



Relatório Técnico [rev.02]

## Modelagem Hidrodinâmica e Dispersão de Óleo

Bacia da Foz do Amazonas

---

/

Preparado para: Queiroz Galvão Exploração e Produção

Preparado por: André Luis Santi Coimbra de Oliveira

Felipe Lobo Mendes Soares

Henery Ferreira Garção

Flávia Pozzi Pimentel

Lívia Sant' Angelo Mariano

Marcelo Montenegro Cabral

23 de março de 2015

### **Prooceano**

Av. Rio Branco, 311/1205 – Centro

CEP 20.0040-009 – Rio de Janeiro – RJ

Tel./Fax + 55 21 2532.5666

[www.prooceano.com.br](http://www.prooceano.com.br)

## Controle de revisão

---

### Revisão nº 01

Data: 20 / 02 / 2015

Descrição: Correções diversas

Responsável: Henery Ferreira Garção

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 02

Data: 23/03/2015

Descrição: Inserção de justificativas para estratégia de modelagem e volume de blowout.

Responsável: Marcelo Cabral

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 03

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 04

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 05

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

## Sumário

---

<b>1. Introdução .....</b>	<b>18</b>
<b>2. Modelagem Hidrodinâmica .....</b>	<b>19</b>
2.1. Introdução .....	19
2.2. Modelo Numérico Utilizado .....	20
2.3. Domínio do Modelo .....	24
2.4. Condições Iniciais .....	26
2.5. Condições de Contorno .....	30
2.6. Estabilização da Energia Cinética .....	57
2.7. Avaliação do Modelo .....	59
2.8. Resultados .....	91
<b>3. Modelagem de Dispersão de Óleo .....</b>	<b>99</b>
3.1. Metodologia .....	100
3.2. Resultados .....	150
<b>4. Conclusão .....</b>	<b>202</b>
<b>5. Bibliografia .....</b>	<b>204</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>210</b>

## Índice das imagens

Figura 1: Localização do ponto de vazamento (preto), em relação ao bloco FZA-M-90 (vermelho).....	18
Figura 2: Região de modelagem. Polígono vermelho pontilhado representa os limites da grade do modelo hidrodinâmico.....	25
Figura 3: Detalhamento da representação da linha de costa pela grade do modelo hidrodinâmico. Os retângulos em vermelho representam as células consideradas como terra pelo modelo, e a linha branca mostra a linha de costa da região. A linha do Equador é apresentada com a cor preta.....	26
Figura 4: Campo de temperatura superficial (°C) no dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.....	27
Figura 5: Campo de salinidade superficial no dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.....	28
Figura 6: Campo de Elevação da Superfície Livre (m) do dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.....	28
Figura 7: Campo de Correntes superficiais (m/s) do dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.....	29
Figura 8: Representação esquemática das condições de contorno a serem definidas em um modelo de área limitada.....	30
Figura 9: Batimetria da grade do modelo numérico.....	31
Figura 10: Carta Náutica 040 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN).....	32
Figura 11: Batimetria do ETOPO1 (painel superior) e da Carta Náutica 040 (painel inferior) interpoladas para a grade do ROMS.....	33
Figura 12: Pontos de Grade do NCEP (pontos vermelhos) na região do domínio de modelagem (polígono vermelho pontilhado externo).....	35
Figura 13: Campo médio dos dados de temperatura do ar a 2 m da Reanálise I utilizados como forçante para o período chuvoso (a) e para o período seco (b).....	36
Figura 14: Campo médio dos dados de precipitação da Reanálise I utilizados como forçante para o período chuvoso (a) e para o período seco (b).....	37

Figura 15: Campo médio dos dados de umidade relativa do ar da Reanálise I utilizados como forçante para o período chuvoso (a) e para o período seco (b). .....	38
Figura 16: Campo médio dos dados de pressão atmosférica da Reanálise I utilizados como forçante para o período chuvoso (a) e para o período seco (b). .....	39
Figura 17: Campo médio dos dados de radiação de onda curta da Reanálise I utilizados como forçante para o período chuvoso (a) e para o período seco (b). .....	40
Figura 18: Campo médio dos dados de radiação de onda longa da Reanálise I utilizados como forçante para o período chuvoso (a) e para o período seco (b). .....	41
Figura 19: Campo médio dos dados de vento da Reanálise I utilizados como forçante para o período chuvoso (a) e para o período seco (b). .....	42
Figura 20: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente M2. Fonte (TPX07). .....	44
Figura 21: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente S2. Fonte (TPX07). .....	45
Figura 22: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente N2. Fonte (TPX07). .....	46
Figura 23: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente K2. Fonte (TPX07). .....	47
Figura 24: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente K1. Fonte (TPX07). .....	48
Figura 25: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente O1. Fonte (TPX07). .....	49
Figura 26: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente P1. Fonte (TPX07). .....	50
Figura 27: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente Q1. Fonte (TPX07). .....	51
Figura 28: Estações utilizadas ao longo de todo o globo. Fonte: Dai & Trenberth (2002). .....	54
Figura 29: Estações utilizadas em Dai & Trenberth (2002), que se encontram no domínio de modelagem. .....	55
Figura 30: Campo de salinidade superficial obtido do ROMS para o dia 28 de maio de 2013. .	57
Figura 31: Variação da energia cinética média em superfície ao longo da simulação. ....	58
Figura 32: Localização das estações maregráficas da FEMAR, utilizadas na avaliação da representação da maré no modelo. ....	60

Figura 33: Comparação entre a série maregráfica da estação da Plataforma Penrod (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo). .....	61
Figura 34: Comparação entre a série maregráfica da estação de Ponta dos Índios (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo). .....	62
Figura 35: Comparação entre a série maregráfica da estação da Ilha das Pacas (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo). .....	63
Figura 36: Comparação entre a série maregráfica da estação da Ilha dos Irmãos (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo). .....	64
Figura 37: Comparação entre a série maregráfica da estação de Mangunça (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo). .....	65
Figura 38: TSM média para Janeiro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior). .....	68
Figura 39: TSM média para Fevereiro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior). .....	69
Figura 40: TSM média para Março de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior). .....	70
Figura 41: TSM média para Abril de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior). .....	71
Figura 42: TSM média para Maio de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior). .....	72
Figura 43: TSM média para Junho de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior). .....	73
Figura 44: TSM média para Julho de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior). .....	74
Figura 45: TSM média para Agosto de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior). .....	75

Figura 46: TSM média para Setembro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	76
Figura 47: TSM média para Outubro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	77
Figura 48: TSM média para Novembro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	78
Figura 49: TSM média para Dezembro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	79
Figura 50: Localização do ponto de grade do WOA utilizado para as comparações. ....	81
Figura 51: Perfis médios de temperatura e salinidade obtidos do WOA13. ....	82
Figura 52: Trajetória descrita pelo derivador 01 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 01 e os resultados do ROMS (direita).....	84
Figura 53: Trajetória descrita pelo derivador 02 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 02 e os resultados do ROMS (direita).....	84
Figura 54: Trajetória descrita pelo derivador 03 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 03 e os resultados do ROMS (direita).....	84
Figura 55: Trajetória descrita pelo derivador 04 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 04 e os resultados do ROMS (direita).....	85
Figura 56: Trajetória descrita pelo derivador 05 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 05 e os resultados do ROMS (direita).....	85
Figura 57: Trajetória descrita pelo derivador 06 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 06 e os resultados do ROMS (direita).....	85
Figura 58: Trajetória descrita pelo derivador 07 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 07 e os resultados do ROMS (direita).....	86
Figura 59: Trajetória descrita pelo derivador 08 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 08 e os resultados do ROMS (direita).....	86
Figura 60: Trajetória descrita pelo derivador 09 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 09 e os resultados do ROMS (direita).....	86
Figura 61: Localização dos fundeios do WOCE utilizados para comparação. ....	88

Figura 62: Perfil vertical de correntes retirado do WOCE (acima) e do ROMS (abaixo). .....	89
Figura 63: Diagrama esquemático das correntes superficiais e subsuperficiais do Oceano Atlântico Tropical. Fonte: Neto (2005). .....	91
Figura 64: Campo médio de circulação para o mês de janeiro. ....	92
Figura 65: Campo médio de circulação para o mês de fevereiro. ....	93
Figura 66: Campo médio de circulação para o mês de março. ....	93
Figura 67: Campo médio de circulação para o mês de abril. ....	94
Figura 68: Campo médio de circulação para o mês de maio. ....	94
Figura 69: Campo médio de circulação para o mês de junho. ....	95
Figura 70: Campo médio de circulação para o mês de julho. ....	95
Figura 71: Campo médio de circulação para o mês de agosto. ....	96
Figura 72: Campo médio de circulação para o mês de setembro. ....	96
Figura 73: Campo médio de circulação para o mês de outubro. ....	97
Figura 74: Campo médio de circulação para o mês de novembro. ....	97
Figura 75: Campo médio de circulação para o mês de dezembro. ....	98
Figura 76: Esquema simplificado dos dados de entrada, processos e dados de saída (resultados) usados e obtidos pelo modelo OSCAR. Adaptado de Reed (2001). .....	101
Figura 77: Esquema da degradação dos principais componentes do óleo. Adaptado de Reed (2001). .....	109
Figura 78: Esquema geral de plumas de <i>blowout</i> de óleo em profundidade. Adaptado de Lindersen (2013). .....	117
Figura 79: Ilustração de uma simulação de <i>blowout</i> no fundo oceânico com o OSCAR. O mapa mostra a distribuição de partículas representando o óleo em superfície (círculos em cinza) e as partículas representando o óleo na coluna d'água (pontos pretos e marrons). .....	119
Figura 80: Representação do limite da grade de óleo (linha vermelha tracejada). ....	128
Figura 81: A grade de batimetria utilizada na simulação. ....	129



Figura 82: Localização dos pontos de grade do NCEP (em vermelho) em relação ao ponto de vazamento. Ponto em azul é o mais próximo da região de vazamento. ....	133
Figura 83: Rosa dos ventos para os meses de janeiro a junho para o ponto mais próximo dos locais de vazamento. ....	134
Figura 84: Rosa dos ventos para os meses de julho a dezembro para o ponto mais próximo dos locais de vazamento. ....	135
Figura 85: Rosa de correntes para os meses de janeiro a junho para o ponto mais próximo do local de vazamento do bloco FZA-M-90. ....	138
Figura 86: Rosa de correntes para os meses de julho a dezembro para o ponto mais próximo do local de vazamento do bloco FZA-M-90. ....	139
Figura 87: Perfis de salinidade e temperatura para o ponto de vazamento do bloco FZA-M-90. ....	142
Figura 88: Curva do Erro Médio Quadrático (RMSE). ....	143
Figura 89: Derivada da curva do Erro Médio Quadrático (RMSE). ....	144
Figura 90: Mapa de probabilidade de presença de óleo para um ponto de risco na Bacia da Foz do Amazonas com 300 e 500 simulações. ....	145
Figura 91: Histograma de diferença de probabilidade de presença de óleos nos casos de 300 e 500 simulações. Valor positivo representa maior probabilidade no caso de 500 simulações. Valor negativo representa maior probabilidade no caso de 300 simulações. ....	147
Figura 92: Histograma de diferença absoluta de probabilidade de presença de óleos nos casos de 300 e 500 simulações. ....	148
Figura 93: Histograma acumulado de diferença absoluta de probabilidade de presença de óleos nos casos de 300 e 500 simulações. ....	149
Figura 94: Gráfico do tipo box-plot. ....	151
Figura 95: Fluxograma de apresentação dos resultados probabilístico. ....	152
Figura 96: Fluxograma de apresentação dos resultados determinísticos. ....	153
Figura 97: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m <sup>3</sup> no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias). ....	155

Figura 98: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m <sup>3</sup> no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias). ....	156
Figura 99: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 8 m <sup>3</sup> no cenário de verão a partir do bloco FZA-M-90. ....	157
Figura 100: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m <sup>3</sup> no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias). .	158
Figura 101: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m <sup>3</sup> no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias). .	159
Figura 102: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 8 m <sup>3</sup> no cenário de inverno a partir do bloco FZA-M-90. ....	160
Figura 103: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m <sup>3</sup> no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias).161	
Figura 104: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 200 m <sup>3</sup> no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias). ....	162
Figura 105: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 200 m <sup>3</sup> no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias).163	
Figura 106: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 200 m <sup>3</sup> no cenário de verão a partir do bloco FZA-M-90. ....	164
Figura 107: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m <sup>3</sup> no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias). ....	165
Figura 108: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 200 m <sup>3</sup> no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias). ....	166
Figura 109: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para vazamento de 200 m <sup>3</sup> , no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias). ....	167
Figura 110: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 200 m <sup>3</sup> no cenário de inverno a partir do bloco FZA-M-90. ....	168

Figura 111: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias. ....	169
Figura 112: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias.....	170
Figura 113: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três profundidades (100, 500 e 1.000 metros), para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias.....	171
Figura 114: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três profundidades (2.000, 2.400 e 2.500 metros), para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias.....	172
Figura 115: Mapa de probabilidade de presença de óleo no fundo marinho, para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias. ....	173
Figura 116: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para um vazamento de <i>blowout</i> contínuo de 30 dias no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias. ....	174
Figura 117: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de pior caso no cenário de verão a partir do bloco FZA-M-90. ....	175
Figura 118: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias. ....	176
Figura 119: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias.....	177
Figura 120: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três profundidades (100, 500 e 1.000 metros), para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias.....	178
Figura 121: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três profundidades (2.000, 2.400 e 2.500 metros), para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias.....	179

Figura 122: Mapa de probabilidade de presença de óleo no fundo marinho, para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias. ....	180
Figura 123: Trajetórias dos derivadores do GDP (84 derivadores) a partir da vizinhança do ponto de vazamento. A escala de cor está relacionada à duração da trajetória. ....	181
Figura 124: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias .....	182
Figura 125: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de pior caso no cenário de inverno a partir do bloco FZA-M-90. ....	183
Figura 126: Rosa dos ventos para o período de simulação da situação de menor tempo de toque na costa. ....	186
Figura 127: Rosa de corrente para o período de simulação da situação de menor tempo de toque na costa. ....	187
Figura 128: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 12 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 46.742 m <sup>3</sup> a partir do bloco FZA-M-90.....	189
Figura 129: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 36 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 46.742 m <sup>3</sup> a partir do bloco FZA-M-90.....	190
Figura 130: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 60 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 46.742 m <sup>3</sup> a partir do bloco FZA-M-90.....	191
Figura 131: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 46.742 m <sup>3</sup> a partir do bloco FZA-M-90. ....	192
Figura 132: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Resultado de espessura	

---

em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 46.742 m <sup>3</sup> a partir do bloco FZA-M-90.....	193
Figura 133: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 46.742 m <sup>3</sup> a partir do bloco FZA-M-90.....	194
Figura 134: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 46.742 m <sup>3</sup> a partir do bloco FZA-M-90.....	195
Figura 135: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície. Vazamento de 46.742 m <sup>3</sup> a partir do bloco FZA-M-90.....	196
Figura 136: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície. Vazamento de 46.742 m <sup>3</sup> a partir do bloco FZA-M-90.....	197
Figura 137: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condição crítica de menor tempo de chegada. Volume de 46.742 m <sup>3</sup> .....	198
Figura 138: Área superficial da mancha de óleo e a massa de óleo no mar durante a simulação da trajetória em condição crítica de menor tempo de chegada.....	200

## Índice das tabelas

Tabela 1: Ponto de vazamento na Bacia da Foz do Amazonas. ....	18
Tabela 2: Parâmetros e constantes utilizadas no modelo hidrodinâmico. ....	24
Tabela 3: Estações utilizadas em Dai & Trenberth (2002), que se encontram no domínio de modelagem. Fonte: Dai & Trenberth (2002). ....	56
Tabela 4: Comparação estatística entre os dados de elevação do ROMS e os dados medidos. ....	66
Tabela 5: Datas e coordenadas dos pontos iniciais e finais das trajetórias dos derivadores. ....	83
Tabela 6: Índice de Wilmot das comparações modelo/derivadores. ....	87
Tabela 7: Resumo dos cenários de vazamento simulados. ....	100
Tabela 8: Equações de regressão para estimativa dos parâmetros Koc e Kow para diferentes componentes químicos. Fonte: Reed, 2001. ....	111
Tabela 9: Parâmetros físicos e químicos utilizados no modelo de óleo. ....	120
Tabela 10: Constantes físicas utilizadas no modelo de óleo. ....	121
Tabela 11: Parâmetros numéricos utilizados no modelo de óleo. ....	122
Tabela 12: Características do óleo utilizado nas simulações. ....	125
Tabela 13: Curva de destilação do óleo utilizado no estudo. ....	126
Tabela 14: Componentes calculados pelo OSCAR a partir da curva de destilação. ....	127
Tabela 15: Ocorrência mensal de direção dos ventos para o ponto mais próximo do local do vazamento. ....	136
Tabela 16: Ocorrência mensal de intensidade dos ventos para o ponto mais próximo do local do vazamento. ....	136
Tabela 17: Ocorrência mensal de direção das correntes para o ponto mais próximo do local do vazamento do bloco FZA-M-90. ....	140
Tabela 18: Ocorrência mensal de intensidade das correntes para o ponto mais próximo do local do vazamento do bloco FZA-M-90. ....	140

---

Tabela 19: Massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas localidades com possibilidade de serem alcançados em um evento derrame de grande volume (46.742 m <sup>3</sup> ) a partir do bloco FZA-M-90, nos cenários de verão e inverno.....	184
Tabela 20: Informações da simulação determinística crítica considerada para um evento derrame de grande volume (46.742 m <sup>3</sup> ) a partir do bloco FZA-M-90. ....	185
Tabela 21: Ocorrência conjunta entre direção e intensidade dos ventos para o ponto mais próximo do local do vazamento para o período da condição de menor tempo de toque na costa. ....	186
Tabela 22: Estatística do vento para o período da condição de menor tempo de toque na costa. ....	186
Tabela 23: Ocorrência conjunta entre direção e intensidade de corrente para o ponto mais próximo do local do vazamento para o período da condição de menor tempo de toque na costa. ....	187
Tabela 24: Estatística de corrente para o período da condição de menor tempo de toque na costa. ....	188
Tabela 25: Balanço de massa do óleo durante a simulação em valores percentuais e de massa de óleo. ....	199
Tabela 26: Área superficial, massa de óleo e a espessura máxima da mancha de óleo e a massa de óleo do óleo durante a simulação. ....	200

## Equipe técnica

---

**Nome: André Luis Santi Coimbra de Oliveira**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 5967357

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Modelagem Hidrodinâmica

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

**Nome: Felipe Lobo Mendes Soares**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 3811578

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Modelagem Hidrodinâmica

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

**Nome: Henery Ferreira Garção**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 3790998

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Modelagem de Dispersão de Óleo

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

**Nome: Lívia Sant'Angelo Mariano**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 6005736

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Modelagem de Dispersão de Óleo

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---



---

**Nome: Flávia Pozzi Pimentel**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 2473071

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Modelagem de Dispersão de Óleo

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

**Nome: Marcelo Montenegro Cabral**

---

Registro no Conselho de Classe: 2010110225 - CREA/RJ

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 5621594

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Todas

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

# 1. Introdução

O presente relatório descreve os resultados obtidos nas modelagens numéricas do transporte de óleo no mar para os cenários acidentais de vazamentos localizado em um ponto de risco no bloco FZA-M-90 (Vértice Sudoeste), Bacia da Foz do Amazonas, em dois períodos sazonais. A localização do ponto de vazamento e do bloco é apresentada na Figura 1 e as coordenadas do ponto na Tabela 1.

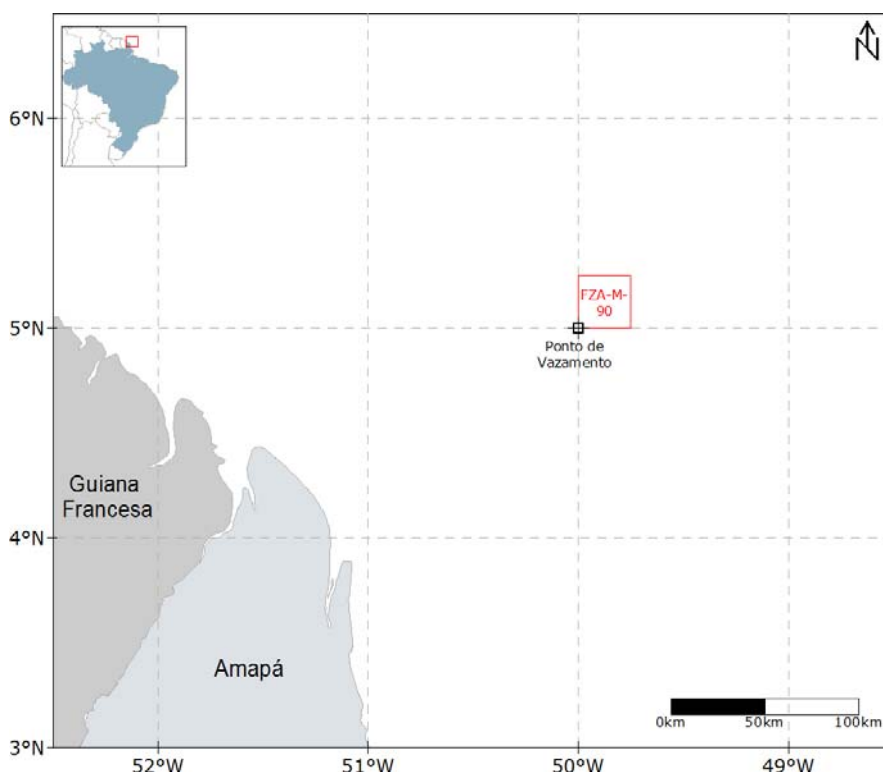


Figura 1: Localização do ponto de vazamento (preto), em relação ao bloco FZA-M-90 (vermelho).

Tabela 1: Ponto de vazamento na Bacia da Foz do Amazonas.

Bloco do ponto de vazamento	Coordenadas	Datum
FZA-M-90	4°59'58,89" S e 50°0'1,58" W	SIRGAS 2000

A posição do vazamento foi definida de maneira conservadora, considerando que o ponto escolhido é o vértice que apresenta a menor distância do bloco FZA-M-90 até a costa.

O estudo foi dividido em duas etapas. A primeira consiste na análise das características meteorológicas e simulações hidrodinâmicas da região, mais especificamente os parâmetros

capazes de afetar o comportamento do óleo derramado (item Modelagem Hidrodinâmica). Na segunda etapa foi realizada a simulação da dispersão do óleo, para as condições meteo-oceanográficas características, estimando o comportamento do óleo a ser derramado em cada um deles (item Modelagem de Dispersão de Óleo).

A separação das condições meteo-oceanográficas é realizada com o objetivo de se estabelecer dois padrões sazonais que reflitam em comportamento diverso da deriva do óleo na região de estudo. Esta separação é fundamentada nos padrões mensais apresentados pelos dados de vento e corrente utilizados no estudo de modelagem, os quais são os responsáveis pelo transporte de óleo no mar. As denominações adiante adotadas de períodos de verão e inverno objetivam apenas identificar os dois padrões sazonais selecionados e não seguem quaisquer convenções de verão e inverno, seja do hemisfério norte ou sul. A definição dos períodos sazonais adotados nesse estudo é exposta no item 3.1.4.3.

Destaca-se ainda que a separação sazonal adotada na Modelagem de Dispersão de Óleo não reflete necessariamente a mesma separação apresentada no estudo de Meio Físico, no qual considera além de vento e corrente, outras variáveis meteorológicas e oceanográficas, como temperatura do ar, precipitação, umidade, entre outros. Dessa forma, no estudo de Meio Físico a separação sazonal mais apropriada para região é destacar em período seco e período chuvoso.

## 2. Modelagem Hidrodinâmica

### 2.1. Introdução

Para simular o transporte de qualquer material no oceano é necessário conhecer o comportamento das correntes marinhas da região em questão. Para tal, pode-se recorrer à técnica conhecida como fluidodinâmica computacional, que consiste em reproduzir o comportamento de fluidos em resposta às forçantes atuantes no meio, através da solução numérica das equações que governam os processos envolvidos. Com isso, podem ser obtidos resultados sinóticos e sob diferentes condições de contorno e iniciais, como por exemplo, condições de verão e inverno, de maré de sizígia e quadratura etc.

A capacidade de simular diferentes condições, aliada à obtenção de resultados sinóticos em quatro dimensões (as três do espaço e o tempo), faz da fluidodinâmica computacional uma opção interessante, e em determinados casos, como em regiões com pouca ou nenhuma

medição, a única para obter os resultados necessários à modelagem de transporte de materiais no oceano. É imprescindível, no entanto, a realização de comparações dos resultados obtidos pelo modelo hidrodinâmico com dados observados na região, para se obter uma medida da representatividade do modelo em relação ao observado.

O presente relatório apresenta uma descrição das simulações hidrodinâmicas e seus resultados, que serão utilizados nas modelagens de transporte de óleo do Bloco FZA-M-90.

## 2.2. Modelo Numérico Utilizado

Para as simulações hidrodinâmicas na região do Bloco FZA-M-90 foi utilizado o modelo *Regional Ocean Modeling System* - ROMS (HAIDVOGEL *et al.*, 2008). O ROMS é um modelo oceânico de superfície livre, coordenadas seguidoras de terreno e equações primitivas, utilizado amplamente pela comunidade científica em uma vasta gama de aplicações (por exemplo, HAIDVOGEL *et al.*, 2000; MARCHESIELLO *et al.*, 2003; PELIZ *et al.*, 2003). Os algoritmos não lineares que formam o cerne computacional do ROMS são descritos em detalhes em Shchepetkin & McWilliams (2003, 2005). O ROMS inclui modelos acoplados para processos biogeoquímicos, bio-ópticos, transporte de sedimentos e também inclui diversos regimes de mistura vertical (WARNER *et al.*, 2005), níveis múltiplos de aninhamento e grades compostas.

As equações hidrostáticas primitivas de momento são resolvidas utilizando um passo de tempo dividido explicitamente e modos barotrópico (bidimensional) e baroclínico (tridimensional) acoplados. Um número finito de passos de tempo barotrópicos é efetuado em cada passo de tempo baroclínico para resolver as equações de superfície livre e momento verticalmente integrado. No intuito de evitar erros associados com o *aliasing* de frequências resolvidas no modo barotrópico mas não no baroclínico, são realizadas médias temporais nos campos barotrópicos antes de serem trocados com os valores obtidos com um passo baroclínico de maior duração. Um filtro de tempo cossenoidal, centrado no novo nível de tempo, é usado para fazer as médias dos campos barotrópicos (SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2005). Adicionalmente, o passo de tempo separado é forçado a manter a conservação de volume e a preservação de consistência, propriedades que são necessárias para as equações de traçadores (p.ex. temperatura e salinidade) (SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2005).

Atualmente, todas as equações em duas e três dimensões são discretizadas no tempo usando um algoritmo de passo de tempo previsor (*Leap-Frog*) e corretor (Adams-Molton) de terceira ordem, que é altamente robusto e estável. A estabilidade reforçada pelo esquema permite

passos de tempo mais longos, por um fator de aproximadamente quatro, o qual mais do que compensa o custo elevado do algoritmo previsor-corretor.

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

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

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

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

A parametrização vertical de mistura no ROMS pode ser tanto por esquemas de fechamento locais, como não-locais. Os esquemas de fechamento locais são baseados nas equações de energia cinética turbulenta de nível 2,5 de Mellor & Yamada (1982) e na parametrização de Escala Genérica de Dimensão (EGD) (UMLAUF & BUCHARD, 2003). O esquema de fechamento não-local é baseado na formulação da camada limite, perfil-K, definida por Large *et al.* (1994). O esquema de perfil-K tem sido expandido para incluir tanto os limites de camadas de superfície quanto os de fundo. O EGD é um modelo de turbulência de duas equações que permite uma ampla variedade de fechamentos de mistura vertical, incluindo os esquemas k-kl (Mellor-Yamada level 2,5), k-e e k-w. Muitas funções de estabilidade têm sido empregadas para favorecer a flexibilidade. Um estudo recente (WARNER *et al.*, 2005a) avaliou a performance desses fechamentos de turbulência no ROMS, em aplicações de transporte de sedimentos idealizado. Além disso, existe um esquema de camada limite de fundo onda/corrente que provoca o estresse de fundo (STYLES; GLENN, 2000) e o transporte de sedimentos, que tem ganhado importância em aplicações costeiras.

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

O ROMS possui um código altamente moderno e modular escrito em F90 e 95. Utiliza pré-processamento C para ativar as diversas opções físicas e numéricas. Muitos padrões de códigos têm sido estabelecidos para facilitar a leitura, manutenção e portabilidade do modelo. Todas as variáveis de estado do modelo são dinamicamente alocadas e passadas como argumento das rotinas computacionais.

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

Equação da continuidade:

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

Equação da conservação da quantidade de movimento na direção zonal:

$$\frac{\partial U D}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial U V D}{\partial y} + \frac{\partial U \omega}{\partial \sigma} - f V D + g D \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{g D^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma_0} \left[ \frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] + F_x \quad (2)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento na direção meridional:

$$\frac{\partial V D}{\partial t} + \frac{\partial U V D}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V \omega}{\partial \sigma} + f U D + g D \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{g D^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma_0} \left[ \frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] + F_y \quad (3)$$

Equação da conservação de calor:

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

Equação da conservação de sal:

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

Equação de estado da água do mar:

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

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

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

Todas as constantes e os parâmetros físicos utilizados no modelo hidrodinâmico são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros e constantes utilizadas no modelo hidrodinâmico.

Parâmetro	Valor	Descrição
<b>VISC2 (m<sup>2</sup>/s)</b>	5,0	Coeficiente de viscosidade horizontal
<b>AKT_BAK (m<sup>2</sup>/s)</b>	1,0x10 <sup>-6</sup>	Coeficiente vertical de mistura para traçadores
<b>AKV_BAK (m<sup>2</sup>/s)</b>	1,0x10 <sup>-5</sup>	Coeficiente vertical de mistura de momentum
<b>AKK_BAK (m<sup>2</sup>/s)</b>	5,0x10 <sup>-6</sup>	Coeficiente vertical de mistura para energia cinética turbulenta
<b>RDRG (m/s)</b>	3,0x10 <sup>-4</sup>	Coeficiente linear de atrito com o fundo
<b>RDRG2</b>	3,0x10 <sup>-3</sup>	Coeficiente quadrático de atrito com o fundo
<b>ZOB (m)</b>	2,0x10 <sup>-2</sup>	Rugosidade do fundo
<b>ZOS (m)</b>	2,0x10 <sup>-2</sup>	Rugosidade da superfície

### 2.3. Domínio do Modelo

Para simular a hidrodinâmica da região de influência do Bloco FZA-M-90, foi projetada uma grade numérica (Figura 2), que se estende de 3,75° S a 14,5° N, e 42,0° W a 61,5° W. O domínio de modelagem dessa grade abrange toda a costa norte brasileira situada entre o norte do Rio Grande do Norte e o norte do Amapá, englobando a Plataforma Continental, o talude e parte das bacias oceânicas adjacentes.

A resolução da grade é de 0,0625° (~6,5 km) e foi escolhida para que as principais feições batimétricas e da linha de costa pudessem ser reproduzidas de forma satisfatória (Figura 3) e ao mesmo tempo permitir um desempenho computacional compatível. Essa escolha resultou em uma grade com 92.648 pontos em cada nível horizontal (camada sigma), com 30 níveis verticais (camadas sigma).



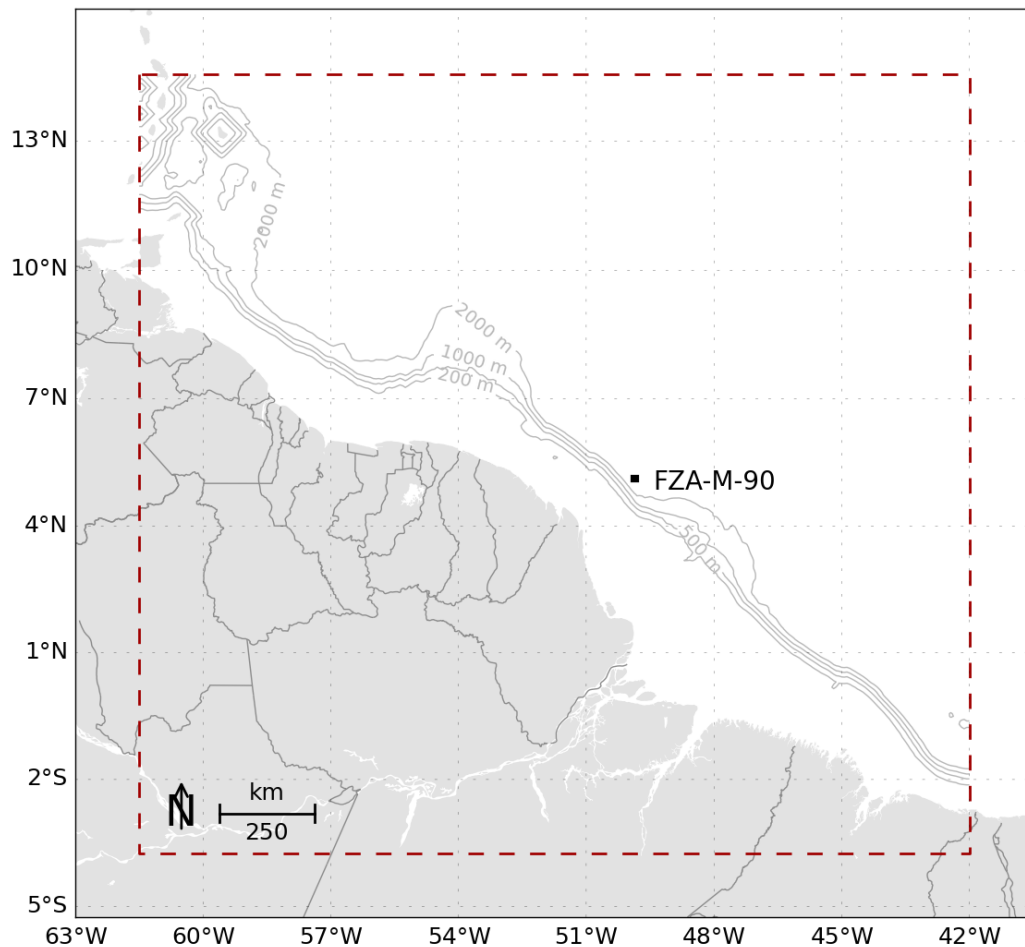


Figura 2: Região de modelagem. Polígono vermelho pontilhado representa os limites da grade do modelo hidrodinâmico.

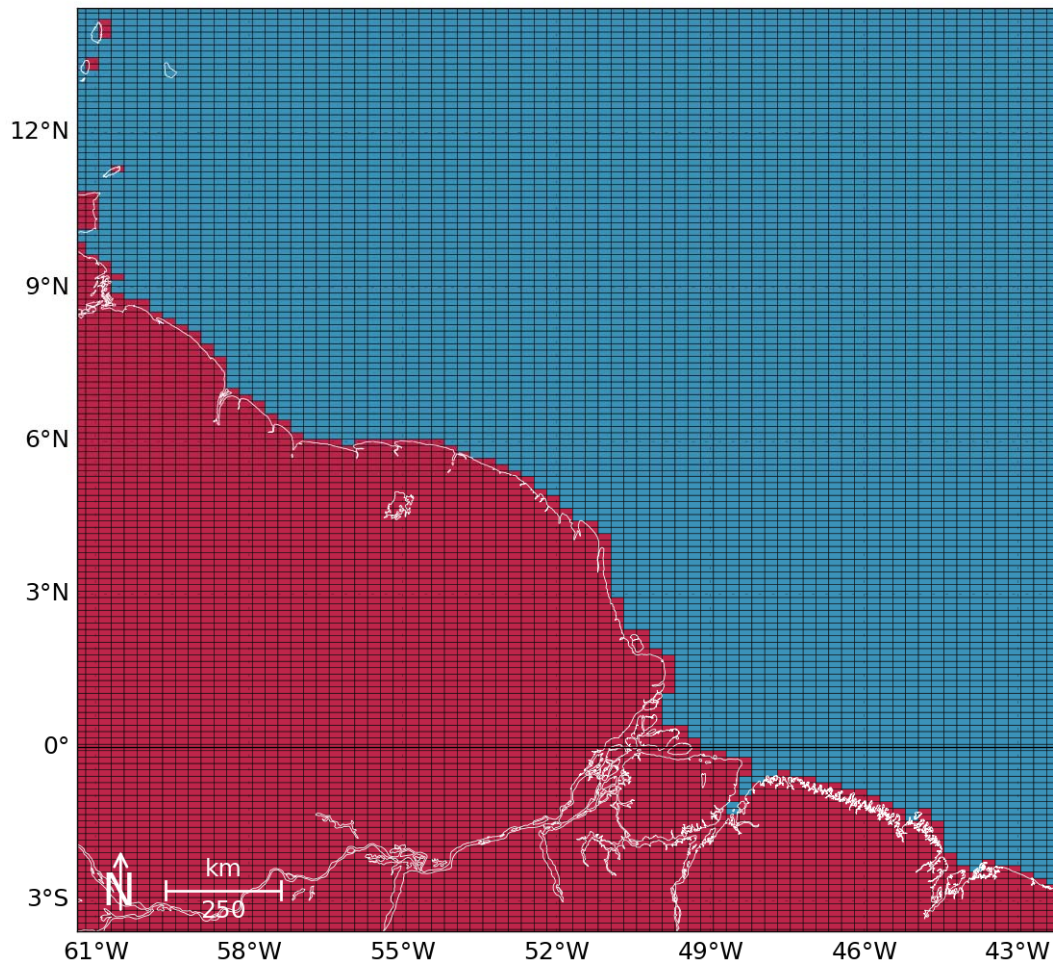


Figura 3: Detalhamento da representação da linha de costa pela grade do modelo hidrodinâmico. Os retângulos em vermelho representam as células consideradas como terra pelo modelo, e a linha branca mostra a linha de costa da região. A linha do Equador é apresentada com a cor preta.

## 2.4. Condições Iniciais

A situação ideal para se inicializar um modelo seria obter, in situ, dados de temperatura, salinidade e correntes em cada ponto de grade (nas três dimensões), observados simultaneamente, o que é inviável. Desta forma, deve-se procurar uma alternativa, como a obtenção de informações de bancos de dados que contenham o máximo de observações simultâneas com a resolução mais próxima à grade do modelo em questão.

Como condição inicial e de contorno para o sistema de previsão oceânica para o Bloco FZA-M-90, foram utilizados os dados de temperatura, salinidade, altura da superfície do mar e de correntes da Análise Global do Projeto MyOcean. Este projeto disponibiliza semanalmente os

resultados da Análise e previsão oceânica global, por um período de 14 dias, com resolução espacial de 1/4° e temporal de 24 h. O modelo oceânico global utilizado no MyOcean é o NEMO (*Nucleus for European Models of the Ocean*), forçado pelos campos atmosféricos obtidos da Análise do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*. O NEMO assimila dados de correntes, altura da superfície e TSM obtidos de satélites, além de dados de temperatura e salinidade obtidos in situ passando por um criterioso controle de qualidade (REGNIER *et al.*, 2013).

O modelo foi inicializado com os resultados da simulação do MyOcean, interpolados para a resolução espacial (vertical e horizontal) da grade usada no ROMS. Exemplos dos campos iniciais com dados do MyOcean fornecidos ao são apresentados da Figura 4 a Figura 7.

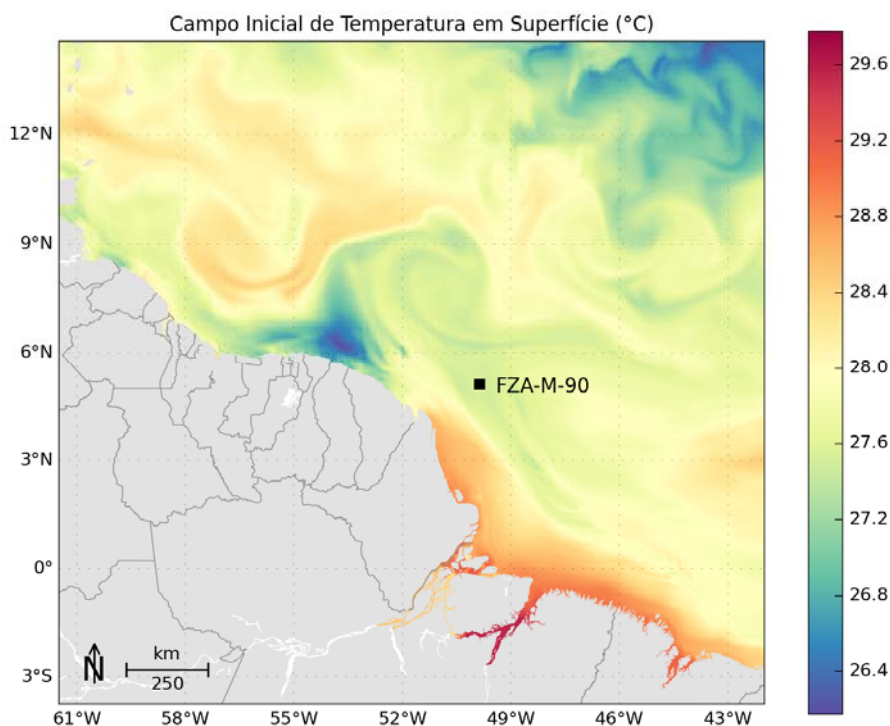


Figura 4: Campo de temperatura superficial (°C) no dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.

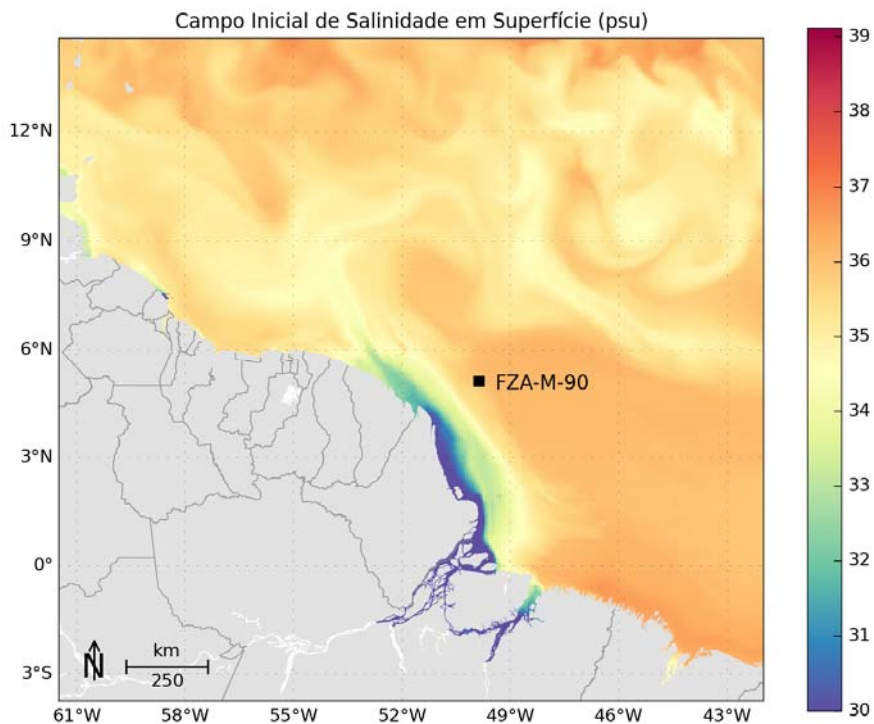


Figura 5: Campo de salinidade superficial no dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.

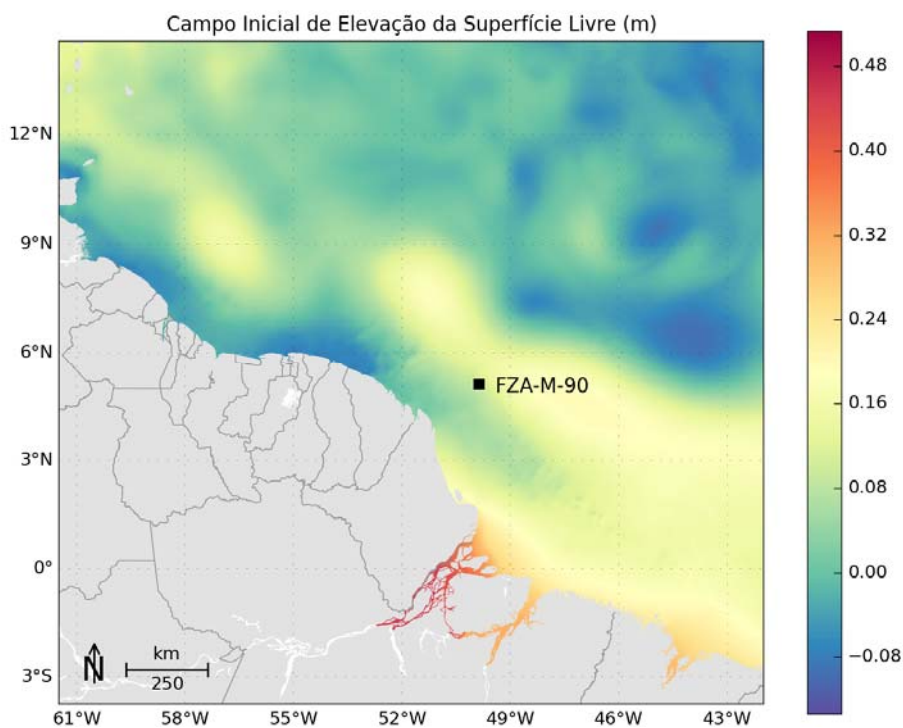


Figura 6: Campo de Elevação da Superfície Livre (m) do dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.

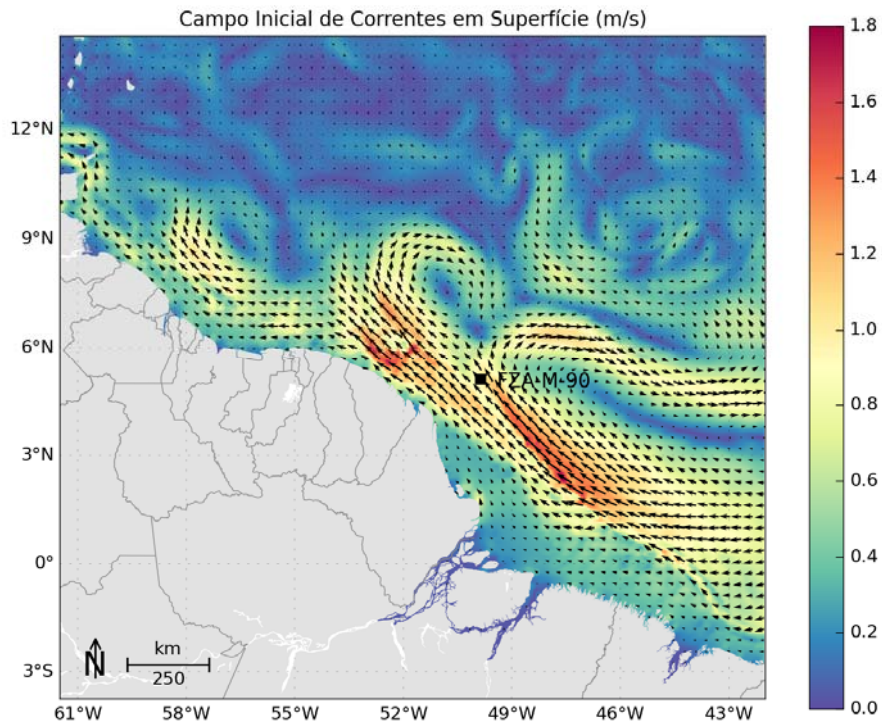


Figura 7: Campo de Correntes superficiais (m/s) do dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.

O modelo foi configurado para simular as correntes da região no período entre dezembro de 2012 e fevereiro de 2014.

## 2.5. Condições de Contorno

Quando se utiliza um modelo de área limitada, como é o caso do ROMS, um dos fatores primordiais é uma escolha adequada das condições de contorno do modelo (Figura 8). Tal escolha deve ser realizada com bastante critério, uma vez que os resultados serão consequência das condições escolhidas.

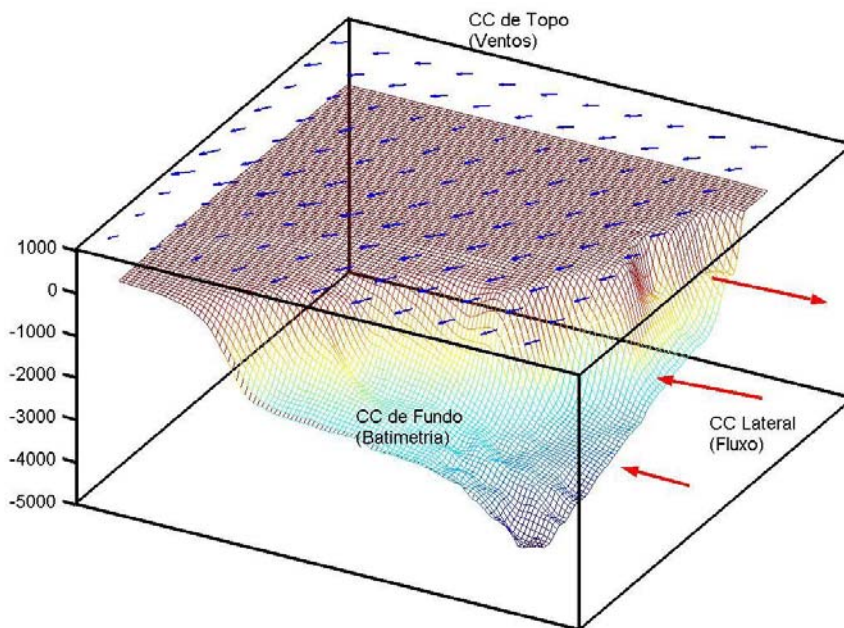


Figura 8: Representação esquemática das condições de contorno a serem definidas em um modelo de área limitada.

### 2.5.1 Condição de Contorno de Fundo

Para a confecção da matriz de batimetria do modelo da grade-mãe, foram utilizados os dados da base global ETOPO1 (AMANTE; EAKINS, 2009). O ETOPO 1 é um modelo global do relevo da superfície terrestre, com resolução espacial de 1 minuto de arco, que integra topografia e batimetria do oceano. Após interpolação cúbica, obteve-se a matriz de topografia do fundo para a grade utilizada no modelo hidrodinâmico (Figura 9).

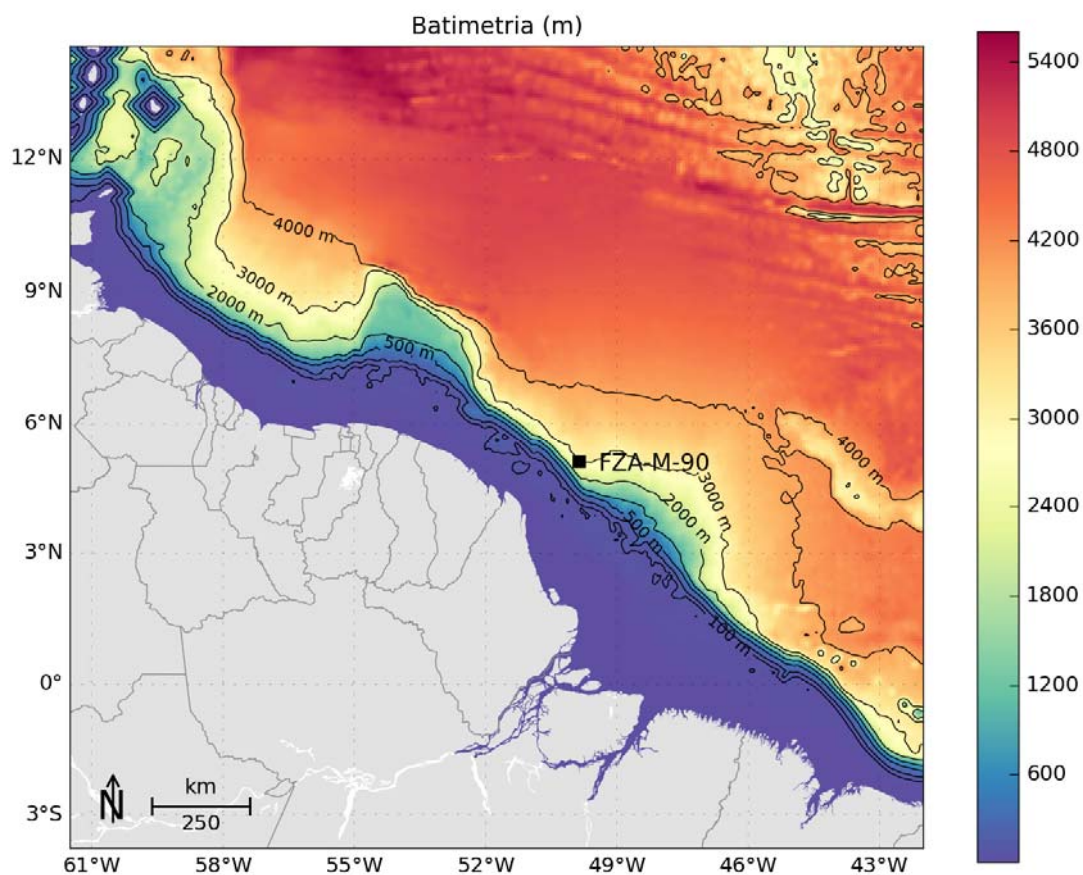


Figura 9: Batimetria da grade do modelo numérico.

É fundamental que se tenha uma topografia de fundo representativa da região para que o modelo hidrodinâmico possa simular de forma adequada a circulação. Para comparar a batimetria do modelo hidrodinâmico, foi utilizada a carta náutica nº 40 (Da Baía do Oiapoque ao Rio Parnaíba) da Diretoria de Hidrografia e Navegação (Figura 10). Essa é a carta náutica disponível que apresenta maior cobertura em relação à área de modelagem, compreendendo toda a costa brasileira usada no modelo hidrodinâmico.

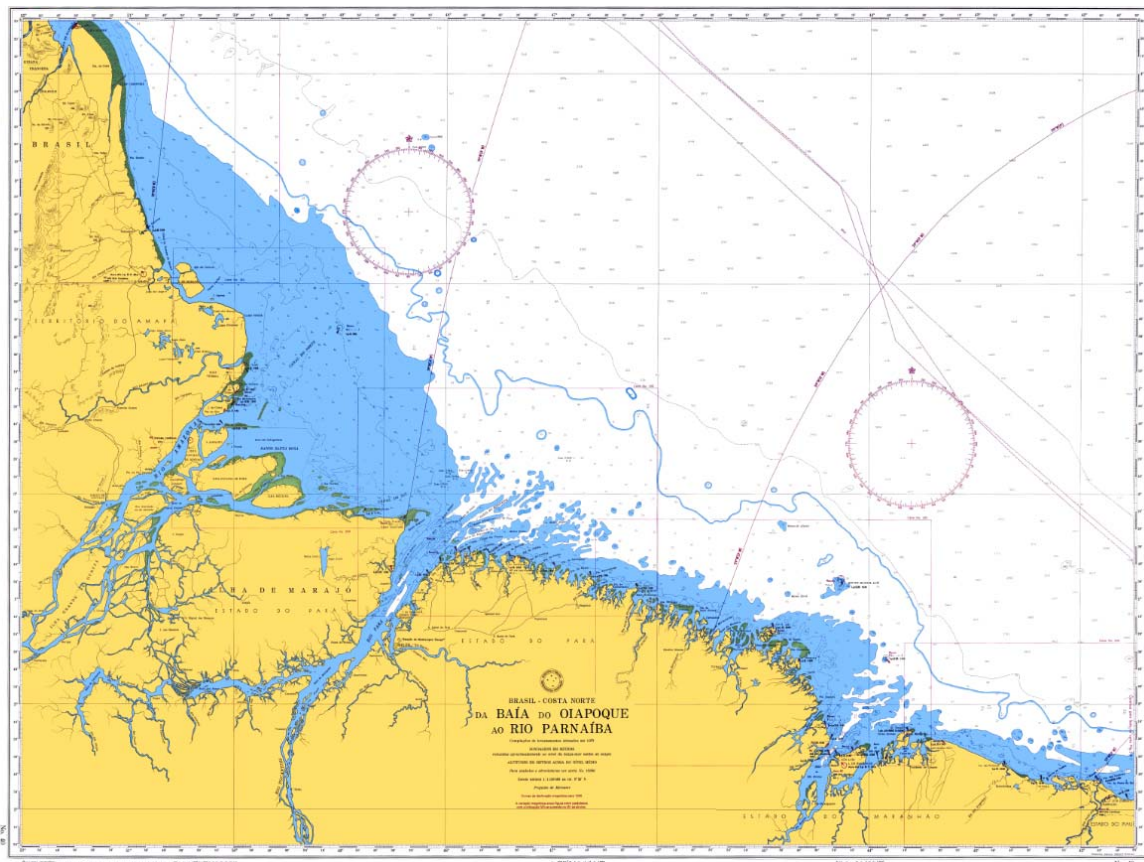


Figura 10: Carta Náutica 040 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN).

Os dados da carta náutica digitalizada foram interpolados para a grade do modelo hidrodinâmico, da mesma forma que os dados do ETOPO1 (interpolação cúbica). Na Figura 11 são apresentadas as batimetrias do ETOPO1 e da carta náutica da DHN interpoladas para a grade do ROMS. Pode-se observar que os dados do ETOPO1 são bastante próximos aos informados na carta náutica e podem ser considerados adequados para utilização como condição de contorno de fundo do modelo hidrodinâmico.



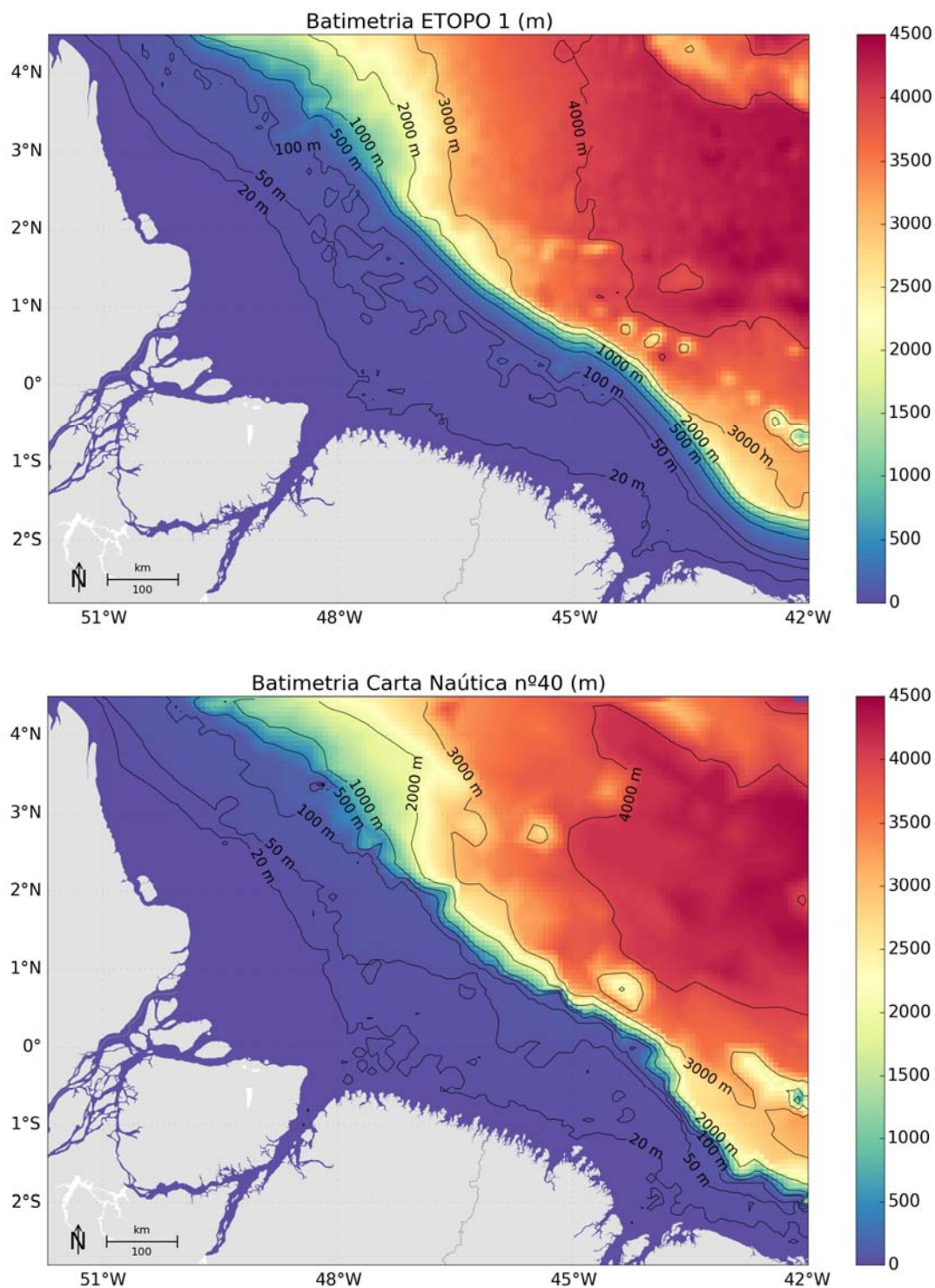


Figura 11: Batimetria do ETOPO1 (painel superior) e da Carta Náutica 040 (painel inferior) interpoladas para a grade do ROMS.

## 2.5.2 Condição de Contorno de Superfície

No ROMS, os fluxos na interface oceano/atmosfera necessários para forçar o modelo podem ser inseridos de duas formas. O usuário pode fornecer dados com o fluxo total de calor, ou ativar a camada limite (oceano/atmosfera) do modelo para calcular tanto o fluxo total de calor quanto o atrito do vento através dos campos atmosféricos. Essa camada limite é baseada na parametrização das trocas ar/mar descrita por Liu *et al.* (1979) e calculada pela rotina `bulk_flux.F`, que foi adaptada do código do COARE, descrito em Fairall *et al.* (1996). Os fluxos turbulentos de vento, calor e mistura são calculados usando a teoria de similaridade Monin-Obukhov (LIU *et al.*, 1979).

Se a camada limite oceano/atmosfera é ativada, como neste caso, o usuário necessita informar os seguintes campos atmosféricos superficiais:

- » Componente zonal do vento;
- » Componente meridional do vento;
- » Temperatura do ar;
- » Pressão atmosférica;
- » Umidade relativa do ar;
- » Taxa de precipitação;
- » Radiação de onda curta;
- » Radiação de onda longa.

Estes campos foram obtidos através da Reanálise I do NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*), com resolução espacial de 1,8° e temporal de 6 horas, para todo período de modelagem (dezembro de 2012 a fevereiro de 2014). Na Figura 12 pode ser observada a distribuição espacial dos pontos de grade do NCEP na região do domínio de modelagem.

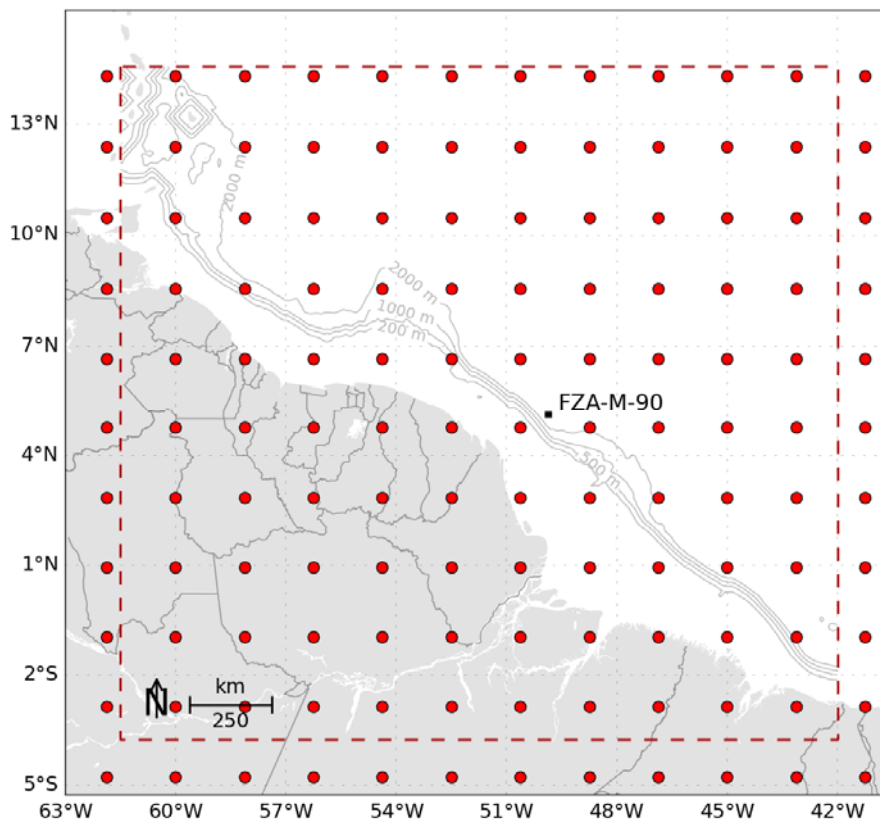
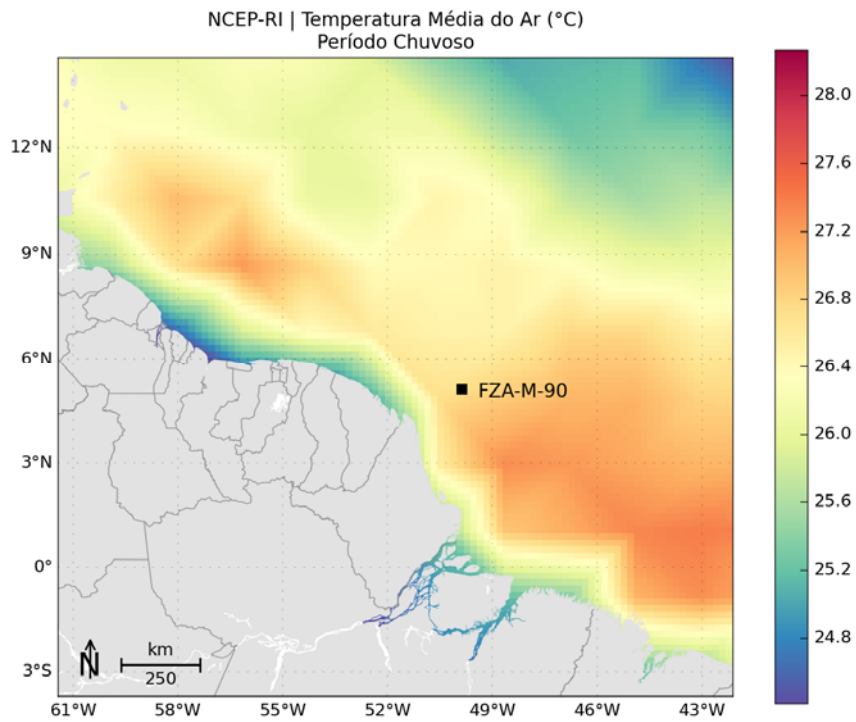


Figura 12: Pontos de Grade do NCEP (pontos vermelhos) na região do domínio de modelagem (polígono vermelho pontilhado externo).

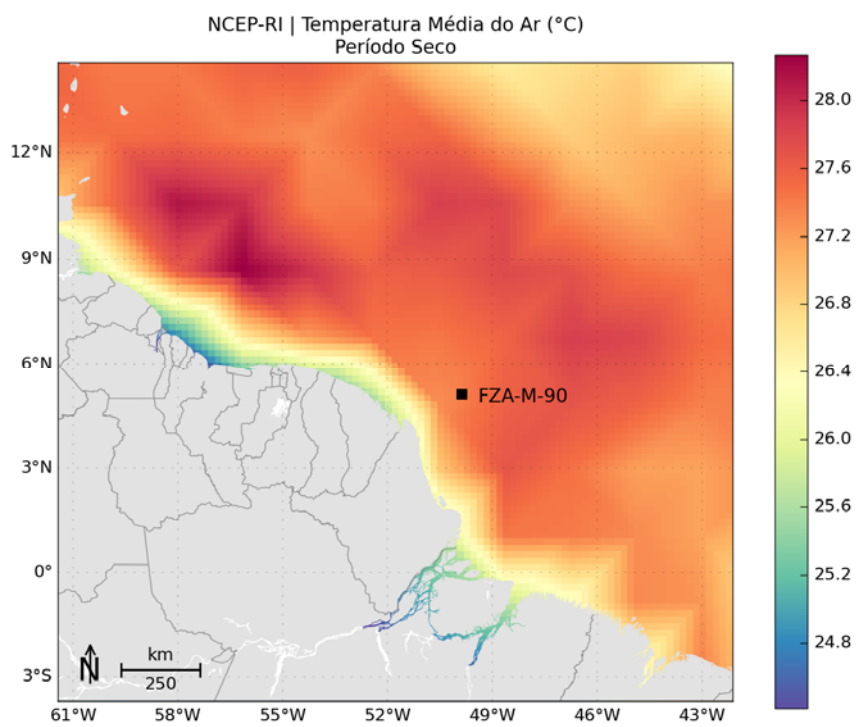
A base de dados conhecida como “Reanálises do NCEP” foi originada a partir de uma cooperação entre o NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) e o NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), com intuito de produzir inicialmente uma rede de 40 anos de dados meteorológicos globais com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

Esta base de dados foi utilizada por se tratar de uma reanálise que assimila dados meteoceanográficos de diversas fontes, apresenta resolução espacial e temporal compatíveis com a natureza do estudo, e disponibiliza informações de todas as 8 variáveis meteorológicas necessárias para forçar o ROMS.

Como exemplo dos campos atmosféricos utilizados como condição de contorno de topo do modelo, da Figura 13 a Figura 19, são apresentados os campos médios de cada variável, calculados para o período chuvoso (janeiro a junho) e para o período seco (julho a dezembro).

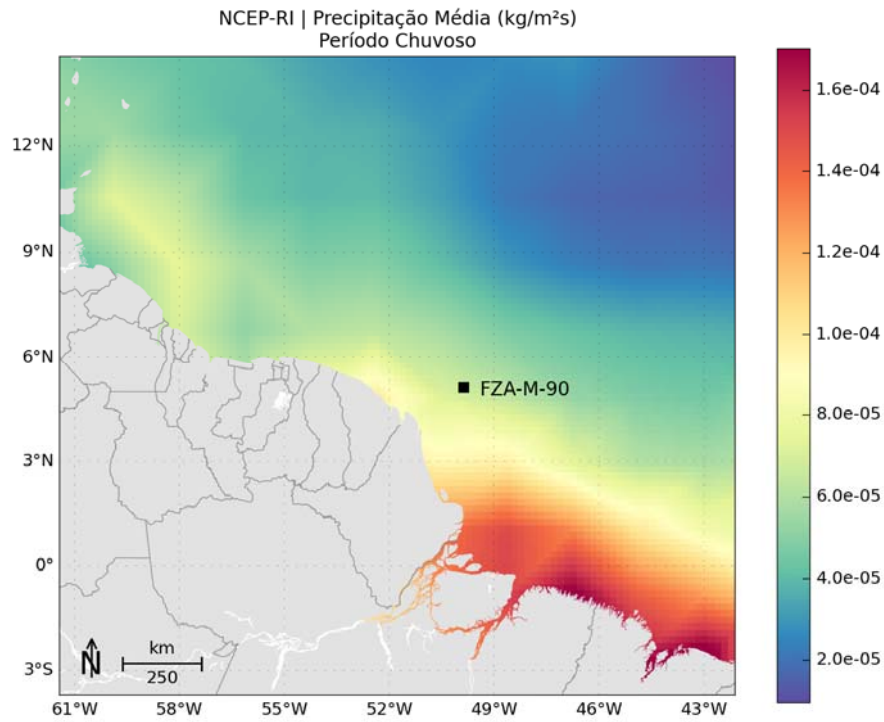


(a)

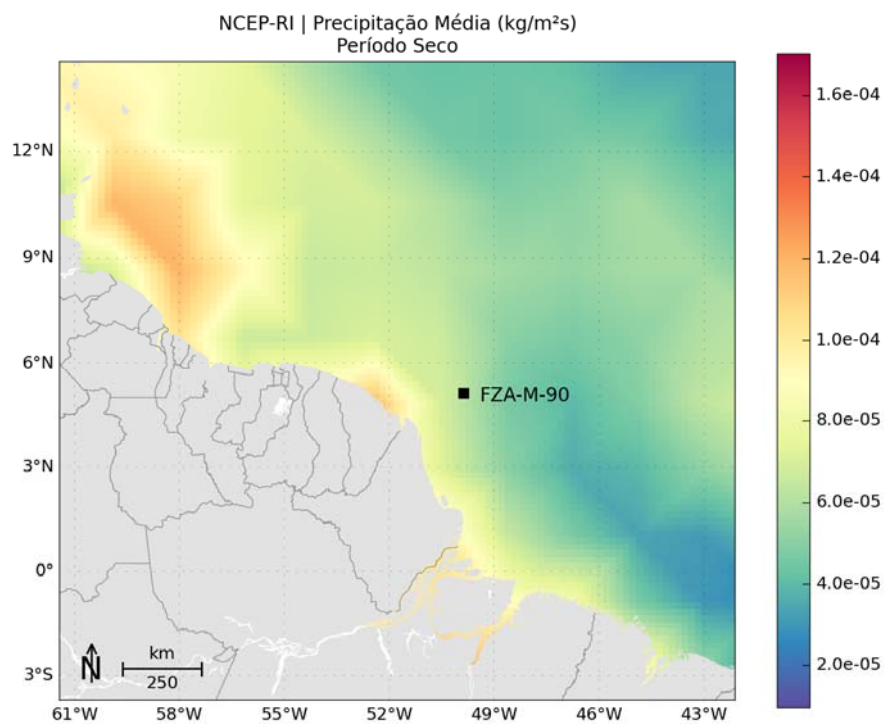


(b)

Figura 13: Campo médio dos dados de temperatura do ar a 2 m da Reanálise I utilizados como forçante para o período chuvoso (a) e para o período seco (b).

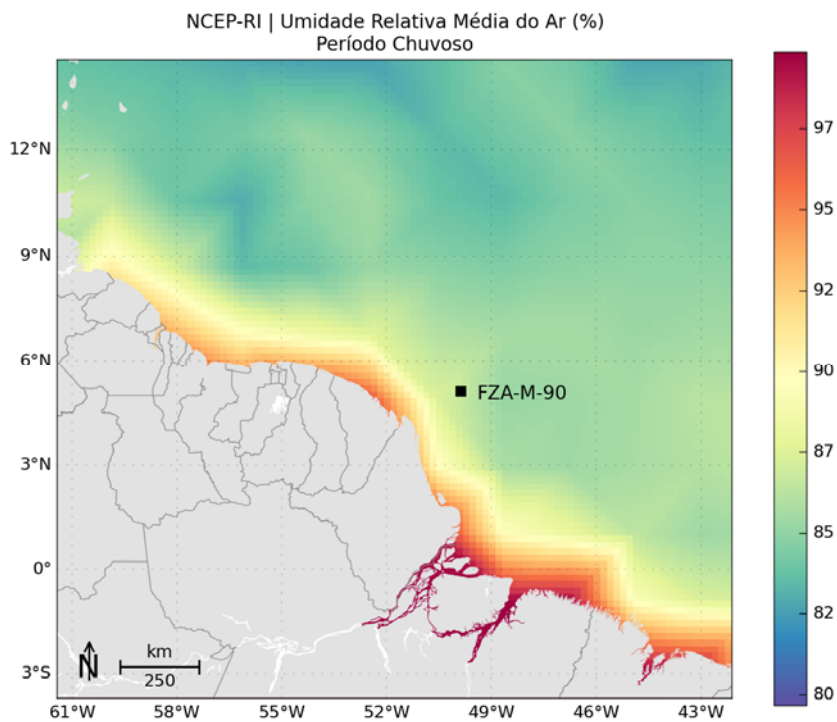


(a)

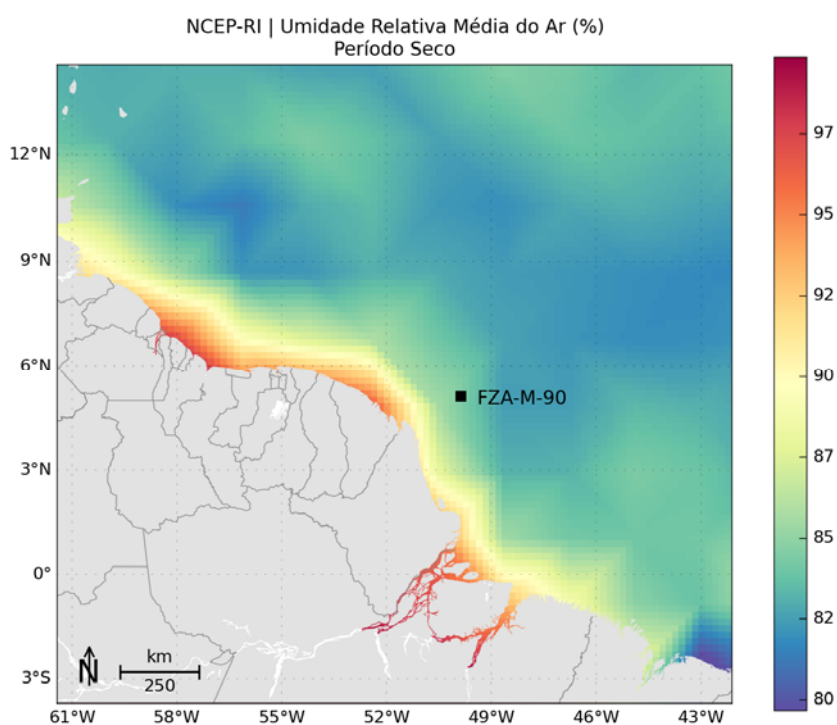


(b)

Figura 14: Campo médio dos dados de precipitação da Reanálise I utilizados como forçante para o período chuvoso (a) e para o período seco (b).



(a)



(b)

Figura 15: Campo médio dos dados de umidade relativa do ar da Reanálise I utilizados como forçante para o período chuvoso (a) e para o período seco (b).

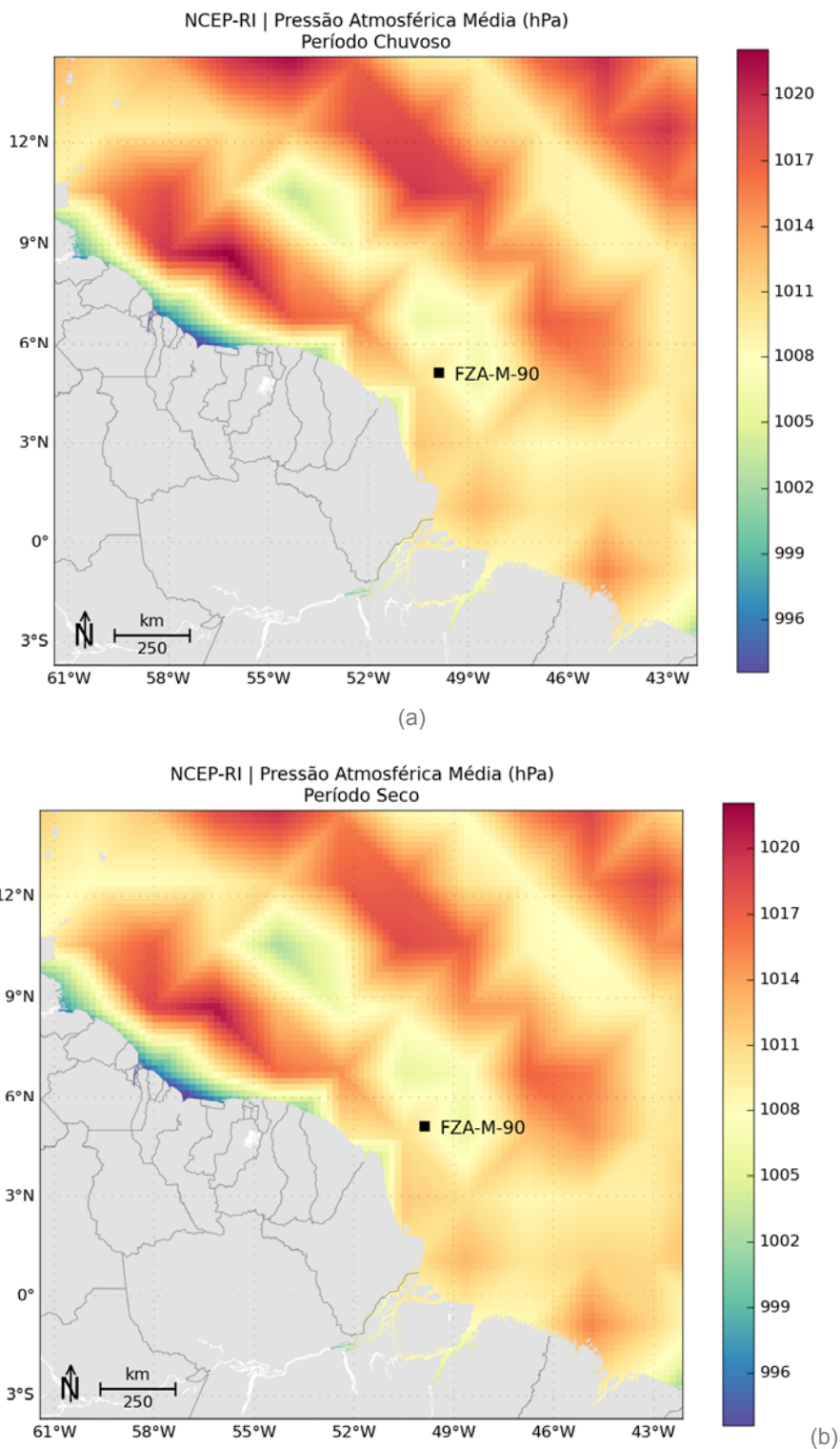
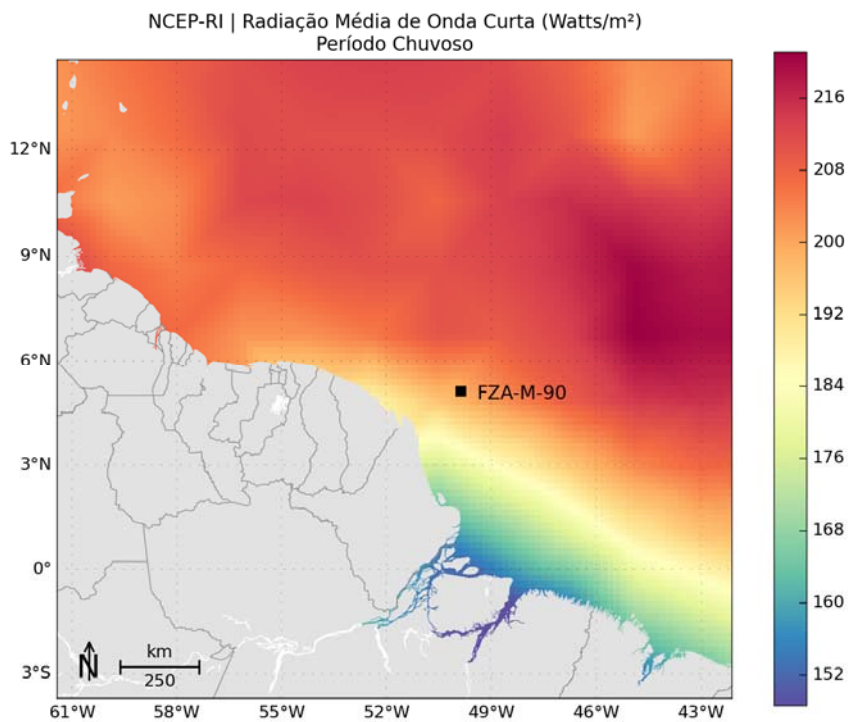
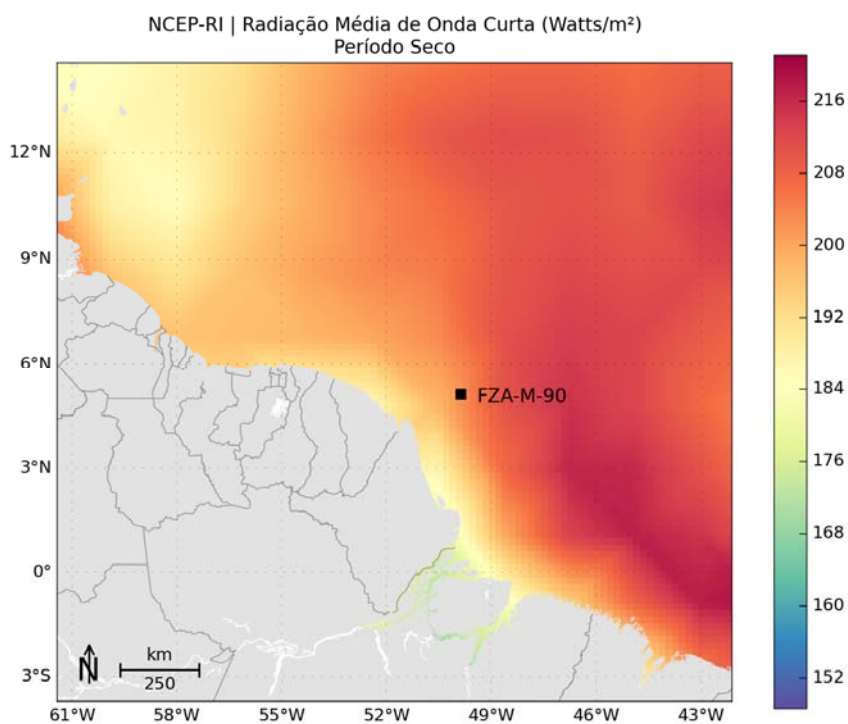


Figura 16: Campo médio dos dados de pressão atmosférica da Reanálise I utilizados como forçante para o período chuvoso (a) e para o período seco (b).



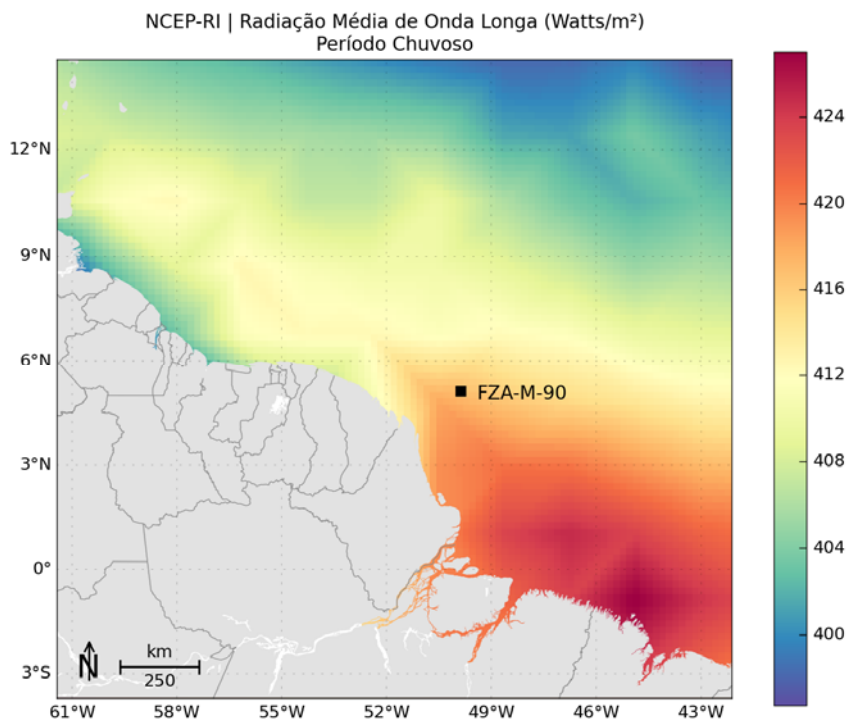
(a)



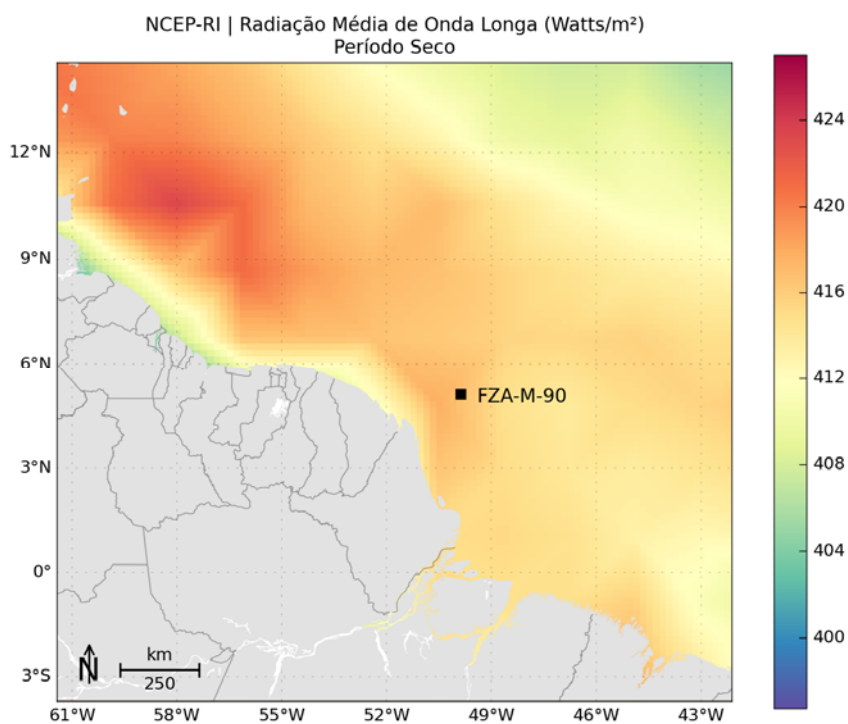
(b)

Figura 17: Campo médio dos dados de radiação de onda curta da Reanálise I utilizados como forçante para o período chuvoso (a) e para o período seco (b).



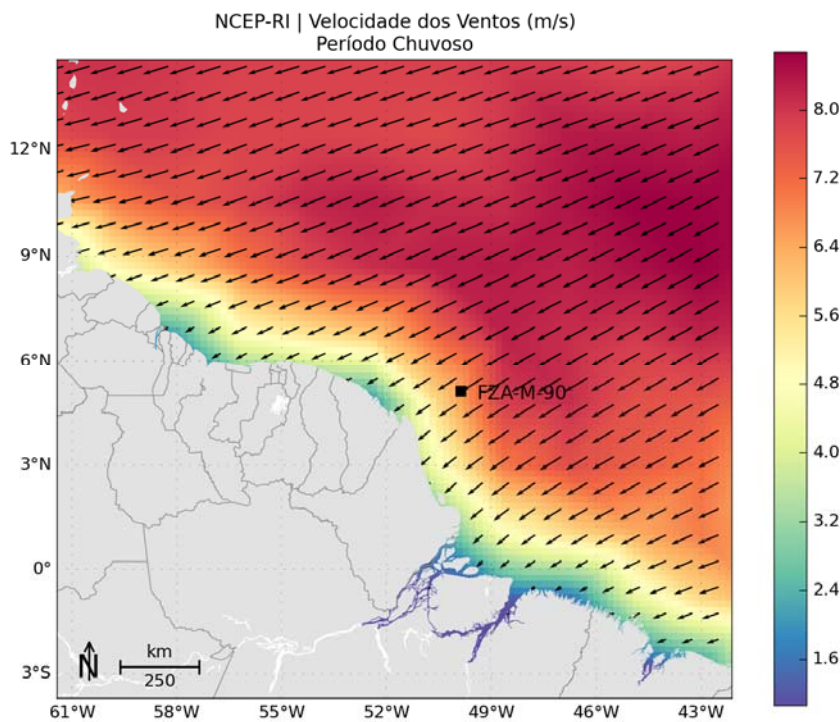


(a)

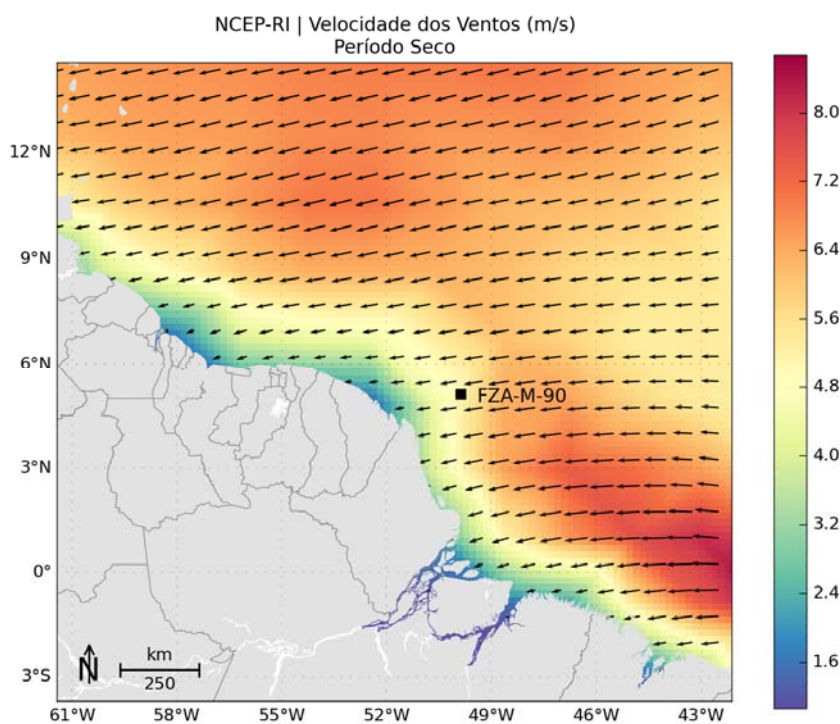


(b)

Figura 18: Campo médio dos dados de radiação de onda longa da Reanálise I utilizados como forçante para o período chuvoso (a) e para o período seco (b).



(a)



(b)

Figura 19: Campo médio dos dados de vento da Reanálise I utilizados como forçante para o período chuvoso (a) e para o período seco (b).

### 2.5.3 Condição de Contorno Laterais

O modelo possui três fronteiras abertas (norte, leste e oeste) e uma fechada (sul). Na fronteira fechada foram utilizadas as condições de contorno, com velocidades normais ao contorno nulas e *free-slip*, ou seja, velocidades tangenciais ao contorno podendo ser diferentes de zero.

Por se tratar de um modelo regional, para as fronteiras abertas há a necessidade de se obter informações de regiões exteriores ao domínio do modelo. Nesse caso, foram utilizados os resultados do MyOcean (temperatura, salinidade, altura da superfície do mar e correntes) com resolução espacial de  $1/12^\circ$  e temporal de 1 dia. Para passar estas informações ao ROMS, os resultados do MyOcean foram interpolados em seções verticais localizadas nas bordas do modelo, assim a cada dia simulado, o modelo faz a leitura destas informações no contorno, propagando-as para o interior do domínio.

### 2.5.4 Maré

Para simular o efeito da elevação do nível do mar no domínio de modelagem, foram utilizadas as constantes harmônicas do modelo global de marés TPX07 (EGBERT; EROFEEVA, 2002). Este modelo possui resolução de  $1/4^\circ$  e utiliza dados do satélite altimétrico TOPEX/POSEIDON como fonte primária para assimilação.

A seguir, da Figura 20 a Figura 27, são apresentados os campos de amplitude e fase das 8 primeiras constantes harmônicas do TPX07 fornecidas ao modelo para o cálculo da elevação de maré, ressaltando que o ROMS utiliza apenas os dados nos contornos como forçante.

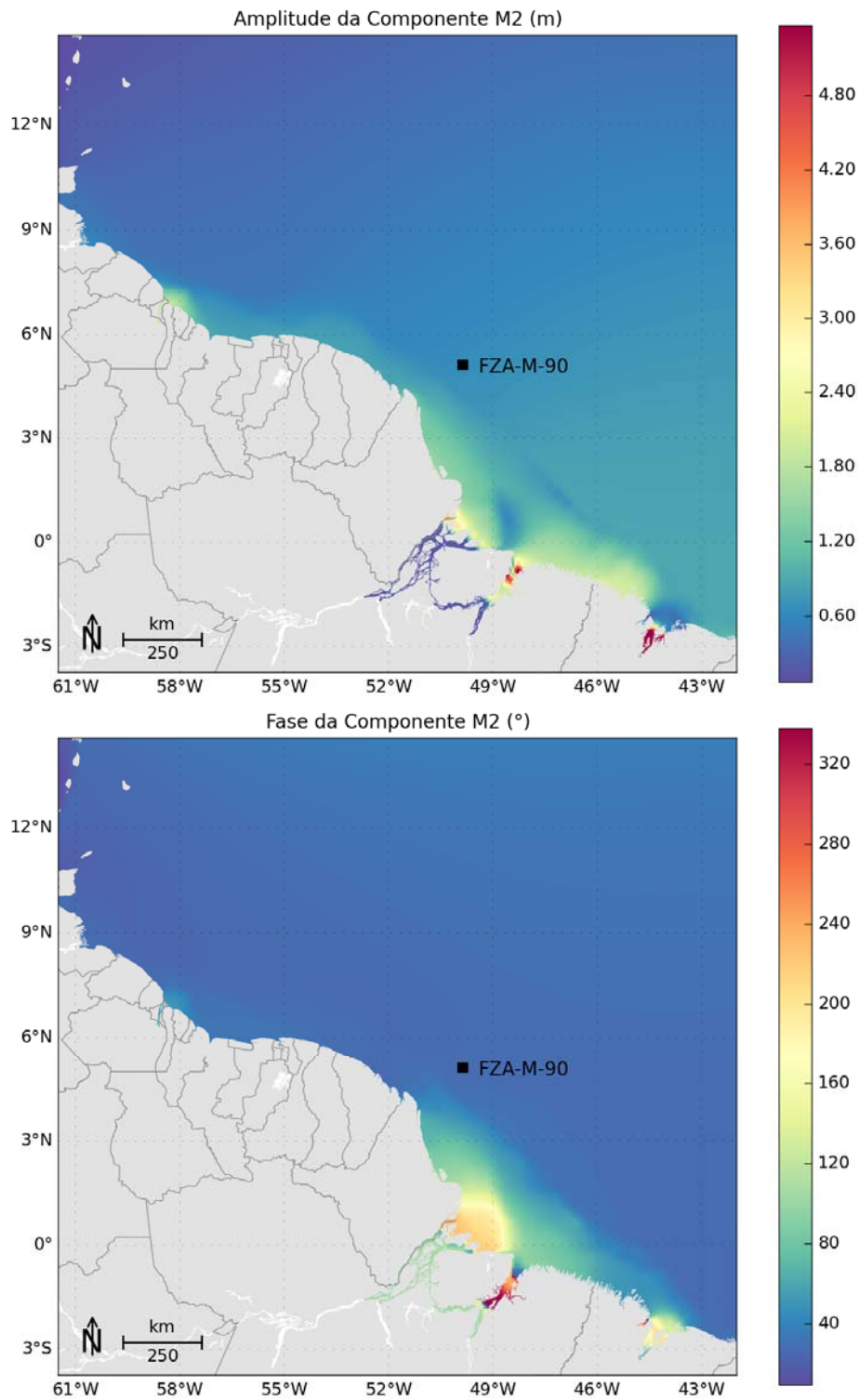


Figura 20: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente M2. Fonte (TPX07).

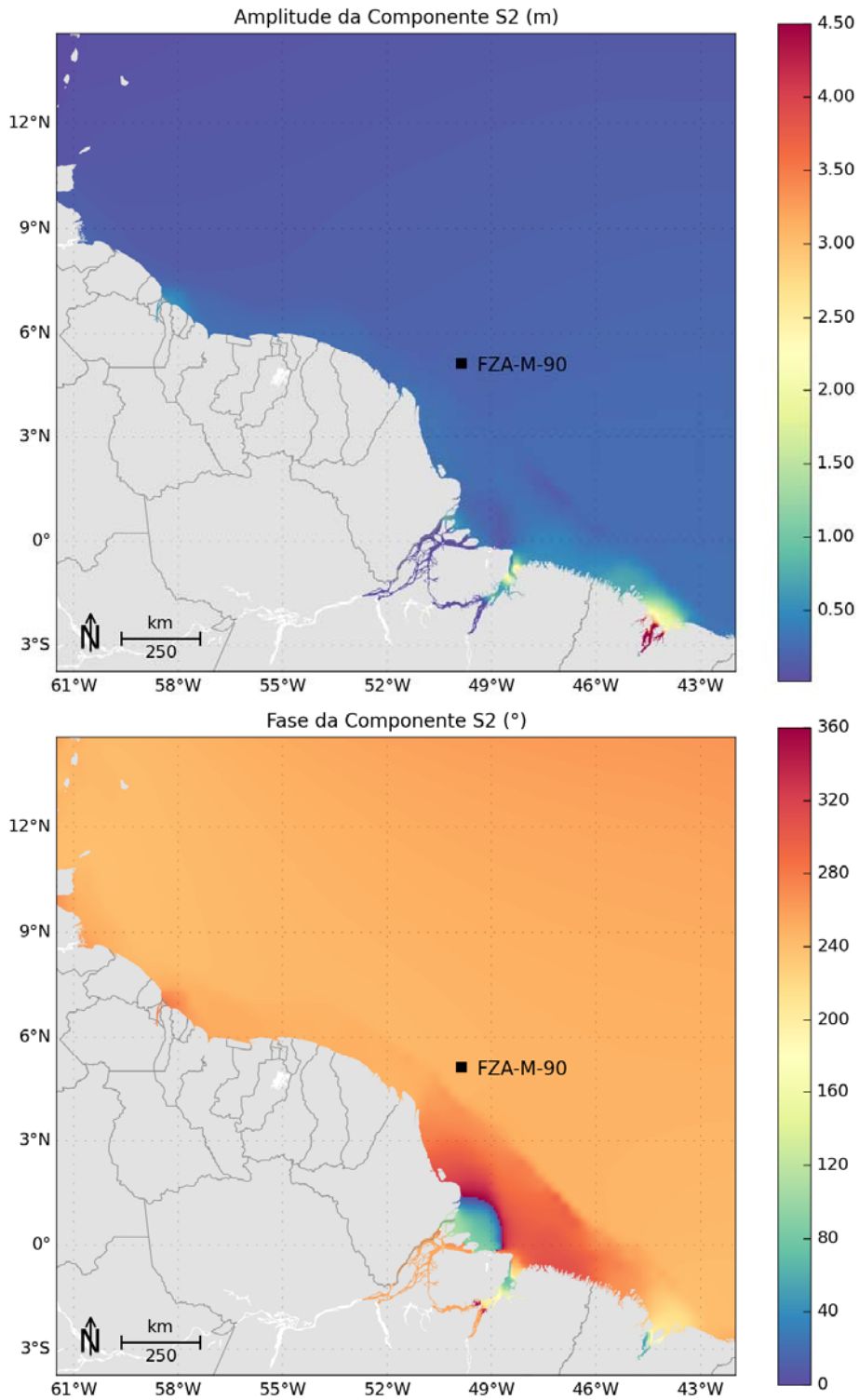


Figura 21: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente S2. Fonte (TPX07).

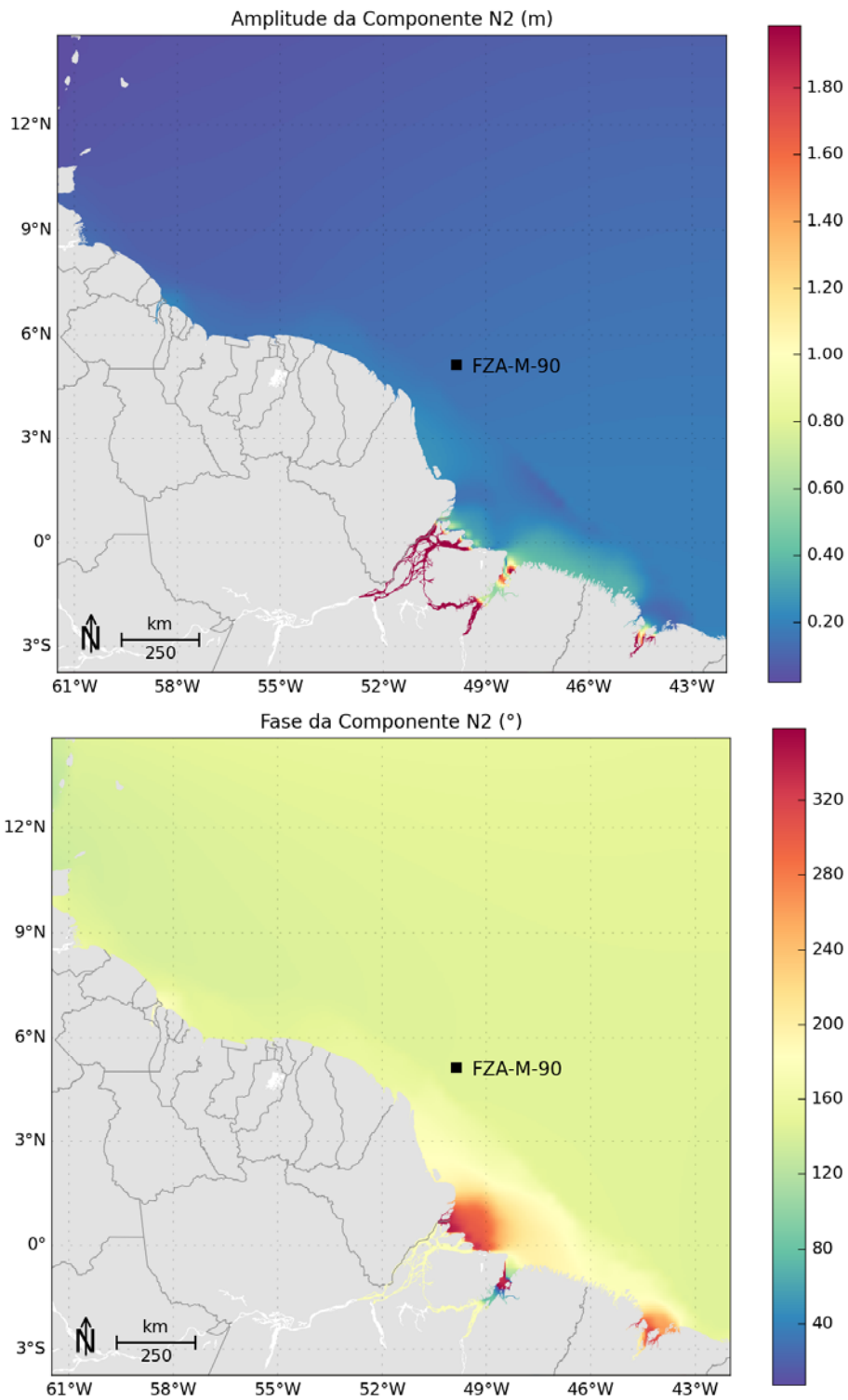


Figura 22: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente N2. Fonte (TPX07).

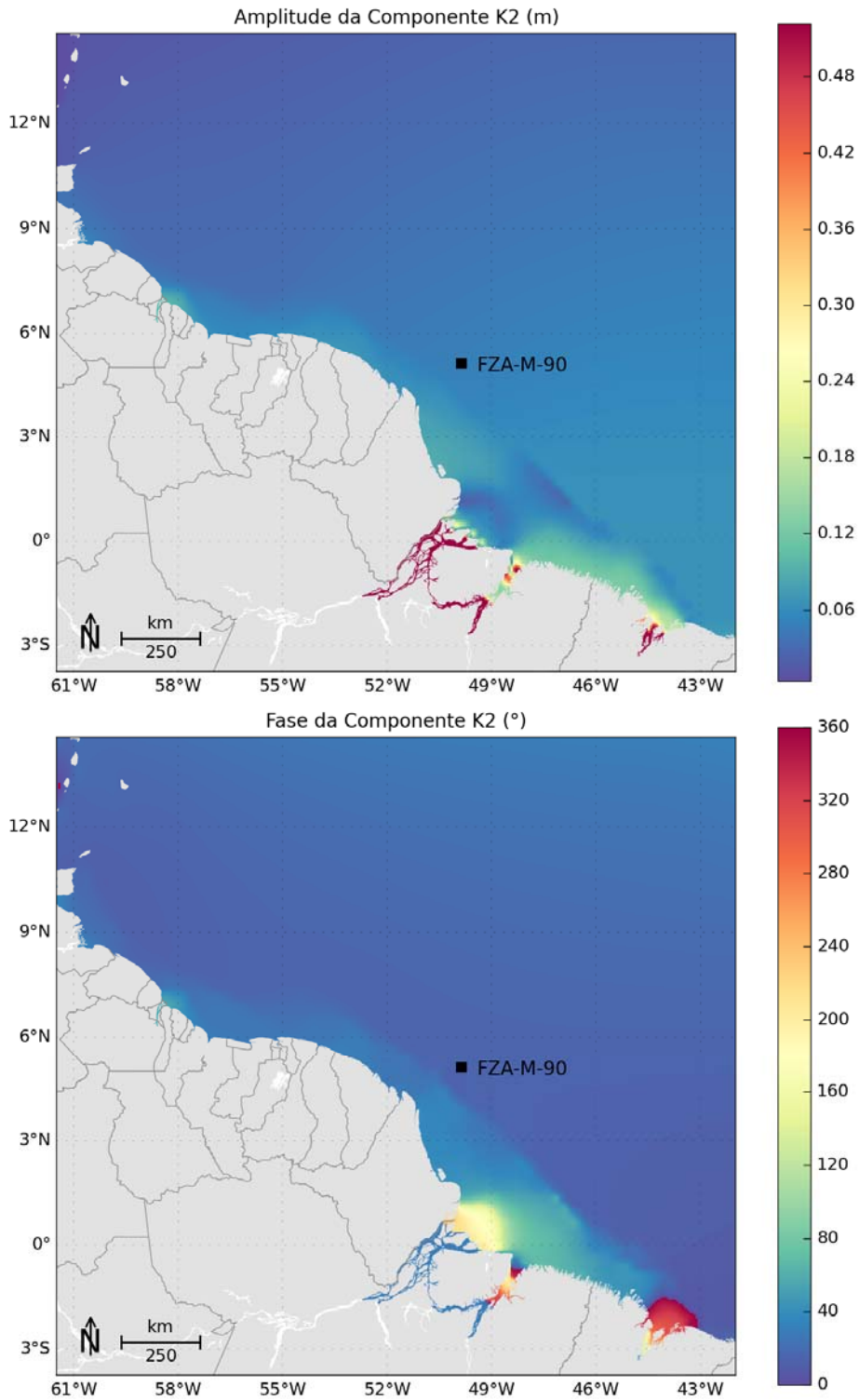


Figura 23: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente K2. Fonte (TPX07).

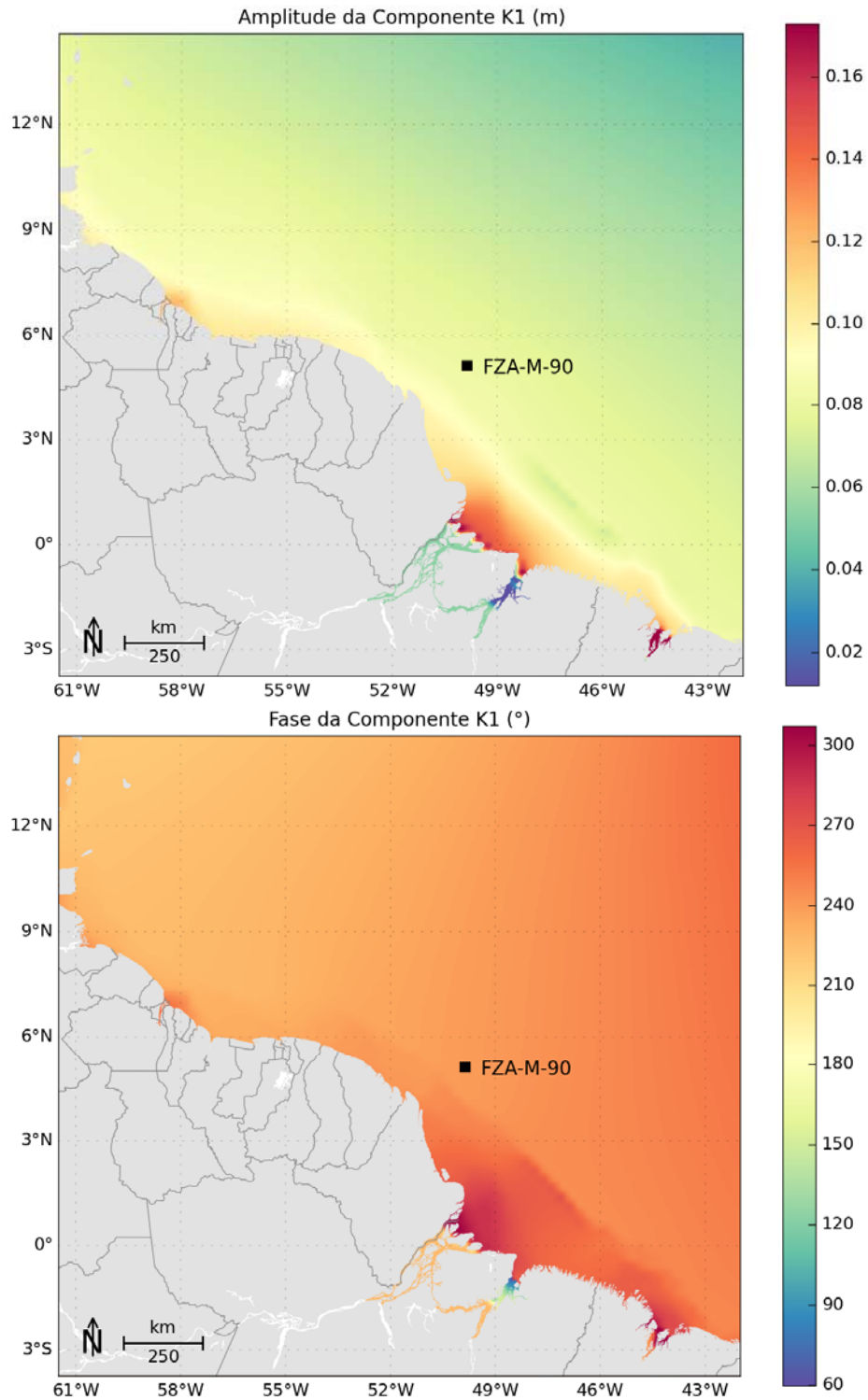


Figura 24: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente K1. Fonte (TPX07).



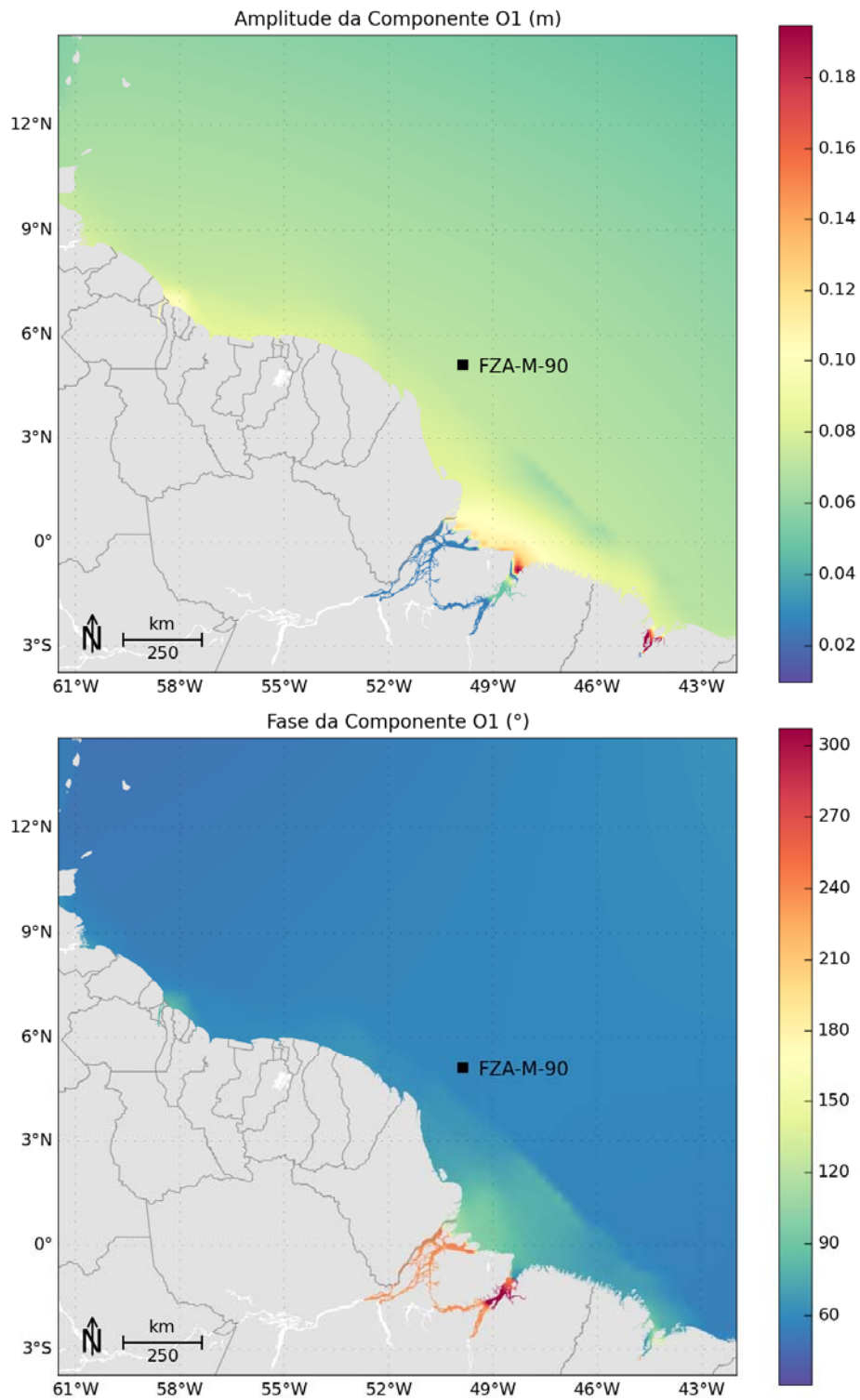


Figura 25: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente O1. Fonte (TPX07).

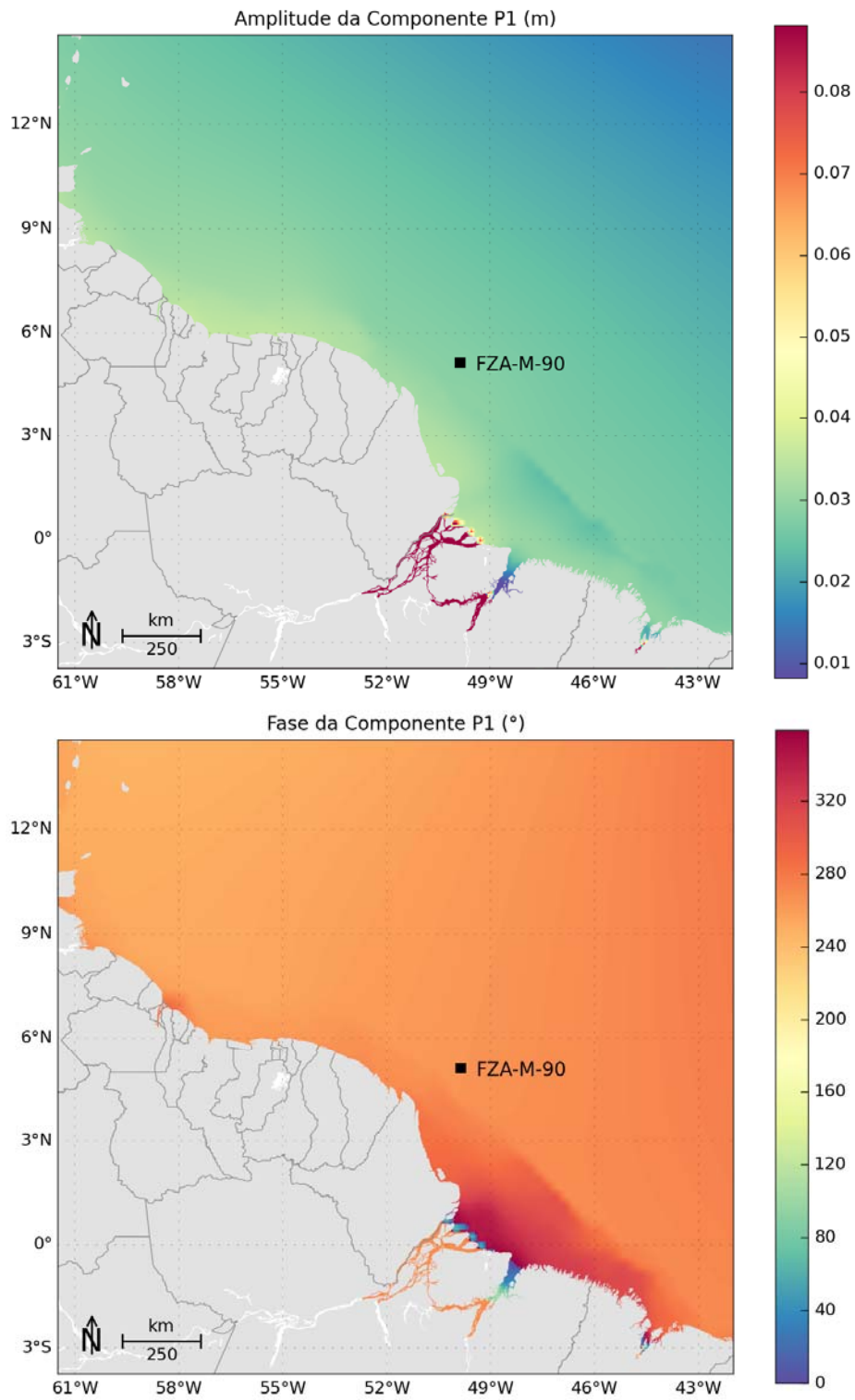


Figura 26: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente P1. Fonte (TPX07).

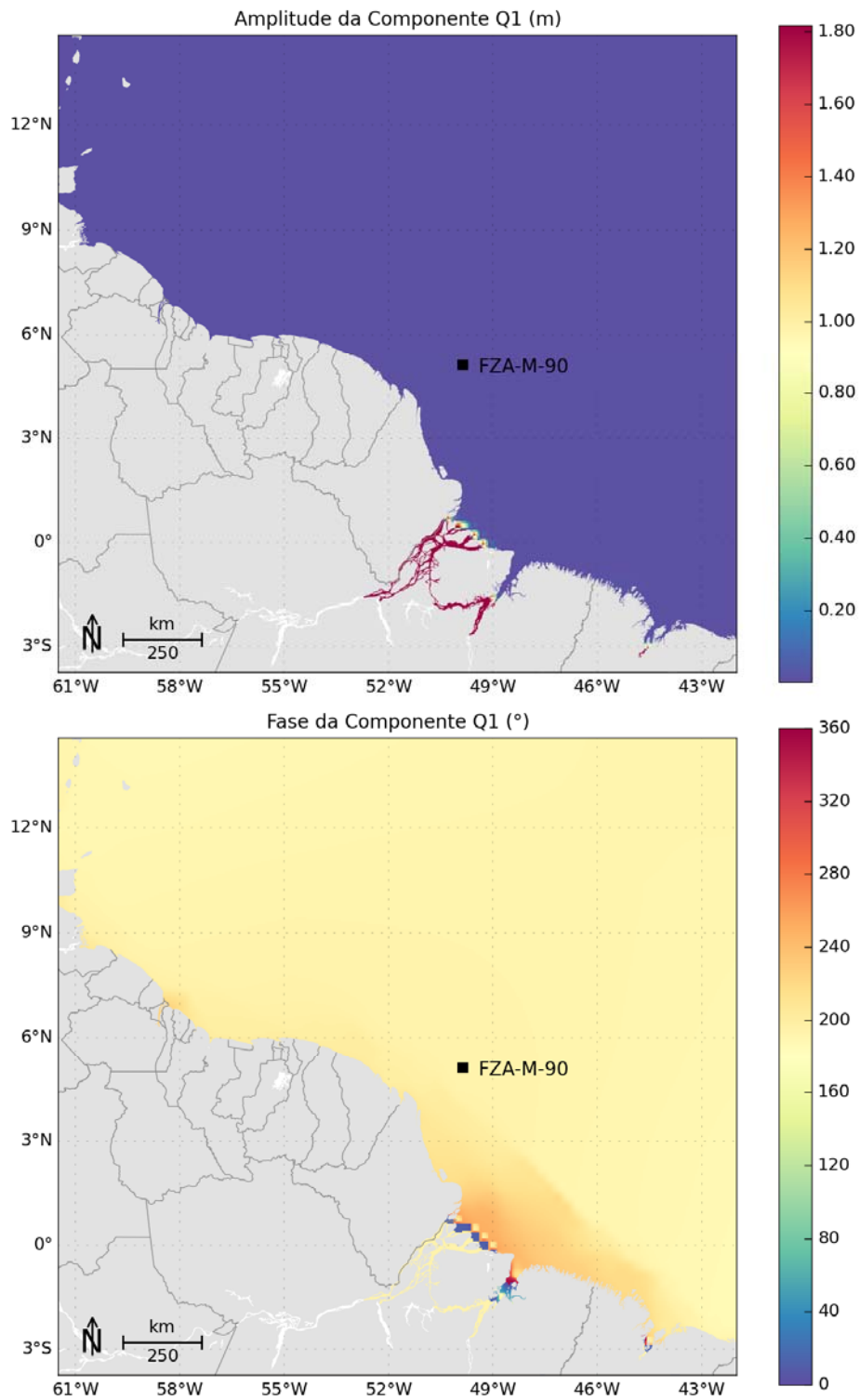


Figura 27: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente Q1. Fonte (TPX07).

A propagação da elevação de maré foi gerada utilizando-se a combinação de condições de contorno do tipo Flather para as velocidades barotrópicas e Chapman para a elevação.

A condição de contorno, proposta por Flather (1976), combina a equação de Summerfeld com uma versão uni-dimensional da equação da continuidade aplicada à direção normal ao contorno aberto e pode ser representada por:

$$\overline{u_n} = \overline{u_n^{ext}} - \sqrt{\frac{g}{h}} (n - n^{ext}) \quad (8)$$

onde  $\overline{u_n^{ext}}$  representa os dados externos,  $h$  a profundidade local,  $g$  a aceleração da gravidade e  $n$  a elevação do nível do mar. Esta condição de contorno é apropriada para fluxos barotrópicos, porém potencialmente instável quando a condição CFL não é respeitada.

Já a condição de contorno Chapman (CHAPMAN, 1985) considera a propagação de ondas de gravidade e pode ser representada por:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \sqrt{g(n + h_0)} \frac{\partial n}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

onde  $h_0$  é a profundidade local.

## 2.5.5 Descarga Fluvial

A vazão dos rios é proveniente da climatologia mensal de descarga de rios presente em Dai & Trenberth (2002).

Conforme descrito no item 2.6 (Estabilização da Energia Cinética), o ROMS foi configurado para usar os resultados do MyOcean como condição inicial e de contorno e, para ler os resultados do MyOcean em todo o seu domínio (X,Y e Z) através de um termo de tendência (*Nudging*), que faz com que os resultados do ROMS não divirjam em média dos resultados do MyOcean

As vazões dos rios provenientes da climatologia mensal de Dai & Trenberth (2002) foram inseridas nos contornos do MyOcean. Como os resultados do MyOcean foram carregados a cada dia, nas três dimensões da grade do ROMS, o efeito da descarga fluvial na circulação e nos campos de massa no modelo ROMS é proveniente dos resultados do MyOcean.

Dai & Trenberth (2002) elaboraram uma grade global de 1° de resolução com médias mensais da descarga de rios a partir de dados de vazão dos 921 maiores rios do mundo, complementados com estimativas de descarga de áreas não monitoradas com base nos índices de escoamento superficial e área de m. As estações utilizadas no trabalho de Dai & Trenberth (2002) podem ser visualizadas na Figura 28. Esta grade elaborada é utilizada então como condição de contorno de terra no modelo hidrodinâmico do MyOcean, levando o modelo a representar a vazão dos principais rios ao redor do mundo.

Na Figura 29 e na Tabela 3 são apresentadas as estações localizadas na região de interesse.

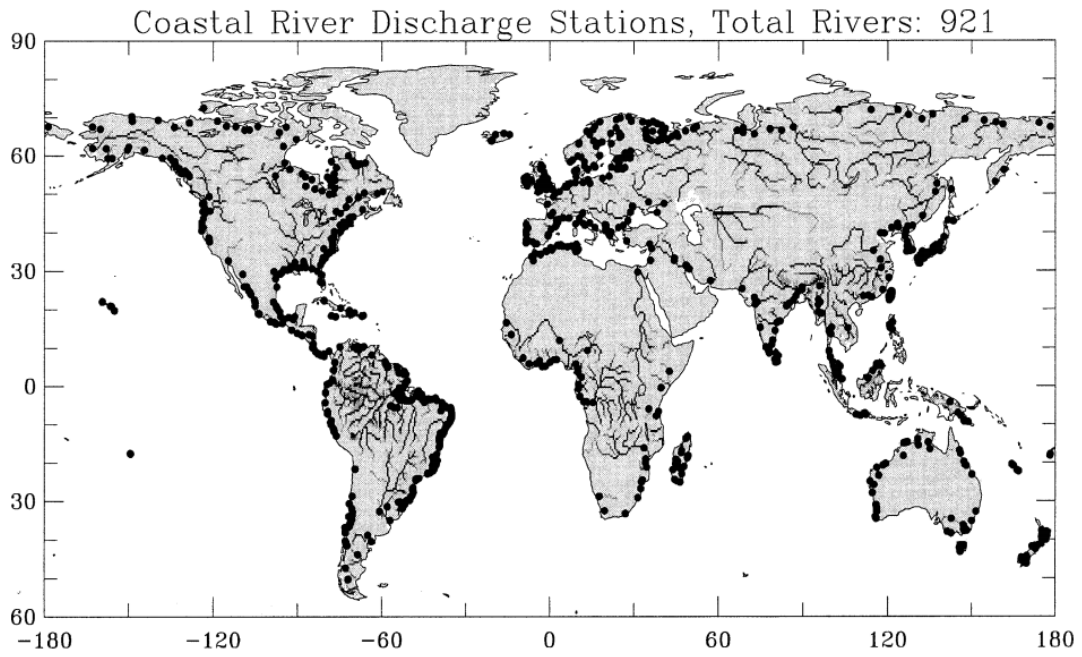


Figura 28: Estações utilizadas ao longo de todo o globo. Fonte: Dai & Trenberth (2002).

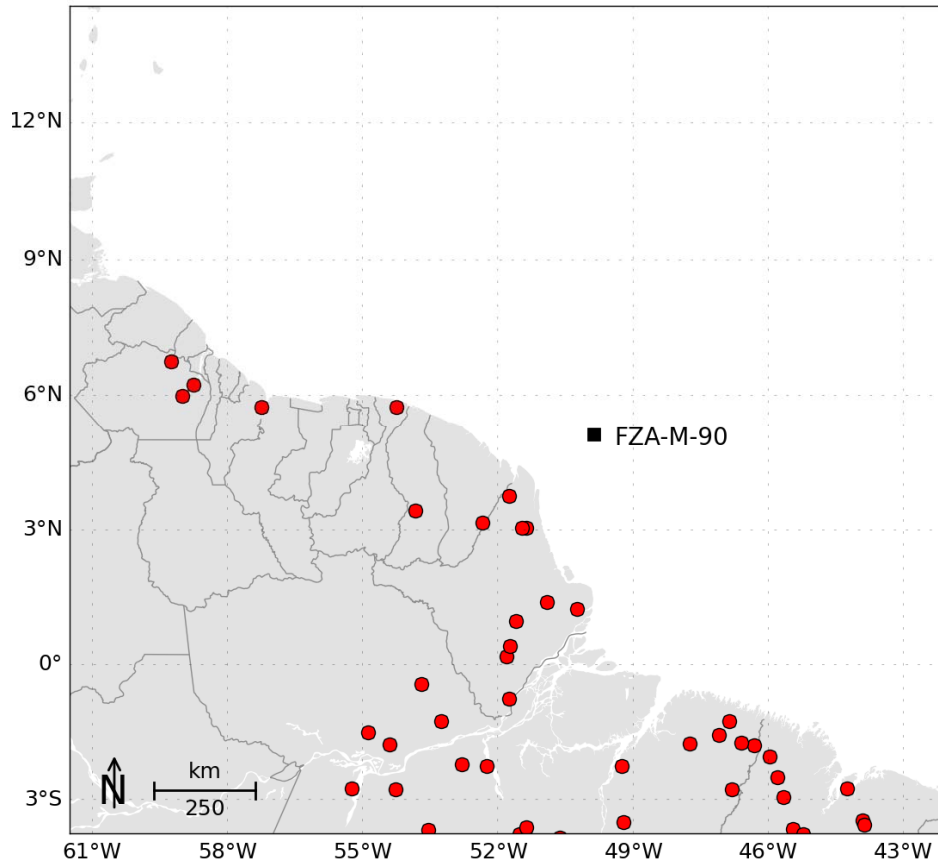


Figura 29: Estações utilizadas em Dai & Trenberth (2002), que se encontram no domínio de modelagem.

Tabela 3: Estações utilizadas em Dai & Trenberth (2002), que se encontram no domínio de modelagem. Fonte: Dai & Trenberth (2002).

Estação	Latitude	Longitude
Obidos	-51,75	-0,75
Tucurui	-49,25	-2,25
Jatoba	-55,25	-2,75
Altamira	-52,25	-2,25
Langa Tabbe	-54,25	5,75
Maripa	-51,75	3,75
Sao Francisco	-53,25	-1,25
Porto Plato	-50,25	1,25
Badajos	-47,75	-1,75
Cantanhede	-44,25	-2,75
Fazenda Paq.	-53,70	-0,42
Alto Bonito	-46,32	-1,8
Retiro Santo	-51,37	3,05
Camopi	-52,35	3,17
Degrad-Roch	-53,83	3,42
Bom Jardim	-47,10	-1,56
jusante da i.	-54,27	-2,78
Boca do Inf.	-54,87	-1,5
Ramos	-51,60	0,97
Arapari	-54,40	-1,78
Fazenda Boa	-52,80	-2,22
Alto Turi	-45,67	-2,94
Tararua-Pon	-46,59	-1,74
Cafezal	-46,80	-2,77
Tartarugal	-50,92	1,4
Maracacume	-45,96	-2,05
Pancada	-51,80	0,18
Nova Mocaju	-46,87	-1,25
Acampamento	-51,74	0,41
Cooperativa	-51,46	3,04
Br-316	-45,79	-2,5

O efeito da descarga fluvial nos resultados do ROMS pode ser exemplificado pela Figura 30, que apresenta a pluma do rio Amazonas, representada pelo campo de salinidade superficial calculado pelo ROMS.



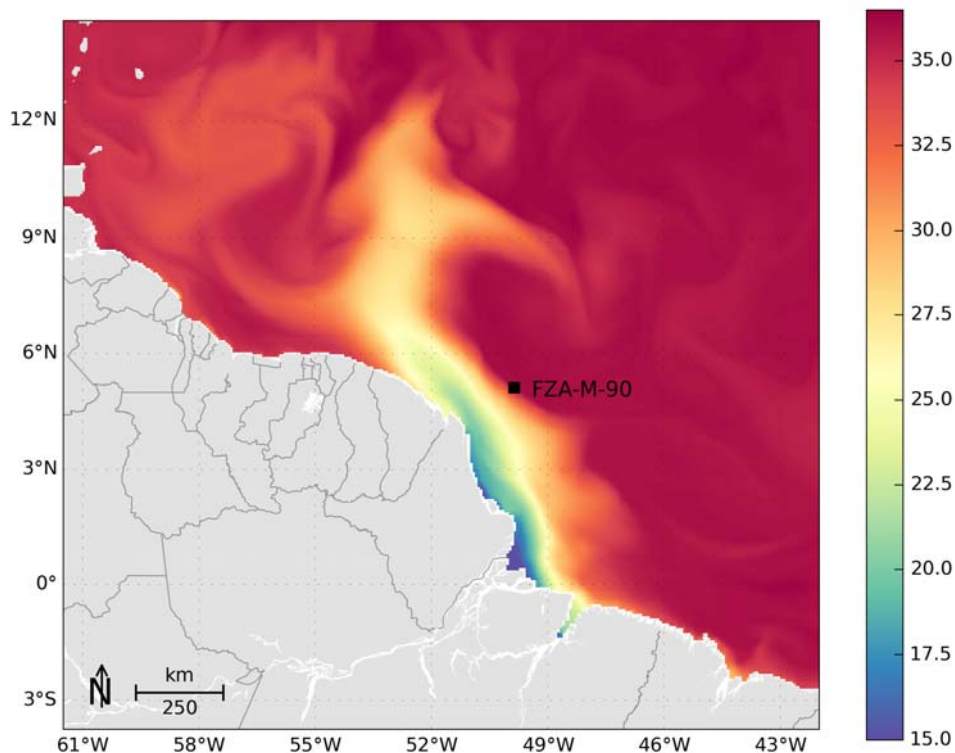


Figura 30: Campo de salinidade superficial obtido do ROMS para o dia 28 de maio de 2013.

## 2.6. Estabilização da Energia Cinética

O ROMS, além de usar os resultados do MyOcean como condição inicial e de contorno, foi configurado para ler os resultados do MyOcean em todo o seu domínio (X,Y e Z), inserindo um termo de tendência (*Nudging*), que faz com que os resultados do ROMS se aproximem aos do MyOcean.

O termo de tendência (Nudging) nos resultados do ROMS é inserido da seguinte forma: O usuário deve fornecer a escala de tempo relativa ao nudging (nesse caso 1 dia) e então os resultados, em cada ponto de grade do ROMS são alterados em direção ao valor do resultado do MyOcean através da seguinte equação:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta t}{T}(\theta - \theta^{MyO}) \quad (8)$$

Onde ' $\phi$ ' representa uma variável do modelo (ROMS), ' $\phi_{ext}$ ' representa um dado externo (MyOcean), ' $\Delta t$ ' é o passo de tempo do modelo ROMS, ' $\Delta \phi$ ' é o incremento imposto à variável e ' $T$ ' é a escala de tempo para o nudging.

O emprego desta técnica tem o objetivo de aproveitarmos as vantagens do modelo MyOcean – modelo global com sistema robusto de assimilação de dados – e conseguirmos uma representação das escalas temporais e espaciais adequadas para o problema proposto com o modelo ROMS– resultados de 2 em 2 horas, resolução de  $1/16^\circ$  – Com isso conseguimos a representação de processos físicos não representados no modelo MyOcean, como a maré.

Desta forma, não é necessário que o modelo seja integrado por certo período para atingir a estabilidade (*spin-up*), como demonstrado pelo gráfico da variação da energia cinética média do modelo ao longo da simulação (Figura 31).

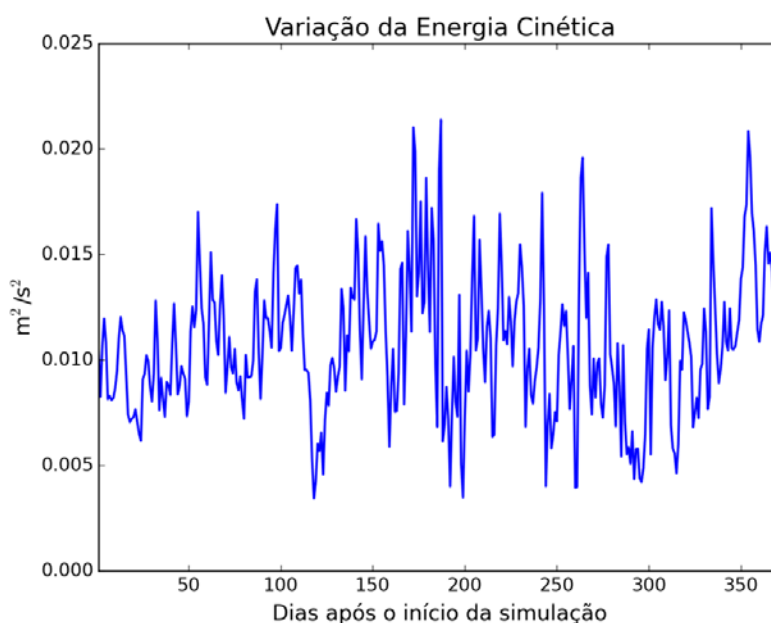


Figura 31: Variação da energia cinética média em superfície ao longo da simulação.

## 2.7. Avaliação do Modelo

Para que possamos saber se o comportamento de um modelo numérico é suficientemente compatível com o “sistema real” é necessário realizar uma comparação entre os resultados obtidos nos dois mundos; o “real” e o simulado.

A nomenclatura contemporânea para tal estudo é “avaliação”. Embora possa parecer um rótulo de pouca importância, os termos anteriormente utilizados para tal fim, sempre foram controversos. A primeira nomenclatura “validação” foi substituída por “comparação histórica”, a qual foi complementada com o termo “garantia de qualidade”. A dificuldade em se definir um termo reside no fato de que as palavras “validação” e “garantia” trazem em si uma expectativa de positivo e negativo em relação aos resultados. O modelo poderia ser somente válido ou não válido, garantido ou não garantido. Nesse sentido, o termo “avaliação” torna-se mais adequado, uma vez que é neutro e pode abarcar uma gama maior de definições em termos de qualificação do modelo ou sistema (BECK, 2002).

Em essência, são duas as principais perguntas que devem ser respondidas quando se avalia um modelo ou sistema:

1. O modelo foi construído com materiais aprovados, *i.e.* as hipóteses constituintes são consagradas e adequadas?
2. O seu comportamento se aproxima bem do observado com respeito ao “mundo real”?

A primeira pergunta pode ser respondida com o grande número de artigos publicados em revistas internacionais utilizando o ROMS para estudos de circulação oceânica em diversas escalas, nos mais variados corpos d’água.

Para responder a segunda pergunta, foram realizadas diversas comparações entre dados medidos e os resultados obtidos pelo modelo, sendo apresentadas a seguir.

### 2.7.1 Maré

Para comparar a elevação de maré calculada pelo modelo numérico com dados da região modelada foram escolhidas cinco estações maregráficas (Ponta dos Índios – AP, Plataforma Penrod – AP, Ilha das Pacas – PA, Ilha dos Irmãos – MA e Mangunça - MA) da FEMAR (Figura 32) situadas ao longo do domínio de modelagem. Estas estações foram escolhidas por estarem

em regiões bem distintas entre si no interior do domínio de modelagem, tanto em regiões oceânicas, quanto em regiões costeiras e compreendendo os diferentes estados do Brasil.

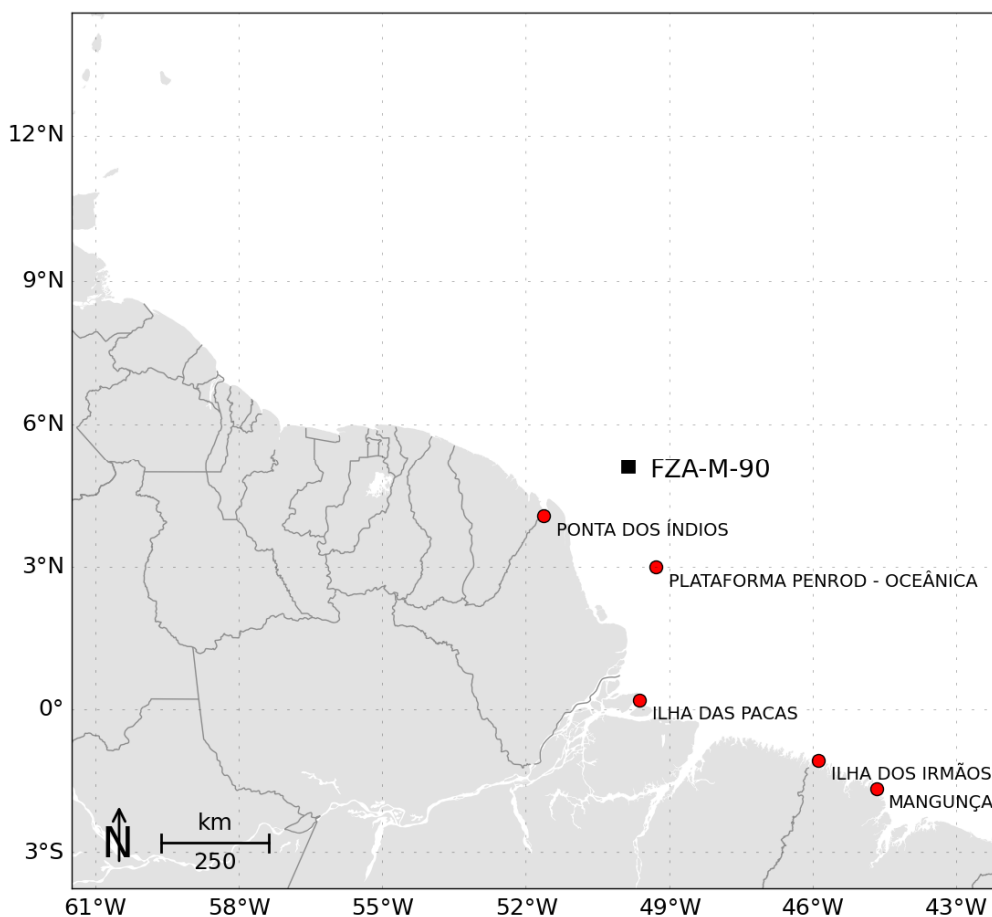


Figura 32: Localização das estações maregráficas da FEMAR, utilizadas na avaliação da representação da maré no modelo.

Com os dados das constantes harmônicas dessas estações foram realizadas previsões da elevação de maré para o período de simulação (Janeiro de 2013 a Dezembro de 2013). Esses dados foram comparados com os valores de elevação do nível do mar calculados pelo modelo nos pontos de grade mais próximos das estações (Figura 33 a Figura 37). As comparações são apresentadas para todo o período de modelagem, e em detalhamento para um período de aproximadamente 30 dias. A comparação em ~30 dias é feita para que as diferenças e semelhanças em amplitude e fase possam ser melhor observadas, não tendo sido escolhidos períodos em que haja maior aproximação, ou divergência entre as séries modeladas e observadas.

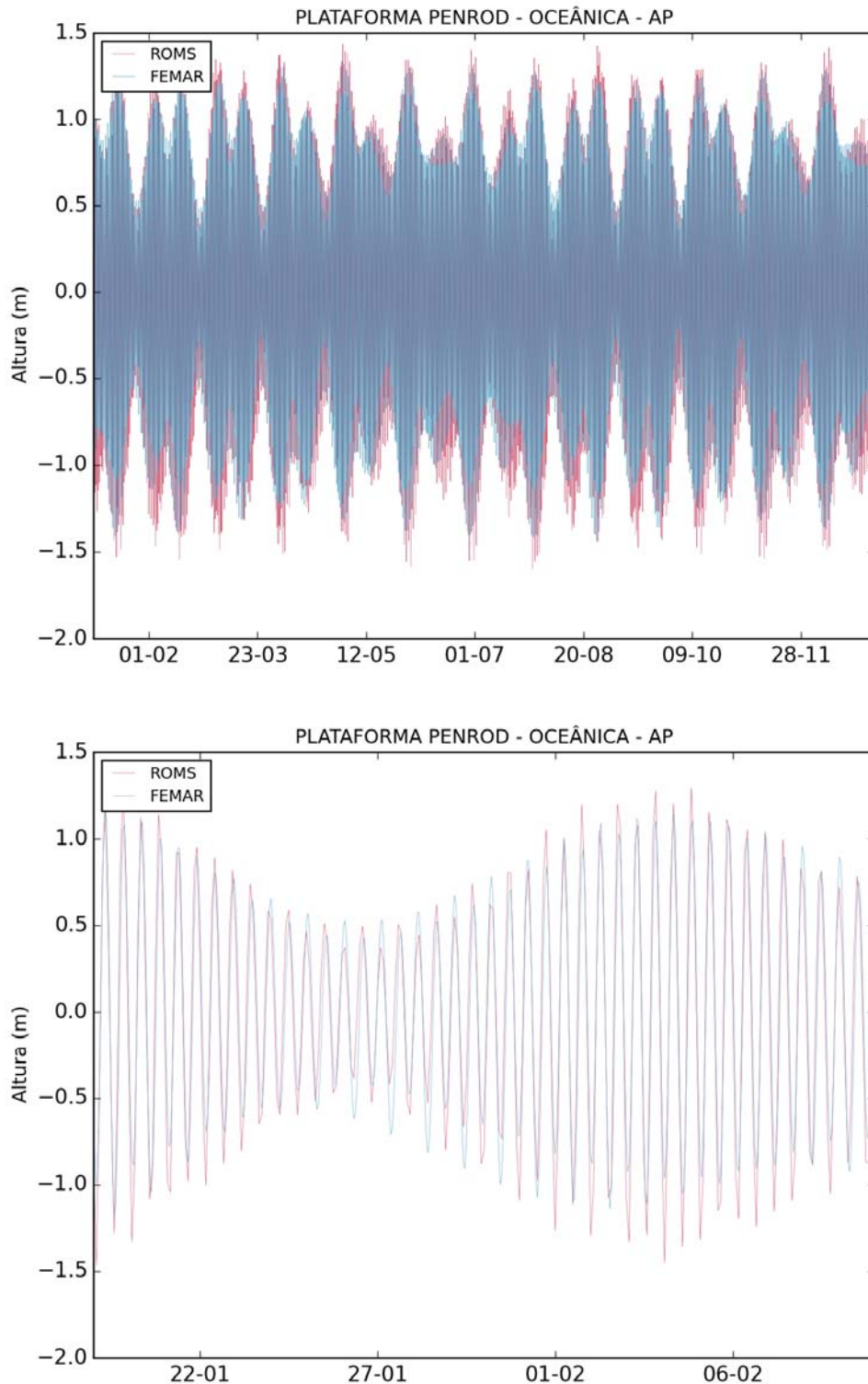


Figura 33: Comparação entre a série maregráfica da estação da Plataforma Penrod (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).

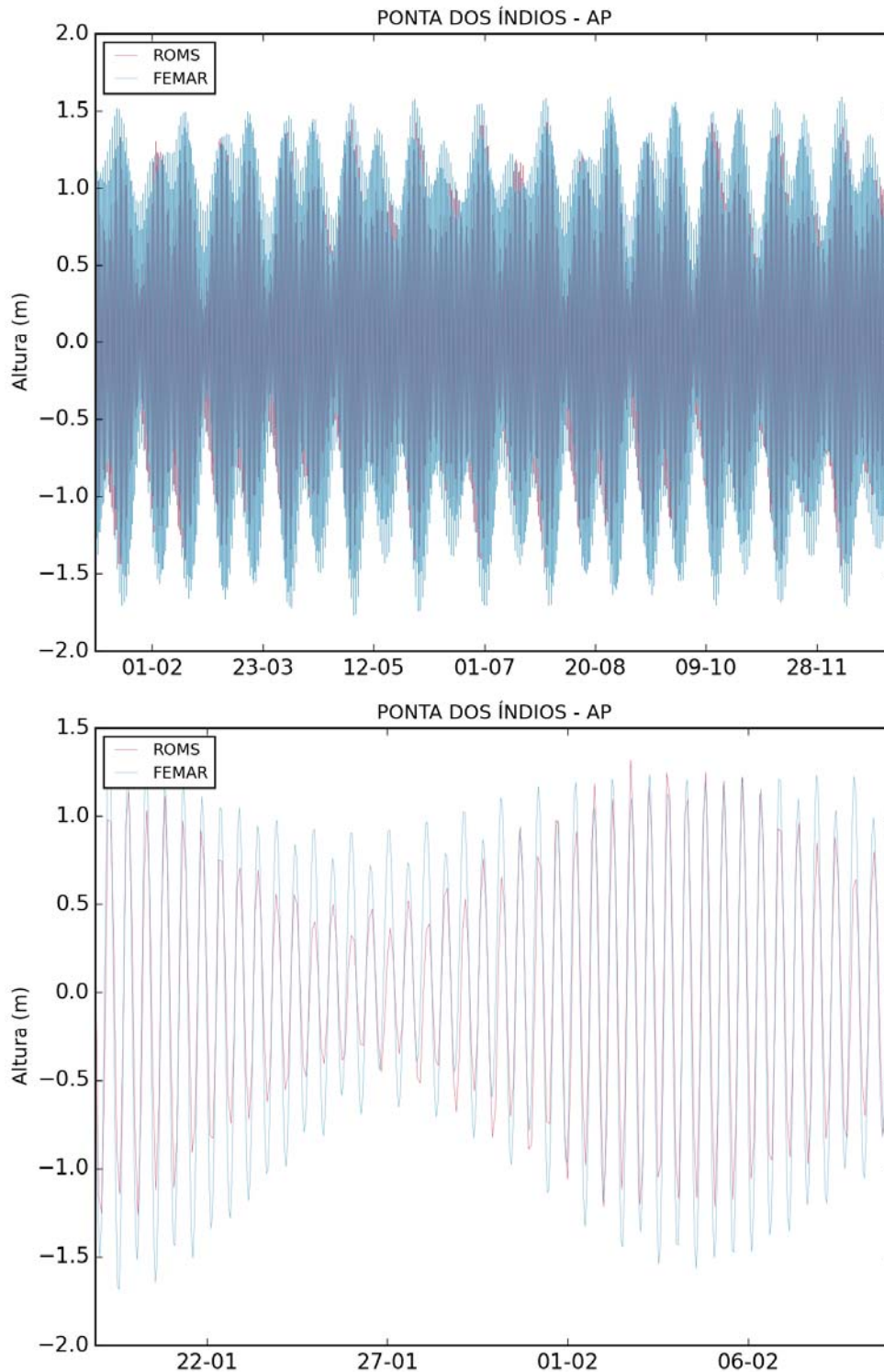


Figura 34: Comparação entre a série maregráfica da estação de Ponta dos Índios (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).

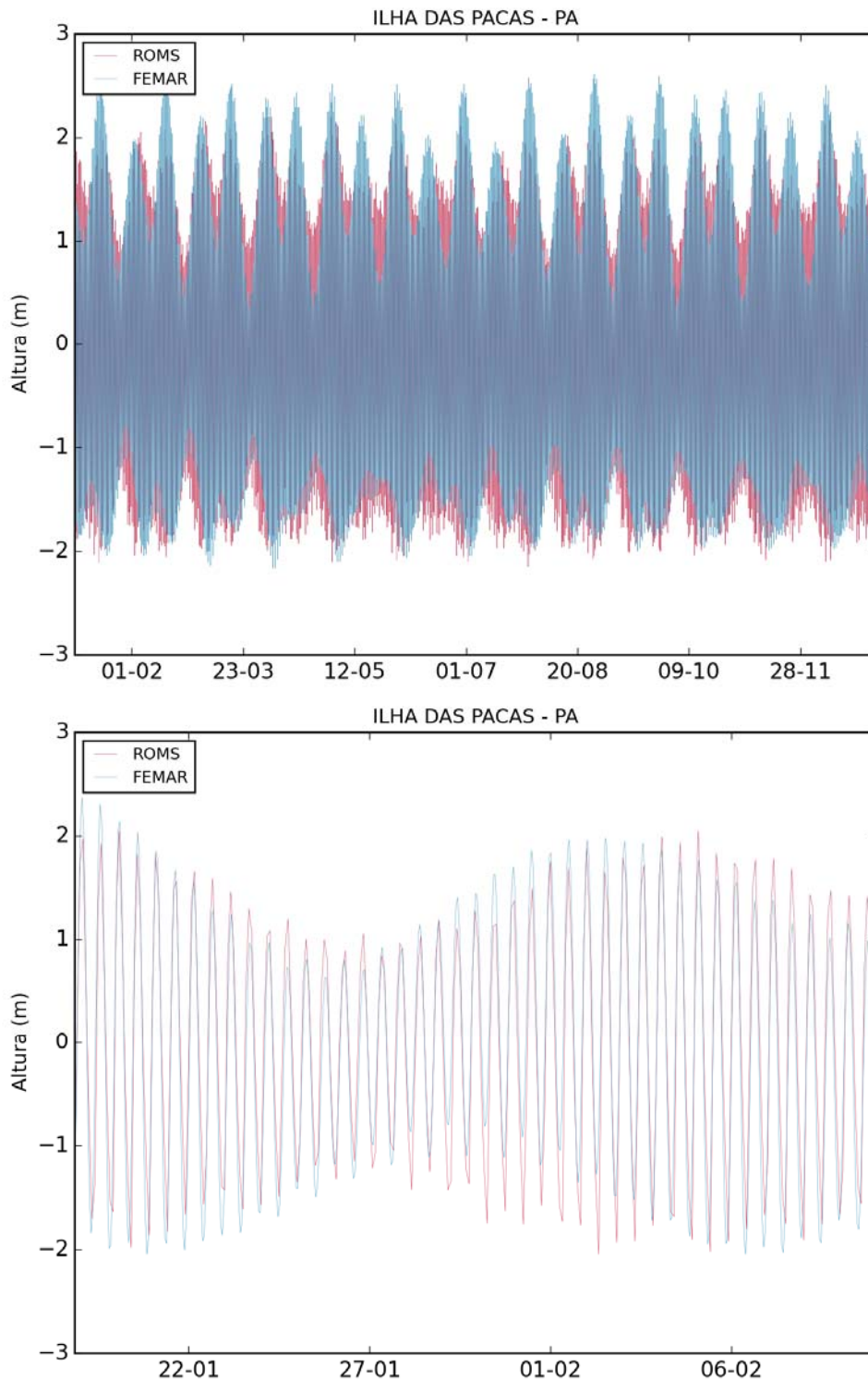


Figura 35: Comparação entre a série maregráfica da estação da Ilha das Pacas (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).

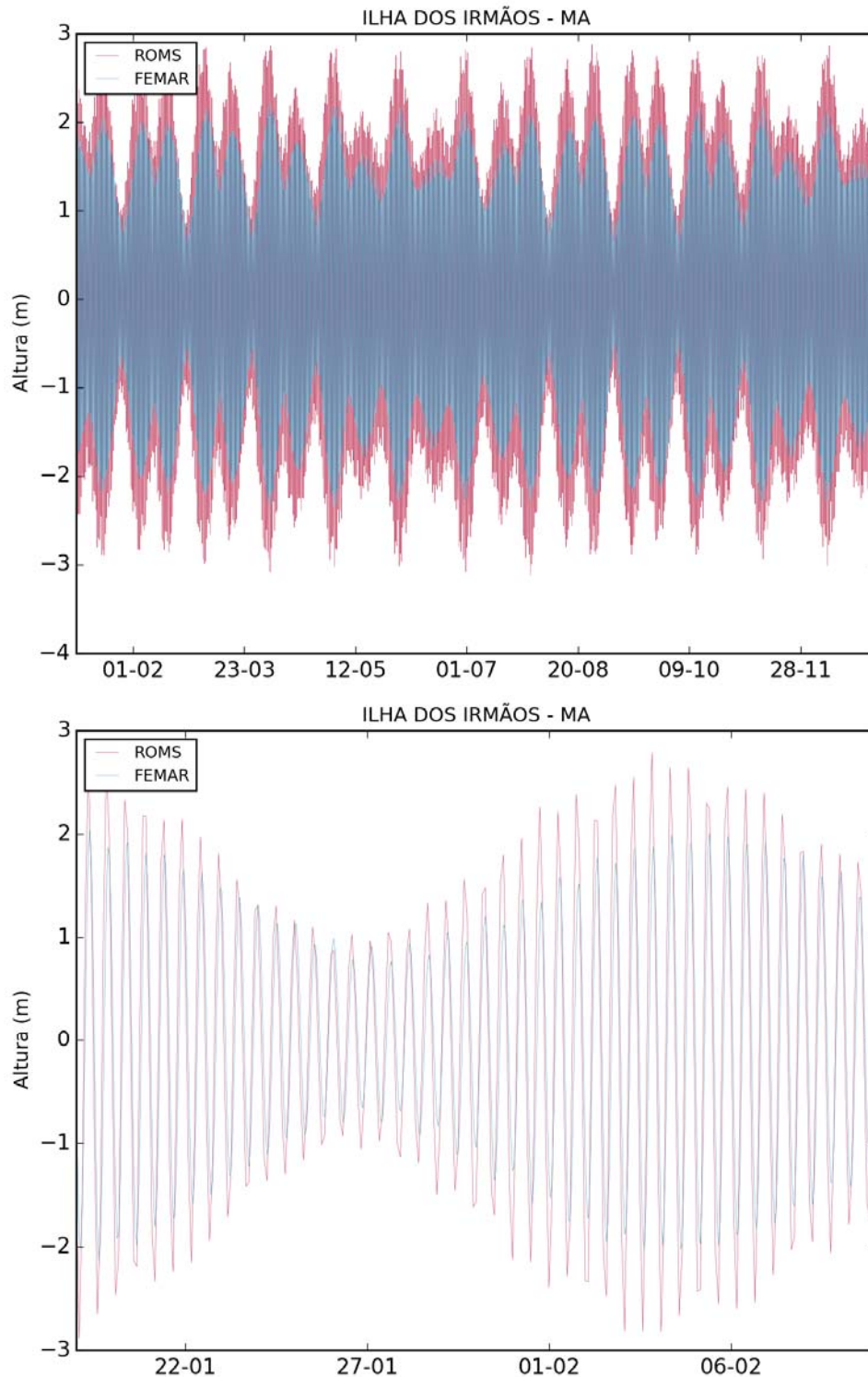


Figura 36: Comparação entre a série maregráfica da estação da Ilha dos Irmãos (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).



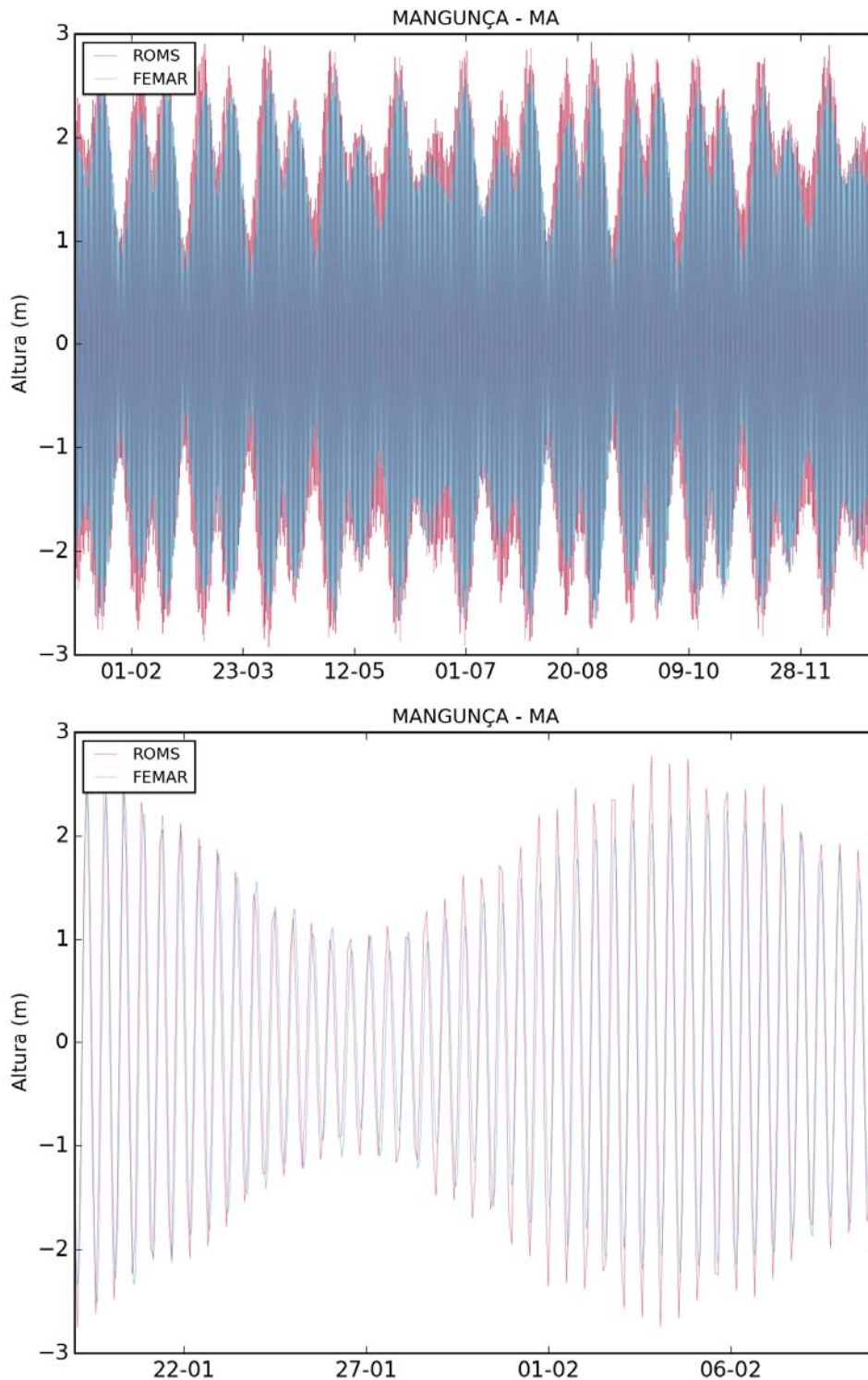


Figura 37: Comparação entre a série maregráfica da estação de Mangunça (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).

Na maioria das ocorrências, houve uma boa representação das alturas de maré, embora seja observada, em geral, uma pequena superestimação da elevação de maré pelo ROMS.

O método estatístico utilizado para a comparação foi o índice de concordância proposto por Wilmot (1981), que pode ser expresso por:

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P'_i| + |O'_i|)^2} \right], 0 \leq d \leq 1, \quad (10)$$

Onde N é o número de observações, P é o resultado da simulação, O os dados observados, e P' representa a diferença entre os dados previstos e a média dos dados observados, e O' a diferença entre os dados observados e a sua média.

Esse índice estatístico reflete o quão acuradamente o parâmetro observado está sendo estimado pela variável simulada. O índice de concordância não é uma medida da correlação ou associação no sentido formal, mas uma medida do grau que o modelo é livre de erros. Ao mesmo tempo d é uma medida padronizada de modo que: (1) pode ser facilmente interpretada e (2) comparações cruzadas de suas magnitudes podem ser realizadas independentemente das unidades e variáveis. Varia de 0 a 1 e quando este índice é igual a 1 significa que a concordância entre as séries é máxima e 0 indica completa discordância (WILMOT, 1981).

Os índices de concordância calculados para cada local são apresentados na Tabela 4. O melhor índice de concordância foi obtido para a estação de Plataforma Penrod (0,99), e o pior, na estação da Ilha dos Irmãos (0,91).

Tabela 4: Comparação estatística entre os dados de elevação do ROMS e os dados medidos.

Local	D
Ponta dos Índios	0,93
Penrod	0,99
Ilha das Pacas	0,93
Ilha dos Irmãos	0,91
Mangunça	0,95

Os erros encontrados são esperados devido à grande extensão do domínio, dificultando a calibração da maré para toda área. Essas diferenças podem gerar superestimações ou subestimações das correntes de maré. Considerando que foram avaliadas diferentes estações ao longo do domínio, incluindo regiões oceânicas e costeiras, obtendo-se bons resultados na maioria dos casos, pode-se concluir que a maré foi bem representada pelo ROMS.

## 2.7.2 Temperatura da Superfície do Mar

Da Figura 38 a Figura 49 são apresentadas as médias mensais da temperatura da superfície do mar (TSM) obtidas do ROMS para o período de Janeiro de 2013 a Dezembro de 2013, e as médias mensais da TSM obtida de dados satelitais disponibilizados pelo NCOF (National Center for Ocean Forecast) através do produto OSTIA (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis) para o mesmo período. Este produto abrange todo o globo e possui alta resolução (~6 km). O produto é oferecido diariamente, sendo resultado da combinação de diversos sensores infravermelhos e micro-ondas, além de dados in situ por meio de processo de Análise Objetiva. Este produto tem oferecido dados acurados de TSM, com um erro médio quadrático menor que 0,6°C, em alta resolução e disponibilizados em tempo quase real (STARK et al. 2007).

Para a comparação, os dados do OSTIA foram interpolados para a mesma grade do ROMS, como apresentado nas figuras a seguir.

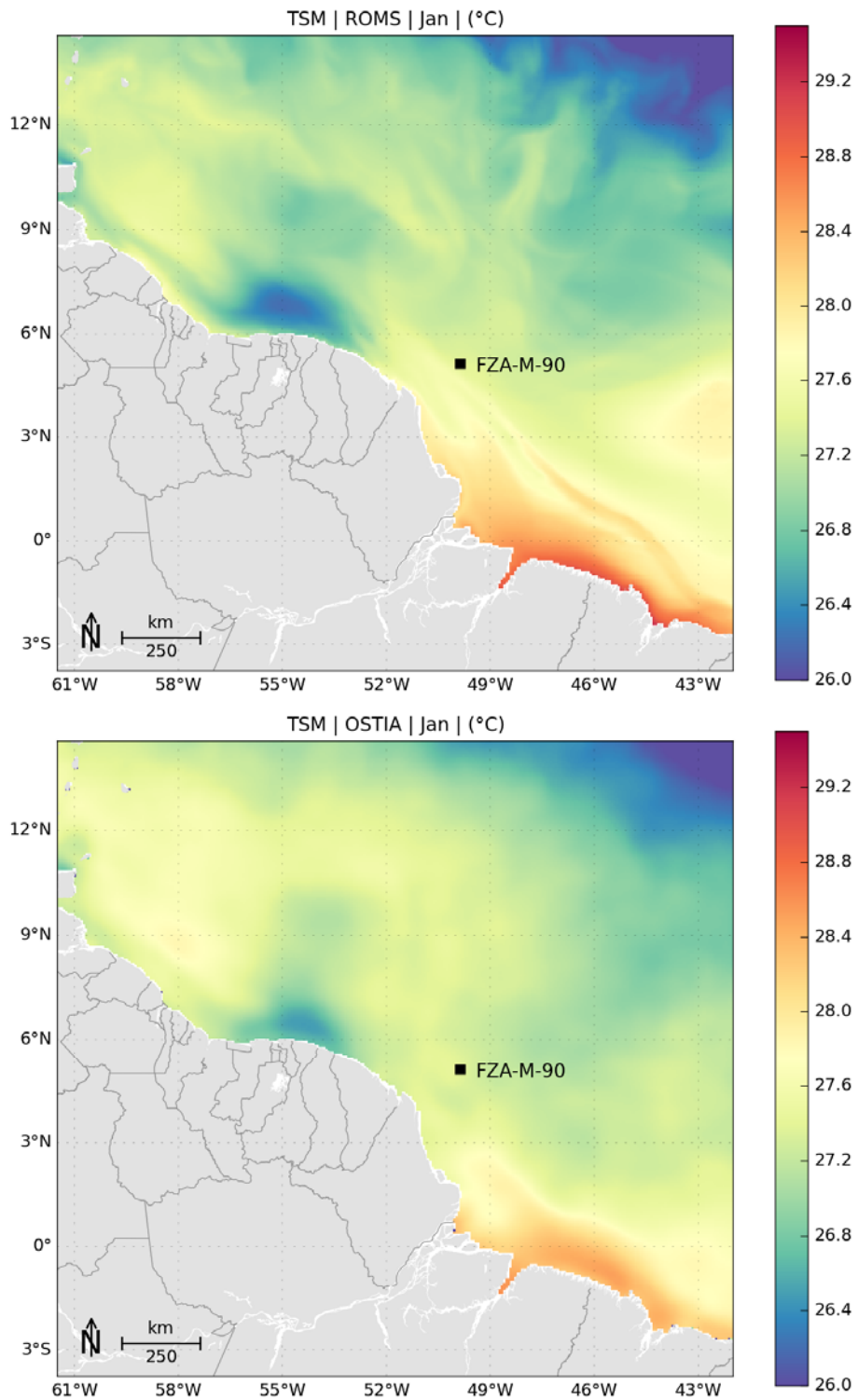


Figura 38: TSM média para Janeiro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

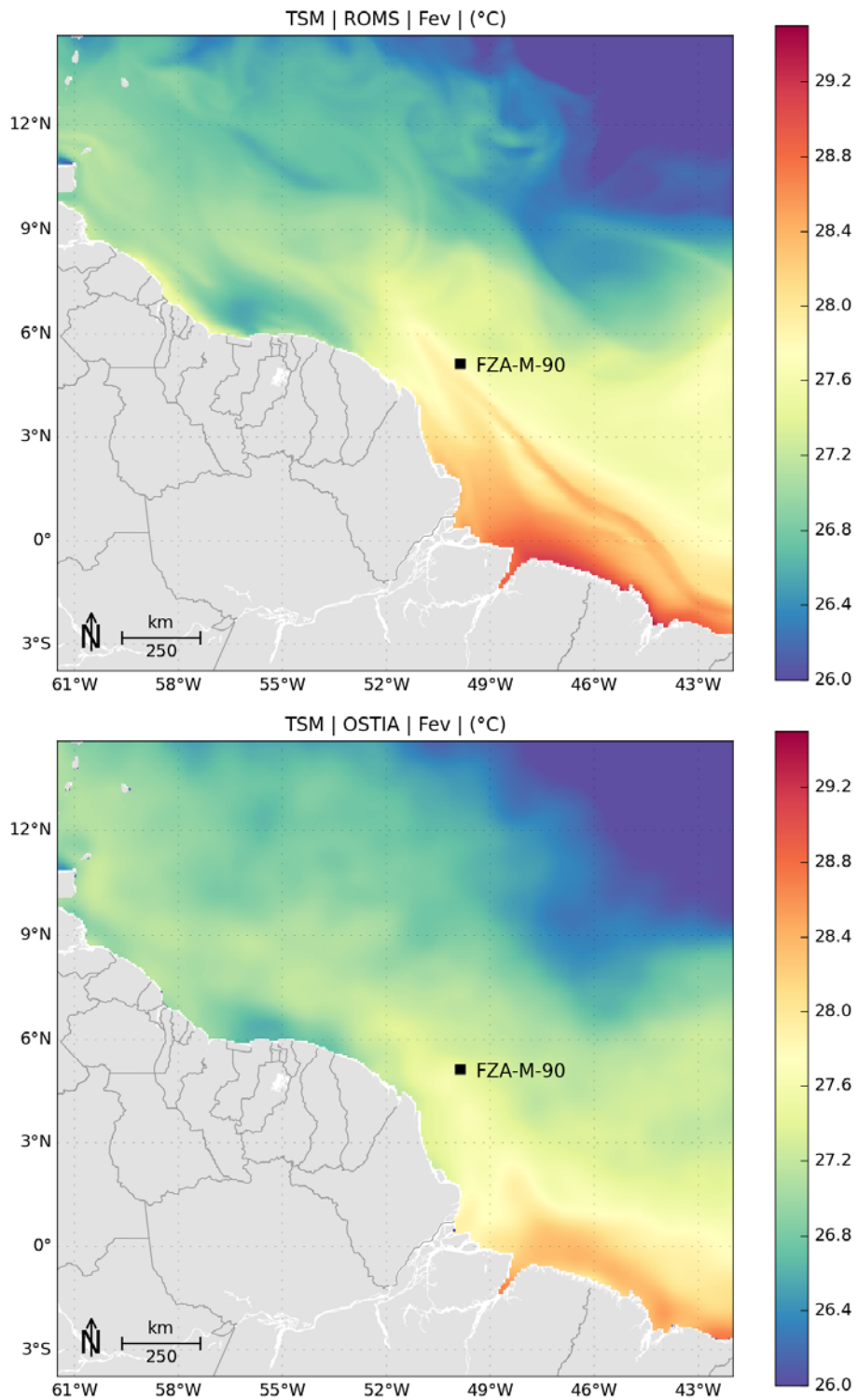


Figura 39: TSM média para Fevereiro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

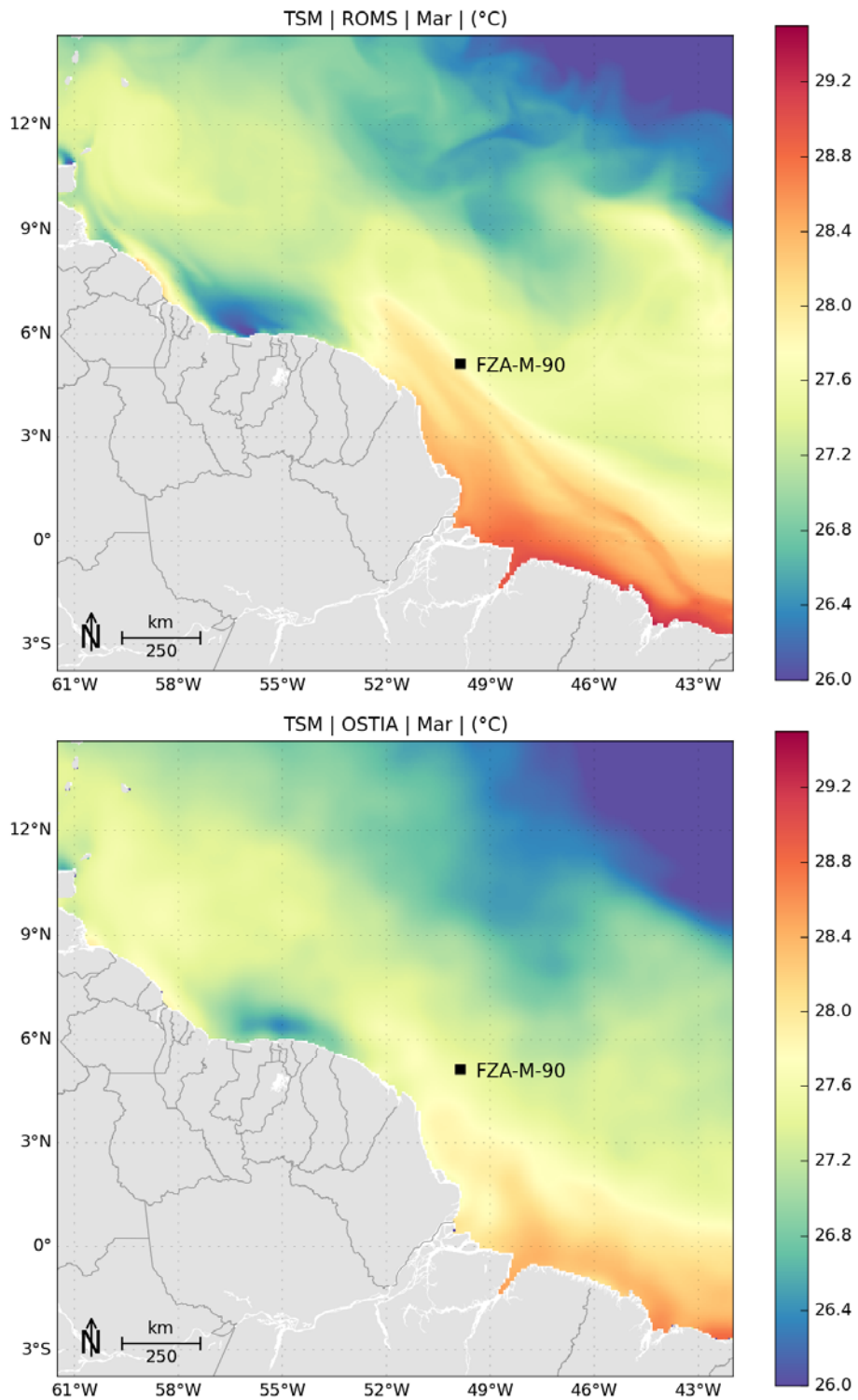


Figura 40: TSM média para Março de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

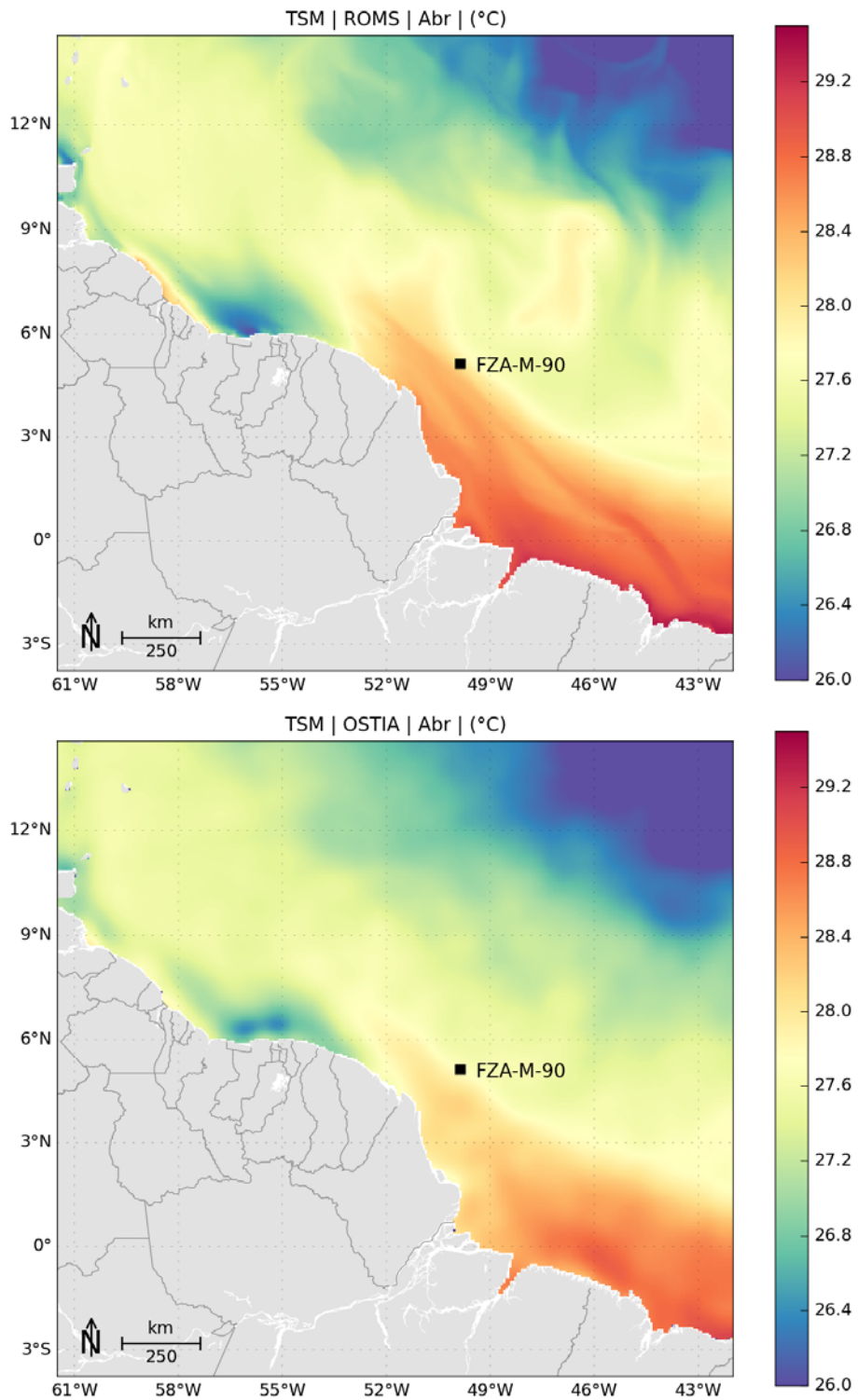


Figura 41: TSM média para Abril de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

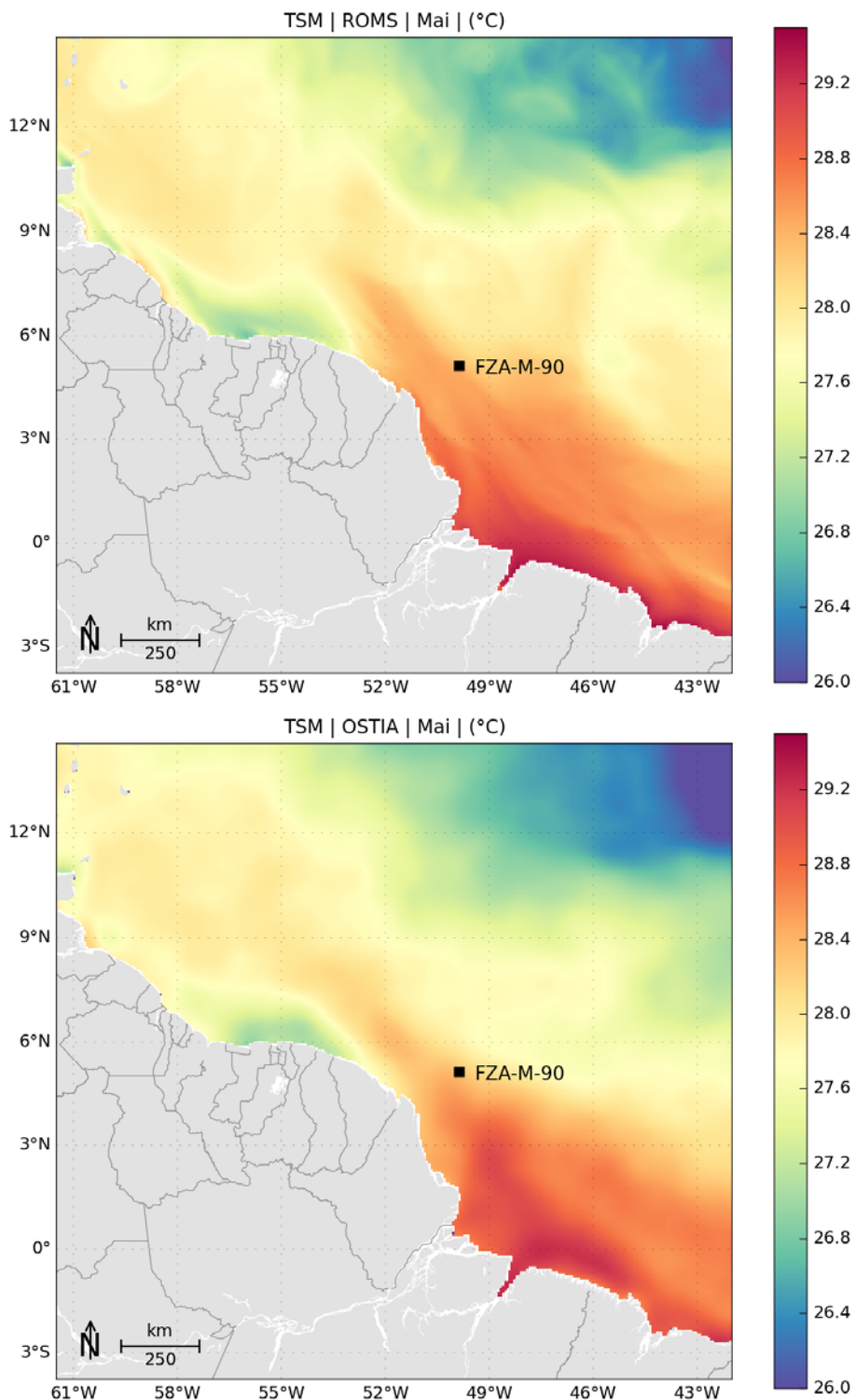


Figura 42: TSM média para Maio de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).



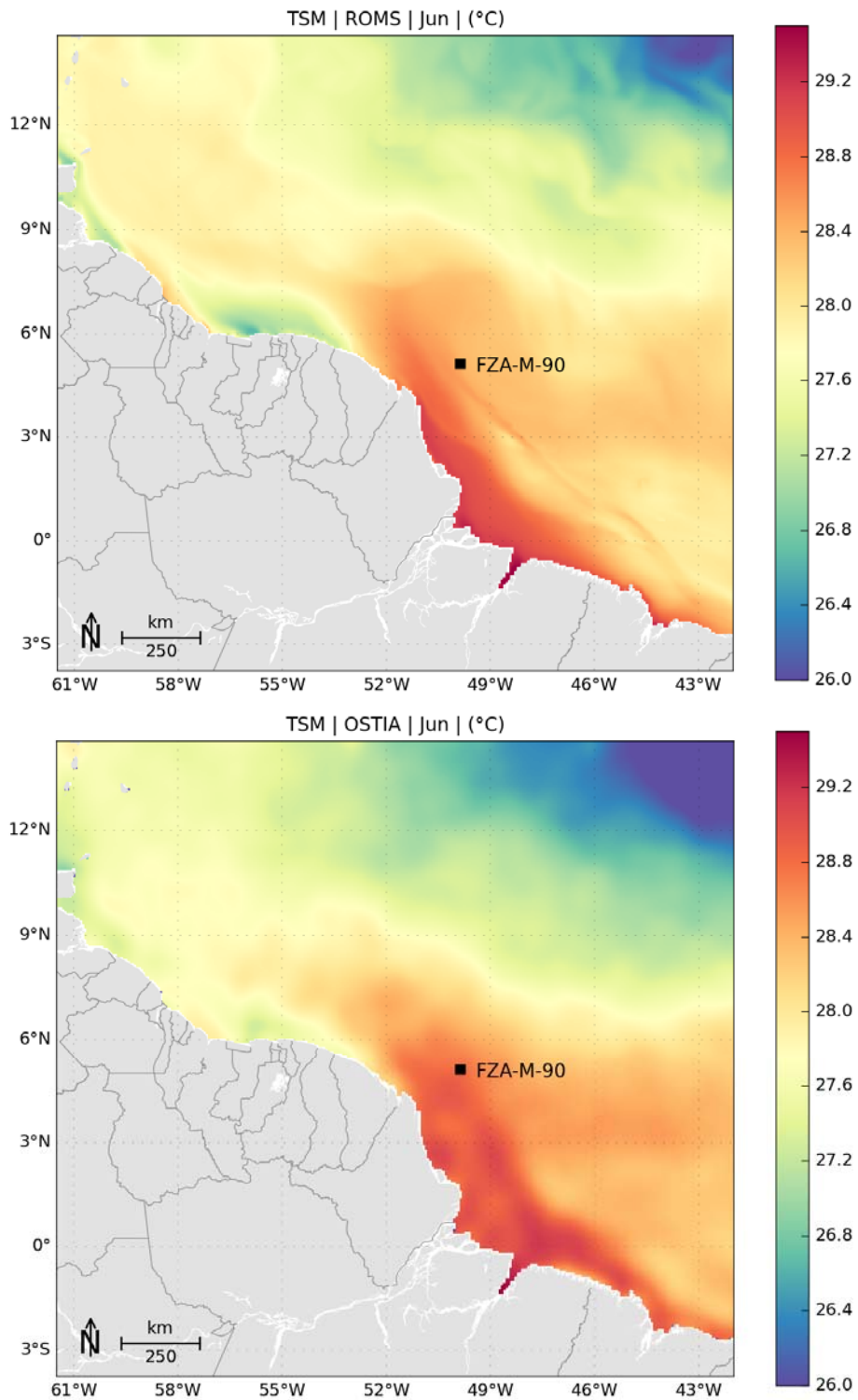


Figura 43: TSM média para Junho de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

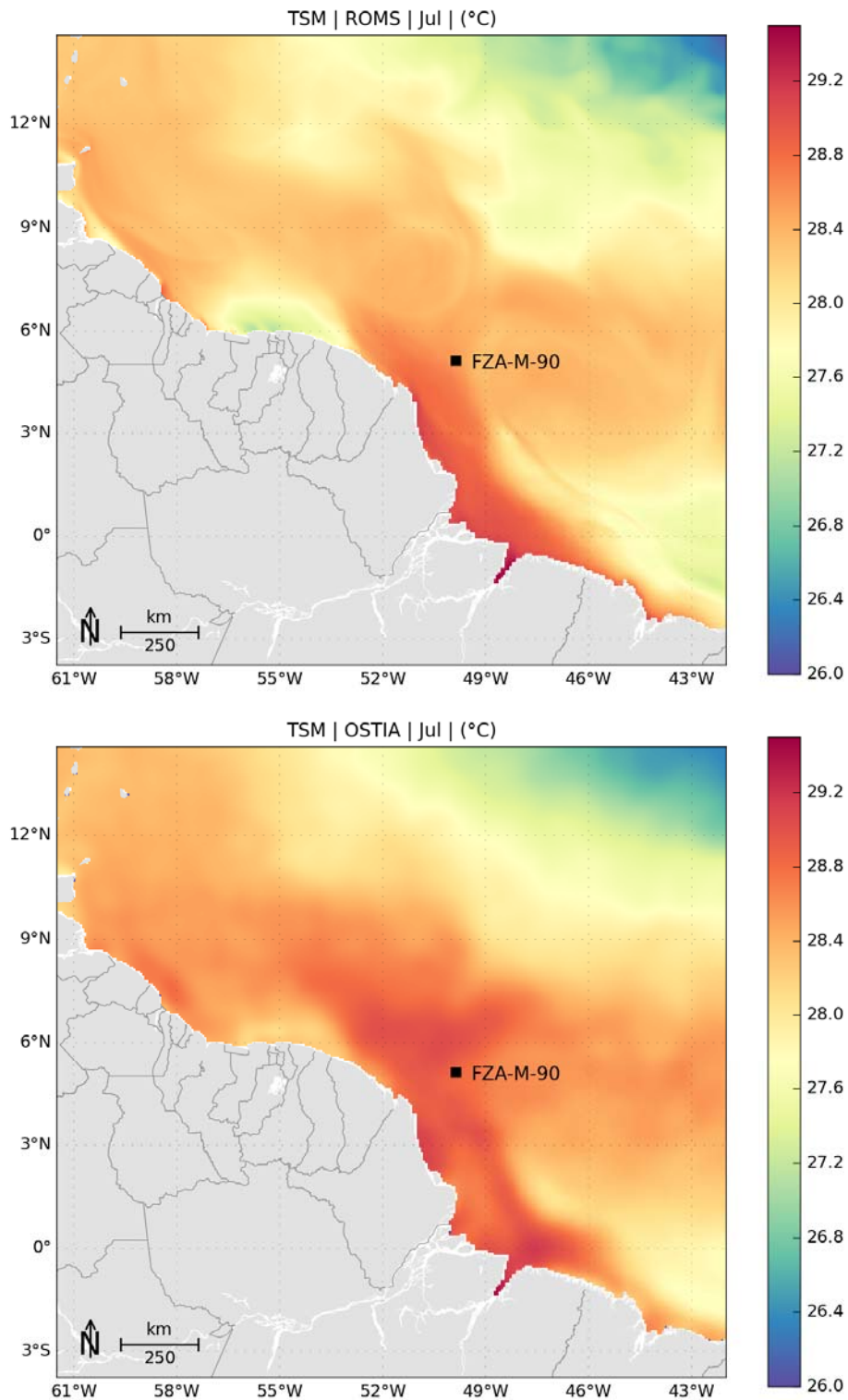


Figura 44: TSM média para Julho de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

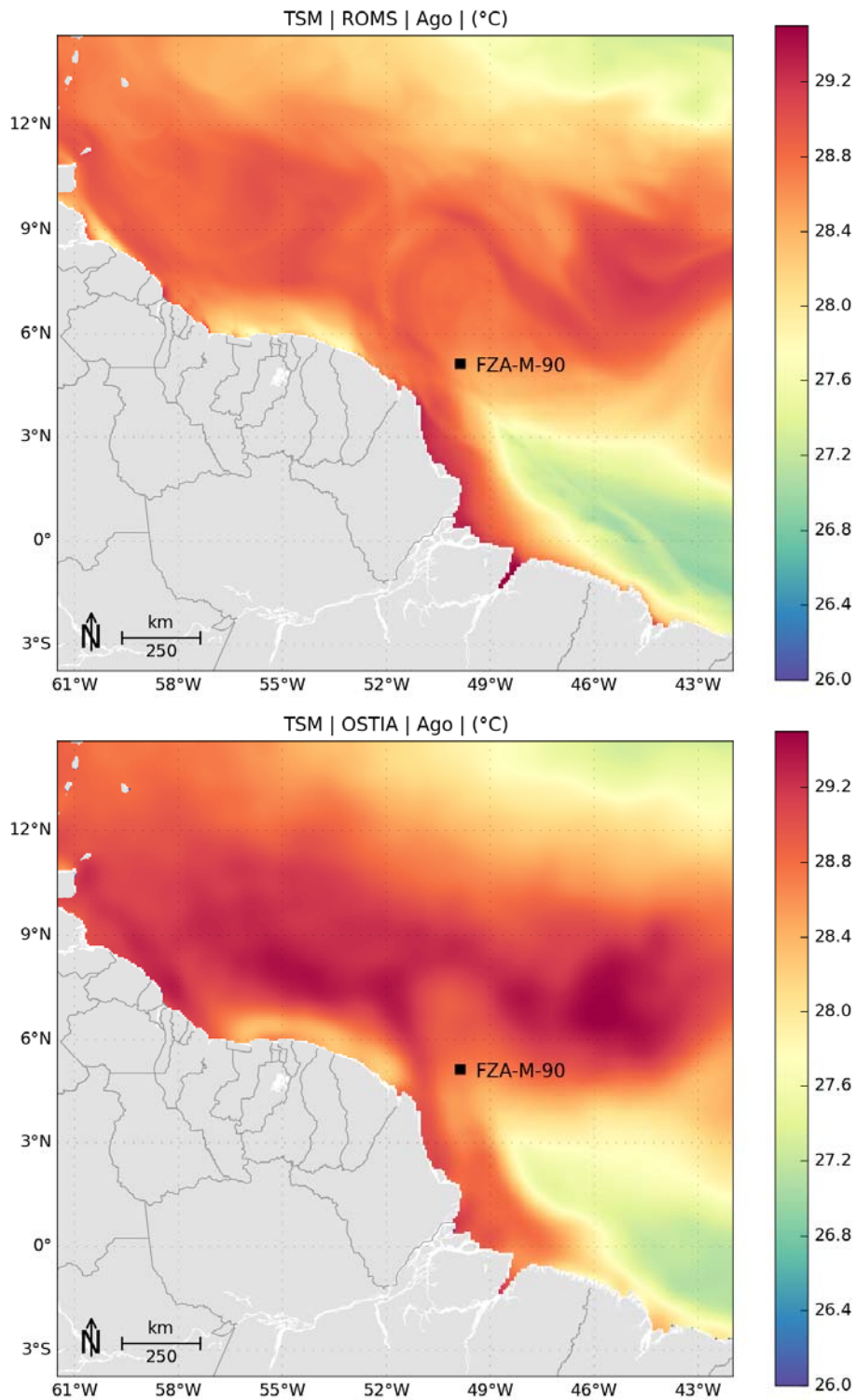


Figura 45: TSM média para Agosto de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

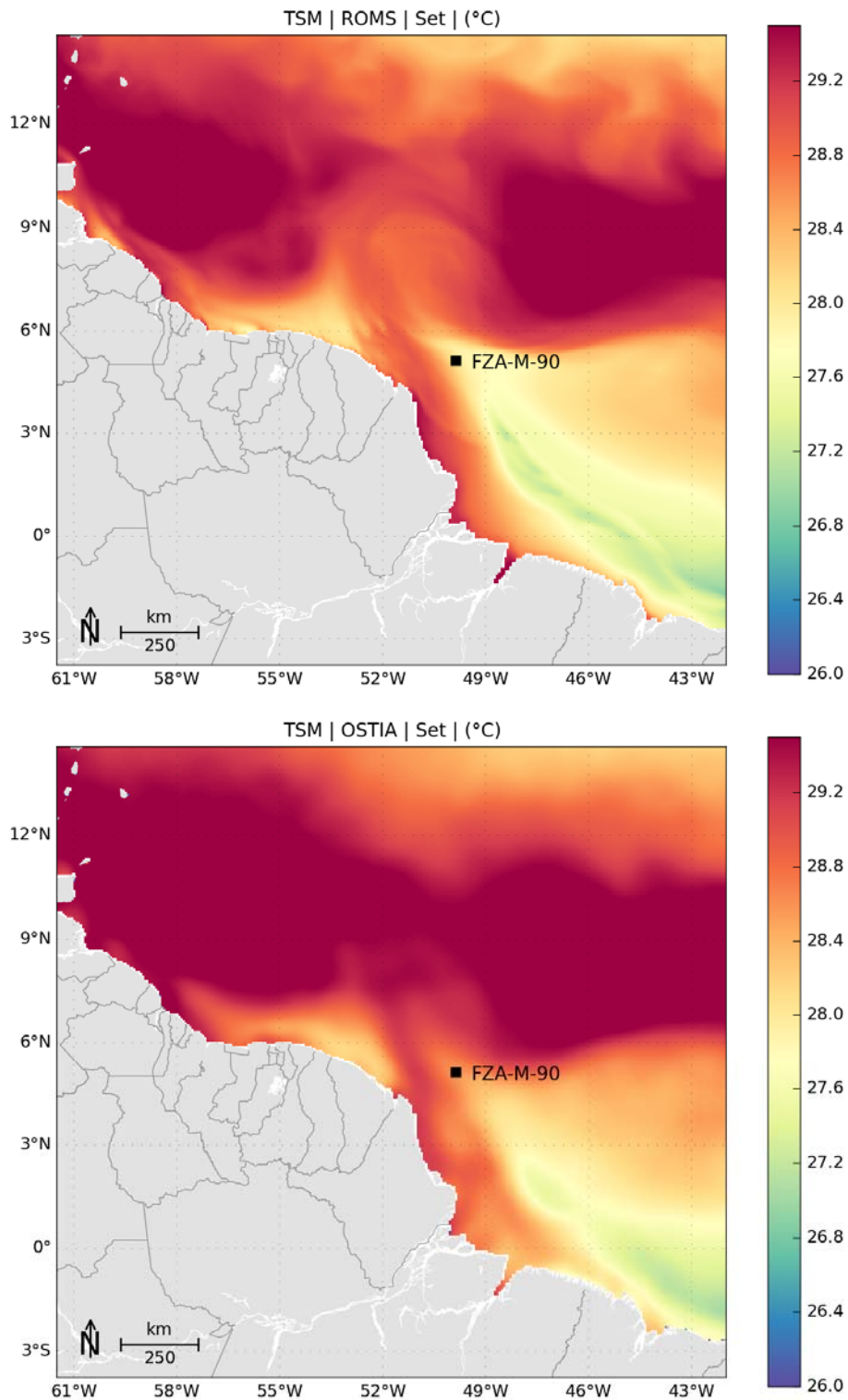


Figura 46: TSM média para Setembro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

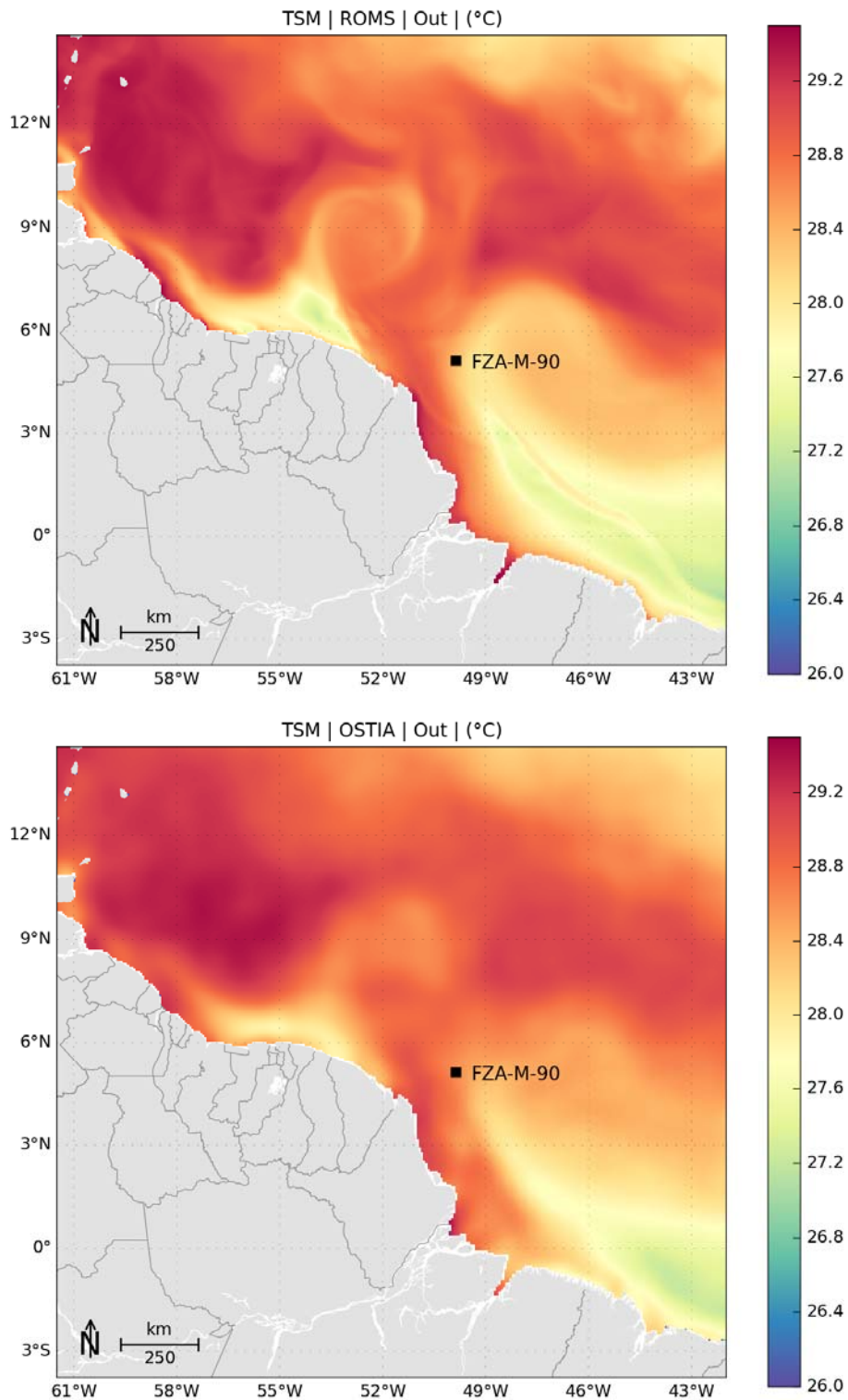


Figura 47: TSM média para Outubro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

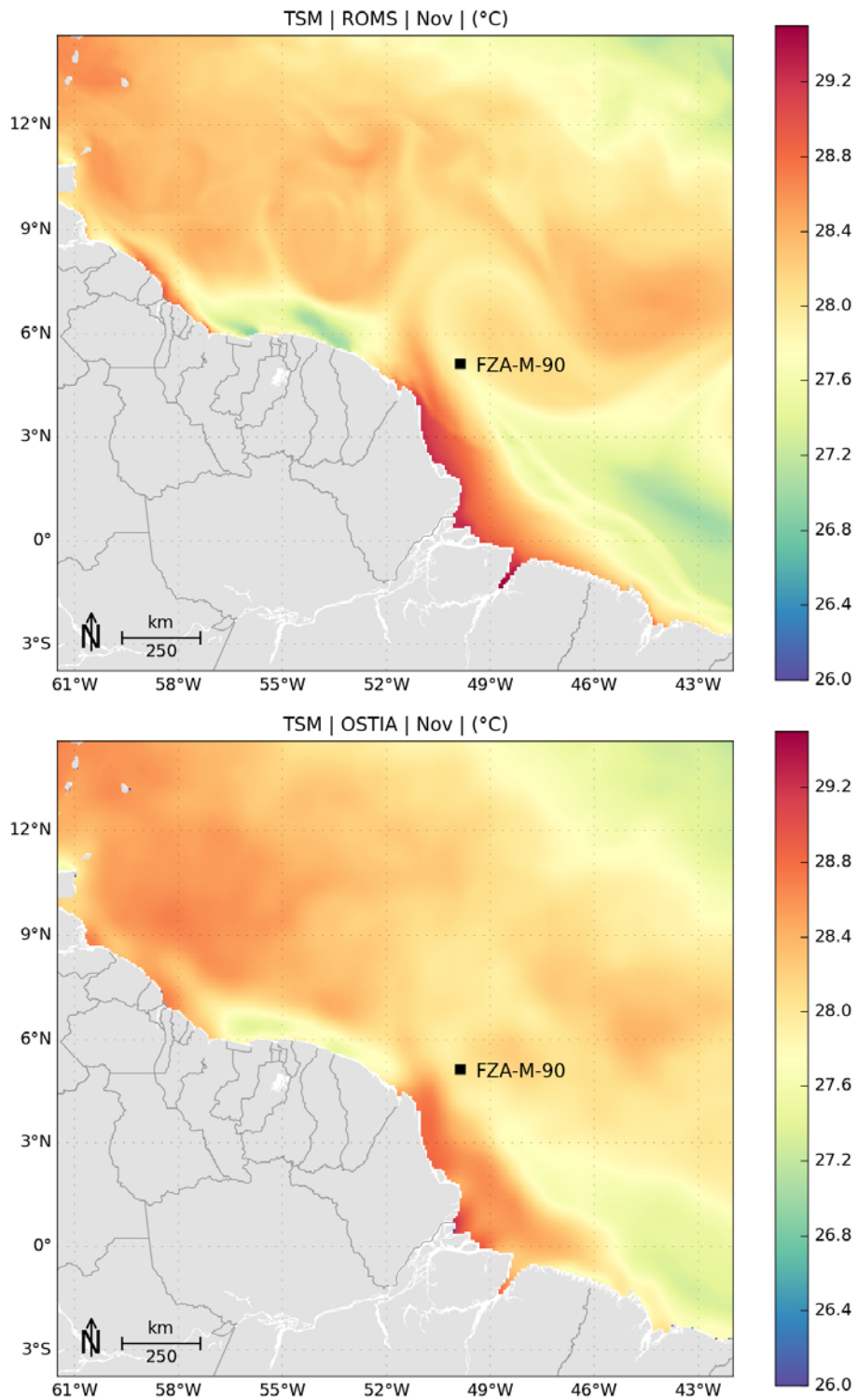


Figura 48: TSM média para Novembro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

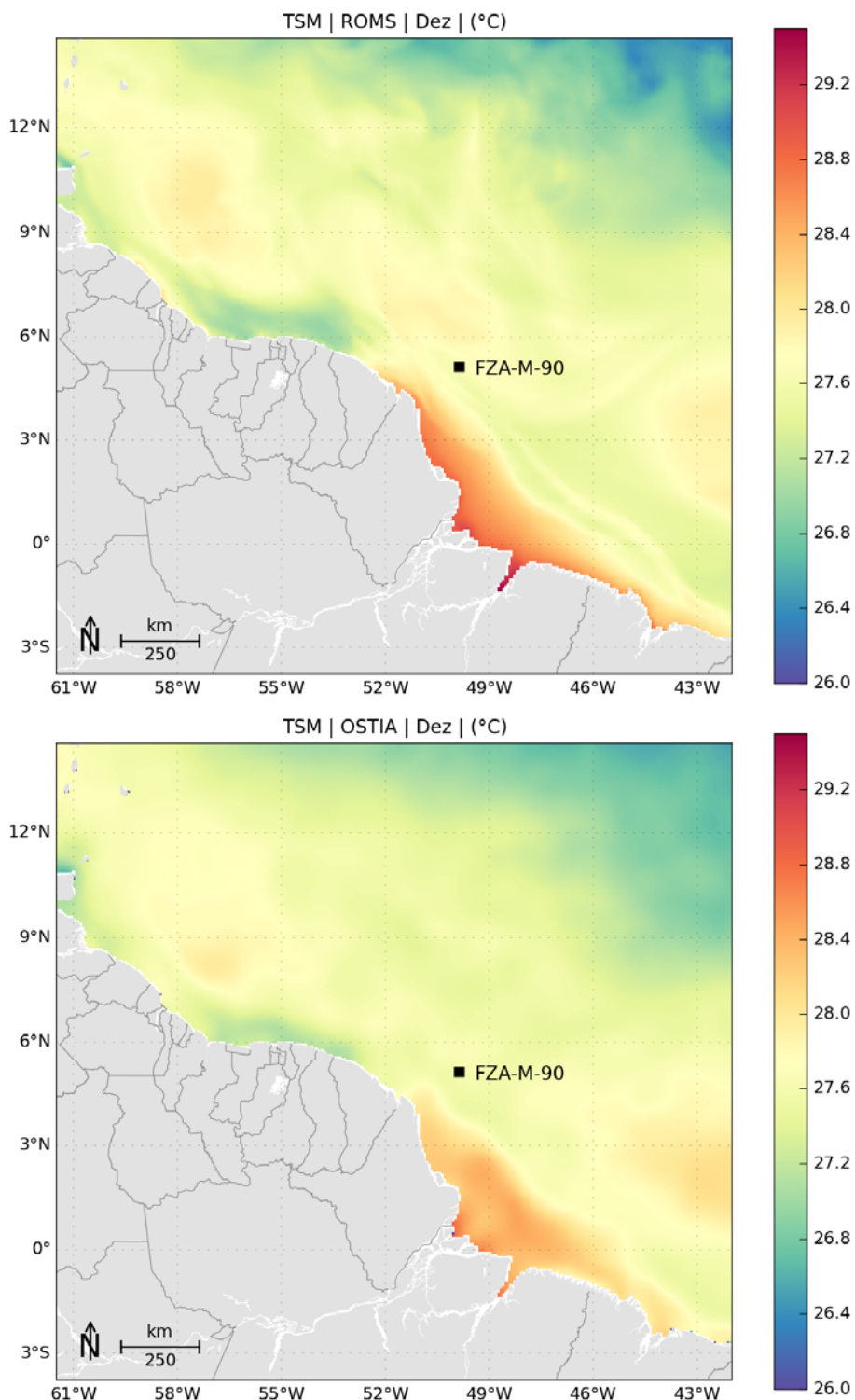


Figura 49: TSM média para Dezembro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

Em geral, verifica-se que os padrões da TSM foram bem representados pelo ROMS, embora haja uma superestimação da TSM nas regiões sobre a plataforma continental, e em alguns casos, uma subestimação das temperaturas associadas à região da Corrente Norte do Brasil, indicando possíveis ajustes necessários nos parâmetros de difusão do modelo. A boa representação do campo de temperatura superficial do modelo é um excelente indicador da capacidade do modelo em representar a hidrodinâmica da região, visto que a distribuição espacial da temperatura é influenciada fortemente pela advecção das correntes.

### 2.7.3 Estrutura Termohalina

Para avaliar a representação da estrutura vertical de temperatura e salinidade, na região de interesse, foram utilizados os dados da climatologia WOA13 (*World Ocean Atlas 13*) do *National Oceanographic Data Center* (NODC).

Os campos que compõem a base de dados da climatologia WOA13 consistem da análise objetiva dos dados históricos armazenados no NODC, coletados por diversas campanhas e equipamentos, em navios de pesquisa e de oportunidade. Esta análise objetiva utilizar dados irregularmente espaçados, gerando uma grade global com resolução espacial de  $1/4^\circ$ . Estes campos são tridimensionais e os dados são interpolados em 102 profundidades padrão desde a superfície até 5.500 m de profundidade. Temporalmente, esta climatologia consiste na média realizada para o período compreendido entre os anos de 1773 e 2013. Os dados da climatologia WOA13 podem ser obtidos através da sua página na internet (<http://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/>). Maiores informações sobre a bases climatológicas do WOA09 podem ser obtidas em Locarnini *et al.* (2013) e Zweng *et al.* (2013).

Os dados utilizados foram extraídos de um ponto de grade localizado em  $5,33^\circ\text{S}$  e  $49,88^\circ\text{W}$ , conforme apresentado na Figura 50.



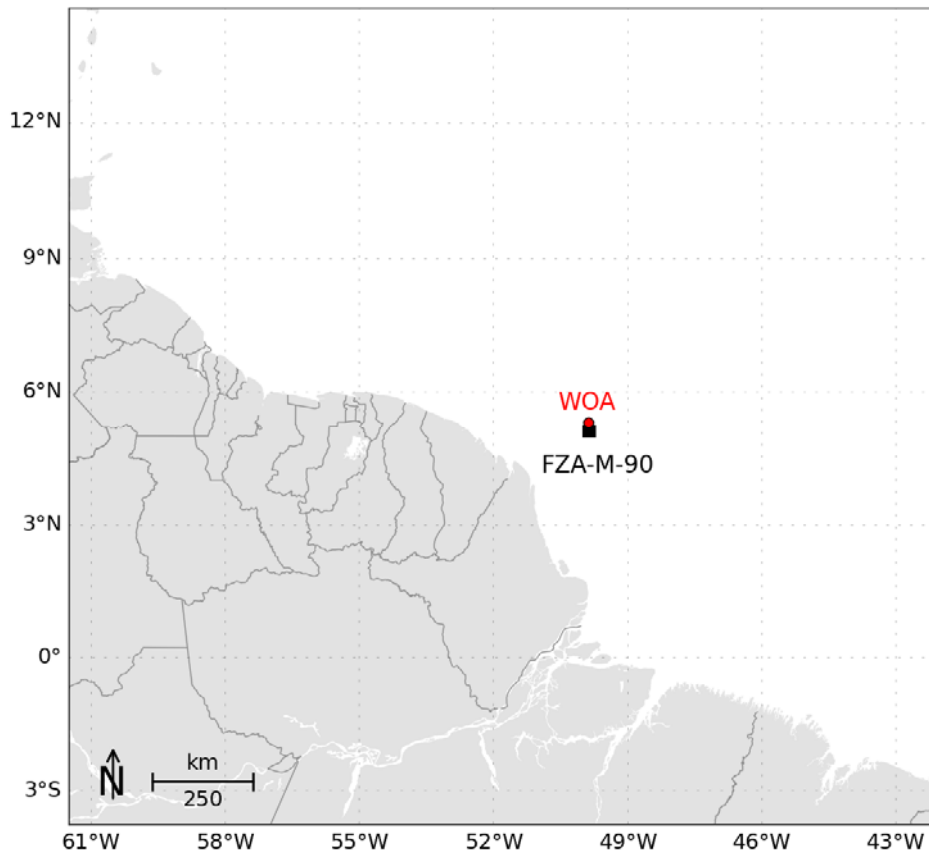


Figura 50: Localização do ponto de grade do WOA utilizado para as comparações.

Na Figura 51, que apresenta os perfis médios de temperatura e salinidade obtidos do WOA e do ROMS (todo período de modelagem), pode-se observar que o ROMS representou muito bem a estrutura vertical termohalina da região. Ao longo de toda a coluna d'água, os valores de temperatura e salinidade estiveram sempre muito próximos da climatologia.

Esta comparação é um indicativo de houve uma boa representação do posição média das massas d'água na costa norte brasileira.

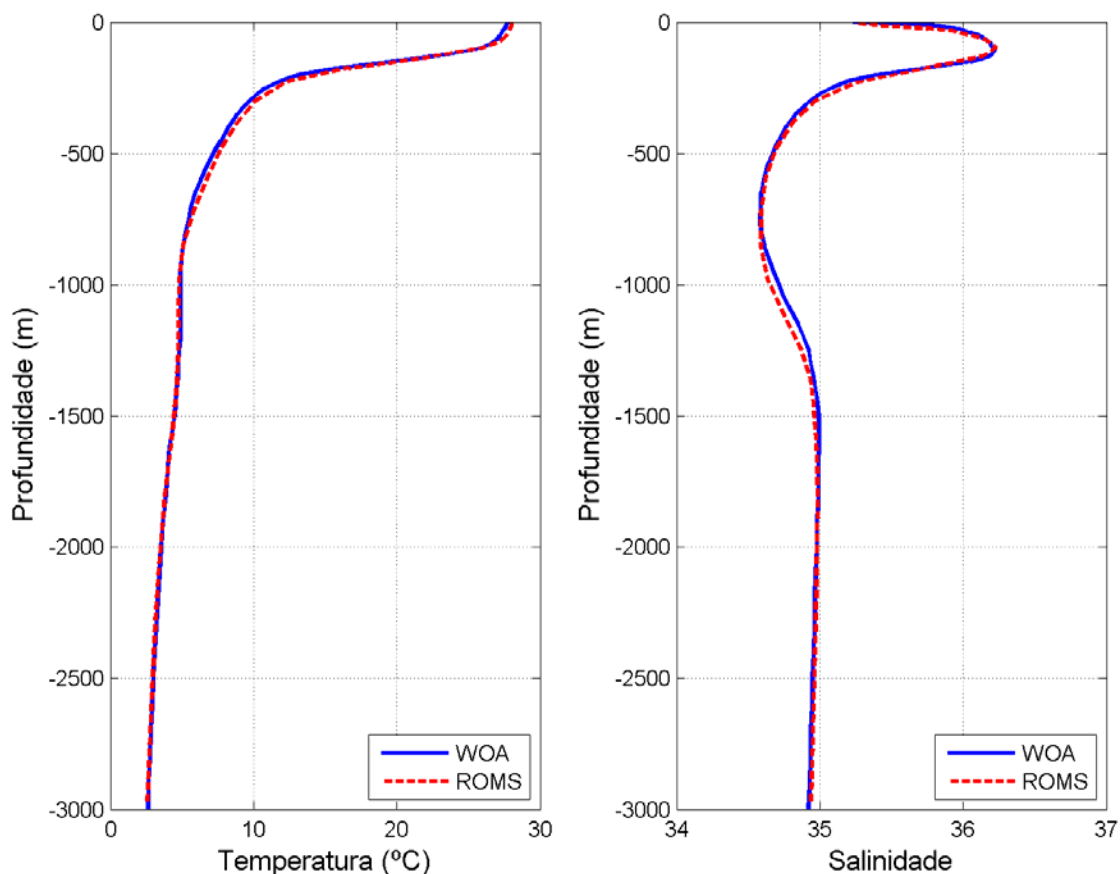


Figura 51: Perfis médios de temperatura e salinidade obtidos do WOA13.

## 2.7.4 Correntes

### 2.7.4.1 Correntes Superficiais

A representação adequada das correntes superficiais pode ser considerada o aspecto mais importante para a avaliação da modelagem hidrodinâmica em questão. Por se tratar de um modelo desenvolvido com intuito de forçar simulações de transporte de óleo, deve-se considerar que a menor densidade do óleo em relação a água, fará com que este apresente maior parte da sua deriva na superfície do mar.

Para comparação das correntes, foram utilizados dados de derivadores lagrangianos de superfície do GDP (Global Drifter Program). Foram considerados os dados dos derivadores cuja trajetória está contida no domínio desse estudo durante o período de dezembro de 2012 até junho de 2013. Nesse contexto, 9 derivadores aparecem como relevantes para a comparação.

A Tabela 5 agrupa as coordenadas do primeiro e último ponto onde cada derivador é encontrado no domínio espacial e temporal.

Tabela 5: Datas e coordenadas dos pontos iniciais e finais das trajetórias dos derivadores.

Derivador	Data Inicial	Longitude	Latitude	Data Final	Longitude	Latitude
01	26/12/2012	45.76°W	8.40°	20/01/2013	49.37°W	5.63°
02	23/01/2013	42.01°W	10.16°	23/05/2013	56.40°W	11.30°
03	27/02/2013	42.09°W	1.08°	05/03/2013	45.87°W	0.76°
04	27/02/2013	42.02°W	1.06°	29/06/2013	58.69°W	10.28°
05	12/02/2013	42.06°W	2.20°	19/04/2013	55.73°W	14.49°
06	09/06/2013	42.03°W	1.81°	17/06/2013	45.97°W	0.85°
07	08/06/2013	42.00°W	1.55°	29/06/2013	47.58°W	0.33°
08	10/01/2013	42.01°W	2.04°	23/06/2013	61.30°W	11.38°
09	07/05/2013	42.11°W	2.06°	29/06/2013	45.21°W	6.06°

Os dados transmitidos pelos derivadores passaram por um controle de qualidade baseado na técnica *forward & backward* (HANSEN; POULAIN, 1996) visando eliminar transmissões espúrias. O critério de corte foram velocidades superiores a 2,5 m/s, sendo identificados e removidos os dados de posição transmitidos que levassem a valores de velocidade superiores a este limiar.

Para fins de comparação foram usados os dados de velocidade dos derivadores, espaçados de 6h, no período em que estes permaneceram no domínio de modelagem, e a velocidade das correntes nos pontos de grade mais próximos da posição do derivador e no mesmo instante temporal.

A seguir, da Figura 52 a Figura 60 são apresentadas as trajetórias descritas pelos 9 derivadores, durante o período no qual estes permaneceram dentro do domínio de modelagem e as comparações entre as componentes zonais e meridionais das correntes medidas pelos derivadores, e calculadas pelo ROMS. Nas figuras, os círculos representam os pontos de início da trajetória, enquanto os "X" o ponto final.

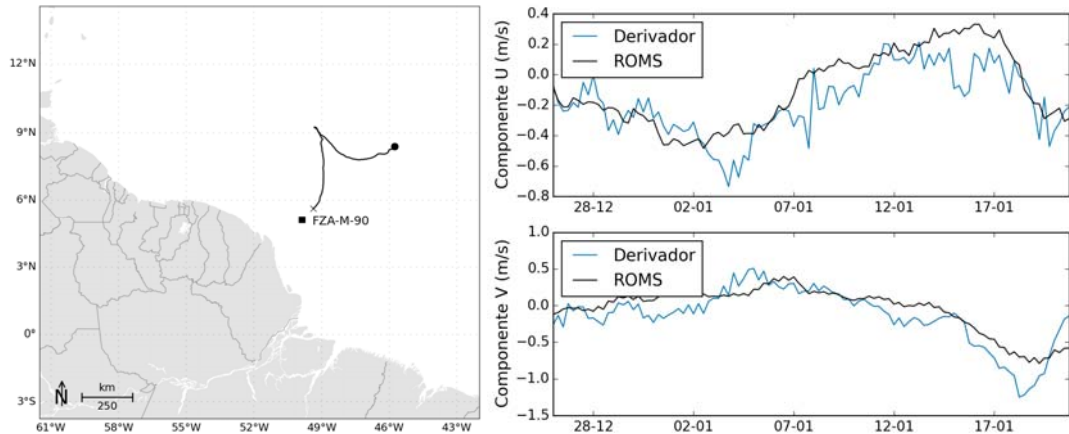


Figura 52: Trajetória descrita pelo derivador 01 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 01 e os resultados do ROMS (direita).

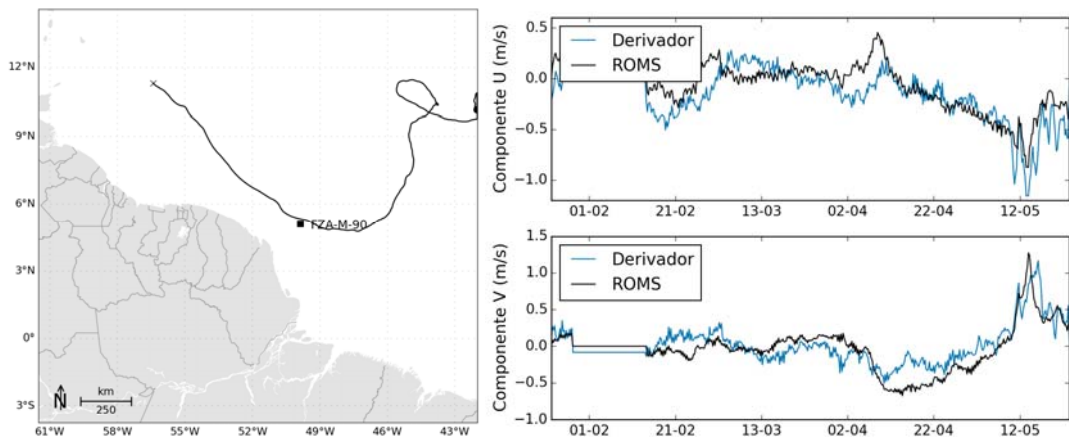


Figura 53: Trajetória descrita pelo derivador 02 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 02 e os resultados do ROMS (direita).

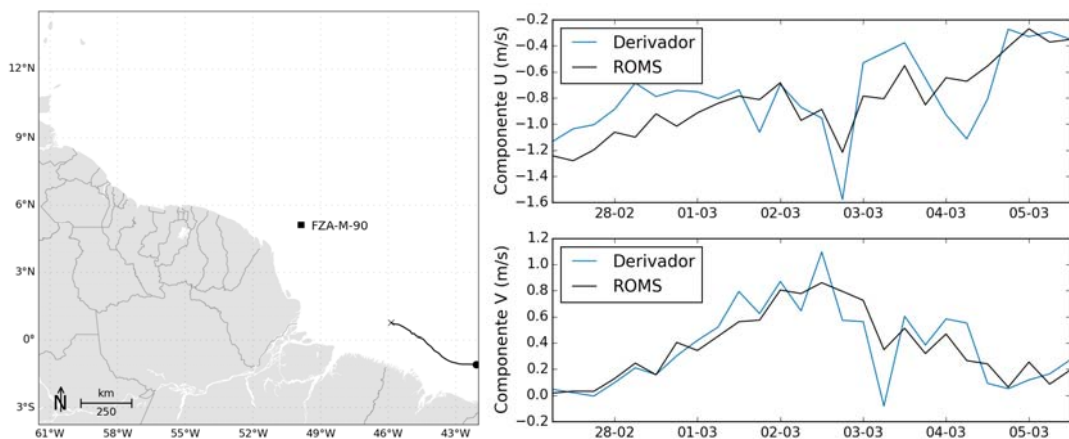


Figura 54: Trajetória descrita pelo derivador 03 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 03 e os resultados do ROMS (direita).

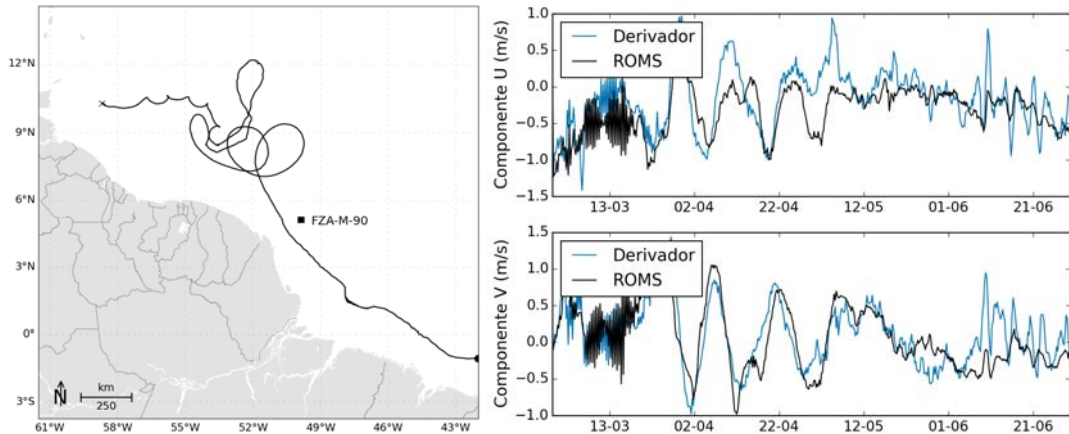


Figura 55: Trajetória descrita pelo derivador 04 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 04 e os resultados do ROMS (direita).

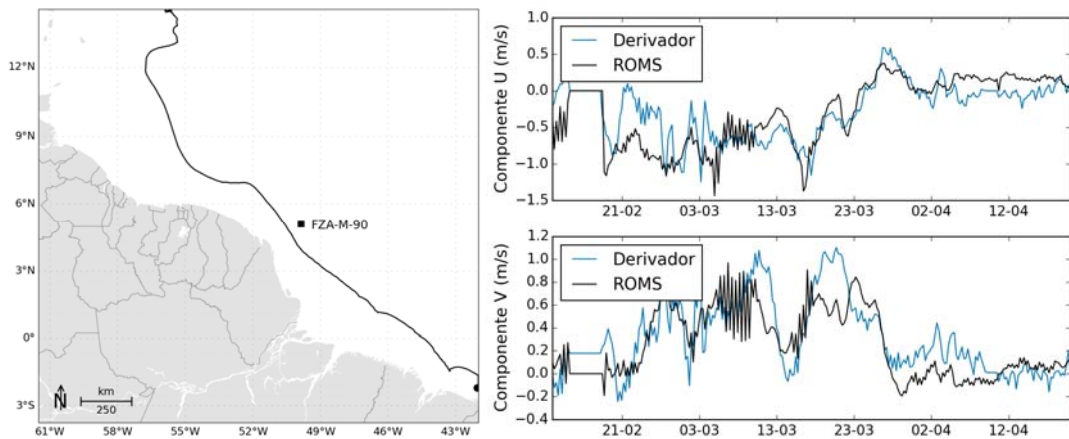


Figura 56: Trajetória descrita pelo derivador 05 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 05 e os resultados do ROMS (direita).

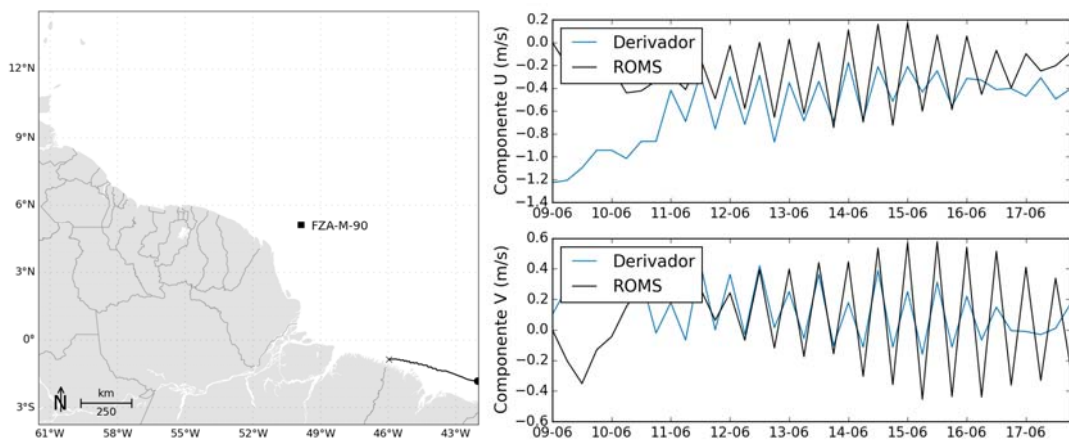


Figura 57: Trajetória descrita pelo derivador 06 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 06 e os resultados do ROMS (direita).

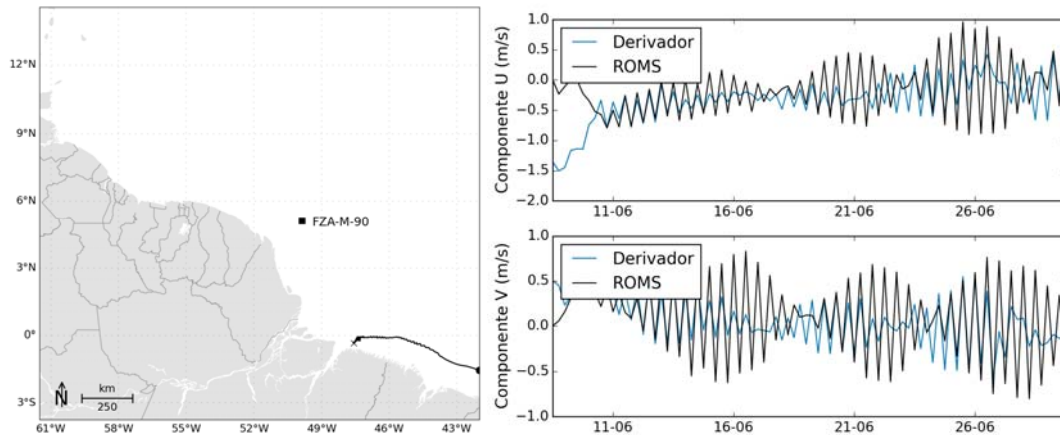


Figura 58: Trajetória descrita pelo derivador 07 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 07 e os resultados do ROMS (direita).

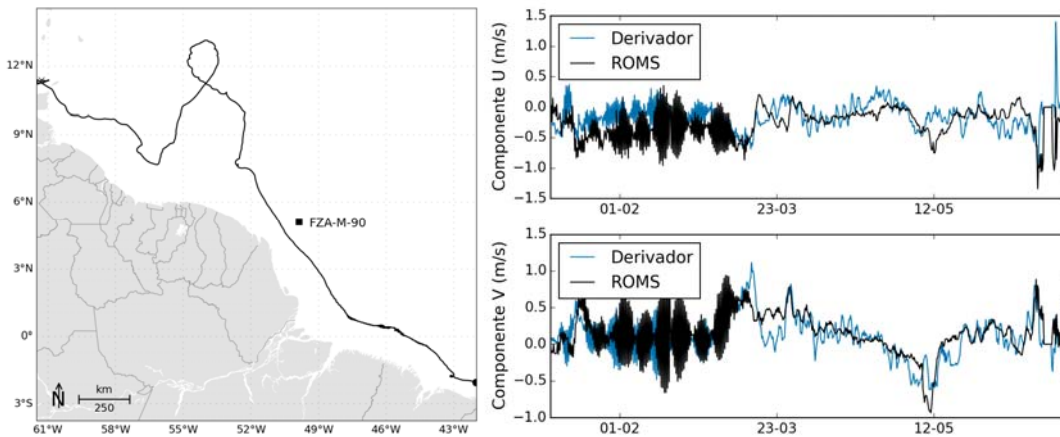


Figura 59: Trajetória descrita pelo derivador 08 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 08 e os resultados do ROMS (direita).

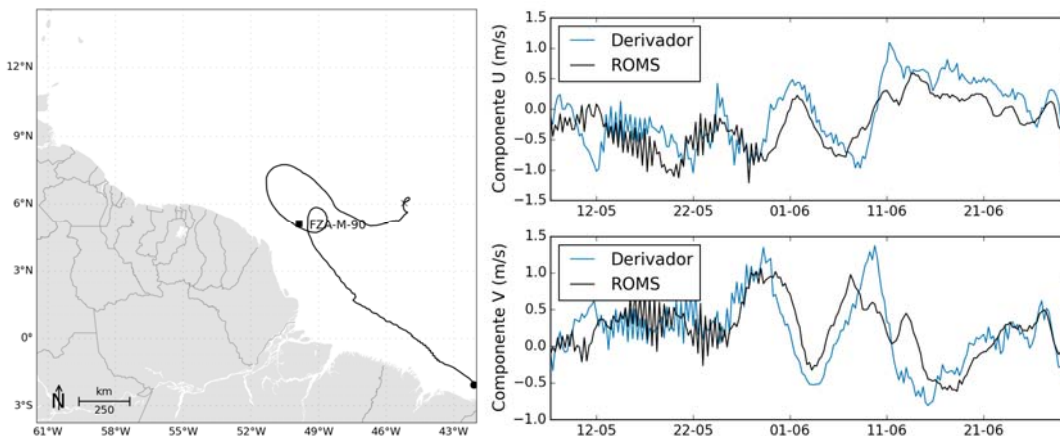


Figura 60: Trajetória descrita pelo derivador 09 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 09 e os resultados do ROMS (direita).

Através dos gráficos comparativos pode-se observar que os resultados do ROMS apresentaram uma boa aproximação com os dados medidos pelos derivadores, tanto nas amplitudes das oscilações quanto na fase. A fim de quantificar as comparações apresentadas, foi feita uma análise estatística calculando o índice de Wilmot (descrito na seção 2.7.1). O valor médio do índice de Wilmot (1982) para cada componente das correntes é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Índice de Wilmot das comparações modelo/derivadores.

Parâmetro	Média
D componente zonal	0,81
D componente meridional	0,87

Esta comparação com os derivadores é um bom indicativo de que o modelo é capaz de representar os principais fenômenos da região, tanto no espaço quanto no tempo, uma vez que os derivadores se deslocaram ao longo do domínio de modelagem, com os resultados permanecendo compatíveis ao longo do tempo.

Em resumo, levando-se em conta as ressalvas feitas no início do capítulo, o modelo representa bem as correntes em superfície no que tange o padrão de intensidade e direção.

#### 2.7.4.2 Correntes em Profundidade

As comparações de corrente em profundidade, principalmente na costa norte do Brasil, tem como principal fator limitante, a escassez de dados medidos, principalmente de séries temporais de longa duração. A baixa quantidade de informações em profundidade, também dificulta a representação da circulação intermediária e profunda. Devido quantidade de informações disponíveis ser muito maior em superfície, é esperado que modelos que utilizam sistemas de assimilação de dados, como o MyOcean (utilizado como condição inicial, de contorno e *nudging*), apresentem resultados mais realistas em superfície.

Para avaliar o comportamento das correntes ao longo da coluna d'água, foram utilizados dados dados de corrente obtidos do Programa *Current Meter Data do World Ocean Circulation Experiment* (WOCE), da *Oregon State University*. A base de dados do WOCE contempla um arranjo de linhas de fundeios na bacia norte do Brasil, contemplando a região do fluxo principal da CNB. O arranjo ACM7 contém os fundeios K327 e K339, localizados na latitude 0,087° N e longitude 44,390° W, e o fundeio K359, localizado na latitude de 0,243° N e longitude 44,310° W (Figura 61). Destaca-se que estes fundeios foram efetuados em épocas diferentes: K 327, de setembro de 1989 a outubro de 1990; K 339, de outubro de 1990 a setembro de 1991; e K 359, de outubro de 1992 a fevereiro de 1993. Para avaliação da estrutura vertical de correntes,

foram retiradas médias de velocidade de corrente nas profundidades nas quais foram realizadas as medições.

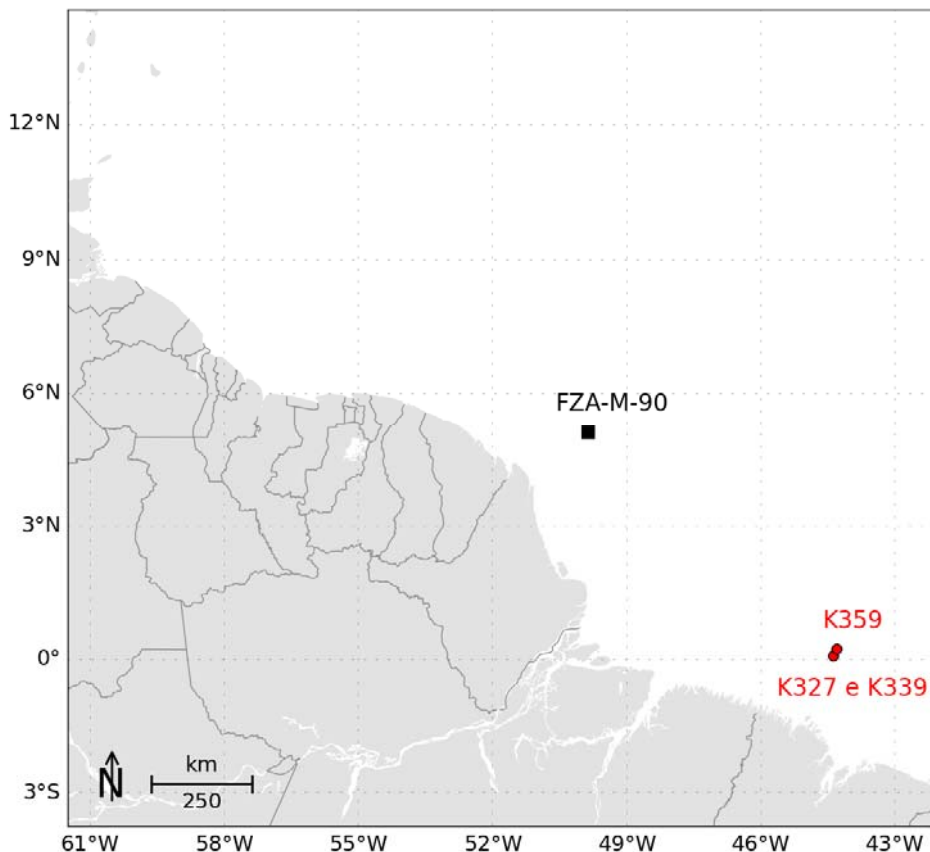


Figura 61: Localização dos fundeios do WOCE utilizados para comparação.

Na Figura 62 são apresentados os perfis verticais médios, retirados dos dados do WOCE e dos resultados do ROMS para o ponto mais próximo aos fundeios K327 e K339 (mais profundos). Ressalta-se que as comparações realizadas tem um caráter qualitativo, uma vez que os dados do WOCE e as simulações do ROMS são referentes a períodos de tempo bem diferentes. Sendo assim, embora sejam esperadas diferenças entre os dados, devido à sua natureza e períodos distintos, pretende-se avaliar padrões mais gerais com essa comparação, como por exemplo as direções e intensidades médias da corrente, e as profundidades nas quais ocorrem inversões de fluxo.



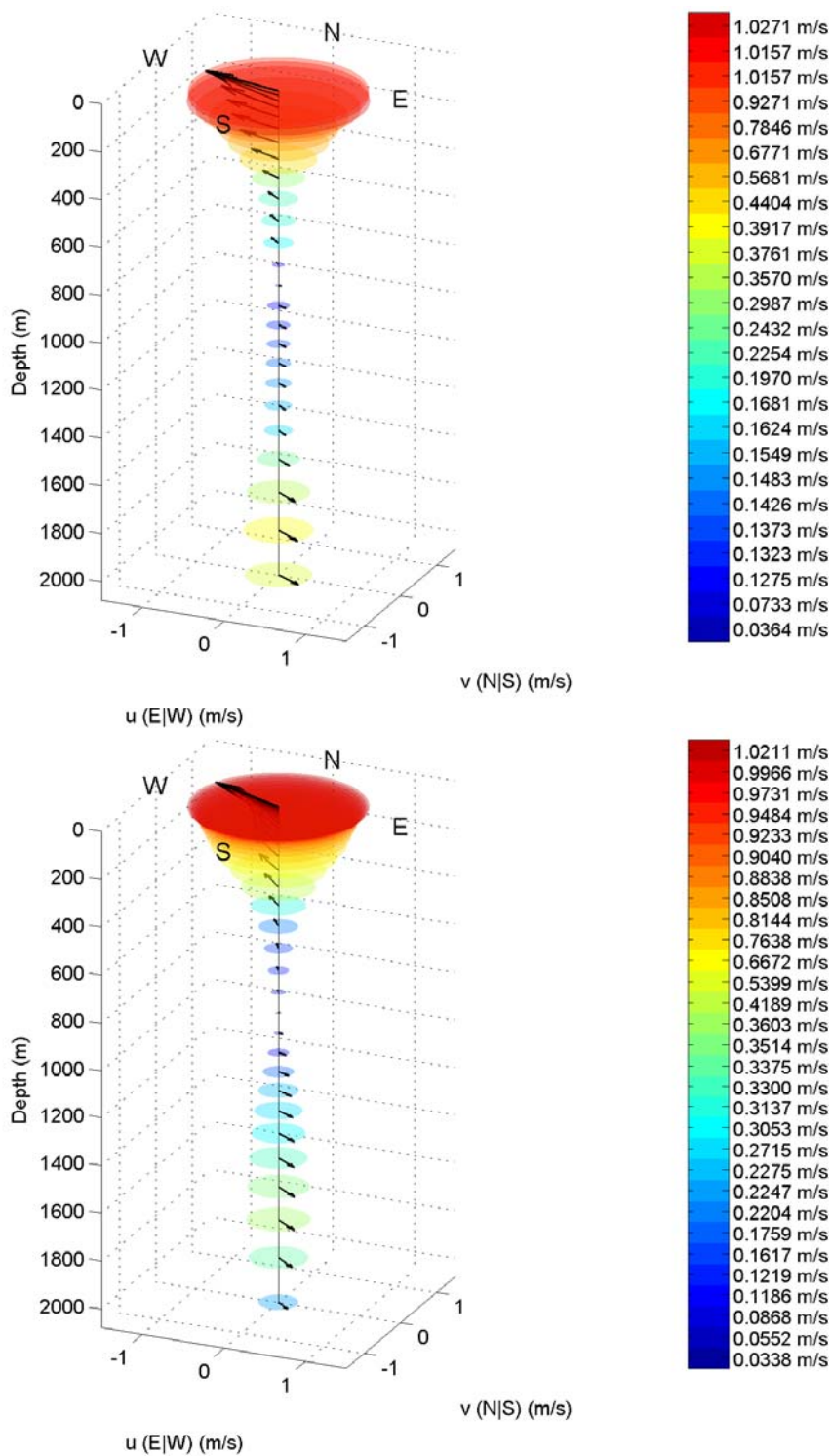


Figura 62: Perfil vertical de correntes retirado do WOCE (acima) e do ROMS (abaixo).

O perfil vertical médio obtido do ROMS apresenta o mesmo padrão verificado no WOCE: correntes superficiais para WNW, com intensidades médias próximas a 1 m/s. Entre a superfície e 600 m de profundidade há uma diminuição gradativa das intensidades. De 800 a 2000 m de profundidade há uma inversão do fluxo para ESSE, com intensidades médias da ordem de 0,3 m/s.

## 2.8. Resultados

Toda costa norte brasileira sofre influência direta da Corrente Norte do Brasil (CNB), que transporta águas superficiais do Atlântico Sul para o hemisfério norte. A CNB é uma corrente de contorno oeste formada próximo da latitude 10°S, onde o fluxo para oeste da Corrente Sul Equatorial (CSE) inicia um movimento para norte em uma corrente de contorno (JOHNS *et al.*, 1998).

Ao norte do Equador o fluxo começa a deixar a CNB, alimentando um sistema de contra-correntes zonais: A Contra-Corrente Norte Equatorial (CCNE), a Subcorrente Equatorial (SCE), e a Subcorrente Norte Equatorial (SNE). Em superfície a CNB continua seu fluxo até aproximadamente 6 - 7° N, onde esta retroflete para leste, alimentando a CCNE entre os meses de junho e janeiro, aproximadamente. Durante esta retroflexão, frequentemente são originados vórtices pela CNB, que se desprendem da corrente e seguem para noroeste em direção ao Caribe (JOHNS *et al.*, 1998).

O sistema de correntes descrito acima é exemplificado na Figura 63.

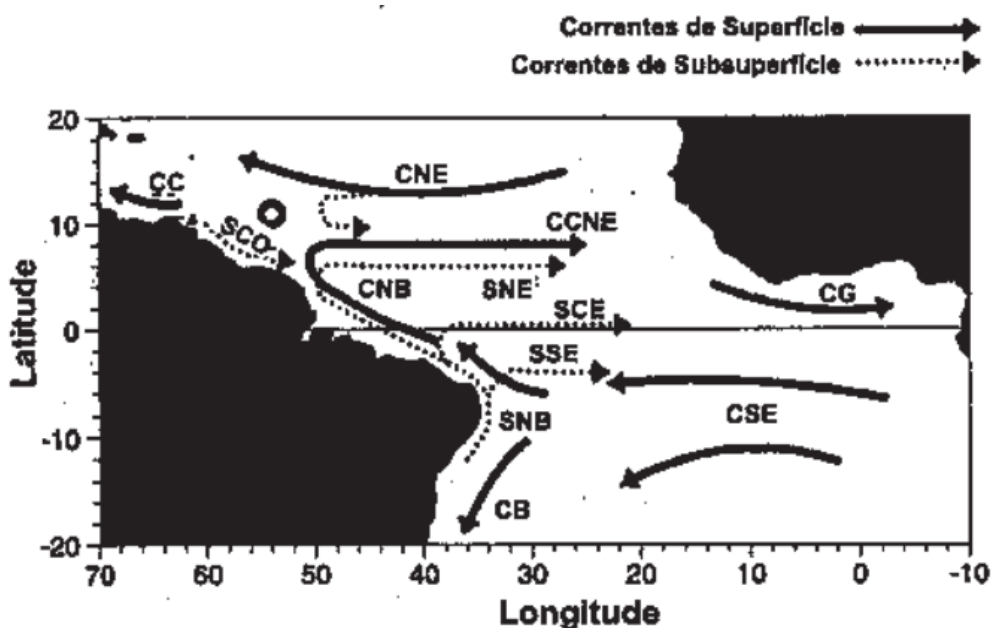


Figura 63: Diagrama esquemático das correntes superficiais e subsuperficiais do Oceano Atlântico Tropical. Fonte: Neto (2005).

Os campos médios mensais de circulação obtidos dos resultados do modelo podem ser observados da Figura 64 até a Figura 75. Estes campos demonstram que a região do Bloco

FZA-M-90 é influenciada diretamente pela CNB, que flui para NW, ao longo de todo o ano, com velocidades médias entre 1 e 1,5 m/s.

Não há variabilidade sazonal na direção das correntes na região de estudo, entretanto, como apresentado pela literatura, a retroflexão da CNB se torna mais nítida no segundo semestre do ano. Vórtices gerados no processo de retroflexão também podem ser observados.

Na plataforma continental dominam as correntes de maré, e a circulação induzida pelos ventos alísios de NE no período chuvoso (janeiro a junho) e de E no período seco (julho a dezembro).

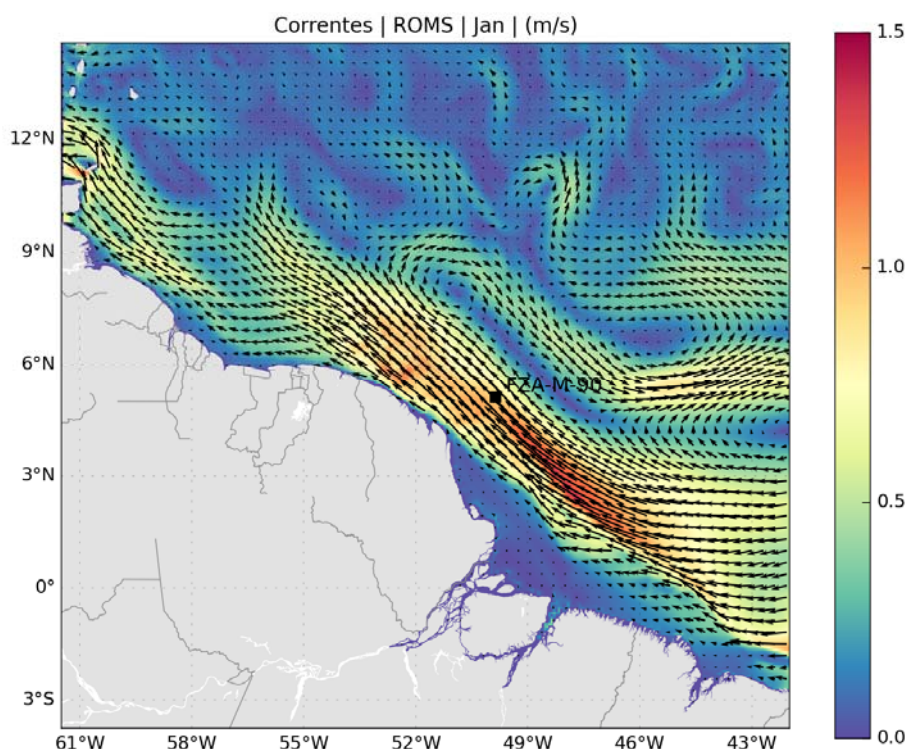


Figura 64: Campo médio de circulação para o mês de janeiro.

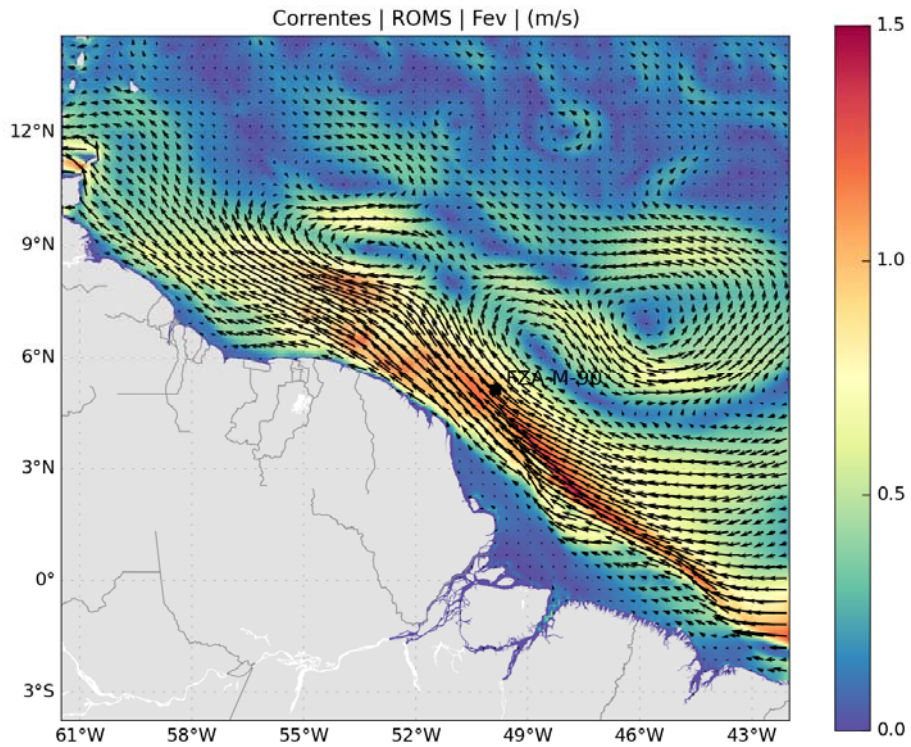


Figura 65: Campo médio de circulação para o mês de fevereiro.

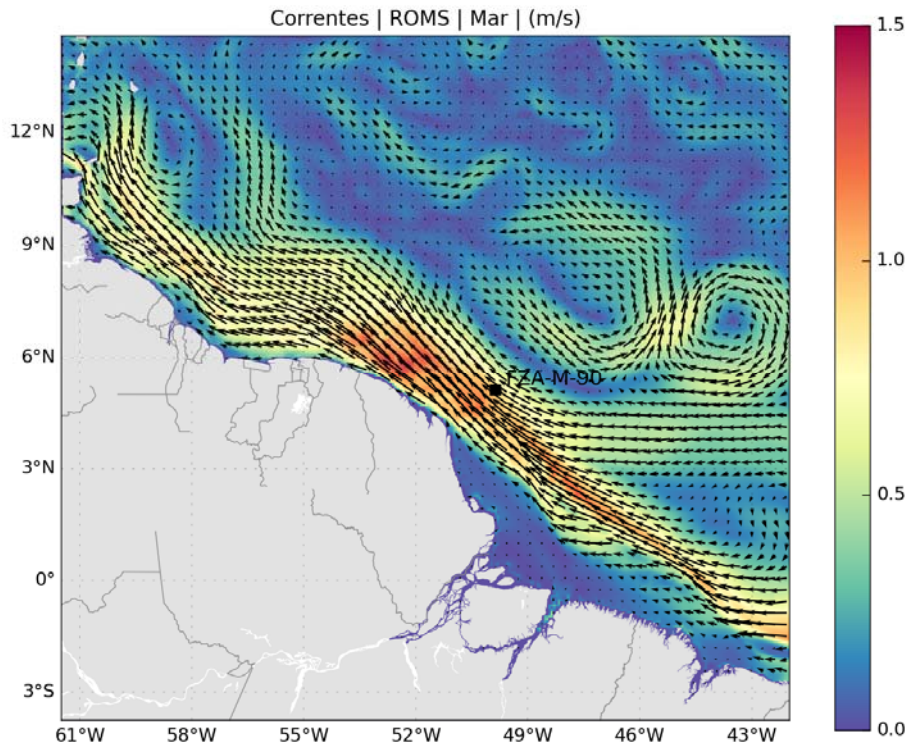


Figura 66: Campo médio de circulação para o mês de março.

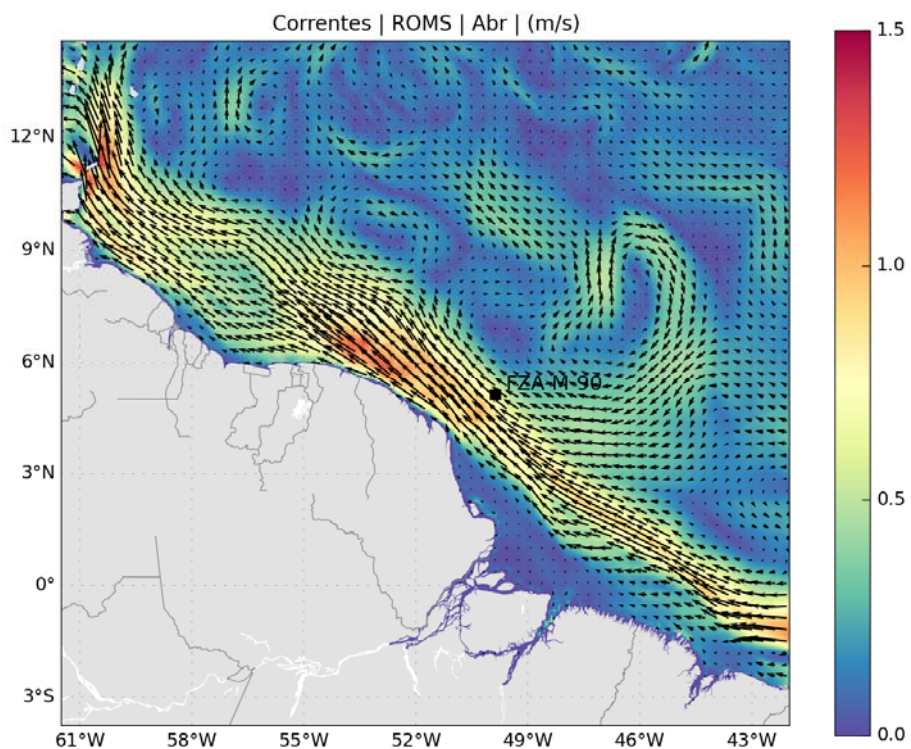


Figura 67: Campo médio de circulação para o mês de abril.

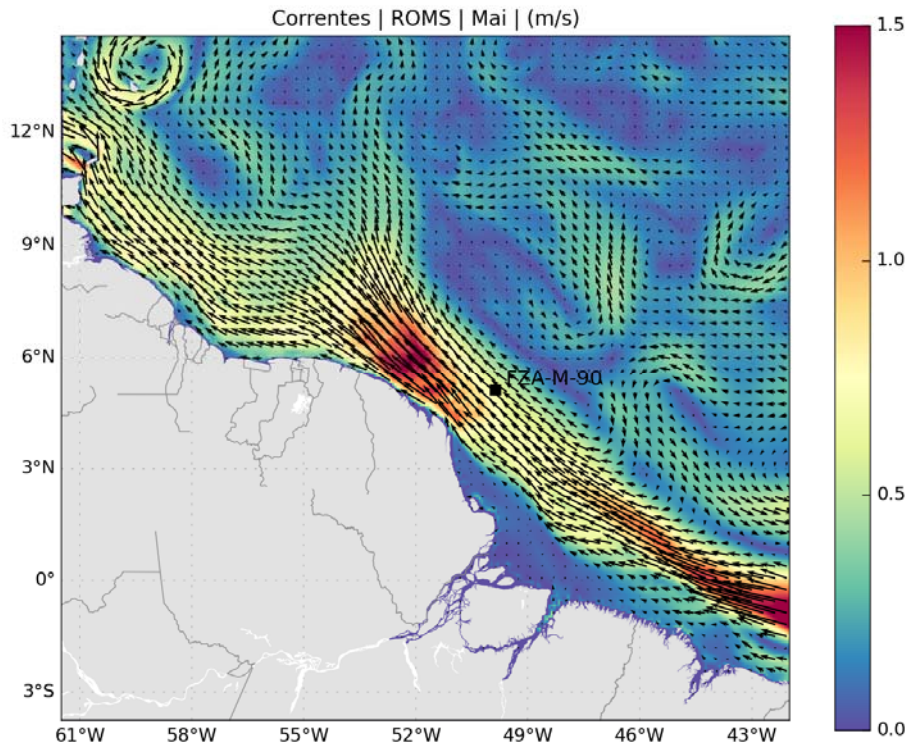


Figura 68: Campo médio de circulação para o mês de maio.

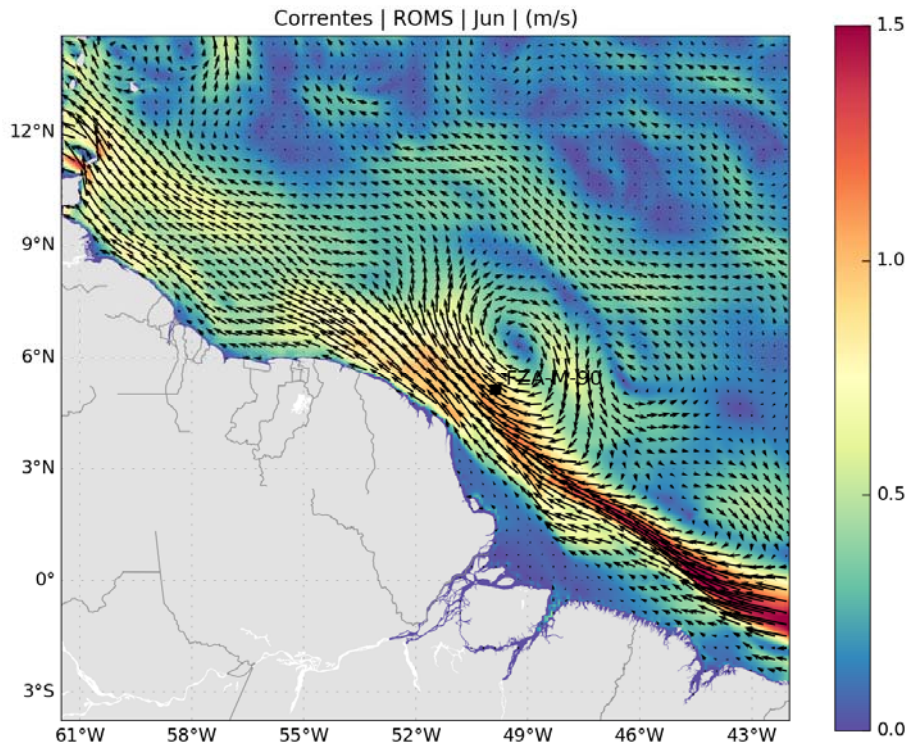


Figura 69: Campo médio de circulação para o mês de junho.

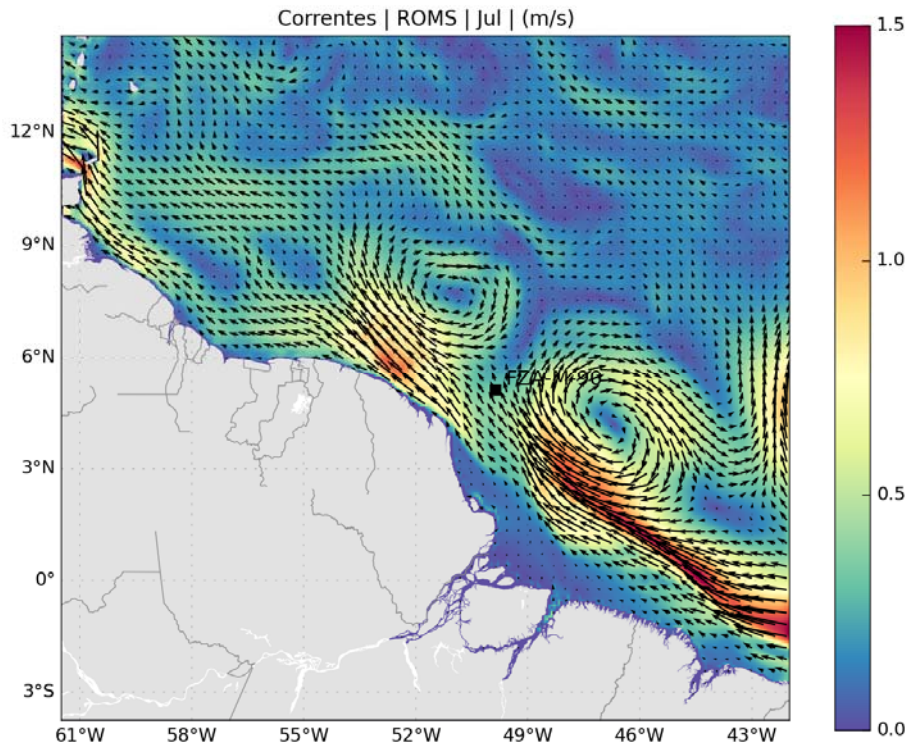


Figura 70: Campo médio de circulação para o mês de julho.

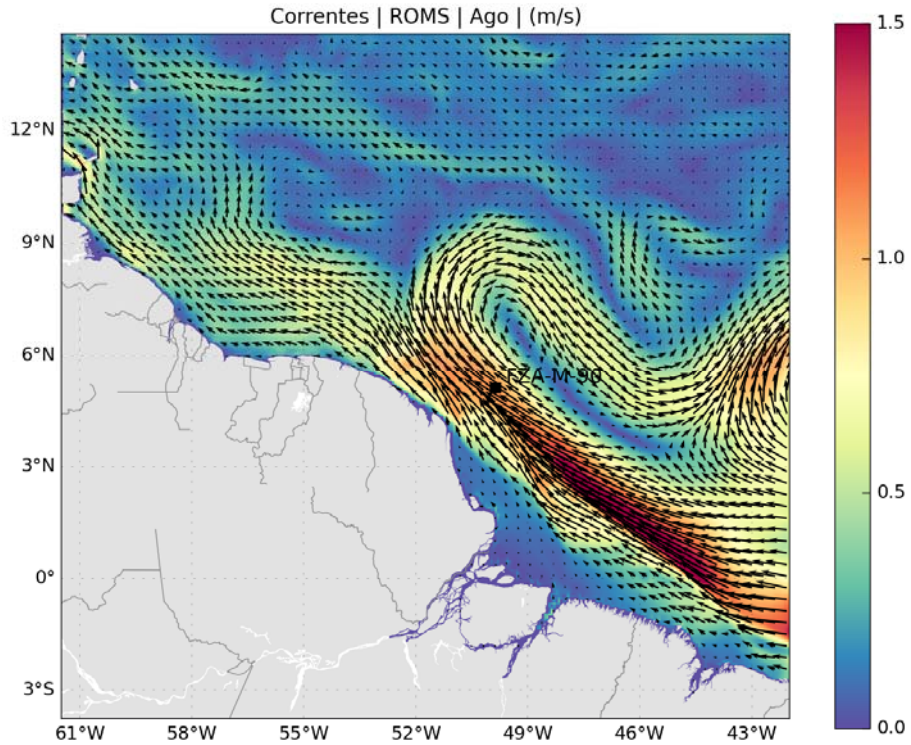


Figura 71: Campo médio de circulação para o mês de agosto.

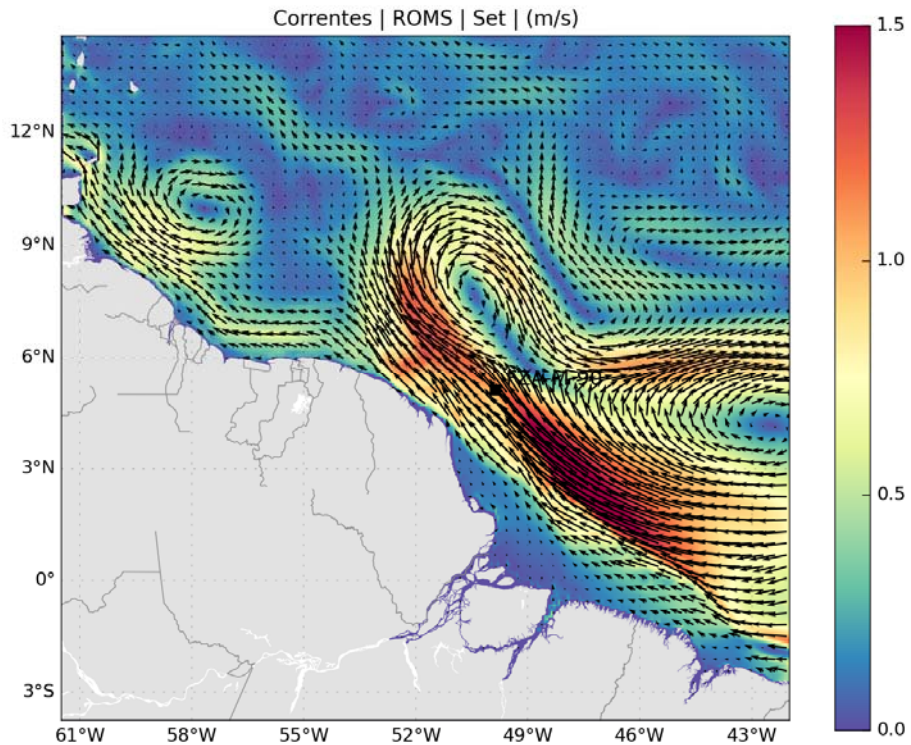


Figura 72: Campo médio de circulação para o mês de setembro.



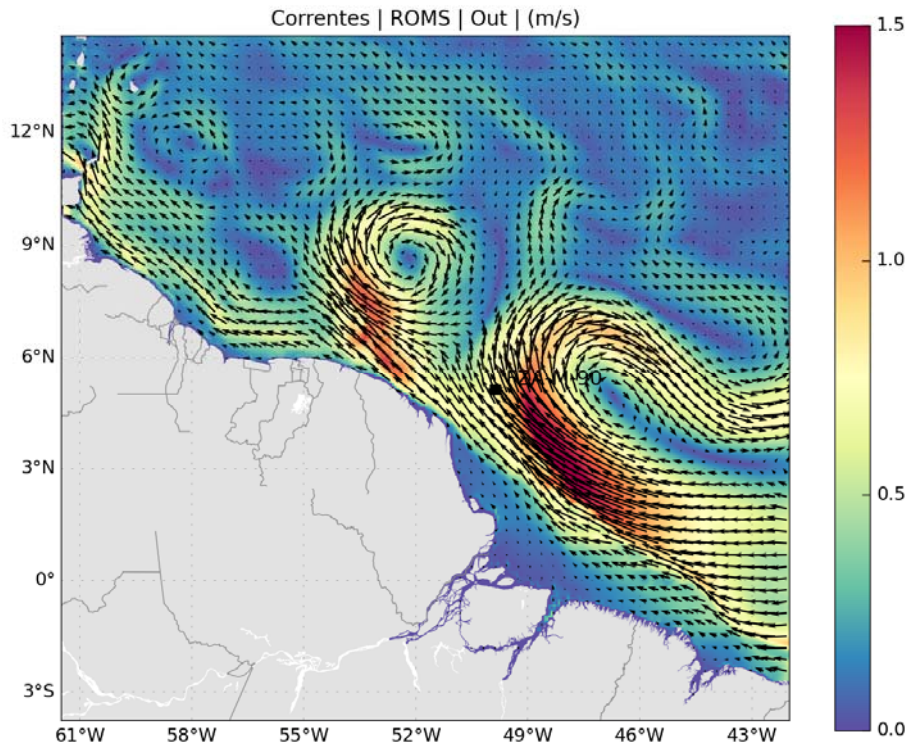


Figura 73: Campo médio de circulação para o mês de outubro.

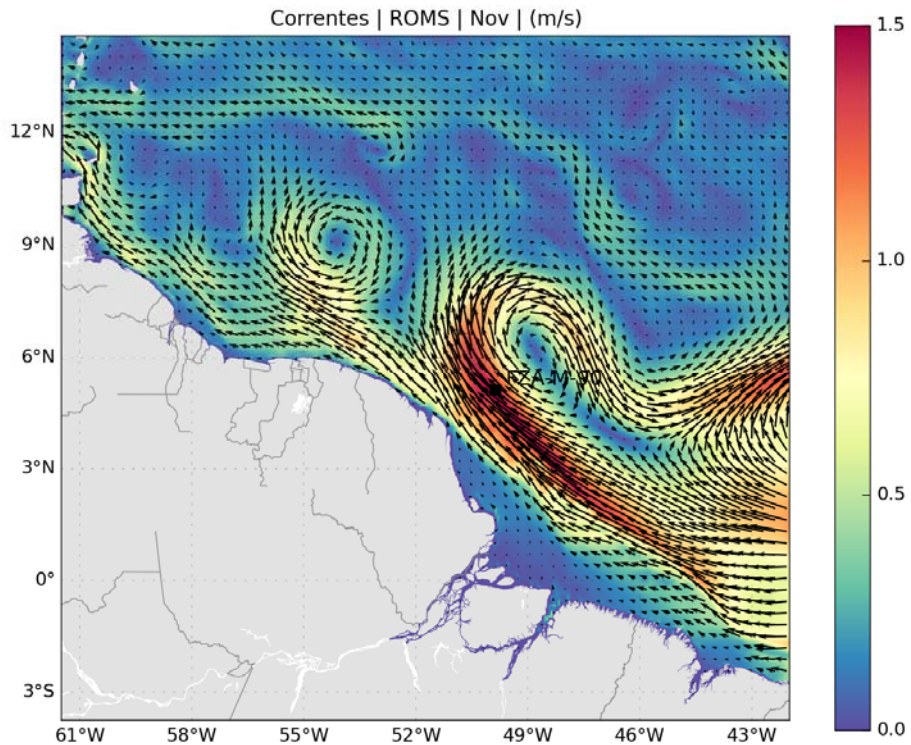


Figura 74: Campo médio de circulação para o mês de novembro.

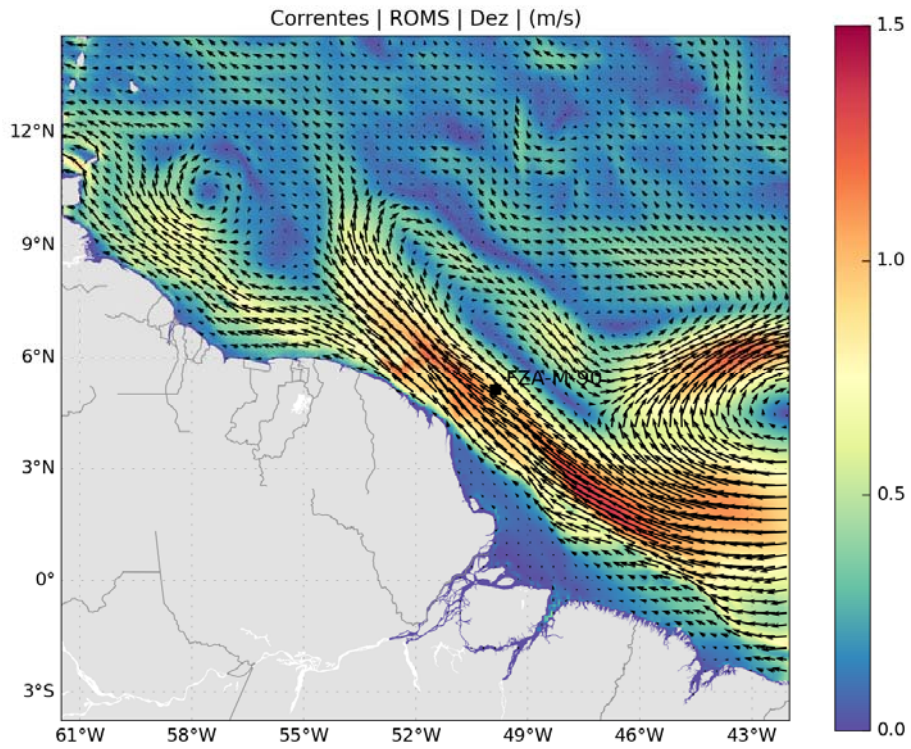


Figura 75: Campo médio de circulação para o mês de dezembro.

### 3. Modelagem de Dispersão de Óleo

Este item descreve os resultados obtidos nas modelagens numéricas do transporte de óleo no mar para os cenários acidentais de vazamentos localizados em um ponto no bloco FZA-M-90, Bacia da Foz do Amazonas. A localização do ponto de vazamento foi apresentada na Figura 1 e na Tabela 1.

Para o ponto de vazamento foram considerados três possíveis casos de vazamentos acidentais. O montante de óleo relacionado a cada caso é:

- Pequeno porte - 8 m<sup>3</sup>;
- Médio Porte - 200 m<sup>3</sup>;
- Pior caso (maior volume): ~ 46.742 m<sup>3</sup> (294.000 bbl)

Esses volumes simulados estão em concordância com a resolução CONAMA nº 398/2008, que dispõe sobre o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual, para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional.

O volume de pior caso é baseado na associação da capacidade de produção diária do poço (estimada em 9.800 bbl/dia, segundo a contratante), com a perda de controle do poço (30 dias de vazamento), conforme justificativa apresentada no ANEXO I.

No estudo de dispersão de óleo, dois tipos de simulações serão conduzidos: probabilísticas e determinísticas. Na Tabela 7 é apresentado o resumo dos cenários simulados para cada ponto de vazamento.

Tabela 7: Resumo dos cenários de vazamento simulados.

Modelo	Volume Total (m <sup>3</sup> )	Vazamento	Profundidade	Tempo
<b>Probabilístico</b>				
Pequeno Porte	8	instantâneo	superfície	30 dias
Médio Porte	200	instantâneo	superfície	30 dias
Pior Caso	46.742	contínuo (30 dias)	fundo	60 dias
<b>Determinístico</b>				
Crítico - Menor tempo de toque de óleo na costa	46.742	contínuo (30 dias)	fundo	60 dias
Crítico - Maior massa de óleo acumulado na costa	46.742	contínuo (30 dias)	fundo	60 dias

## 3.1. Metodologia

### 3.1.1 Modelo de Transporte

As simulações numéricas apresentadas nesse estudo foram feitas com o OSCAR (*Oil Spill Contingency and Response*), modelo desenvolvido pela SINTEF para o cálculo da dispersão de manchas de óleo. O OSCAR é capaz de avaliar a evolução de óleo na superfície da água, ao longo de costas, na coluna d'água e no sedimento. Os principais componentes do sistema OSCAR são um modelo de intemperismo, um modelo de trajetória em três dimensões e um modelo de combate a vazamentos acidentais (REED, 2001; REED *et. al* 2004).

Na Figura 76 é apresentado um esquema ilustrativo das três principais etapas no processo da simulação: os dados de entrada (características do vazamento e condições ambientais), os processos realizados em diferentes intervalos de tempo (intemperismo atuante no óleo) e os resultados (balanço de massa do óleo, distribuição geográfica e propriedades).

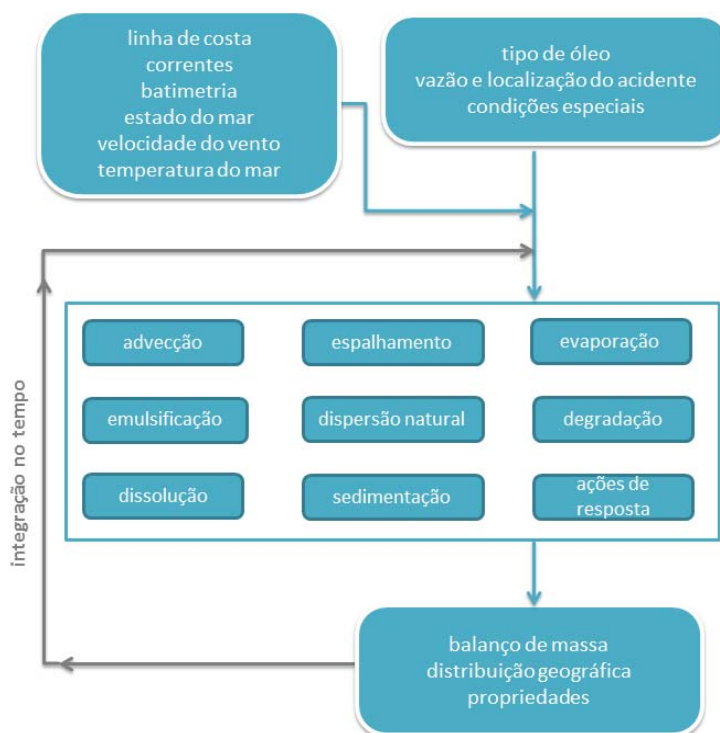


Figura 76: Esquema simplificado dos dados de entrada, processos e dados de saída (resultados) usados e obtidos pelo modelo OSCAR. Adaptado de Reed (2001).

Uma breve descrição dos processos físicos/químicos atuantes no óleo e de como eles são representados no modelo OSCAR, será apresentada a seguir, com base no relatório desenvolvido por Reed (2001).

### 3.1.1.1 Processos de Intemperismo

O modelo OSCAR utiliza a aproximação de multicomponentes. Tal metodologia consiste na especificação de um número de componentes individuais ou pseudo-componentes para representação da massa de óleo. Cada componente é associado com um conjunto de parâmetros que governam os processos de transformação do óleo.

Os processos de evaporação, dissolução e degradação estão diretamente relacionados com a massa de cada um dos componentes do óleo e são calculados dinamicamente a cada passo de tempo do modelo. Detalhes sobre a formação de multicomponentes do OSCAR podem ser vistos em Reed *et al.* (2000).

Outros processos como espalhamento, entranhamento e mistura vertical estão mais diretamente relacionados com “macro-características” do óleo, como densidade e viscosidade.

No entanto, como apresentado a seguir, existe uma inter-relação entre todos os processos de intemperismo.

### 3.1.1.1.1 Advecção

A advecção é calculada a partir da soma de uma velocidade local média e de uma componente turbulenta de base aleatória. A velocidade local média é a soma das velocidades de correntes, ventos e a componente governada pela onda (Stokes) e a componente turbulenta ( $w'$ ) é expressa como:

$$w' = \sqrt{6K / \Delta t} \quad 3-1$$

onde  $K$  é o coeficiente de dispersão turbulenta, estimado para as direções horizontais e verticais, e  $t$  o tempo.

O coeficiente de dispersão horizontal pode ser calculado a partir de dados aproximados de estudos de dispersão de traçadores (OKUBO (1971, 1974) *apud* REED, 2001; BOWDEN, 1983 *apud* REED, 2001):

$$K_x = 0,0027 t^{1,34} \quad 3-2$$

para  $K$  em  $\text{cm}^2/\text{s}$  e  $t$  em segundos.

O coeficiente de difusão turbulenta acima da pycnoclina relacionado às condições de onda, segundo Ichiye (1967), é:

$$K_z = 0,0028 \frac{H^2}{T} \exp(-2Kz) \quad 3-3$$

sendo  $H$  a altura de onda,  $T$  o período de onda e  $K$  o número de onda. Abaixo da profundidade da pycnoclina,  $K_z$  é assumido como uma constante igual a  $10^{-4} \text{ m/s}^2$  (KULLENBERG, 1984 *apud*

REED, 2001). Na ausência da pycnoclina, a equação de Ichiye é aplicada da superfície ao fundo.

O deslocamento vertical das gotículas de óleo é calculado pela soma da velocidade turbulenta de base aleatória e uma velocidade vertical (subida ou descida). As velocidades verticais são calculadas usando a média harmônica de dois extremos, sendo o coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds (JOHANSEN, 2000):

$$w_{ascendente} = 1/(w_1^{-1} + w_2^{-1})$$

onde,

$$w_1 = d^2 g' / 18\nu, \text{ (para número de Reynolds} < 1000), \text{ e}$$

$$w_2 = \sqrt{3d / |g'|}, \text{ (para número de Reynolds} > 1000),$$

sendo  $g' = g(\rho_\alpha - \rho_0) / \rho_\alpha$  onde  $g$  é a aceleração gravitacional e  $\nu$  a viscosidade cinemática da água ( $\sim 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

O **coeficiente de arrasto do vento** na deriva superficial do óleo utilizada neste estudo foi **3,5% da intensidade do vento**, como orientado pela Coordenação Geral de Petróleo e Gás.

### 3.1.1.1.2 Espalhamento

O espalhamento do óleo na superfície do mar envolve diversas interações entre forças e processos, e alguns estudos (FAY, 1969 *apud* REED, 2001, HOULT, 1972; FANNELØP & WALDMAN, 1972 *apud* REED, 2001) já mostraram que o espalhamento passivo do óleo ocorre devido às forças da gravidade, momento e viscosidade. Para a representação do espalhamento transversal de uma mancha de vazamento contínuo, é utilizada neste modelo uma equação unidimensional:

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

3-4

onde  $x_{LE}$  é a largura da mancha de óleo (m),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ),  $\Delta\rho$  é a diferença entre as densidades da água e do óleo ( $kg/m^3$ ),  $\rho_w$  é a densidade da água ( $kg/m^3$ ),  $\mu_w$  é a viscosidade da água (cP),  $m$  é  $\frac{1}{2}$  da taxa de liberação de massa dividido pela corrente superficial ( $kg/m$ ) e  $C_0$  é a constante de espalhamento.

Esta equação representa o regime de gravidade-viscosidade no processo de espalhamento e somente é utilizado para a parte espessa da mancha de óleo.

### 3.1.1.1.3 Evaporação

A taxa de evaporação é controlada pela pressão de vapor dos componentes individuais do óleo as suas frações molares em qualquer localização da mancha superficial, e calculada como. (MACKAY *et al.*, 1980; SEBASTIÃO & SOARES, 1995; REED *et al.*, 1999):

$$dm_i / dt = K_e P_i A M_i F_i / (RT) \quad 3-5$$

onde  $m_i$  é a massa associada ao  $i$ -ésimo componente do vazamento;  $t$  é o tempo (s);  $K_e$  é o coeficiente de transferência de massa evaporada (m/s);  $T$  é a temperatura (K);  $P_i$  é a pressão de vapor para o  $i$ -ésimo componente (atm);  $A$  é a área da mancha de óleo ( $m^2$ );  $M_i$  é o peso molecular da  $i$ -ésimo componente (g/mol);  $F_i$  é a fração molar do  $i$ -ésimo componente remanescente na mancha; e  $R$  é a constante universal dos gases,  $8,206 \times 10^{-5} \text{ atm}\cdot\text{m}^3/\text{mol}\cdot\text{K}$ .

O coeficiente de transferência de massa,  $K_e$ , depende do vento e é calculado por (AMOROCHO & DEVRIES, 1980 *apud* REED, 2001):

$$K_e = C_d U(t) \quad 3-6$$

sendo  $C_d$  o coeficiente de atrito entre a atmosfera e o ar, e  $U(t)$  a velocidade do vento (m/s). O coeficiente de arrasto  $C_d$  é calculado em função da velocidade do vento:



$$C_d = \left( \frac{U^*}{U(t)} \right)^2 \quad 3-7$$

em que

$$U^* = CU(t), \text{ quando } U(t) < u_1$$

$$U^* = Cu_1 + (Du_2 - Cu_1) \frac{U(t) - u_1}{u_2 - u_1}, \text{ quando } u_1 \leq U(t) \leq u_2$$

$$U^* = DU(t), \text{ quando } U(t) > u_2$$

sendo  $C$ ,  $D$ ,  $u_1$  e  $u_2$  valores constantes (0,0323; 0,0474, 7 e 20, respectivamente).

### 3.1.1.1.4 Dispersão natural

A dispersão de óleo na superfície do mar é obtida por (DELVIGNE & SWEENEY, 1988):

$$Q_{di} = C^* D^{0,57} S F d_i^{0,7} \Delta d \quad 3-8$$

onde  $Q_{di}$  é a taxa de dispersão por unidade de área das gotículas de óleo com diâmetros entre  $(d_i - \Delta d)$  e  $(d_i + \Delta d)$  ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ );  $C^*$  é um coeficiente de dispersão derivado empiricamente;  $D$  é a energia da onda dissipada por unidade de área ( $\text{kg}/\text{s}^2$ );  $S$  é a fração da superfície do oceano coberta por óleo;  $F$  é a fração da superfície do mar coberta pela arrebentação de ondas por unidade de tempo (1/s);  $d_i$  é o diâmetro médio das partículas na classe de tamanho  $i$  (m); e  $\Delta d$  é o intervalo do diâmetro das partículas (m).

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

$$C^* = 4450\nu^{-0,4} \quad 3-9$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática do óleo ( $m^2/s$ ). A energia dissipada da quebra da onda  $D$ , é aproximadamente:

$$D = 0,0034 \rho_w g H_b^2 \quad 3-10$$

onde  $\rho_w$  é a densidade da água do mar ( $kg/m^3$ );  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ); e  $H_b$  é altura de quebra da onda (m). A fração  $F$  de superfície do oceano coberta pela arrebentação de ondas por unidade de tempo é, aproximadamente:

$$F = 3 \cdot 10^{-6} U(t)^{3,5} \quad 3-11$$

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

$$d_0 = \frac{C_0 \nu^{0,34}}{\sqrt{e}} \quad 3-12$$

sendo  $\nu$  é a viscosidade cinemática do óleo ( $m^2/s$ );  $e$  é a taxa de dissipação de energia (geralmente  $1000 J/m^3s$ );  $C_0$  é, aproximadamente, 500 para o menor tamanho de partícula e 3400 para o maior tamanho de partícula. As gotículas são divididas em intervalos entre os tamanhos, mínimo e máximo, encontrados.

### 3.1.1.1.5 Emulsificação

A emulsificação  $W(t)$  é calculada a partir de uma regressão exponencial:

$$W(t + \Delta t) = W_m(t) - [W_m(t) - W(t)] 0,5^{\frac{\Delta t}{t_{1/2}}} \quad 3-13$$

onde  $W_m(t)$  é o teor máximo de água (%);  $\Delta t$  é o passo de tempo (s);  $t_{1/2}$  é o tempo de meia-vida dependente do vento para emulsificação (s).

O valor  $t_{1/2}$  e a função  $W_m(t)$  são derivados de dados de laboratório e, correlacionam a taxa de emulsificação e o teor máximo de água pela fração evaporada. A partir desses dados, a meia-vida de referência  $t_{ref}$  para um vento de 10 m/s de velocidade, é encontrada em:

$$t_{ref} = Ct_{lab} \quad 3-14$$

onde,  $t_{lab}$  é a média de valores de meia-vida encontrados em laboratório para amostras de óleo artificialmente intemperizados (s), e  $C$  é uma constante empírica. Esses dados são baseados no estudo de Cormack (1983):

$$t_{1/2} = \left[ \frac{1 + U_{ref}}{1 + U(t)} \right]^2 t_{ref} \quad 3-15$$

onde  $U_{ref}$ , é de 10 (m/s), e  $U(t)$  é a velocidade do vento (m/s).  $W_m$  como função da fração evaporada é obtida a partir de dados de laboratório, assumindo-se que a quantidade máxima de água é linearmente dependente da fração evaporada.

### 3.1.1.1.6 Dissolução

Como a evaporação, a dissolução, é dependente da fração molar de cada componente em uma mancha de óleo.

$$dm_i / dt = K_d A (F_i S_i - C_i) \quad 3-16$$

onde  $K_d$  é o coeficiente de transferência de massa por difusão (m/s);  $A$  é a área superficial da mancha de óleo (m<sup>2</sup>);  $F_i$  é a fração molar do componente  $i$  remanescente na mancha;  $S_i$  é a solubilidade do componente  $i$  (g/m<sup>3</sup>, ppm); e  $C_i$  é a concentração ambiente do componente  $i$  (g/m<sup>3</sup>).

Para uma mancha de óleo, o coeficiente de transferência de massa  $K_d$  é calculado (THIBODEAUX, 1979 *apud* REED, 2001):

$$K_d = Sh_i D_i / L \quad 3-17$$

Para manchas na superfície, é feita a correlação de superfície plana para o Número de Sherwood:

$$Sh_i = 0,578 Re^{0,5} Sc_i^{0,33} \quad 3-18$$

onde  $Re$  é o número de Reynolds;  $Sc_i$  é o número de Schmidt;  $U_{rel}$  é a velocidade relativa entre o óleo e a água (m/s);  $L$  é a extensão da mancha (m);  $\nu_w$  é a viscosidade cinemática da água ( $\sim 8,9 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  a  $25^\circ\text{C}$ ) e  $D_i$  a difusividade molecular do componente  $i$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

Para as partículas de óleo, a correlação da transferência de massa para esferas é usada para o número de Sherwood:

$$Sh = 2 + 0,347 Re^{0,62} Sc_i^{0,31i} \quad 3-19$$

### 3.1.1.1.7 Degradação

O cálculo da degradação do óleo no modelo OSCAR é feita através da soma da transformação de cada componente do óleo por diferentes formas de degradação. A Figura 77 mostra o esquema de transformação dos componentes considerados no modelo OSCAR.

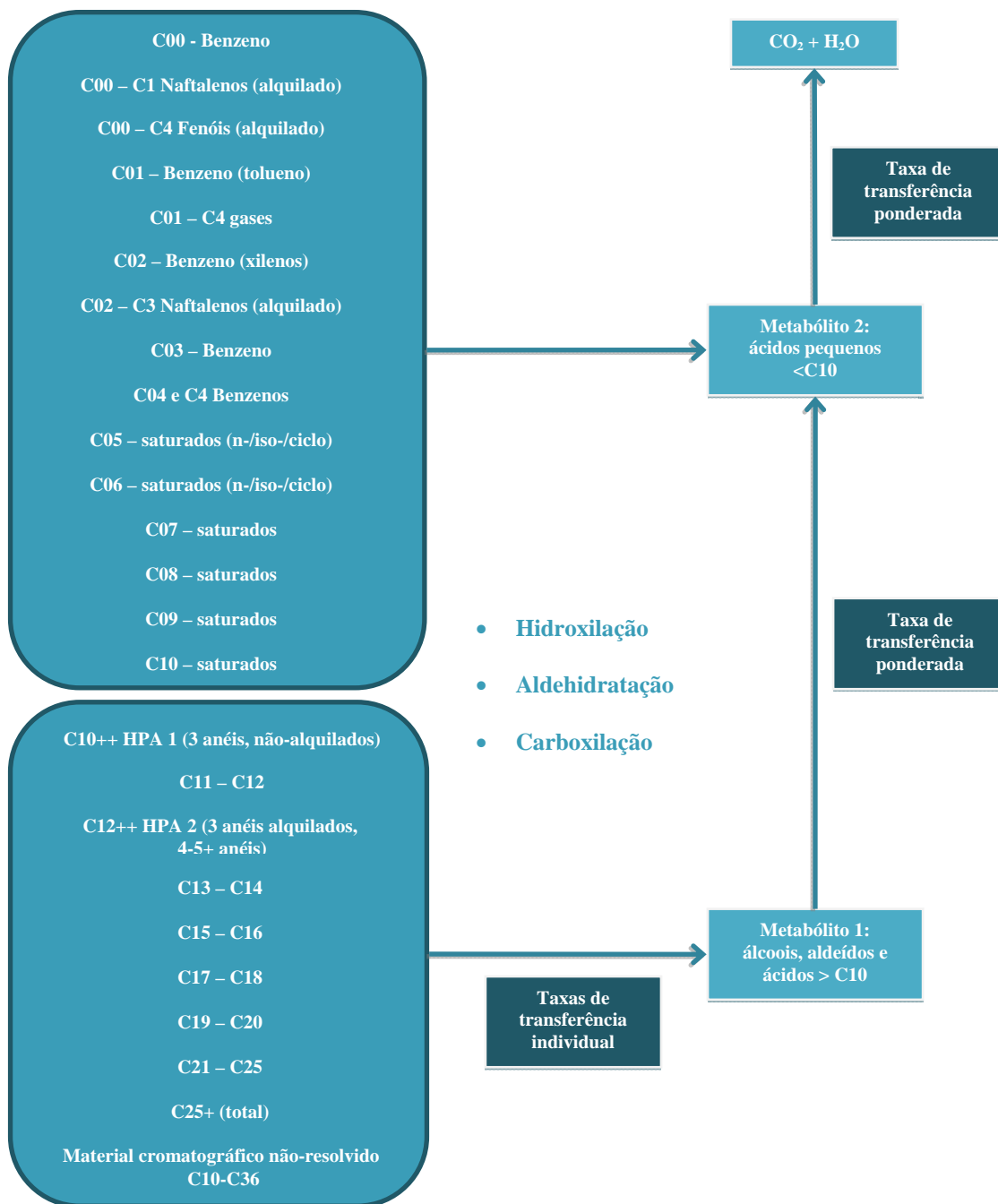


Figura 77: Esquema da degradação dos principais componentes do óleo. Adaptado de Reed (2001).

### 3.1.1.1.8 Sedimentação

No OSCAR a separação entre a fase dissolvida e particulada/adsorvida é calculada com base na teoria de equilíbrio linear. A fração de óleo particulada, ou adsorvida em material particulado, é passível de sedimentação no fundo, misturando-se aos sedimentos, e podendo ser dissolvida novamente para a coluna d'água (REED *et al.*, 1996).

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 obtida a uma determinada temperatura. Existem várias teorias que descrevem as isotermas de adsorção, tais como as isotermas de Langmuir (Equação 3-20) e de Freundlich (Equação 3-21) (REED, 2001).

$$C_s = \frac{K_1 K_2 C_w}{1 + K_1 C_w} \quad 3-20$$

$$C_s = K_f C_w^{1/n} \quad 3-21$$

Segundo Reed (2001), em ambiente aquático, o valor da fase aquosa do poluente,  $C_w$ , é geralmente baixo, e em consequência, o termo  $n$  na equação 3-21 é geralmente igual a 1 e o termo  $K_1 C_w$  na equação 3-20 é muito menor do que 1. Dessa forma, as equações podem ser reduzidas a uma equação linear

$$C_s = K_p C_w C_{ss} \quad 3-22$$

onde  $C_{ss}$  é a concentração de sedimentos suspensos. O coeficiente de partição de uma substância química,  $K_p$ , é dependente da temperatura, do pH e das características físicas e químicas do sólido adsorvido. Através de estudo do comportamento de compostos orgânicos, principalmente os hidrofóbicos não-iônicos, observou-se que o carbono orgânico é o fator predominante no processo de adsorção (REED, 2001). Assim, se  $K_p$  é normalizado pela fração de carbono orgânico do sólido ( $f_{oc}$ )

$$K_{OC} = \frac{K_p}{f_{oc}} \quad 3-23$$

então  $K_{oc}$  torna-se independente de sorventes. Somado a isso, o coeficiente de partição baseado no carbono orgânico apresenta ótima correlação tanto com  $K_{ow}$  (coeficiente de partição octanol/água) como com a solubilidade em água ( $S$ ) (Equações 3-24 e 3-25, respectivamente).

$$\log K_{OC} = A \log K_{ow} + B \quad 3-24$$

$$\log K_{OC} = a \log S + b \quad 3-25$$

Assim, é possível determinar  $K_{oc}$  tanto do valor de  $K_{ow}$  como da solubilidade, sendo que as constantes de correlação ( $A$ ,  $B$ ,  $a$  e  $b$ ) são normalmente dependentes da estrutura do composto. A Tabela 8 mostra algumas equações de correlação entre  $K_{oc}$ ,  $K_{ow}$  e  $S$  usados no modelo.

Tabela 8: Equações de regressão para estimativa dos parâmetros  $K_{oc}$  e  $K_{ow}$  para diferentes componentes químicos. Fonte: Reed, 2001.

Equação	R <sup>2</sup>	Classe
<b>Parâmetro: <math>K_{ow}</math></b>		
$\log 1/S = 1,113 \log K_{ow} - 0,926$	0,935	Álcool
$\log 1/S = 1,229 \log K_{ow} - 0,720$	0,960	Cetona
$\log 1/S = 1,013 \log K_{ow} - 0,520$	0,980	Éster
$\log 1/S = 1,182 \log K_{ow} - 0,935$	0,880	Éter
$\log 1/S = 1,294 \log K_{ow} - 1,043$	0,908	Alcino
$\log 1/S = 1,294 \log K_{ow} - 0,248$	0,970	Alceno
$\log 1/S = 0,996 \log K_{ow} - 0,339$	0,951	Aromático
$\log 1/S = 1,237 \log K_{ow} - 0,248$	0,908	Alcano
<b>Parâmetro: <math>K_{oc}</math></b>		
$\log K_{oc} = 0,937 \log K_{ow} - 0,006$	0,950	Aromático
$\log K_{oc} = 0,544 \log K_{ow} + 1,377$	0,740	Todos os outros

Embora seja possível especificar um valor constante de concentração de sedimentos suspensos nas simulações, neste estudo adotou-se um valor nulo de concentração de sedimentos suspensos. Dessa forma, se objetiva uma abordagem mais conservadora que não permite a retirada de óleo da superfície e da coluna d'água por esse processo. Os valores de sedimentação apresentados nas simulações são referentes ao óleo na coluna d'água que toca diretamente o fundo marinho.

### 3.1.1.2 Propriedades físicas do óleo

As principais propriedades do óleo utilizadas pelo modelo são a densidade e a viscosidade do óleo. Essas propriedades variam de acordo com curvas obtidas em laboratório em função da fração de óleo evaporado. A seguir são apresentadas as equações das curvas obtidas em laboratório para os cálculos das propriedades do óleo (JOHANSEN, 1991 *apud* REED, 2001):

$$\text{Densidade (g/L)} \quad \rho_0 = a_p + b_p f \quad 3-26$$

$$\text{Viscosidade (cP)} \quad \mu_0 = e^{(a\mu + b\mu f)} \quad 3-27$$

sendo  $f$  a fração evaporada (%) e  $a$  e  $b$  fatores de regressão. Os parâmetros de ajuste  $a$  e  $b$  fazem parte do banco de dados da SINTEF que integra o modelo OSCAR e são obtidas através de ensaios laboratoriais. A densidade da emulsão  $\rho(t)$  é calculada:

$$\rho(t) = \frac{W(t)\rho_w + [100 - W(t)]\rho_0(t)}{100} \quad 3-28$$

sendo  $W(t)$  a porcentagem de água (%),  $\rho_w$  a densidade da água do mar, e  $\rho_0(t)$  a densidade do óleo livre de água (g/L).

A equação de Mooney, de 1951, é usada para calcular a viscosidade de emulsão  $\mu(t)$ :

$$\mu(t) = \mu_0(t)e^{\frac{aW(t)}{100 - bW(t)}} \quad 3-29$$

onde  $a$  e  $b$  são constantes empíricas.



### 3.1.1.3 Concentração na coluna d'água

Como a grande maioria dos modelos numéricos de transporte de contaminantes, o OSCAR utiliza um modelo de partículas (modelagem lagrangiana) para obter aproximações da equação do transporte advectivo-difusivo:

$$\frac{\delta C_i}{\delta t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} C_i = \vec{\nabla} \cdot D_k \vec{\nabla} C_i + \sum_{j=1}^n r_j C_i + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n r_{ij} C_i \quad 3-30$$

onde  $C_i$  é a concentração do  $i$ -ésimo constituinte químico do vazamento;  $t$  é o tempo;  $\vec{V}$  é o vetor do transporte advectivo; e  $D_k$  é o coeficiente de difusão turbulenta para  $k = x, y$  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 utilizando partículas lagrangeanas para representar o campo de concentração. Os termos  $r_j$  são taxas de vários processos, tais como a evaporação, emulsificação e espalhamento das manchas superficiais e volatilização dos compostos do óleo.

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.

A equação de transporte advectivo e difusivo determina a variação das concentrações no tempo e no espaço e serve como base para os modelos de partículas (ver, por exemplo, Fischer, 1979). Em contraste com os modelos de partículas, existem modelos que resolvem numericamente a equação de transporte advectivo e difusivo de maneira convencional, isto é, através de esquemas baseados em métodos de diferenças finitas, volumes finitos ou elementos finitos. Estas aproximações conhecidas como modelagem Euleriana fornecem diretamente os valores de concentrações e suas variações no espaço e no tempo em uma grade fixa, pré-definida. Este tipo de modelagem é inviável para o problema em questão devido às dimensões do domínio e as escalas envolvidas no transporte de óleo em bacias oceânicas.

Os modelos de partículas apresentam uma série de vantagens em relação aos modelos Eulerianos, pois são capazes de representar os fenômenos de transporte e calcular a distribuição de massa do contaminante de maneira acurada independentemente de uma grade, além de não estarem sujeitos a oscilações numéricas espúrias e efeitos de difusão numérica (ver por exemplo Andrade, 2006).

Enquanto os modelos Eulerianos calculam diretamente os valores das concentrações, os modelos de partículas calculam a distribuição espacial de massa do contaminante representada por uma nuvem de partículas, sendo cada partícula uma representação discreta de uma parcela da massa total do contaminante no ambiente.

Se valores de concentração são requeridos, os resultados dos modelos de partículas precisam ser transformados e representados em uma grade. Como apresentado em Jong (2004), o OSCAR tem a vantagem em relação a outros modelos de partículas, pois permite essa transformação, inclusive fazendo a distinção entre as parcela da massa de óleo que está dissolvida, dispersa ou na superfície.

Existem várias maneiras de fazer essa transformação. A maneira mais simples é através da contagem de partículas que estão dentro das células da grade. Uma maneira mais avançada, que é a utilizada no OSCAR, é considerar a partícula como uma pequena nuvem que cresce com o tempo, usando funções de espalhamento gaussiano (ver por exemplo Andrade, 2006).

No OSCAR, a célula da grade em três dimensões é definida pelos espaçamentos meridional, zonal e vertical definidos pelo usuário. Embora os processos de mistura e de intemperismos do óleo estejam sendo resolvidos de maneira acurada e independentemente da grade, os resultados de concentração devem ser interpretados considerando o tamanho da célula da grade utilizada. Os resultados de concentração devem ser vistos como valores médios no volume definido pelas dimensões das células da grade. Sendo assim, plumas ou manchas de contaminantes que tenham dimensões inferiores às dimensões da grade estão sujeitos a uma “diluição numérica” artificial.

### 3.1.1.4 Óleo na costa

Apesar do grande número de publicações sobre a interação do óleo na costa, ainda existem consideráveis lacunas na compreensão do processo dinâmico de acumulação de óleo na costa. Uma relativamente recente revisão (ETKIN *et al.*, 2007) do “estado da arte” da modelagem da interação entre manchas de óleo e a costa foi elaborada por especialistas sobre o tema para o MMS (*Minerals Management Service*), órgão ligado ao departamento americano do interior. Tal publicação representa uma excelente referência sobre o tema.

O comportamento do óleo quando é depositado na costa é complexo e depende dos seguintes fatores inter-relacionados:

- Características físico-químicas do óleo

- A espessura do óleo que encalha na costa
- Tempo de toque
- Instante da maré no momento da chegada da mancha de óleo na costa
- Morfologia da linha de costa
- Clima no momento do toque.
- Energia de ondas na costa

Um modelo que incorpore **todos** esses fatores é útil para algumas finalidades, no entanto é impraticável para simulações probabilísticas de vazamentos de óleo em regiões *offshore*. O grande número de simulações determinísticas e as grandes dimensões do domínio inviabilizam qualquer tentativa nesse sentido. Esta afirmação está alinhada com as conclusões do citado relatório da MMS.

Para modelagens probabilísticas de vazamentos em áreas *offshore*, a prática atual é fazer uma aproximação de acumulação de óleo na costa através de uma estimativa das capacidades de armazenamento e remoção de óleo na costa derivadas empiricamente. Tal procedimento é utilizado na maioria dos modelos de transporte de óleo que incluem algum tipo de algoritmo de interação do óleo com a costa. (GUNDALACH & REED, 1986; GUNDALACH, 1987; FRENCH *et al.*, 1996; REED *et al* 1999, 2000; CHENG *et al.*, 2000; FRENCH MCCAY, 2004 *apud* ETKIN *et al.*, 2007).

O modelo OSCAR incorpora uma dinâmica, relativamente simples, para simular as interações óleo-costa. Estes procedimentos representam uma simplificação dos conjuntos desenvolvidos para um modelo de derramamento de óleo em uma zona costeira mais complexa.

A partir de trabalhos científicos, grupos de capacidade máxima de absorção de óleo foram estimados juntamente com uma série de taxas de remoção. As capacidades de absorção destinam-se a refletir tanto a inclinação da costa como a sua permeabilidade, e em alguns casos, a exposição às ondas e aos ventos.

O volume máximo de óleo,  $V_{max}$  (m<sup>3</sup>), quando há o encontro da mancha de óleo com a linha de costa, pode ser expresso como:

$$V_{max} = \delta_i L W_i$$

3-31

Onde  $\delta_i$  é a máxima capacidade de retenção por tipo de costa  $i$ ,  $L$  é o comprimento da célula de praia e  $W_i$  é a largura da região de deposição por tipo de costa

Durante as simulações computacionais, se este volume máximo já estiver sido atingido, a massa de óleo que chega à costa não é mais depositada e o óleo continua a ser transportado pelos ventos e correntes para outras regiões:

O modelo também considera que ao longo da simulação uma quantidade de óleo vai sendo removida através da seguinte equação:

$$\Delta m = m_i (1 - \exp[-r_i \Delta t]) \quad 3-32$$

Onde  $\Delta m$  é a massa removida no passo de tempo  $\Delta t$ ,  $m_i$  é a massa na célula de costa  $i$ , e  $r_i$  é a taxa de remoção de por tipo de costa  $i$ .

### 3.1.1.5 Massa Máxima de Óleo na Costa

Para obter a massa máxima de óleo na costa, os elementos de grade são monitorados ao longo de toda a simulação. São armazenadas as informações de massa máxima de óleo que atingiram cada elemento de grade ao longo das  $n$  simulações. Ao final, têm-se um mapa das massas máximas por unidade de área que atingiram os elementos de grade que representam a costa.

### 3.1.1.6 *Blowout* Submerso

Nos últimos anos diversos modelos foram desenvolvidos para simular o transporte de misturas de óleo e gás em águas profundas. Lindersen (2013) apresenta alguns desses modelos e as bases teóricas para os seus desenvolvimentos.

De maneira geral os modelos de *blowout* submerso levam em consideram três diferentes fases: a fase de jato, a fase de pluma e uma fase passiva com velocidade vertical controlada pelo tamanho das gotículas de óleo, conforme ilustrado na Figura 78.

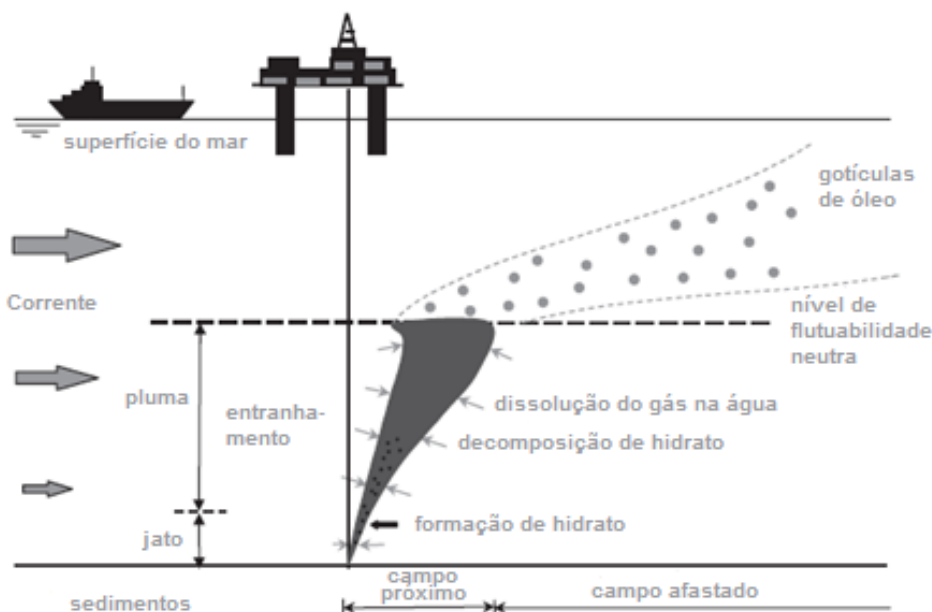


Figura 78: Esquema geral de plumas de *blowout* de óleo em profundidade. Adaptado de Lindersen (2013)

O modelo OSCAR contém um módulo específico para a modelagem de vazamentos de óleo em profundidade. Este módulo, chamado Plume3D, contém um modelo de pluma multifásico geral desenvolvido pela SINTEF, com acoplamento entre o campo próximo (*Near-Field*), que inclui as fases de jato e a fase de pluma, e o campo afastado (*Far-Field*), que permite o acompanhamento das gotículas dispersas, bolhas e partículas minerais decorrentes de descargas de óleo e gás oriundas do fundo do oceano. Detalhes sobre esse modelo podem ser encontradas em Johansen & Durgut (2006) e em Johansen *et al.* (2012).

Vazamentos de óleo e gás no fundo oceânico resultarão na formação de gotículas de óleo e bolhas de gás respectivamente. Na fase de jato os movimentos são dominados pelas correntes induzidas pelo próprio vazamento e o tamanho dessas bolhas e gotículas não são consideradas.

Na fase de pluma, as gotículas e bolhas de diversos tamanhas se movem em conjunto como uma mistura integral. Nesta fase, a dissolução dos gases, a formação de hidratos e o estranhamento de água do ambiente têm papel dominante na densidade da pluma, que por sua vez, controla o movimento vertical da pluma. Nesta fase, os tamanhos das gotículas e bolhas não afetam de maneira significativa o movimento da pluma. Aspectos importantes da fase de pluma em águas profundas, considerados no Plume3D são:

- Comportamento de gás não ideal;

- Dissolução de gás das bolhas para a água do ambiente;
- Efeito de correntes do ambiente;
- Formação e dissociação de Hidratos.

Após a fase de pluma é atingido o nível terminal da pluma dinâmica e inicia-se a fase passiva onde a velocidade vertical do óleo no ambiente é controlada pelo tamanho das gotículas de óleo formadas nas plumas. O Plume3d contém um algoritmo desenvolvido pela SINTEF para estimativa das distribuições do tamanho das gotículas de óleo a partir de experimentos realizados nos tanques dos laboratórios da SINTEF. Detalhes sobre esses experimentos podem ser encontrados em Brandvik *et al.* (2012).

A partir do nível terminal da pluma dinâmica a trajetória do óleo na coluna d'água é afetada pelo tamanho das gotículas de óleo formadas a partir do *blowout* em águas profundas. Como ilustração, considerando uma profundidade de 1.000 m, pequenas gotículas, com diâmetros inferiores a 0,5 mm, precisam de aproximadamente 1 dia para chegar a superfície. Na mesma situação, gotículas maiores, com diâmetro maiores que 5 mm, podem chegar a superfície em algumas poucas horas, enquanto que partículas menores do que 1.000 µm podem ficar retidas na coluna d'água por grandes períodos antes de chegarem a superfície. Além do tamanho das gotículas, fatores como correntes, turbulência vertical e estratificação vertical de densidade também são considerados na velocidade de subida dessas gotículas.

Detalhes sobre o algoritmo e as formulações utilizadas para cálculo da distribuição dos tamanhos das gotículas podem ser vistos em Brandvik *et al.* (2012) e Lindersen (2013).

O cálculo do tamanho das gotículas de óleo é feito em função de:

- Macro-características do óleo (viscosidade, densidade, etc);
- Dimensões do vazamento;
- Vazão do *blowout*;
- Correntes.

O acoplamento do Plume3D com o modelo de partículas lagrangiano do OSCAR permite um mapeamento tridimensional das partículas em cada instante e, conseqüentemente, o cálculo das concentrações de óleo na coluna d'água e espessuras de óleo em superfície, conforme ilustrado na Figura 79.

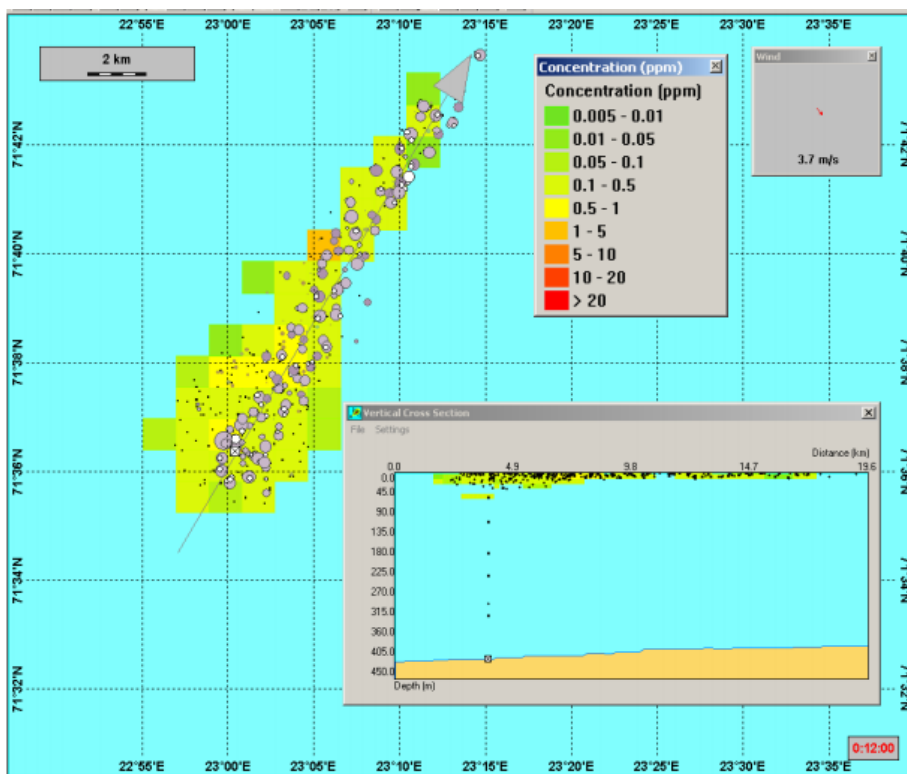


Figura 79: Ilustração de uma simulação de *blowout* no fundo oceânico com o OSCAR. O mapa mostra a distribuição de partículas representando o óleo em superfície (círculos em cinza) e as partículas representando o óleo na coluna d'água (pontos pretos e marrons).

### 3.1.1.7 Resumo dos parâmetros físicos e numéricos

Os parâmetros físicos utilizados no modelo de dispersão de óleo são apresentados na Tabela 9, enquanto as constantes são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 9: Parâmetros físicos e químicos utilizados no modelo de óleo.

Parâmetro	Descrição
$w'$	componente turbulenta
$K$	coeficiente de dispersão turbulenta
$K_x$	coeficiente de dispersão horizontal
$H$ e $H_b$	altura de onda
$T(1)$	período de onda
$x_{le}$	largura da mancha de óleo
$\Delta\rho$	diferença entre as densidades da água e do óleo
$m$	1/2 da taxa de liberação de massa dividido pela corrente superficial
$m_i$	massa associada ao i-ésimo componente de vazamento
$K_e$	coeficiente de transferência de massa evaporada
$T(2)$	Temperatura do óleo
$P_i$	pressão de vapor para o i-ésimo componente
$F_i$	fração molar do i-ésimo componente remanescente na mancha
$C_d$	coeficiente de atrito entre a atmosfera e o ar
$U(t)$	velocidade do vento
$Q_{di}$	taxa de dispersão por unidade de área das gotículas de óleo
$C^*$	coeficiente de dispersão derivado empiricamente
$D$	energia da onda dissipada por unidade de área
$S$	fração da superfície do oceano coberta por óleo
$F$	fração da superfície do mar coberta pela arrebentação de ondas por unidade de tempo
$d_i$	diâmetro média das partículas na classe de tamanho i
$\Delta d$	intervalo do diâmetro das partículas
$\nu$	viscosidade cinemática do óleo
$e$	taxa de dissipação de energia
$W(t)$	emulsificação
$W_m(t)$	teor máximo de água no óleo
$t_{1/2}$	tempo de meia-vida dependente do vento para emulsificação
$t_{ref}$	tempo de meia-vida de referência
$t_{lab}$	média de valores de meia-vida encontrados em laboratório
$K_d$	coeficiente de transferência de massa por difusão
$A$	área superficial da mancha de óleo



$S_i$	solubilidade do componente i
$C_i$	concentração ambiente do componente i
$Sh_i$	Número de Sherwood
$Re$	Número de Reynolds
$Sc_i$	Número de Schmidt
$U_{rel}$	velocidade relativa entre o óleo e a água
$L$	extensão da mancha
$D_i$	difusividade molecular do componente i
$C_w$	concentração de equilíbrio de um poluente na fase aquosa
$C_s$	concentração de equilíbrio na fase sólida
$C_{ss}$	concentração de sedimentos suspensos
$K_p$	parâmetro dependente da temperatura, pH e das características físico-químicas do sólido adsorvido
$A, B, a, b$	constantes de correlação dependentes da estrutura do composto
$a'_{\mu, \rho, p}$	fatores de regressão
$b'_{\mu, \rho, p}$	fatores de regressão
$\rho_o$	densidade da água do óleo
$D_k$	coeficiente de difusão turbulenta para $k = x, y$ e $z$ .
$\rho_w$	densidade da água
$\mu_w$	viscosidade dinâmica da água
$\nu$	viscosidade cinemática da água

Tabela 10: Constantes físicas utilizadas no modelo de óleo.

Constante	Valor	Descrição
$K_z$	$10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$	coeficiente de dispersão vertical
$g$	$9,81 \text{ m/s}^2$	aceleração gravitacional
$\nu$	$1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	viscosidade cinemática da água
$R$	$8,206 \times 10^{-5} \text{ atm} \cdot \text{m}^3/\text{mol} \cdot \text{K}$	constante universal dos gases
$C$	0,0323	constante
$D$	0,0474	constante
$u_1$	7	constante
$u_2$	20	constante
$C_0(2)$	500 a 3400	constante
$a$	2,5	constante empírica
$b$	0,654	constante empírica

Em seguida, na Tabela 11, são apresentados os parâmetros numéricos utilizados no modelo de dispersão de óleo.

Tabela 11: Parâmetros numéricos utilizados no modelo de óleo.

Constante	Valor	Descrição
$\Delta t$	900 s	Passo de tempo
$\Delta x$	3 km	Espaçamento zonal da grade
$\Delta y$	3 km	Espaçamento meridional da grade
$\Delta z$	100 m ( <i>blowout</i> ) e 10 m (8 m <sup>3</sup> e 200 m <sup>3</sup> )	Espaçamento na coluna d'água da grade
$n_p$	40.000	Número de partículas

No modelo OSCAR pode-se utilizar até 30 mil partículas para representar a fração não dissolvida do óleo e 30 mil para representar a fração dissolvida. No estudo atual, optou-se por utilizar 20 mil para cada tipo, totalizando 40 mil partículas. Esse valor foi escolhido com base em testes de sensibilidade com aumentos sucessivos do número de partículas onde foi verificado que a partir de 10 mil partículas (5 mil não dissolvidos e 5 mil dissolvidos) não observam-se diferenças entre os resultados. Com relação à distribuição dos diâmetros e massas das partículas, isto é feito internamente pelo modelo de óleo.

Foram utilizados os menores espaçamentos de grade permitidos pelo OSCAR para essa modelagem considerando as dimensões do domínio de modelagem.. É importante destacar que plumas ou manchas de óleo com dimensões menores do que as dimensões das células da grade estão sujeitos a uma “diluição numérica” artificial. Os resultados de concentração e espessuras devem ser vistos como valores médios no volume definido pelas dimensões das células da grade.

### 3.1.2 Estratégias de Modelagem

As simulações foram realizadas considerando eventos de *blowout* com **vazamentos contínuos no fundo marinho** de 30 dias em 2 cenários sazonais, verão e inverno, por um **orifício de 18 ¾ polegadas** (~476 mm) (informação da contratante). Após 30 dias de vazamento foram ainda simulados mais 30 dias para observação do comportamento da deriva do óleo, totalizando 60 dias (1.440 horas) de simulação. Além da simulação de pior caso, na qual é considerado o volume de ~46.742 m<sup>3</sup>, foram ainda realizadas simulações para **vazamentos instantâneos em superfície** de pequeno e médio porte, 8 m<sup>3</sup> e 200 m<sup>3</sup>, respectivamente. Para todos os casos simulados a deriva do óleo foi acompanhada por 30 dias. A Justificativa para o volume de *blowout* considerado está apresentada no ANEXO II.

Em todas as simulações optou-se pela modelagem tridimensional. Este tipo de modelagem permite o mapeamento das frações do óleo que ficam dissolvidas e dispersas na coluna d'água, além da parcela do óleo que fica na superfície. Considerando que uma parcela significativa do óleo fica na coluna d'água, entendemos que esta estratégia é bem mais robusta do que a modelagem bidimensional, onde a parcela da massa de óleo que fica na coluna d'água é apenas quantificada, mas não é transportada nem mapeada no domínio de modelagem.

No caso de *blowout* o vazamento foi considerado ocorrendo no fundo do mar. Segundo informações obtidas com a contratante, na eventualidade de um *blowout*, ocorre uma desconexão do riser. Sendo assim, o vazamento passa a ocorrer a partir do fundo do mar. Considerou-se o vazamento de *blowout* passando por um orifício de 18 ¾ polegadas (~476 mm), que é o diâmetro da cabeça do poço. Como regra geral, maiores orifícios resultam na formação de maiores gotículas de óleo. Quanto maiores forem as gotículas de óleo formadas no *blowout*, maiores serão as velocidades de ascensão dessas gotículas e menores serão as superfícies de contato da massa de óleo com a água do mar. Como é impossível precisar quais serão as dimensões do orifício por onde o óleo passará num eventual acidente, optou-se por considerar o orifício como sendo toda a área da cabeça do poço. Assim, maximizam-se as velocidades de ascensão do óleo e minimizam-se as superfícies de contato. Com menor tempo e área de contato com a água do mar, uma maior parcela do óleo chega à superfície e não fica dispersa ou dissolvida na coluna d'água. Ou seja, esta estratégia visa, de maneira conservadora, maximizar o tamanho da mancha de óleo em superfície.

Para os vazamentos instantâneos de pequeno (8 m<sup>3</sup>) e médio (200 m<sup>3</sup>) porte, optou-se por considerar os vazamentos ocorrendo na superfície do mar, uma vez que esta situação é mais compatível com a frequência de ocorrência de vazamentos deste porte

Em todas as simulações considerou-se como critério de existência de óleo na superfície espessuras maior ou igual ao limiar de  $3 \times 10^{-7}$  metros. Esse valor de espessura está em conformidade com o **limite visual** indicado na Informação Técnica n° 023/02, que “*corresponde ao filme de óleo denominado por arco-íris*”.

Na resolução CONAMA n°357 de 2005, em seu texto, estabelece que o padrão para óleos em águas salinas na classe 1 e 2 é “virtualmente ausente”, enquanto para classe 3 é “toleram-se iridescência”. Dessa forma, entende-se que se não houver iridescências (arco-íris), pode-se considerar a superfície da água com teor de óleo virtualmente ausente.

Para mapeamento das concentrações de óleo disperso/dissolvido na coluna d’água foi utilizado a **concentração de 20 ppb** como limite para apresentação dos resultados. A especificação de um **valor limiar** deve ser baseada em critérios que levem em conta a toxicidade dos compostos presentes no óleo.

Para fins práticos é comum a adoção de um valor restritivo que possa ser utilizado de maneira mais geral. Um bom exemplo disso é o critério de presença de óleo baseado na espessura de óleo na superfície. O valor de 20 ppb foi adotado considerando que este valor é aproximadamente 0,1 % da concentração de óleo e graxas permitida para descarte de água produzida de acordo com a resolução CONAMA 393/2007. Esta resolução estabelece que o “... descarte de água produzida deverá obedecer a concentração média aritmética simples mensal de óleos e graxas de até 29 mg/l, com valor máximo diário de 42 mg/l”.

Dessa forma, se baseando em 0,1% de 29 mg/l temos aproximadamente 29 ppb. O valor de 0,1% foi arbitrado levando em consideração que este valor tem a mesma ordem de grandeza das diluições necessárias para que não sejam observados efeitos tóxicos adversos em descartes de água de produção, conforme observado em GABARDO (2007).

Destacamos que o valor de 20 ppb utilizado como limiar para apresentação dos resultados não está diretamente relacionado com o risco de efeitos tóxicos adversos. Apenas foi utilizado um valor que, em ordem de grandeza, permitisse o mapeamento da pluma de óleo disperso/dissolvido na coluna d’água.

Segundo informações da contratante, para o bloco FZA-M-90 o óleo esperado é de 27° API. Dessa forma foi escolhido um óleo de grau API próximo no banco de dados do OSCAR. As características do óleo utilizado nas simulações são apresentadas na Tabela 12.

A curva de destilação do óleo análogo é apresentada na Tabela 13. A partir das informações da curva de destilação, o modelo OSCAR estabelece internamente as frações dos 25

componentes do óleo necessários para os cálculos dos processos de intemperismo e das macro-características, apresentados na Tabela 14.

Tabela 12: Características do óleo utilizado nas simulações.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
API	27	°
Densidade	0,893	g/cm <sup>3</sup>
Viscosidade dinâmica	27 (13°C)	cP
Ponto de Fluidez ( <i>Pour Point</i> )	-12	°C
Ponto de Fulgor ( <i>Flash Point</i> )	3	°C
Conteúdo Máximo de Água	75	%
Graxa	2	%
Asfalteno	0,2	%

Tabela 13: Curva de destilação do óleo utilizado no estudo.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>% Volume</b>
65	1,43
90	3,04
150	9,57
180	13,83
240	24,49
320	45,71
375	57,21
420	63,59
525	83,78
565	87,99

Tabela 14: Componentes calculados pelo OSCAR a partir da curva de destilação.

<b>Componentes</b>	<b>Fração no óleo (%)</b>
C1-C4 gases (dissolvido no óleo)	0,4112
C5-saturados (n-/iso-/ciclo)	0,6561
C6-saturados (n-/iso-/ciclo)	1,1399
Benzeno	0,1900
C7-saturados (n-/iso-/ciclo)	1,2781
C1-Benzeno (Toluene) et, B	0,4277
C8-saturados (n-/iso-/ciclo)	1,6859
C2-Benzeno (xilenos; usando O-xileno)	0,4606
C9-saturados (n-/iso-/ciclo)	1,8769
C3-Benzeno	4,2838
C10-saturados (n-/iso-/ciclo)	3,2686
C4 e C4 Benzenos	0,1127
C11-C12 (total sat + aro)	6,1171
Fenóis (C0-C4 alquilado)	0,0097
Naftalenos 1 (C0-C1-alkilado)	0,3299
C13-C14 (total sat + aro)	6,7708
Naftalenos 2 (C2-C3-alkilado)	0,4578
C15-C16 (total sat + aro)	6,3750
HPA 1 (Hidrocarbonetos poliaromático médio solúvel (3 anéis-não-alkilado; < 4 anéis)	0,2762
C17-C18 (total sat + aro)	6,2899
C19-C20 (total sat + aro)	3,8352
Materiais cromatográficos não-resolvidos (C10 à C36)	0,0834
C21-C25 (total sat + aro)	6,9442
HPA 2 (Hidrocarbonetos poliaromático baixo solúvel (3 anéis-alkilado; 4-5+ anéis))	0,0778
C25+ (total)	46,6418

### 3.1.3 Descrição das Grades

Neste estudo utilizou-se uma grade regular com resolução espacial de 3 km nas direções zonal e meridional. Os limites da grade são: ao sul, 33° 39' S, ao norte, 22° 05' S, a oeste, 53° 14' O e a leste, 37° 40' O (Figura 80). Com isso, obteve-se uma matriz com 712 por 493 pontos de grade.

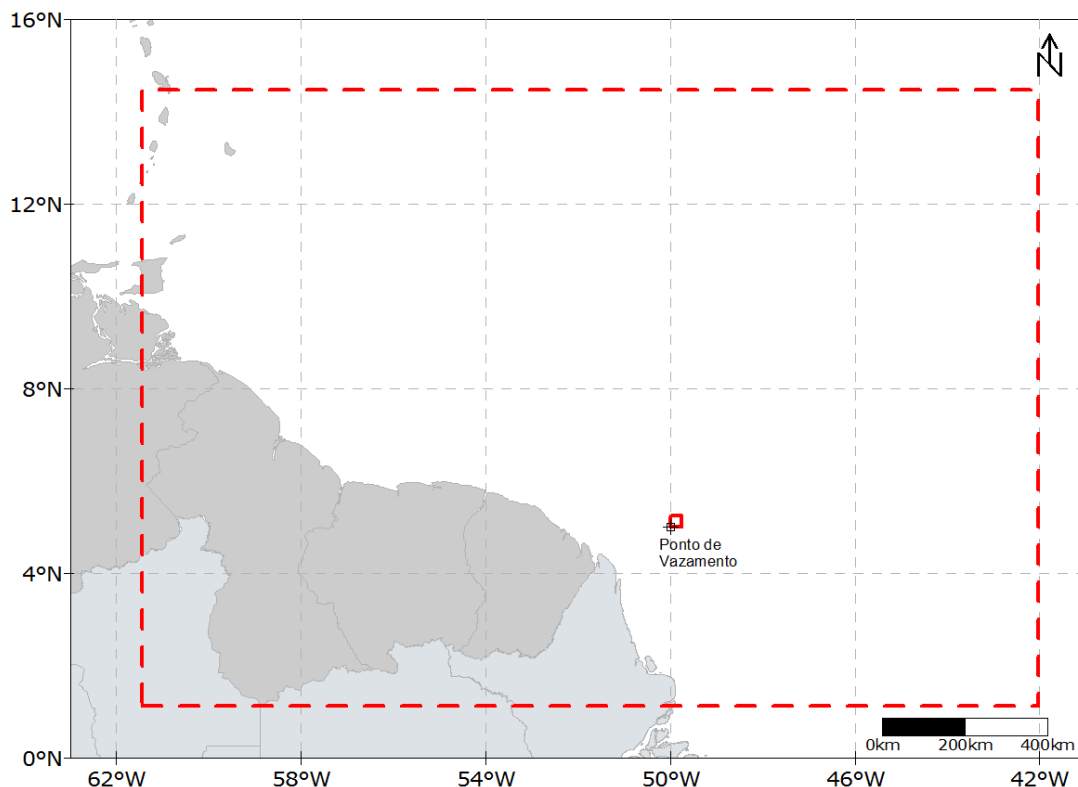


Figura 80: Representação do limite da grade de óleo (linha vermelha tracejada).

Para os volumes de vazamento de 8 m³ e 200 m³, o número de camadas foi de 10, indo de 0 a 100 m de profundidade, totalizando 3.510.160 elementos. Para o volume de *blowout*, o número de camadas foi de 25, indo de 0 a 2.500 m de profundidade, totalizando 8.775.400 elementos.

A grade do modelo de óleo com a batimetria é apresentada na Figura 81. Para manter a concordância com a modelagem hidrodinâmica, os dados de batimetria utilizados são provenientes da base global batimétrica ETOPO1 (AMANTE; EAKINS, 2009).



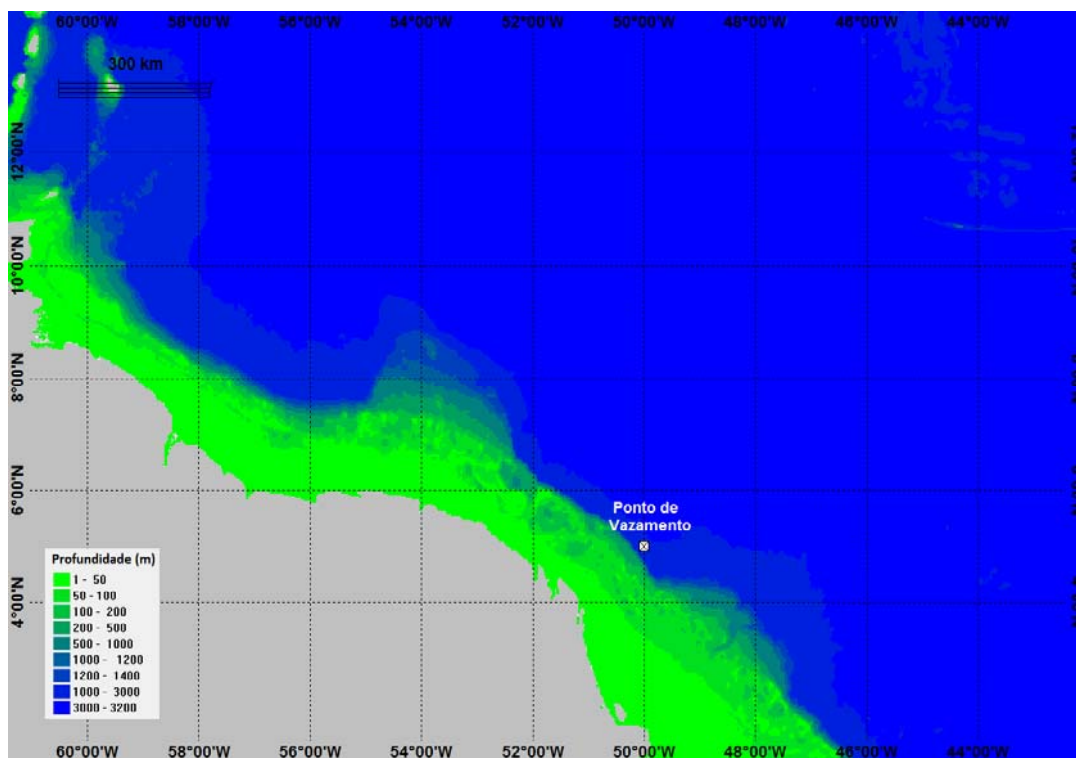


Figura 81: A grade de batimetria utilizada na simulação.

Como discutido no item 3.1.1.4, as interações óleo-linha de costa no modelo OSCAR são dependentes tanto do tipo de óleo considerado na modelagem quanto do tipo de linha de costa. Este vai definir a máxima capacidade de retenção do óleo nos pontos da grade do modelo que representam a costa.

Para a definição do tipo de costa para modelagem de óleo foi utilizado como base as informações do Projeto de Proteção e Limpeza de Costa (PPLC, 2014).

O Projeto de Proteção e Limpeza de Costa (PPLC) é um Acordo de Cooperação Técnica entre Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e o Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP), cujo objetivo é criar um banco de dados georreferenciados de todo o litoral brasileiro para servir de suporte para o planejamento e gestão de uma operação de resposta a acidentes envolvendo derramamento de óleo no mar.

O projeto utilizou os conceitos definidos nas Cartas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo (SAO) e contribui à atualização dos Atlas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo, já publicados.

Na região de estudo em questão, no que tange o território brasileiro, é verificada a predominância do Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL) de valor 10, que representa regiões de manguezais e planícies de maré. Desta forma, foi utilizado o tipo de costa no modelo OSCAR que melhor representa esse tipo de ambiente.

Além disso, foi extrapolado para a costa dos outros países que fazem parte da região de estudo o mesmo tipo de costa para se ter uma abordagem conservadora, uma vez que o ISL 10 é o tipo de costa com maior sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo.

O detalhamento da linha de costa utilizado na grade da modelagem de óleo é apresentado no ANEXO II.

### 3.1.4 Forçantes

#### 3.1.4.1 Ventos

Os dados de vento utilizados como forçante no modelo são provenientes das Reanálises do NCEP – *National Centers for Environmental Prediction* – (KALNAY *et al.*, 1996). A base de dados conhecida como “Reanálises do NCEP” foi originada a partir de uma cooperação entre o NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) e o NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), com intuito de produzir inicialmente uma rede de 40 anos de dados meteorológicos globais com base nas análises dos campos atmosféricos (KALNAY *et al.*, 1996). Posteriormente, esse projeto foi ampliado para uma janela de tempo de 50 anos (KISTLER *et al.*, 2001), e atualmente, estão disponíveis mais de 60 anos (1948-atual) de dados.

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

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

- Dados globais de radiossondas.
- Dados da superfície do mar obtidos através do projeto COADS (*Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set*) no período de 1983 a 1996 (14 anos), originados de diversas fontes, dentre elas, observações de navios, bóias fixas, bóias móveis e estações oceânicas próximas à superfície.
- Dados aéreos, originados de observações por aeronaves em todo o globo, geralmente associados a projetos como GARP (*Global Atmospheric Research Program*) e GATE (*Global Atlantic Tropical Experiment*), por exemplo.
- Dados de Satélite, que começaram a ser obtidos em 1967, através de diversos programas. Atualmente, o NCEP/NCAR utiliza dados fornecidos pelo projeto TOVS (*Operational Vertical Sounder System*), com variáveis em três dimensões, cuja resolução espacial média é de 2,5 graus.

- Dados de vento em superfície, obtidos pelo sensor espacial *Microwave/Imager* (SSM/I) a partir de 1987, submetidos ao tratamento feito pela rede neural de Kransnopolsky *et al.* (1995) *apud* Kalnay *et al.* (1996).
- Dados de cobertura de nuvens obtidos por estimativas dos dados de Satélites Meteorológicos Geoestacionários (SMG). Esses dados estão disponíveis desde 1978.

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

Para este estudo foram tratados 5 anos de dados (2009 a 2013) com uma frequência temporal de 6 horas (4 dados por dia). A resolução espacial na área em questão é de aproximadamente 1,8°, tendo sido utilizado o ponto de grade do NCEP mais próximo aos pontos de simulação de vazamento do bloco FZA-M-90 (Figura 82). A seguir, são apresentadas as rosas dos ventos mensais (Figura 83 e Figura 84), elaboradas para o período analisado (2009 a 2013), além das tabelas de ocorrência de direção e intensidade (Tabela 15 e Tabela 16).

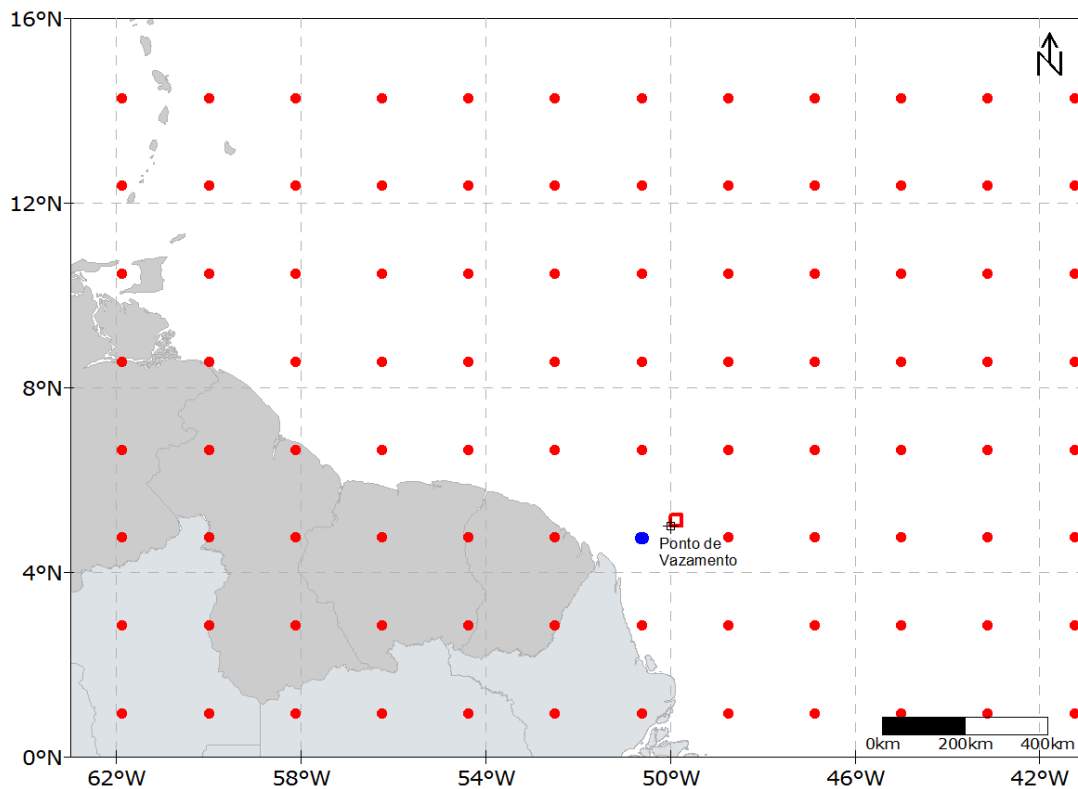


Figura 82: Localização dos pontos de grade do NCEP (em vermelho) em relação ao ponto de vazamento. Ponto em azul é o mais próximo da região de vazamento.

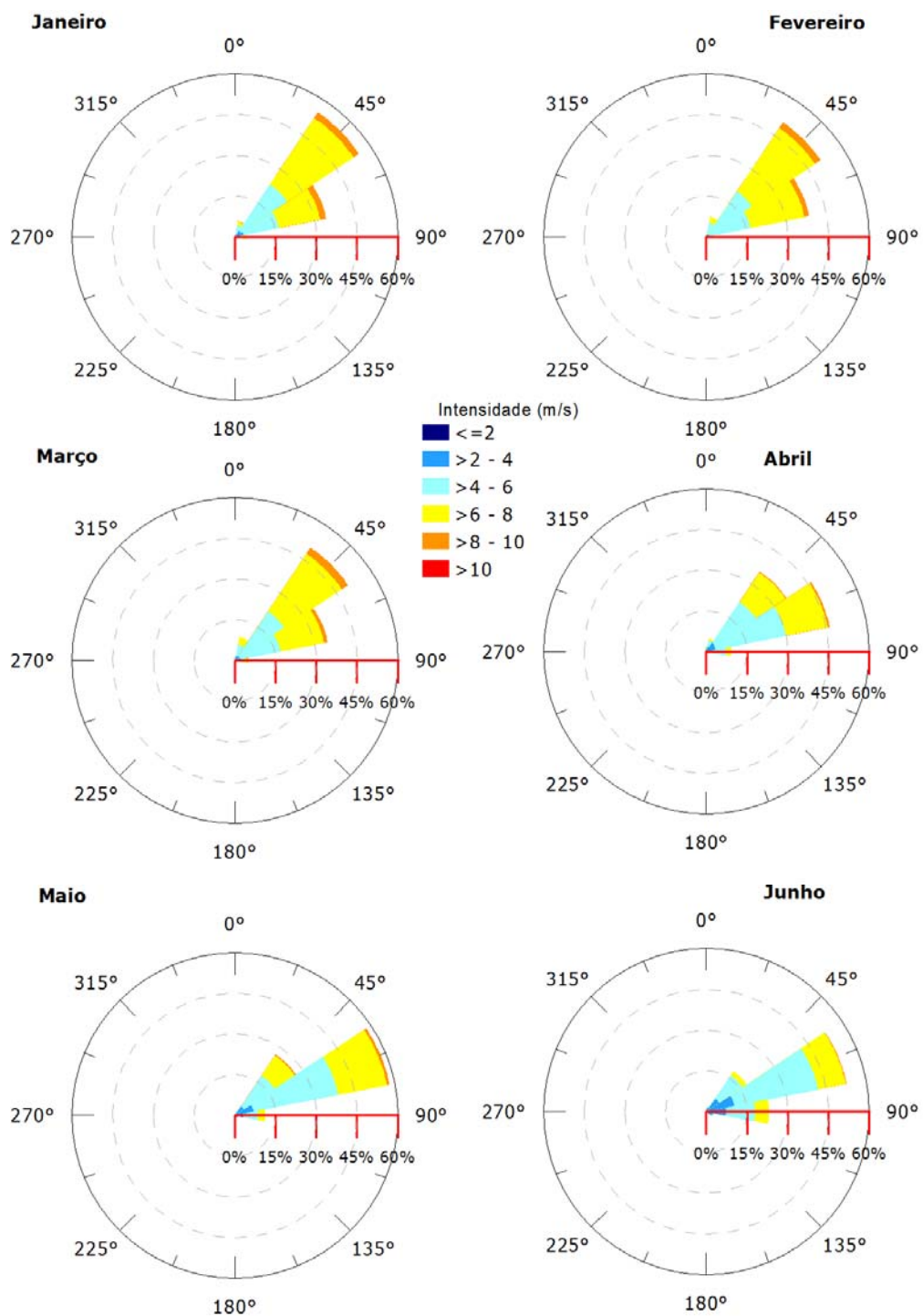


Figura 83: Rosa dos ventos para os meses de janeiro a junho para o ponto mais próximo dos locais de vazamento.

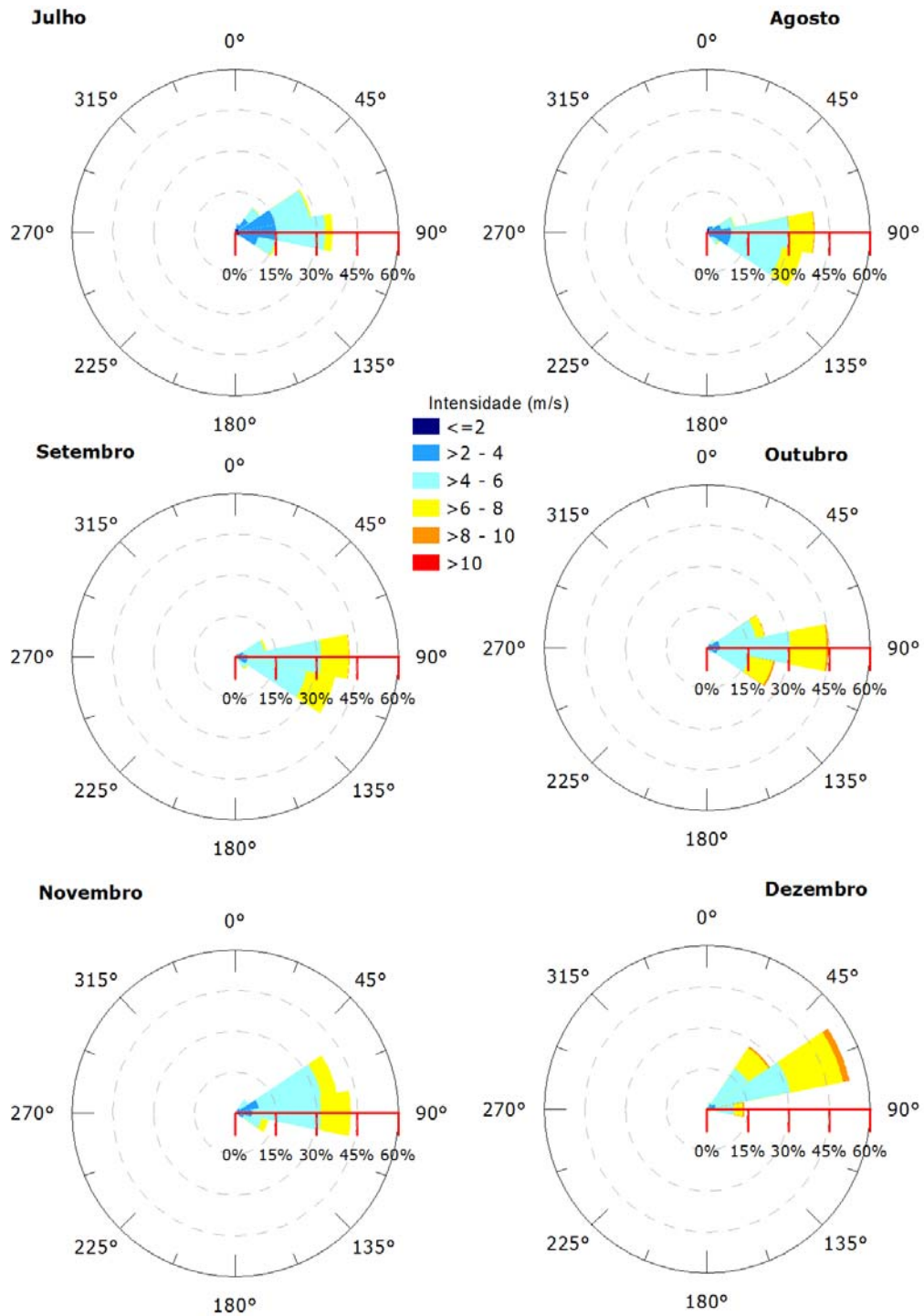


Figura 84: Rosa dos ventos para os meses de julho a dezembro para o ponto mais próximo dos locais de vazamento.

Tabela 15: Ocorrência mensal de direção dos ventos para o ponto mais próximo do local do vazamento.

Direção	Meses do ano											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
N	0,32	0,71	0,97	1,67	0,16	-	0,97	0,16	0,17	0,16	0,17	0,48
NNE	5,81	7,45	8,87	4,83	1,61	2,17	3,55	2,26	0,17	-	0,33	2,58
NE	55,00	50,71	50,16	35,50	27,10	18,00	11,13	3,23	1,50	3,71	6,00	27,90
ENE	34,35	38,65	34,84	46,33	58,06	52,67	28,55	10,48	11,83	21,77	38,17	53,39
E	4,35	1,95	5,16	9,33	11,29	23,17	35,97	39,68	42,17	44,68	42,67	13,87
ESE	0,16	0,35	-	1,67	1,45	3,17	15,81	35,65	37,50	25,48	12,50	1,61
SE	-	0,18	-	0,50	0,32	0,50	2,42	5,97	5,83	2,74	0,17	0,16
SSE	-	-	-	0,17	-	-	0,81	0,97	0,83	0,81	-	-
S	-	-	-	-	-	-	0,16	0,97	-	0,32	-	-
SSO	-	-	-	-	-	-	0,32	0,32	-	-	-	-
SE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16	-	-
OSO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O	-	-	-	-	-	-	-	0,32	-	-	-	-
ONO	-	-	-	-	-	-	0,16	-	-	-	-	-
NO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NNO	-	-	-	-	-	0,33	0,16	-	-	0,16	-	-

Tabela 16: Ocorrência mensal de intensidade dos ventos para o ponto mais próximo do local do vazamento.

Mês	Intensidade (m/s)				
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10
Janeiro	-	7,90	40,32	46,94	4,84
Fevereiro	0,35	4,26	39,72	51,42	4,26
Março	0,48	7,26	42,26	45,81	4,19
Abril	0,67	12,67	53,50	32,17	1,00
Maio	0,48	15,81	52,26	30,00	1,45
Junho	3,50	25,00	53,83	17,33	0,33
Julho	9,03	43,23	43,55	4,19	-
Agosto	6,29	25,97	50,16	17,26	0,32
Setembro	0,67	14,83	61,67	22,67	0,17
Outubro	1,61	16,45	54,68	25,81	1,45
Novembro	0,33	20,67	59,50	19,50	-
Dezembro	0,65	9,52	54,03	32,26	3,55



### 3.1.4.2 Correntes

Como forçante hidrodinâmica foram utilizados os resultados do modelo hidrodinâmico descritos no item 2 – Modelagem Hidrodinâmica. Assim, são apresentadas as rosas de correntes mensais (Figura 85 e Figura 86) para ponto mais próximo do local de vazamento, além das tabelas de ocorrência de direção e intensidade (Tabela 17 e Tabela 18).

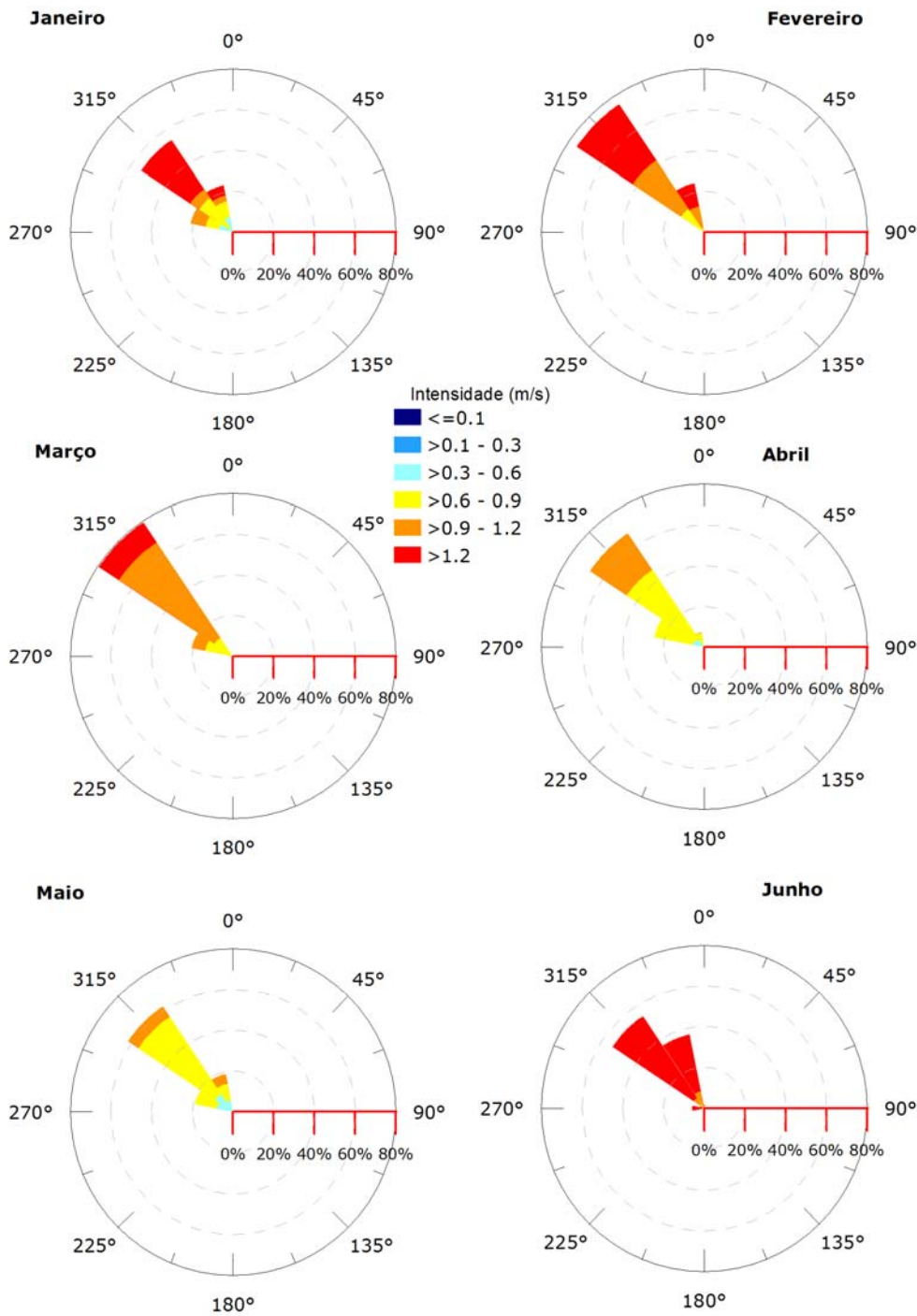


Figura 85: Rosa de correntes para os meses de janeiro a junho para o ponto mais próximo do local de vazamento do bloco FZA-M-90.

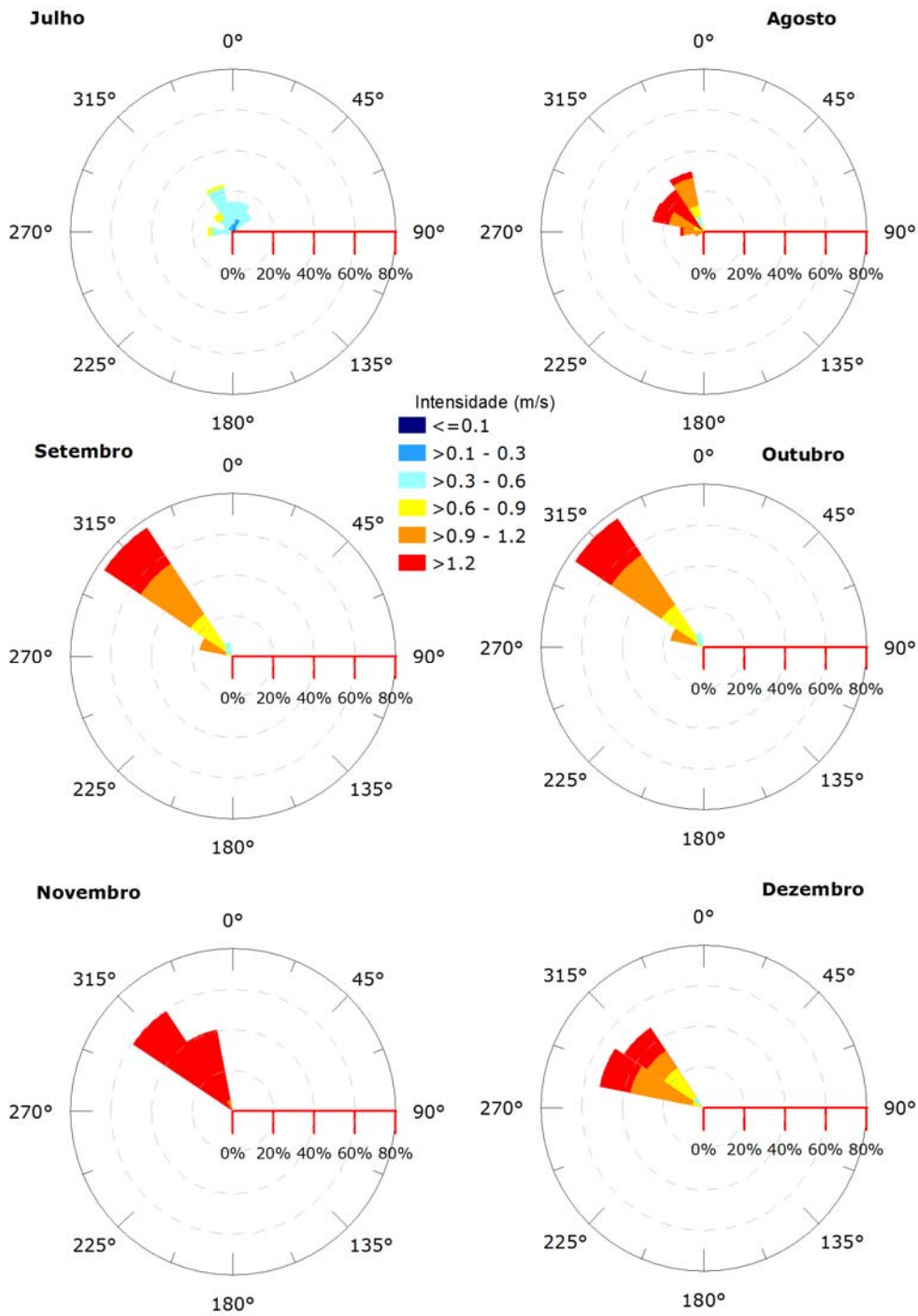


Figura 86: Rosa de correntes para os meses de julho a dezembro para o ponto mais próximo do local de vazamento do bloco FZA-M-90.

Tabela 17: Ocorrência mensal de direção das correntes para o ponto mais próximo do local do vazamento do bloco FZA-M-90.

Direção	Meses do ano											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
N	1,08	-	-	-	-	1,39	14,67	3,23	-	29,30	-	-
NNE	-	-	-	-	-	-	14,95	-	-	0,54	-	-
NE	-	-	-	-	-	-	11,41	-	-	-	-	-
ENE	-	-	-	-	-	-	3,26	-	-	-	-	-
E	-	-	-	-	-	-	0,27	-	-	-	-	-
ESE	-	-	-	-	-	-	0,27	-	-	-	-	-
SE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OSO	-	-	-	-	-	-	3,26	4,58	-	-	-	-
O	-	-	-	-	-	5,83	12,23	11,59	-	-	-	-
ONO	21,24	0,30	20,70	25,00	19,09	1,94	4,62	25,61	16,67	1,08	-	52,28
NO	54,30	75,30	79,30	67,50	62,10	54,17	11,41	24,80	76,11	15,86	59,17	47,18
NNO	23,39	24,40	-	7,50	18,82	36,67	23,64	30,19	7,22	53,23	40,83	0,54

Tabela 18: Ocorrência mensal de intensidade das correntes para o ponto mais próximo do local do vazamento do bloco FZA-M-90.

Mês	Intensidade (m/s)					
	0-0,1	0,1 - 0,3	0,3 - 0,6	0,6 - 0,9	0,9 - 1,2	> 1,2
Janeiro	-	-	17,74	32,53	15,59	34,14
Fevereiro	-	-	1,19	14,88	39,29	44,64
Março	-	-	-	25,00	63,17	11,83
Abril	-	-	10,28	67,78	21,94	-
Maio	-	-	24,19	64,78	11,02	-
Junho	-	-	2,22	33,61	35,56	28,61
Julho	4,08	15,22	73,10	7,61	-	-
Agosto	-	-	7,55	13,48	41,24	37,74
Setembro	-	-	12,22	23,61	42,78	21,39
Outubro	-	3,23	40,32	27,96	12,10	16,40
Novembro	-	-	-	-	5,56	94,44
Dezembro	-	-	6,17	23,32	41,29	29,22

### 3.1.4.3 Separação Sazonal

A partir da observação das informações de ventos e correntes são identificadas duas condições sazonais a serem utilizadas no estudo.

A primeira, denominada **período de verão**, compreende os meses de **dezembro a junho** é caracterizado pela maior frequência de ventos do primeiro quadrante, com predominância de ventos de nordeste e leste-nordeste, e com corrente predominantemente noroeste. No segundo período, entre os meses de **julho e novembro**, denominado **período de inverno**, existe a predominância dos ventos do leste-sudeste e leste. As correntes neste período têm predominância de noroeste e norte-noroeste, com o mês de julho com maior ocorrência de intensidades inferiores a 0,9 m/s.

### 3.1.4.4 Salinidade e Temperatura

Para definir os perfis de salinidade e temperatura a serem incorporados na modelagem de óleo foram utilizados os dados da Análise Global do Projeto MyOcean, os mesmos utilizados na condição inicial e de contorno da Modelagem Hidrodinâmica e descrito no item 2.5 (Condições de Contorno).

Os perfis apresentados (Figura 87) representam a média dos dados para o ponto de grade mais próximo do ponto de vazamento e dentro dos períodos sazonais escolhidos (3.1.4.3 Separação Sazonal).

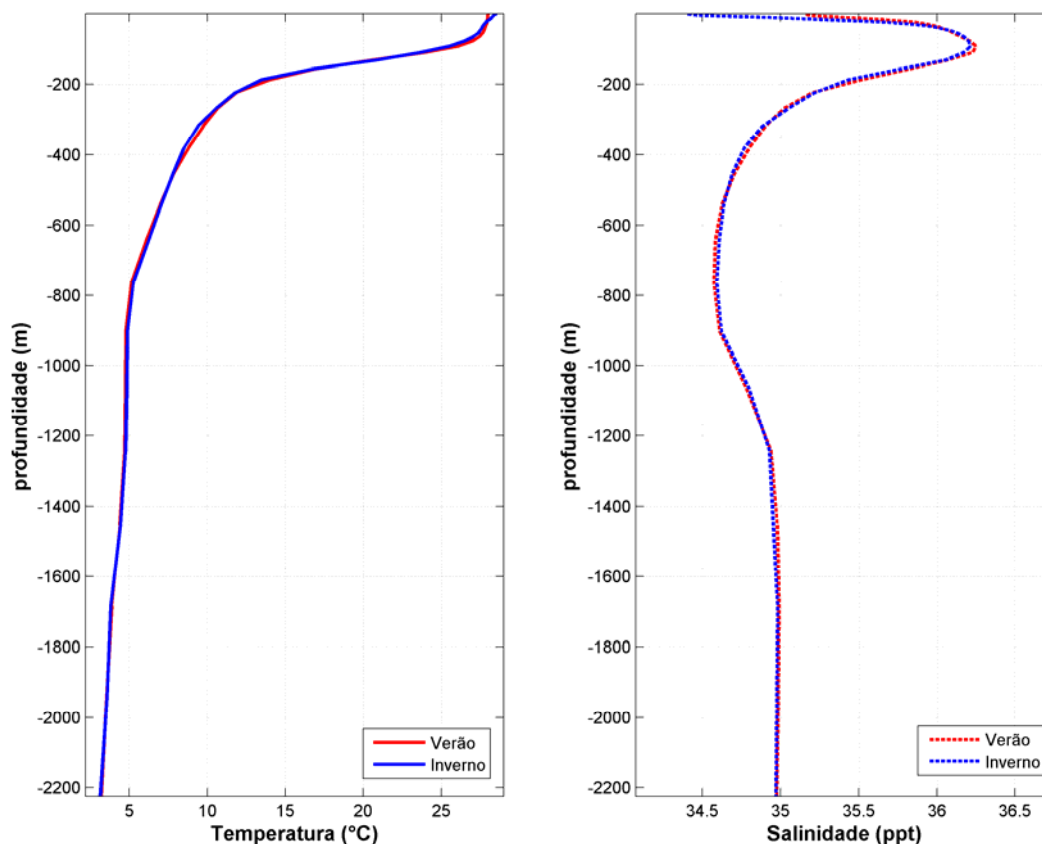


Figura 87: Perfis de salinidade e temperatura para o ponto de vazamento do bloco FZA-M-90.

### 3.1.5 Variabilidade Ambiental

Na implementação de um modelo probabilístico de vazamento de óleo é necessária a definição de um universo amostral que represente a variabilidade ambiental da região. No modelo OSCAR, o universo amostral é criado por  $n$  repetições com condições de vento e corrente correlacionadas (*i.e.* condição de vento e de corrente são para o mesmo dia), o que cria a necessidade de se definir o número de simulações que serão conduzidas na realização da modelagem. Este número deve ser suficiente para representar de forma adequada a variabilidade ambiental presente na região, obtendo um mapa de probabilidade estatisticamente coerente.

Com base no estudo desenvolvido por Da Silva *et al.* (2008), avaliou-se a evolução do erro médio quadrático (RMSE) de mapas de probabilidade realizados com diferentes números de simulações para região da margem equatorial do Brasil.

O cálculo do Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error* — RMSE) entre os resultados parciais e o final é dado pela seguinte equação:

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

onde  $P_i$  é o resultado parcial e  $O_i$  resultado do mapa probabilístico com o maior número de simulações (500 neste caso);  $n$  é o número de pontos de grade.

A evolução e a derivada do erro médio quadrático são apresentadas na Figura 88 e na Figura 89, respectivamente.

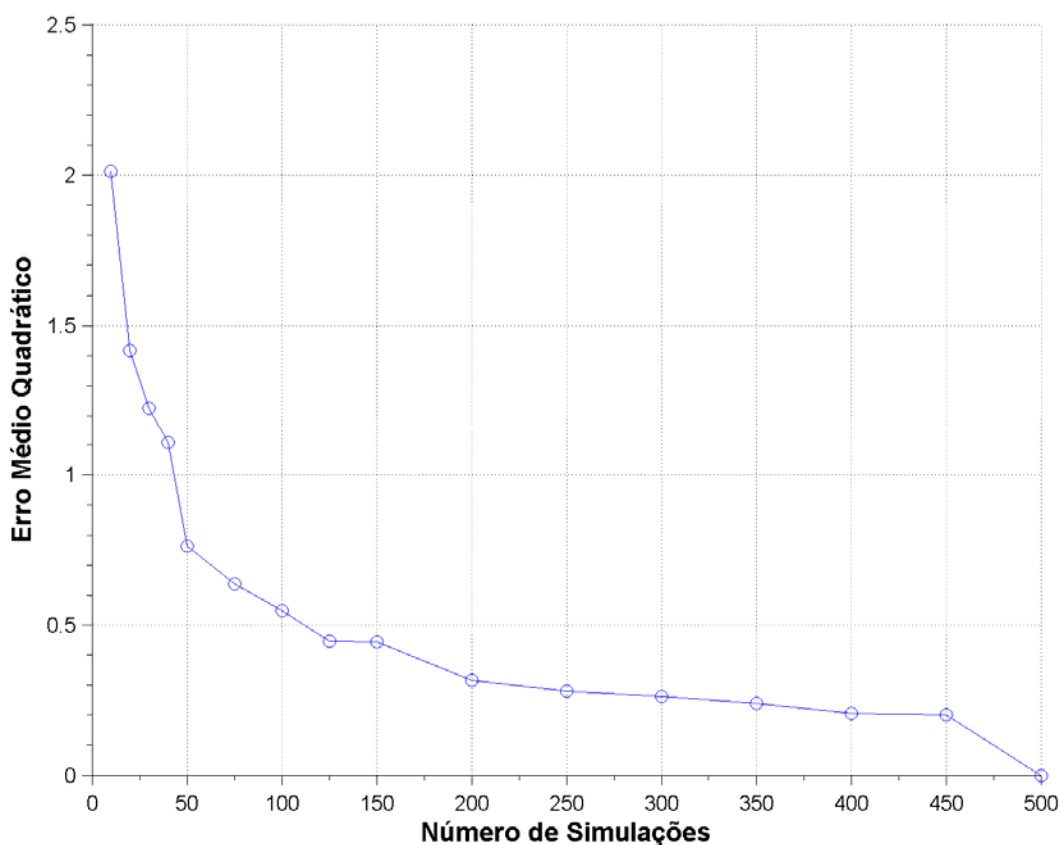


Figura 88: Curva do Erro Médio Quadrático (RMSE).

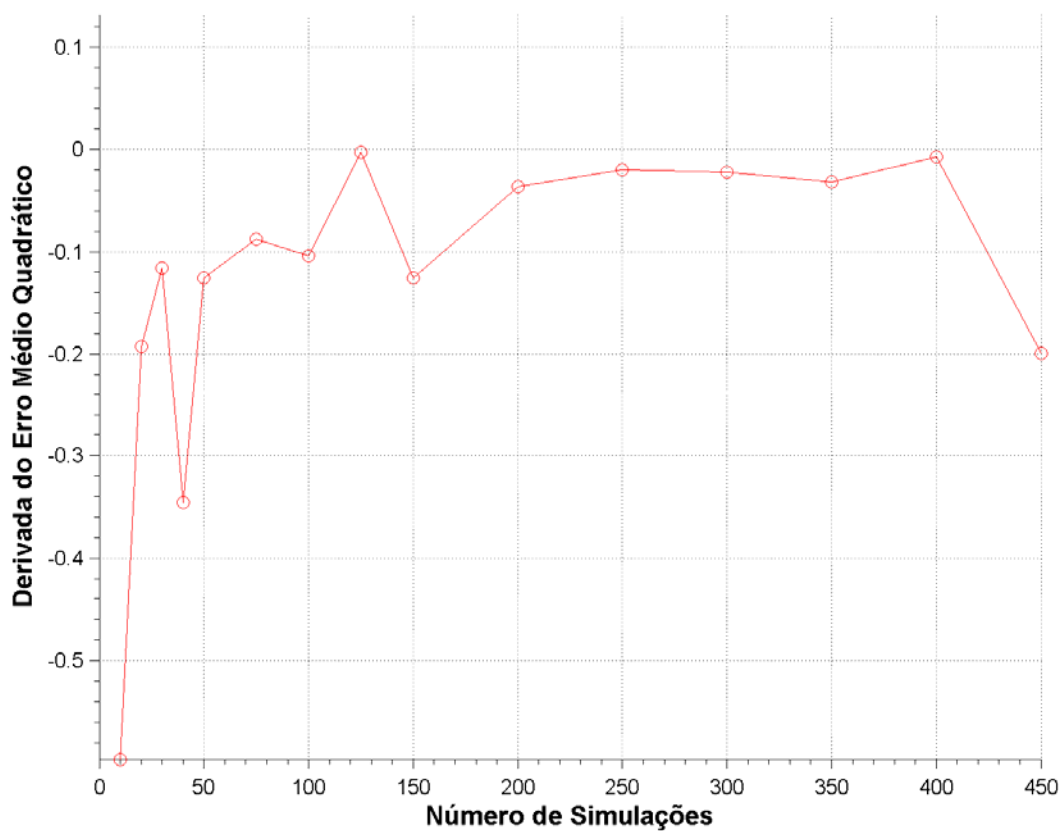


Figura 89: Derivada da curva do Erro Médio Quadrático (RMSE).

Em 300 simulações, o erro médio para todo o domínio encontra-se menor que 0,3 e a derivada próxima de zero (tendência de estabilização da curva), mostrando a capacidade de representação da área de probabilidade.

Porém, para ilustrar ainda mais a escolha de 300 simulações, a seguir são apresentados mapas de probabilidade de presença de óleo para a região da Bacia da Foz da Amazonas para o mesmo ponto de vazamento com 300 e 500 simulações.



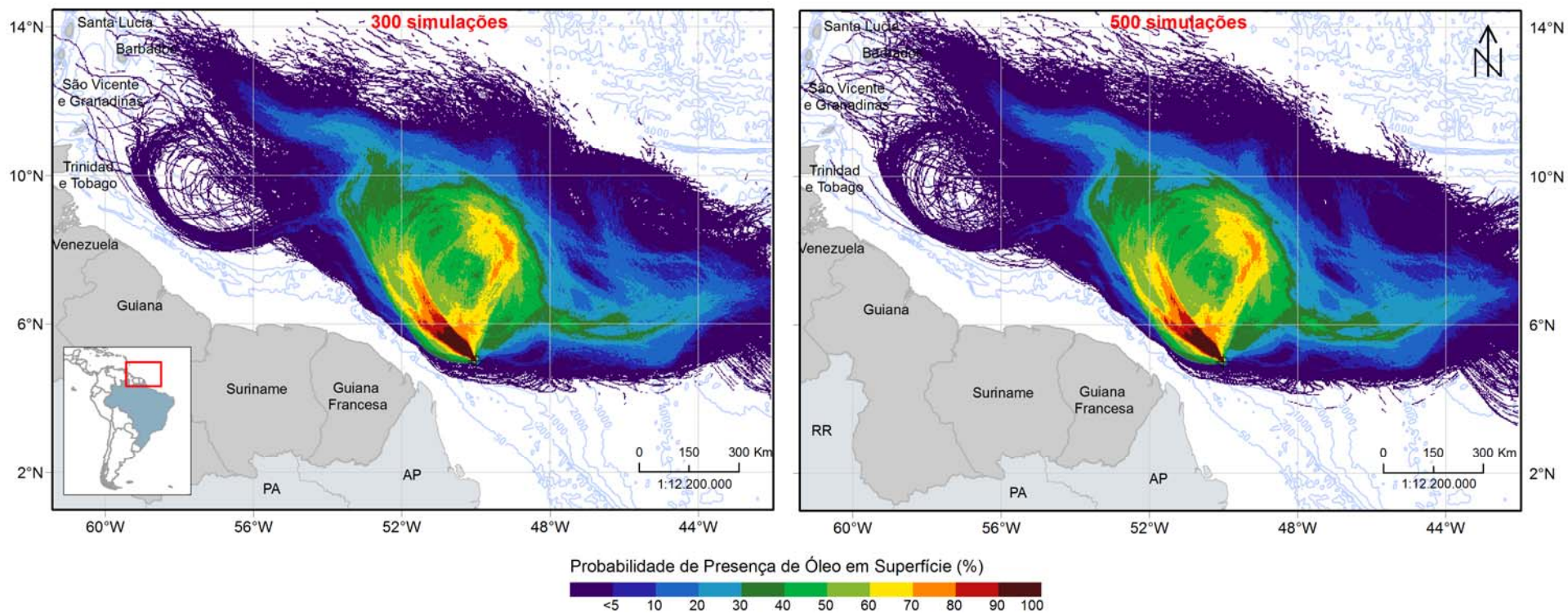


Figura 90: Mapa de probabilidade de presença de óleo para um ponto de risco na Bacia da Foz do Amazonas com 300 e 500 simulações.

Ao analisar de forma qualitativa, é observado basicamente que todas as regiões com probabilidade de presença de óleo no caso de 500 simulações são abarcadas pelo caso de 300 simulações, principalmente os locais com probabilidade acima de 5%. Ainda nota-se que as classes de probabilidade em sua maioria são coincidentes nas mesmas localidades.

No que tange a análise quantitativa, são apresentados histogramas de diferença de probabilidade, ponto a ponto, entre os dois casos (Figura 91, Figura 92 e Figura 93). Somente foram calculados os pontos que tiveram probabilidade em alguma simulação, i.e., se o valor de 0% de probabilidade fosse encontrado em um ponto nos dois casos simulados, este era desconsiderado do cálculo.

O histograma de diferenças de probabilidade (Figura 91) entre os dois casos mostra um comportamento quase que simétrico (considerando o zero como centro), onde as diferenças estão na mesma intensidade, não tendendo sobestimar ou subestimar algum dos casos. Agora ao considerar somente a diferença absoluta (Figura 92), observa-se que a maior porcentagem dos pontos (~30%) está associada ao primeiro intervalo de diferença (0 – ~0,25%) e que 92% do total de pontos de grade com probabilidade apresentam diferenças menores que 3% (Figura 93).

Desta forma, consideramos que os resultados com 300 simulações são apropriados para a correta representação da variabilidade ambiental da região. Essas 300 simulações são escolhidas com espaçamento de tempo regular, permitindo assim considerar todo o período de dados e toda a variabilidade ambiental da região no período.

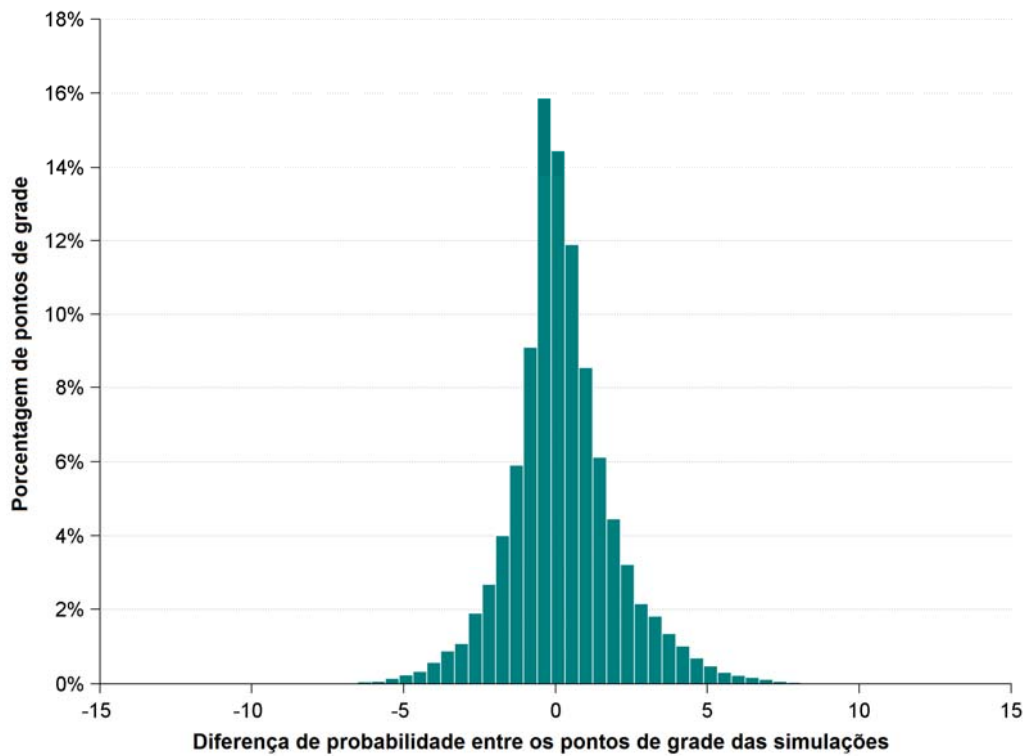


Figura 91: Histograma de diferença de probabilidade de presença de óleos nos casos de 300 e 500 simulações. Valor positivo representa maior probabilidade no caso de 500 simulações. Valor negativo representa maior probabilidade no caso de 300 simulações.

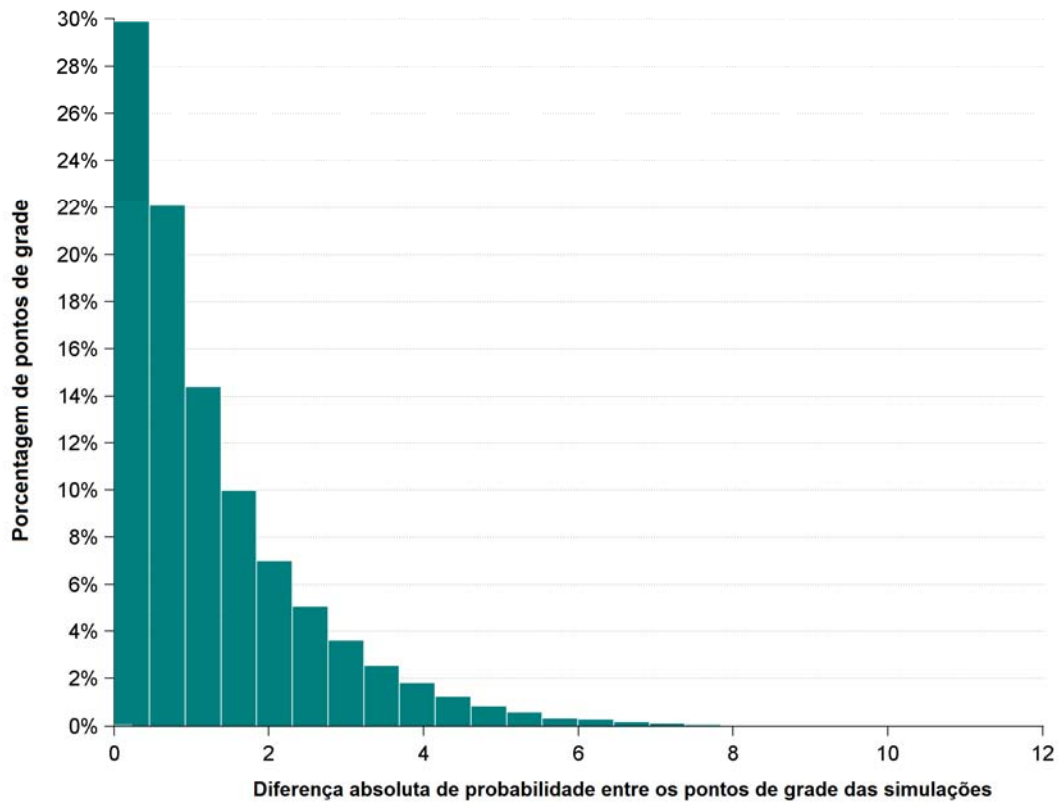


Figura 92: Histograma de diferença absoluta de probabilidade de presença de óleos nos casos de 300 e 500 simulações.

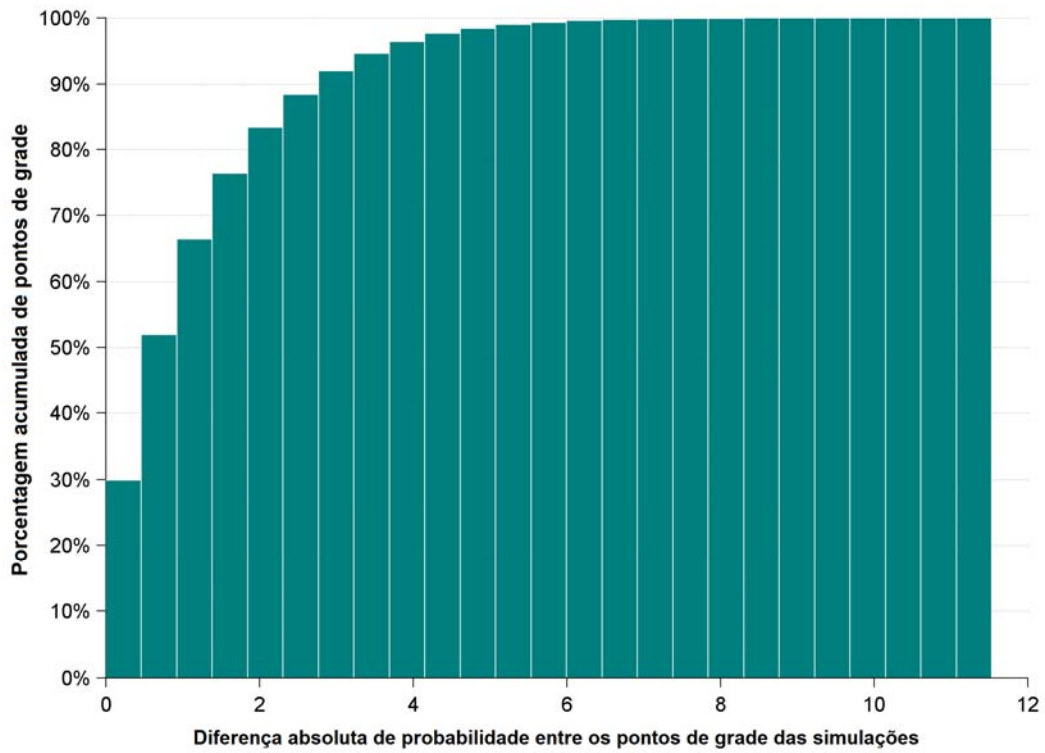


Figura 93: Histograma acumulado de diferença absoluta de probabilidade de presença de óleos nos casos de 300 e 500 simulações.

## 3.2. Resultados

A seguir serão apresentados os resultados das simulações de deriva do óleo para vazamentos de 8 m<sup>3</sup>, 200 m<sup>3</sup> e pior caso (*blowout*), nos modos probabilístico e determinístico.

Na abordagem probabilística são realizadas diversas simulações determinísticas, considerando todos os processos citados nos itens anteriores, em diferentes condições meteorológicas e oceanográficas. Os resultados do modo probabilístico são de grande importância porque ilustram tanto a abrangência da área passível de ser afetada pelo vazamento quanto o tempo mínimo de chegada do poluente em cada local com probabilidade de ser atingido, além de identificar as regiões com maiores probabilidades de serem alcançadas nas diferentes condições simuladas.

Para a obtenção destes resultados foram realizadas 300 diferentes simulações para cada período (verão e inverno) nos diferentes volumes de vazamento, totalizando 1.800 possíveis cenários ambientais de vazamento.

Para avaliação da presença de óleo no fundo oceânico foi utilizado o seguinte procedimento: a partir do cruzamento dos mapas de probabilidade de presença de óleo na coluna d'água em diversas profundidades com o mapa de batimetria utilizado no estudo, foram obtidos mapas de probabilidade de presença de óleo no fundo oceânico. É importante observar que existe uma diferença entre este procedimento e a especificação de um limiar de concentração de óleo nos sedimentos. Enquanto a concentração de óleo nos sedimentos leva em consideração um efeito cumulativo de adsorção de óleo nos sedimentos, o critério utilizado no mapa de probabilidade apenas leva em consideração apenas o fato do óleo tocar no fundo oceânico com concentrações superiores a 20 ppb.

Para avaliar a contribuição dos processos de intemperismo no balanço de massa do óleo nas simulações determinísticas que compõem os cenários probabilísticos, são apresentados gráficos do tipo *box-plot*. Nesse tipo de gráfico, é possível representar graficamente uma amostra de dados através de parâmetros estatísticos básicos como valores mínimo, máximo, mediana, primeiro e terceiro quartis. A Figura 94 mostra o esquema da apresentação dos parâmetros no gráfico *box-plot*.

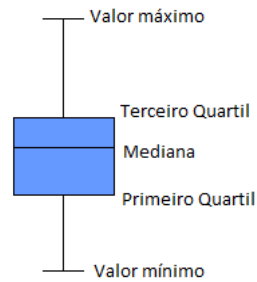


Figura 94: Gráfico do tipo box-plot.

Os **cenários críticos** para serem simulado no modo determinístico foram definidos através da análise dos resultados sazonais de pior caso, sendo escolhida a situação onde o óleo atingiu a costa no **menor período de tempo possível** após o início do vazamento e a situação onde houve **maior acúmulo de óleo na costa**.

O intemperismo e a evolução da massa e área da mancha de óleo serão apresentados ao final de cada simulação determinística, através de gráficos e tabelas que apresentam os valores ao longo da simulação.

A Figura 95 e a Figura 96 resumem a forma como os resultados dos modos probabilísticos e determinísticos serão apresentados, respectivamente.

<b>Volume</b>	<b>Resultado</b>	<b>Tempo de Simulação</b>
<b>8 m<sup>3</sup></b>	Mapa de Probabilidade em superfície	30 dias
	Mapa de Tempo Mínimo em superfície	30 dias
<b>200 m<sup>3</sup></b>	Mapa de Probabilidade em superfície	30 dias
	Mapa de Probabilidade na coluna d'água	30 dias
	Mapa de Tempo Mínimo em superfície	30 dias
<b>Pior caso (46.742 m<sup>3</sup>)</b>	Mapa de Probabilidade em superfície	60 dias
	Mapa de Probabilidade na coluna d'água	60 dias
	Mapa de Probabilidade na costa	60 dias
	Mapa de Probabilidade no fundo marinho	60 dias
	Mapa de Tempo Mínimo em superfície	60 dias
	Mapa de Tempo Mínimo na costa	60 dias
	Mapa de Massa Máxima na Costa	60 dias

Figura 95: Fluxograma de apresentação dos resultados probabilístico.



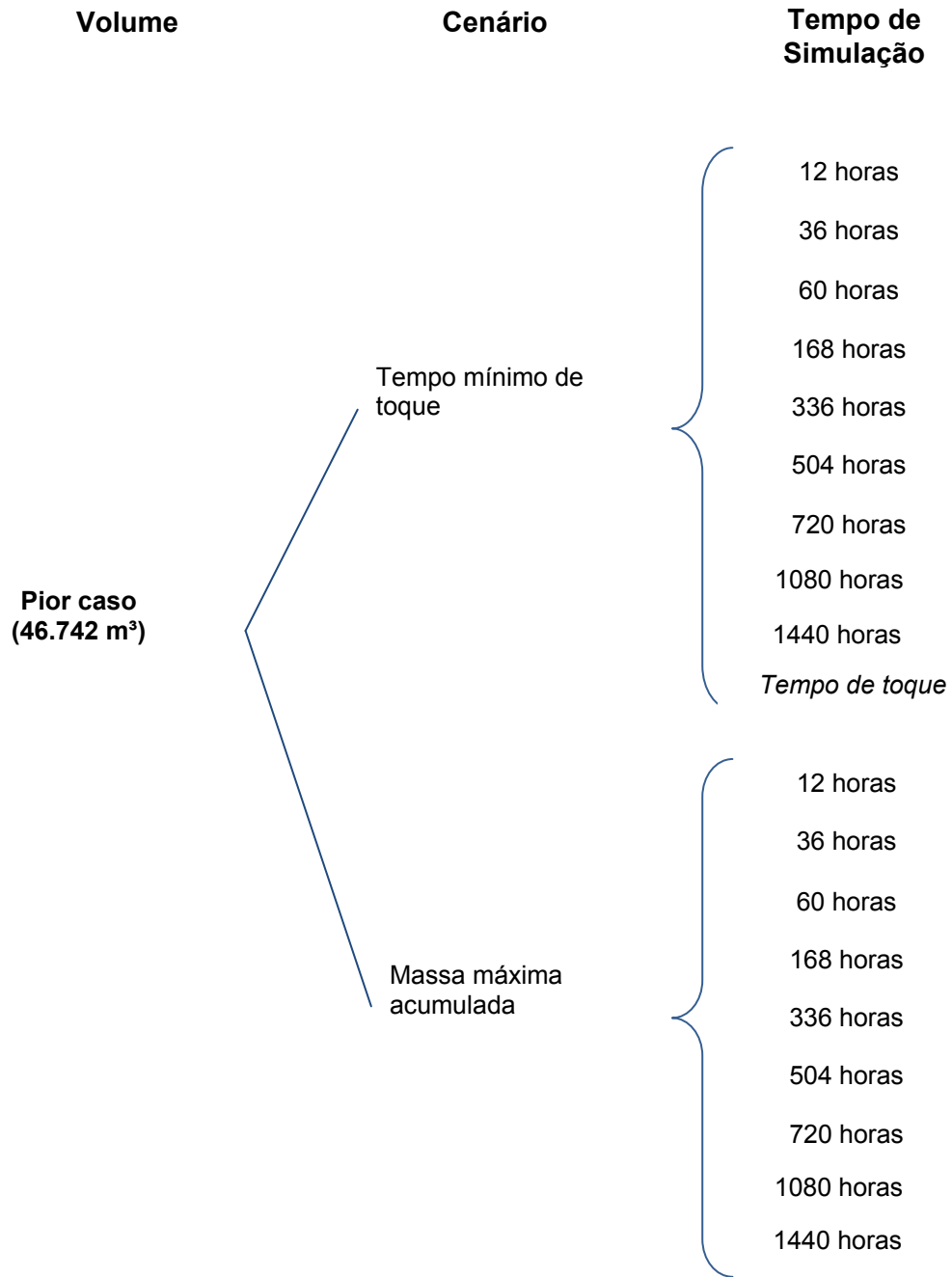


Figura 96: Fluxograma de apresentação dos resultados determinísticos.

## 3.2.1 Resultados Probabilísticos

A seguir serão apresentados os resultados do modo probabilístico para os vazamentos a partir do bloco FZA-M-90 para os três volumes (8 m<sup>3</sup>, 200 m<sup>3</sup> e pior caso - 46.742 m<sup>3</sup>) nos dois cenários sazonais (verão e inverno).

### 3.2.1.1 Vazamento de 8 m<sup>3</sup>

#### 3.2.1.1.1 Verão

Os mapas de probabilidade de presença de óleo e de tempo mínimo de chegada em superfície, para o vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de verão, são apresentados na Figura 97 e na Figura 98, respectivamente.

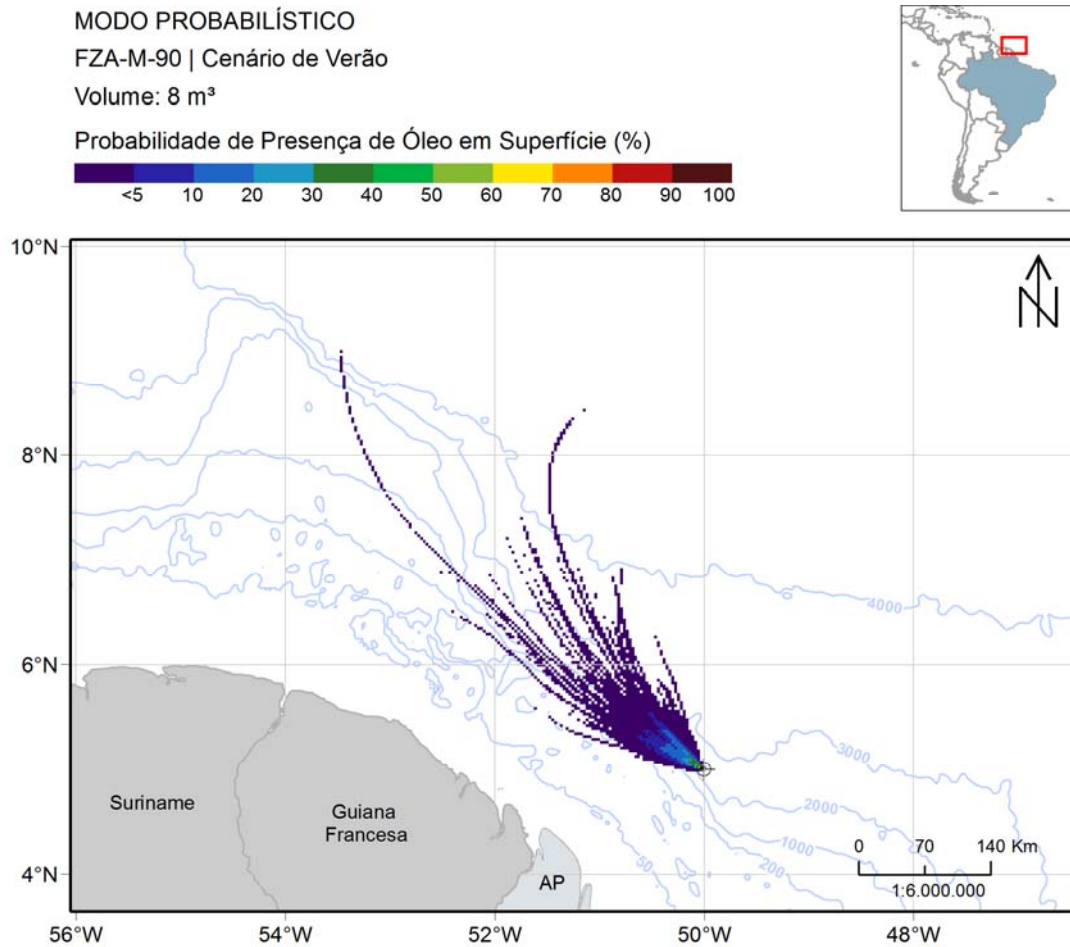


Figura 97: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias).

A deriva do óleo neste cenário foi para noroeste do ponto de vazamento, seguindo o fluxo da Corrente Norte do Brasil (CNB). Não houve toque de óleo na costa e o óleo se restringiu entre as longitudes de 50°W e 53,5°W. A menor distância apresentada em relação à costa foi de 98,2 km da Guiana Francesa sendo que a área de presença de óleo se estendeu até 590 km em relação ao ponto de vazamento.

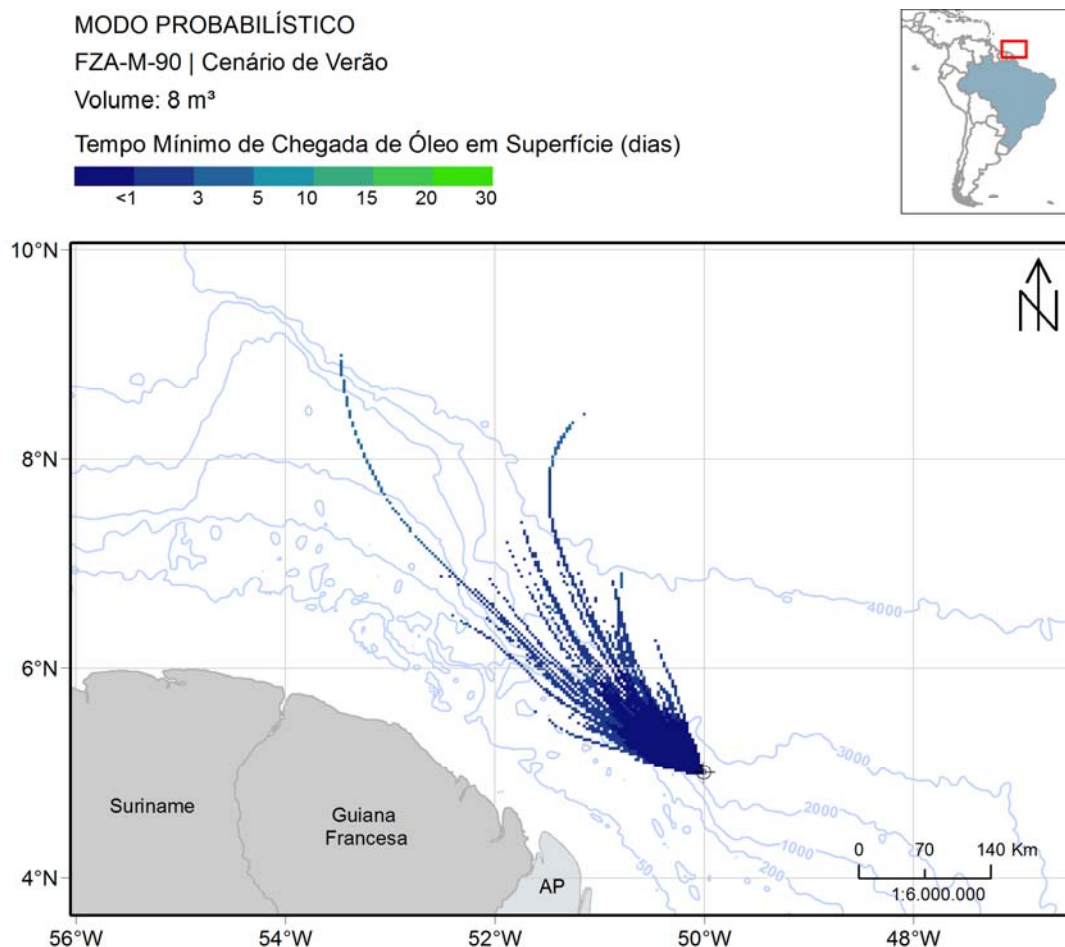


Figura 98: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias).

Observa-se que grande parte da área com probabilidade de presença de óleo pode ser alcançada dentro de 1 dia após início do vazamento, mas são observados tempos mínimos de chegada de até 7 dias. A maior aproximação da costa ocorre entre 3 e 5 dias.

A seguir, na Figura 99, são apresentados os percentuais de retirada de óleo por cada processo intempérico ao final das simulações. Observa-se que a retirada de óleo da superfície ocorreu principalmente através da evaporação (mediana de ~56%), seguido pela dispersão na coluna d'água (mediana de 25%) e pela degradação (mediana de ~17%).

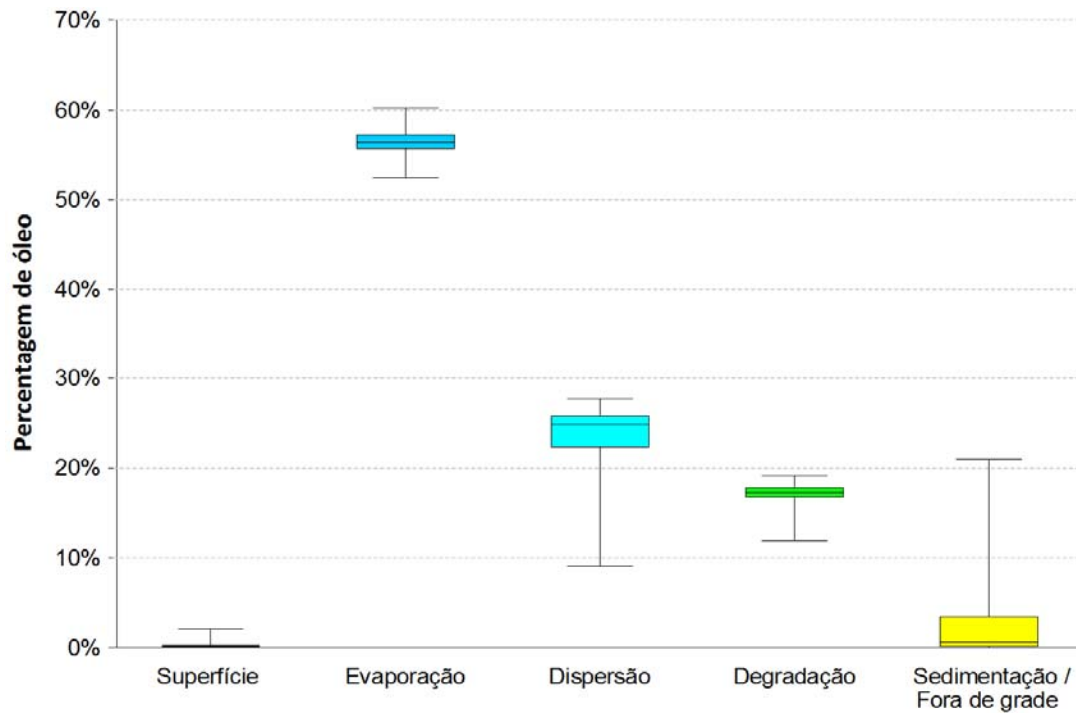


Figura 99: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 8 m<sup>3</sup> no cenário de verão a partir do bloco FZA-M-90.

### 3.2.1.1.2 Inverno

Os mapas de probabilidade de presença de óleo e de tempo mínimo de chegada em superfície, para o vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de inverno, encontram-se na Figura 100 e na Figura 101, respectivamente.

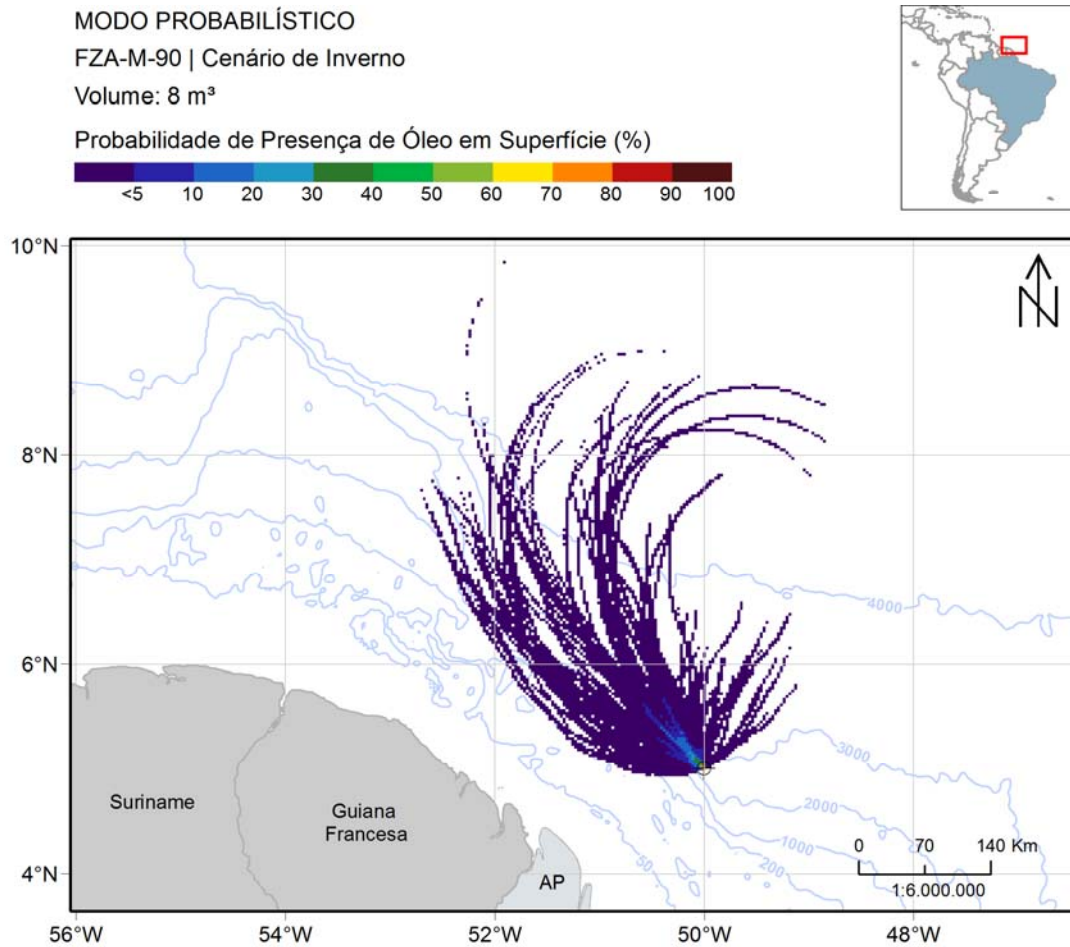


Figura 100: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias).

Diferentemente do cenário de verão, em que há a tendência do óleo deslocar quase que integralmente para noroeste, neste cenário de inverno a presença do meandro e da retroflexão da CNB caracterizam o padrão de probabilidade de presença de óleo. Com isso, nota-se uma parte da área de probabilidade partindo logo de início para norte e nordeste e as partes mais extremas seguindo o padrão da retroflexão.

Nesse caso, o óleo ficou compreendido entre as longitudes de 48,8-52,7°W, sem que houvesse toque na costa. A extensão da área de probabilidade foi de até 550 km do ponto de vazamento sendo que a menor distância da costa foi de 87,5 km até a Guiana Francesa.

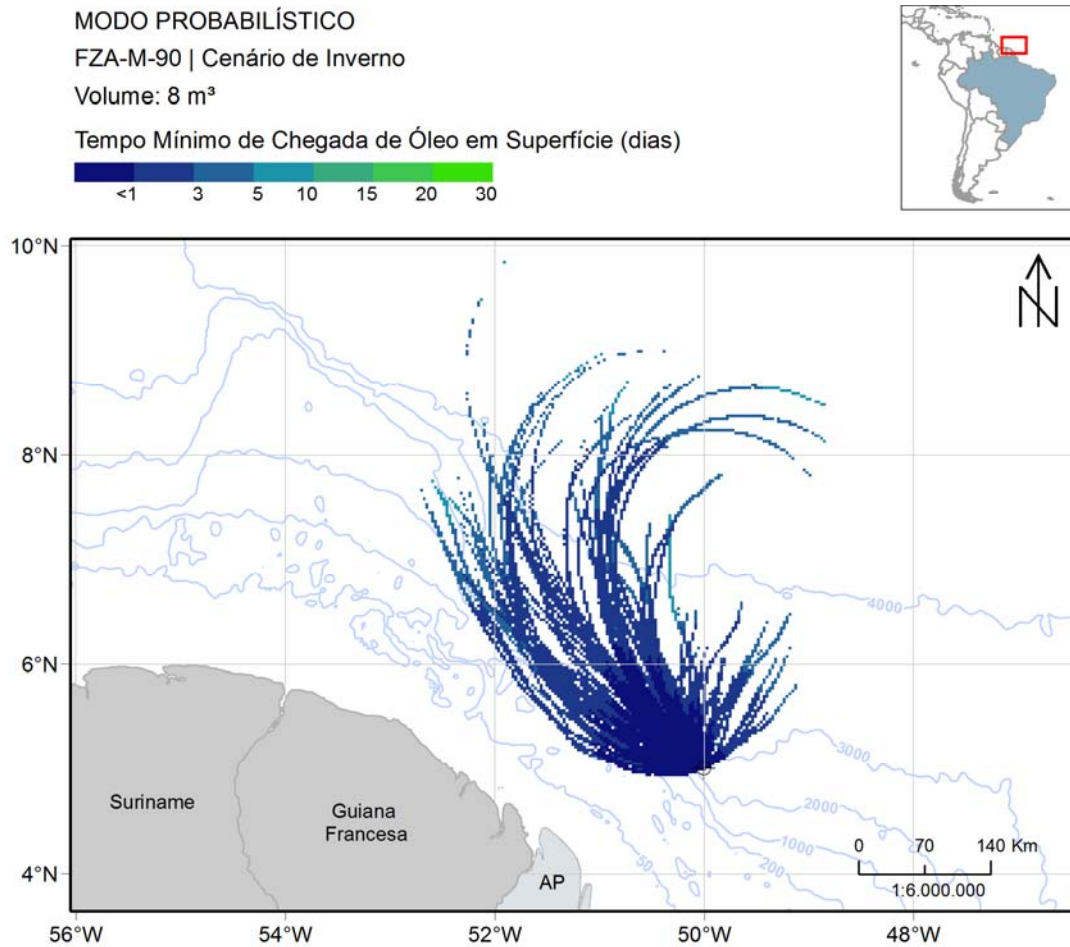


Figura 101: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m<sup>3</sup> no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias).

Observa-se que grande parte da área com probabilidade de presença de óleo pode ser alcançada dentro de 3 dias após início do vazamento, mas são observados tempos mínimos de chegada de até 10 dias.

A seguir, na Figura 102, são apresentados os percentuais de retirada de óleo por cada processo intempérico ao final das simulações. Assim como no cenário de verão, a retirada de óleo da superfície ocorreu principalmente através da evaporação (mediana de 58%), seguida pela dispersão na coluna d'água (mediana de 25%) e da degradação (14%).

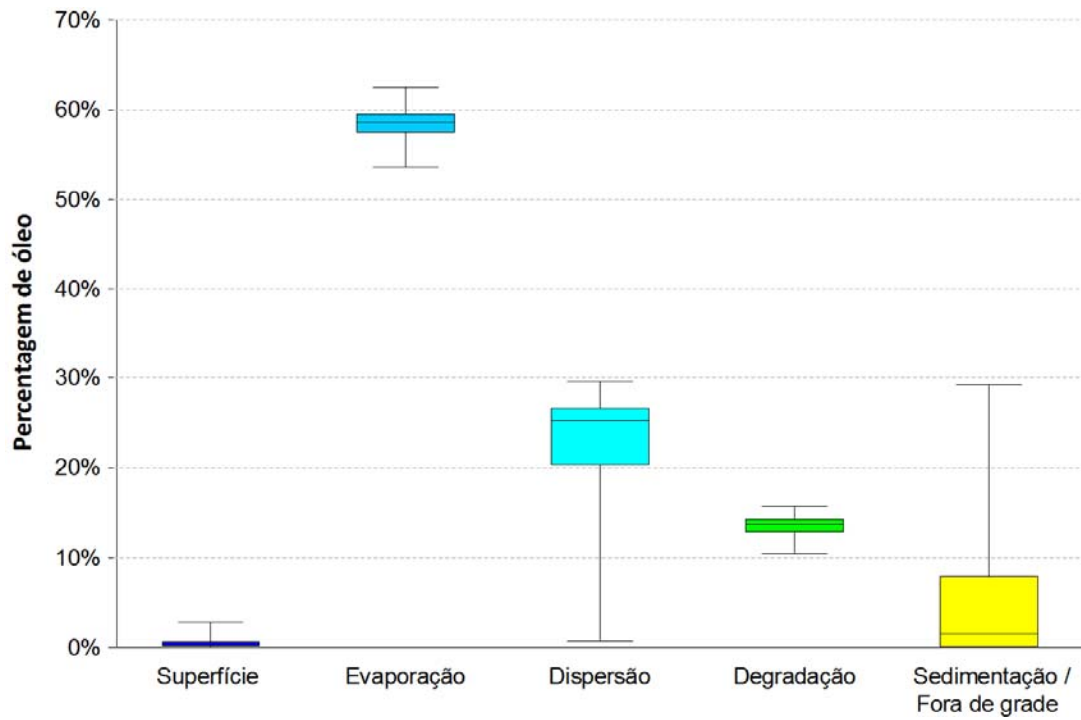


Figura 102: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 8 m³ no cenário de inverno a partir do bloco FZA-M-90.



### 3.2.1.2 Vazamento de 200 m<sup>3</sup>

#### 3.2.1.2.1 Verão

A seguir são apresentados os mapas de probabilidade de presença de óleo em superfície e na coluna d'água para o vazamento de médio porte (200 m<sup>3</sup>) no período de verão (Figura 103 e Figura 104, respectivamente). O mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície encontra-se na Figura 105.

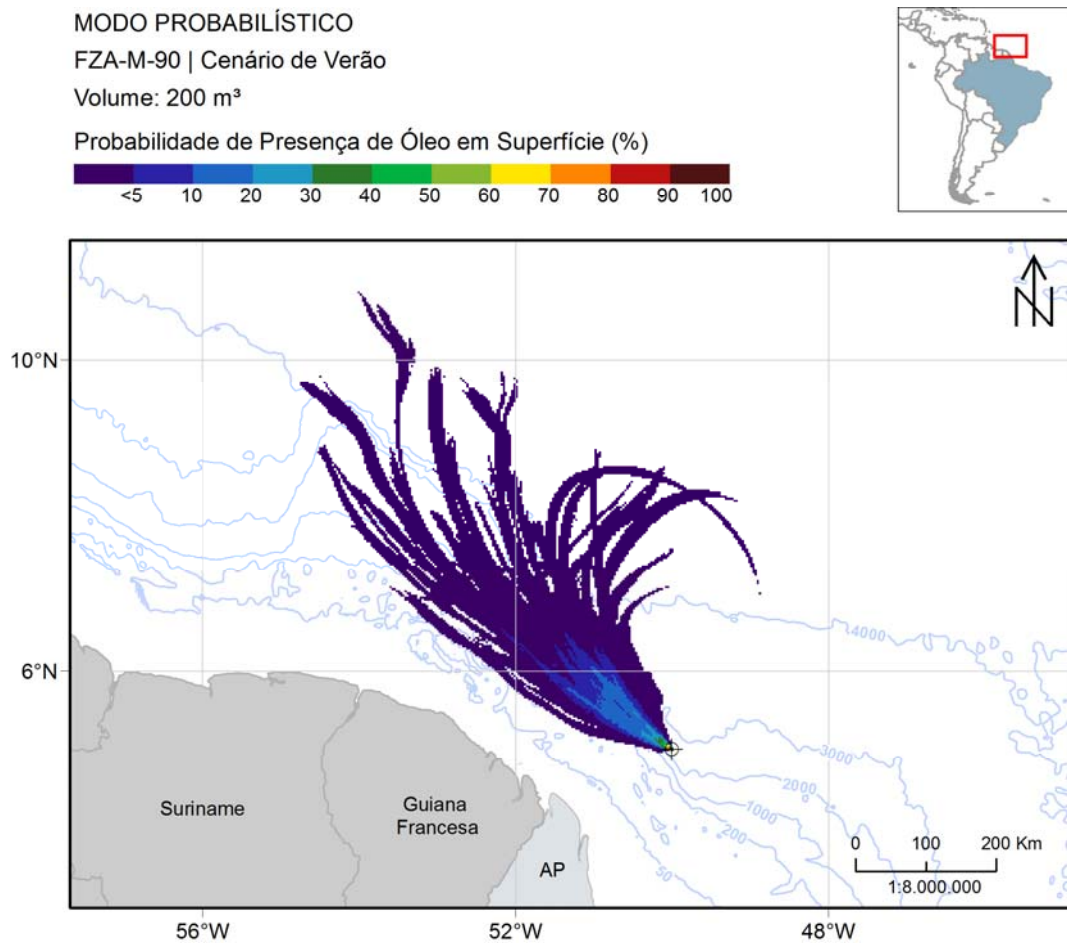


Figura 103: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m<sup>3</sup> no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias).

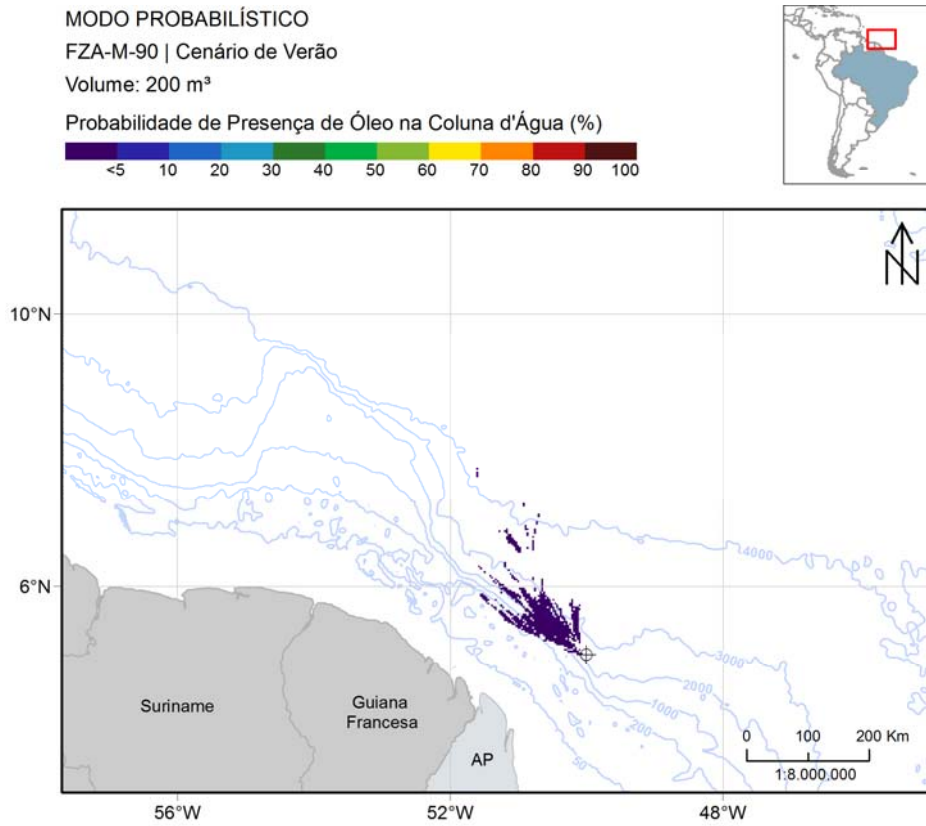


Figura 104: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 200 m<sup>3</sup> no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias).

Neste cenário o padrão é similar ao apresentado no vazamento de 8 m<sup>3</sup>, onde a maior parte da área de probabilidade de presença de óleo tem uma tendência de deriva na direção noroeste. Contudo, a área se estende até 790 km em relação ao ponto de início do vazamento. A maior proximidade da costa é de 89,7 km, referente à Guiana Francesa.

Na coluna d'água (considerando a integração de todas as profundidades), a área de probabilidade se estende até 350 km do ponto de vazamento, com probabilidades de no máximo 10%.

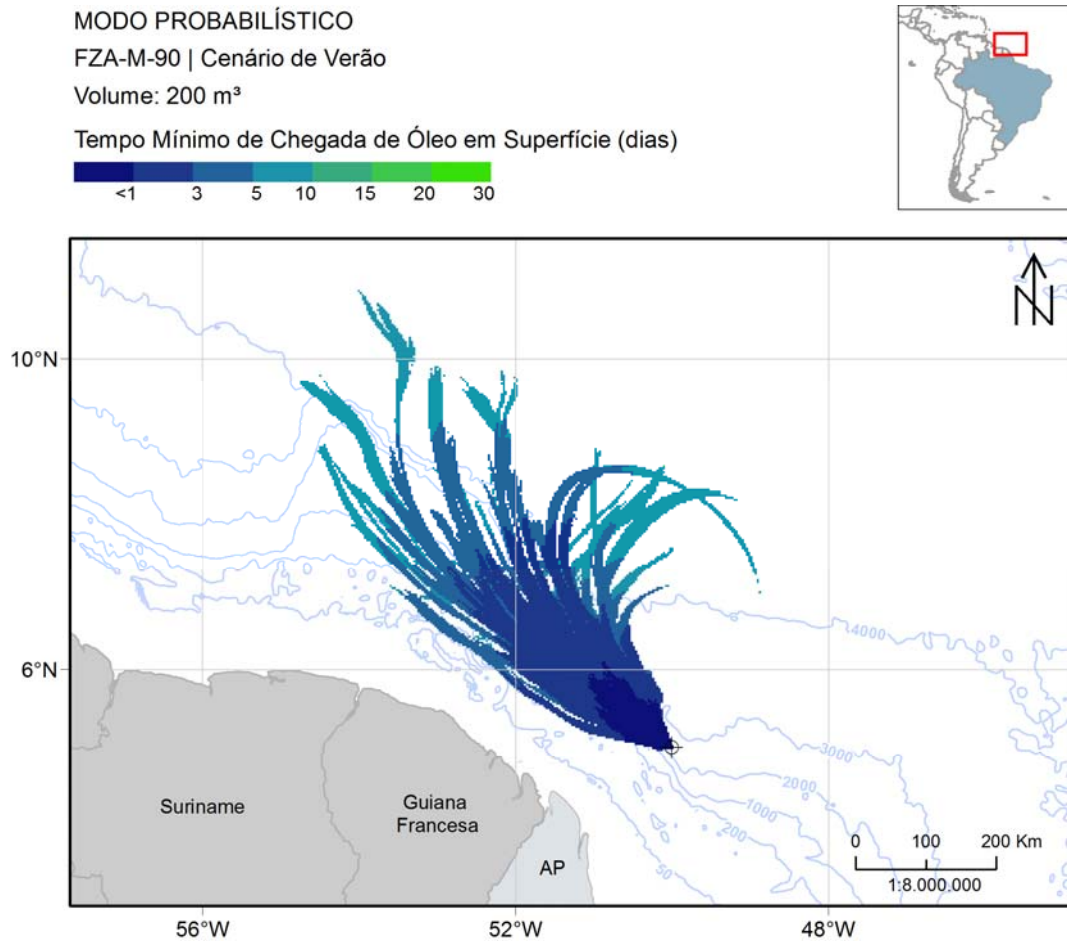


Figura 105: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 200 m<sup>3</sup> no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias).

Observa-se que até 1 dia após o início do vazamento, o óleo pode alcançar até 150 km de extensão e, em 3 dias, distâncias de até 400 km. As regiões mais distantes podem ser atingidas em até 10 dias. O ponto mais próximo da costa pode ocorrer em até 3 dias.

A seguir, na Figura 106, são apresentados os percentuais de retirada de óleo por cada processo intempérico ao final das simulações. A retirada de óleo da superfície ocorreu principalmente através da evaporação (mediana de 56%), seguida pela dispersão na coluna d'água (mediana de 25%) e degradação (17%).

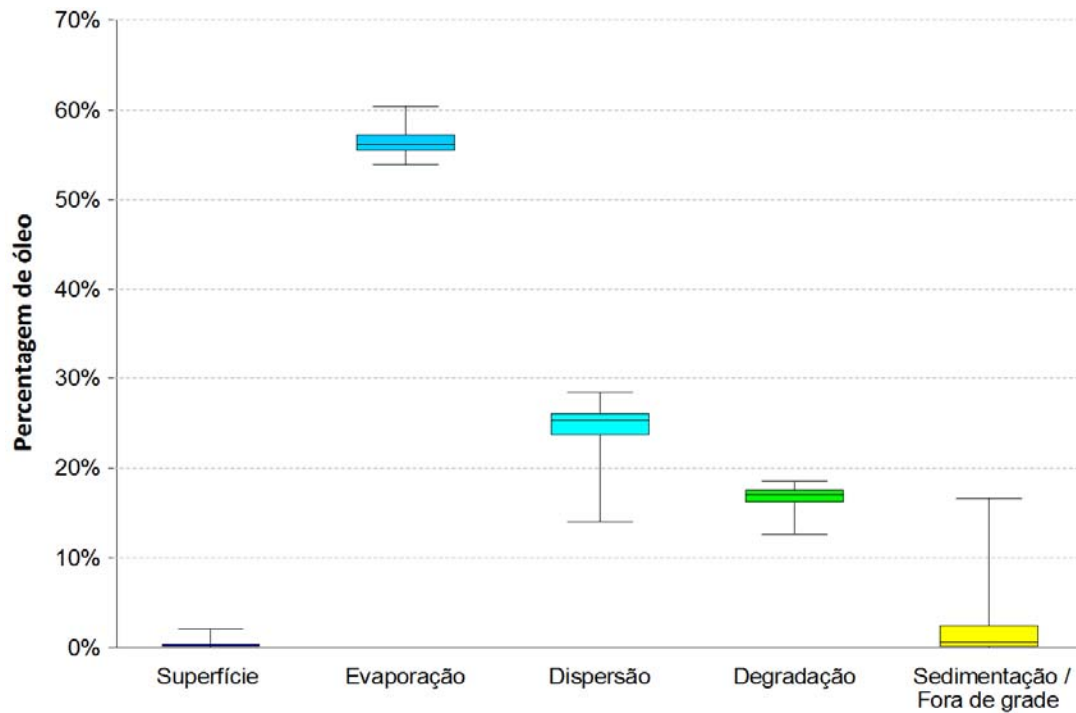


Figura 106: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 200 m<sup>3</sup> no cenário de verão a partir do bloco FZA-M-90.

### 3.2.1.2.2 Inverno

A seguir são apresentados os mapas de probabilidade de presença de óleo em superfície e na coluna d'água para o vazamento de médio porte (200 m<sup>3</sup>), no período de inverno, são apresentados na Figura 107 e na Figura 108, respectivamente. O mapa de tempo mínimo de chegada em superfície encontra-se na Figura 109.

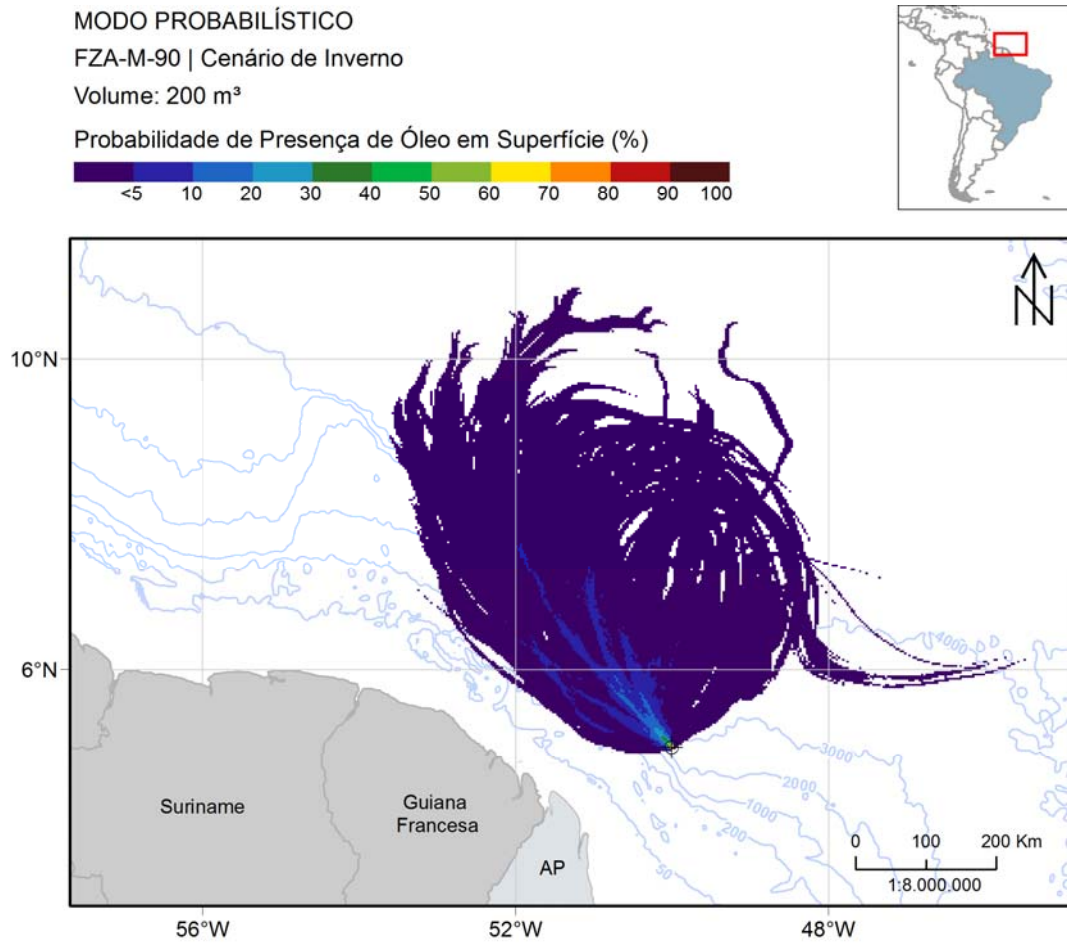


Figura 107: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m<sup>3</sup> no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias).

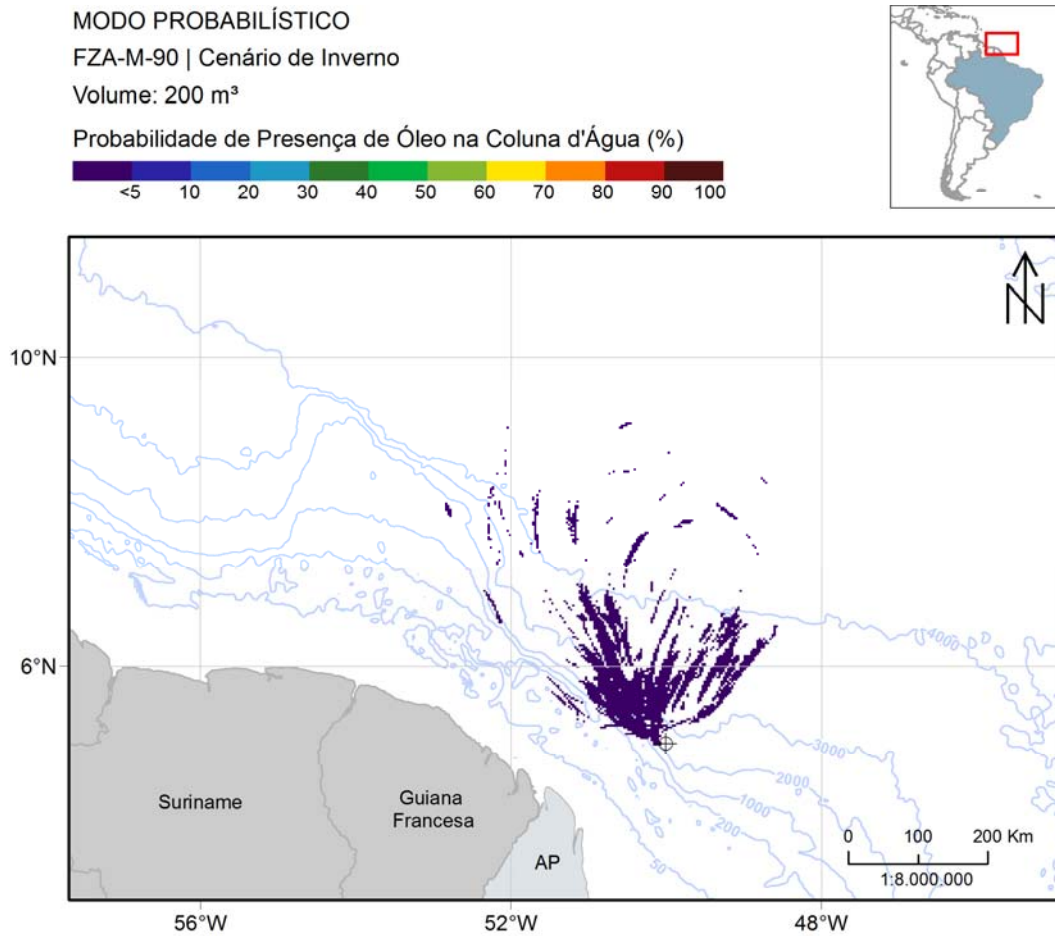


Figura 108: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 200 m<sup>3</sup> no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias).

No cenário de inverno de um vazamento de 200 m<sup>3</sup>, observa-se novamente a nítida influência do meandramento e da retroflexão da CNB, não havendo toque de óleo na costa. O óleo girou sobre a influência dessas feições e, com isso, parte retornou para região de vazamento e outra seguiu a Contra-Corrente Norte Equatorial (CCNE), se dirigindo para leste. A maior distância em relação ao ponto de vazamento foi de 670 km, sendo que a menor distância da costa foi de 84,9 km até a Guiana Francesa. Na coluna d'água, as probabilidades máximas foram de até 5%.

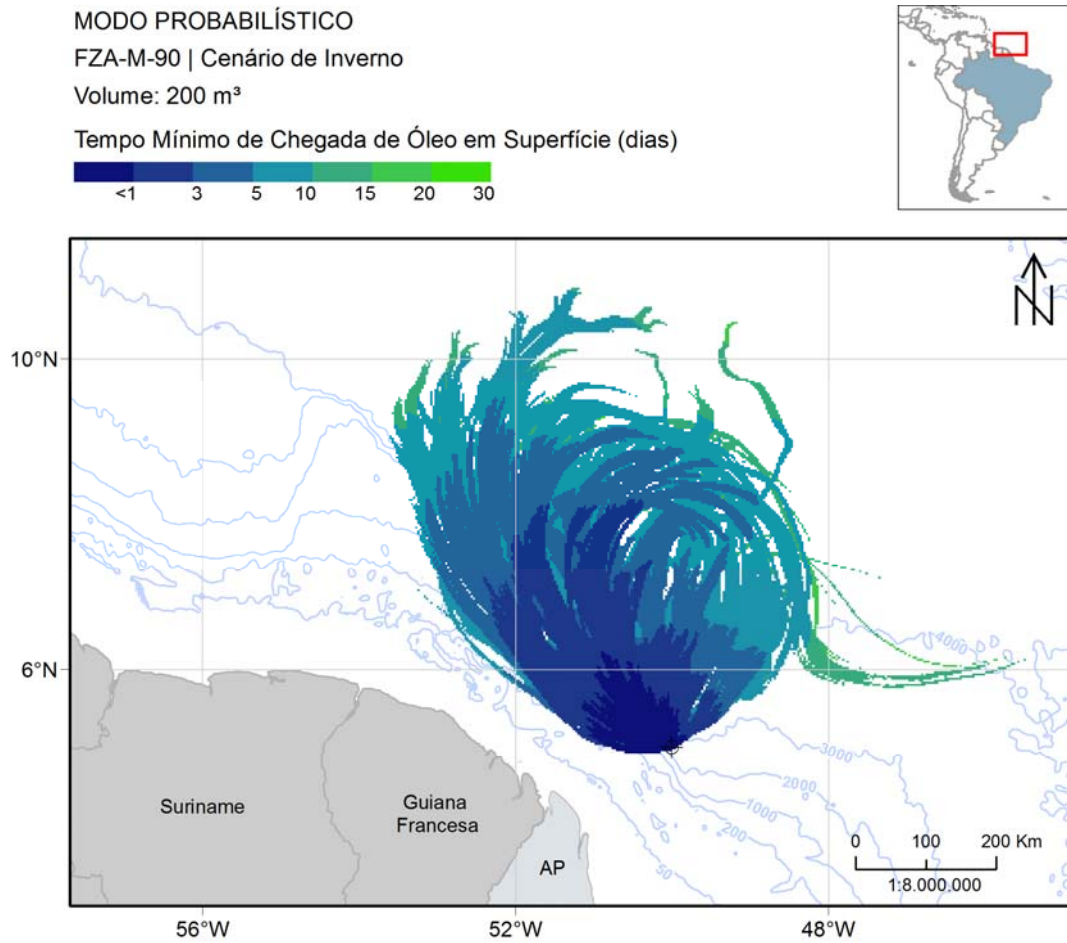


Figura 109: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para vazamento de 200 m<sup>3</sup>, no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 720 horas (30 dias).

Em até 1 dia após o vazamento, o óleo pode alcançar a distância de até 170 km. Os locais mais distantes do ponto de vazamento, a noroeste, podem ser atingidos pelo óleo em até 10 dias.

A seguir, na Figura 110, são apresentados os percentuais de retirada de massa de óleo por cada processo intempérico ao final das simulações. Observa-se que a retirada de óleo da superfície ocorreu principalmente através da evaporação (mediana de 59%), seguida pela dispersão na coluna d'água (mediana de 26%) e da degradação (mediana de 12%).

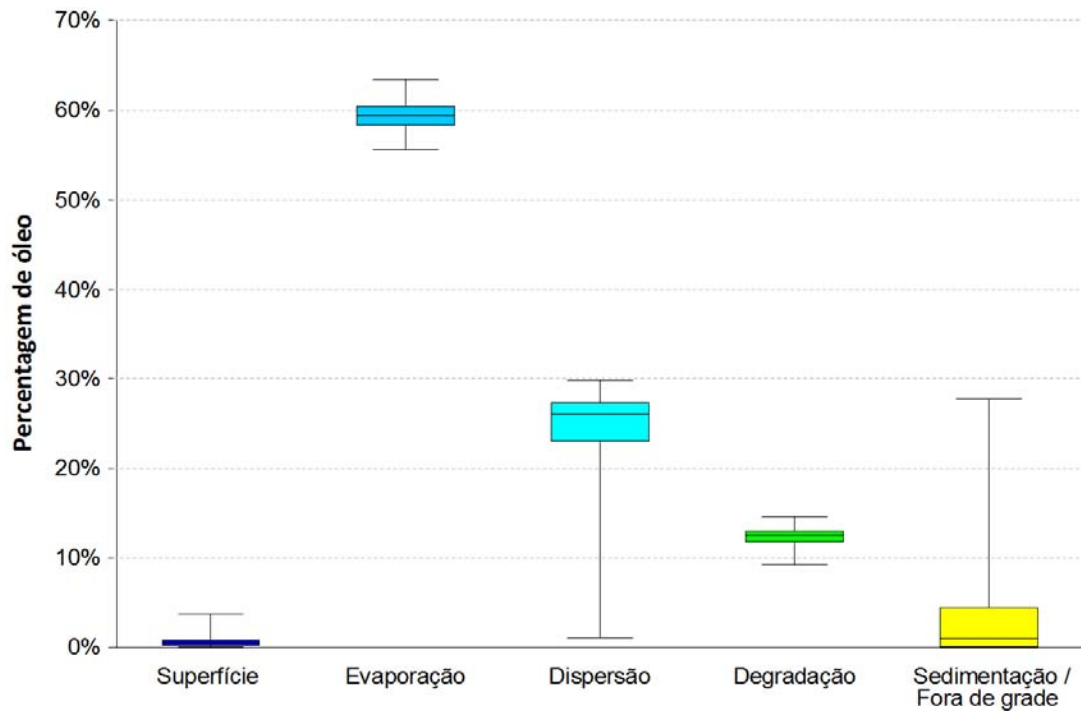


Figura 110: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 200 m<sup>3</sup> no cenário de inverno a partir do bloco FZA-M-90.



### 3.2.1.3 Vazamento de Pior Caso

#### 3.2.1.3.1 Verão

O mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para um evento de pior caso (46.742 m<sup>3</sup>), em período de verão, 60 dias após o início do vazamento, encontra-se na Figura 111. Na Figura 112, é apresentada a probabilidade máxima na coluna d'água e na Figura 113 e Figura 114 a probabilidade em seis profundidades diferentes. A probabilidade de presença de óleo no fundo é apresentada na Figura 115.

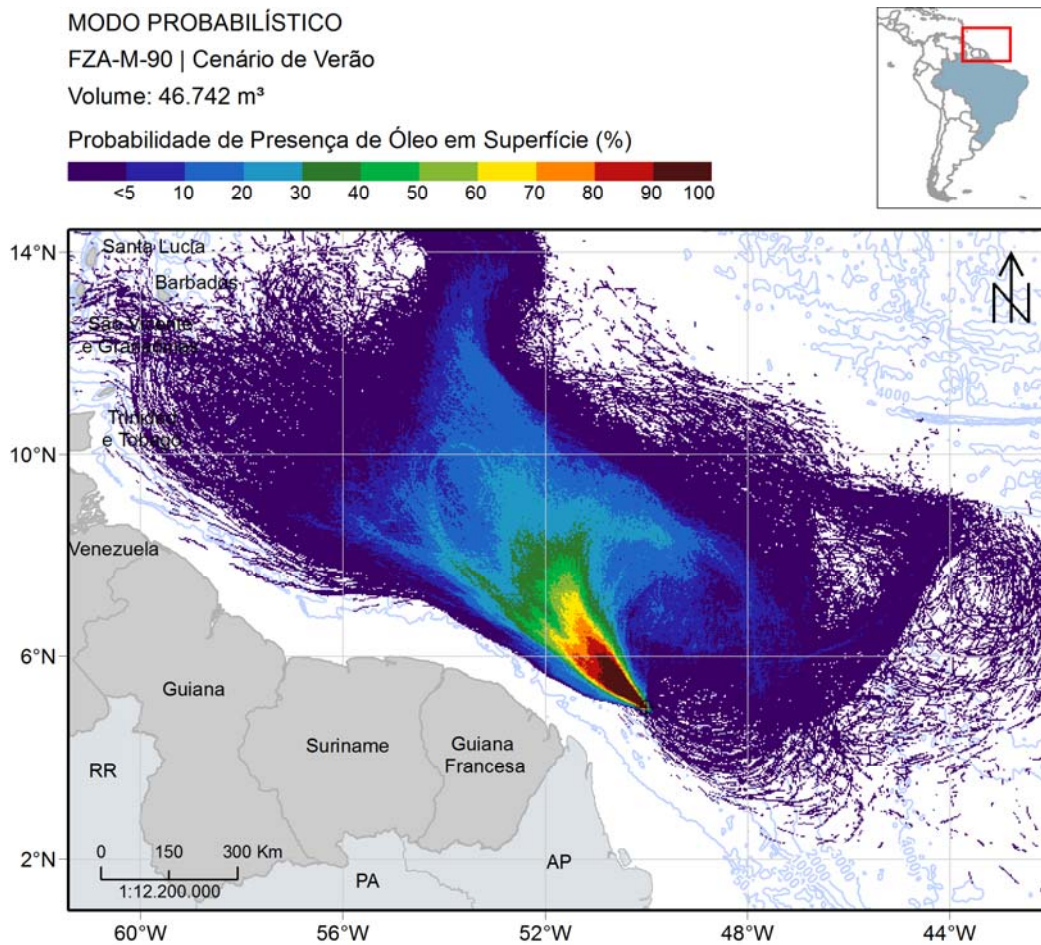


Figura 111: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias.

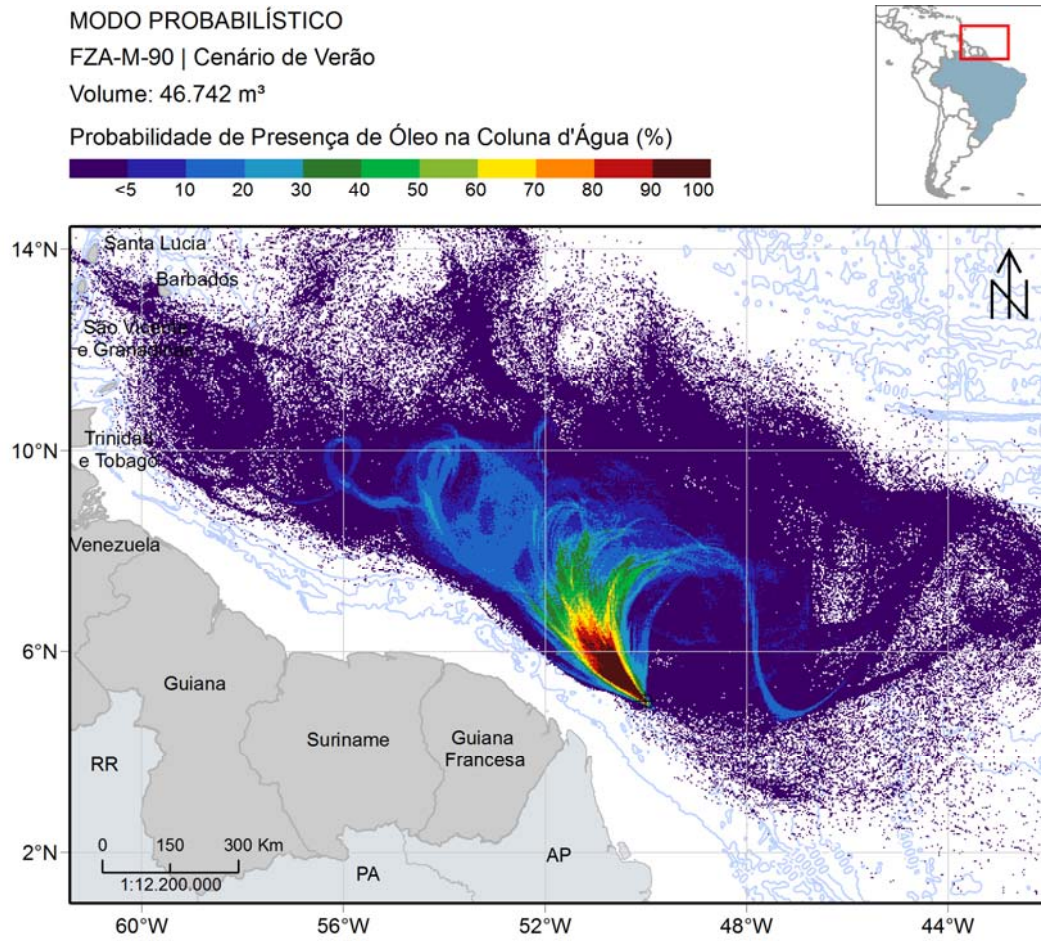


Figura 112: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias.

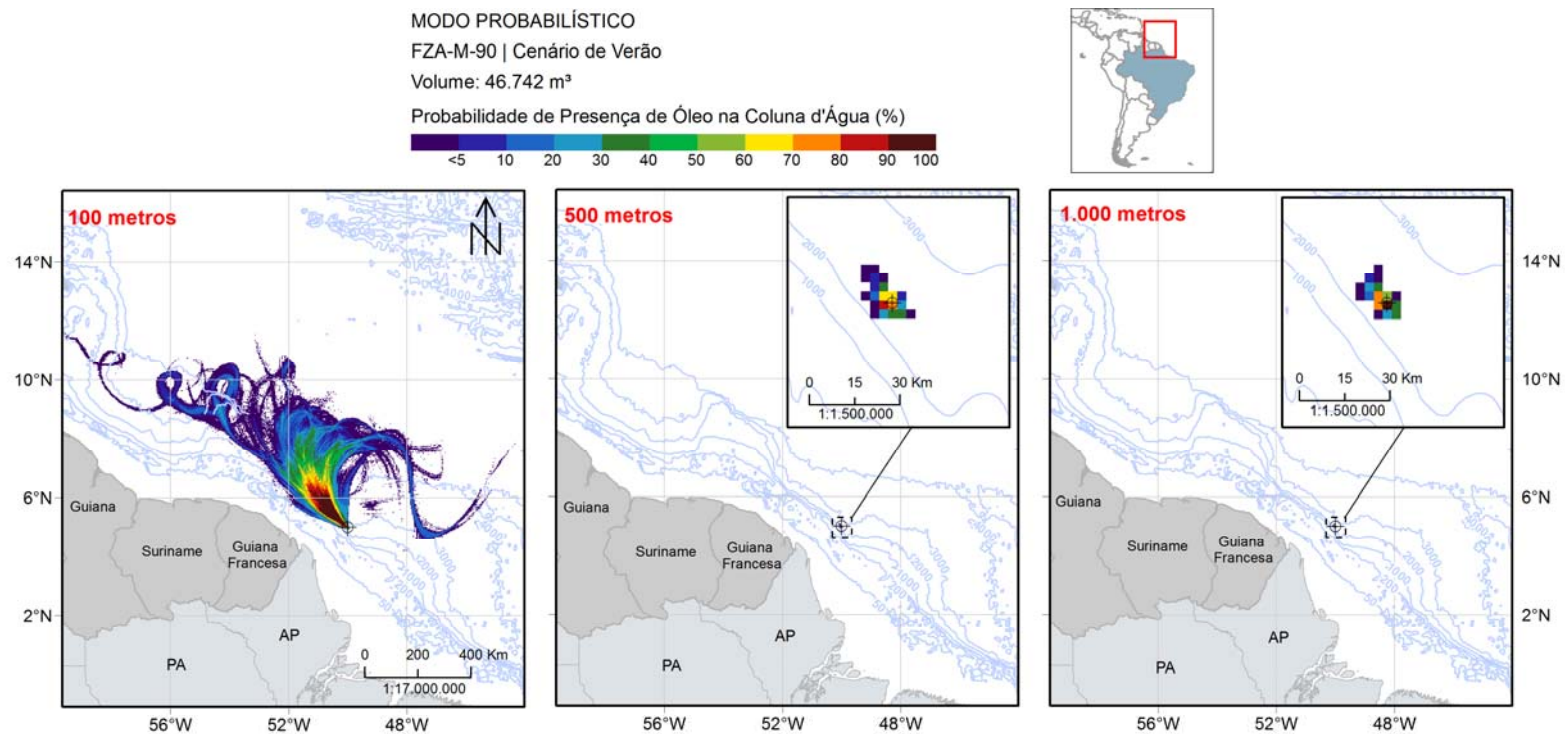


Figura 113: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três profundidades (100, 500 e 1.000 metros), para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias.

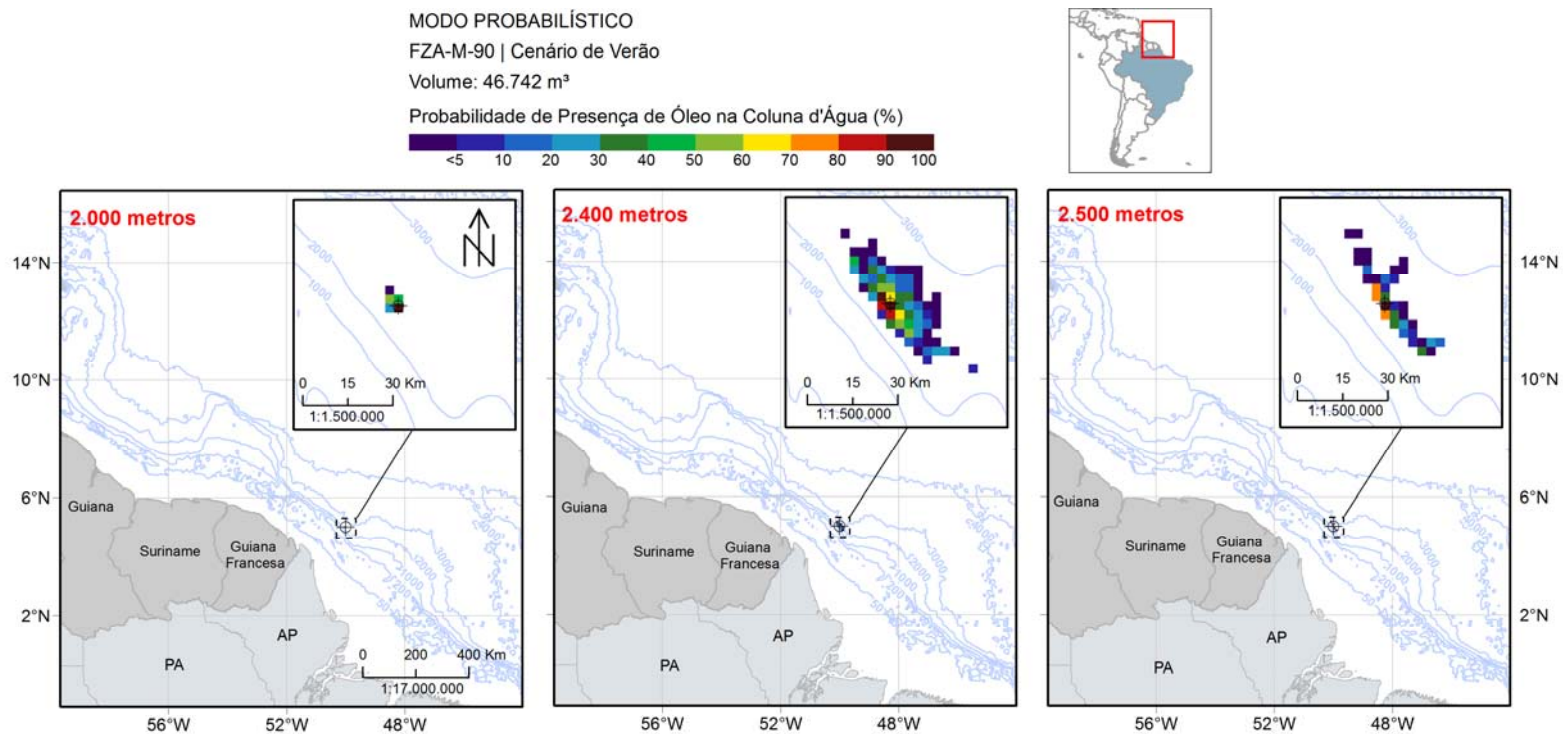


Figura 114: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três profundidades (2.000, 2.400 e 2.500 metros), para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias.

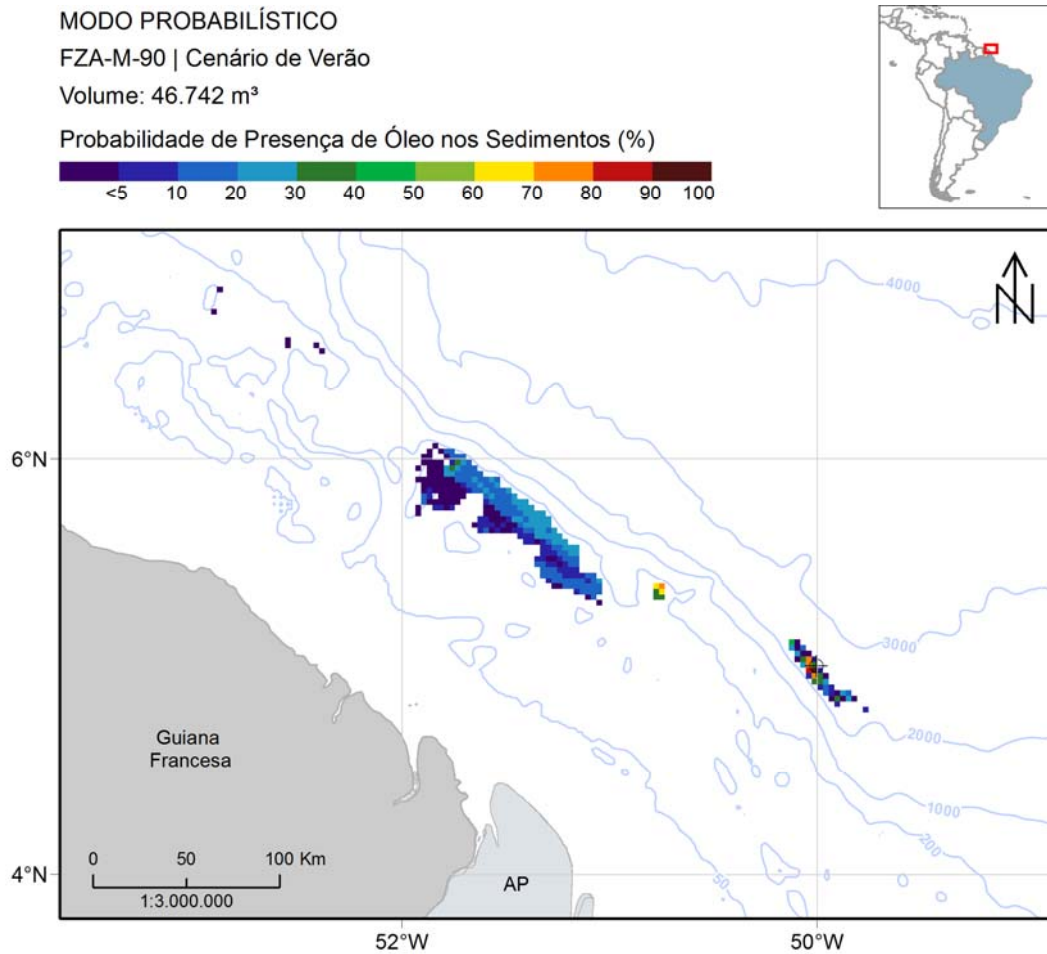


Figura 115: Mapa de probabilidade de presença de óleo no fundo marinho, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias.

Observa-se que o óleo derivou preferencialmente para noroeste do ponto de vazamento, influenciado principalmente pela CNB, que flui nessa direção. Entretanto, há também uma tendência do óleo deslocar-se para norte do ponto e, posteriormente, para leste devido à presença de meandros na região e estar próxima da retroflexão da CNB. Probabilidades abaixo de 5% são encontradas próximo à costa da São Vicente e Granadinas, Santa Lúcia e Barbados, porém sem toque de óleo acima do limiar (Tabela 19).

Os resultados de coluna d'água mostram a diminuição da área de probabilidade em direção ao fundo marinho. Entretanto, em 2.400 m de profundidade há o aumento da área de probabilidade, mostrando que parte do óleo pode ficar nessa profundidade num raio de até 30 km com concentração maior que 20 ppb.

Nos sedimentos, as maiores probabilidades ocorrem próximas ao ponto de vazamento, chegando até 100%. O restante da área de probabilidade de presença nos sedimentos apresenta em sua maior parte valores de no máximo 30%, principalmente a região frente a Guiana Francesa.

O mapa de tempo mínimo de chegada em superfície encontra-se na Figura 116.

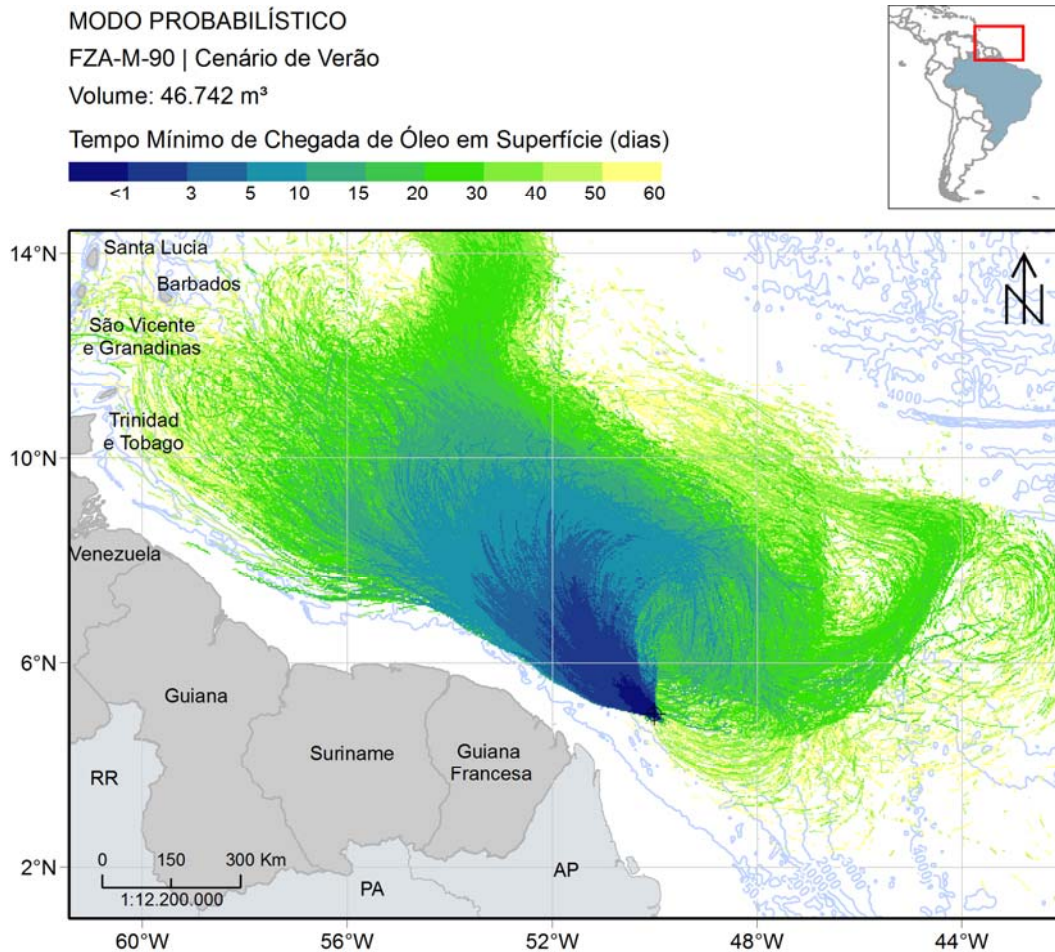


Figura 116: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para um vazamento de *blowout* contínuo de 30 dias no período de verão a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias.

Observa-se que até 1 dia após o início do vazamento, o óleo pode alcançar até 120 km de extensão e, em 3 dias, distâncias de até 350 km. Nas regiões da costa onde há maior aproximação da área de probabilidade, o óleo pode chegar somente após 42 dias (Tabela 19).

A seguir, na Figura 117, são apresentados os percentuais de retirada de massa de óleo por cada processo intempérico ao final das simulações. Diferentemente das outras simulações, que

tiveram vazamentos na superfície, grande parte do óleo se manteve na coluna d'água (mediana de 37%). Dos processos de retirada de óleo, a degradação apresentou a mediana de 29% e a evaporação de 28%. O óleo remanescente em superfície foi menor que 1,2% em todas as simulações e a sedimentação/fora da grade foi de até 6% na metade das simulações.

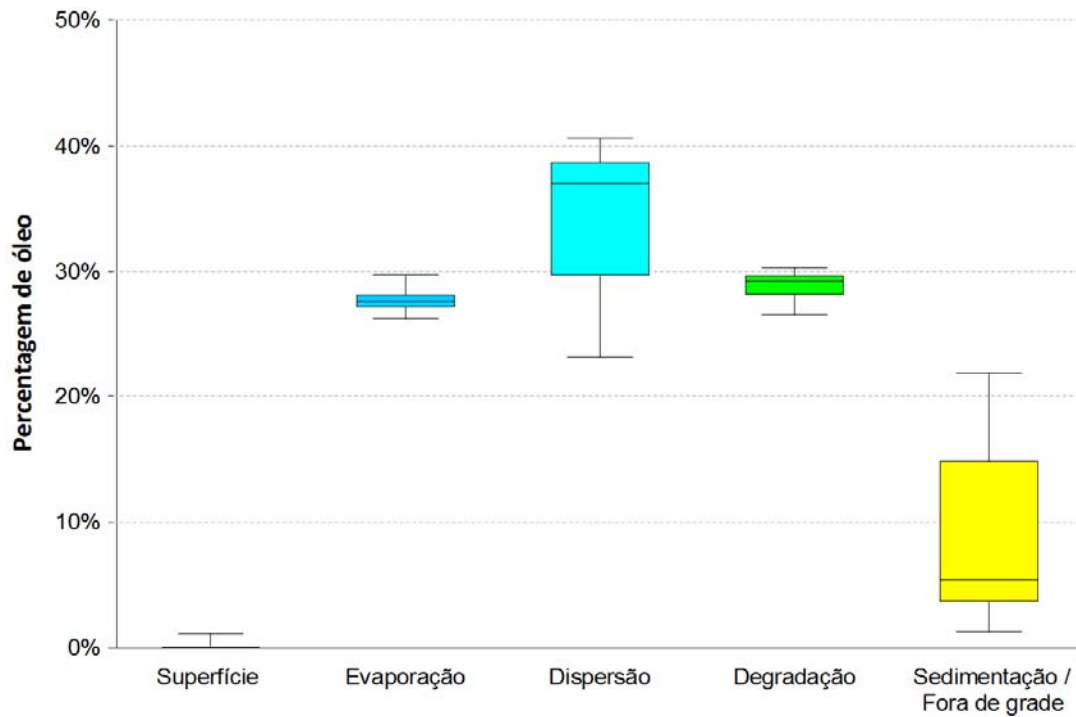


Figura 117: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de pior caso no cenário de verão a partir do bloco FZA-M-90.

### 3.2.1.3.2 Inverno

O mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para um evento de pior caso (46.742 m³), em período de inverno, 60 dias após o início do vazamento, encontra-se na Figura 118. Na Figura 119, é apresentada a probabilidade máxima na coluna d'água e na Figura 120 e Figura 121 a probabilidade em 6 profundidades diferentes. A probabilidade de presença de óleo no fundo é apresentada na Figura 122.

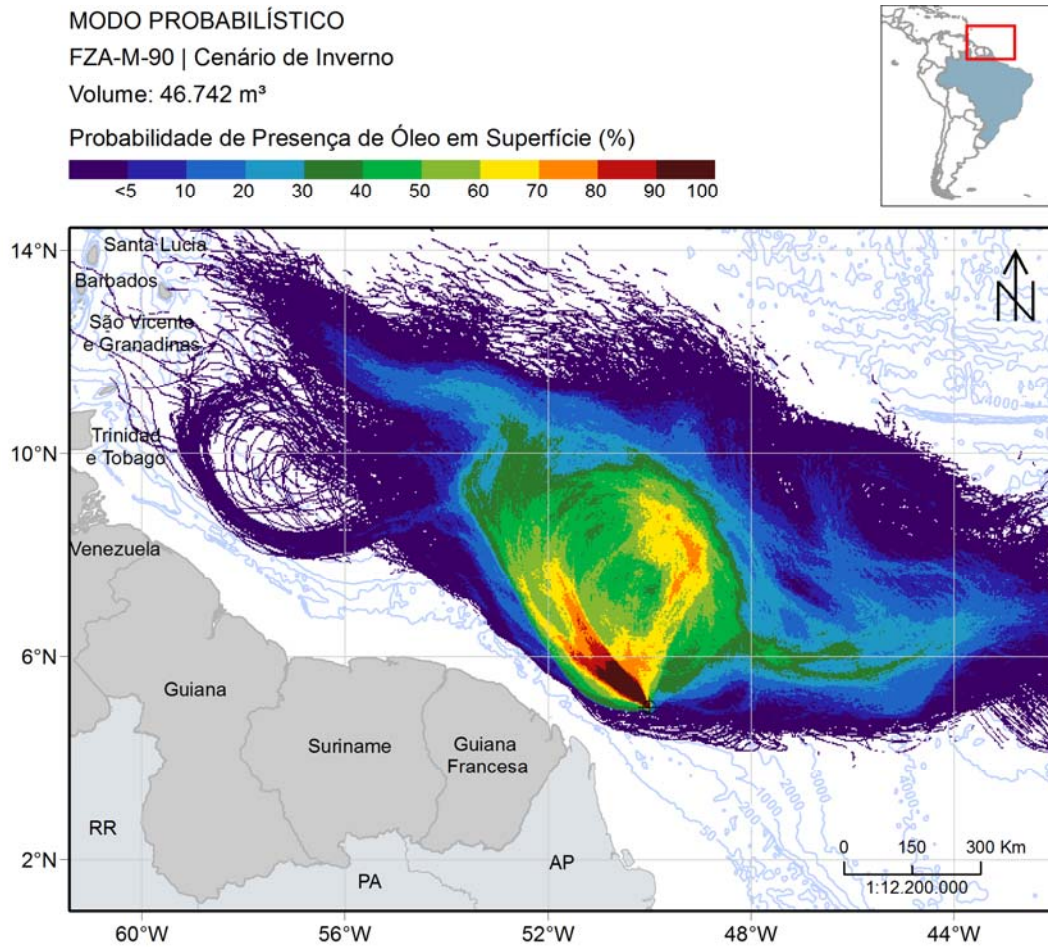


Figura 118: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias.



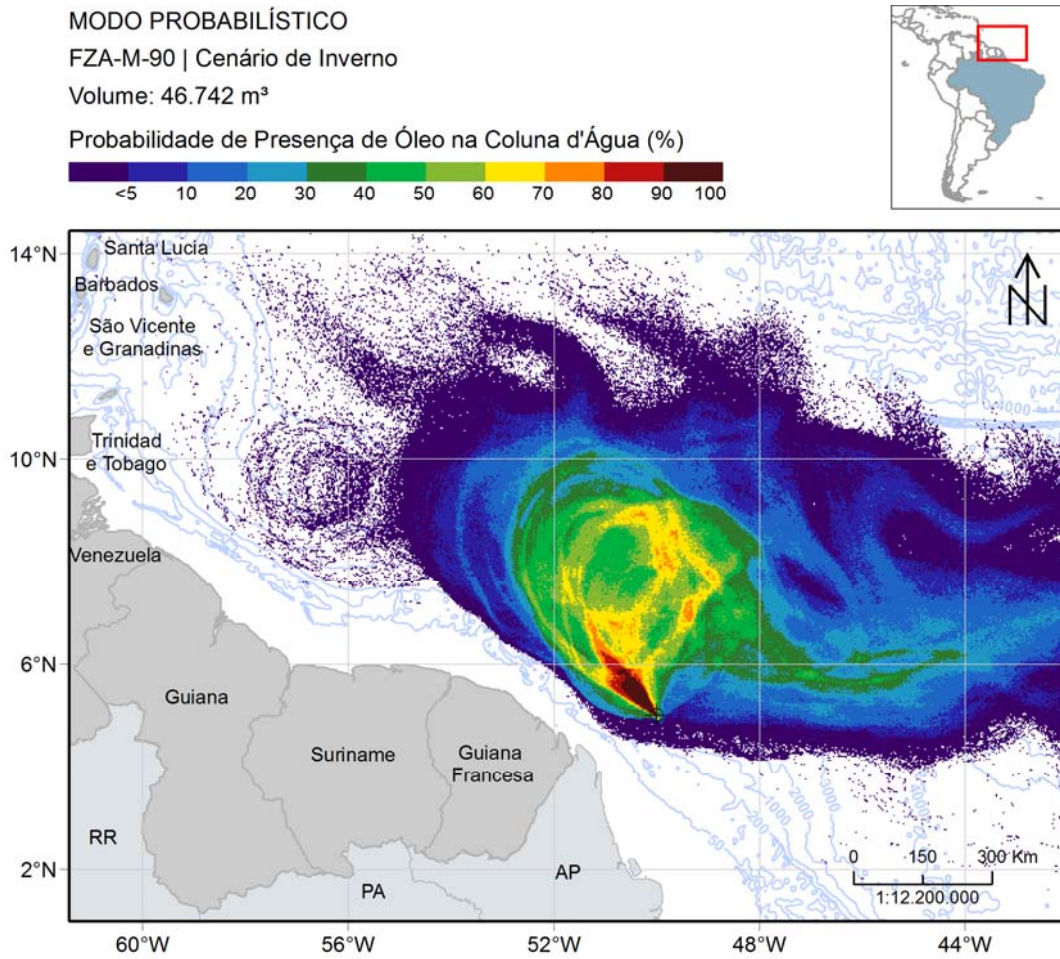


Figura 119: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias.

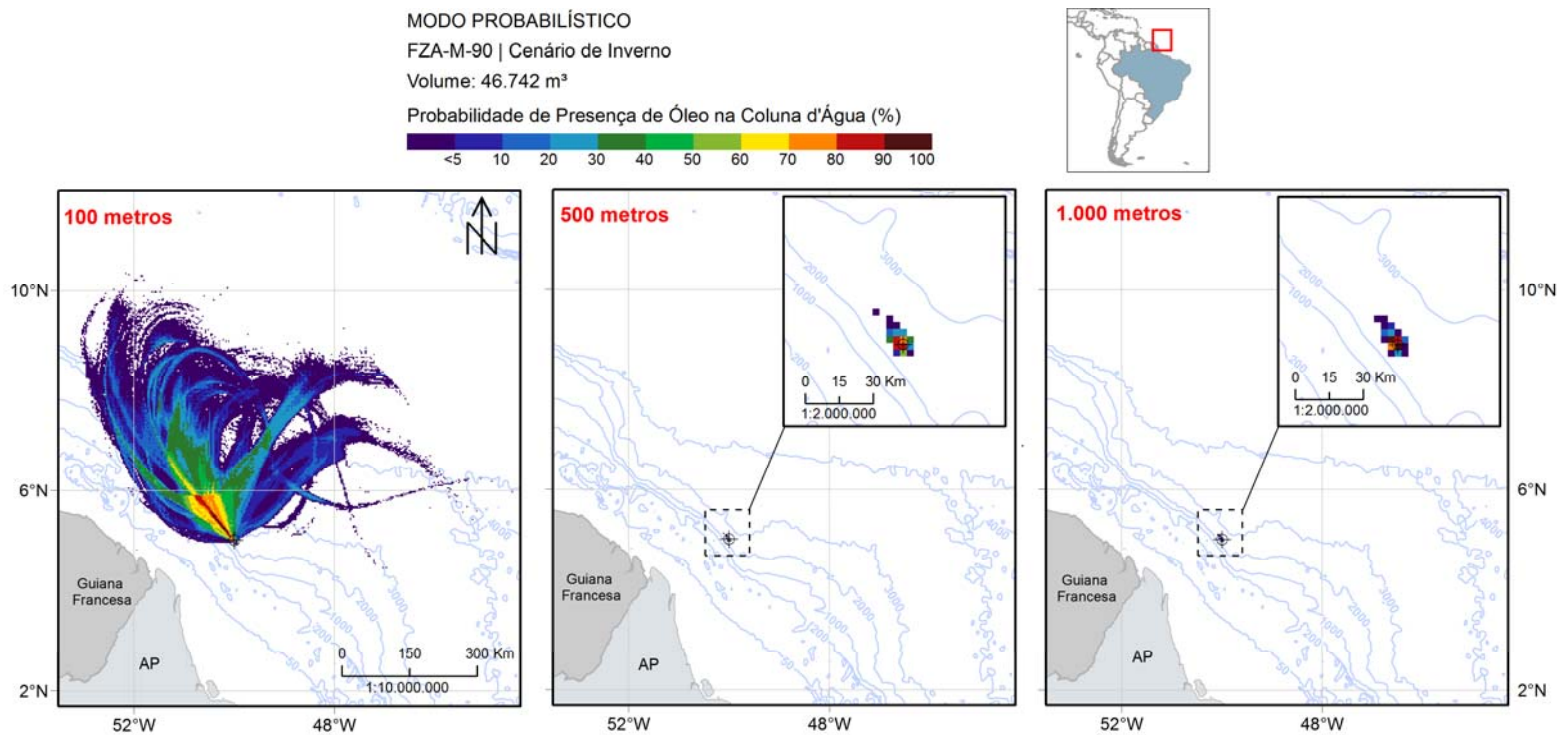


Figura 120: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três profundidades (100, 500 e 1.000 metros), para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias.

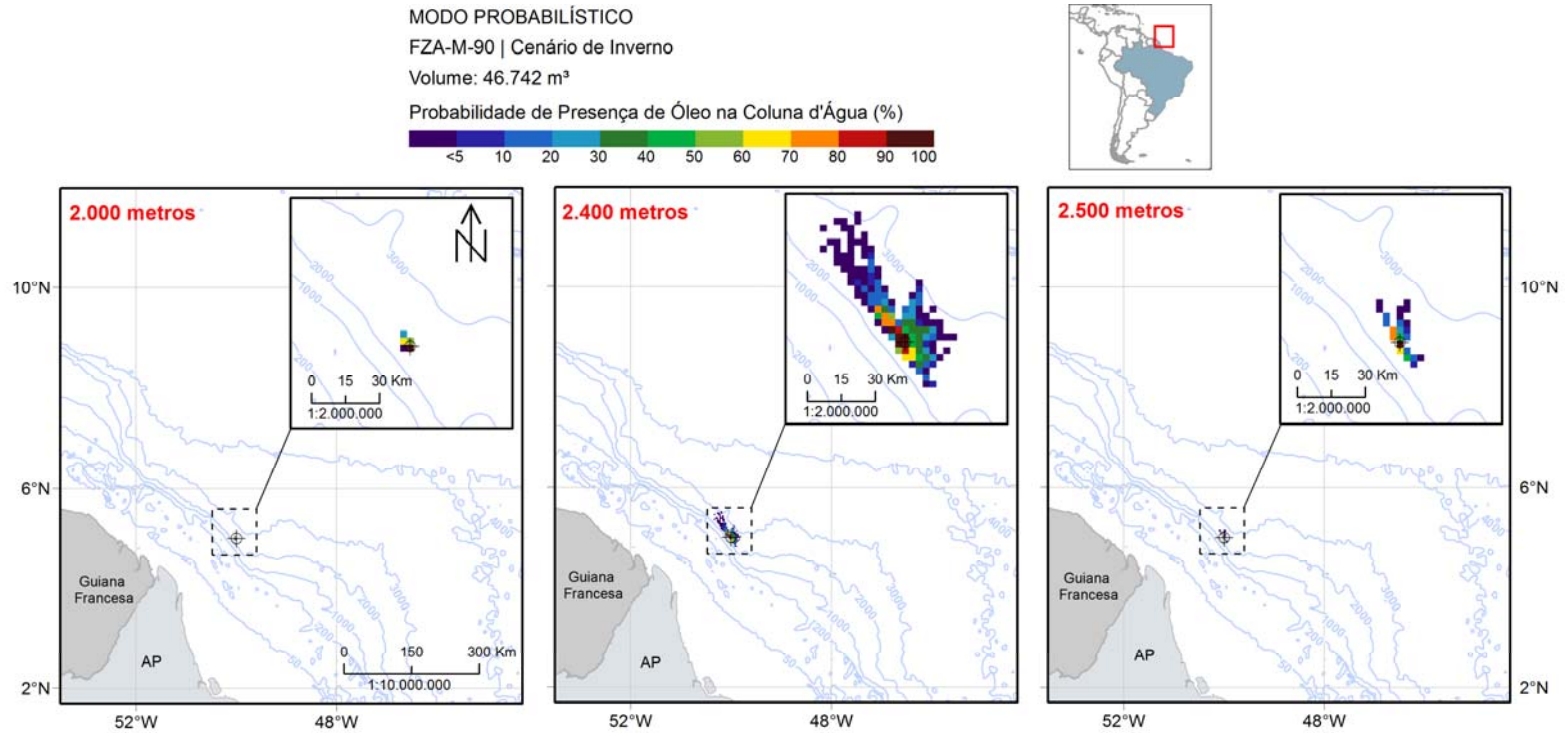


Figura 121: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três profundidades (2.000, 2.400 e 2.500 metros), para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias.

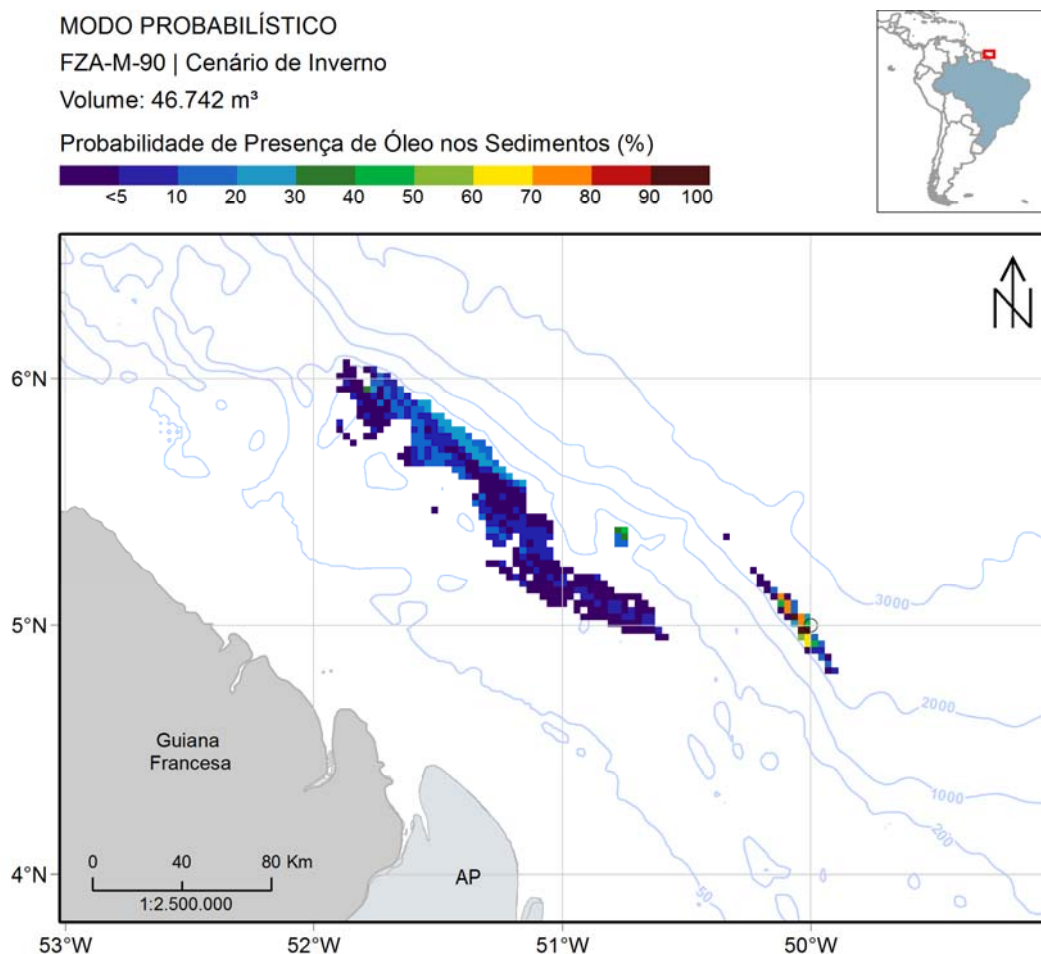


Figura 122: Mapa de probabilidade de presença de óleo no fundo marinho, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias.

Assim como nas simulações de vazamentos de menor volume, a retroflexão e os meandros da CNB se mostraram muito importantes na advecção do óleo durante o período de inverno. A área de probabilidade de presença de óleo em superfície estendeu-se para noroeste seguindo o fluxo da CNB. Entretanto, a maior parte girou junto a retroflexão e se dirigiu para leste, seguindo a CCNE, saindo do domínio de modelagem a leste.

Neste cenário também não houve presença de óleo na costa com valores superiores a limiar de detecção, porém há grande aproximação do resultado da superfície da costa de Barbados, com o valor de 0,3% de probabilidade.

Devido essa saída de óleo a leste do domínio de modelagem, é necessário demonstrar que o óleo além do domínio não apresentaria a tendência de alcançar à costa. De forma direta, ao

observar o padrão de circulação superficial da região descrito na literatura (Figura 63), observa-se que o óleo deslocaria em direção leste sob a influência da CCNE, uma vez que o principal mecanismo de deslocamento do óleo foram as correntes. Entretanto, para sustentar mais essa hipótese, buscou-se utilizar novamente os dados dos derivadores do GDP para analisar se houve ocorrência de algum derivador na costa.

Primeiramente, foram considerados todos os derivadores presentes no domínio de  $4,0^{\circ}$  S a  $14,5^{\circ}$  N, e  $30,0^{\circ}$  W a  $58,0^{\circ}$  W entre os anos de 1979 e 2013. Em seguida, foram utilizados os derivadores cuja trajetória passou a uma margem de  $1^{\circ}$  do ponto de vazamento de óleo e que possuam tempo de vida superior a 20 dias. Com esses critérios, chegou-se a um total de 84 derivadores (Figura 123).

Ao se comparar a Figura 118 e Figura 123, observa-se que as trajetórias dos derivadores lagrangianos assemelham-se a área de probabilidade de presença de óleo, ratificando que a forte intensidade de correntes presentes na região é determinante no transporte do óleo. Além disso, ressalta-se que os derivadores que seguiram para leste (retroflexão) do domínio permaneceram nessa direção e não houve deslocamentos em direção à costa, mesmo 60 dias após a passagem destes pela região do bloco.

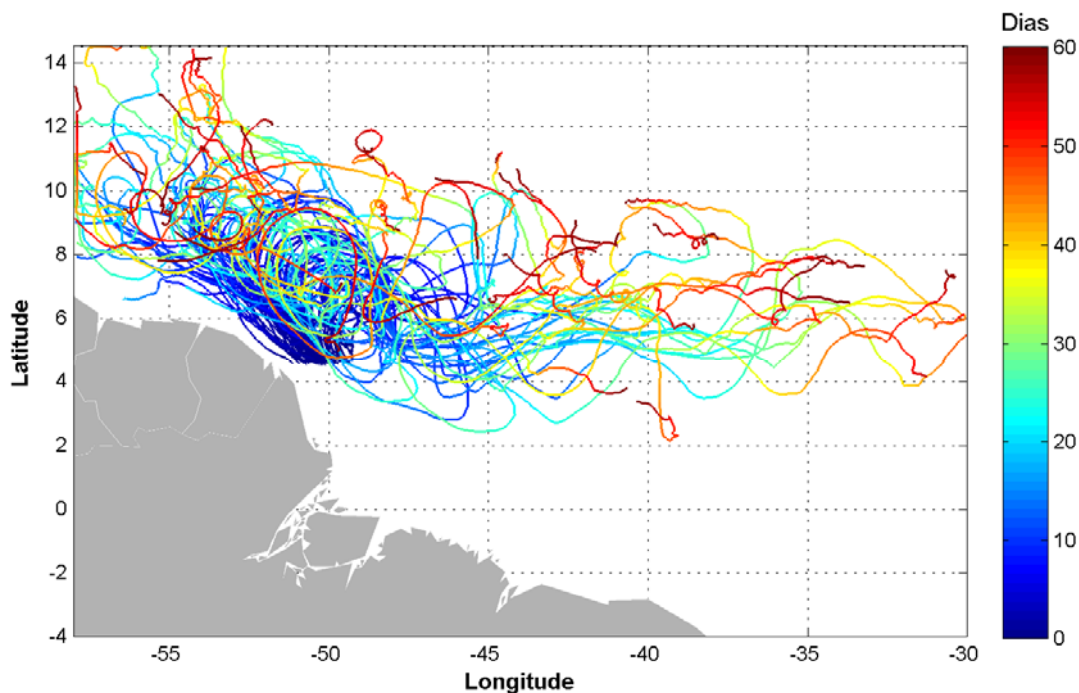


Figura 123: Trajetórias dos derivadores do GDP (84 derivadores) a partir da vizinhança do ponto de vazamento. A escala de cor está relacionada à duração da trajetória.

Os resultados de coluna d'água mostram, assim como no cenário de verão, a diminuição da área de probabilidade com o aumento da profundidade. Porém é visto que em 2.400 m a área de probabilidade abarca uma região de até 60 km do ponto de vazamento. Isto mostra que há probabilidade do óleo deslocar-se nessa profundidade com uma concentração maior que 20 ppb, principalmente na direção noroeste.

Neste cenário a área de probabilidade foi maior quando comparada com o verão, principalmente frente a Guiana Francesa. Entretanto o padrão dos valores de probabilidade se manteve similar ao ocorrido no verão, com as maiores probabilidades ocorrendo próximas ao ponto de vazamento e o restante com valores de até 30%.

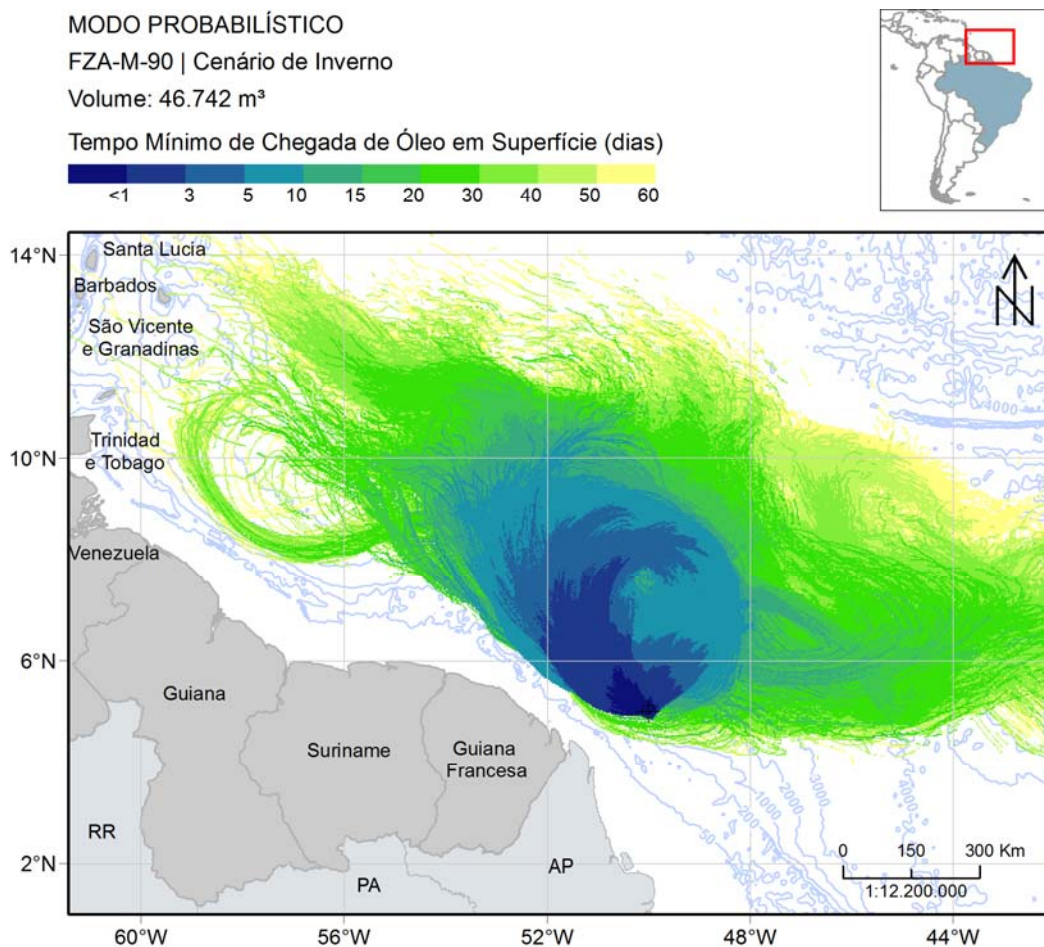


Figura 124: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno a partir do bloco FZA-M-90. Simulação de 60 dias

Regiões mais próximas ao ponto de vazamento, em um raio de 300 km e se estendendo até a latitude de 8° N, podem ser atingidas em 3 dias. Nas proximidades de Barbados, o óleo somente chega entre 40-50 dias (Tabela 19).

A seguir, na Figura 125, são apresentados os percentuais de retirada de óleo por cada processo intempérico ao final das simulações. Diferente do cenário de verão, a evaporação apresentou a maior mediana dentre todos os processos, 30%, seguido pela dispersão e a degradação, ambos com 27%. O óleo remanescente em superfície foi menor que 2% em todas as simulações e a sedimentação/fora da grade foi de até 16% na metade das simulações.

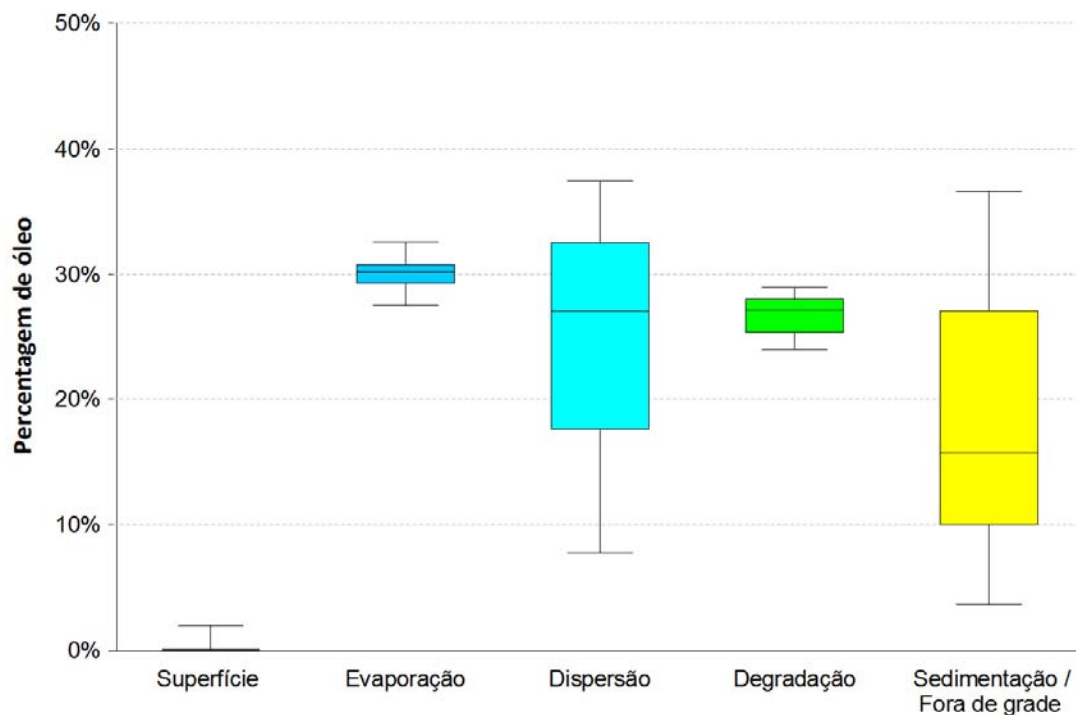


Figura 125: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de pior caso no cenário de inverno a partir do bloco FZA-M-90.

A seguir, na Tabela 19, são apresentados os valores de massa máxima na costa, probabilidade de presença de óleo e tempo mínimo de chegada de óleo em cada município com possibilidade de ser atingido pelo óleo em um derrame de 46.742 m<sup>3</sup>, além da extensão de toque em cada um deles.

Tabela 19: Massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas localidades com possibilidade de serem alcançados em um evento derrame de grande volume (46.742 m<sup>3</sup>) a partir do bloco FZA-M-90, nos cenários de verão e inverno.

PAÍS	Massa Máxima por célula (t)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo (dias)	
	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
Santa Lúcia	**	-	0,3*	-	50,79*	-
São Vicente e Granadinas	**	-	0,3*	-	51,50*	-
Barbados	**	**	0,7*	0,3*	42,67*	48,25*

\* Valores retirados dos resultados em superfície para países que não apresentaram massa acumulada na costa acima do limiar monitorado. Resultados a uma distância de menos de 3 km (um ponto de grade) da costa.

\*\* Como os valores apresentados são da superfície, não são apresentados valores de massa acumulada na costa.



### 3.2.2 Resultados Determinísticos

Com base nos resultados obtidos nas simulações probabilísticas foi identificada a condição crítica para ocorrência de um vazamento de 46.742 m<sup>3</sup> para o bloco FZA-M-90.

Para o bloco FZA-M-90 não se verificou a chegada de óleo na costa. Dessa forma, foi selecionada a simulação determinística em que mais se aproximava da costa e em menor tempo. Na Tabela 20 são apresentadas as informações dessa condição crítica selecionada.

Tabela 20: Informações da simulação determinística crítica considerada para um evento derrame de grande volume (46.742 m<sup>3</sup>) a partir do bloco FZA-M-90.

Cenário	Data da simulação (GMT)	Tempo de toque na costa	Primeiro município de toque	Massa final de óleo na costa
Menor tempo e maior proximidade da costa	06/02/2013 às 4h	-	-	-

#### 3.2.2.1.1 Menor tempo e maior proximidade da costa

A seguir são apresentadas informações relacionadas aos ventos e correntes do período simulado que se estendeu de 06/02/2013 às 4h até 07/04/2013 às 4h. Os valores estão relacionados ao ponto de grade mais próximo do local do vazamento.

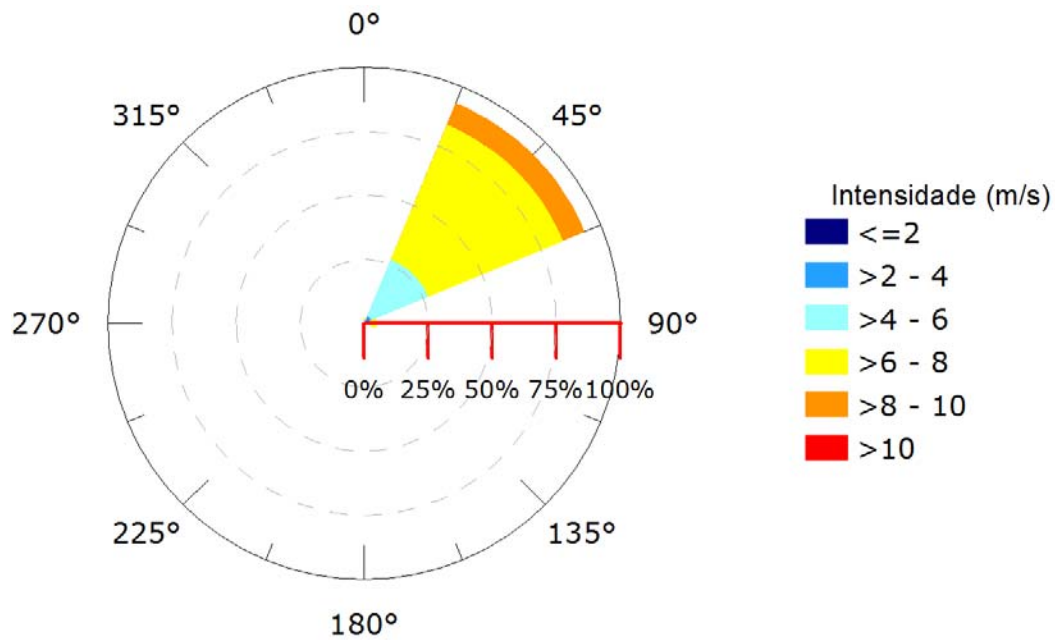


Figura 126: Rosa dos ventos para o período de simulação da situação de menor tempo de toque na costa.

Tabela 21: Ocorrência conjunta entre direção e intensidade dos ventos para o ponto mais próximo do local do vazamento para o período da condição de menor tempo de toque na costa.

Direção -> Intensidade (m/s)	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Freq, (%)
0-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2-4	-	7	1	-	-	-	-	-	3,3
4-6	3	58	6	-	-	-	-	-	27,9
6-8	1	137	5	-	-	-	-	-	59,6
8-10	-	22	-	-	-	-	-	-	9,2
>10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Freq, (%)	1,7	93,3	5,0	-	-	-	-	-	

Tabela 22: Estatística do vento para o período da condição de menor tempo de toque na costa.

Direção média (°)	Direção de maiores intensidades (°)	Vel. Média (m/s)	Vel. Mín (m/s)	Vel máx. (m/s)	Desvio padrão (m/s)
49	58	6,49	2,73	9,57	1,21

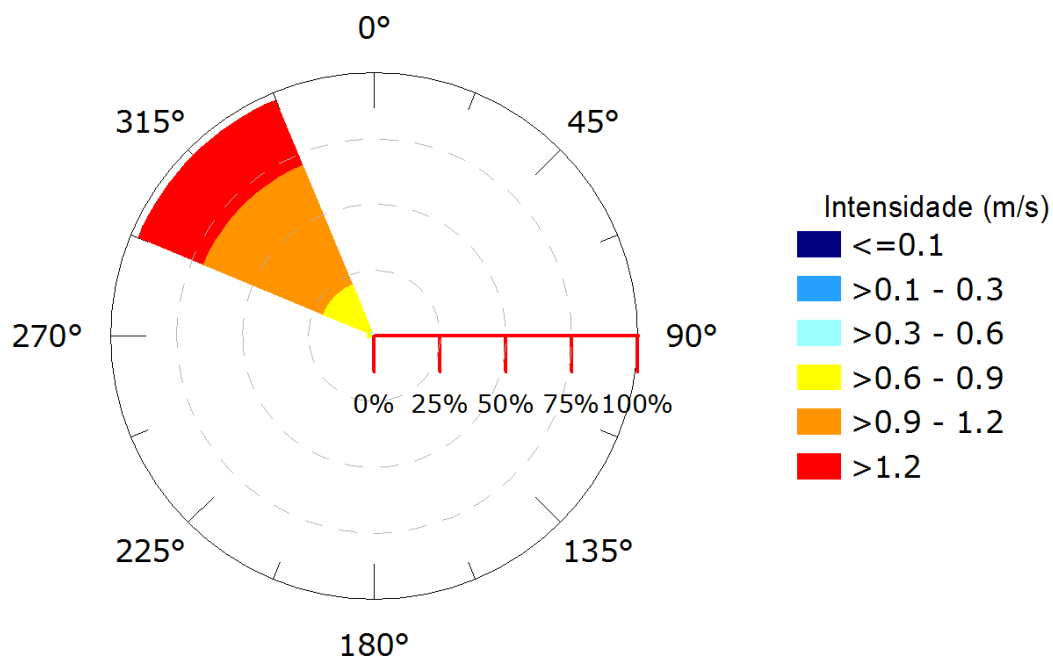


Figura 127: Rosa de corrente para o período de simulação da situação de menor tempo de toque na costa.

Tabela 23: Ocorrência conjunta entre direção e intensidade de corrente para o ponto mais próximo do local do vazamento para o período da condição de menor tempo de toque na costa.

Direção ->									Freq, (%)
Intensidade (m/s)	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
<0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,1 - 0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,3 - 0,6	-	-	-	-	-	-	2	12	1,9
0,6 - 0,9	-	-	-	-	-	-	17	141	21,9
0,9 - 1,2	-	-	-	-	-	-	-	355	49,2
>1,2	-	-	-	-	-	-	-	194	26,9
Freq, (%)	-	-	-	-	-	-	2,6	97,4	

Tabela 24: Estatística de corrente para o período da condição de menor tempo de toque na costa.

Direção média (°)	Direção de maiores intensidades (°)	Vel. Média (m/s)	Vel. Mín (m/s)	Vel máx. (m/s)	Desvio padrão (m/s)
314	318	1,06	0,52	1,61	0,24

Pelos dados de vento (Figura 126, Tabela 21 e Tabela 22) no período da simulação ocorre a predominância de ventos de nordeste (~93%) e intensidades entre 6 e 8 m/s (~60%). Os dados de correntes (Figura 127, Tabela 23 e Tabela 24) mostram predominância da direção noroeste (97%) com intensidades entre 0,9 e 1,2 m/s (49% do total).

A seguir, da Figura 128 à Figura 136, é apresentada a deriva do óleo em superfície e na coluna d'água, além da área varrida (em amarelo claro nas figuras) pela mancha durante toda a simulação. O resultado na coluna d'água representa a integração dos valores de concentração de óleo ao longo da longitude, isto é, é apresentado o maior valor de concentração em cada ponto de grade relativo à longitude e a profundidade.

Nesse caso determinístico não é apresentado o mapa de óleo nos sedimentos ao final da simulação porque a concentração de óleo no fundo foi inferior a 1g de óleo/m<sup>2</sup><sup>1</sup>, limiar adotado nas simulações determinísticas.

<sup>1</sup> Valor baseado em LONG ET AL (1995) considerando uma espessura de contaminação de 10 cm, densidade de sedimentos de 2,6 g/cm<sup>3</sup>

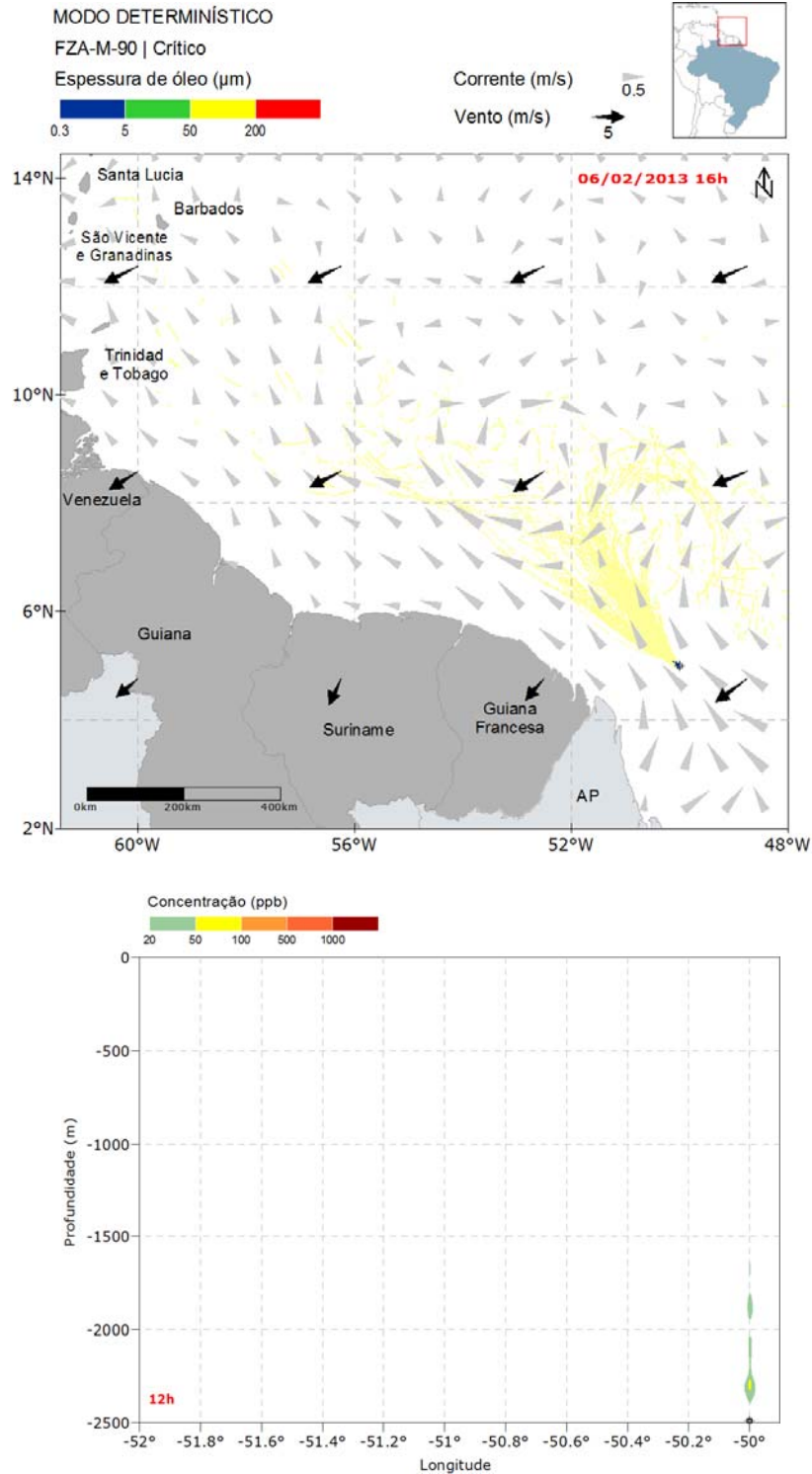


Figura 128: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 12 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 46.742 m<sup>3</sup> a partir do bloco FZA-M-90.

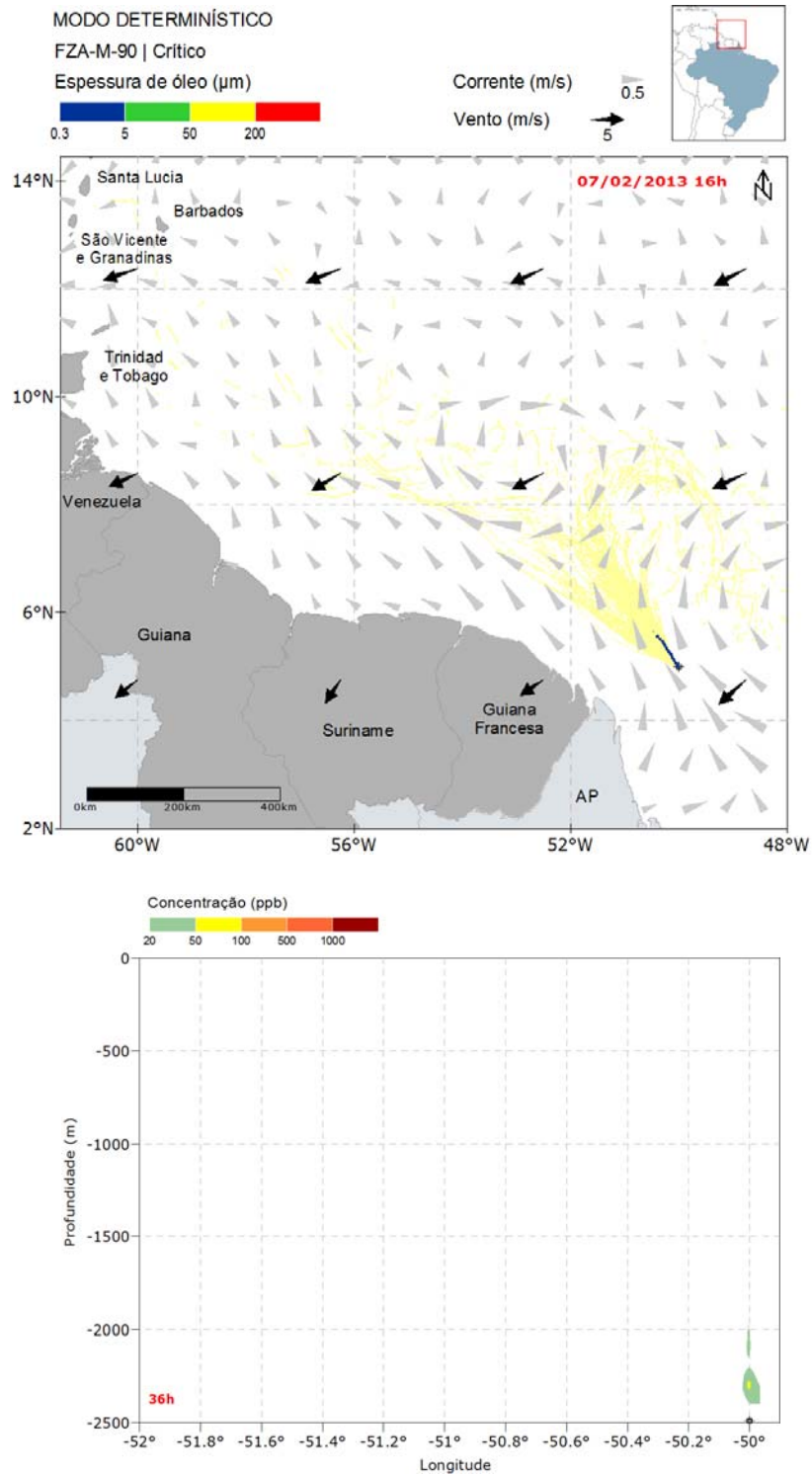


Figura 129: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 36 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 46.742 m<sup>3</sup> a partir do bloco FZA-M-90.

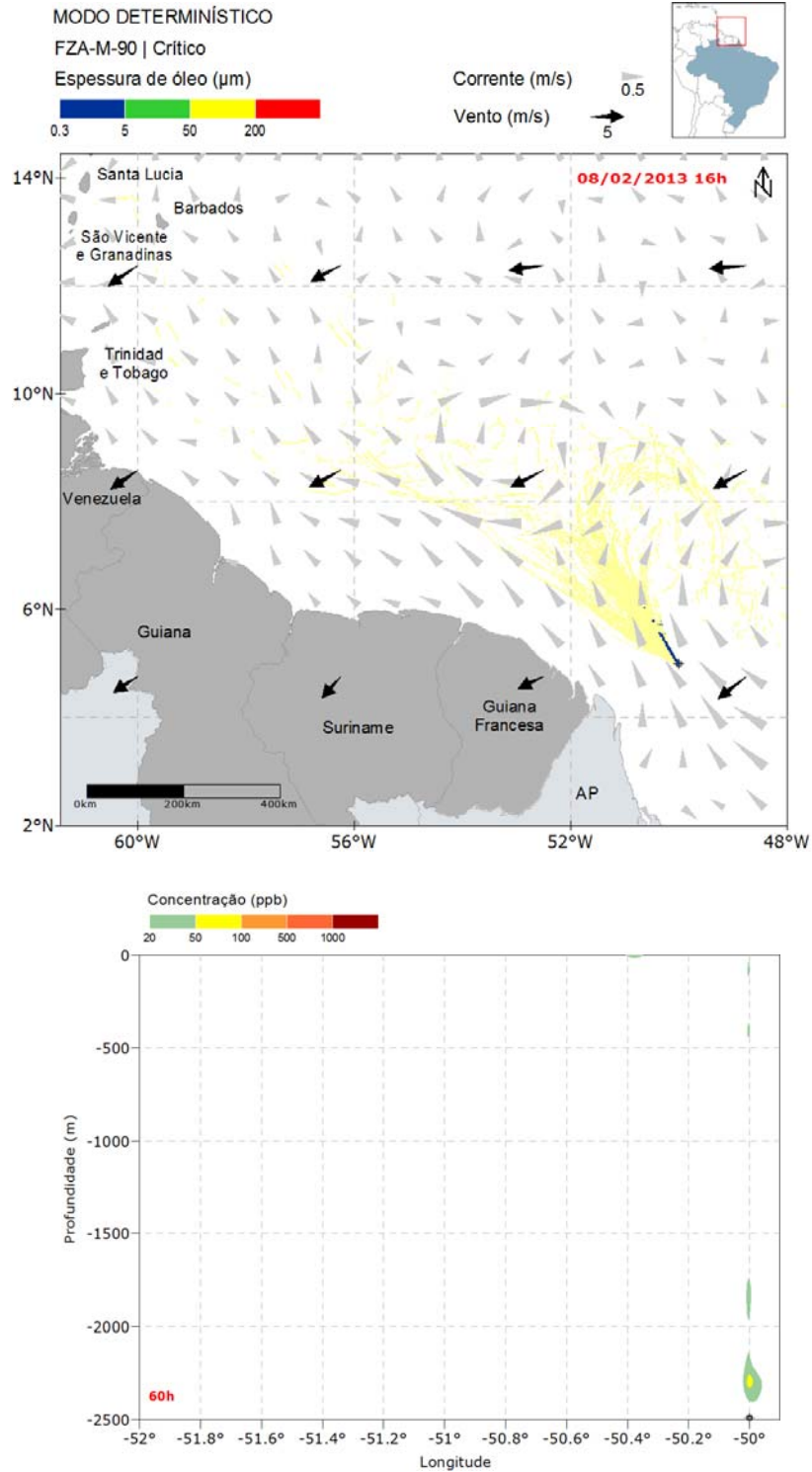


Figura 130: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 60 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 46.742 m<sup>3</sup> a partir do bloco FZA-M-90.

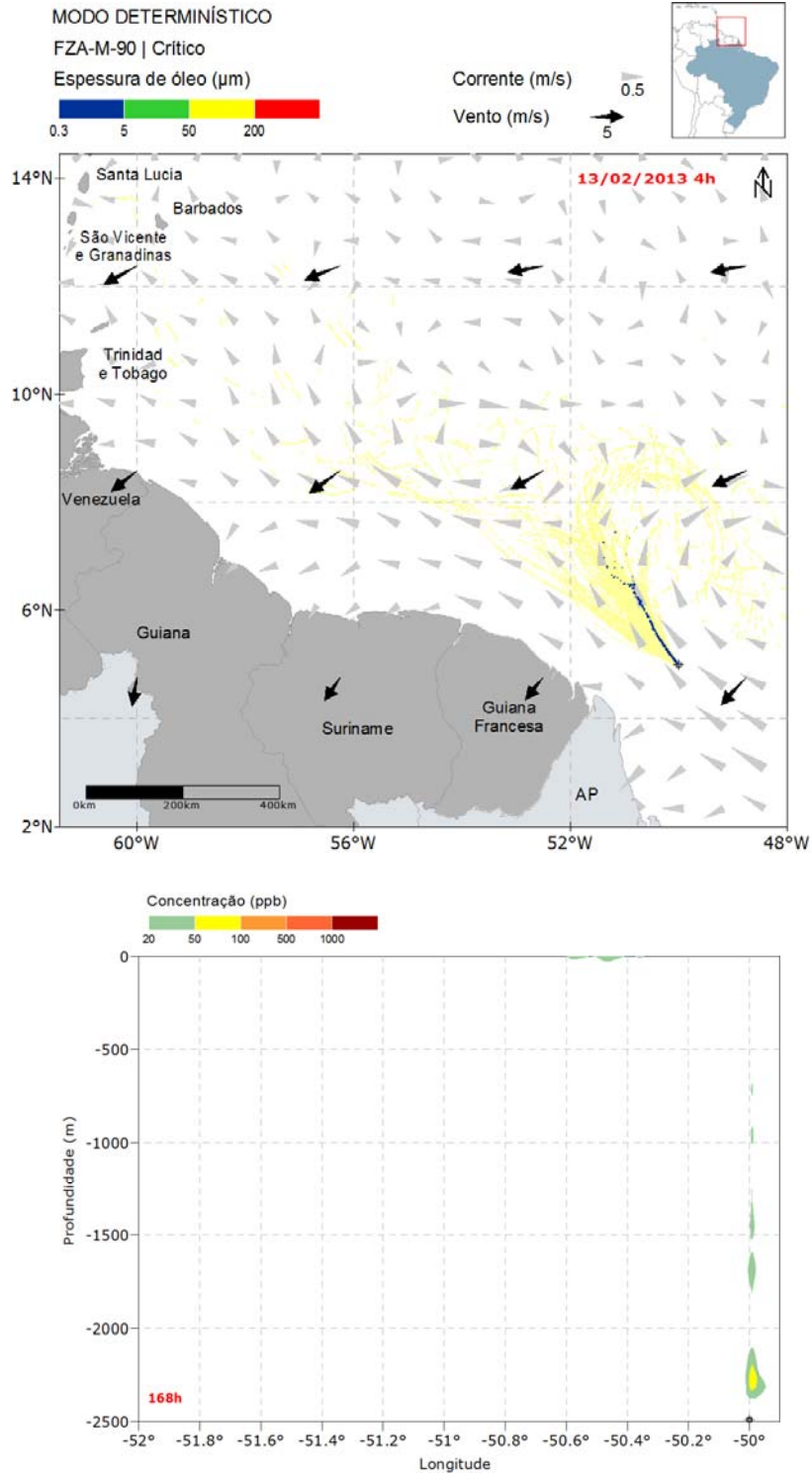


Figura 131: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 46.742 m<sup>3</sup> a partir do bloco FZA-M-90.



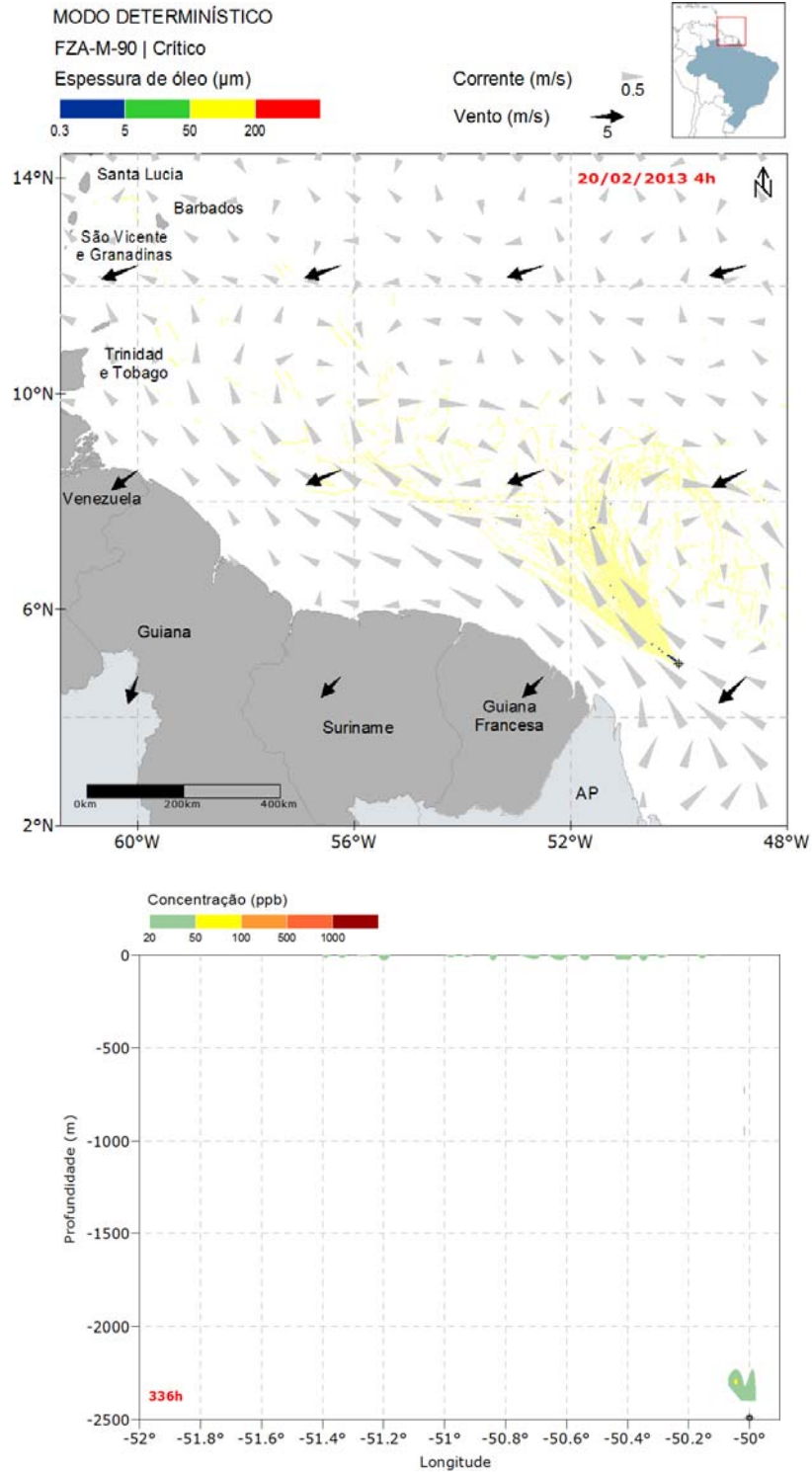


Figura 132: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 46.742 m<sup>3</sup> a partir do bloco FZA-M-90.

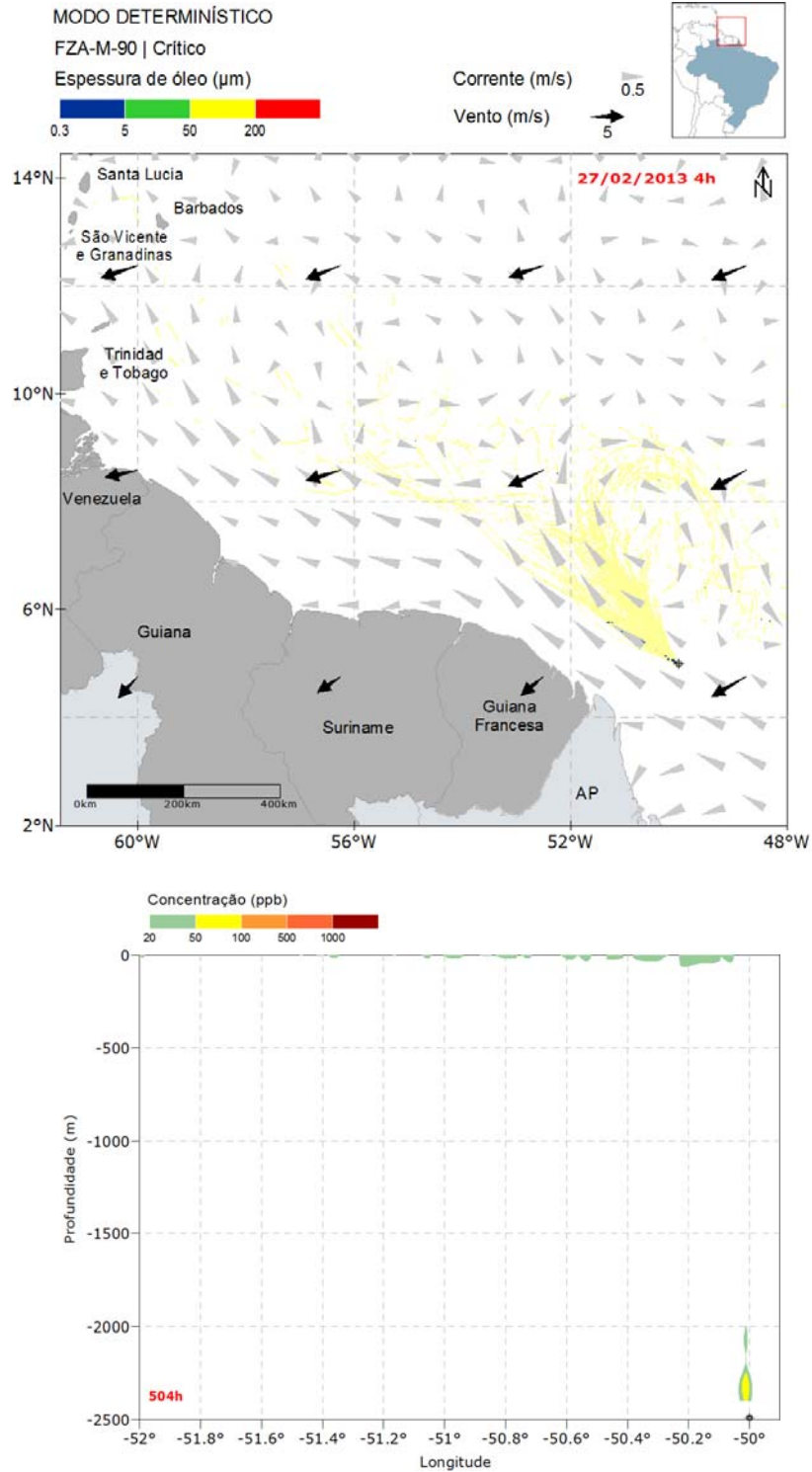


Figura 133: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 46.742 m<sup>3</sup> a partir do bloco FZA-M-90.

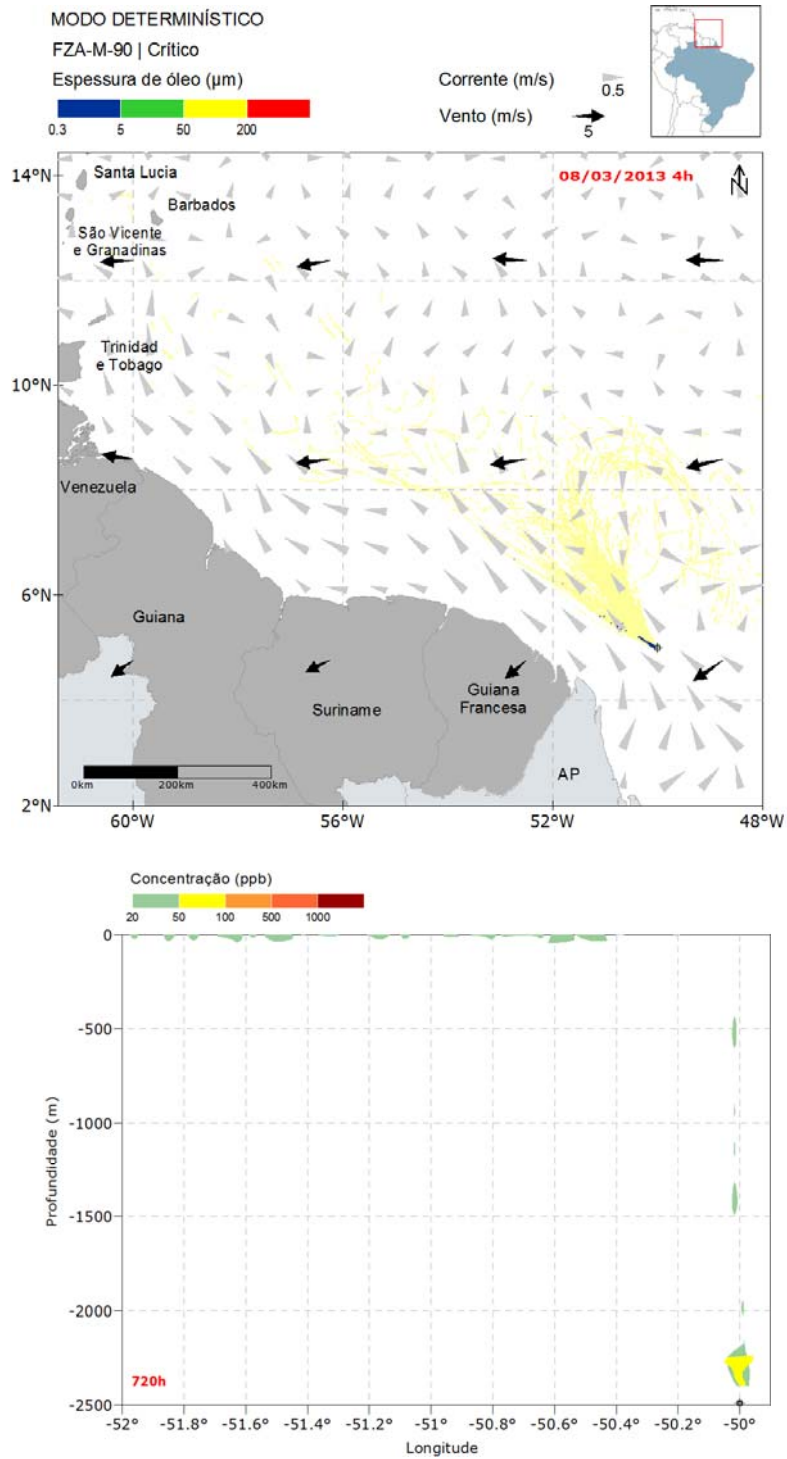


Figura 134: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 46.742 m<sup>3</sup> a partir do bloco FZA-M-90.

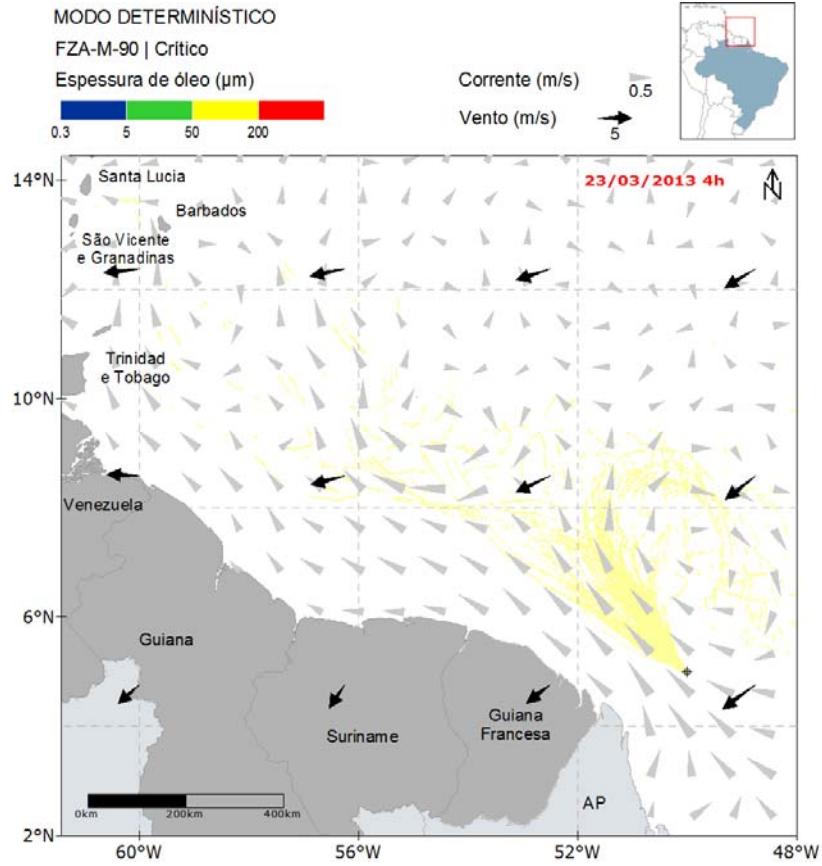


Figura 135: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície. Vazamento de 46.742 m<sup>3</sup> a partir do bloco FZA-M-90.

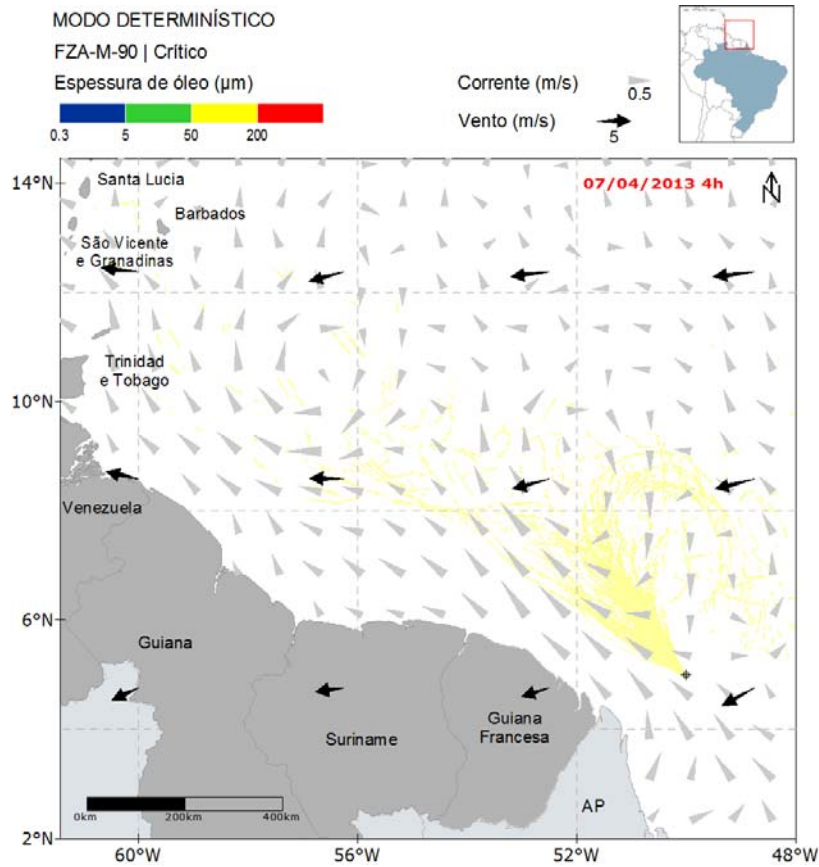


Figura 136: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície.

Vazamento de 46.742 m<sup>3</sup> a partir do bloco FZA-M-90.

A deriva do óleo ao longo da simulação ocorreu rumo a noroeste do ponto de vazamento, influenciada predominantemente pelas correntes. Observa-se que em grande parte dos tempos apresentados não houve a formação de uma extensa mancha de óleo, com exceção da Figura 131 (após uma semana de vazamento). Ao analisar o balanço de massa apresentado na Figura 137, nota-se que a porcentagem de óleo na superfície da água é sempre pequena ao longo da simulação, resultando em algumas manchas espalhadas na região de estudo após o término do vazamento. A aproximação da costa em Barbados ocorreu em uma dessas manchas espalhadas após 40 dias de simulação em um pequeno ponto junto à costa.

Em relação à coluna d'água, a maior concentração de óleo foi observado próximo a profundidade de vazamento, com valores de até 100 ppb. Junto a superfície, não se verificou valores de concentração maior que 50 ppb. Após o término do vazamento, em 1080 horas (45 dias), não é observado valores acima de 20 ppb ao longo da coluna d'água, apesar de ~40% do óleo estar disperso.

A seguir, é apresentada a evolução temporal do balanço de massa do óleo (Figura 137 e Tabela 25) e a evolução da área e a massa de óleo (Figura 138 e Tabela 26) durante a simulação.

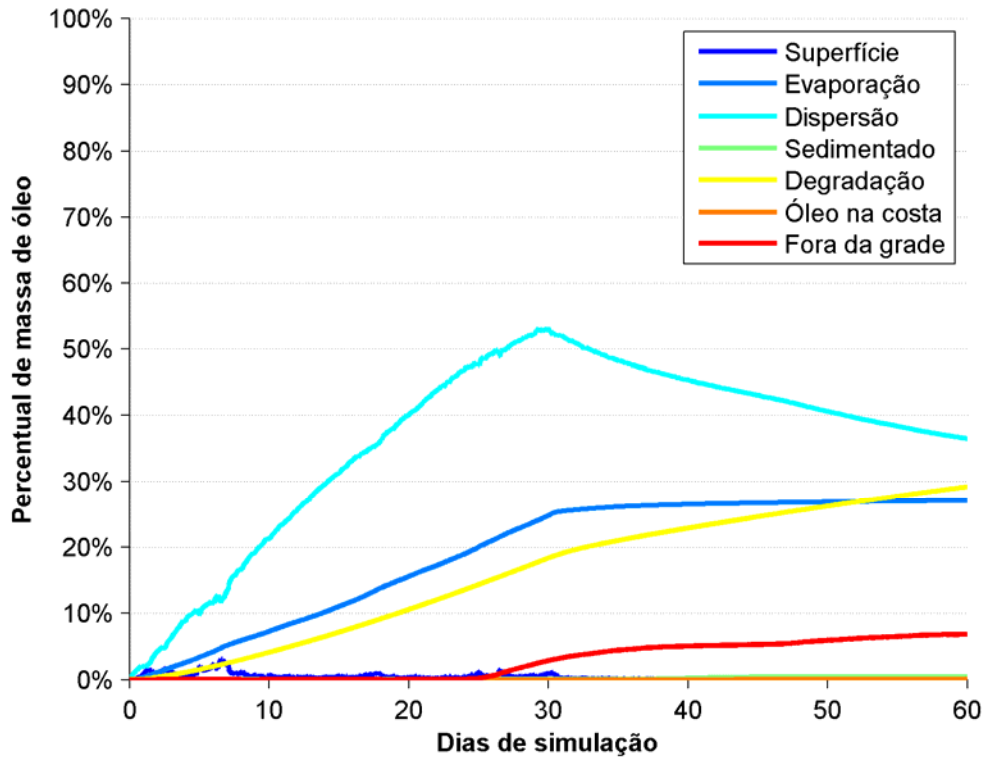


Figura 137: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condição crítica de menor tempo de chegada. Volume de 46.742 m<sup>3</sup>.

Tabela 25: Balanço de massa do óleo durante a simulação em valores percentuais e de massa de óleo.

Tempo (h)	Superfície (%)	Evaporado (%)	Coluna d'água (%)	Sedimento (%)	Degradado (%)	Fora da grade (%)
12	0,18 (73 t)	0,07 (27 t)	1,39 (572 t)	-	0,03 (13 t)	-
36	1,41 (579 t)	0,73 (299 t)	2,64 (1083 t)	-	0,22 (90 t)	-
60	1,56 (639 t)	1,46 (600 t)	4,79 (1965 t)	-	0,52 (213 t)	-
168	2,07 (848 t)	5,18 (2123 t)	13,60 (5576 t)	-	2,49 (1022 t)	-
336	0,37 (151 t)	10,20 (4184 t)	29,55 (12120 t)	0,01 (3 t)	6,52 (2673 t)	0,00 (1 t)
504	0,33 (137 t)	16,45 (6746 t)	41,87 (17170 t)	0,03 (12 t)	11,31 (4639 t)	0,01 (4 t)
720	0,72 (295 t)	24,80 (10170 t)	53,20 (21820 t)	0,05 (20 t)	18,35 (7527 t)	2,87 (1177 t)
1080	0,02 (10 t)	26,65 (10930 t)	43,04 (17650 t)	0,39 (159 t)	24,58 (10080 t)	5,29 (2169 t)
1440	0,01 (6 t)	27,09 (11110 t)	36,45 (14950 t)	0,44 (183 t)	29,14 (11950 t)	6,86 (2812 t)

É observado que a maior parte do óleo ao final da simulação, 36,5%, se encontra na coluna d'água. Com a maior porcentagem de óleo entranhado na água, o valor da degradação também é alto, representando ao final da simulação 29,1% do total vazado. A evaporação também foi um dos processos importantes ao pouco óleo associado à superfície, retirando 27,1%. O óleo no sedimento e o óleo na superfície não ultrapassaram 1% ao término da simulação. A saída de óleo do domínio de simulação esteve associada ao deslocamento do óleo pela coluna d'água, chegando ao valor de 6,9% do total de óleo.

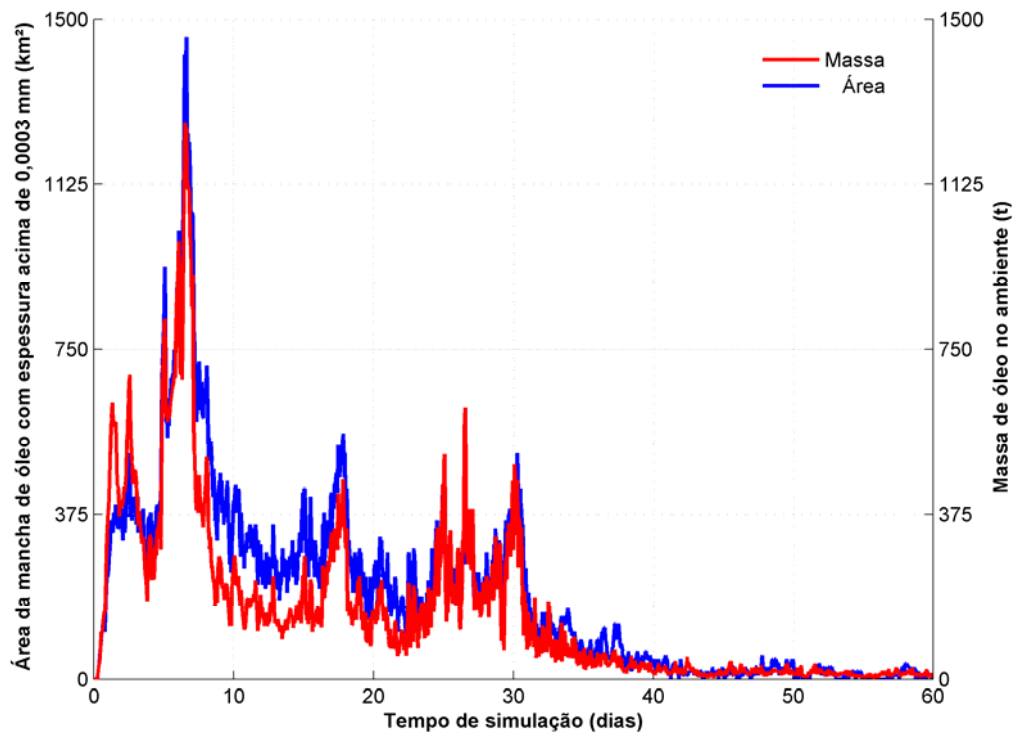


Figura 138: Área superficial da mancha de óleo e a massa de óleo no mar durante a simulação da trajetória em condição crítica de menor tempo de chegada.

Tabela 26: Área superficial, massa de óleo e a espessura máxima da mancha de óleo e a massa de óleo do óleo durante a simulação.

Tempo (h)	Área (km <sup>2</sup> )	Massa (t)	Espessura máxima (um)
12	72,2	72,6	1,7
36	352	579	5,2
60	460	639,3	5,7
168	1010	847,8	4,7
336	280	151	2,4
504	289	137,2	1,6
720	352	294,8	0,4
1080	9	9,8	0,3
1440	9	6	0



O gráfico da área da mancha de óleo mostra que o pico de extensão ocorreu entre 7 e 8 dias, próximo de 1500 km<sup>2</sup>. Após esse tempo houve um decréscimo abrupto na área da mancha, com algumas oscilações até 30 dias (fim do vazamento). Já os valores de espessura máxima mostram que as maiores espessuras estão associadas a primeira semana, a diminuição após este instante devido ao espalhamento e ao intemperismo do óleo.

## 4. Conclusão

O modelo numérico hidrodinâmico de coordenadas sigma ROMS foi implementado na região do Bloco FZA-M-90, utilizando uma grade com resolução espacial de aproximadamente 6,5 km. As condições de contorno e iniciais implementadas no modelo numérico foram obtidas a partir dos resultados do MyOcean, com o modelo sendo forçado pelas variáveis atmosféricas da Reanálise I do NCEP e pelo modelo global de marés TPX07.

Os resultados das comparações entre os resultados do ROMS e os dados medidos, tanto para temperatura, elevação de maré, e correntes, mostraram que o modelo numérico foi capaz de reproduzir bem a circulação oceânica e costeira da região em estudo.

Após comparações com dados observados de várias fontes, relativos à temperatura de superfície do mar (TSM), maré e derivadores, os resultados do modelo hidrodinâmico foram considerados aptos a serem utilizados para as simulações de transporte de material no oceano realizadas para o Bloco. Neste pode-se obter as variações espaço-temporais da circulação, levando-se em conta mudanças sazonais, infra-sazonais e diurnas, o que garante aos resultados das simulações de transporte uma maior confiabilidade, pois estes irão contemplar uma ampla gama de situações ambientais ocorrentes na região de estudo.

Nas simulações probabilísticas, os períodos sazonais apresentaram comportamentos distintos devido principalmente ao comportamento sazonal da Corrente Norte do Brasil e sua retroflexão. No verão, a deriva do óleo foi preferencialmente para noroeste do ponto de vazamento, enquanto no inverno a área de probabilidade foi influenciada pelos meandros e a retroflexão da CNB, girando a norte e derivando para leste do domínio. Um ponto em comum entre os períodos sazonais foi a ausência de toque de óleo na costa, sendo a CNB determinante para que isto não ocorresse.

Como não houve toque de óleo na costa, somente foi realizada uma simulação determinística, a que chegava mais próximo da costa e em menor tempo. Verificou-se que a mancha de óleo ficava restrita as proximidades do ponto de vazamento na maior parte do tempo e que a concentração de óleo na coluna d'água não ultrapassou 100 ppb.

Os resultados obtidos em relação ao intemperismo do óleo mostraram que nos vazamentos instantâneos ocorridos na superfície o processo de evaporação foi o principalmente responsável pela retirada de óleo da superfície da d'água, com mediana próxima de 60%. Nos vazamentos contínuos de fundo houve equiparação entre os processos de evaporação,

dispersão e degradação, com a dispersão apresentando maior variabilidade entre os cenários simulados.

## 5. Bibliografia

- AMANTE, C., and B.W. EAKINS. 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19 pp, Whole-world grids available on-line at [<http://ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>] from the NOAA, NESDIS, National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado U.S.A.
- ANDRADE, R.C., 2006 Uma Nova Abordagem para a Solução Numérica de Problemas de Advecção e Difusão Multidimensional, em Corpos de Água Naturais. Tese de doutorado do Programa de Engenharia Oceânica – Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica – COPPE/UFRJ. BECK, B., 2002: Model evaluation and performance. In Encyclopedia of Environmetrics, Eds. A. H. El-Shaarawi and W. W. Piegorsch, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester.
- BOWDEN, K.F. 1983. Physical oceanography of coastal waters. John Wiley, NY, 302 p.
- BOURLÈS, B., Y. GOURIOU, e R. CHUCHLA, 1999a: On the circulation in the upper layer of the western equatorial Atlantic. J. Geophys. Res., C, 104(C9), 21,151–21,170.
- BRANDVIK, P., JOHANSEN, Ø., LEIRVIK, F., FAROOQ, U. and DALING, P. (2012). Droplet breakup in sub-surface oil releases - Part 1: Experimental study of droplet breakup and effectiveness of dispersant injection, Submitted to Marine Pollution Bulletin October 2012 .
- CHAPMAN, D. C., 1985: Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model, J. Phys. Oceanogr., 15, 1060--1075.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. 2005. Resolução Conama nº 357. Disponível em: < [www.mma.conama.gov.br/conama](http://www.mma.conama.gov.br/conama) > Acesso em 01/04/2014.
- DA SILVA, A. P. F. ; CRUZ, L. M. ; FRAGOSO, M. ; DOS SANTOS, F. A. . Um Estudo Sobre o Número Ótimo de Simulações Numéricas para Elaboração dos Mapas de Probabilidade de Presença de Óleo no Mar Baseado na Variabilidade do Vento. In: III Congresso Brasileiro de Oceanografia, 2008, Fortaleza - CE. III Congresso Brasileiro de Oceanografia, 2008.
- DAI, A. AND TRENBERTH, K. E.: Estimates of freshwater discharge from continents: latitudinal and seasonal variations, J. Hydrometeorol., 3, 660–687, 2002.
- DALING, P. S. LEWIS, A. RAMSTAD, S. 1999. The Use of Colour as a Guide to Oil Film Thickness – Main Report. Report N° STF66 F99082. Trondheim, Norway. 48 pp.

- DELVIGNE G.A.L.; SWEENEY C.E.. Natural dispersion of Oil. Oil & Chemical Pollution 4 (1988) 281-310.
- EGBERT, G.D., EROFEEVA, S. Y, 2002: Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides, J. Atmos. Oceanic Technol., 19(2), 183-204.
- ELPN/IBAMA. Informação Técnica nº 023/2002. Modelagem de Derramamento de Óleo no Mar.
- ETKIN, D.S., FRENCH-MCCAY, D.; MICHEL, J. 2007. Review of the State-of-the-Art on Modeling Interactions between Spilled Oil and Shorelines for the Development of Algorithms for Oil Spill Risk Analysis Modeling. Available from BOEM Environmental Division, Branch of Environmental Sciences. OCS Study MMS 2007-063. 161 p.
- FAIRALL, C.W., E.F. BRADLEY, D.P. ROGERS, J.B. EDSON and G.S. YOUNG, 1996: Bulk parameterization of air-sea fluxes for tropical ocean-global atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment, J. Geophys. Res., 101, 3747-3764.
- FISCHER ET AL, 1979. Mixing in Inland and Coastal Waters., Academic Press, New York, 1979
- FLATHER, R.A., 1976. A tidal model of the North-West European continental shelf. Mém. Soc. R. Soc. Liège 9, 141–164.
- GABIOUX, M. Estudo numérico dos meandros e vórtices da corrente do Brasil entre 22°S e 30°S [Rio de Janeiro] 2008 XVII, 138 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Oceânica, 2008) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- HAIDVOGEL, D. B. and A. BECKMANN, 1999: Numerical Ocean Circulation Modeling. Imperial College Press.
- HAIDVOGEL, D. B., H. G. ARANGO, K. HEDSTRON, A. BECKMAN, P. MALANOTTE-RIZZOLI, and A. F. SCHEPETK (2000), Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: Simulations in nonlinear terrain-following coordinates, Dyn. Atmos. Oceans, 32, 239-281.
- HAIDVOGEL, D. B., H. ARANGO, W. P. BUDGELL, B. D. CORNUELLE, E. CURCHISTER, E. DI LORENZO, K. FENNEL, W. R. GEYER, A. J. HERMANN, L. LANEROLLE, J. LEVIN, J. C. McWILLIAMS, A. J. MILLER, A. M. MOORE, T. M. POWELL, A. F. SHCHEPETKIN, C. R. SHERWOOD, R. P. SIGNELL, J. C. WARNER, and J. WILKIN, 2008. Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System. Journal of Computational Physics, 227, 3595-3624.
- HANSEN, D. V.; POULAIN, P. M. Quality control and interpolations of WOCE-TOGA drifter data. Journal of atmospheric and oceanic technology, v. 13, n. 4, p. 900–910, 1996.

- HOULT, D. P. Oil spreading on the sea. *Annual Review of Fluid Mechanics*, p. 341-367, 1972.
- JOHANSEN, Ø. 2000. DeepBlow – A Lagrangian Plume Model for Deep Water Blowouts. *Spill Science & Technology Bulletin*. Vol. 6, No. 2: 103 – 111.
- JOHANSEN, Ø. and DURGUT, I. (2006). Implementation of the near-field module in the ERMS model, Technical report, SINTEF.
- JOHNS, W. E., T. N. LEE, R. C. BEARDSLEY, J. CANDELA, R. LIMEBURNER, B. CASTRO, 1998: Annual cycle and variability of the North Brazil Current. *Journal of Physical Oceanography*, 28(1), pp. 103-128.
- JONG, K, 2004 A Comparison of Four Particle Models. A Comparison of DemWaq, DREAM, GNOME, and SIMPAR. Ministeriere Van Verkeer en Waterstraat.
- KALNAY, E, M. KANAMITSU, R. KISTLER, W. COLLINS, D. DEAVEN, L. GANDIN, M. IREDELL, S. SAHA, G. WHITE, J. WOOLLEN, Y. ZHU, M. CHELLIAH, W. EBISUZAK, W. HIGGINS, J. JANOWIAK, K.C. MO, C. ROPELEWSKI, J. WANG, A. LEETMAA, R. REYNOLDS, R. JENNE, D. JOSEPH, 1996: "The NCEP /NCAR 40-Year Reanalysis Project", *Bulletin of the American Meteorological Society*, 437-470.
- KISTLER, R.; KALNAY, E; COLLINS, W.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; KANAMITSU, M.; KOUSKY, V.; DOOL, H.; JENNE, R. & FIORINO, 2001. "The NCEP-NCAR 50 Year Reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation." *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 247-267.
- KJERFVE B & LACERDA LD. 1993. Mangroves of Brazil. In: Conservation and sustainable utilization of mangrove forest in Latin America and Africa regions. Part I – Latin America, LACERDA LD (Ed.). Mangrove Ecosystem Technical Report No. 2. ITTO/ISME, Okinawa, 272 pp.
- LARGE, W. G., J. C. McWILLIAMS, and S. C. DONEY, 1994: Oceanic vertical mixing: a review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Rev. Geophys.*, 32, 363-403.
- LOCARNINI, R. A., A. V. MISHONOV, J. I. ANTONOV, T. P. BOYER, H. E. GARCIA, O. K. BARANOVA, M. M. ZWENG, AND D. R. JOHNSON, 2013. *World Ocean Atlas 2013, Volume 1: Temperature*. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 68, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 184 pp.

- LINDERSEN, P, J, B, 2013. Modelling of Subsurface Releases of Oil and Gas. Master's Thesis. Norwegian University of Science and Technology. Department of Chemical Engineering. Trondheim, Norway.
- LIU, W.T., K.B. KATSAROS, and J.A. BUSINGER, 1979: Bulk parameterization of the air-sea exchange of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface, J. Atmos. Sci., 36, 1722-1735.
- MACKAY, D., I. BUIST, R. MASCARENHAS & S. PATERSON. 1980. Oil Spill Processes and Models. Environmental Protection Service. Canada. Report EE-8.
- MARCHESIELLO, P., J.C. McWILLIAMS, and A. SHCHEPETKIN, 2003: Equilibrium structure and dynamics of the California Current System, J. Phys. Oceanogr., 33, 753-783.
- MELLOR, G. L.; YAMADA, T., 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. Rev. Geophys. Space Phys., 20, 851-875.
- MYOCEAN, 2013, Ocean Monitoring and Forecasting. [http://www.myocean.eu/web/69-myocean-interactive-catalogue.php/?option=com\\_csw&view=details&product\\_id=GLOBAL\\_ANALYSIS\\_FORECAST\\_PHYS\\_001\\_002](http://www.myocean.eu/web/69-myocean-interactive-catalogue.php/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHYS_001_002)
- OSPAR Commission. 2010. North Sea Manual on Maritime Oil Pollution Offences. ISBN 978-1-906840-45-7. Publication Number: 405/2009. 87 pp.
- PELIZ, A., J. DUBERT, D. B. HAIDVOGEL, 2003: Subinertial Response of a Density-Driven Eastern Boundary Poleward Current to Wind Forcing, J. Phys. Oceanogr., 33, 1633-1650.
- 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., DOWNING, K. (1996): Calibration and Testing of IKU's Oil Spill Contingency and Response (OSCAR) Model System. Proceedings of the 1996 Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, pp.689-726.
- REED, M.; DALING, P.; LEWIS, A.; DITLEVSEN, M. K.; BRØRS, B.; CLARK, J.; AURAND, D. 2004. Modelling of dispersant application to oil spills in shallow coastal waters. Environmental Modelling & Software, v. 19, p. 681-690.
- REED, M. 2000; SINGSAAS, I.; DALING, P.S; FAKNES, L; BRAKSTAD, O.G.; HETLAND, B. A.; HOKSTAD, J. 2000. Modeling the Water-Accommodated Fraction in OSCAR2000. In:

- 2001 International Oil Spill Conference. Computer Technology and Oil Spills. SINTEF Report. pp.1083-1091.
- REED, M.; JOHANSEN, Ø.; BRANDVIK, P. J.; DALING, P.; LEWIS, A.; FIOCCO, R.; MACKAY, D.; PRENTKI, R. 1999. Oil Spill Modelling towards the Close of the 20th Century: Overview of the State of the Art. Spill Science and Technology Bulletin, 5 (1): pp 3-16.
- REGNIER, C. J-M. LELLOUCHE, O. LEGALLOUDEC, C. DESPORTES, M. DREVILLON. 2013. Quality Information Document for Global Sea Analysis and Forecasting Product. Ref: MYO2-GL-QUID-001-002. Disponível em: [www.myocean.eu](http://www.myocean.eu).
- SEBASTIÃO, P.; SOARES, C. G. 1995. Modeling the Fate of Oil Spills at Sea. Spill Science and Technology Bulletin, 2 (2): pp 121-131.
- SCHEPETKIN, A. F., and J. C. McWILLIANS (1998), Quasi-monotone advection schemes based on explicit locally adaptive dissipation, Monthly Weather Review, 126, 1541-1580.
- SHCHEPETKIN, A. F., and J. C. McWILLIANS (2003), A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate, J. Geophys. Res., 108(C3), 3090, doi:10.1029/2001JC001047.
- SHCHEPETKIN, A. F., and J. C. McWILLIANS (2005), The Regional Ocean Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model, Ocean Modelling, 9, 347-404.
- SONG, Y. and D. B. HAIDVOGEL, 1994: A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system. J. Comp. Phys., 115(1), 228-244.
- SOUZA FILHO, P. W. M. e. Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. Revista Brasileira de Geofísica, v. 23, n. 4, p. 427-435, 2005.
- STARK, J. D. CRAIG J. DONLON, MATTHEW J. MARTIN and McCULLOCH, 2007, OSTIA : An operational, high resolution, real time, global sea surface temperature analysis system., Oceans '07 IEEE Aberdeen, conference proceedings. Marine challenges: coastline to deep sea. Aberdeen, Scotland.IEEE.
- STYLES, R. and S.M. GLENN, 2000: Modeling stratified wave and current bottom boundary layers in the continental shelf. J. of Geophys. Res., 105, 24119-24139.
- UMLAUF, L., H. BUCHARD, 2003: A generic length-scale equation for geophysical turbulence models. J. Marine Res., 61, 235-265.



WARNER, J.C, C.R. SHERWOOD, H.G. ARANGO, and R.P. SIGNELL, 2005a: Performance of four Turbulence Closure Methods Implemented using a Generic Length Scale Method. Ocean Modelling, 8, 81-113.

ZWENG, M.M, J.R. REAGAN, J.I. ANTONOV, R.A. LOCARNINI, A.V. MISHONOV, T.P. BOYER, H.E. GARCIA, O.K. BARANOVA, D.R. JOHNSON, D. SEIDOV, M.M. BIDDLE, 2013. World Ocean Atlas 2013, Volume 2: Salinity. S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 74, 39 pp.

# ANEXOS

## ANEXO I. JUSTIFICATIVA PARA O VOLUME DE *BLOWOUT*

## Estimativa de Volume de Óleo

Este documento descreve a metodologia de cálculo, os parâmetros utilizados e o resultado obtido na avaliação do *worst-case discharge* para os leads e prospectos do Cretáceo Superior do bloco exploratório FZA-M-90 na Bacia da Foz do Amazonas. O *worst-case discharge* é a maior vazão de hidrocarbonetos líquidos resultante do pior cenário de descontrole de poço (*blowout*).

O cenário concebido para o cálculo de vazamento de óleo assume o descontrole do poço a partir da perda de vedação hidráulica entre a cabeça do poço e o fundo do mar por qualquer falha ou acidente. Fora de controle, o poço produz fluido da formação por surgência tendo como contrapressão na cabeça do poço a pressão correspondente à coluna da lâmina d'água. Admite-se que o reservatório não está anormalmente pressurizado, com pressão estática de 9.000 psia referenciada à profundidade de -6.071 m.

O Índice de Produtividade (IP) é uma medida comumente usada para quantificar a capacidade de produção de um poço, relacionando a razão entre a vazão total de líquido e o diferencial de pressão aplicado entre o reservatório e o poço. Para um sistema monofásico de óleo e poço vertical, o IP em regime de fluxo estabilizado (pseudopermanente) é calculado de acordo com a lei física que rege o fluxo de fluidos em meios porosos, a Lei de Darcy:

$$IP = \frac{0,05255 k_o h}{\mu_o B_o \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - 0,75 + s \right]}$$

onde,

$IP$  = Índice de Produtividade, m<sup>3</sup>/d/kgf/cm<sup>2</sup>;

$k_o$  = permeabilidade efetiva ao óleo, mD;

$h$  = espessura do reservatório, m;

$\mu_o$  = viscosidade do óleo, cP;

$B_o$  = fator volume-formação do óleo, bbl/STB;

$r_e$  = raio de drenagem do reservatório, m;

$r_w$  = raio do poço, m; e

$s$  = dano do poço (*skin*).

Considera-se que:

- O reservatório é portador de um óleo intermediário de 27°API;
- O fator volume-formação do óleo ( $B_o$ ) calculado é de 1,45 bbl/STB, para uma razão gás/óleo de 134 m<sup>3</sup>std/m<sup>3</sup>std;
- A espessura efetiva (*net*) de reservatório contribuindo para o fluxo é de 31 m;
- A permeabilidade efetiva ao óleo é de 50 mD;
- A viscosidade do óleo é de 0,50 cP (valor esperado para este tipo de óleo nas condições de reservatório);
- O poço não possui dano mecânico na interface com o reservatório (sem *skin*,  $s=0$ ); e
- O intervalo comum de variação do termo logarítmico é entre 8 e 10 (assume-se aqui 8).

O **Índice de Produtividade** calculado para o poço a partir da lei de Darcy e das premissas descritas acima é de **15,4 m<sup>3</sup>/d/kgf/cm<sup>2</sup>**. Este valor é acoplado à simulação do fluxo no poço entre o reservatório e o fundo do mar, realizada no simulador de escoamento em dutos (PIPESIM) por análise nodal do poço na posição do fundo do mar, assumindo as premissas:

- *Blowout* com coluna de perfuração dentro do poço;
- Fluxo pelo anular (entre o revestimento e a coluna de perfuração);
- Revestimento de 13 <sup>5</sup>/<sub>8</sub>" acima da zona de interesse;
- *Drill pipe* de 5 1/2";
- Pressão do reservatório de 9.000 psia
- Temperatura do reservatório de 125°C; e
- Pressão no fundo do mar de 4.300 psia (-2.861 m) e temperatura de 4°C.

A partir desta análise e com as premissas adotadas, a vazão de óleo que flui para o fundo do mar no caso de descontrole do poço (*worst-case discharge*) é de **9.800 bbl/d**, com um volume de **294.000 bbl** de óleo acumulado num período contínuo de **30 dias**.

## ANEXO II. MAPA COM DETALHAMENTO DA LINHA DE COSTA