
SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	6
2 - ÁREA DE ESTUDO	8
2.1 - Ventos.....	10
2.2 - Regime de Correntes	16
3 - MODELO DE DISPERSÃO DE ÓLEO (OSCAR) E DADOS DE ENTRADA.....	25
3.1 - Linha de costa, batimetria e grade do modelo	27
3.2 - Ventos, correntes e ondas	29
3.3 - Parâmetros da simulação.....	31
4 - RESULTADOS.....	34
4.1 - Simulações probabilísticas.....	34
4.2 - Simulações determinísticas.....	42
5 - CONCLUSÕES	46
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
7 - EQUIPE TÉCNICA.....	52
ANEXO I - FORMULAÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO E TRANSPORTE DE ÓLEO OSCAR	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Área de estudo.	8
Figura 2.2 - Série temporal diária dos dados de vento do satélite QuikScat para o ponto de derramamento. As setas azuis indicam a direção do vento (em relação ao norte verdadeiro) e a linha vermelha representa a intensidade do vento.	11
Figura 2.3 - Exemplo de campo de vento do QuikScat num determinado instante adotado nas simulações com o modelo OSCAR.	12
Figura 2.4 - Histograma direcional dos dados de vento do QuikScat no período de inverno e verão para o ponto de derramamento.	13
Figura 2.5 - Histograma de intensidades dos dados de vento do QuikScat durante o período de inverno (a) e verão (b) para o ponto de derramamento.	14
Figura 2.6 - Histograma de direções cardinais dos dados de vento do QuikScat durante o período de inverno (a) e verão (b) para o ponto de derramamento.	15
Figura 2.7 - Domínio do modelo HYCOM com uma grade de Mercator e outra bipolar. Estão plotados também dados de desvio padrão da elevação da superfície do mar (Fonte: Chassignet, 2008).	17
Figura 2.8 - Exemplo com a localização de dados de altimetria (a), temperatura da superfície do mar obtida por satélite (b), temperatura da superfície do mar obtida por medições in situ (c) e observações em perfis ao longo da coluna d'água (d) assimilados no HYCOM na região equatorial no dia 19 de janeiro de 2008 (Fonte: Smedstad et al., 2008).	18
Figura 2.9 - Exemplo do campo de temperatura da superfície do mar do HYCOM num determinado instante.	19
Figura 2.10 - Série temporal diária dos dados de corrente superficial simulados pelo modelo hidrodinâmico HYCOM para o ponto de derramamento. As setas azuis indicam a direção da corrente (em relação ao norte verdadeiro) e a linha vermelha representa a intensidade da corrente.	20
Figura 2.11 - Exemplo de campo de correntes do HYCOM num determinado instante adotado nas simulações com o modelo OSCAR.	21

Figura 2.12 - Histograma direcional dos dados de corrente superficiais do HYCOM no período de inverno e verão para o ponto de derramamento.	22
Figura 2.13 - Histograma de intensidades dos dados de corrente superficiais do HYCOM durante o período de inverno (a) e verão (b) para o ponto de derramamento.....	23
Figura 2.14 - Histograma de direções cardinais dos dados de corrente superficiais do HYCOM durante o período de inverno (a) e verão (b) para o ponto de derramamento.....	24
Figura 3.1 - Esquema geral do modelo de dispersão de óleo OSCAR.....	26
Figura 3.2 - Batimetria da área de estudo.	28
Figura 3.3 - Grade de habitats da área de estudo.....	29
Figura 4.1 - Probabilidade de ocorrência de óleo na superfície para o CENÁRIO 1 - Período: inverno; Volume: 8 m ³ ; Critério de parada: 30 dias.....	35
Figura 4.2 - Probabilidade de ocorrência de óleo na superfície para o CENÁRIO 2 - Período: verão; Volume: 8 m ³ ; Critério de parada: 30 dias.....	36
Figura 4.3 - Probabilidade de ocorrência de óleo na superfície para o CENÁRIO 3 - Período: inverno; Volume: 200 m ³ ; Critério de parada: 30 dias.....	37
Figura 4.4 - Probabilidade de ocorrência de óleo na superfície para o CENÁRIO 4 - Período: verão; Volume: 200 m ³ ; Critério de parada: 30 dias.....	38
Figura 4.5 - Probabilidade de ocorrência de óleo na superfície para o CENÁRIO 5 - Período: inverno; Volume: 132 m ³ /dia por 30 dias; Critério de parada: 60 dias.	39
Figura 4.6 - Probabilidade de ocorrência de óleo na superfície para o CENÁRIO 6 - Período: verão; Volume: 132 m ³ /dia por 30 dias; Critério de parada: 60 dias.	40
Figura 4.7 - Máxima espessura (em mm) e balanço de massa do cenário de pior caso com início no mês de junho.	43
Figura 4.8 - Máxima espessura (em mm) e balanço de massa do cenário de pior caso com início no mês de setembro.....	44

Figura I. 1 - Importância relativa dos processos de transformação do óleo ao longo do tempo.....53

Figura I. 2 - Principais vias de degradação aeróbica e principais componentes do óleo (numerados de 1 a 25) considerados no OSCAR.....67

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características e localização do ponto simulado.....	31
Tabela 3.2 - Parâmetros e premissas utilizados na modelagem de óleo.	32
Tabela 3.3 - Cenários realizados para o ponto simulado do Bloco BM-PAMA-8. .	33
Tabela 4. 1 – Simulações determinísticas.....	42
Tabela I. 1 - Propriedades de óleo e suas equações (f é a fração evaporada (%) e a e b são fatores de regressão).....	61

1 - INTRODUÇÃO

Um adequado manejo das atividades de exploração de petróleo requer estudos detalhados sobre a previsão, comportamento e destino de manchas de óleo no mar advindas de possíveis derramamentos. Dentre as ferramentas utilizadas para essa finalidade encontram-se os modelos de dispersão e trajetória do óleo, como o OSCAR (*Oil Spill Contingency and Response*), que é um modelo tridimensional, capaz de englobar efeitos potenciais na superfície da água, ao longo da linha de costa, como também na coluna d'água. Maiores detalhes destes processos podem ser encontrados em Reed (2001), e uma descrição sumária das formulações no ANEXO I.

O presente relatório visa apresentar os resultados da modelagem de dispersão e trajetória de manchas de óleo provenientes de derramamentos acidentais no Bloco BM-PAMA-8, Bacia do Pará-Maranhão, empregando o modelo de dispersão de óleo OSCAR.

Segundo a Resolução CONAMA nº 398/08 são definidas três classes de derramamento: pequeno, com um volume de 8 m³; médio com até 200 m³ e de pior caso, decorrente da perda de controle do poço (*blowout*) por 30 dias. Sendo assim, foram conduzidas simulações probabilísticas, que visam determinar a área de influência da mancha de óleo na região de interesse, sob diferentes condições meteo-oceanográficas, considerando derramamentos instantâneos de 8 m³ e 200 m³, e contínuo de 132 m³/dia ao longo de 30 dias para o ponto de risco que representa o poço, tanto para período de verão quanto para inverno. A partir destes resultados foram realizadas simulações determinísticas a fim de prever o comportamento da mancha quando considerados períodos em que as condições meteorológicas e oceanográficas dificultassem os procedimentos de recolhimento do óleo da superfície do mar.

Primeiramente será apresentada a área de estudo e os dados de vento e correntes utilizados na modelagem, seguido por uma descrição do modelo, dos dados de entrada, assim como dos parâmetros e premissas utilizados nas simulações. Em seguida serão apresentados os resultados e discussão dos cenários probabilísticos e determinísticos e por fim uma conclusão com base no

trabalho realizado. Além disso, o Anexo I contém as informações técnicas a respeito do modelo de dispersão e transporte de óleo OSCAR.

2 - ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo e o ponto de derramamento simulado estão representados na Figura 2.1.

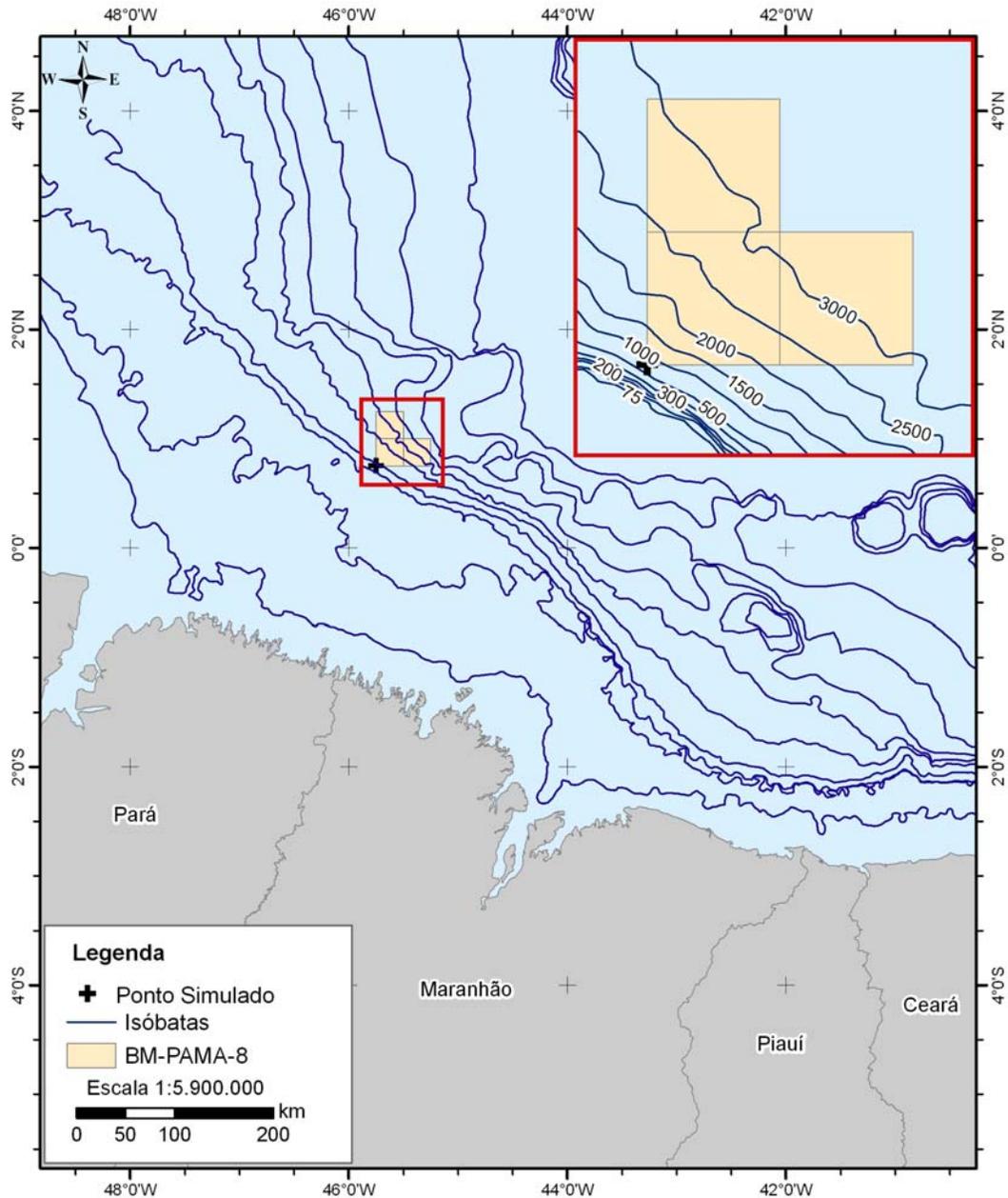


Figura 2.1 - Área de estudo.

Os dados de vento e corrente são descritos a seguir e foram selecionados com a finalidade de representar as condições meteo-oceanográficas da Bacia do Pará-Maranhão. A fim de considerar a sazonalidade das condições meteo-oceanográficas, os dados compreendidos entre dezembro e março foram considerados como inverno e os dados entre maio e agosto foram considerados verão.

2.1 - Ventos

De modo a representar as condições meteorológicas na região foram utilizados dados com variação espaço-temporal obtidos pelo sensor de microondas *SeaWinds* a bordo do satélite QuikScat para o período de 2003 a 2009. O campo de vento (intensidade e direção) próximo à superfície dos oceanos é medido diariamente com resolução espacial de 25 km. A precisão dos dados é de aproximadamente 2 m/s para a intensidade e 20° para a direção. Segundo JPL (2008), o sensor mede ventos de até 50 m/s, no entanto acima de 20 m/s a precisão é reduzida.

A série temporal dos dados de vento do satélite QuikScat para o ponto de derramamento simulado (00°45'N e 45°45'W) é apresentada na Figura 2.2 e o campo de vento importado no modelo OSCAR para um instante específico do mês de fevereiro de 2009 é mostrado na Figura 2.3.

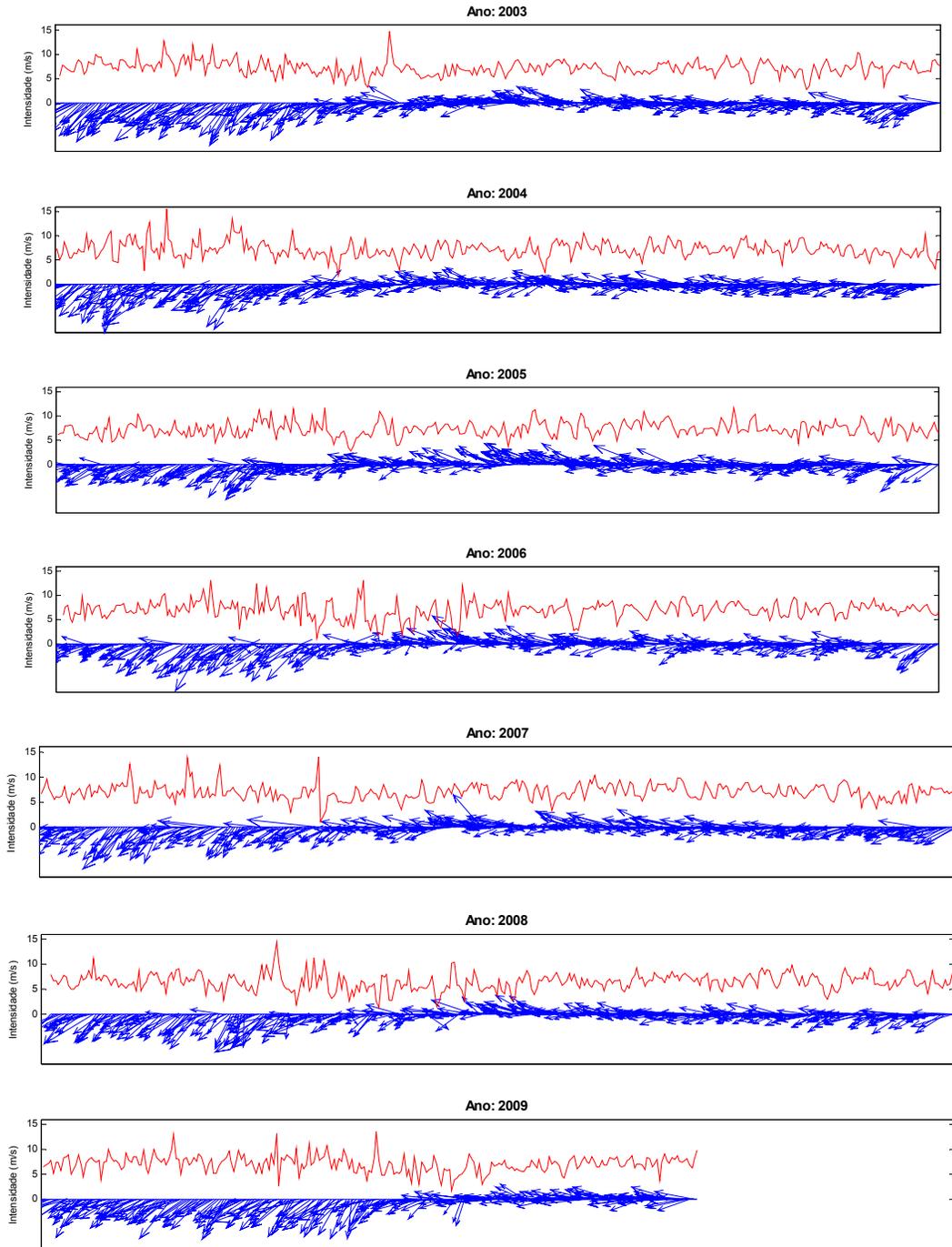


Figura 2.2 - Série temporal diária dos dados de vento do satélite QuikScat para o ponto de derramamento. As setas azuis indicam a direção do vento (em relação ao norte verdadeiro) e a linha vermelha representa a intensidade do vento.

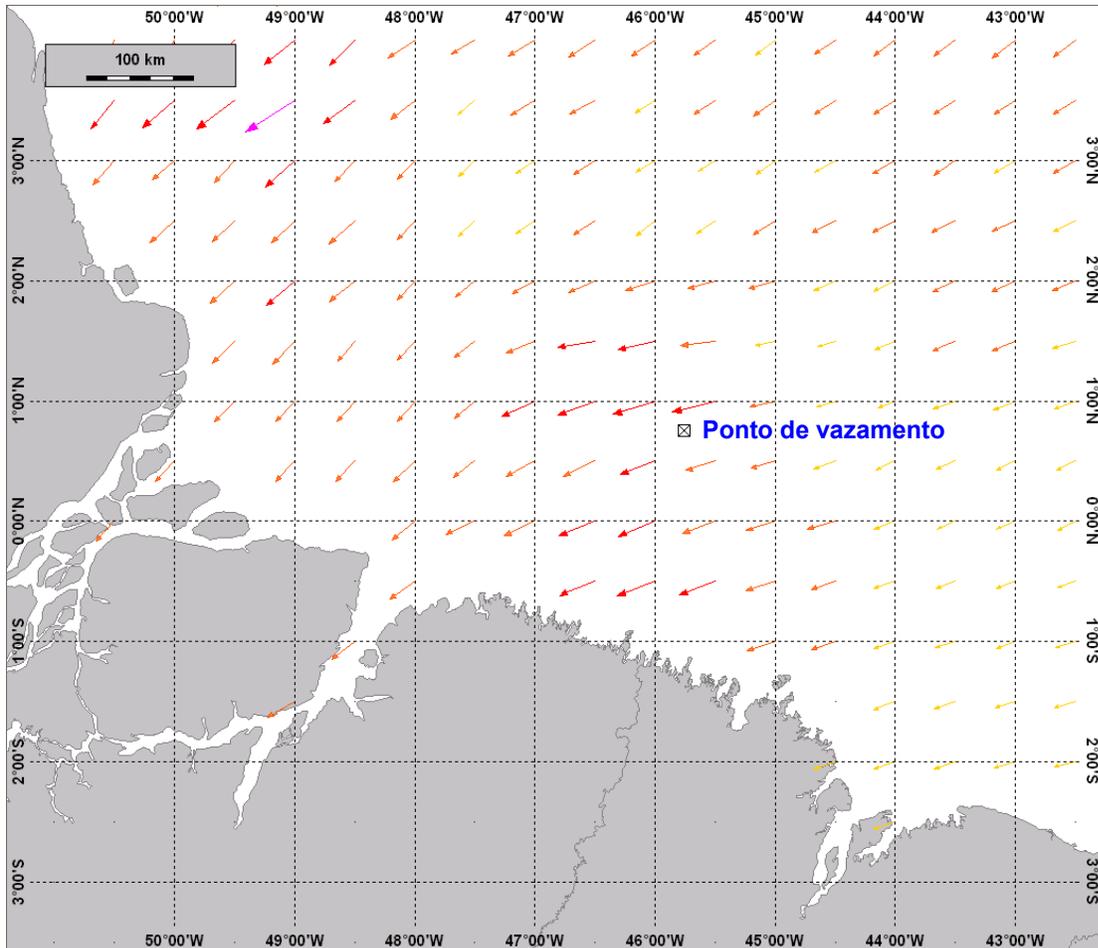


Figura 2.3 - Exemplo de campo de vento do QuikScat num determinado instante adotado nas simulações com o modelo OSCAR.

A Figura 2.4 apresenta os histogramas direcionais dos dados de vento para o ponto de derramamento separados para o período de inverno (dezembro a março) e verão (maio a agosto) dos anos de 2003 a 2009, onde estão representadas a intensidade, a direção e o percentual de ocorrência de ventos por 16 classes de direções e 6 classes de intensidade.

Visando apresentar uma análise estatística dos dados, nas Figuras 2.5 e 2.6 são mostrados os histogramas de intensidade e direção para os dados do QuikScat tanto para o inverno como para o verão.

Observa-se o predomínio de ventos soprando entre E e NE no inverno e entre ESE e ENE no verão. Em período de verão nota-se uma maior incidência de ventos de E, com 63,88% de freqüência. Já em período de inverno, os ventos predominantes são de ENE (44,45% de freqüência), entretanto, observa-se uma

maior distribuição dos ventos em outras direções se comparadas com o verão. As intensidades mais comuns estão entre 6 e 9 m/s, tanto para o período de verão quanto para o inverno. Ventos mais intensos que 12 m/s são raros e apresentam apenas 1.07% de frequência no inverno e 0.32% no verão.

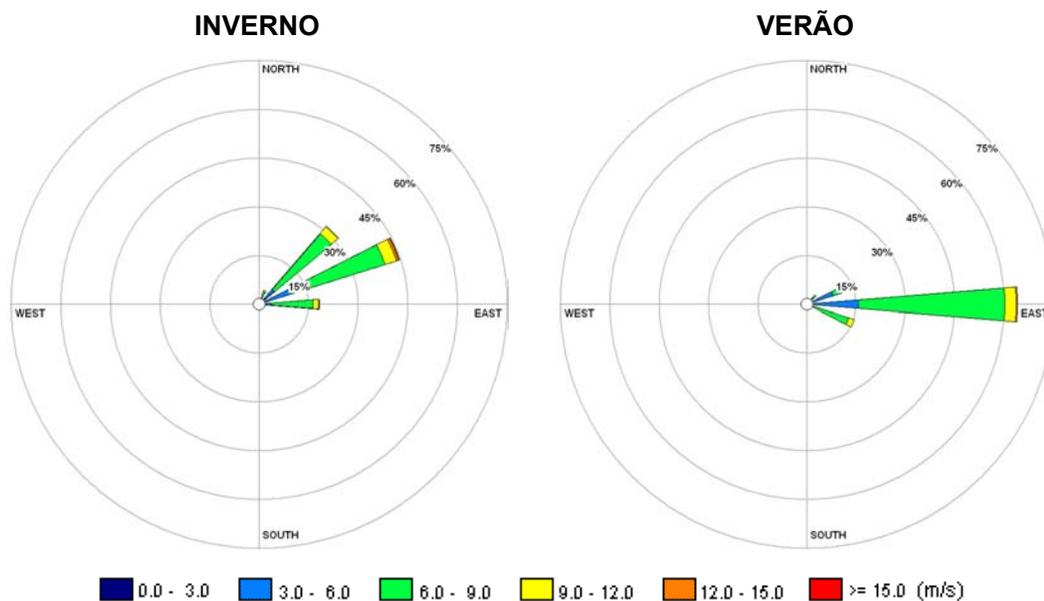


Figura 2.4 - Histograma direcional dos dados de vento do QuikScat no período de inverno e verão para o ponto de derramamento.

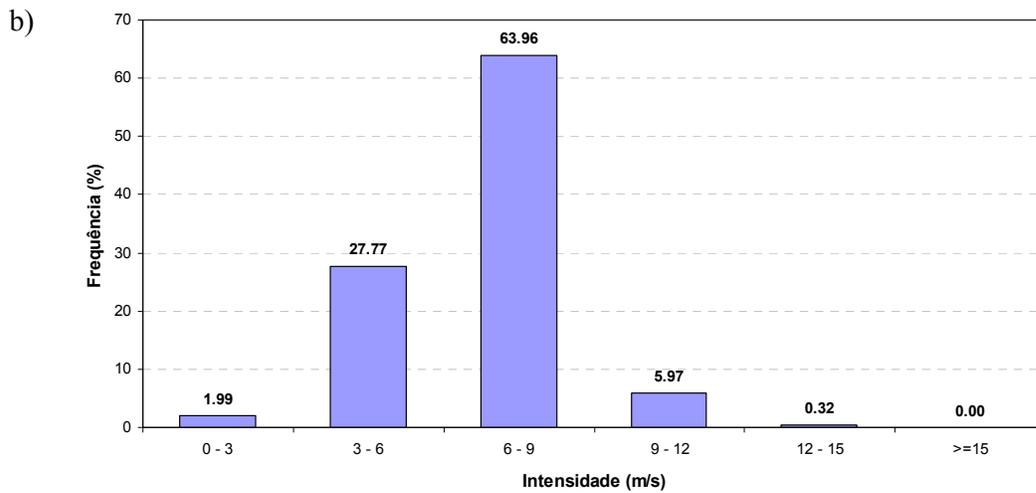
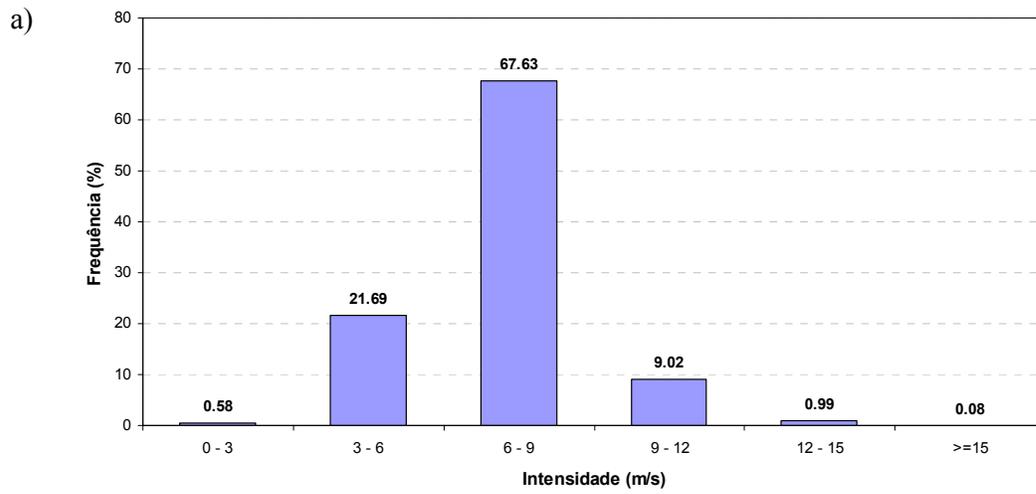


Figura 2.5 - Histograma de intensidades dos dados de vento do QuikScat durante o período de inverno (a) e verão (b) para o ponto de derramamento.

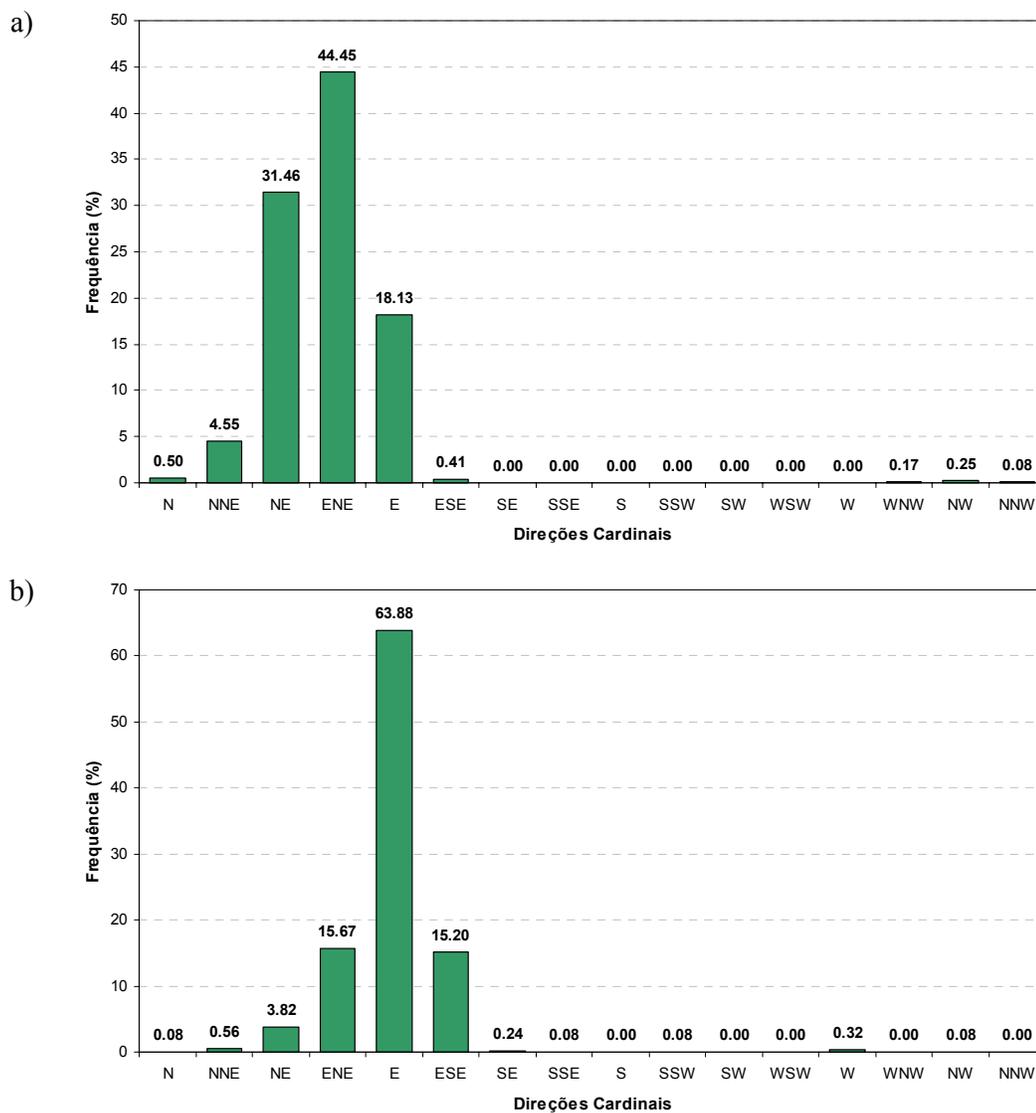


Figura 2.6 - Histograma de direções cardinais dos dados de vento do QuikScat durante o período de inverno (a) e verão (b) para o ponto de derramamento.

2.2 - Regime de Correntes

A circulação na área de estudo foi obtida através dos resultados de uma simulação hidrodinâmica global de alta resolução realizada com o modelo HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*), disponibilizada pelo HYCOM Consortium. O HYCOM é um modelo geral de circulação oceânica de equações primitivas que utiliza coordenadas híbridas¹ na vertical. Ele é largamente utilizado na comunidade científica, sendo alguns de seus resultados apresentados por Chassignet *et al.* (2003), Kelly *et al.* (2007), Chassignet *et al.* (2009) e Srinivasan *et al.* (2009).

O modelo possui um domínio que abrange longitudinalmente todo o globo, e latitudinalmente entre 79°S e 90°N. À este domínio corresponde uma grade horizontal combinada de Mercator, entre as latitudes de 79°S e 47°N, e bipolar mais ao norte (Figura 2.7). Dessa forma evita-se uma singularidade no pólo norte.

A resolução espacial horizontal é de 1/12°, correspondendo a um espaçamento entre pontos de grade de, aproximadamente, 6,5 km em média. Verticalmente o HYCOM dispõe de 32 camadas híbridas. A batimetria foi obtida a partir da base de dados DBDB2 (*Digital Bathymetry Data Base*) do NRL (*Naval Research Laboratory*), que possui 2 minutos de resolução espacial.

No HYCOM os únicos contornos abertos são os de 986 rios que tiveram suas vazões médias mensais prescritas, assim como seus respectivos fluxos de sal.

O modelo teve um período de aquecimento, na qual foi inicializado com dados climatológicos de temperatura e salinidade do mês de janeiro do GDEM3 (*Generalized Digital Environment Model version 3.0*) e integrado por 13 anos com climatologias diárias de vento e médias mensais de temperatura derivadas de Reanálises do ECMWF (*European Center for Medium-Range Weather Forecasts*). O passo de tempo utilizado no modo interno (velocidades baroclínicas e traçadores) é de 240 segundos e no modo externo (velocidades barotrópicas) é de 7,5 segundos.

Depois da fase de aquecimento o modelo foi rodado por cerca de 6 anos, de novembro de 2003 a setembro de 2009, forçado superficialmente a cada 3 horas

¹ São utilizadas coordenadas z na camada de mistura, coordenadas isopícnais no oceano aberto e estratificado, e coordenadas sigma em regiões costeiras (Bleck *et al.*, 2002).

por ventos, fluxos de calor e precipitação, calculados a partir de dados do NOGAPS (*Navy Operational Global Atmospheric Prediction System*).

O modelo utiliza um sistema de assimilação de dados (NCODA – *Navy Coupled Ocean Data Assimilation*) onde dados disponíveis de altimetria e temperatura da superfície do mar obtidos por satélite, além de perfis de temperatura e salinidade ao longo da coluna d'água obtidos a partir de XBT's, bóias oceanográficas e flutuadores ARGO (Figura 2.8) são interpolados bidimensionalmente através de um esquema de interpolação ótima multi-variável (Cummings, 2005), e, posteriormente, as feições em superfície são projetadas para dentro da coluna d'água através do MODAS - *Modular Ocean Data Assimilation System* (Fox *et al.*, 2002).

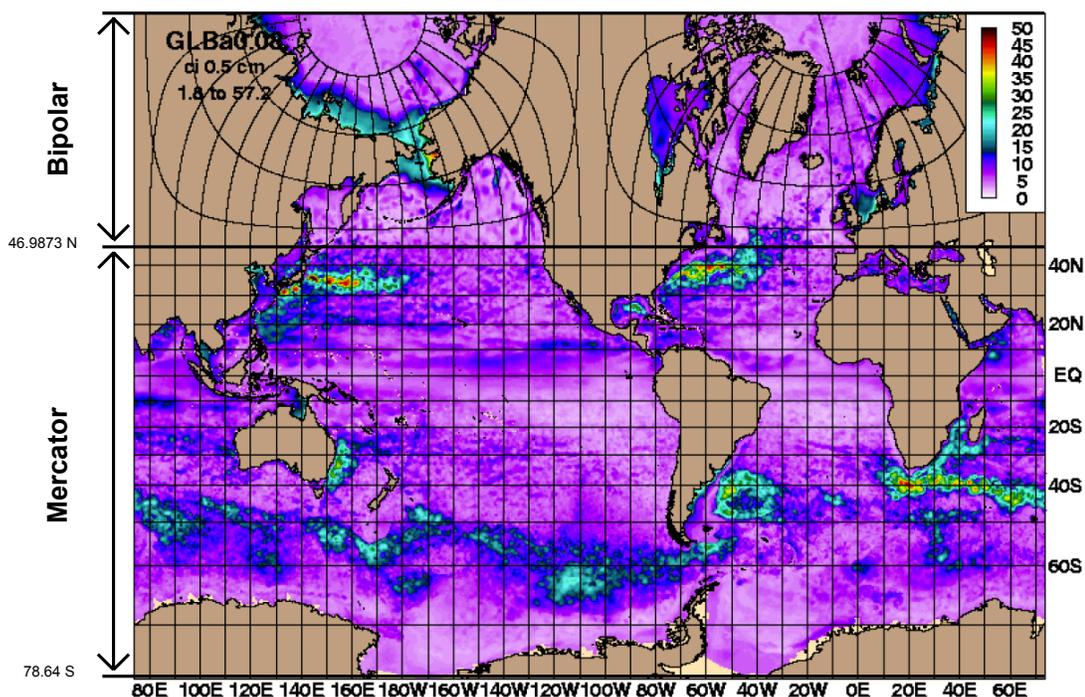


Figura 2.7 – Domínio do modelo HYCOM com uma grade de Mercator e outra bipolar. Estão plotados também dados de desvio padrão da elevação da superfície do mar (Fonte: Chassignet, 2008).

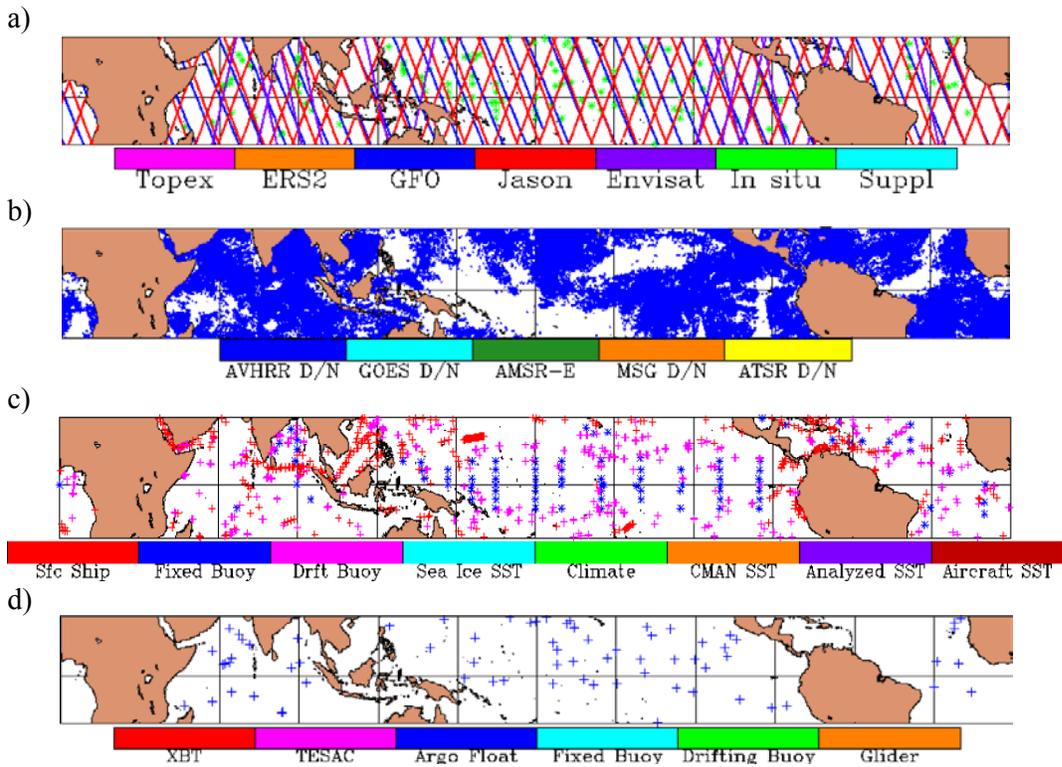


Figura 2.8 – Exemplo com a localização de dados de altimetria (a), temperatura da superfície do mar obtida por satélite (b), temperatura da superfície do mar obtida por medições in situ (c) e observações em perfis ao longo da coluna d’água (d) assimilados no HYCOM na região equatorial no dia 19 de janeiro de 2008 (Fonte: Smedstad et al., 2008).

Na figura 2.9 é apresentado, como exemplo de resultado do modelo, dados de temperatura da superfície do mar num determinado instante para a região do Atlântico Equatorial.

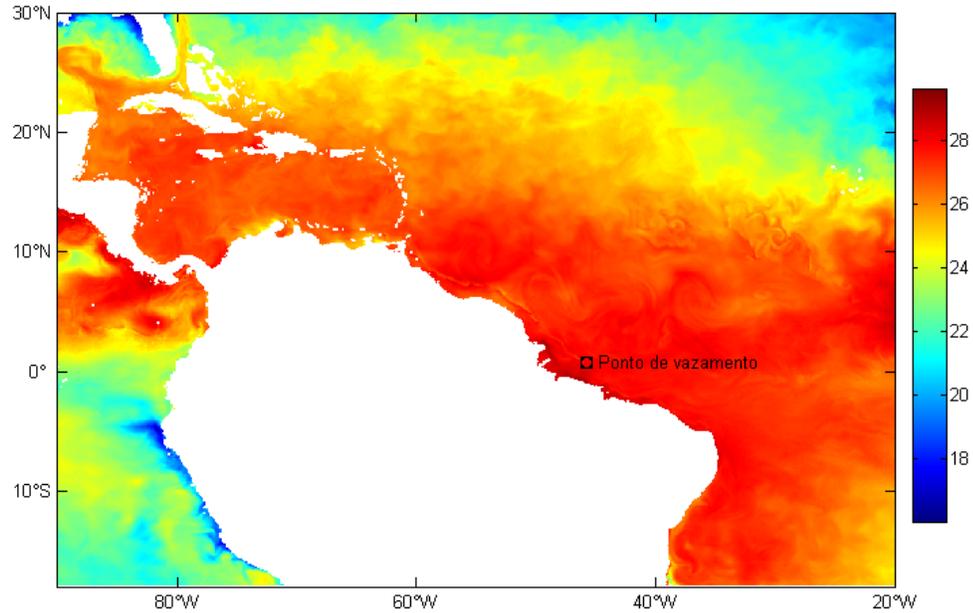


Figura 2.9 – Exemplo do campo de temperatura da superfície do mar do HYCOM num determinado instante.

Os resultados diários globais da simulação numérica do HYCOM com assimilação de dados são disponibilizados pelo HYCOM Consortium. As variáveis tridimensionais foram interpoladas verticalmente para os mesmos níveis verticais utilizados na base de dados do *World Ocean Atlas* (também conhecido como base de dados Levitus), ou seja, 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1750, 2000, 2500, 3000, 4000, 4500, 5000 e 5500 metros (Locarnini et al., 2006). Estes dados da simulação hidrodinâmica, compreendendo o período entre 03/11/2003 e 30/09/2009, foram baixados através da internet e importados no modelo de dispersão de óleo OSCAR.

A série temporal dos dados de corrente simulados pelo HYCOM para o ponto de derramamento simulado (00°45'N e 45°45'W) é apresentada na Figura 2.10 e o campo de correntes importado no modelo OSCAR para um instante específico do mês de janeiro de 2004 é mostrado na Figura 2.11.

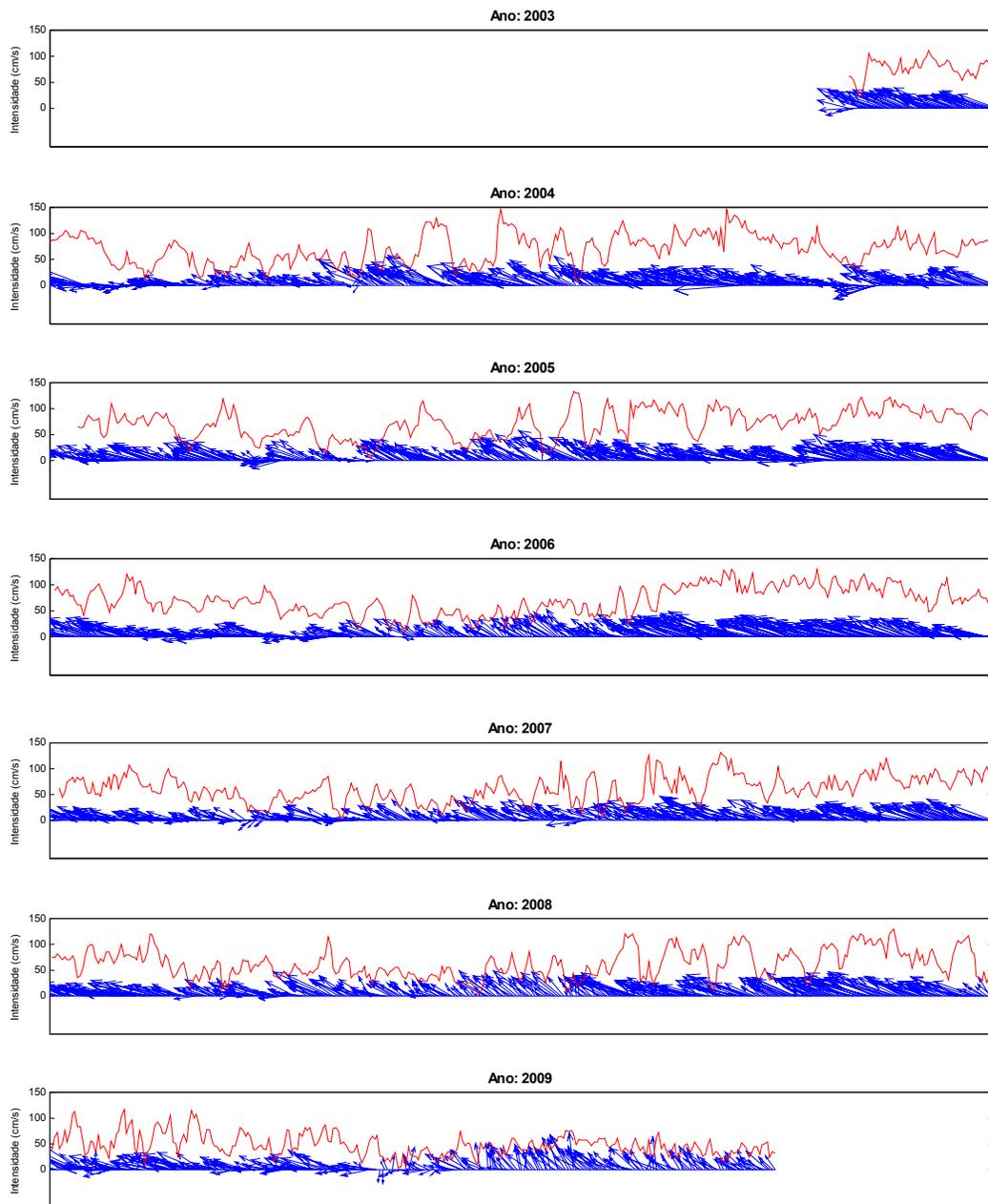


Figura 2.10 - Série temporal diária dos dados de corrente superficial simulados pelo modelo hidrodinâmico HYCOM para o ponto de derramamento. As setas azuis indicam a direção da corrente (em relação ao norte verdadeiro) e a linha vermelha representa a intensidade da corrente.

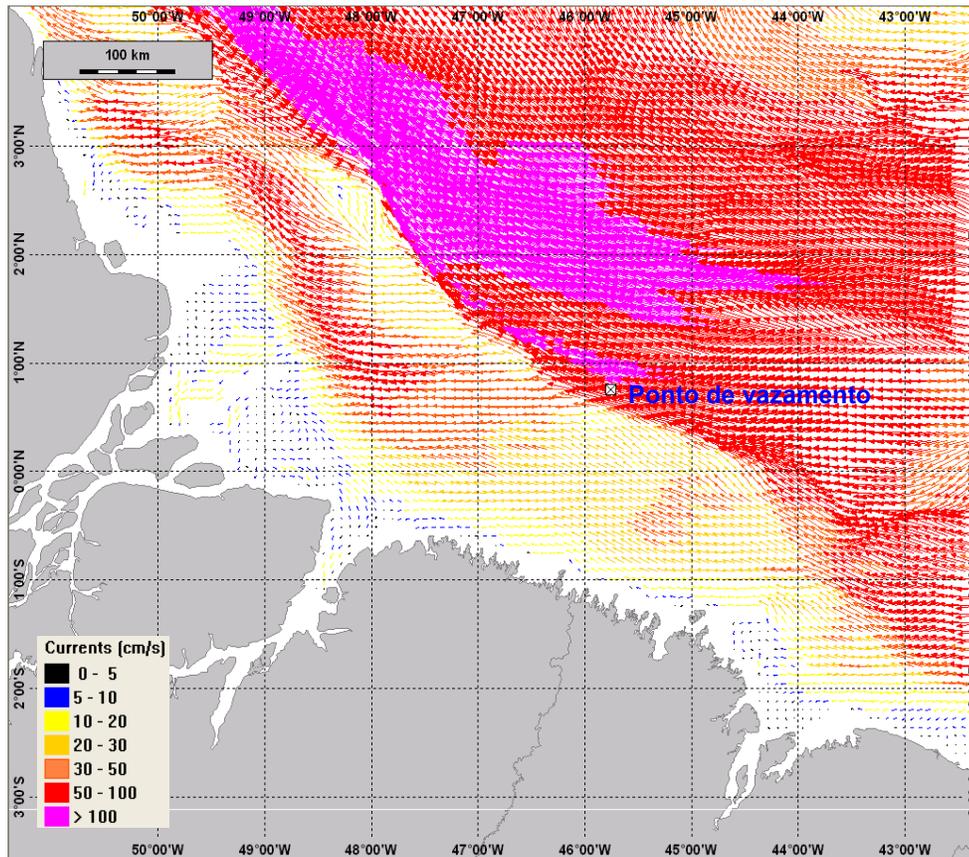


Figura 2.11 - Exemplo de campo de correntes do HYCOM num determinado instante adotado nas simulações com o modelo OSCAR.

Para uma análise mais detalhada do padrão das correntes na região de interesse a Figura 2.12 apresenta o histograma direcional dos dados de corrente para o ponto de derramamento tanto para o período de verão como para o de inverno dos anos de 2003 a 2009, onde estão representadas a intensidade, a direção e o percentual de ocorrência de correntes por 16 classes de direção e 6 classes de intensidade. Nas Figuras 2.13 e 2.14 são mostrados os histogramas de intensidade e direção para os dados do HYCOM.

Observa-se o predomínio de correntes superficiais fluindo para WNW, tanto no inverno quanto no verão, porém, no período de verão é verificada uma maior contribuição de correntes fluindo para as outras direções. Durante o verão as correntes apresentam, de forma geral, intensidades menores que no inverno. As intensidades mais comuns estão entre 25 e 50 cm/s, com freqüências de 38,54% no verão e entre 50 e 75 cm/s, com freqüências de 37,26% no inverno. Correntes

com intensidades acima de 125 cm/s são raras e ocorrem apenas no verão, apresentando 0,81% de frequência.

Estes resultados demonstram que a circulação na área de interesse é controlada principalmente pela Corrente Norte do Brasil.

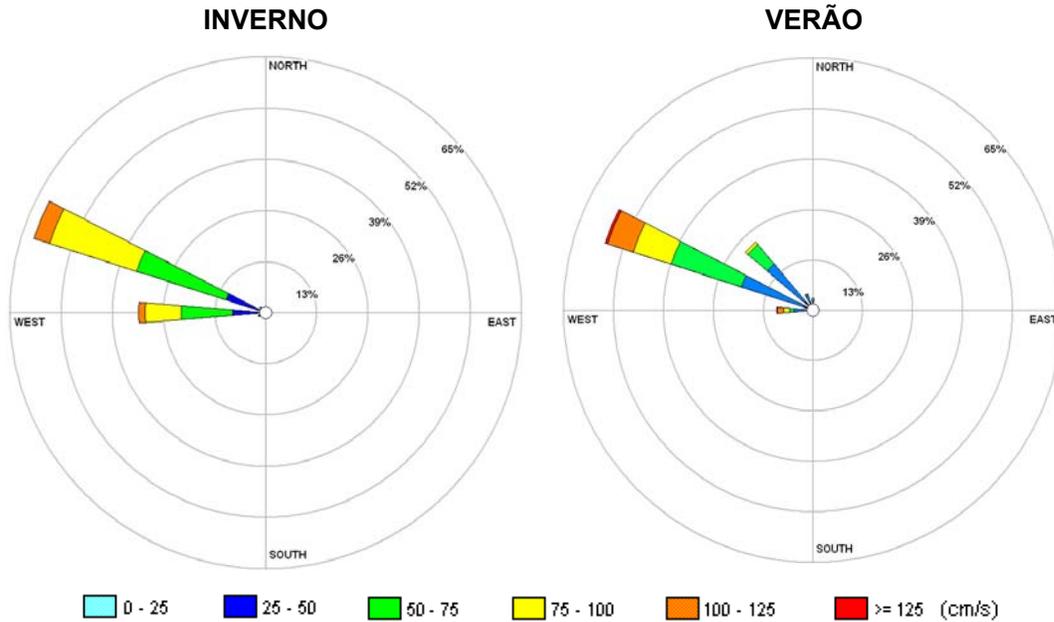


Figura 2.12 - Histograma direcional dos dados de corrente superficiais do HYCOM no período de inverno e verão para o ponto de derramamento.

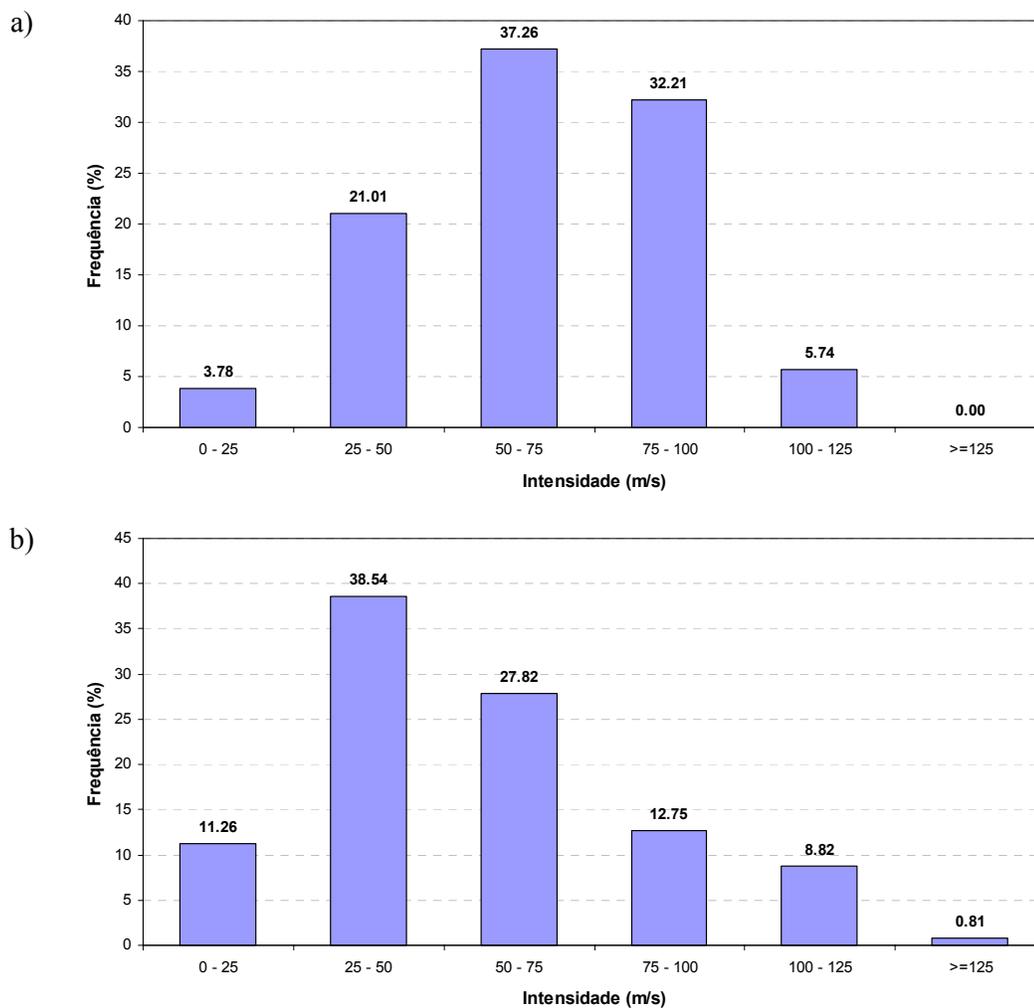


Figura 2.13 - Histograma de intensidades dos dados de corrente superficiais do HYCOM durante o período de inverno (a) e verão (b) para o ponto de derramamento.

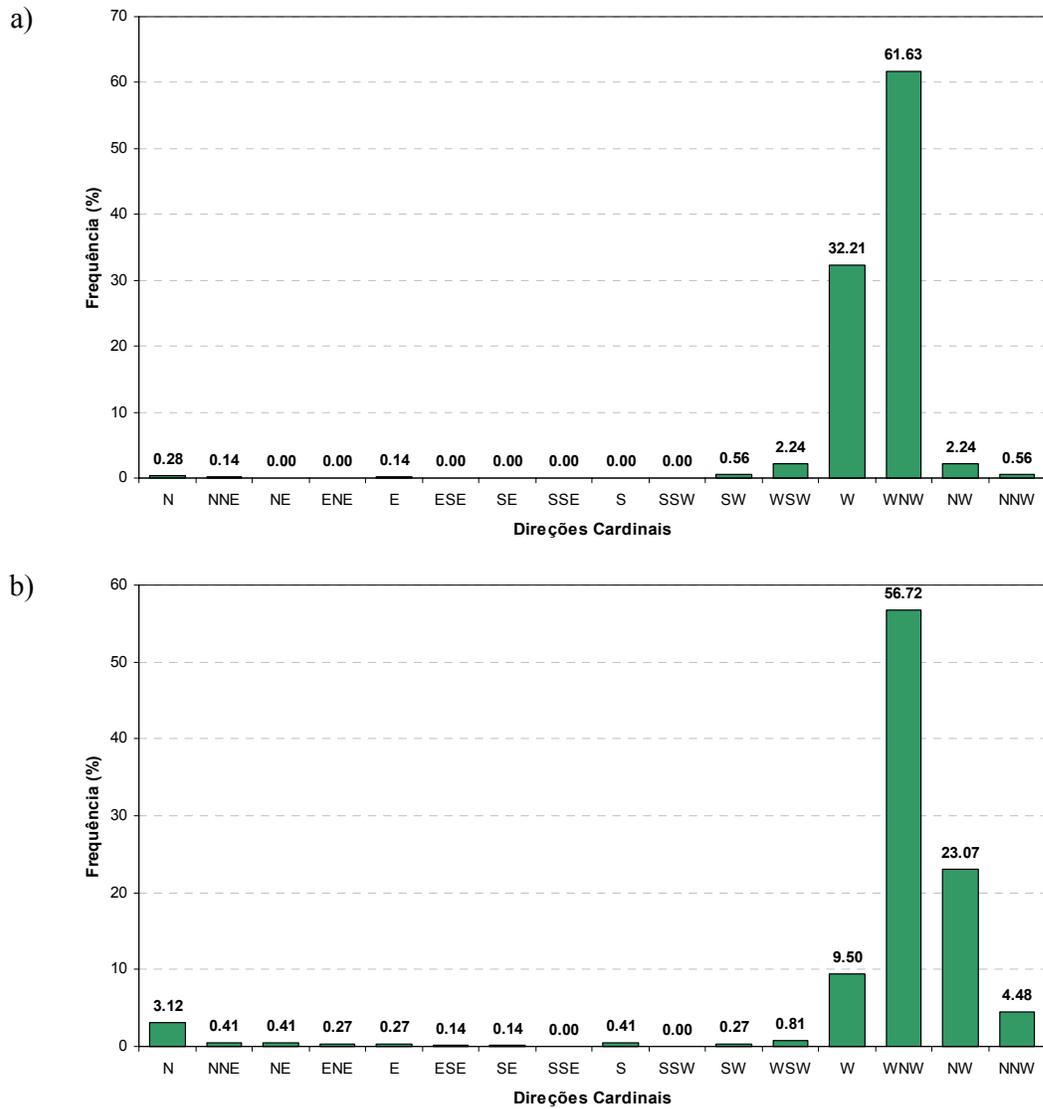


Figura 2.14 - Histograma de direções cardinais dos dados de corrente superficiais do HYCOM durante o período de inverno (a) e verão (b) para o ponto de derramamento.

3 - MODELO DE DISPERSÃO DE ÓLEO (OSCAR) E DADOS DE ENTRADA

O modelo de dispersão de óleo empregado neste estudo foi o OSCAR (*Oil Spill Contingency and Response*), desenvolvido pela SINTEF² com a finalidade de dar suporte a planos de contingência de óleo e respaldo a tomada de decisões (Daling & Strom, 1999; Reed *et al.*, 1996).

São componentes-chaves do sistema: um modelo de intemperismo de óleo da SINTEF (Aamo *et al.*, 1993; Daling *et al.*, 1990), um modelo tridimensional de destino químico e trajetória do óleo (Reed *et al.*, 1995a).

Com a finalidade de representar bem o óleo e seus produtos de degradação, o OSCAR combina um grande número de componentes individuais do óleo, pseudocomponentes e metabólitos. Este tipo de abordagem permite que as taxas dos processos de intemperismo sejam calculadas para cada componente, já que, por exemplo, diferentes componentes apresentarão taxas de evaporação ou degradação diferenciadas.

Com relação às previsões de intemperismo empregadas no OSCAR, diversos testes em campo foram realizados para verificar sua confiabilidade, evitando-se resultados irreais (Daling & Brandvik, 2001).

O OSCAR já foi aplicado na análise de estratégias de resposta tanto para plataformas de petróleo *offshore* (Aamo *et al.*, 1995; Reed *et al.*, 1995b) quanto para terminais costeiros (Reed *et al.*, 1996). O modelo utiliza partículas lagrangeanas e “pseudo-lagrangeanas” para determinar o transporte, o comportamento e os efeitos dos poluentes através de cálculos de sua distribuição temporal na superfície da água, na coluna d’água, nos sedimentos e ao longo da costa.

Os processos que governam o comportamento dos poluentes no OSCAR são apresentados na Figura 3.1. Nota-se que os processos de intemperismo estão muito inter-relacionados, onde a saída de um processo de algoritmo influencia o comportamento dos outros.

² Endereço eletrônico: <http://www.sintef.no>

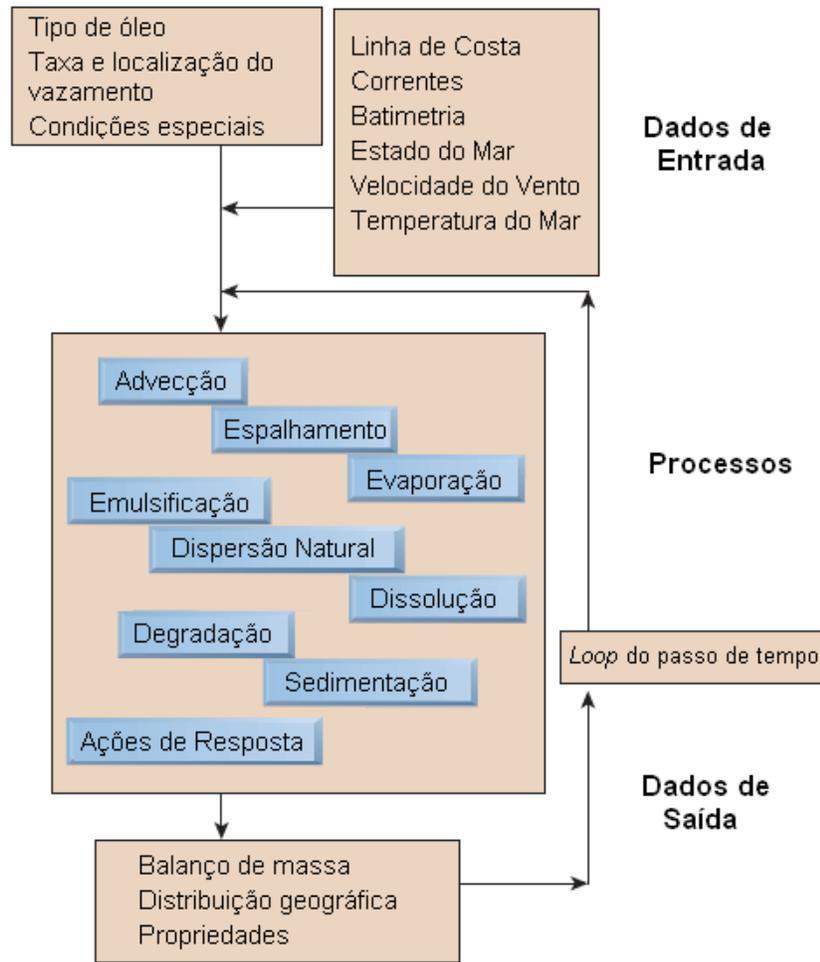


Figura 3.1 - Esquema geral do modelo de dispersão de óleo OSCAR.

Sendo assim, o OSCAR emprega algoritmos de espalhamento superficial, advecção, entranhamento, emulsificação e evaporação para determinar o transporte e destino dos compostos. Os contaminantes no fundo são misturados no sedimento, e podem voltar à fase dissolvida na coluna d'água, enquanto que os próximos à superfície podem evaporar para a atmosfera. Na coluna d'água os poluentes sofrem uma turbulência horizontal, relacionada à idade das partículas, e uma turbulência vertical, que é função da profundidade local e da velocidade dos ventos. Além disto, o particionamento entre o dissolvido e adsorvido ao material particulado é calculado com base na teoria de equilíbrio linear. Já a degradação na água e nos sedimentos é representada como um processo de decaimento de primeira ordem. Os algoritmos utilizados para simular os processos que controlam os destinos físicos das substâncias estão descritos no Anexo I deste relatório.

Para o óleo proveniente de derramamentos, processos como advecção, espalhamento, entranhamento e mistura vertical na coluna d'água não são diretamente dependentes da composição do óleo, embora exista uma tendência a estarem relacionados à macro-características como viscosidade e densidade. Outros processos como evaporação, dissolução e degradação são diretamente dependentes da composição do óleo.

A seguir, serão detalhados os itens que caracterizam o ambiente físico necessário para a simulação da dispersão e trajetória do óleo no OSCAR (linha de costa, batimetria, grade do modelo, ventos, correntes e ondas) além dos parâmetros utilizados nas simulações.

3.1 - Linha de costa, batimetria e grade do modelo

A linha de costa foi determinada a partir de bases cartográficas do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística)³. Estas bases são compatíveis com a escala de 1:2.500.000, e foram geradas a partir do arquivo-fonte na escala original 1:250.000.

A batimetria presente na base de dados do modelo de dispersão OSCAR está baseada na combinação de dados de altimetria por satélite e levantamento de navios. Essa base é distribuída em pontos de grade regular com uma resolução aproximada de 10 km (Smith & Sandwell, 1994, 1997; http://topex.ucsd.edu/marine_topo/mar_topo.html).

Uma grade regular onde se pode caracterizar o tipo de costa e a profundidade local é utilizada pelo OSCAR para os cálculos de transporte e dispersão do óleo.

O tipo de costa refletirá a inclinação e permeabilidade desta, e em alguns casos, exposição ao vento e ondas. Então, uma praia de cascalhos pode reter mais óleo leve por unidade de comprimento do que uma praia arenosa devido à penetração do óleo no substrato, e as taxas de remoção na praia de cascalhos são mais baixas, pois a meia-vida do óleo nos sedimentos é mais longa (ANEXO I).

³ Malha Municipal Digital do Brasil - 2001

As Figuras 3.2 e 3.3 mostram a batimetria da área de estudo e a grade de habitats detalhando os tipos de costa que foram definidas na grade. Os tipos de células representadas conferem a cada segmento capacidades de retenção ou remoção de óleo diferenciadas.

A grade utilizada nas simulações é uma grade de 600 X 500 células, sendo que cada célula tem aproximadamente 3,9 km de largura e altura.

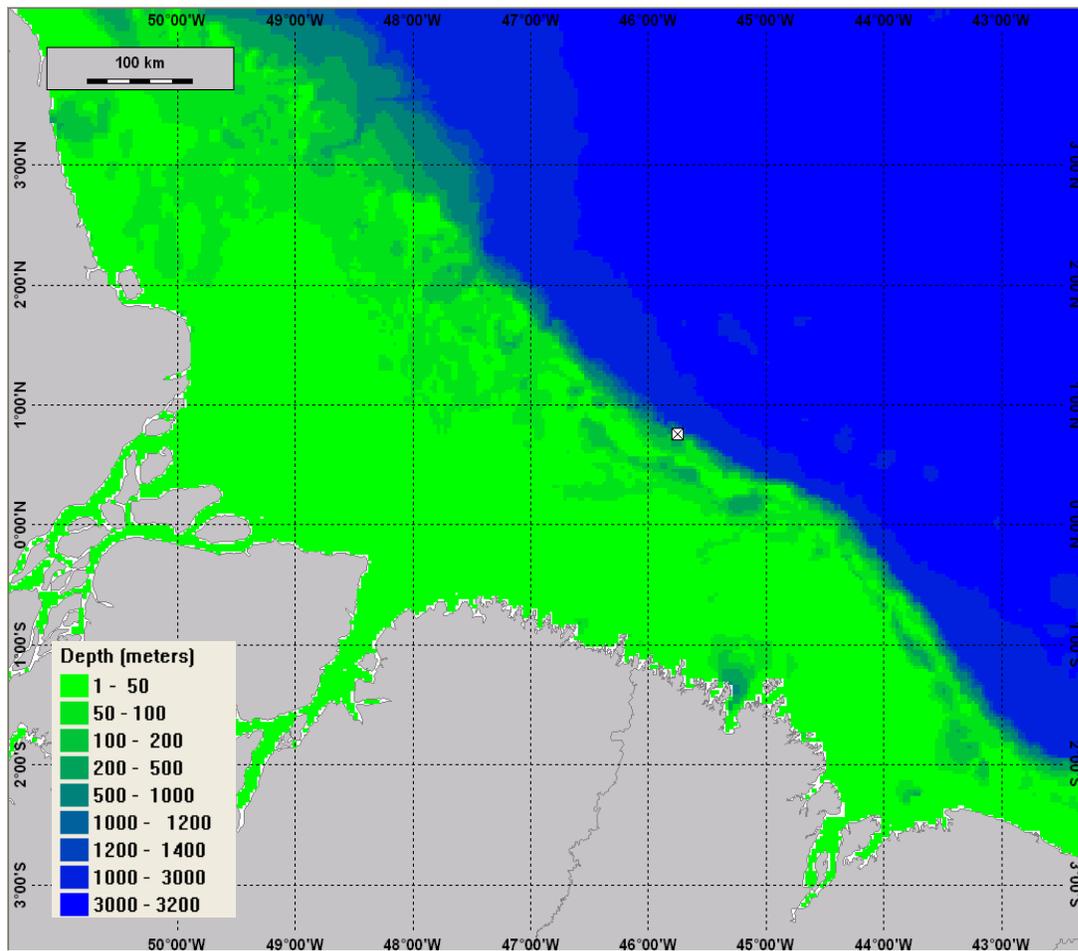


Figura 3. 2 - Batimetria da área de estudo.

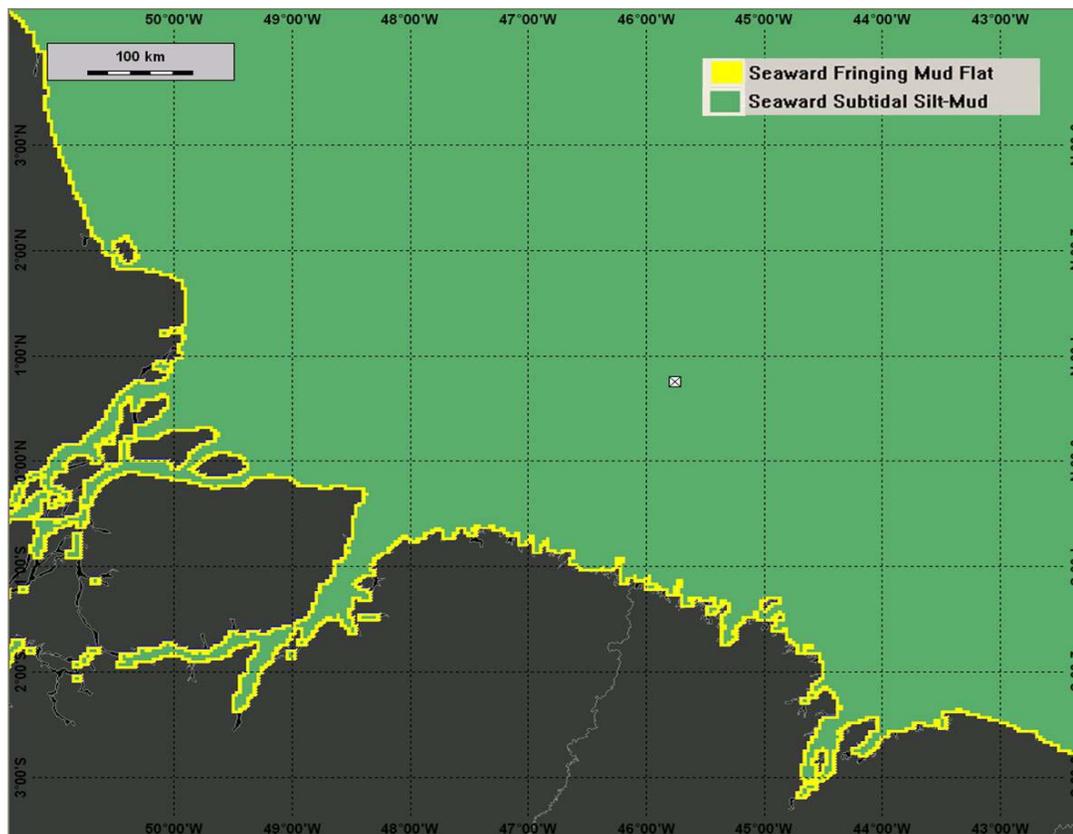


Figura 3. 3 - Grade de habitats da área de estudo.

3.2 - Ventos, correntes e ondas

São utilizados como dados de entrada no OSCAR, ventos medidos a 10 m acima da superfície do mar. Caso a série de ventos seja definida para um único ponto, o modelo assume um campo de ventos espacialmente uniforme. Também é possível forçar o modelo com diferentes séries de vento, espaçadas arbitrariamente. Neste caso, um vetor de vento linearmente interpolado é aplicado.

Com relação às correntes, o OSCAR considera campos de corrente bidimensionais, que podem ser estacionários ou não, e tridimensionais, que devem variar no tempo e são obtidos através de modelos hidrodinâmicos.

Altura e período de onda são computados internamente pelo modelo em função da velocidade do vento, pista, profundidade da coluna d'água e aceleração gravitacional. No Anexo I tem-se a descrição dos algoritmos utilizados.

Para as simulações realizadas para o Bloco BM-PAMA-8, foram utilizados campos de corrente tridimensionais, variando no tempo, que são resultados de uma simulação hidrodinâmica global de alta resolução realizada com o modelo HYCOM. No caso dos ventos, foram utilizados dados com variação espaço temporal obtidos pelo sensor SeaWinds a bordo do satélite QuikScat. Ambos os parâmetros foram considerados para o período entre 2003 e 2009 conforme descrito nos itens 2.1 e 2.2.

3.3 - Parâmetros da simulação

A Tabela 3.1 apresenta as características e localização do ponto de derramamento simulado.

Tabela 3.1 - Características e localização do ponto simulado.

Bacia	Pará-Maranhão
Bloco	BM-PAMA-8
Volume de pior caso	132 m ³ /dia
Ponto de derramamento	00°45'00" N e 45°45'00" W
Projeção	Geográfica (Lat/Lon) / Datum SAD-69

O volume de pior caso foi estimado a partir da correlação com o poço 1-PAS-11, uma vez que a expectativa é de que as locações do bloco BM-PAMA-8 tenham o mesmo processo de formação e migração de hidrocarbonetos que este poço. Durante a fase de perfuração do poço 1-PAS-11, o intervalo 4273 a 4303 metros foi testado, observando-se vazão de óleo de 132 m³/dia com RGO (razão gás-óleo) igual a 857 m³/m³.

Detalhes sobre os parâmetros e premissas utilizados na modelagem são apresentados na Tabela 3.2.

A fim de que seja representada toda a variabilidade das condições meteo-oceanográficas presentes na região, para cada cenário são realizadas 100 simulações⁴ para o cálculo da grade de probabilidade, compreendidas no período entre dezembro e março (cenários de inverno) e maio e agosto (cenários de verão) entre os anos de 2003 e 2009.

⁴ Para a definição número de simulações necessário para representar as variabilidades das condições meteo-oceanográficas foram realizados diversos testes com diferentes cenários, e 100 foi um número considerado satisfatório para esta representação na região de estudo.

Tabela 3.2 - Parâmetros e premissas utilizados na modelagem de óleo.

Parâmetro	Descrição	Valor utilizado
Período da simulação	Períodos das forçantes meteo-oceanográficas considerados nas simulações probabilísticas	03/11/2003 a 30/09/2009
Temperatura superficial da água do mar	Temperatura superficial média da água do mar a partir do World Ocean Atlas 2005	27,57 – verão 27,27 - inverno
Salinidade superficial da água do mar	Salinidade superficial média da água do mar a partir do World Ocean Atlas 2005	35,49 – verão 35,53 - inverno
Oxigênio	Valor médio de oxigênio na água do mar a partir do World Ocean Atlas 2005	4,66 – verão 4,68 - inverno
Passo de tempo	Intervalo de tempo no qual o modelo executará os cálculos da posição e intemperismo dos componentes do óleo.	30 min
Número de partículas	Quantidade de partículas utilizada para representar o vazamento	1000
Arrasto do vento sobre a superfície	Percentual da velocidade do vento a ser adicionado à deriva superficial	3,5 %

As características do óleo fornecidas pela PETROBRAS são as seguintes: Óleo tipo ESS-123 Golfinho com grau API 30, densidade a 20/24°C de 0,8168 g/cm³ e viscosidade dinâmica a 25°C de 4,758 Cp. Para a realização das simulações utilizou-se um óleo do banco de dados do OSCAR com características mais próximas possíveis das fornecidas. Neste caso, o óleo utilizado apresentava uma densidade 0,8200 g/cm³.

Os volumes utilizados nas simulações para o ponto de risco de *blowout*, que representa o poço localizado no Bloco BM-PAMA-8, Bacia do Pará-Maranhão, definidos de acordo com a Resolução CONAMA nº 398/08 são:

- Pequeno: 8 m³;
- Médio: 200 m³;
- Pior caso: 132 m³/dia.

Na Tabela 3.3 são listados os cenários realizados e os seus respectivos critérios de parada. De acordo com a Nota Técnica nº 02/2009/CGPEG/DILIC o critério de parada da simulação é de 30 dias após o término do vazamento.

Tabela 3.3 - Cenários realizados para o ponto simulado do Bloco BM-PAMA-8.

Cenário	Período	Volume	Duração	Critério de Parada
1	Inverno	8 m ³	Instantâneo	30 dias
2	Verão	8 m ³	Instantâneo	30 dias
3	Inverno	200 m ³	Instantâneo	30 dias
4	Verão	200 m ³	Instantâneo	30 dias
5	Inverno	132 m ³ /d	Contínuo por 30 dias	60 dias
6	Verão	132 m ³ /d	Contínuo por 30 dias	60 dias

4 - RESULTADOS

Neste item serão apresentados dois diferentes tipos de resultados: probabilísticos e determinísticos. Nas simulações probabilísticas são apresentados os contornos de probabilidade de ocorrência de mancha ao considerar um grande número de simulações distribuídas em diferentes momentos iniciais ao longo de uma série de ventos e correntes, esperando-se assim, representar as possíveis variações das condições meteo-oceanográficas da região. Já em uma simulação determinística, representa-se a trajetória percorrida por uma mancha de óleo em um período específico.

4.1 - Simulações probabilísticas

As simulações probabilísticas aqui apresentadas representam os contornos de probabilidade de ocorrência de óleo ao considerar 100 simulações distribuídas ao longo dos anos de 2003 a 2009, considerando os meses de dezembro a março como inverno, e maio a agosto como verão.

As Figuras 4.1 a 4.6 apresentam os resultados das simulações probabilísticas para o ponto de risco do Bloco BM-PAMA-8, conforme os cenários listados na Tabela 3.3.

Nas legendas destas figuras, o limite inferior é aberto e o limite superior é fechado, o que significa que, por exemplo, na classe de probabilidade de 90-100% estarão representados valores maiores que 90% e menores ou iguais a 100%.

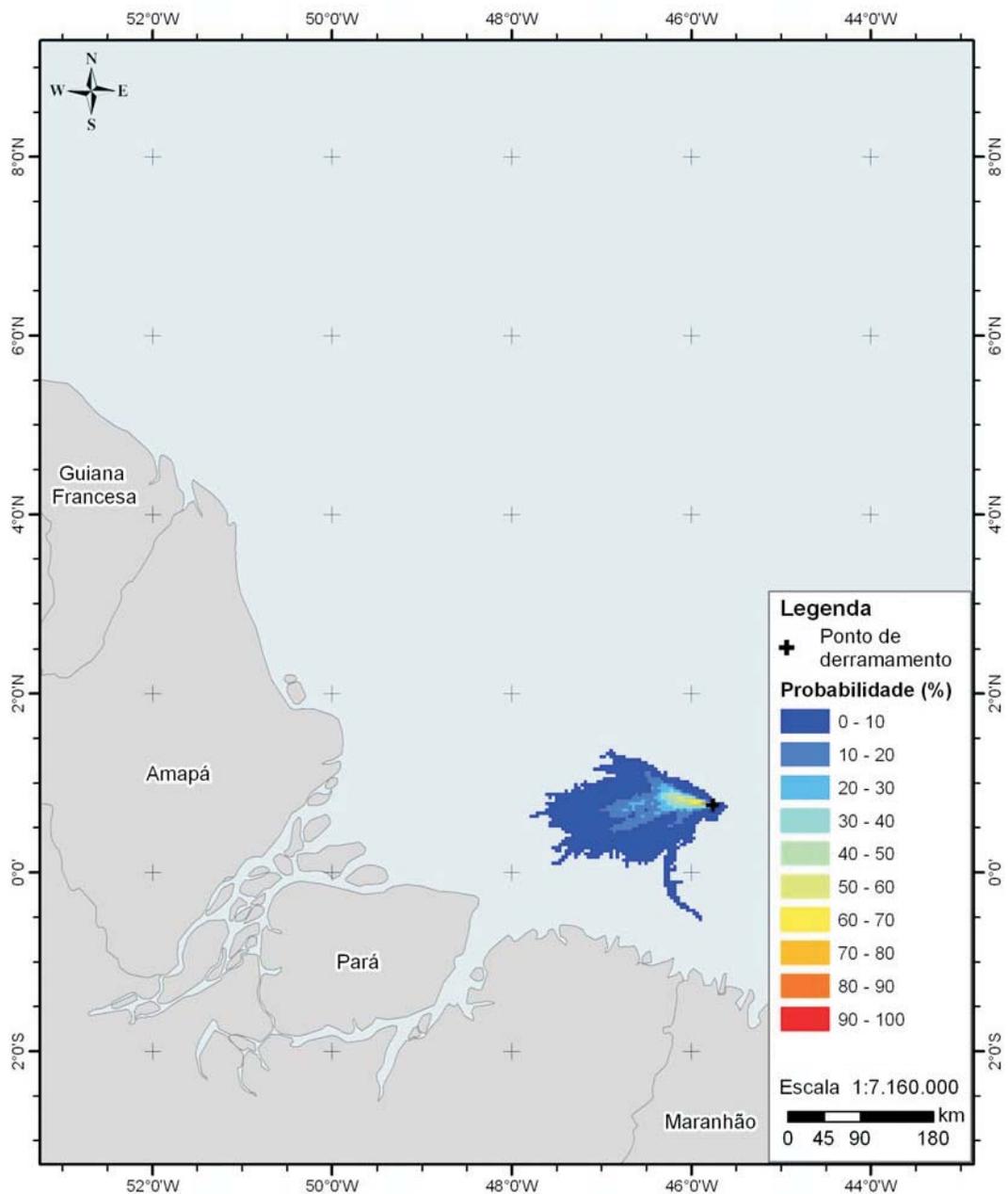


Figura 4.1 - Probabilidade de ocorrência de óleo na superfície para o CENÁRIO 1 - Período: inverno; Volume: 8 m³; Critério de parada: 30 dias.

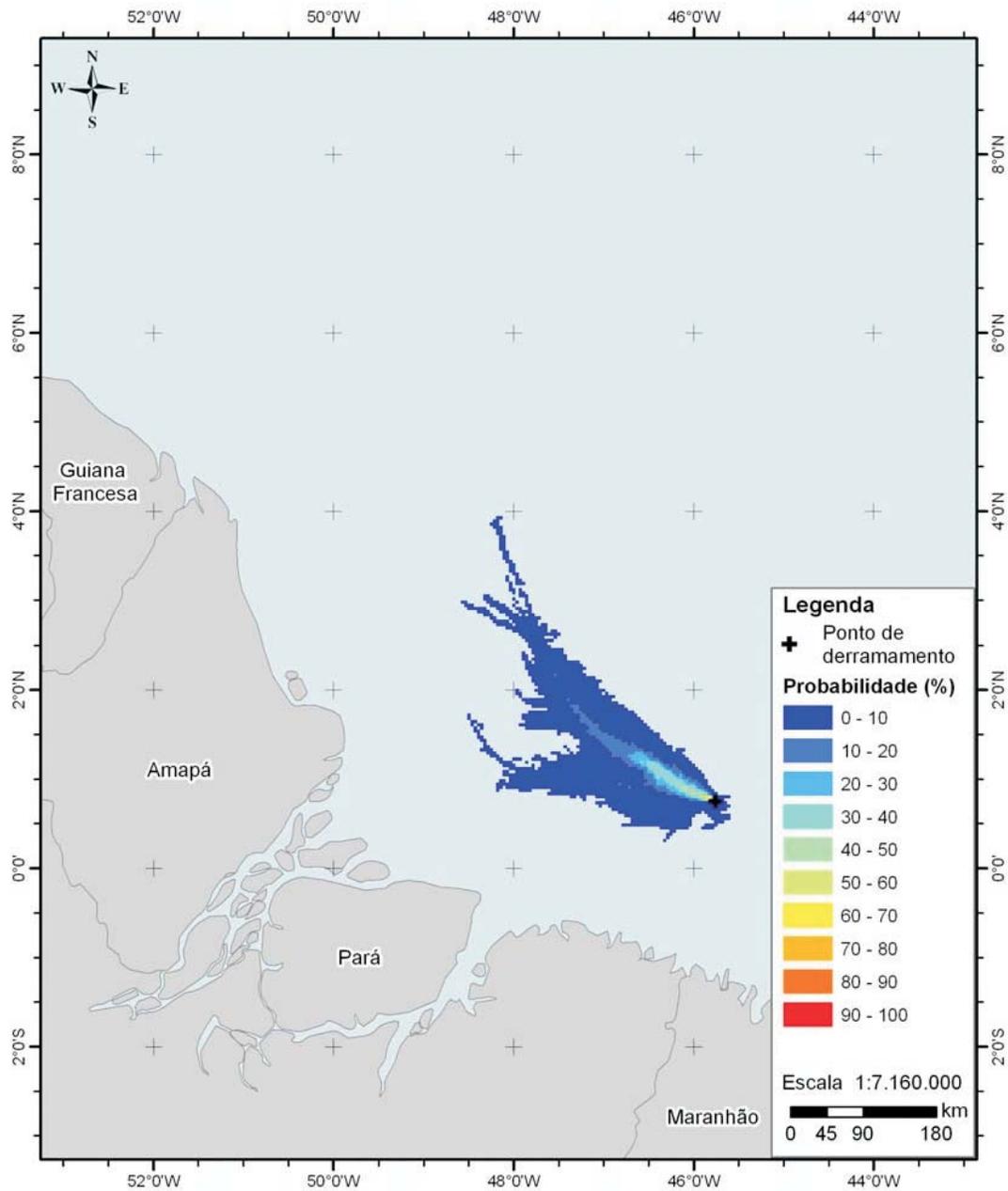


Figura 4.2 - Probabilidade de ocorrência de óleo na superfície para o CENÁRIO 2 - Período: verão; Volume: 8 m³; Critério de parada: 30 dias.

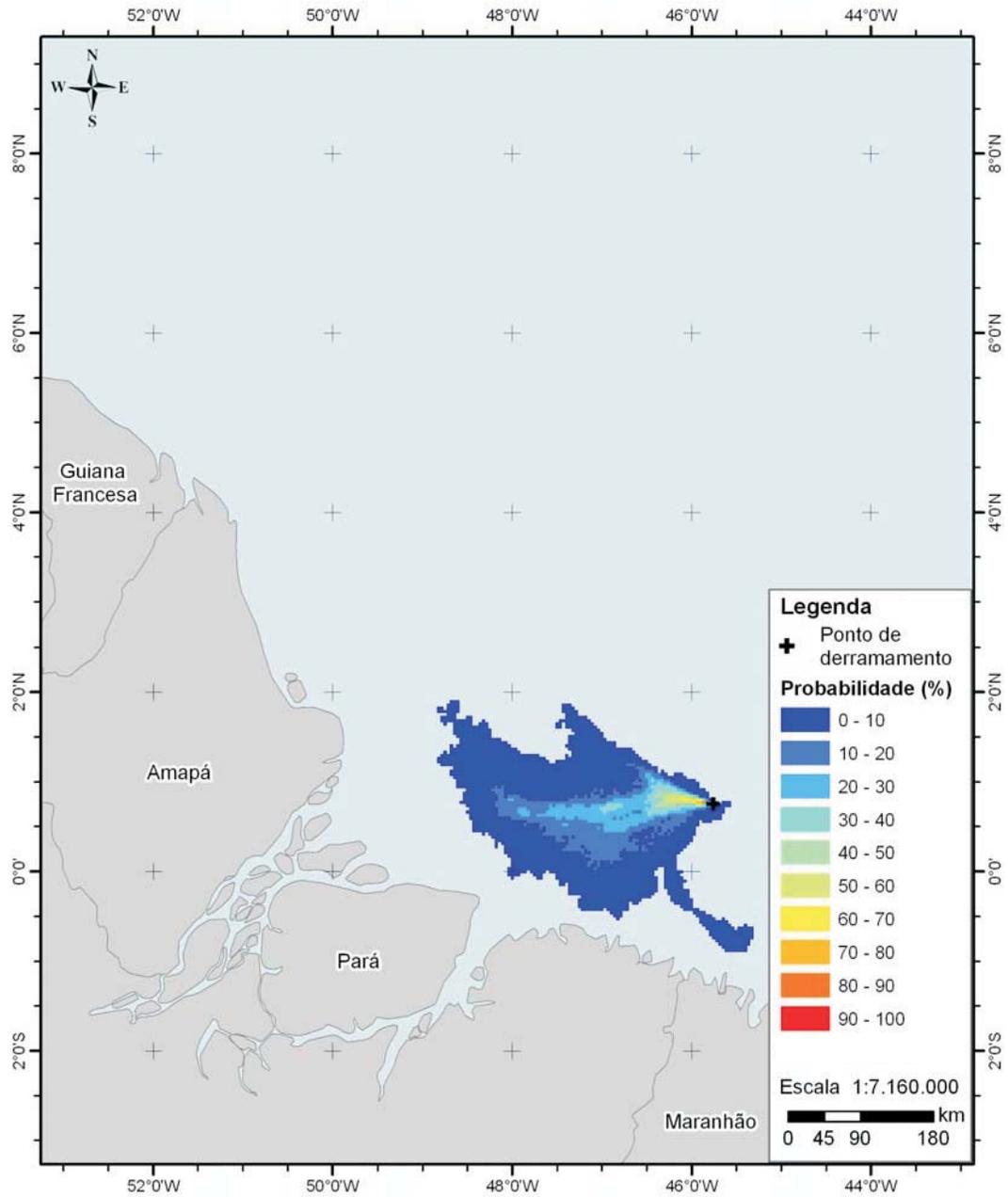


Figura 4.3 - Probabilidade de ocorrência de óleo na superfície para o CENÁRIO 3 - Período: inverno; Volume: 200 m³; Critério de parada: 30 dias.

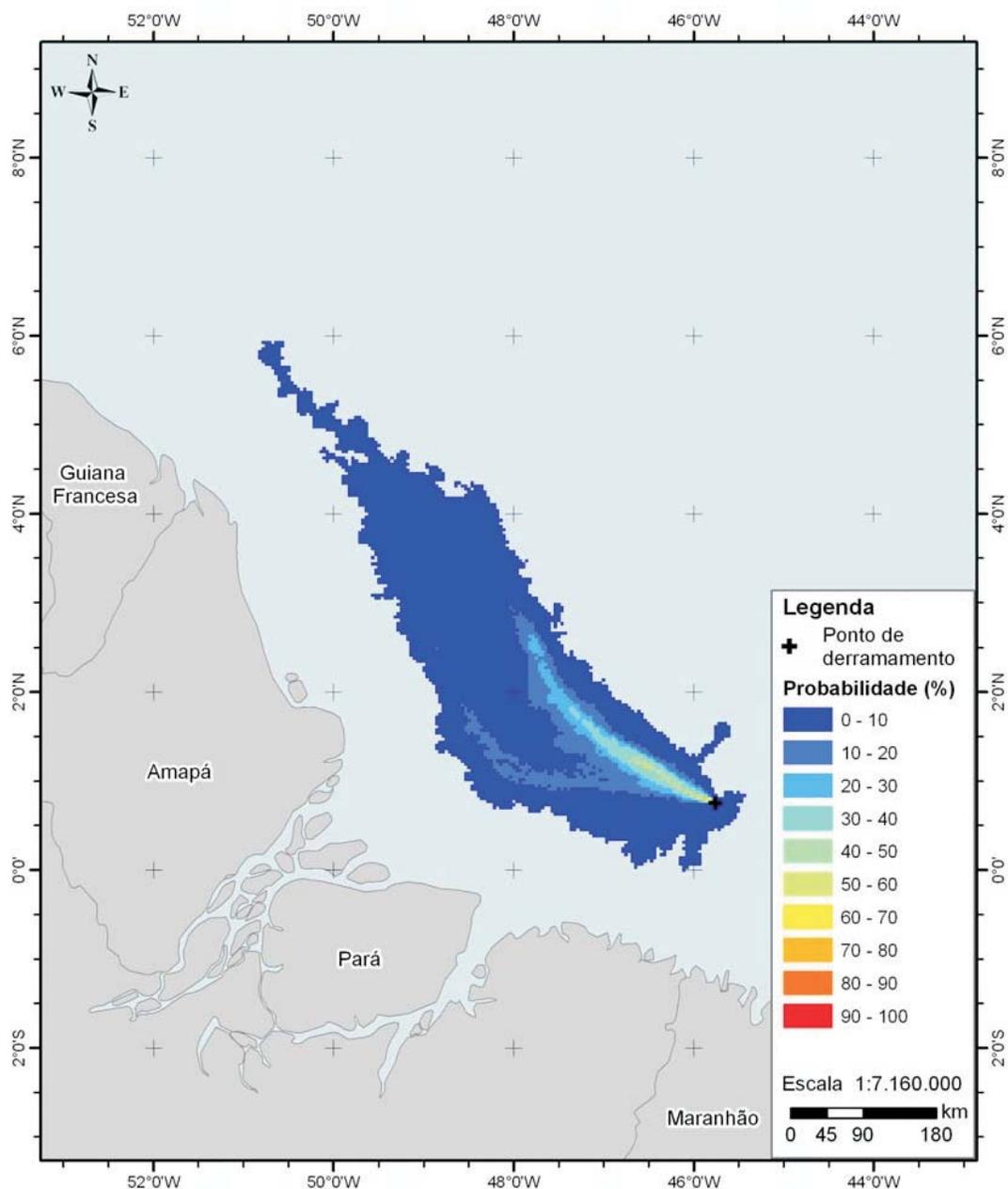


Figura 4.4 - Probabilidade de ocorrência de óleo na superfície para o CENÁRIO 4 - Período: verão; Volume: 200 m³; Critério de parada: 30 dias.

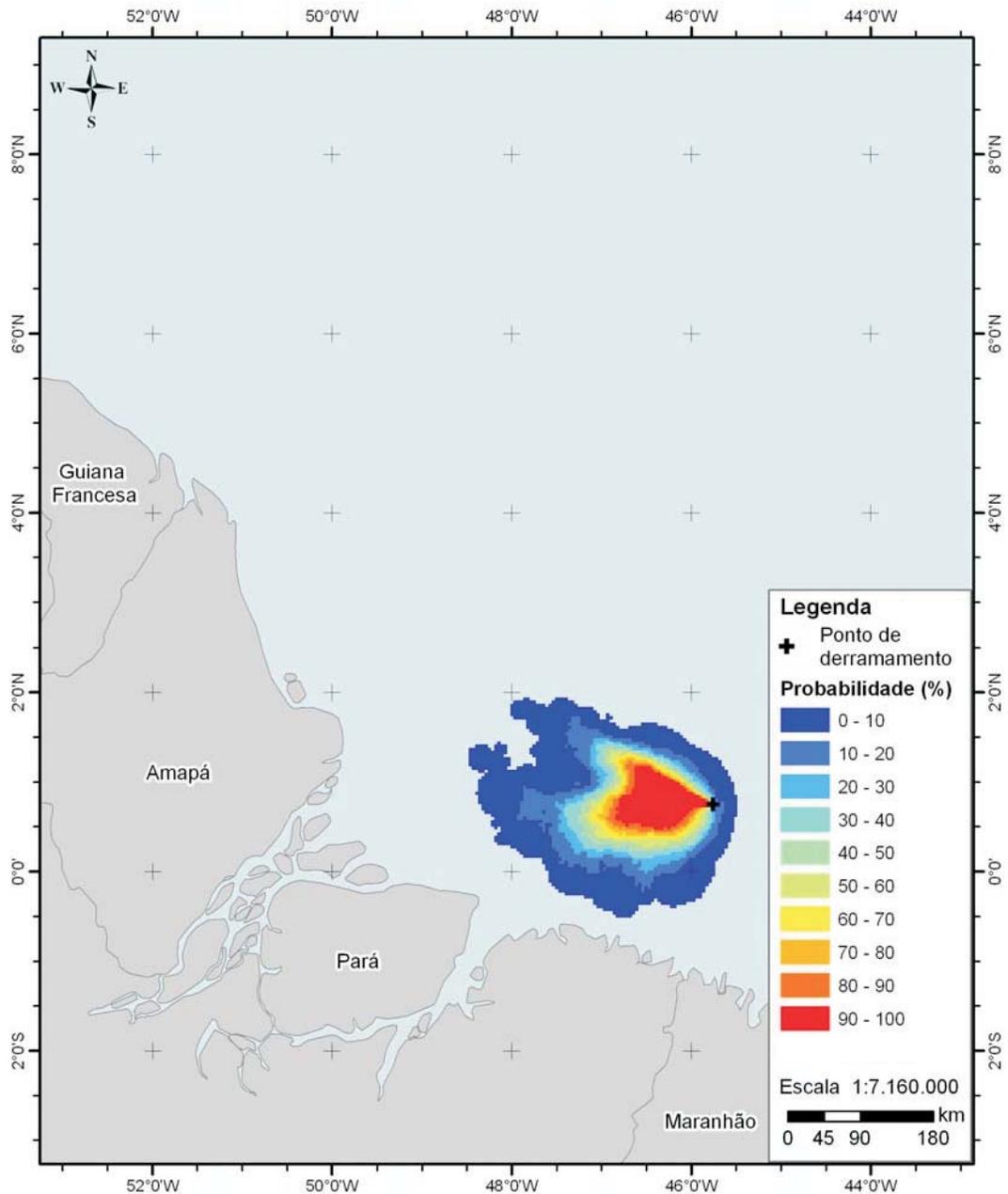


Figura 4.5 - Probabilidade de ocorrência de óleo na superfície para o CENÁRIO 5 - Período: inverno; Volume: 132 m³/dia por 30 dias; Critério de parada: 60 dias.

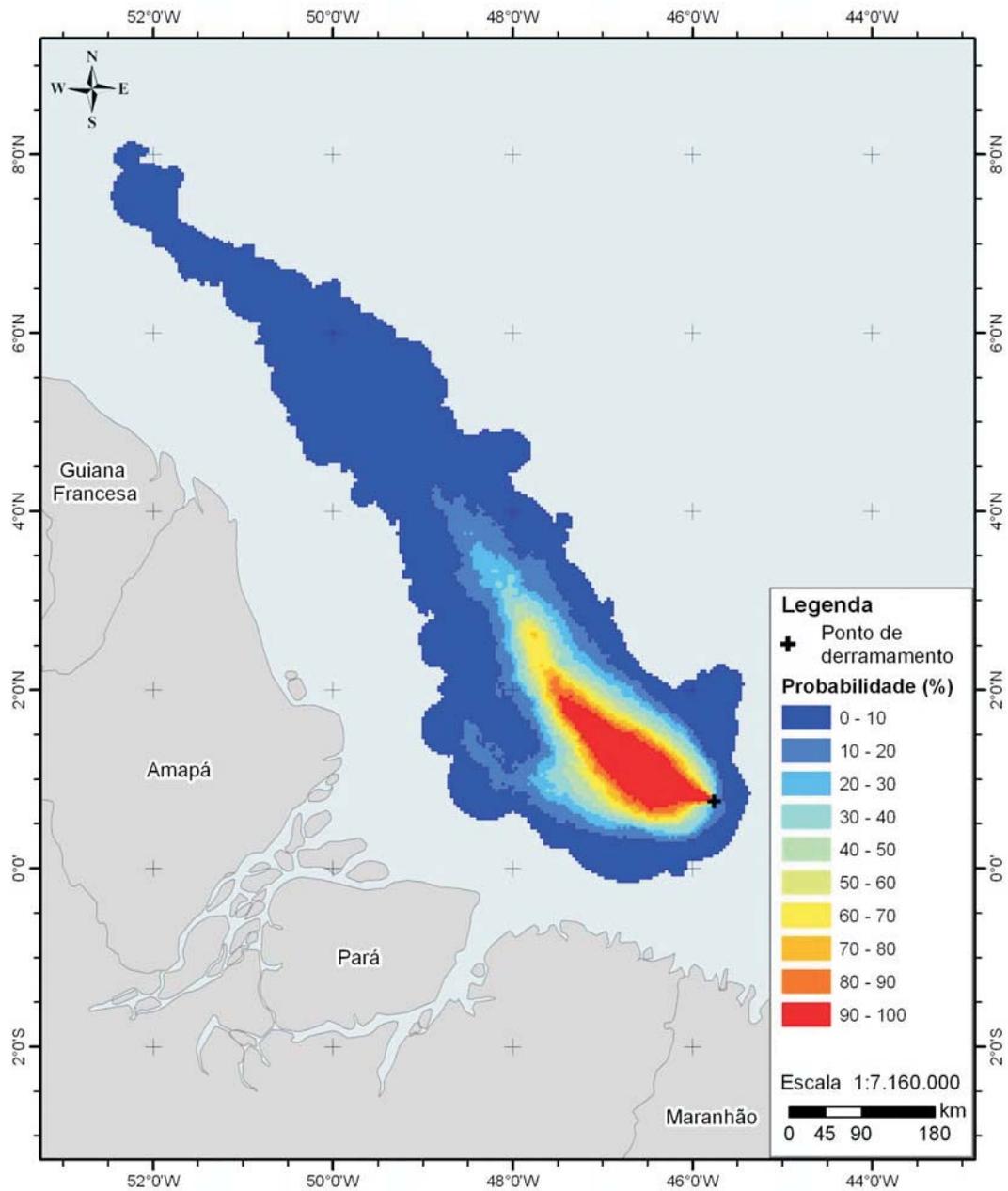


Figura 4.6 - Probabilidade de ocorrência de óleo na superfície para o CENÁRIO 6 - Período: verão; Volume: 132 m³/dia por 30 dias; Critério de parada: 60 dias.

Os resultados das simulações probabilísticas mostram que os derramamentos no Bloco BM-PAMA-8 seguem predominantemente para W/SW no período de inverno e para NW no período de verão, sendo que em nenhum cenário ocorreu toque de óleo na costa.

Em todos os cenários, considerando as 100 simulações de cada um, observa-se que ao final do período simulado cerca de 80% do óleo derramado foi evaporado.

4.2 - Simulações determinísticas

Em relação às simulações determinísticas, uma vez que não houve toque de óleo na costa em nenhum dos cenários simulados, não foi possível realizar simulações nas quais as condições meteorológicas e oceanográficas propiciassem menor tempo de chegada do óleo à costa. Foram considerados então, apenas períodos cujas condições meteorológicas e oceanográficas dificultassem os procedimentos de recolhimento do óleo da superfície do mar. Para tanto, considerando que a deriva da mancha de óleo é mais influenciada pelas correntes do que pelo vento, foram escolhidos, a partir da análise da série temporal dos dados de corrente, dois períodos nos quais são observadas as maiores intensidades de corrente, e foram realizadas simulações de pior caso com critério de parada de 60 dias. As datas de início das simulações determinísticas estão listadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Simulações determinísticas.

Simulação	Volume	Tempo inicial da simulação
Simulação 1	132 m ³ /dia por 30 dias	15/06/2004 às 01:00
Simulação 2	132 m ³ /dia por 30 dias	18/09/2004 às 01:00

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam a trajetória percorrida pela mancha de óleo com as cores representando a máxima espessura do óleo ocorrida em cada ponto. Também é apresentado o balanço de massa das simulações.

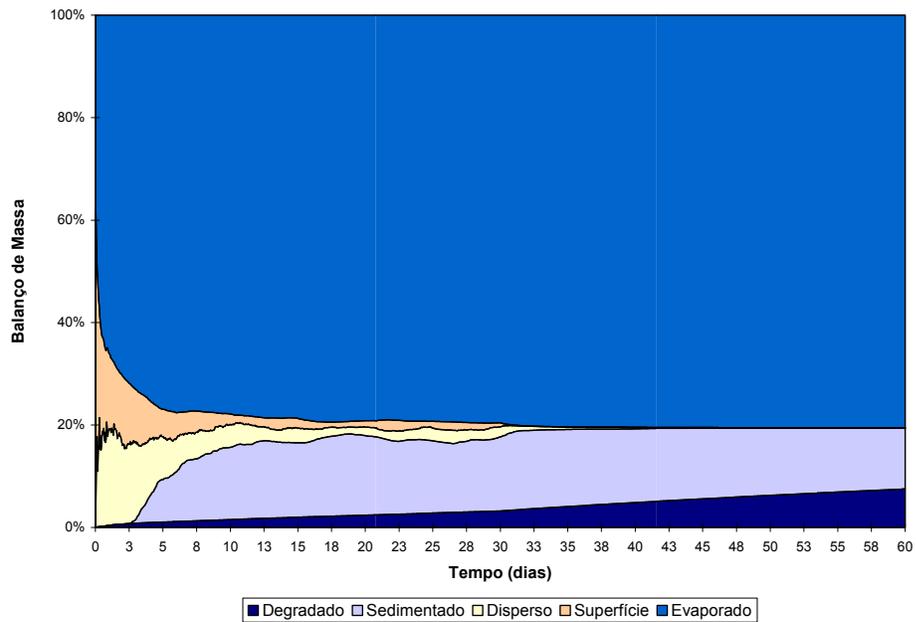
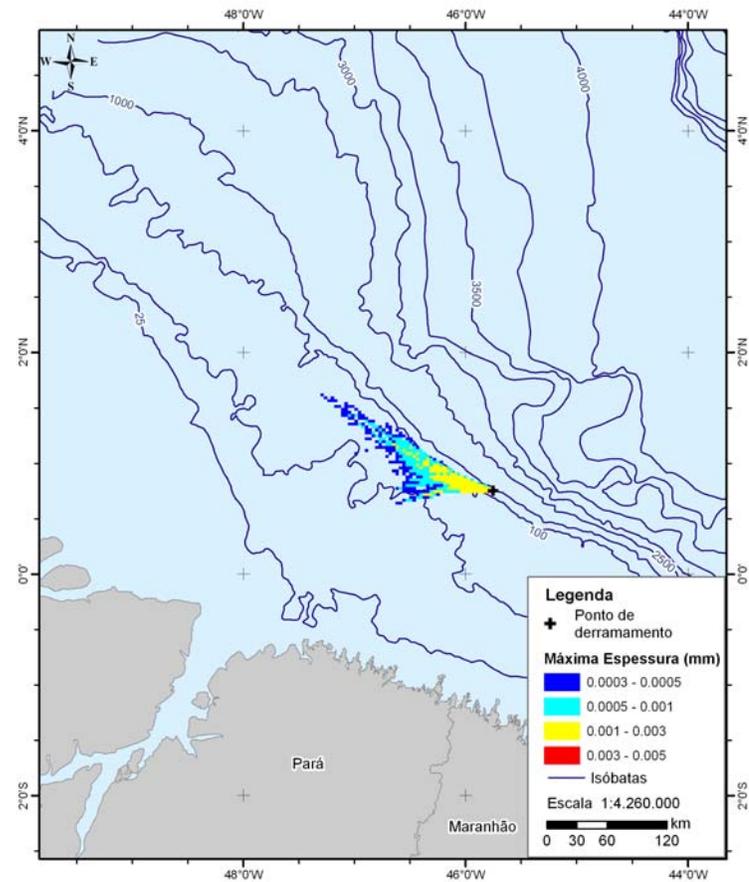


Figura 4.7 - Máxima espessura (em mm) e balanço de massa do cenário de pior caso com início no mês de junho.

Em relação ao balanço de massa, ao final da simulação, observa-se que cerca de 80% do óleo é evaporado, 12% é sedimentado e 8% é degradado. A máxima espessura encontrada é de 0,0035 mm próximo ao ponto de derramamento em ambos os cenários.

5 - CONCLUSÕES

Para o estudo de modelagem de dispersão de óleo no Bloco BM-PAMA-8 foram realizados seis cenários probabilísticos para um ponto específico de simulação (00°45'00"N; 45°45'00"W). Os resultados destas simulações mostram que os derramamentos seguem predominantemente o sentido W/SW nos cenários de inverno e o sentido NW nos cenários de verão. Em todas as simulações não foi observada ocorrência de óleo na costa.

Estes resultados estão de acordo com os padrões de correntes observados para a região de interesse.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAMO, O. M.; DOWNING, K. & REED, M. 1996. **Calibration, verification and sensitivity analysis of the IKU Oil Spill Contingency and Response (OSCAR) model system.** Technical Report 42.4048.00/01/96, IKU, Norwegian.

AAMO, O. M.; REED, M. & DALING, P. S. 1995. **Evaluation of environmental consequences and effectiveness of oil spill response operations with a possible change in first line response at the Veslefrikk field.** SINTEF Report No. 95.006, 1995 SINTEF Petroleum Research.

AAMO, O.M.; REED, M.; DALING, P.S. & JOHANSEN, O. 1993. **A Laboratory-Based Weathering Model: PC Version for Coupling to Transport Models.** Proceedings of the 1993 Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar pp.617-626.

AMOROCHO, J. & DEVRIES, J. J. 1980. **A New Evaluation of the Wind Stress Coefficient over Water Surfaces.** Journal of Geophysical Research, Volume 85, No. C1, pp 433-442.

BLECK, R.; HALLIWELL, G.; WALLCRAFT, A.; CARROLL, S.; KELLY, K.; RUSHING, K., 2002. **HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) – User’s Manual.** Code Version 2.0.01, Manual Version 2.0.01.

BOWDEN, K. F., 1983. **Physical Oceanography of Coastal Waters.** Ellis Harwood Ltd, UK. 312p.

CHASSIGNET, E.P., 2008. **U.S. GODAE: Global Ocean Prediction with HYCOM.** Ocean Sciences Meeting, Orlando.

CHASSIGNET, E.P.; SMITH, L.T.; HALLIWELL, G.R.; BLECK, R., 2003. **North Atlantic simulations with the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM):**

Impact of the vertical coordinate choice, reference pressure, and thermobaricity. J. Phys. Oceanogr. 33, 2504-2526.

CHASSIGNET, E.P.; HURLBURT, H.E.; METZGER, E.J.; SMEDSTAD, O.M.; CUMMINGS, J.A.; HALLIWELL, G.R.; BLECK, R.; BARAILLE, R.; WALLCRAFT, A.J.; LOZANO, C.; TOLMAN, H.L.; SRINIVASAN, A.; HANKIN, S.; CORNILLON, P.; WEISBERG, R.; BARTH, A.; HE, R.; WERNER, F.; WILKIN, J., 2009. **US GODAE Global Ocean Prediction with the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM).** Oceanography 22, 64-75.

CSANADY, G.T., 1973. **Turbulent diffusion in the environment.** D. Reidel Publ. Co., Dordredt, Holland. 248p.

CUMMINGS, J.A., 2005. **Operational multivariate ocean data assimilation.** Quart. J. R. Met. Soc. 131, 3583-3604.

DALING, P. S. & BRANDVIK, P. J. 2001. **Weathering of oils at sea: comparisons between field data and model predictions.** In: Brebbia, C. A. (Ed.). Oil Spill Modelling and Processes. Southampton: WIT Press. pp. 91-106.

DALING, P. S.; AAMO, O. M.; A. LEWIS, & STROM-KRISTIANSEN, T. 1997. **SINTEF/IKU Oil-Weathering Model: Predicting Oil Properties at Sea.** Proceedings 1997 Oil Spill Conference. API publication No. 4651, Washington D. C., pp 297 - 307.

DALING, P. S.; BRANDVIK, P. J.; MACKAY, D. & JOHANSEN, O. 1990. **Characterization of Crude Oils for Environmental Purposes.** Oil and Chemical Pollution, Vol. 7, pp. 199 - 224.

DALING, P.S. & STROM, T. 1999. **Weathering of Oils at Sea: Model/Field Data Comparisons.** Spill Science and Technology Bulletin, Vol. 5, nº.1, p.63-74.

DELVIGNE, G. & SWEENEY, C. 1988. **Natural dispersion of oil.** Oil and Chemical Pollution 4: 281- 310.

FAY, J. A., 1969. **The spread of oil on a calm sea.** In Oil on the Sea, ed. D.Hoult, Plenum Press.

FANNELOP; WALDMAN, G.D., 1972. **The dynamics of oil slicks.** AIAA Journal 10 (14), p506.

FRENCH, D. et al., 1996. **The CERCLA type A natural resource damage assessment model for coastal and marine environments (NRDAM/CME),** Technical Documentation, Vol. I – Model Description. Final Report, submitted to the Office of Environmental Policy and Compliance, U.S Dept. of the Interior, Washington, DC, Contract No. 14-0001-91-C-11. April, 1996.

FOX, D.N.; TEAGUE, W.J.; BARRON, C.N.; CARNES, M.R.; LEE, C.M., 2002. **The Modular Ocean Data Assimilation System (MODAS).** J. Atmos. Ocean. Technol. 19, 240-252.

ICHIYE, T. 1967. **Upper ocean boundary-layer flow determined by dye diffusion.** Physical Fluids Supplement Vol. 10, pp 270-277.

JPL - **JET PROPULSION LABORATORY.** Winds Home Page. <http://winds.jpl.nasa.gov/>. Último acesso em outubro de 2008.

KELLY, K.A.; THOMPSON, L.; CHENG, W.; METZGER, E., 2007. **Evaluation of HYCOM in the Kuroshio Extension region using new metrics.** J. Geophys. Res. 112, C01004.

KULLENBERG, G. 1982. **Pollutant transfer and transport in the sea.** CRC Press, Boca Raton, Fl. , Vol. I. 227 p.

LOCARNINI, R.A.; MISHONOV, A.V.; ANTONOV, J.I.; BOYER, T.P.; GARCIA, H.E., 2006. **World Ocean Atlas 2005**, volume 1: Temperature. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 61, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 182 pp.

LYMAN, W.J.; REEHL, W.F. & ROSENBLATT, D.H. 1982. **Handbook of Chemical Property Estimation Methods**. McGrawHill Book Co., NY. 900p.

MACKAY, D.; BUIST, L; MASCARENHAS, R. & PATERSON, S. 1980. **Oil Spill Processes and Models**. Department of Chemical Engineering, University of Toronto, Toronto, Ontario, Publ. No. EE-8.

REED, M. & FRENCH, D. 1992. **A transportable system of models for natural resource damage assessment**. Environmental Software, Elsevier Science Publishers, Ltd.(7)191-201.

REED, M. 1989. **The physical fates component of the CERCLA Type A model system**. Oil and Chemical Pollution 5:99-124.

REED, M. 2001. **Technical Description and Verification Tests of OSCAR 2000, a Multi-Component 3-Dimensional Oil Spill Contingency And Response Model**. SINTEF Report. 52p.

REED, M.; AAMO, O. M. & DALING, P. S. 1995b. **Quantitative Analysis Of Alternate Oil Spill Response Strategies Using OSCAR**. Spill Science and Technology, Pergamon Press 2(1): 67-74.

REED, M.; AAMO, O.M. & DOWNING, K. 1996. **Calibration and Testing of IKU's Oil Spill Contingency and Response (OSCAR) Model System**. Proceedings of 19th AMOP Seminar, Edmonton, Alberta. p. 689 - 726.

REED, M.; FRENCH, D.; RINES, H. & RYE, H. 1995a. **A three-dimensional oil and chemical spill model for environmental impact assessment**. Proceedings of the 1995 International Oil Spill Conference, pp.61-66.

SMEDSTAD, O.M.; CUMMINGS, J.A.; METZGER, E.J.; HOGAN, P.J.; HURLBURT, H.E.; SHRIVER, J.F. & WALLCRAFT, A.J. 2008. **The 1/12° global HYCOM real-time nowcast/forecast system**. Ocean Sciences Meeting, Orlando.

SMITH, W. H. F. & SANDWELL, D. T. 1994. **Bathymetric prediction from dense satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry**. Journal Geophysical Research, 99:21803-21824.

SMITH, W. H. F. & SANDWELL, D. T. 1997. **Global Seafloor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings**. Science, 277:1956 -1962.

SRINIVASAN, A.; GARRAFFO, Z.; ISKANDARANI, M., 2009. **Abysal circulation in the Indian Ocean from a 1/12° resolution global hindcast**. Deep-Sea Res. I, in press.

THIBODEAUX, L. J. 1979. **Chemodynamics**. John Wiley and Sons, NY. 501 pp.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1984. **Shore Protection Manual**. Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi. 2 vols

7 - EQUIPE TÉCNICA

Coordenador: Alexandre Pereira Cabral (Fugro Brasil)
Marlos Baptista (Fugro Brasil)

Corpo Técnico: Flávia Pozzi Pimentel (Fugro Brasil)
Pedro Marques São Thiago (Fugro Brasil)

Apoio Técnico: Mark Reed (SINTEF)



Coordenador da Equipe



Técnico Responsável

Revisão 00
12/2009

ANEXO I - FORMULAÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO E TRANSPORTE DE ÓLEO OSCAR

O modelo de dispersão de óleo OSCAR (Oil Spill Contingency and Response) considera os processos de transporte que governam a trajetória da mancha e os processos de destino físico-químicos que modificam as propriedades do óleo, provocando transferência de massa entre os diferentes meios. A seguir serão detalhados diversos fatores que governam o destino final do óleo derramado conforme descrito em Reed (2001).

Alguns processos apresentam maior relevância logo após o derramamento, como a evaporação e a dispersão, enquanto outros processos são importantes semanas após o derrame, como a biodegradação e sedimentação. A importância relativa destes processos pode ser observada na Figura I.1.

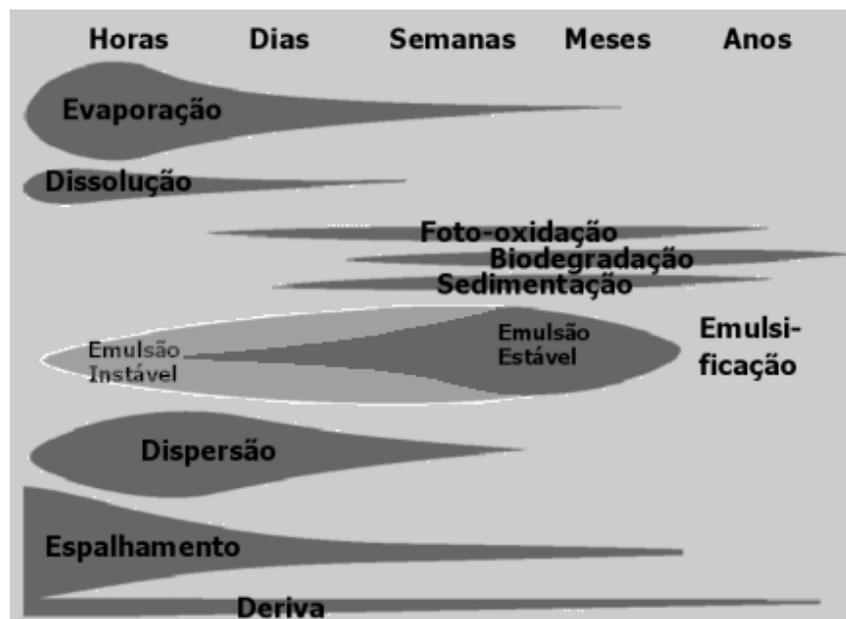


Figura I.1 - Importância relativa dos processos de transformação do óleo ao longo do tempo.

1.1 - Ondas

As equações a seguir são computadas pelo OSCAR a fim de determinar a altura (H) e o período (T) da onda em função da velocidade do vento (U), profundidade da coluna d'água (d), pista (F) e aceleração gravitacional (g). Essas equações são baseadas no manual da U.S. Army Corps of Engineers (1984).

$$\frac{gH}{U_A^2} = 0,283 \tanh \left[0,530 \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/4} \right] \tanh \left\{ \frac{0,00565 \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/2}}{\tanh \left[0,530 \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/4} \right]} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{gT}{U_A} = 7,54 \tanh \left[0,833 \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/8} \right] \tanh \left\{ \frac{0,0379 \left(\frac{gF}{U_A} \right)^{1/3}}{\tanh \left[0,833 \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/8} \right]} \right\}$$

A profundidade local e pista são determinadas internamente no modelo a partir dos dados do *grid*. Em uma fronteira aberta do *grid*, assume-se uma pista de 100 km. A altura e período de onda também são determinados e inseridos em um *grid* retangular e a cada mudança de velocidade e direção de vento, um novo par de altura e período de onda é calculado. Este procedimento permite levar em consideração variações na altura da onda devido à modificações na pista de vento, assim como “sombras” a sotavento das ilhas. Contudo, esta abordagem não inclui empinamento, difração, reflexão, ou interações entre ondas e correntes.

1.2 - Advecção

A advecção está relacionada ao transporte do óleo no mar que é função da circulação da água e, conseqüentemente, das correntes, marés e ondas. No OSCAR é determinada através da superposição da velocidade média local interpolada no espaço e uma componente randômica que representa a turbulência no meio ambiente. Geralmente, a velocidade média local é a soma das componentes climatológicas de maré e de vento, mais a componente de Stokes (forçada por onda). A componente turbulenta W' é computada para um

coeficiente de dispersão turbulenta K , estimado para as direções verticais e horizontais apropriadas como:

$$W' = \sqrt{6K/\Delta t}, \quad (2)$$

O coeficiente de dispersão horizontal pode ser aproximado utilizando-se dados sobre estudos de difusão de traçadores conforme revistos por Bowden (1983), para K em cm^2/s e tempo t em segundos, sendo:

$$K_x = 0,0027 t^{1,34} \quad (3)$$

Kullenberg (1982) sugere que os dados atingem um máximo em cerca de 106 cm^2/s , ou 100 m^2/dia e este máximo é aplicado.

O coeficiente vertical de difusão turbulenta acima da picnoclina está relacionado às condições das ondas segundo Ichiye (1967):

$$K_z = 0,028 \frac{H^2}{T} \exp(-2kz) \quad (4)$$

onde:

H = altura da onda;

T = período de onda;

k = número da onda;

z = profundidade.

Abaixo da profundidade da picnoclina, K_z , assume-se que este coeficiente seja constante e igual a $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (Kullenberg, 1982). Em condições onde não exista picnoclina, a equação de Ichiye é aplicada da superfície ao fundo.

1.3 - Espalhamento

O espalhamento é a expansão horizontal da mancha de óleo devido à tendência do óleo a escoar sobre si mesmo. A maior parte dos modelos calculam o espalhamento a partir do trabalho de Fay (1969), que sugere a melhor descrição em três fases: inercial, viscosa e tensão superficial. Neste caso, a fase inercial é dominada por forças de gravidade, a fase viscosa pelo balanço entre as forças de gravidade e viscosidade e a fase de tensão superficial ocorre quando a força de gravidade deixa de ser importante e o espalhamento é função da tensão

superficial. O espalhamento varia com o volume derramado, no entanto pode-se considerar de uma maneira geral que nos primeiros instantes a fase inercial é predominante e das primeiras horas até alguns dias a fase viscosa predomina. Em ambas as fases encontram-se espessuras da ordem de 1 a 10 mm, já na fase de tensão superficial a espessura é extremamente pequena.

O espalhamento do óleo na superfície do mar calculado pelo OSCAR envolve a interação da gravidade, momento e viscosidade. Neste caso, uma equação unidimensional é utilizada para se representar o espalhamento transversal de uma “mancha” em um vazamento contínuo, estando de acordo com Fay (1969) e Fannelop & Waldman (1972).

$$X_{LE} = C_0 \left(\frac{g \Delta \rho}{\rho_w^2} \right)^{1/4} \frac{m^{1/2}}{(\rho_w \mu_w)^{1/8}} t^{3/8} \quad (5)$$

onde:

X_{LE} = largura da seção principal da mancha (m)

g = aceleração gravitacional (m/s^2)

$\Delta \rho$ = diferença de densidade entre a água e o óleo (kg/m^3)

ρ_w = densidade da água (kg/m^3)

μ_w = viscosidade do óleo (cP)

m = $\frac{1}{2}$ da taxa de liberação da massa / corrente superficial (kg/m)

C_0 = constante de espalhamento

A equação 5 representa o regime de gravidade-viscosidade no processo de espalhamento, e explica apenas o espalhamento quiescente da porção mais espessa da mancha. O espalhamento turbulento ocorre como resultado de cisalhamentos horizontais e verticais no campo de velocidade em uma mancha de óleo, associado ao entranhamento e ressuspensão das gotículas de óleo, e rapidamente ultrapassa o espalhamento quiescente em importância. Como esses processos também são considerados, o modelo produz manchas de óleo menos espessas com o passar do tempo.

I.4 - Evaporação

A evaporação é o processo de intemperismo mais importante em termos de balanço de massa. Devido a este processo, ao longo dos primeiros dias após um derramamento acidental de óleo, um óleo leve pode perder cerca de 75% do volume inicial, um óleo médio cerca de 40% e pesado cerca de 10%. Este é um processo extremamente complexo, visto que composição do petróleo tem diversos componentes, cada um com sua temperatura de evaporação, assim como grau de solubilidade e saturação no ar. A taxa de evaporação depende de diversos fatores, tais como as frações com baixo ponto de ebulição, área superficial e espessura da mancha, pressões de vapor do óleo e coeficiente de transferência de massa, que por sua vez são funções da composição do óleo, velocidade do vento, estado do mar e temperatura do ar e da água.

No OSCAR, a taxa de evaporação é controlada pela pressão de vapor dos componentes individuais do óleo e suas frações. A taxa de transferência da massa evaporada é, usualmente, determinada de acordo com Thibodeaux (1979), Mackay *et al.* (1980) e outros, sendo:

$$dm_i/dt = K_e P_i A M_i F_i / (R T), \quad (6)$$

onde:

m_i = massa associada com o i -ésimo componente do derramamento

t = tempo (s)

K_e = coeficiente de transferência de massa evaporada (m/s)

T = temperatura (°K)

P_i = pressão de vapor para o i -ésimo componente (atm)

A = área da superfície da mancha (m²)

M_i = peso molecular do componente i (grama / mol)

F_i = fração molar do componente i restante na mancha

R = a constante do gás (8.206 x 10⁻⁵ atm·m³ / mol·°K)

O coeficiente de transferência de massa, K_e , é calculado de acordo com Amorocho & DeVries (1980), sendo:

$$K_e = C_d U(t) \quad (7)$$

onde C_d é um coeficiente de arrasto ar/mar e $U(t)$ é a velocidade do vento (m/s). O coeficiente de arrasto C_d é, por sua vez, dependente da velocidade do vento:

$$C_d = \left(\frac{U^*}{U(t)} \right)^2 \quad \text{com,} \quad U^* = \begin{cases} CU(t) & \text{para } U(t) < u_1 \\ Cu_1 + (Du_2 - Cu_1) \frac{U(t) - u_1}{u_2 - u_1} & \text{para } u_1 \leq U(t) \leq u_2 \\ DU(t) & \text{para } U(t) > u_2 \end{cases} \quad (8)$$

onde C , D , u_1 e u_2 são constantes ($C=0,0323$, $D=0,0474$, $u_1=7$ e $u_2=20$).

1.5 - Dispersão natural

A dispersão é um processo de mistura causado pela turbulência na água, podendo expandir ou dissipar uma mancha de óleo. Este processo ocorre tanto na direção horizontal quanto na vertical. No primeiro caso pode ser combinado com espalhamento, no entanto diferenciados por escalas espaciais e temporais. A dispersão vertical e o entranhamento estão associados a movimentos de partículas menores que 100 μm na coluna d'água.

O modelo utilizado para previsão do entranhamento do óleo a partir da superfície do mar é descrito em Reed & French (1992), sendo baseado na formulação empírica de Delvigne & Sweeney (1988):

$$Q_{di} = C^* D^{0,57} S F d_i^{0,7} \Delta d \quad (9)$$

onde:

Q_{di} = taxa de entranhamento por unidade de área superficial de gotículas de óleo com diâmetros entre $(d_i - \Delta d)$ a $(d_i + \Delta d)$ ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)

C^* = coeficiente de entranhamento derivado empiricamente

D = energia de onda dissipada por unidade de área superficial (kg/s^2)

S = fração da superfície do mar coberta pelo óleo

F = fração da superfície do mar coberta pela arrebentação de ondas por unidade de tempo (1/s)

d_i = diâmetro médio das partículas na classe de tamanho i (m)

Δd = intervalo de diâmetro da partícula (m)

O coeficiente empírico C^* é uma função da viscosidade do óleo:

$$C^* = 4450\nu^{-0,4} \quad (10)$$

onde ν é a viscosidade cinemática do óleo (m^2/s). A energia da arrebenção da onda dissipada D é aproximada como:

$$D = 0,0034 \rho_w g H_b^2 \quad (11)$$

onde ρ_w é densidade da água do mar (kg/m^3), g é aceleração gravitacional (m/s^2) e H_b é a altura da onda no momento da arrebenção (m). A fração da superfície do mar coberta pela arrebenção das ondas por unidade de tempo (F) é aproximada de acordo com Monahan & O'Muircheartaigh (1980) *apud* Reed (2001):

$$F = 3 \cdot 10^{-6} U(t)^{3,5} \quad (12)$$

onde $U(t)$ é velocidade do vento (m/s). O tamanho das gotículas do é dado por:

$$d_o = \frac{C_o \nu^{0,34}}{\sqrt{e}} \quad (13)$$

onde:

ν = viscosidade cinemática

e = taxa de dissipação da energia (escolhido como $1000 J/m^3s$)

$C_o \approx$ aproximadamente 500 para o tamanho mínimo das partícula e 3400 para o tamanho máximo. As gotículas são divididas em intervalos de tamanho que vão do mínimo tamanho das partículas para o máximo.

1.6 - Emulsificação e propriedades do óleo em superfície

Emulsificação é o processo de formação de emulsões de água no óleo que resulta em variações nas propriedades e características analisadas. Emulsões estáveis contêm cerca de 60 a 85% de água, expandindo o volume do derramamento inicial em cerca de três a quatro vezes, podendo ainda aumentar a densidade do óleo e a viscosidade. As alterações nas propriedades do óleo geram diferentes taxas de arrasto pelo vento.

Os algoritmos para emulsificação e mudanças nas propriedades do óleo foram calibrados utilizando-se dados de intemperismo em laboratório, de acordo com procedimentos publicados (Daling *et al.*, 1990, 1997).

A emulsificação ou $W(t)$ é calculada como uma exponencial:

$$W(t + \Delta t) = W_m(t) - [W_m(t) - W(t)] 0,5^{\Delta t/t_{1/2}} \quad (14)$$

onde $W_m(t)$ e $t_{1/2}$ são derivados de estudo em laboratório que relacionam taxa de emulsificação e conteúdo máximo de água à fração evaporada, sendo:

$W_m(t)$ = quantidade máxima de água (%)

Δt = passo de tempo do modelo (s)

$t_{1/2}$ = meia-vida para emulsificação dependente do vento (s)

Quatro propriedades do óleo são previstas no modelo: ponto de fluidez, ponto de fulgor, densidade e viscosidade do óleo sem água. Suas propriedades assim como suas equações estão na Tabela I.1. Essas propriedades variam de acordo com o ajuste da curva aos valores medidos em laboratório e a fração evaporada como apresentado a seguir (Johansen, 1991 *apud* Reed, 2001). Nota-se que ao aplicar a perda por evaporação nestas equações são encontradas suas correspondentes funções no tempo.

Tabela I. 1 - Propriedades de óleo e suas equações (f é a fração evaporada (%) e a e b são fatores de regressão).

Propriedade	Equação	
Ponto de fluidez (°C)	$P = e^{(a_p + b_p f)} - 273$	(15)
Ponto de Fulgor (°C)	$F = e^{(a_F + b_F f)} - 273$	(16)
Densidade (g/l)	$\rho_o = a_\rho + b_\rho f$	(17)
Viscosidade (cP):	$\mu_o = e^{(a_\mu + b_\mu f)}$	(18)

A densidade da emulsão $\rho(t)$ é calculada como:

$$\rho(t) = \frac{W(t)\rho_w + [100 - W(t)]\rho_o(t)}{100} \quad (19)$$

onde:

$W(t)$ = quantidade de água (%),

$\rho(t)$ = densidade da água do mar (g/l), e

$\rho_o(t)$ = densidade do óleo sem água.

A equação de Mooney (1951) *apud* Reed (2001) é usada para calcular a viscosidade de emulsão $\mu(t)$:

$$\mu(t) = \mu_o(t) e^{\frac{aW(t)}{100 - bW(t)}} \quad (20)$$

onde a e b são constantes empíricas, escolhidas de acordo com Mackay *et al.* (1980) ($a = 2,5$ e $b = 0,654$) ou ajustando-se a equação com dados de laboratório. Nesse último caso, são encontrados melhores valores entre -10 e 5 para a , e entre -2 e 0,9 para b .

1.7 - Óleo na costa

Ao atingir a costa, a mancha de óleo pode ser retida, ou rejeitada devido a saturação. O tipo de costa influencia a persistência e impacto do resíduo de óleo, sendo importante na tomada de decisão para limpeza de uma área impactada, sendo classificada a partir de um sistema de índice de Sensibilidade Ambiental. Alguns dos fatores analisados são grau de exposição, permeabilidade e declividade da costa.

O OSCAR incorpora dinâmicas relativamente simples para simular interações entre a costa e o óleo. A partir de um modelo de derrame de óleo na zona costeira mais complexo (Reed, 1989), foram estimados grupos de capacidade máxima de retenção de óleo junto com um conjunto de taxas de remoção. As capacidades de retenção foram desenvolvidas com a finalidade de refletir tanto a inclinação da costa quanto sua permeabilidade, e em alguns casos, exposição ao vento e às ondas. Então, uma praia de cascalhos pode reter mais óleo leve por unidade de comprimento do que uma praia arenosa, devido à penetração do óleo no substrato e as taxas de remoção na praia de cascalhos são mais baixas, pois a meia-vida do óleo nos sedimentos é mais longa.

Quando uma mancha em superfície encontra a linha de costa, o volume máximo de óleo, V_{max} (m^3), é determinado de acordo com as características do local. O óleo será depositado no segmento até atingir V_{max} . A partir daí, mais nenhum óleo será depositado, e a mancha continuará a ser transportada pelos ventos e correntes. A quantidade de óleo removida de um segmento i durante um passo de tempo Δt é portanto:

$$\Delta m = m_i (1 - \exp[-r_i \Delta t]) \quad (21)$$

onde m_i é a massa de óleo no segmento i no começo do passo de tempo, e r_i é a taxa de remoção para o tipo de costa em questão.

1.8 - Dissolução

A dissolução é a estabilização química dos componentes do óleo na água. Corresponde a uma pequena porção de perda do óleo, porém importante, visto que os componentes solúveis do óleo, principalmente pequenos compostos aromáticos, são tóxicos às espécies aquáticas.

A dissolução, assim como a evaporação, é dependente da fração molar de cada componente em uma gota ou em uma mancha na superfície. Assim, a concentração ambiente se torna importante.

$$d m_i/dt = K_d A (F_i S_i - C_i) \quad (22)$$

onde:

K_d = coeficiente de dissolução (m/s)

A = área superficial para uma gotícula ou mancha de superfície (m²)

F_i = fração molar do componente i que permanece na gotícula ou mancha

S_i = solubilidade do i -ésimo componente (gramas/m³; ppm)

C_i = concentração ambiente do i -ésimo componente (gramas/m³)

Para uma mancha em superfície, a coeficiente de transferência de massa K_d é computado de acordo com Thibodeaux (1979), como:

$$K_d = Sh_i D_i/L \quad (23)$$

onde Sh_i é o número de Sherwood, onde, para manchas na superfície, utiliza-se:

$$Sh_i = 0,578 Re^{0,5} Sc_i^{0,33} \quad (24)$$

onde:

Re = Número de Reynolds = $U_{rel} L / \nu_w$

Sc_i = Número de Schmidt = ν_w / D_i

U_{rel} = velocidade relativa entre o óleo e a água (m/s)

L = largura da mancha (m)

ν_w = viscosidade cinemática da água $\sim 8,9 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ em 25°C

D_i = difusividade molecular da componente i (m^2/s)

No caso de gotículas utiliza-se a correlação de transferência de massa para esferas para determinar o Número de Sherwood:

$$Sh = 2 + 0,347 Re^{0,62} S_{C_i}^{0,31} \quad (25)$$

Estas são abordagens padrão em engenharia química (Thibodeaux, 1979).

1.9 - Particionamento

Os hidrocarbonetos do petróleo podem ser encontrados em diversas formas ou espécies, particionado entre as fases dissolvida e particulada. A adsorção tem um importante papel no transporte e destino de poluentes no ambiente aquático, determinando o grau de partição entre a fase dissolvida e a particulada, e conseqüentemente, modulando os efeitos tóxicos através da biodisponibilidade dos elementos e as taxas de remoção da coluna d'água para os sedimentos.

A relação entre a concentração de equilíbrio de um poluente na fase aquosa (C_w) e a concentração de equilíbrio na fase sólida (C_s) pode ser determinada em uma temperatura constante. No ambiente aquático, C_w é geralmente baixo, e as equações que descrevem as isotermas de adsorção (isotermas de Langmuir e de Freundlich) podem ser reduzidas à equação abaixo:

$$C_s = K_p C_w C_{ss} \quad (26)$$

onde a concentração de sedimentos em suspensão, C_{ss} , foi separada da definição de coeficiente de partição.

O coeficiente de partição de uma substância química, K_p , é função da temperatura e do pH, assim como características físicas e químicas do sólido adsorvido. Estudos do comportamento sortivo de compostos orgânicos,

especialmente os hidrofóbicos, concluíram que o carbono orgânico é o principal fator que influencia o processo de adsorção. Se K_p for normalizado com a fração orgânica f_{oc} do sólido, K_{oc} torna-se independente dos sorbentes. Temos então:

$$K_{oc} = \frac{K_p}{f_{oc}} \quad (27)$$

Como o coeficiente de partição baseado no carbono orgânico, este apresenta excelente correlação tanto com K_{ow} (coeficiente de partição octanol/água) quanto com a solubilidade de água S , duas propriedades químicas facilmente determinadas para a maioria dos elementos químicos, temos:

$$\begin{aligned} \log K_{oc} &= A \log K_{ow} + B \\ \log K_{oc} &= a \log S + b \end{aligned} \quad (28)$$

É, então, possível estimar K_{oc} tanto de K_{ow} quanto da solubilidade. As constantes de correlação A , B e a , b são normalmente dependentes da estrutura da substância.

1.10 - Volatilização da Coluna D'água

O procedimento adotado foi descrito por Lyman *et al.* (1982), e implementado por Reed (1989) e French *et al.* (1996). Para cada substância química em um vazamento, a constante de Henry (H) é computada:

$$H = P_{vp} / (S/M_w) \quad (29)$$

onde:

P_{vp} = a pressão de vapor (atm)

S = solubilidade (mg/L)

M_w = peso molecular (g/ml)

Se $H < 3 \times 10^{-7}$, a volatilização pode ser negligenciada. Para $H > 3 \times 10^{-7}$, uma constante de Henry H' pode ser calculada em função de R que é a constante do gás ($\text{atm} \cdot \text{m}^3/\text{mol} \cdot \text{°K}$) e T que é a temperatura (°K):

$$H' = H/RT \quad (30)$$

É necessário ainda determinar os coeficientes de troca nas fases líquida (K_5) e gasosa (K_6) para chegar ao coeficiente total de transferência de massa (K_7) e finalmente determinar a taxa de transferência de massa de um constituinte da coluna d'água para a atmosfera:

$$\begin{aligned} dm/dt &= K_7 m/d \\ K_7 &= (H'K_5K_6)/(H'K_6 + K_5) \\ K_6 &= 3000\sqrt{18/M_w} \\ K_5 &= 20\sqrt{44/M_w} \end{aligned} \quad (31)$$

onde m é quantidade de massa do poluente, assumindo uma distribuição uniforme em uma profundidade d . A profundidade de volatilização para substâncias dissolvidas é limitada a um máximo de meio comprimento de onda, ou uma profundidade de difusão d , que é função de D_z ou a difusão vertical (m^2/s) e Δt , o passo de tempo do modelo (s):

$$d = \sqrt{(2D_z\Delta t)} \quad (32)$$

1.11 - Degradação

Uma vantagem na utilização de um modelo baseado em múltiplos componentes onde se tem a flexibilidade de definir e adicionar novos componentes é que este modelo permite levar em consideração a transformação dos componentes por distintas vias de degradação.

A Figura I.2 apresenta um esquema simplificado dos caminhos de degradação dos compostos no OSCAR. Cada substância, incluindo seus produtos

de degradação, é associada a um caminho de degradação, possivelmente com múltiplas ramificações em cada passo de tempo.

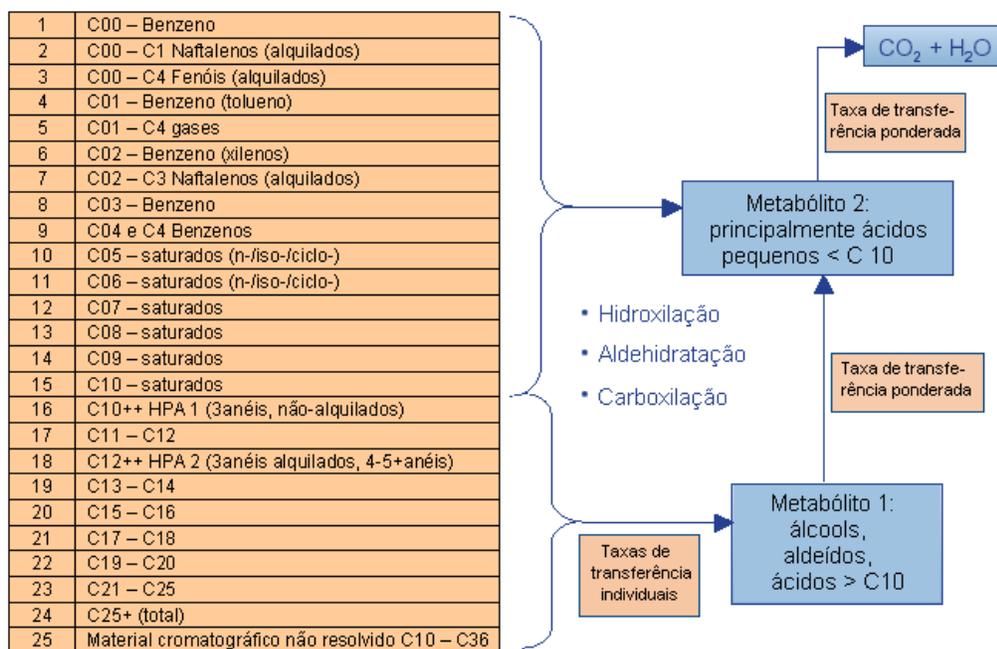


Figura I. 2 - Principais vias de degradação aeróbica e principais componentes do óleo (numerados de 1 a 25) considerados no OSCAR.

I.12 - Concentração na coluna d'água

As concentrações químicas na coluna d'água são determinadas a partir da distribuição temporal e espacial das partículas pseudo-lagrangeanas. Estas partículas são de dois tipos: aquelas que representam as substâncias dissolvidas, e aquelas que representam partículas de óleo ou outras partículas de fluatibilidade não-neutras. Estas últimas partículas são pseudo-lagrangeanas no sentido de que elas não se movimentam estritamente com as correntes, elas podem ascender ou sedimentar de acordo com suas características físicas.

Cada partícula matemática representa conceitualmente uma nuvem de elementos químicos dissolvidos, partículas em sub-superfície, ou partículas em sedimentação, conforme descrito por Csanady (1973). Campos de concentração são construídos no modelo a partir da superposição de todas essas nuvens de

contaminantes. Cada nuvem consiste de um elipsóide com uma partícula em seu centro, e semi-eixos relacionados à história no tempo da partícula. Ao encontrar fronteiras, os elipsóides são truncados, com a massa sendo conservada a partir de reflexão da fronteira, sorção a esta, ou alguma combinação de ambas.

Partículas que representam substâncias dissolvidas possuem os seguintes atributos:

- Coordenadas espaciais x, y e z;
- Massa de cada constituinte químico representada pela partícula;
- Distância para a partícula mais próxima e identificação da mesma;
- Tempo desde o início do derrame;
- Desvio padrão espacial em x, y e z.

Partículas que representam substâncias não-dissolvidas, como partículas de óleo, cascalho ou água de produção, possuem dois atributos adicionais:

- Diâmetro médio da partícula;
- Densidade de partícula.

O modelo resolve a seguinte equação do transporte:

$$\frac{\delta C_i}{\delta t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} C_i = \vec{\nabla} \cdot D_k \vec{\nabla} C_i + \sum_{j=1}^n r_j C_i + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n r_{ij} C_i \quad (33)$$

onde:

C_i = concentração do $i^{\text{ésimo}}$ constituinte químico do derrame

t = tempo

\vec{V} = vetor do transporte advectivo

$\vec{\nabla}$ = operador gradiente

D_k = coeficiente de difusão turbulenta nas direções $k = x, y$ e z .

O primeiro termo da equação é a taxa de variação temporal da concentração de um determinado constituinte em uma determinada localização espacial. Esta taxa de variação é calculada através da determinação dos outros termos da equação acima utilizando partículas lagrangeanas para representar o campo de concentração. Os termos r_j são taxas de processos que incluem:

- Adição de massa em casos de vazamentos contínuos;
- Evaporação das manchas na superfície;
- Espalhamento das manchas na superfície;

- Emulsificação das manchas em superfície;
- Deposição de compostos da coluna d'água na linha de costa;
- Entranhamento e dissolução na coluna d'água;
- Ressuspensão do óleo entranhado;
- Volatilização dos compostos da coluna d'água;
- Dissolução dos compostos dos sedimentos na coluna d'água;
- Deposição dos compostos da coluna d'água nos sedimentos de fundo;
- Remoção dos compostos da linha de costa para a coluna d'água ou superfície;
- Remoção de massa por recolhimento.

Os termos de degradação r_{ij} aparecem no modelo para determinar os subprodutos da degradação como transferência de massa de um componente à outro. Desta forma, as modificações nas propriedades toxicológicas são incorporadas no modelo.