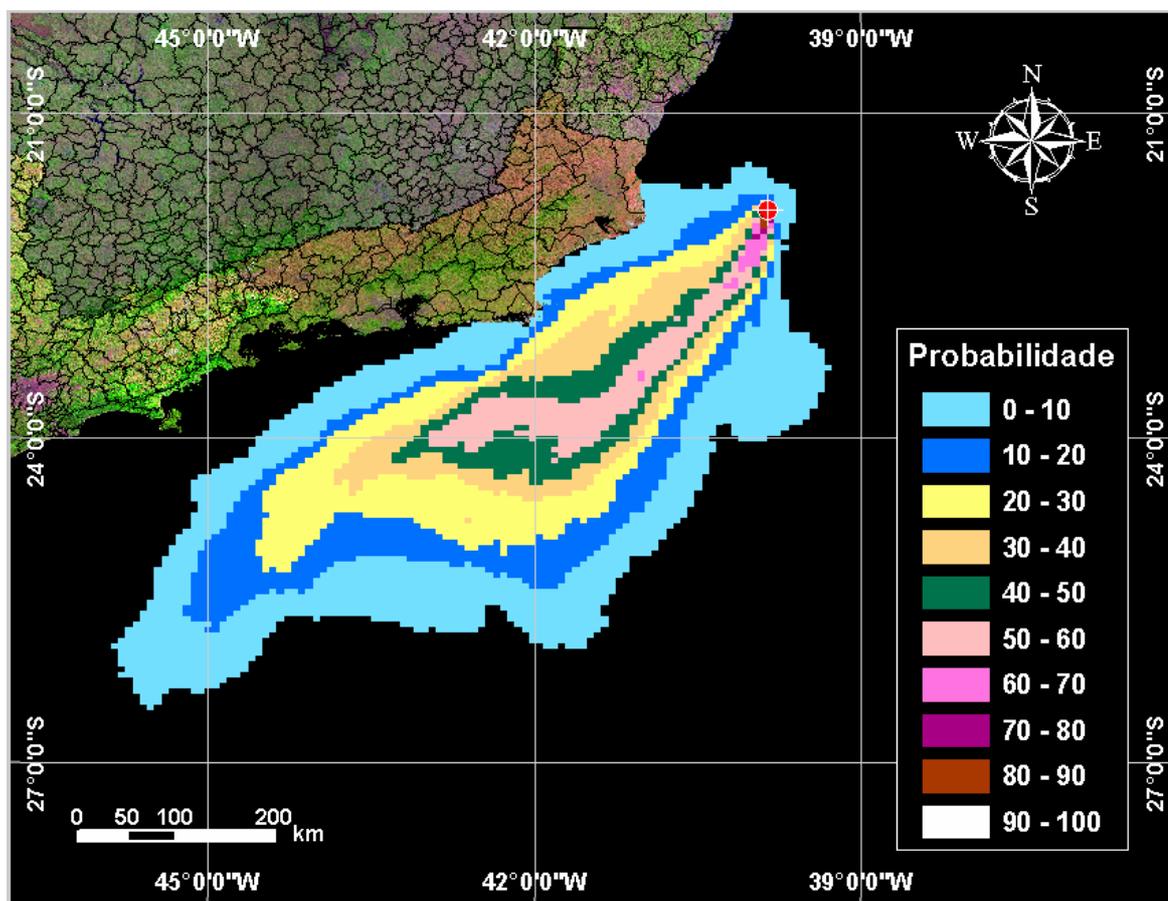


Figura 32 - Cenário *FRADE_INV_PIORCASO_30DIAS*. Contornos de probabilidade de óleo na água para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 251.526,5 m³ após 30 dias.

Na Figura 33 é apresentada, a região da linha de costa com probabilidade de toque, para o FPSO, em condições de inverno. São apresentadas as faixas de probabilidade de toque na costa, observa-se que essa probabilidade engloba uma área que se estende, no Estado do Rio de Janeiro, do município de São João da Barra a Saquarema. A maior probabilidade de toque (entre 10 e 20%) ocorre no município de Cabo Frio.

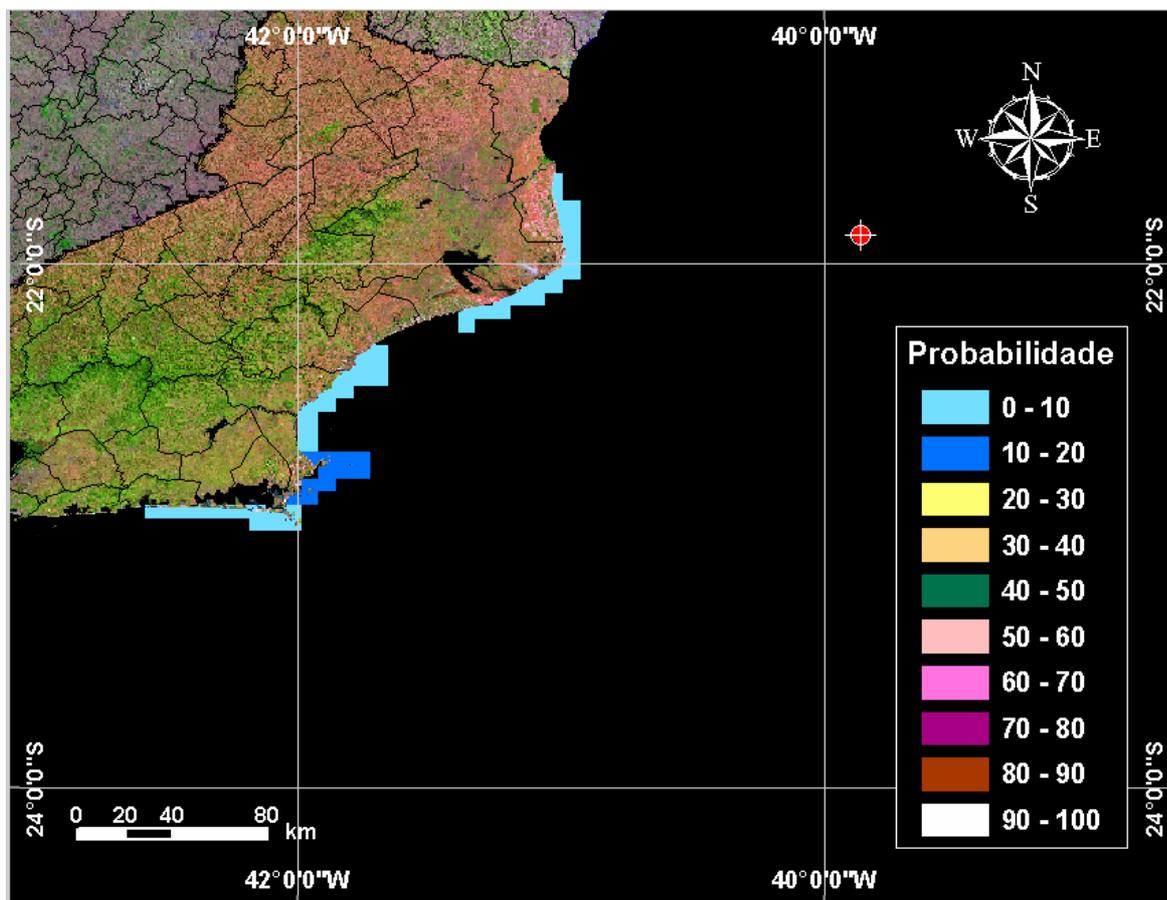


Figura 33 - Cenário *FRADE_INV_PIORCASO_30DIAS_SHORE*. Probabilidades de toque na costa para um acidente ocorrendo no FPSO, durante os meses de inverno (junho a agosto), com derrame de 251.526,5 m³ após 30 dias.

A Figura 34 apresenta o volume médio de óleo por km de costa atingida para simulações em condições de inverno e após 30 dias de simulação. Observa-se que os municípios de São João da Barra e Campos dos Goytacazes (RJ) destacam-se com um volume de cerca de 673-2.753 m³. Na região compreendida entre Quissamã e Saquarema (RJ) ocorrem volumes inferiores a 672 m³.

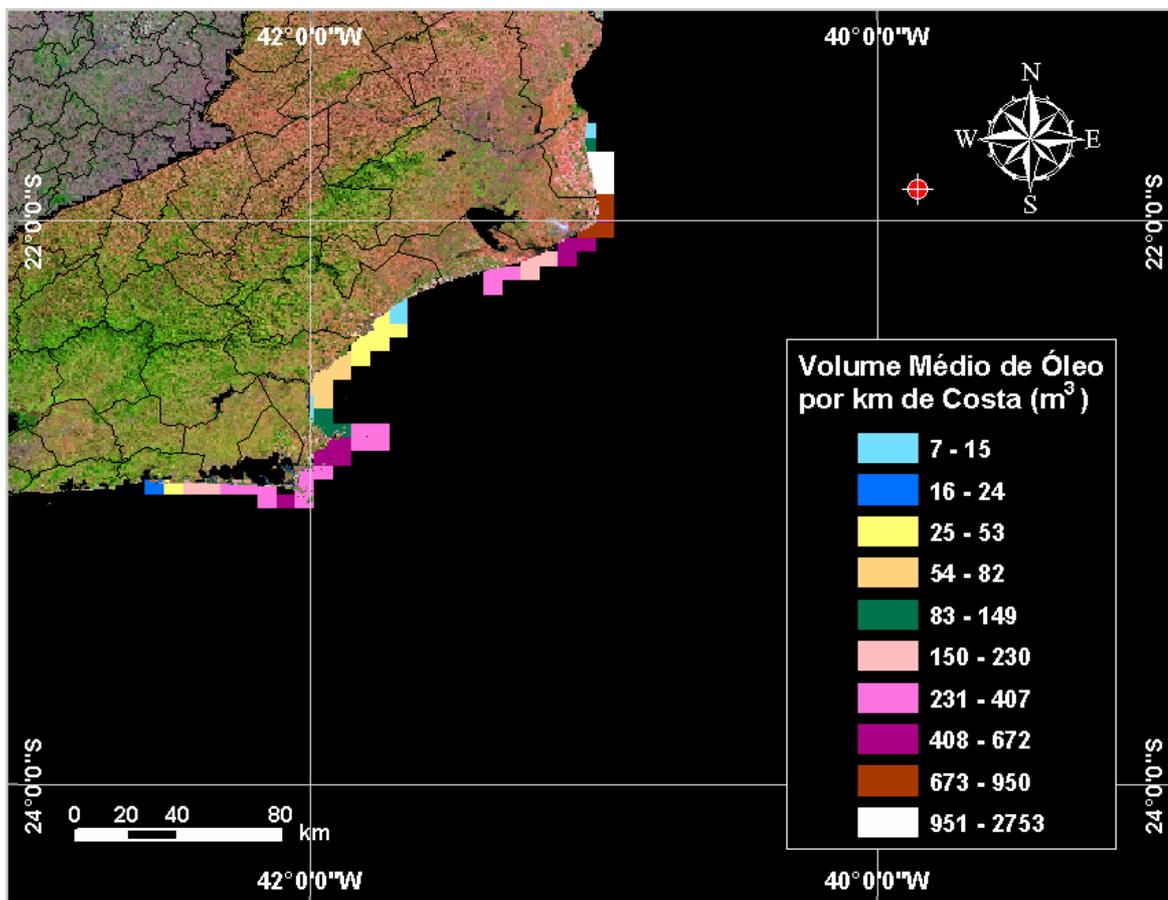


Figura 34 - Cenário *FRADE_INV_PIORCASO_30DIAS_OLEOMED*. Volume médio de óleo por km que chega à costa no período de inverno (junho a agosto).

A Figura 35 apresenta o volume máximo de óleo por km de costa atingida para simulações em condições de inverno e após 30 dias de simulação. Os municípios de São João da Barra (RJ), Campos dos Goytacazes (RJ), Cabo Frio (RJ) e Arraial do Cabo (RJ) destacam-se com volumes de cerca de 1.971-4.674 m³. Nas regiões compreendidas entre Quissamã (RJ) e Casimiro de Abreu (RJ) e entre Aruarama (RJ) e Saquarema (RJ) ocorrem volumes inferiores a 1.970 m³.

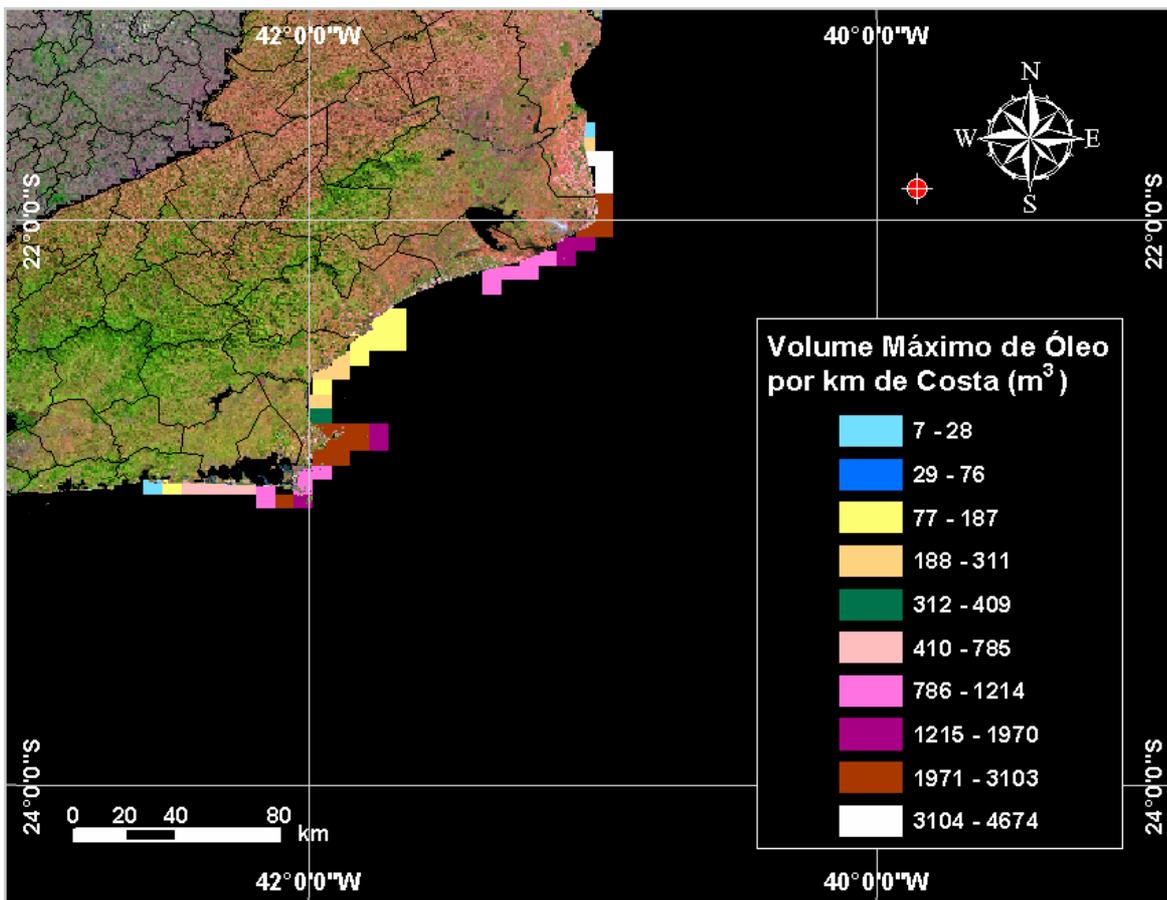


Figura 35 - Cenário FRADE_INV_PIORCASO_30DIAS_OLEOMAX. Volume máximo de óleo por km que chega à costa no período de inverno (junho a agosto).

A Tabela 6 apresenta a extensão de linha de costa atingida no derrame de óleo simulado para o FPSO, no campo de Frade, em condições de inverno.

Tabela 6 - Extensão da linha de costa com probabilidade de ser atingida pelo derrame de óleo do FPSO, simulado em condições de inverno.

CENÁRIOS	EXTENSÃO DE LINHA DE COSTA COM PROBABILIDADE DE TOQUE (km)
FRADE_INV_PIORCASO_30DIAS	288

A Tabela 7 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 os acidentes simulados no FPSO, ocorrendo durante os meses de inverno (junho a agosto).

Tabela 7 - Resumo dos resultados da modelagem probabilística de pior caso ocorrendo durante os meses de inverno (junho a agosto) para o FPSO.

CENÁRIOS	TEMPO MÍNIMO PARA ATINGIR A COSTA (HORAS)	TEMPO MÉDIO PARA ATINGIR A COSTA (HORAS)	PERCENTAGEM DE SIMULAÇÕES COM TOQUE NA COSTA (%)
FRADE_INV_PIORCASO_30DIAS	138	451	20

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 os cenários que apresentaram o menor tempo para o primeiro toque do óleo na costa. No caso do cenário de pior caso de verão, não houve toque na costa, portanto, foi considerado como cenário determinístico crítico aquele cenário onde a mancha de óleo mais se aproxima da costa. Em ambos os cenários foram considerados vazamentos de 215.526,49 m³ em 24 horas. A Tabela 8 apresenta um resumo do cenários críticos de inverno e verão obtidos para o FPSO.

Tabela 8 - Resumo dos cenários determinísticos críticos de verão e de inverno para o FPSO.

CENÁRIOS	DATA DE INÍCIO	VOLUME FINAL DE ÓLEO QUE CHEGA À COSTA (m ³)	TEMPO PARA CHEGAR À COSTA (HORAS)
FRADE_VER_PIORCASO_30DIAS	29/02/1992 – 13:00 h	-	-
FRADE_INV_PIORCASO_30DIAS	14/06/1992 – 12:00 h	3.650	138

Na Figura 36 e na Figura 38 são apresentados os contornos de espessura no instante do primeiro toque na costa dos cenários críticos de verão e inverno, respectivamente, para o FPSO. Nestas figuras são destacados os limites de 0,0003 mm (limite para ambientes sensíveis), e 0,05 mm (limite de recolhimento). A cor cinza representa a região por onde a mancha se deslocou durante os

30 dias de duração do derrame e, portanto, não está associada a uma espessura. A mancha no instante do primeiro toque na costa (ou de maior proximidade da costa) é aquela representada pela escala de cores indicada nas legendas.

Na simulação determinística crítica de verão (Figura 36), a menor distância da pluma em relação à costa (município de Campo dos Goytacazes) é de aproximadamente 76 km.

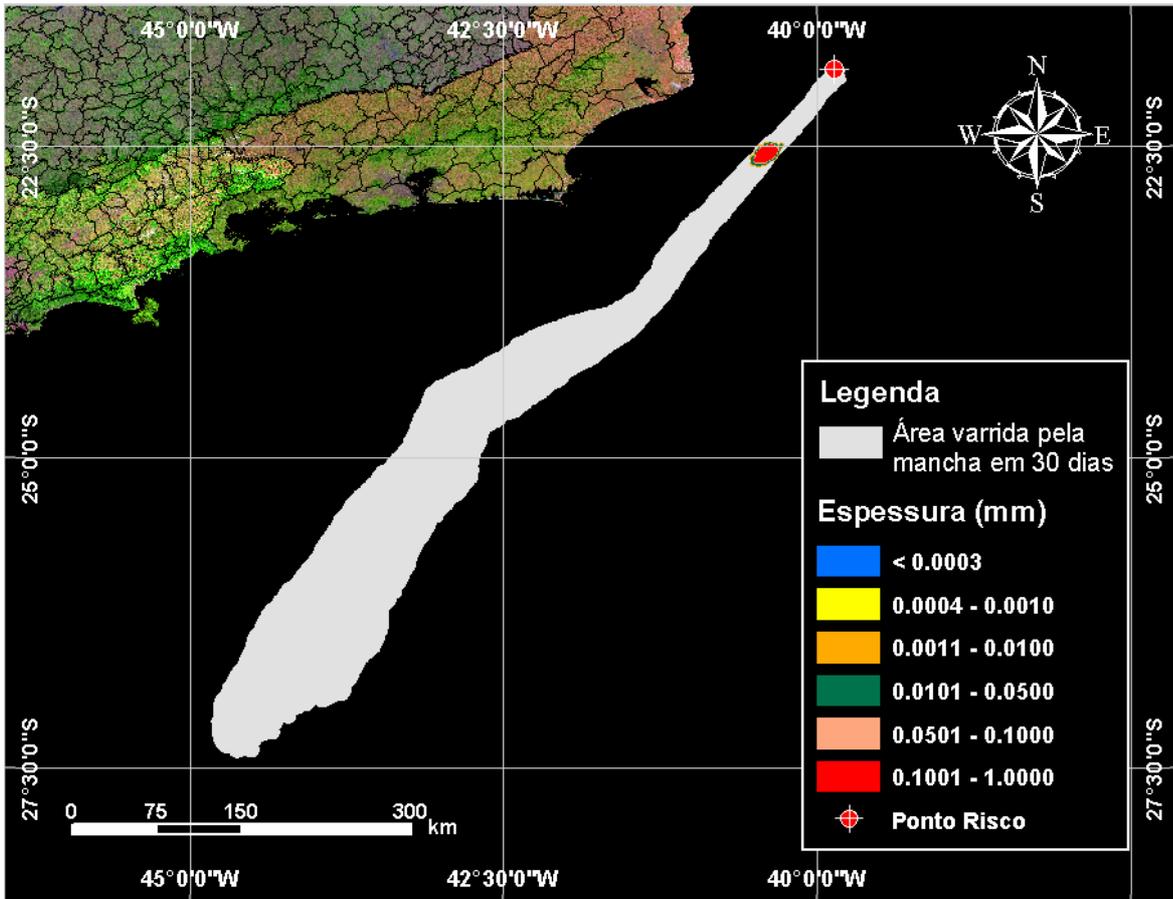


Figura 36 - Cenário determinístico de pior caso para um derrame ocorrido no FPSO, no período de verão.

A Figura 37 apresenta um gráfico com o balanço de massa (óleo na superfície, na costa, evaporado e na coluna d'água) para a simulação de pior caso no período de verão. Observa-se que cerca de 20% do volume derramado evapora ao final dos 30 dias de simulação.

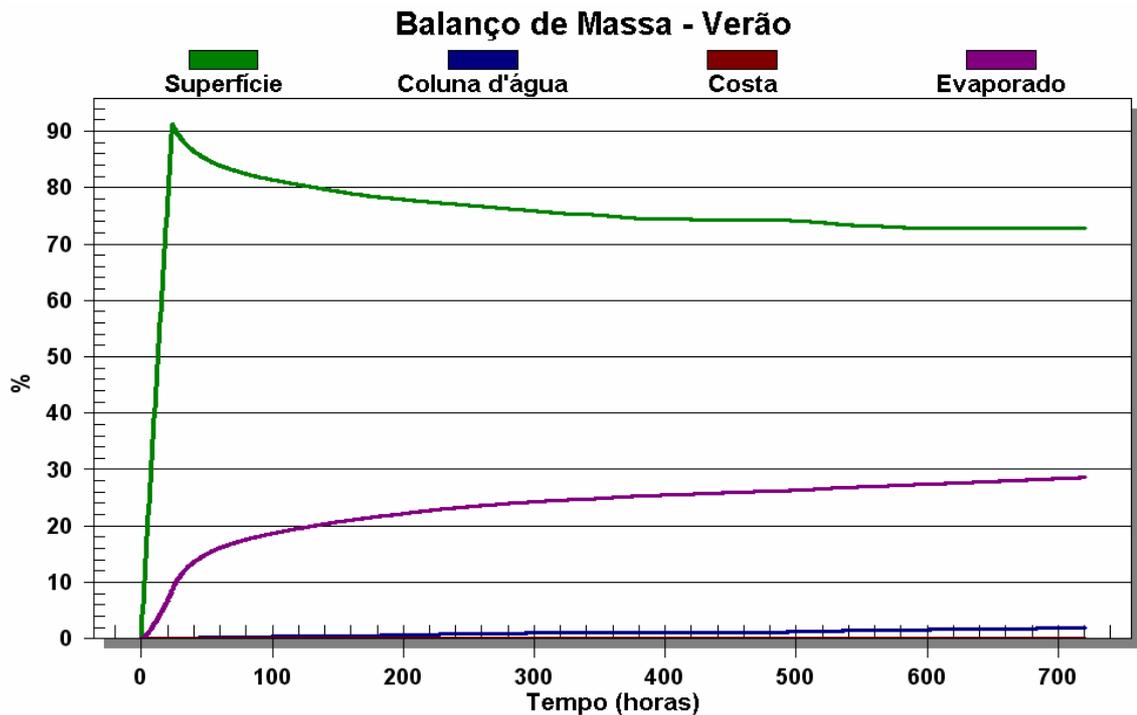


Figura 37 - Balanço de massa para o cenário de pior caso de vazamento no verão, no FPSO.

Na simulação determinística crítica de inverno (Figura 38), o primeiro toque na linha de costa ocorre cerca de 6 dias após o início do derrame.

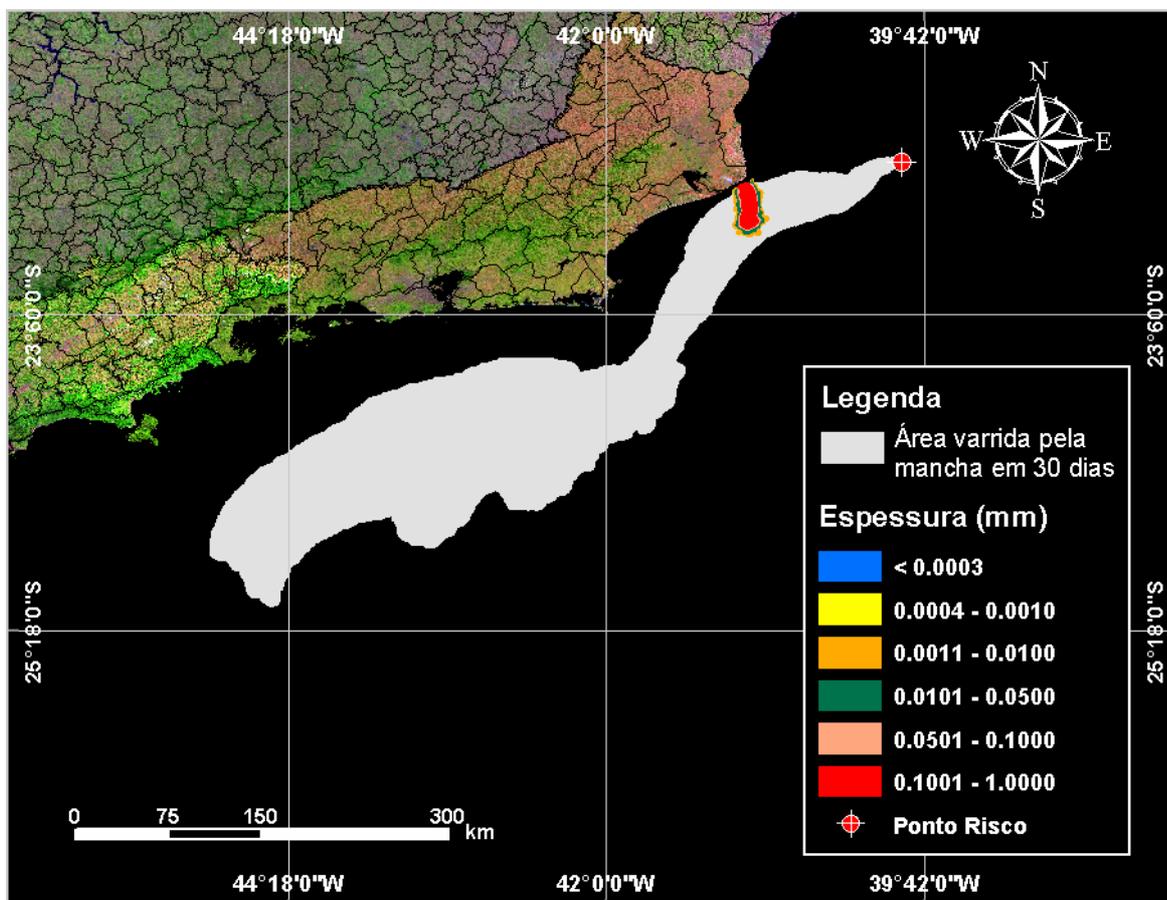


Figura 38 - Cenário determinístico de pior caso para um derrame ocorrido no FPSO, no período de inverno.

A Figura 39 apresenta um gráfico com o balanço de massa (óleo na superfície, na costa, evaporado e na coluna d'água) para a simulação de pior caso no período de inverno.

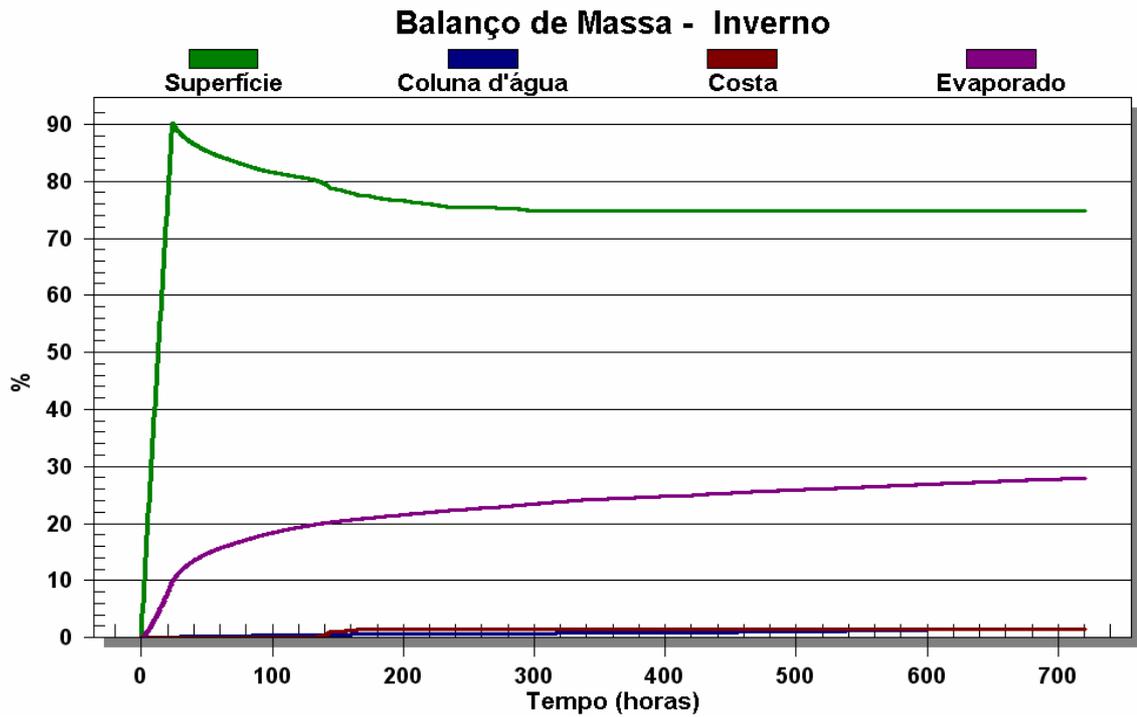


Figura 39 - Balanço de massa para o cenário de pior caso de vazamento no inverno, no FPSO.

VI CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de modelos OILMAP foi utilizado para definir a área potencialmente ameaçada por derramamentos de óleo, decorrentes das atividades de produção no campo do Frade.

Foram conduzidas simulações probabilísticas para determinar contornos de probabilidade da mancha atingir a área de estudo a partir de 3 (três) classes de derrame, como definido na Resolução CONAMA nº 293/01: pequeno, com 8 m³; médio, com 200 m³, e pior caso, com 251.526,5 m³ derramados ao longo de 24 horas, correspondente ao vazamento dos tanques de armazenagem da FPSO provocado por uma colisão.

Os resultados dessas simulações mostraram que para um potencial derramamento de óleo, decorrente do rompimento dos tanques de armazenagem da FPSO em condições meteo-oceanográficas de verão, não há probabilidade de toque na linha de costa. Em condições de inverno, há probabilidade de toque ao longo de 288 km de linha de costa, entre os municípios de São João da Barra (RJ) e Saquarema (RJ).

A partir dos resultados das simulações probabilísticas de pior caso foram selecionados os cenários determinísticos críticos para condições de verão e inverno, utilizando como critério o menor tempo de chegada do óleo na costa. No cenário determinístico crítico de inverno a mancha de óleo levou 138 horas para atingir a linha de costa, no município de Campos dos Goytacazes (RJ). Como não houve toque na costa nos cenários de verão, foi selecionado como cenário crítico aquele onde o óleo mais se aproximou da linha de costa, a cerca de 76 km de distância da costa, na direção do município de Campos dos Goytacazes (RJ).

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

VII BIBLIOGRAFIA

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

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

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

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.
- 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. *Atmosferic 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.
- 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.