



Relatório Técnico [rev.00]

Modelagem Hidrodinâmica e Dispersão de Óleo

Bacia do Ceará

/

Preparado para: TOTAL

Preparado por: André Luis Santi Coimbra de Oliveira

Felipe Lobo Mendes Soares

Flávia Pozzi Pimentel

Henery Ferreira Garção

Lívia Sant' Angelo Mariano

Marcelo Montenegro Cabral

24 de junho 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

Controle de revisão

Revisão nº 01

Data:

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

Revisão nº 02

Data: / /

Descrição:

Responsável:

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

1. Introdução	18
2. Modelagem Hidrodinâmica	20
2.1. Modelo Numérico Utilizado	20
2.2. Domínio do Modelo	25
2.3. Condições Iniciais	27
2.4. Condições de Contorno	30
2.5. Estabilização da Energia Cinética	60
2.6. Avaliação do Modelo	62
2.7. Resultados	102
3. Modelagem de Dispersão de Óleo	111
3.1. Metodologia	112
3.2. Resultados	165
4. Conclusão	218
5. Bibliografia	220
Anexos	226

Índice das imagens

Figura 1: Localização da área de interesse da TOTAL para exploração dentro dos limites do bloco CE-M-661 e locação proposta para o poço, considerada na modelagem de dispersão de óleo.....	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 representada pela cor amarela.	26
Figura 4: Campo de temperatura superficial (°C) no dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.....	28
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.	29
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: Batimetria do ETOPO1 (painel superior) e das Cartas Náuticas 21700, 21800 e 21900 (painel inferior) interpoladas para a grade do ROMS.	35
Figura 13: Pontos de Grade do NCEP (pontos vermelhos) na região do domínio de modelagem (retângulo branco).....	37

Figura 14: 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).	39
Figura 15: Campo médio dos dados de precipitação da Reanálise I utilizados como forçante para o período chuvoso (a) e para o período seco (b).	40
Figura 16: 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).	41
Figura 17: Campo médio dos dados de pressão atmosférica da Reanálise I utilizados como forçante para o período chuvoso (a) e para o período seco (b).	42
Figura 18: 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).	43
Figura 19: 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).	44
Figura 20: Campo médio dos dados de vento da Reanálise I utilizados como forçante para o período chuvoso (a) e para o período seco (b).	45
Figura 21: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente M2. Fonte (TPX07)	47
Figura 22: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente S2. Fonte (TPX07).....	48
Figura 23: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente N2. Fonte (TPX07)	49
Figura 24: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente K2. Fonte (TPX07).....	50
Figura 25: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente K1. Fonte (TPX07).....	51
Figura 26: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente O1. Fonte (TPX07).	52
Figura 27: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente P1. Fonte (TPX07).....	53
Figura 28: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente Q1. Fonte (TPX07).	54
Figura 29: Estações utilizadas ao longo de todo o globo. Fonte: Dai & Trenberth (2002).	57
Figura 30: Estações utilizadas em Dai & Trenberth (2002), que se encontram no domínio de modelagem.	57
Figura 31: Campo de salinidade superficial obtido do ROMS para o dia 08 de maio de 2013. .	59
Figura 32: Variação da energia cinética média em superfície ao longo da simulação.	61

Figura 33: Localização das estações maregráficas da FEMAR, utilizadas na avaliação da representação da maré no modelo.....	63
Figura 34: Comparação entre a série maregráfica da estação de 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).....	65
Figura 35: 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).....	66
Figura 36: 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).....	67
Figura 37: Comparação entre a série maregráfica da estação de Luiz Correia (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).....	68
Figura 38: Comparação entre a série maregráfica da estação de Paracurú (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).....	69
Figura 39: TSM média para Janeiro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	73
Figura 40: TSM média para Fevereiro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	74
Figura 41: TSM média para Março de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	75
Figura 42: TSM média para Abril de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	76
Figura 43: TSM média para Maio de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	77
Figura 44: TSM média para Junho de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	78
Figura 45: TSM média para Julho de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	79

Figura 46: TSM média para Agosto de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	80
Figura 47: TSM média para Setembro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	81
Figura 48: TSM média para Outubro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	82
Figura 49: TSM média para Novembro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	83
Figura 50: TSM média para Dezembro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	84
Figura 51: Localização do ponto de grade do WOA utilizado para as comparações.	87
Figura 52: Perfis médios de temperatura e salinidade obtidos do WOA13.	88
Figura 53: Trajetória descrita pelo derivador 01.	90
Figura 54: Comparação entre os dados obtidos do derivador 01 e os resultados do ROMS.....	90
Figura 55: Trajetória descrita pelo derivador 02.	91
Figura 56: Comparação entre os dados obtidos do derivador 02 e os resultados do ROMS.....	91
Figura 57: Trajetória descrita pelo derivador 03.	92
Figura 58: Comparação entre os dados obtidos do derivador 03 e os resultados do ROMS.....	92
Figura 59: Trajetória descrita pelo derivador 04.	93
Figura 60: Comparação entre os dados obtidos do derivador 04 e os resultados do ROMS.....	93
Figura 61: Trajetória descrita pelo derivador 05.	94
Figura 62: Comparação entre os dados obtidos do derivador 05 e os resultados do ROMS.....	94
Figura 63: Trajetória descrita pelo derivador 06.	95
Figura 64: Comparação entre os dados obtidos do derivador 06 e os resultados do ROMS.....	95
Figura 65: Trajetória descrita pelo derivador 07.	96
Figura 66: Comparação entre os dados obtidos do derivador 07 e os resultados do ROMS.....	96

Figura 67: Trajetória descrita pelo derivador 08.	97
Figura 68: Comparação entre os dados obtidos do derivador 08 e os resultados do ROMS.....	97
Figura 69: Localização dos fundeios do WOCE utilizados para comparação.	99
Figura 70: Perfil vertical de correntes retirado do WOCE (acima) e do ROMS (abaixo).	100
Figura 71: Distribuição esquemática das principais correntes encontradas na camada superficial (entre 0 e 100 m) do Atlântico Tropical: (a) situação típica de outono/HS (março, abril e maio) e (b) situação típica de primavera/HS (setembro, outubro e novembro). Os pontos azuis representam a batimétrica de 200 m. Fonte: Menezes (1999).....	103
Figura 72: Campo médio de circulação para o mês de janeiro.	105
Figura 73: Campo médio de circulação para o mês de fevereiro.	105
Figura 74: Campo médio de circulação para o mês de março.	106
Figura 75: Campo médio de circulação para o mês de abril.	106
Figura 76: Campo médio de circulação para o mês de maio.	107
Figura 77: Campo médio de circulação para o mês de junho.	107
Figura 78: Campo médio de circulação para o mês de julho.....	108
Figura 79: Campo médio de circulação para o mês de agosto.	108
Figura 80: Campo médio de circulação para o mês de setembro.	109
Figura 81: Campo médio de circulação para o mês de outubro.	109
Figura 82: Campo médio de circulação para o mês de novembro.	110
Figura 83: Campo médio de circulação para o mês de dezembro.	110
Figura 84: Esquema simplificado dos dados de entrada, processos e dados de saída (resultados) usados e obtidos pelo modelo OSCAR. Adaptado de Reed (2001).	113
Figura 85: Esquema da degradação dos principais componentes do óleo. Adaptado de Reed (2001).....	121
Figura 86: Unidades de Conservação marinhas e costeiras identificadas na área costeiro-oceânica onde se verifica probabilidade de presença de óleo neste estudo.	130

Figura 87: Esquema geral de plumas de <i>blowout</i> de óleo em profundidade. Adaptado de Lindersen (2013).....	132
Figura 88: 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).	134
Figura 89: Representação do limite da grade de óleo (linha vermelha tracejada).	143
Figura 90: A grade de batimetria utilizada na simulação.	144
Figura 91: 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.	148
Figura 92: Rosa dos ventos para os meses de janeiro a junho para o ponto mais próximo dos locais de vazamento.	149
Figura 93: Rosa dos ventos para os meses de julho a dezembro para o ponto mais próximo dos locais de vazamento.	150
Figura 94: Rosa de correntes para os meses de janeiro a junho para o ponto mais próximo do local de vazamento do bloco CE-M-661.	153
Figura 95: Rosa de correntes para os meses de julho a dezembro para o ponto mais próximo do local de vazamento do bloco CE-M-661.	154
Figura 96: Perfis de salinidade e temperatura para o ponto de vazamento do bloco CE-M-661.	157
Figura 97: Curva do Erro Médio Quadrático (RMSE).	158
Figura 98: Derivada da curva do Erro Médio Quadrático (RMSE).....	159
Figura 99: Mapa de probabilidade de presença de óleo para um ponto de risco na Margem Equatorial com 300 e 500 simulações.	160
Figura 100: 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.	162
Figura 101: Histograma de diferença absoluta de probabilidade de presença de óleos nos casos de 300 e 500 simulações.	163

Figura 102: Histograma acumulado de diferença absoluta de probabilidade de presença de óleos nos casos de 300 e 500 simulações.	164
Figura 103: Gráfico do tipo box-plot.	166
Figura 104: Fluxograma de apresentação dos resultados probabilísticos.	167
Figura 105: Fluxograma de apresentação dos resultados determinísticos.	167
Figura 106: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m ³ no período de verão a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).	168
Figura 107: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m ³ no período de verão a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).	169
Figura 108: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 8 m ³ no cenário de verão a partir do bloco CE-M-661.	170
Figura 109: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m ³ no período de inverno, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).	171
Figura 110: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m ³ no período de inverno, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).	172
Figura 111: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 8 m ³ no cenário de inverno a partir do bloco CE-M-661.	173
Figura 112: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m ³ , no período de verão, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).	174
Figura 113: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água para vazamento de 200 m ³ , no período de verão, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).	175
Figura 114: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 200 m ³ , no período de verão, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).	176
Figura 115: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 200 m ³ no cenário de verão a partir do bloco CE-M-661.	177

Figura 116: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 200 m ³ , no período de inverno, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).	178
Figura 117: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água para vazamento de 200 m ³ , no período de inverno, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).	179
Figura 118: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 200 m ³ , no período de inverno, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).	180
Figura 119: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 200 m ³ no cenário de inverno a partir do bloco CE-M-661.	181
Figura 120: 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 CE-M-661. Simulação de 60 dias.	183
Figura 121: 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 CE-M-661. Simulação de 60 dias.....	184
Figura 122: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três camadas (2-20 m, 20-40 m e 40-60 m), para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de verão a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 60 dias.	186
Figura 123: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três camadas (500-520 m, 740-760 m e 940-960 m), para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias, no período de verão, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 60 dias.....	187
Figura 124: 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 CE-M-661. Simulação de 60 dias.	188
Figura 125: 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 CE-M-661. Simulação de 60 dias.	189
Figura 126: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de pior caso, no cenário de verão, a partir do bloco CE-M-661.	190

Figura 127: 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 CE-M-661. Simulação de 60 dias.	191
Figura 128: Mapa de correntes do modelo hidrodinâmico para o dia 1 ^o de setembro de 2013, incluído no cenário sazonal de inverno (abril a setembro) com a formação de um vórtice anticiclônico na área destacada em rosa.....	192
Figura 129: Mapa de probabilidade 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 CE-M-661. Simulação de 60 dias.	193
Figura 130: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três camadas (2-20 m, 20-40 m e 40-60 m), para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias, no período de inverno, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 60 dias.....	194
Figura 131: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três camadas (500-520 m, 740-760 m e 940-960 m), para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias, no período de inverno, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 60 dias.	195
Figura 132: 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 CE-M-661. Simulação de 60 dias.	196
Figura 133: 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 CE-M-661. Simulação de 60 dias	197
Figura 134: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de pior caso (13.307 m ³), no cenário de inverno, a partir do bloco CE-M-661.....	198
Figura 135: Rosa dos ventos para o período da simulação crítica.....	201
Figura 136: Rosa de corrente para o período de simulação da simulação crítica.....	202
Figura 137: Resultado da simulação determinística em condição crítica após 12 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m ³ a partir do bloco CE-M-661.	204
Figura 138: Resultado da simulação determinística em condição crítica após 36 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m ³ a partir do bloco CE-M-661.	205

- Figura 139: Resultado da simulação determinística em condição crítica após 60 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do bloco CE-M-661. 206
- Figura 140: Resultado da simulação determinística em condição crítica 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 13.307 m³ a partir do bloco CE-M-661. . 207
- Figura 141: Resultado da simulação determinística em condição crítica 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 13.307 m³ a partir do bloco CE-M-661. . 208
- Figura 142: Resultado da simulação determinística em condição crítica após 304 horas (primeiro toque) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do bloco CE-M-661..... 209
- Figura 143: Resultado da simulação determinística em condição crítica 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 13.307 m³ a partir do bloco CE-M-661. 210
- Figura 144: Resultado da simulação determinística em condição crítica após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do bloco CE-M-661. 211
- Figura 145: Resultado da simulação determinística em condição crítica após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do bloco CE-M-661. 212
- Figura 146: Mapa de concentração de óleo no sedimento do fundo marinho da simulação determinística em condição crítica, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Vazamento de 13.307 m³ a partir do bloco CE-M-661. 213
- Figura 147: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condição crítica de menor tempo de chegada na costa. Volume de 13.307 m³. 214
- Figura 148: Área superficial da mancha de óleo e a massa de óleo no mar durante a simulação da trajetória em condição crítica. 216

Índice das tabelas

Tabela 1: Ponto de vazamento na Bacia do Ceará.	19
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).	58
Tabela 4: Comparação estatística entre os dados de elevação do ROMS e os dados medidos.	70
Tabela 5: Data e local de lançamento dos derivadores da primeira campanha de monitoramento.	89
Tabela 6: Índice de Wilmot das comparações modelo/derivadores.	98
Tabela 7: Resumo dos cenários de vazamento simulados.	111
Tabela 8: Equações de regressão para estimativa dos parâmetros K_{oc} e K_{ow} para diferentes componentes químicos. Fonte: Reed, 2001.	123
Tabela 9: Lista de Unidades de Conservação identificadas na área costeiro-oceânica onde se verifica probabilidade de presença de óleo neste estudo. Características das UCs e a divisão adotada em marinhas e costeiras.	131
Tabela 10: Parâmetros físicos e químicos utilizados no modelo de óleo.	135
Tabela 11: Constantes físicas utilizadas no modelo de óleo.	136
Tabela 12: Parâmetros numéricos utilizados no modelo de óleo.	137
Tabela 13: Características do óleo escolhido do banco de dados do modelo OSCAR e utilizado nas simulações.	140
Tabela 14: Curva de destilação do óleo utilizado no estudo.	141
Tabela 15: Componentes calculados pelo OSCAR a partir da curva de destilação.	142
Tabela 16: Ocorrência mensal de direção dos ventos para o ponto mais próximo do local do vazamento.	151
Tabela 17: Ocorrência mensal de intensidade dos ventos para o ponto mais próximo do local do vazamento.	151

Tabela 18: Ocorrência mensal de direção das correntes para o ponto mais próximo do local do vazamento do bloco CE-M-661.	155
Tabela 19: Ocorrência mensal de intensidade das correntes para o ponto mais próximo do local do vazamento do bloco CE-M-661.	155
Tabela 20: Área com toque de óleo, massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas Unidades de Conservação marinhas com possibilidade de serem atingidas em um evento derrame de médio porte (200 m ³) a partir do bloco CE-M-661, nos cenários de verão e inverno. Os resultados considerados são os de superfície.	181
Tabela 21: Área com toque de óleo, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas Unidades de Conservação marinhas com possibilidade de serem atingidas em um evento derrame de médio porte (200 m ³) a partir do bloco CE-M-661, nos cenários de verão e inverno. Os resultados considerados são os de coluna d'água.....	182
Tabela 22: Área com toque de óleo, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas Unidades de Conservação marinhas com possibilidade de serem atingidas em um evento de blowout (13.307 m ³) a partir do bloco CE-M-661, nos cenários de verão e inverno. Os resultados considerados são os de coluna d'água.....	199
Tabela 23: Informações da simulação determinística crítica considerada para um evento de derrame de grande volume (13.307 m ³), a partir do bloco CE-M-661.....	200
Tabela 24: Ocorrência conjunta entre direção e intensidade dos ventos para o ponto mais próximo do local do vazamento para o período da simulação crítica.	201
Tabela 25: Estatística do vento para o período da simulação crítica.	201
Tabela 26: Ocorrência conjunta entre direção e intensidade de corrente para o ponto mais próximo do local do vazamento para o período da simulação crítica.	202
Tabela 27: Estatística de corrente para o período da simulação crítica.	202
Tabela 28: Balanço de massa do óleo durante a simulação em valores percentuais e de massa de óleo.	215
Tabela 29: Área superficial, massa de óleo e espessura máxima da mancha de óleo durante a simulação.....	217

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 na modelagem numérica de transporte de óleo no mar para os cenários acidentais de um vazamento localizado no ponto próximo ao vértice direito superior do bloco CE-M-661, Bacia Ceará, em dois períodos sazonais.

Como a locação definitiva do poço só será conhecida após a análise da sísmica 3D a ser realizada na Bacia do Ceará, a escolha do Poço Itarema do bloco como ponto de vazamento de óleo visou prover um cenário mais realístico, uma vez que está localizado na porção superior do bloco (isóbatas acima de 800 m), área de interesse para perfuração, pela TOTAL, dentro do bloco.

A localização do ponto de vazamento, assim como a localização do bloco, é apresentada na Figura 1 e as coordenadas do ponto na Tabela 1.

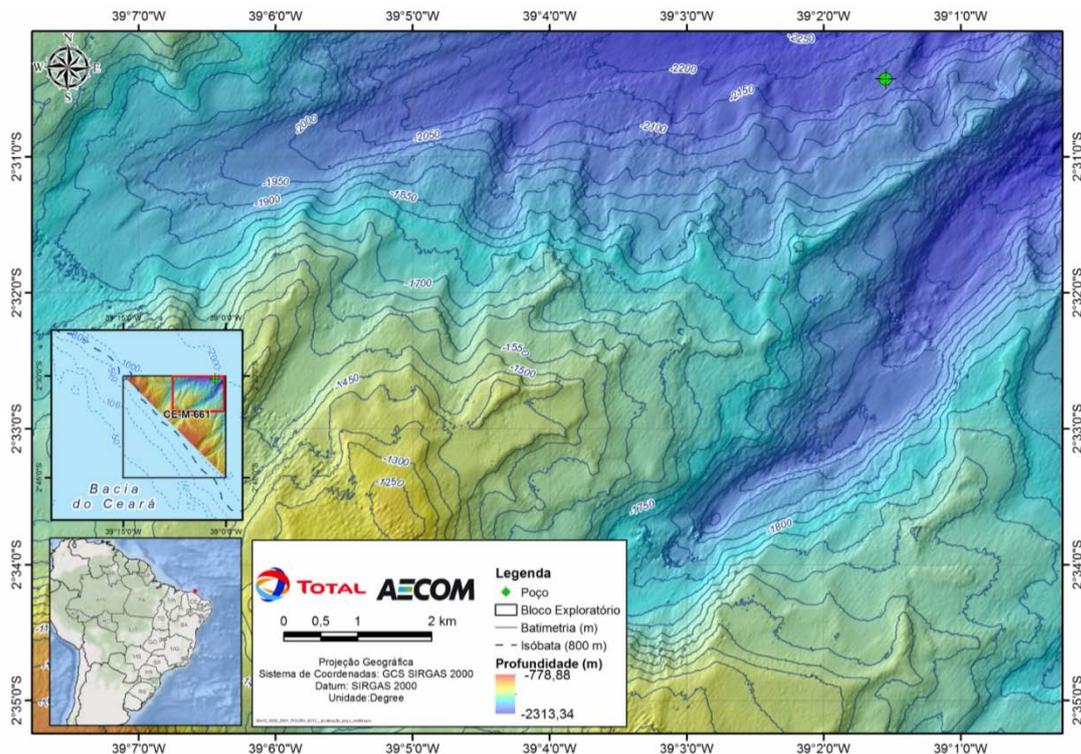


Figura 1: Localização da área de interesse da TOTAL para exploração dentro dos limites do bloco CE-M-661 e locação proposta para o poço, considerada na modelagem de dispersão de óleo.

Tabela 1: Ponto de vazamento na Bacia do Ceará.

Bloco do ponto de vazamento	Coordenadas	Datum	Profundidade
CE-M-661	2°30'25,603" S e 39°1'32,680" W	SIRGAS 2000	2140 m

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

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 forças 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 a partir do Bloco CE-M-661.

2.1. Modelo Numérico Utilizado

Para as simulações hidrodinâmicas na região do Bloco CE-M-661 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 isopicnais (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 β 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:

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

Equação da conservação da quantidade de movimento na direção zonal:

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

Equação da conservação da quantidade de movimento na direção meridional:

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

Equação da conservação de calor:

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

Equação da conservação de sal:

$$\frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial SUD}{\partial x} + \frac{\partial SVD}{\partial y} + \frac{\partial S \omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] + F_s \quad (5)$$

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, ρ é a densidade, ρ_0 é a densidade de referência, ρ' é a anomalia de densidade, θ é a temperatura potencial, S é a salinidade, KM é o coeficiente de viscosidade cinemática vertical, KH é o coeficiente de difusão de calor vertical, $\partial R / \partial z$ é o termo de fluxo de calor radiativo e ω 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
TNU2 (m ⁴ /s)	0,0	Operador biarmônico de difusão horizontal de traçadores
VISC2 (m ² /s)	5,0	Coeficiente de viscosidade horizontal
AKT_BAK (m ² /s)	1,0x10 ⁻⁶	Coeficiente vertical de mistura para traçadores
AKV_BAK (m ² /s)	1,0x10 ⁻⁵	Coeficiente vertical de mistura de momentum
AKK_BAK (m ² /s)	5,0x10 ⁻⁶	Coeficiente vertical de mistura para energia cinética turbulenta
RDRG (m/s)	3,0x10 ⁻⁴	Coeficiente linear de atrito com o fundo
RDRG2	3,0x10 ⁻³	Coeficiente quadrático de atrito com o fundo
ZOB (m)	2,0x10 ⁻²	Rugosidade do fundo
ZOS (m)	2,0x10 ⁻²	Rugosidade da superfície

2.2. Domínio do Modelo

Para simular a hidrodinâmica da região de influência do Bloco CE-M-661, foi projetada uma grade numérica (Figura 2), que se estende de 5,2° S a 8,0° N, e 35,5° W a 51,75° 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 tanto para que as principais feições batimétricas e da linha de costa pudessem ser reproduzidas de forma satisfatória (Figura 3) como para permitir um desempenho computacional compatível. Essa escolha resultou em uma grade com 55.593 pontos em cada nível horizontal (camada sigma), com 30 níveis verticais (camadas sigma).

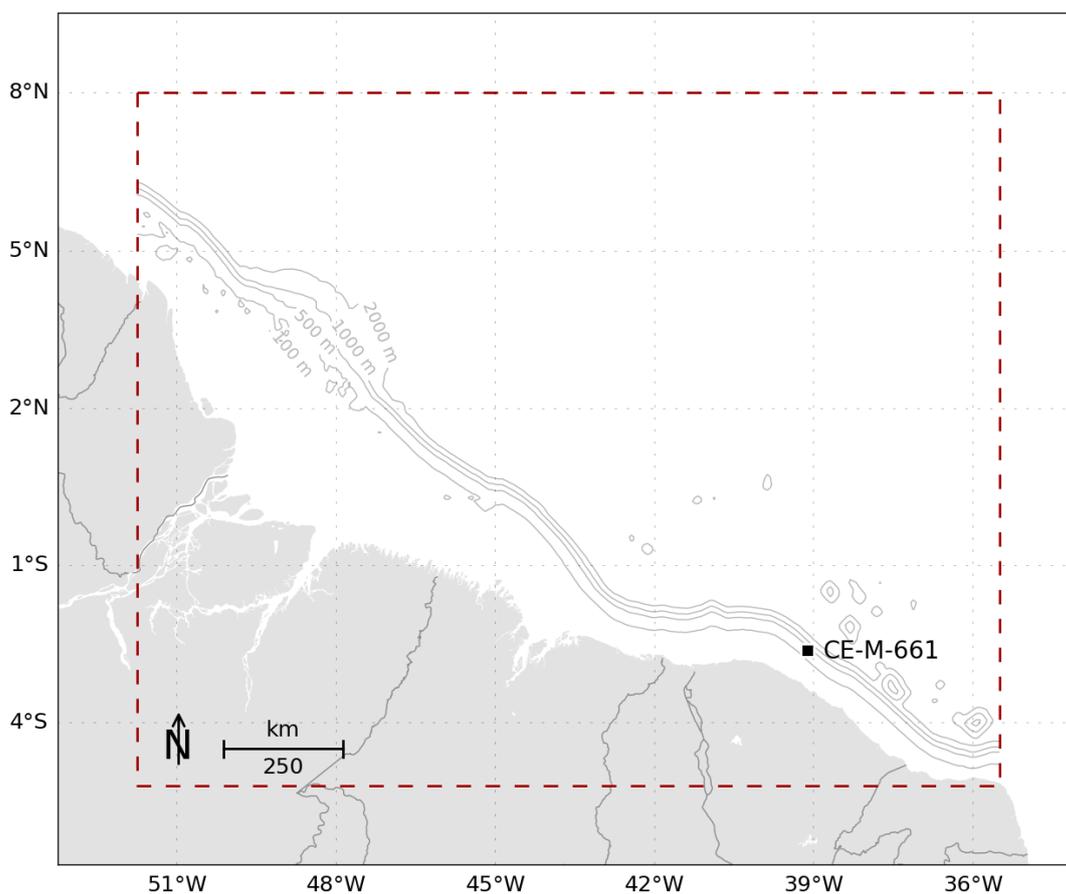


Figura 2: Região de modelagem. Polígono vermelho pontilhado representa os limites da grade do modelo hidrodinâmico.

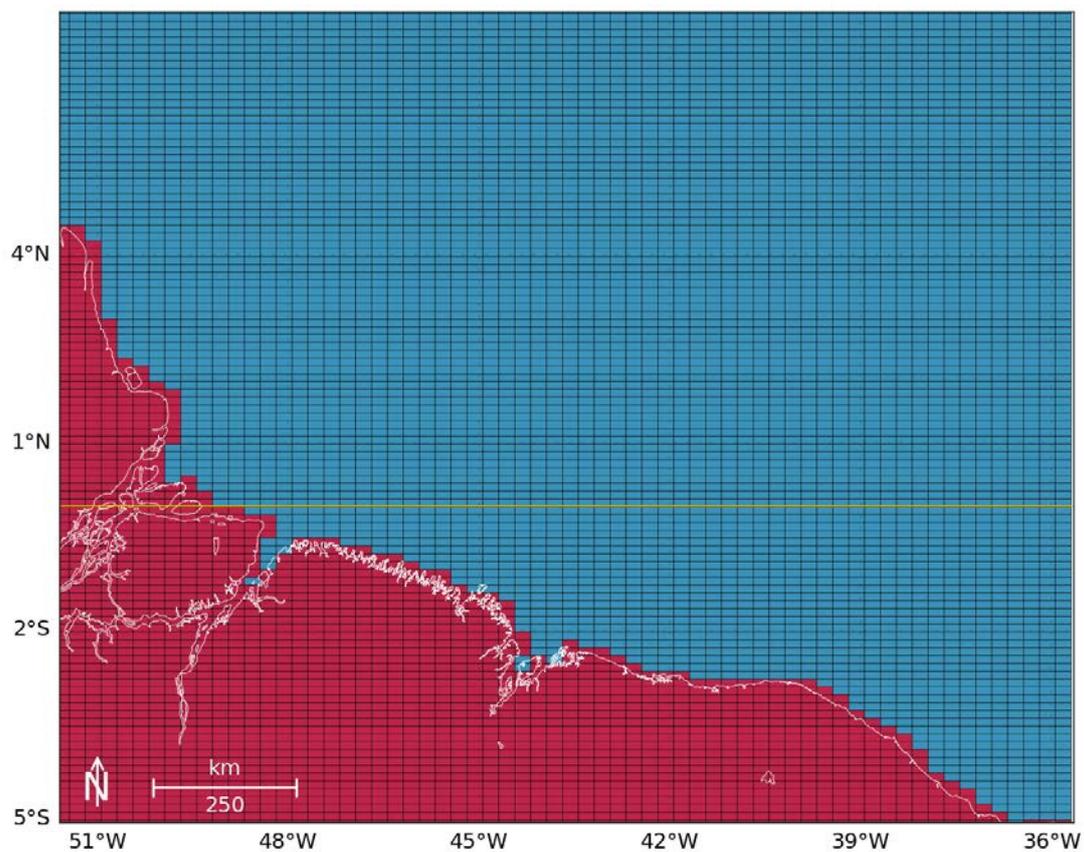


Figura 3: Detalhamento da representação da linha de costa pela grade do modelo hidrodinâmico. Os retângulos em vermelho representam as células consideradas como terra pelo modelo, e a linha branca mostra a linha de costa da região. A linha do Equador é representada pela cor amarela.

2.3. 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 referente ao Bloco CE-M-661, 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 $1/4^\circ$ 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 ECMWF (*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*, que passam por um criterioso controle de qualidade (LARNICOL et al., 2006).

O modelo foi inicializado com os resultados da simulação do MyOcean, interpolados para a resolução espacial (vertical e horizontal) da grade usada no ROMS, o que é considerado um aninhamento de modelos. Nesse caso, se está aninhando o modelo regional para a região simulada (ROMS) em um modelo global (MyOcean) em modo *offline*, ou seja, as condições de contorno usadas no modelo de menor área e maior resolução foram extraídas de um modelo de maior área e menor resolução rodado previamente. Exemplos dos campos iniciais com dados do MyOcean fornecidos ao modelo são apresentados da Figura 4 a Figura 7.

O modelo foi configurado para simular as correntes da região no período entre dezembro de 2012 e fevereiro de 2014. Esse período é relativo a disponibilidade de dados do MyOcean, que se inicia em 26/12/2012.

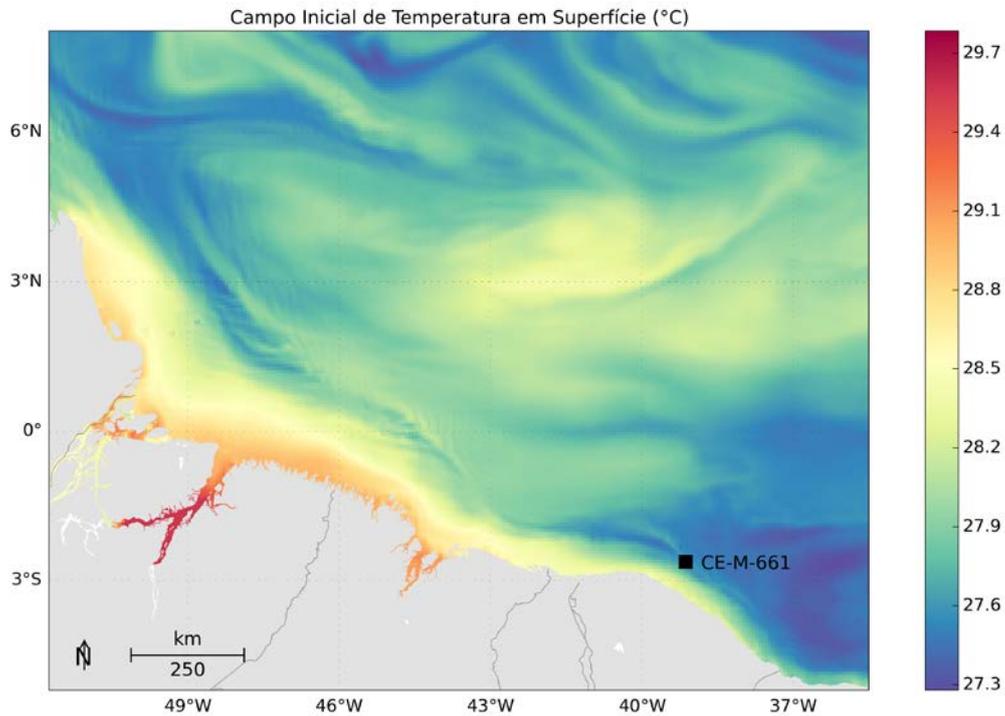


Figura 4: Campo de temperatura superficial (°C) no dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.

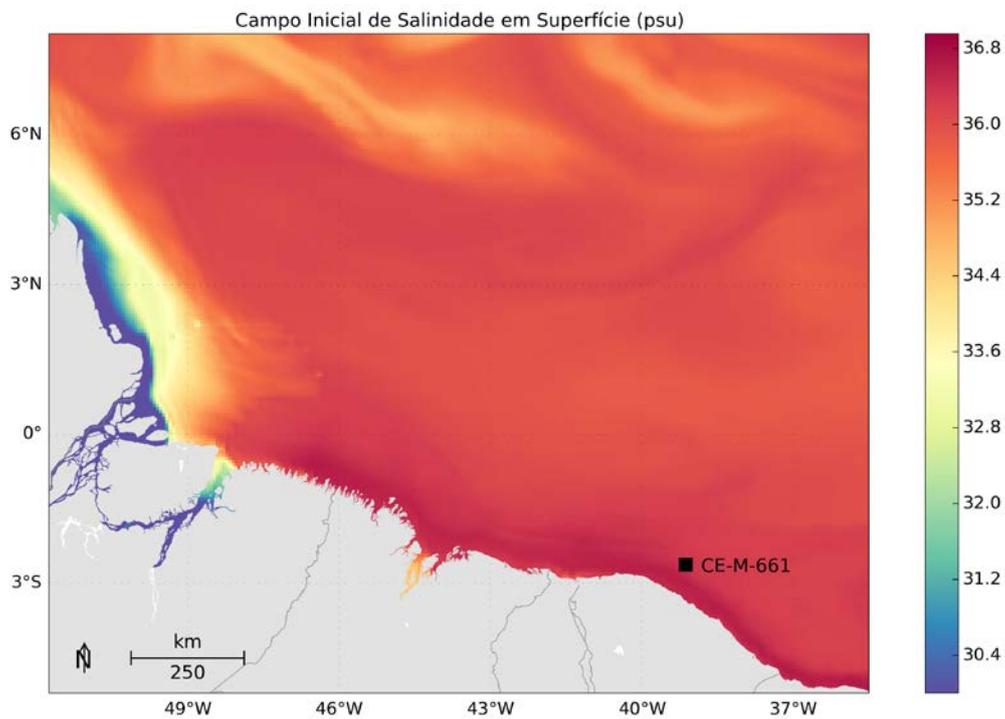


Figura 5: Campo de salinidade superficial no dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.

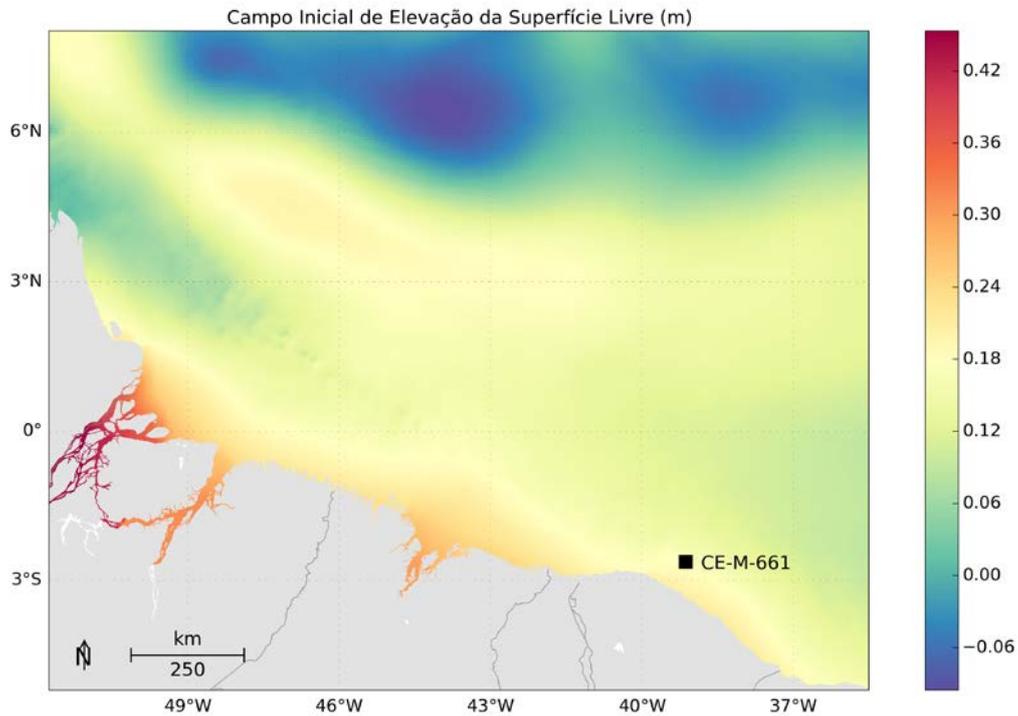


Figura 6: Campo de Elevação da Superfície Livre (m) do dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.

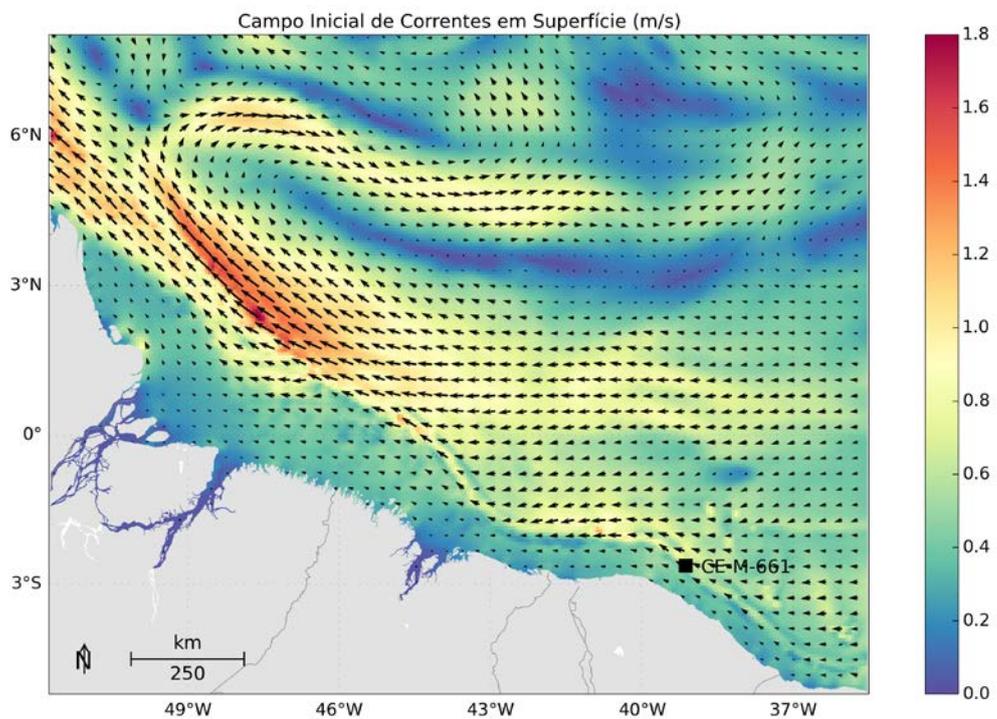


Figura 7: Campo de Correntes superficiais (m/s) do dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.

2.4. 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.

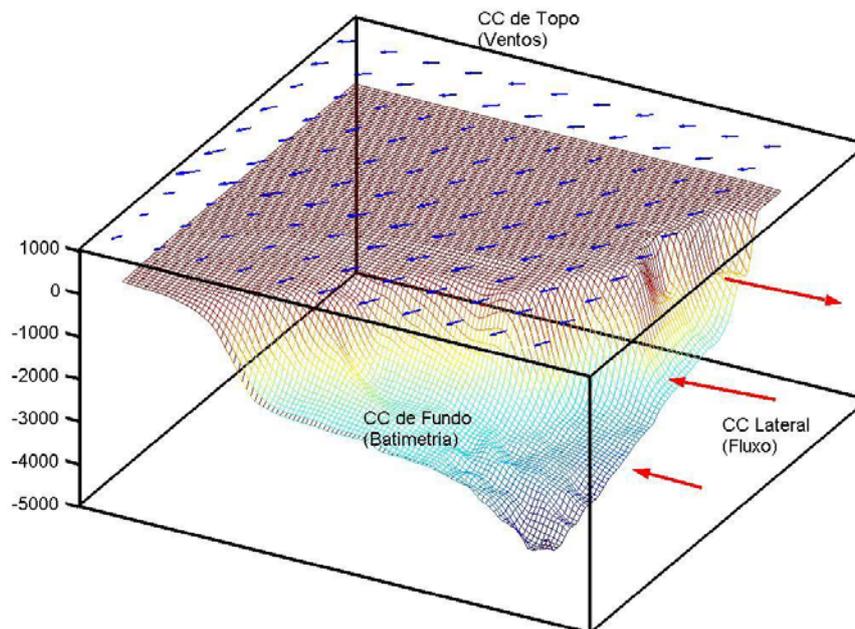


Figura 8: Representação esquemática das condições de contorno a serem definidas em um modelo de área limitada.

2.4.1 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, 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).

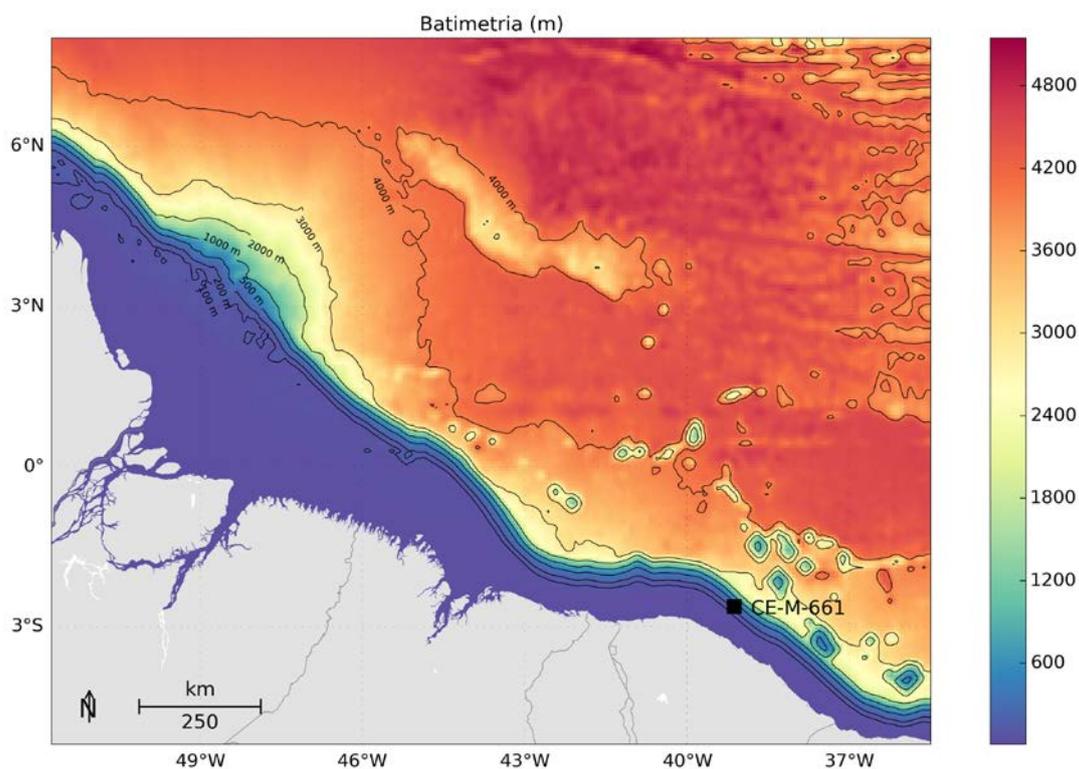


Figura 9: Batimetria da grade do modelo numérico.

Vale ressaltar que é fundamental que se tenha uma topografia de fundo representativa da região para que o modelo hidrodinâmico possa simular a circulação de forma adequada. 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). Esta carta é a que apresenta maior cobertura no domínio de modelagem.

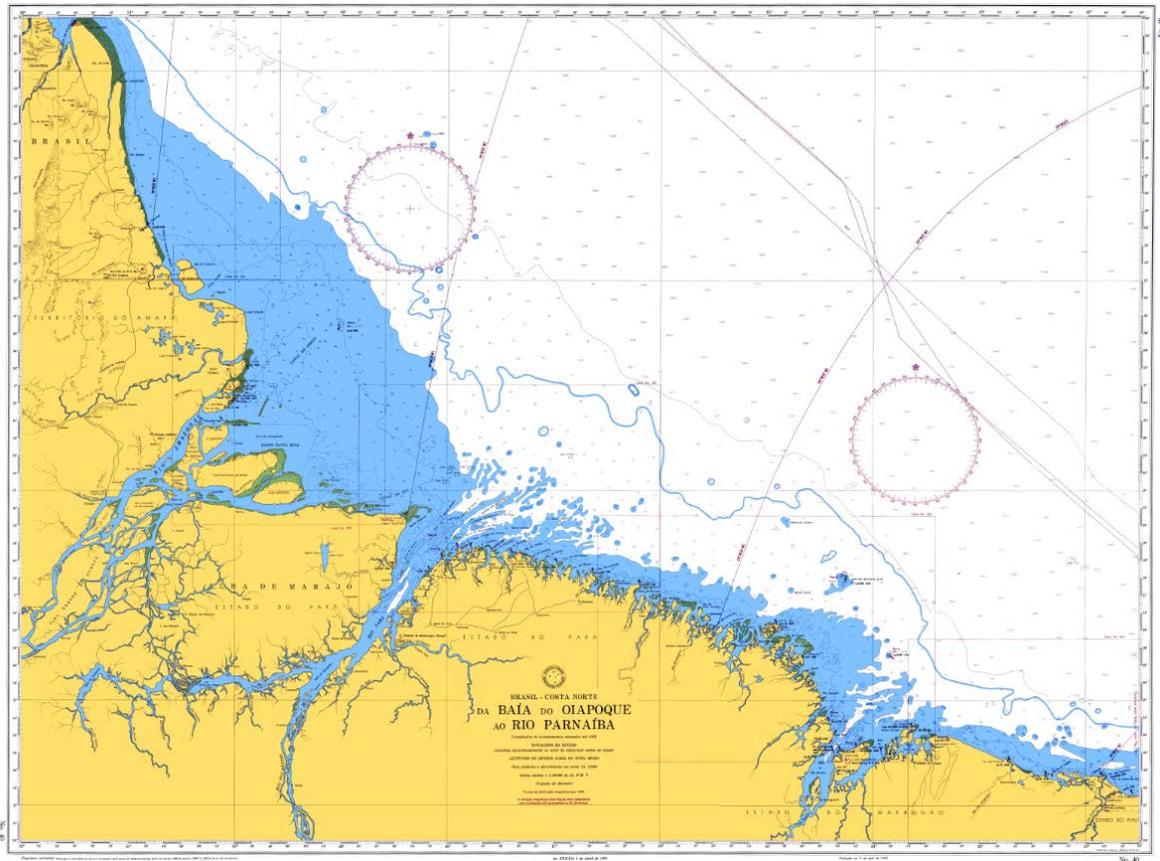


Figura 10: Carta Náutica 040 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN).

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.

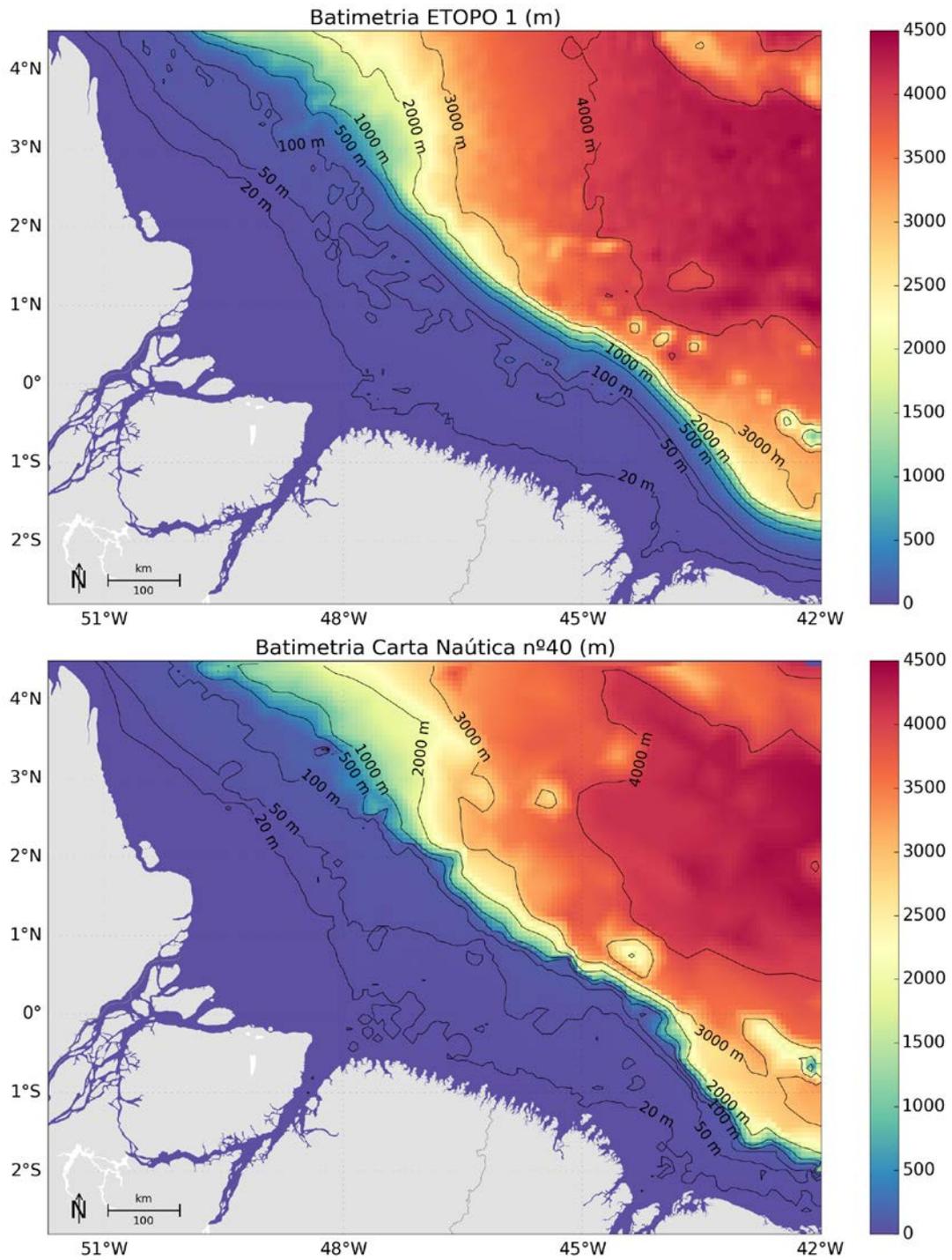


Figura 11: Batimetria do ETOPO1 (painel superior) e da Carta Náutica 040 (painel inferior) interpoladas para a grade do ROMS.

Embora a carta 040 seja a de maior abrangência ao longo do domínio de modelagem, esta não cobre a região da Bacia do Ceará. As cartas náuticas 21700 (de Tutóia à Ponta dos Patos), 21800 (da Ponta Itapagé a Fortaleza) e 21900 (da Ponta Maceió ao Cabo Calcanhar) foram digitalizadas para comparação da batimetria na região da Bacia do Ceará. Na Figura 12 é apresentada a comparação para a região da Bacia do Ceará.

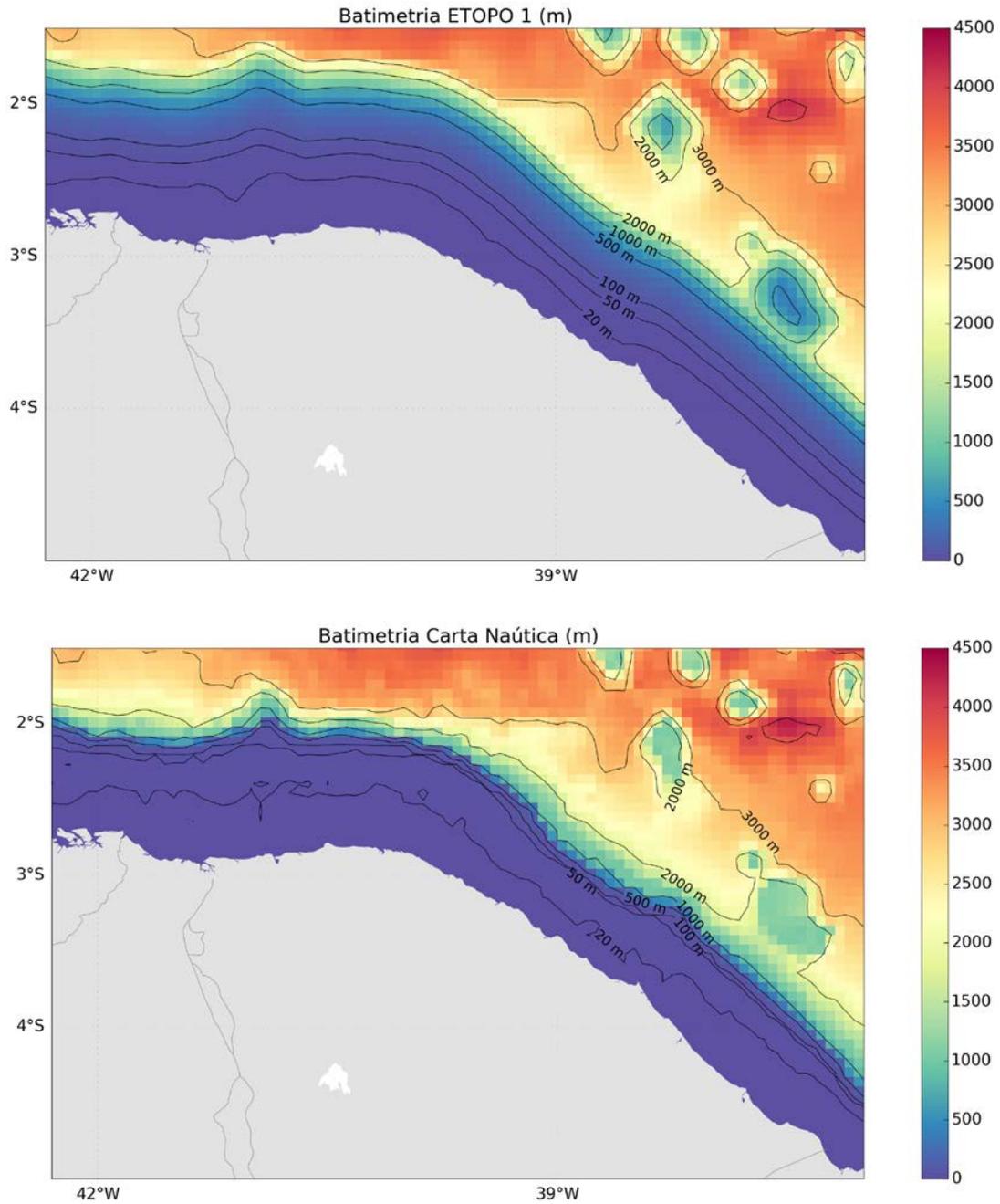


Figura 12: Batimetria do ETOPO1 (painel superior) e das Cartas Náuticas 21700, 21800 e 21900 (painel inferior) interpoladas para a grade do ROMS.

2.4.2 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 $1,8^\circ$ e temporal de 6 horas, para todo período de modelagem (dezembro de 2012 a fevereiro de 2014). Na Figura 13 pode ser observada a distribuição espacial dos pontos de grade do NCEP na região do domínio de modelagem.

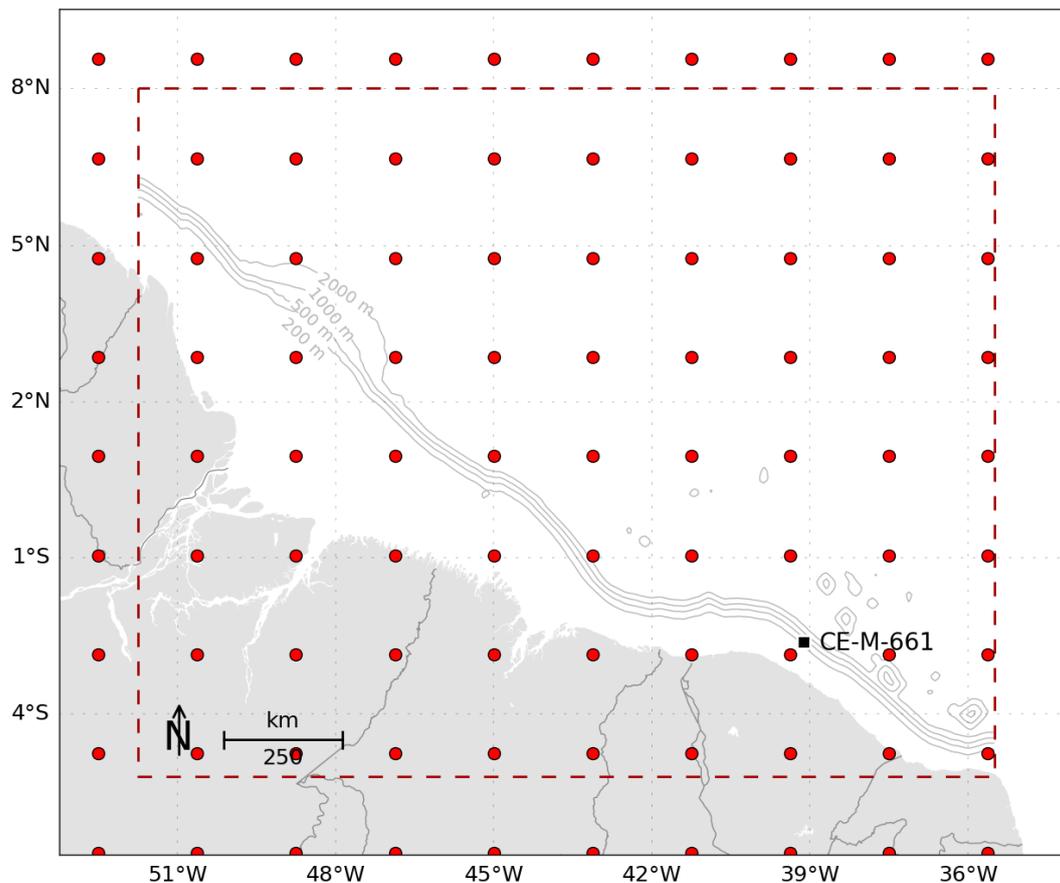
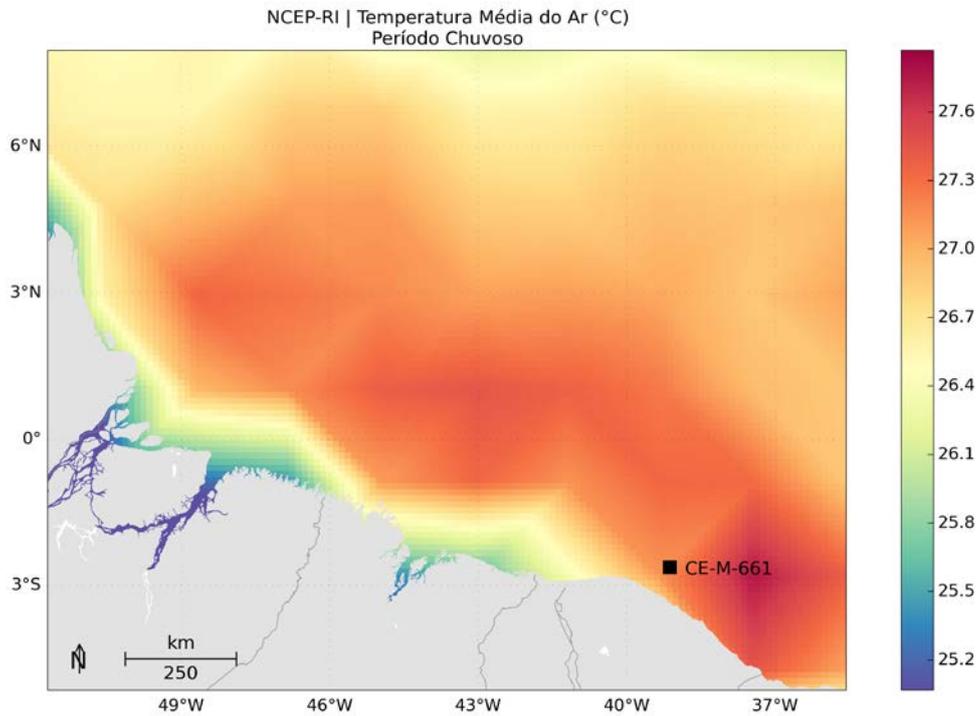


Figura 13: Pontos de Grade do NCEP (pontos vermelhos) na região do domínio de modelagem (retângulo branco).

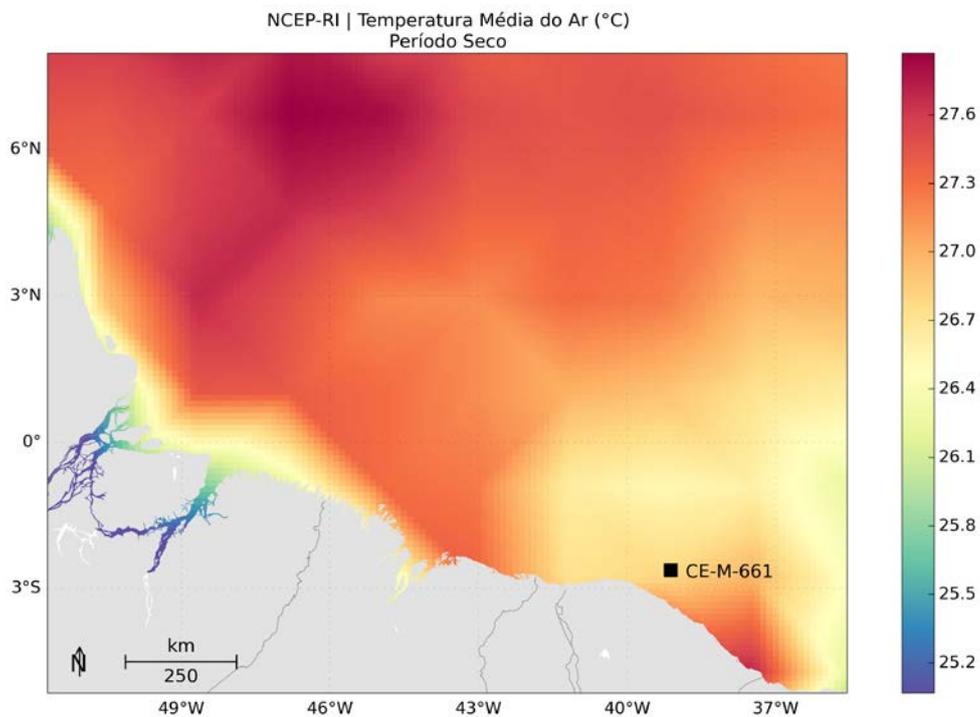
A base de dados conhecida como “Reanálises do NCEP” foi originada a partir de uma cooperação entre o NCEP e o NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), com intuito de produzir, inicialmente, uma rede de 40 anos de dados meteorológicos globais com base nas análises dos campos atmosféricos (KALNAY *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 (oito) variáveis meteorológicas necessárias para forçar o ROMS.

Como exemplo dos campos atmosféricos utilizados como condição de contorno de topo do modelo, da Figura 14 à Figura 20 são apresentados os campos médios de cada variável, calculados para o período chuvoso (janeiro a junho) e para o período seco (julho a dezembro).

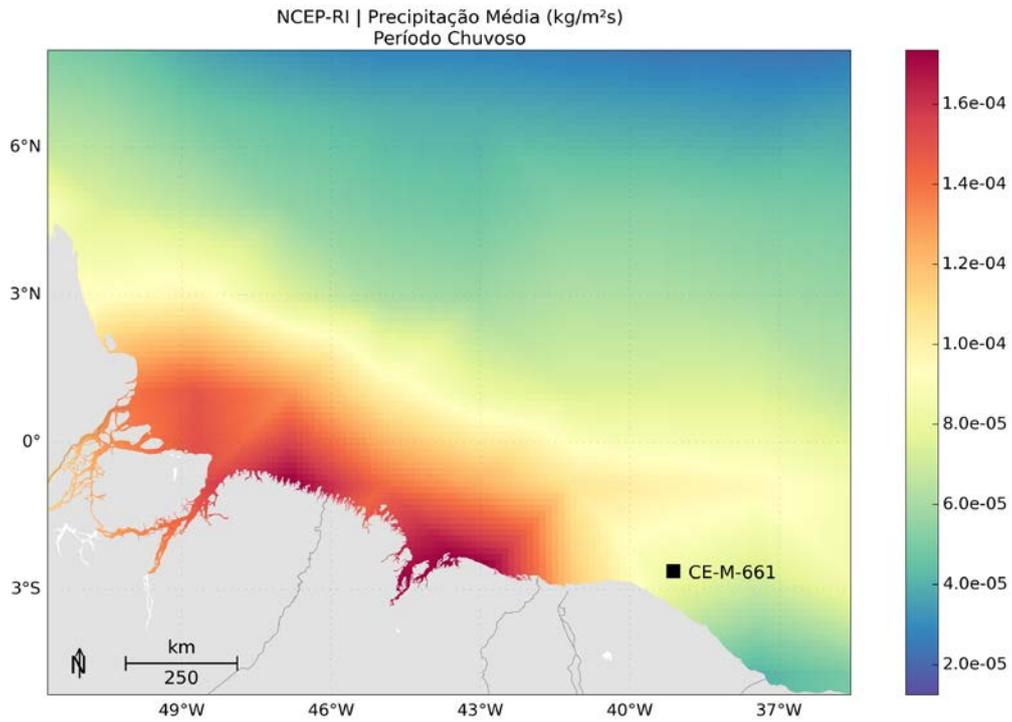


(a)

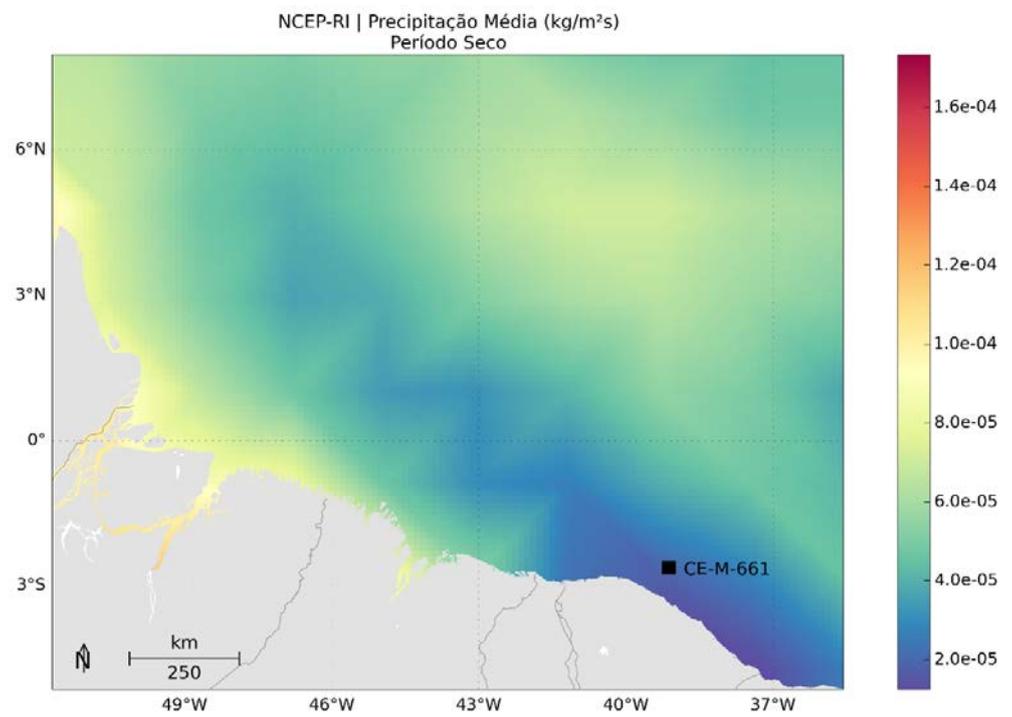


(b)

Figura 14: 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).

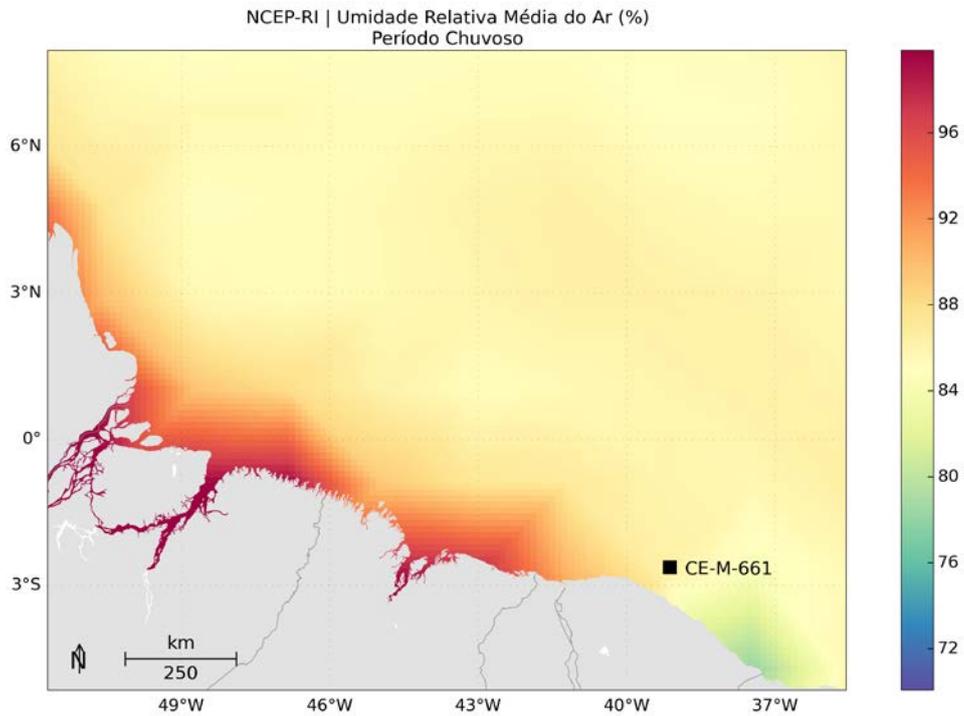


(a)

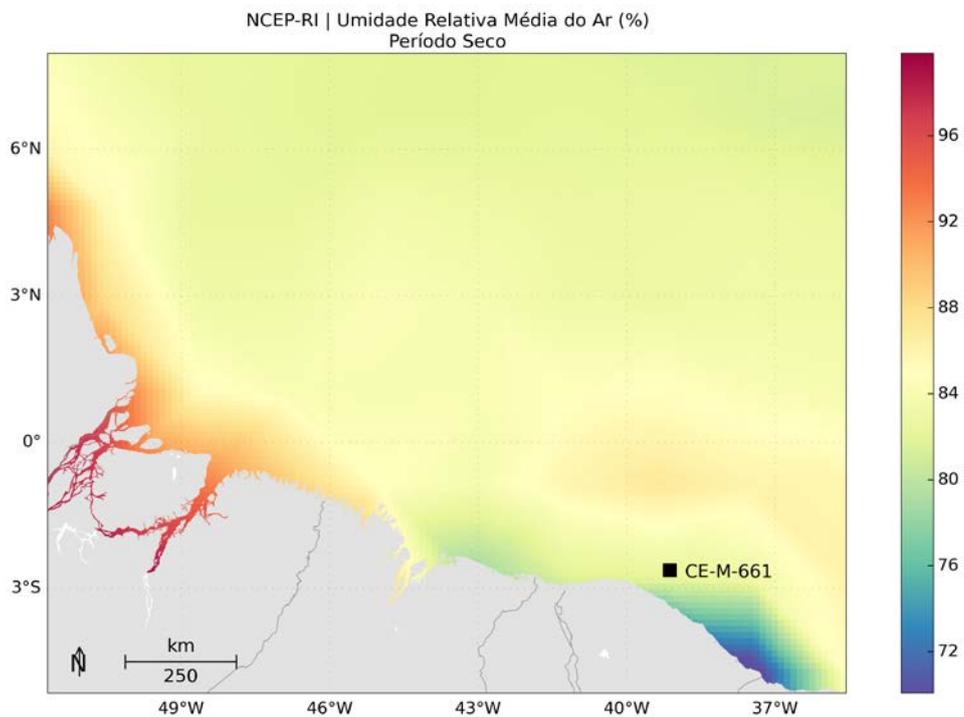


(b)

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

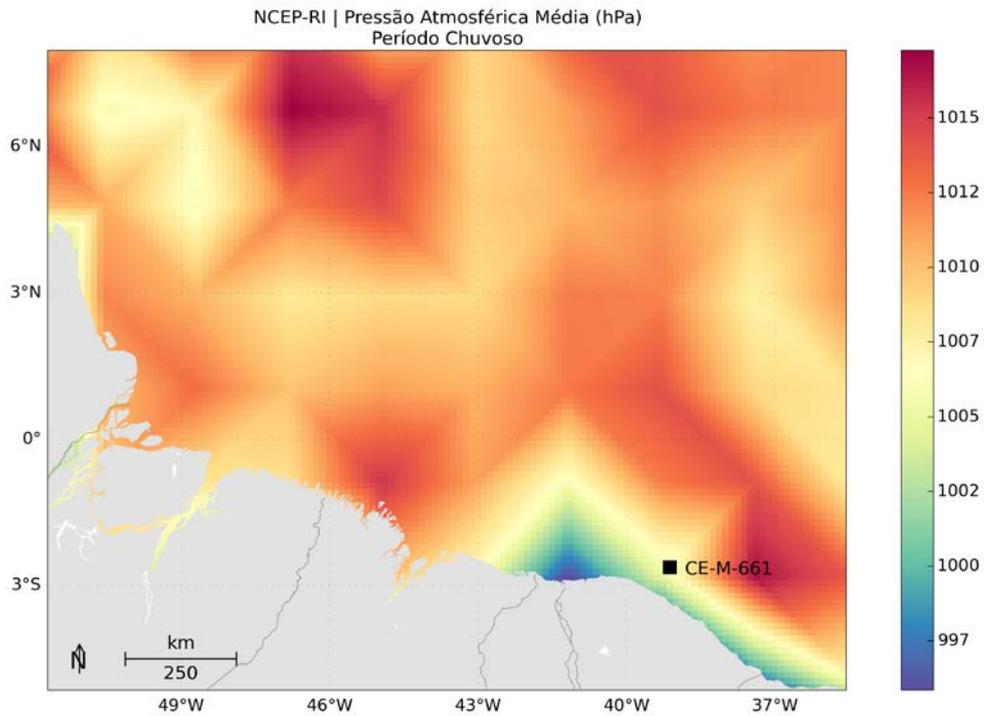


(a)

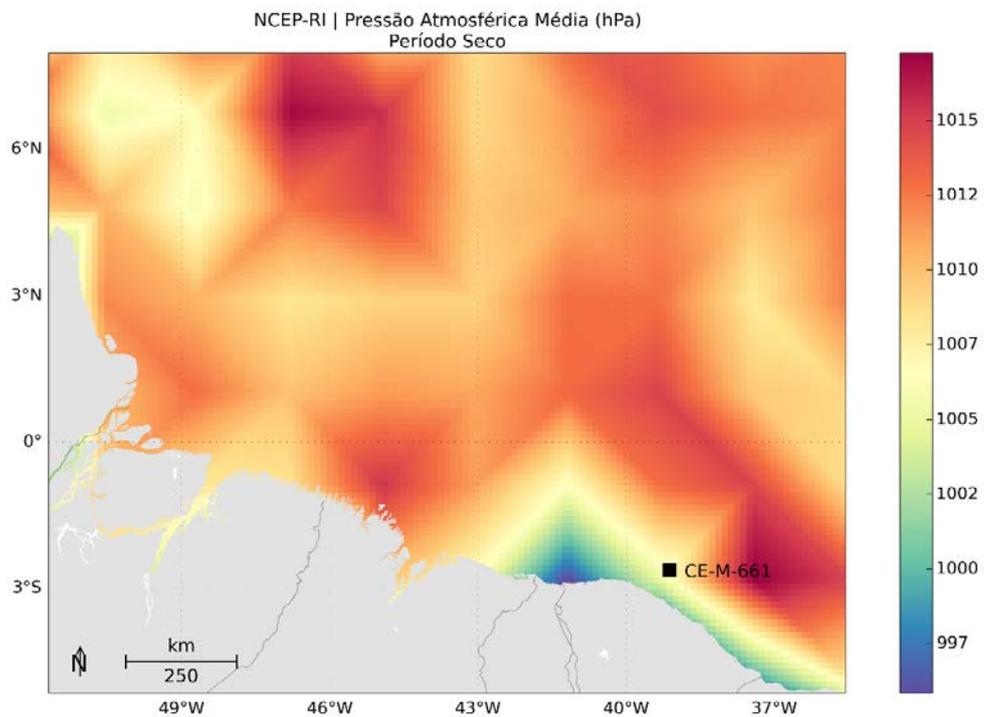


(b)

Figura 16: 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).

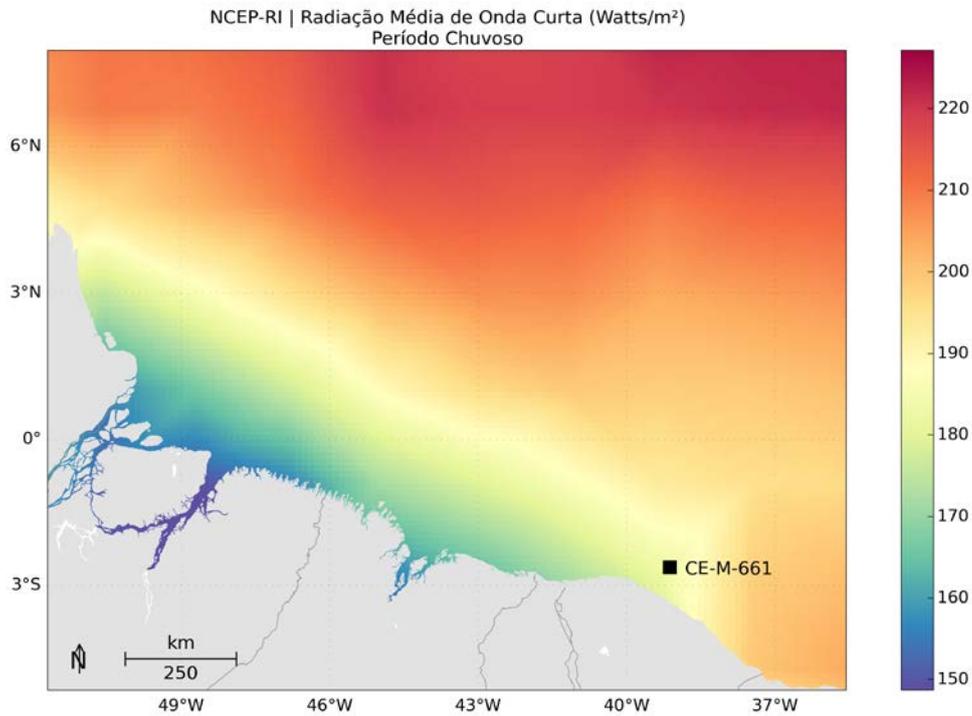


(a)

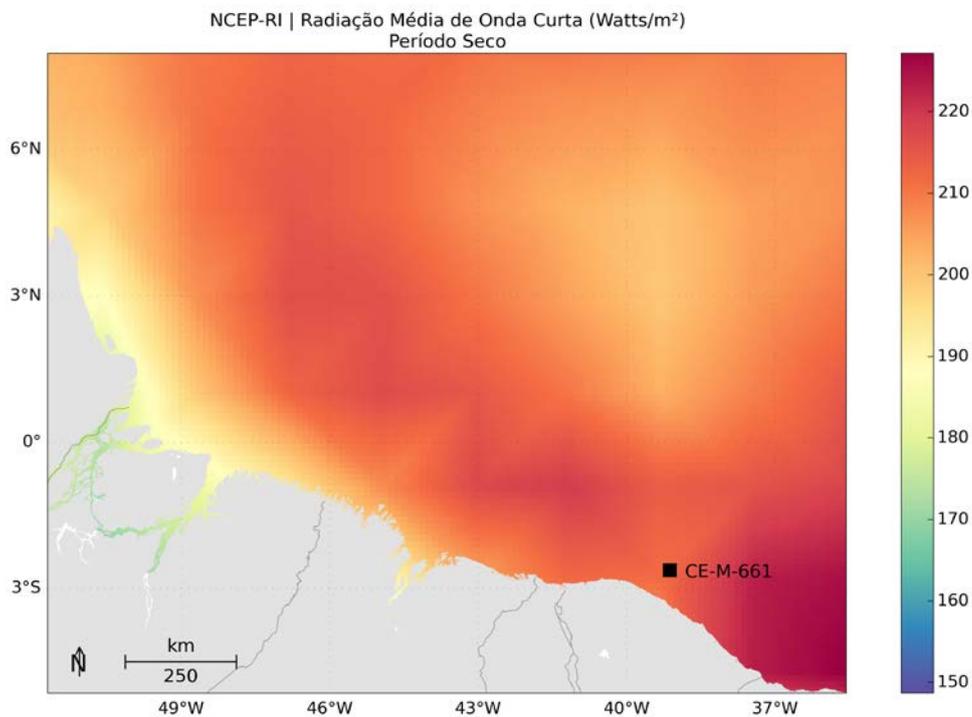


(b)

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

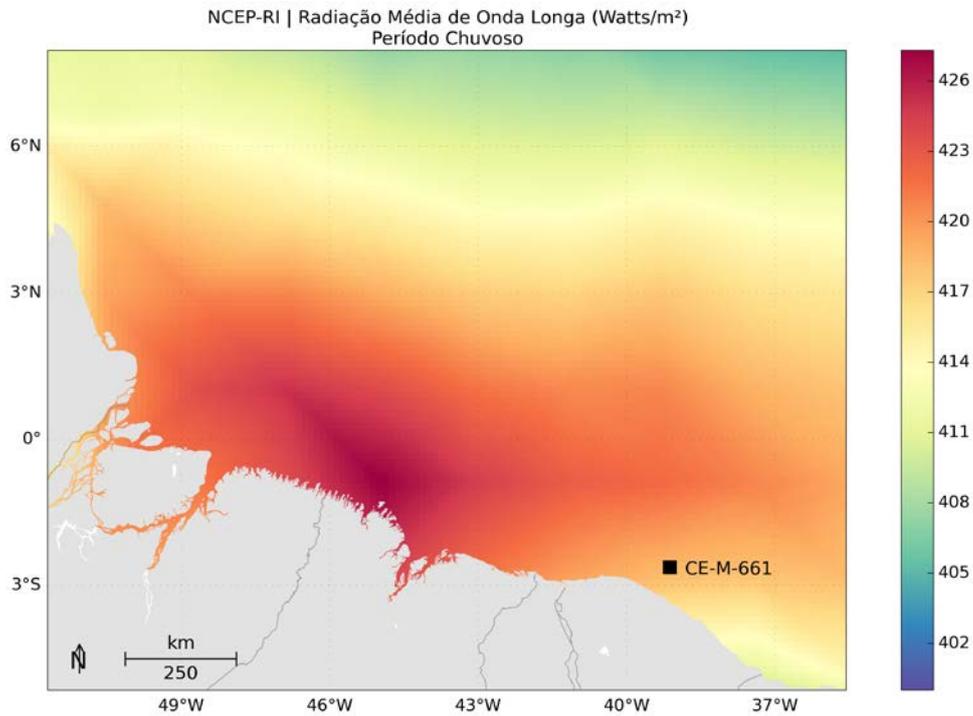


(a)

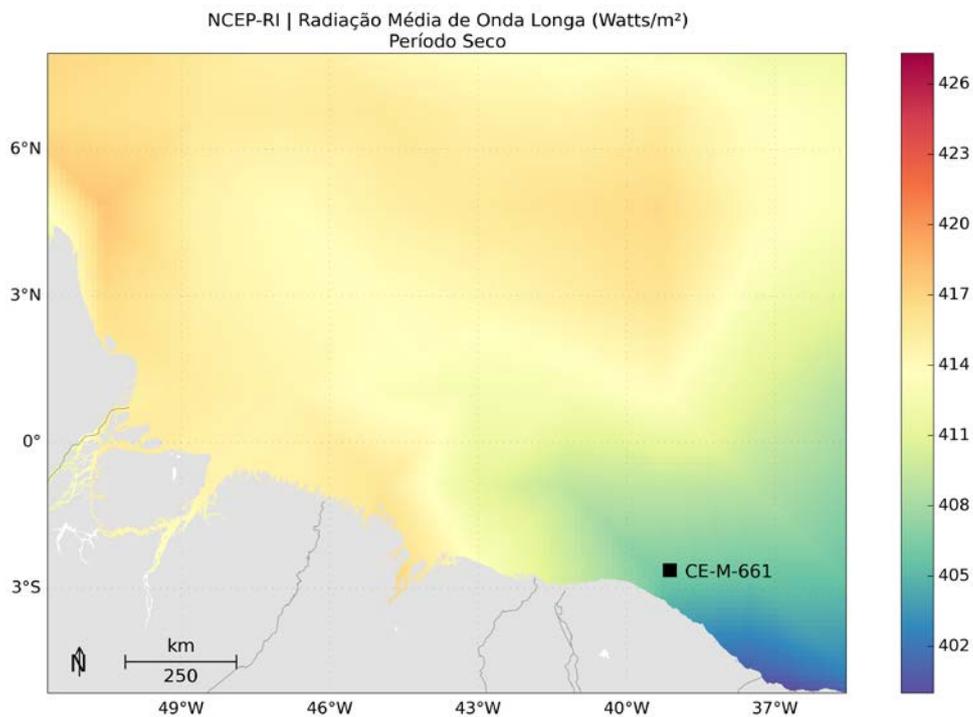


(b)

Figura 18: 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 19: 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).

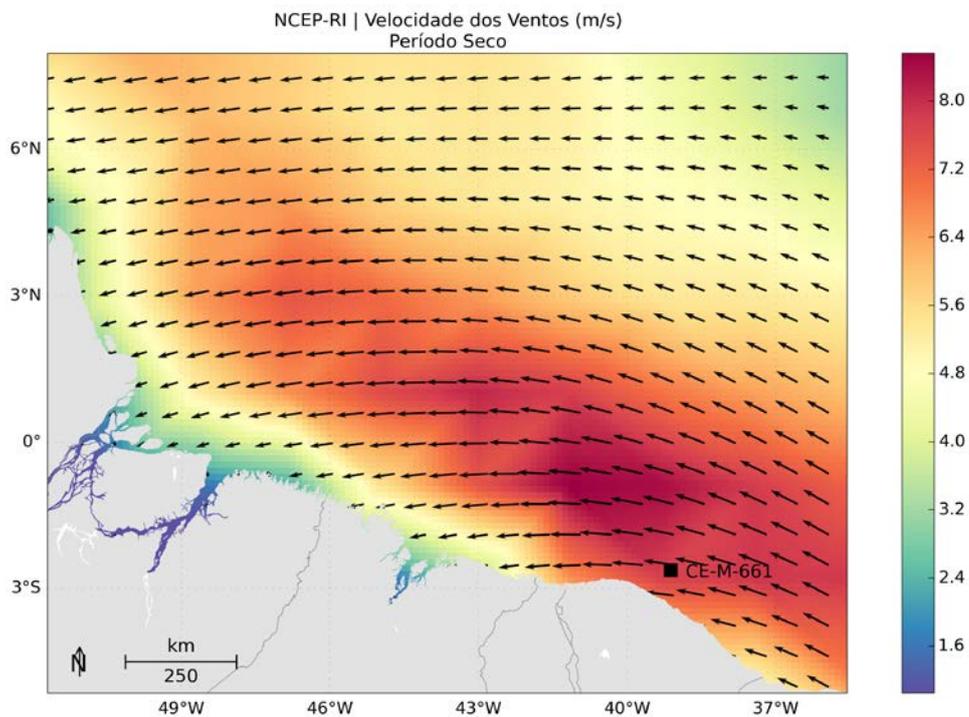
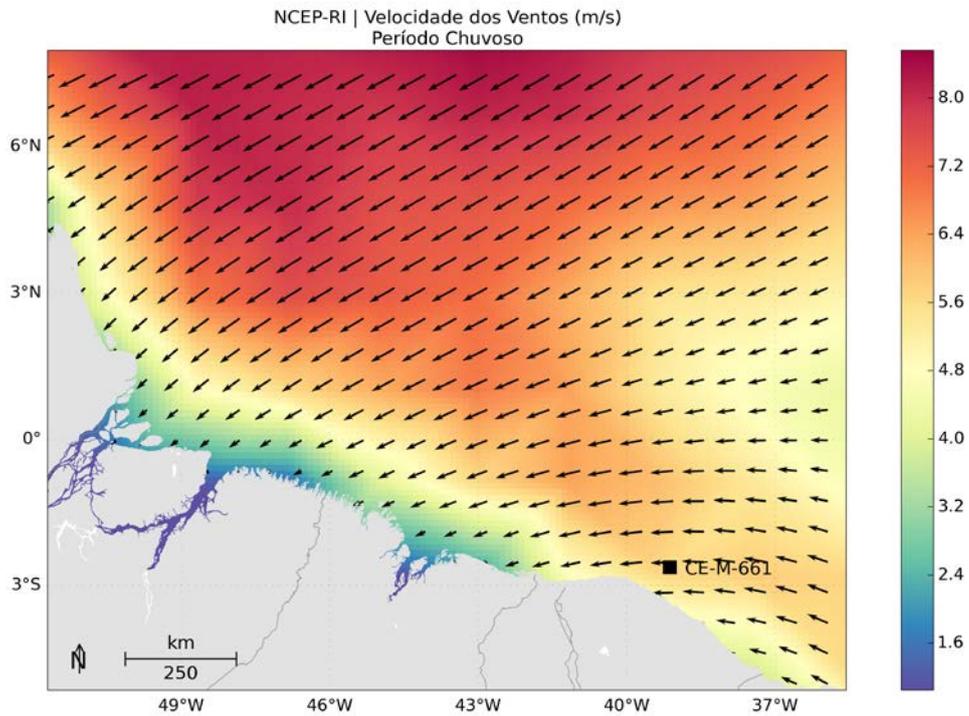


Figura 20: Campo médio dos dados de vento da Reanálise I utilizados como forçante para o período chuvoso (a) e para o período seco (b).

2.4.3 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 $1/4^\circ$ 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.

2.4.4 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 21 à Figura 28, são apresentados os campos de amplitude e fase das 8 (oito) 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.

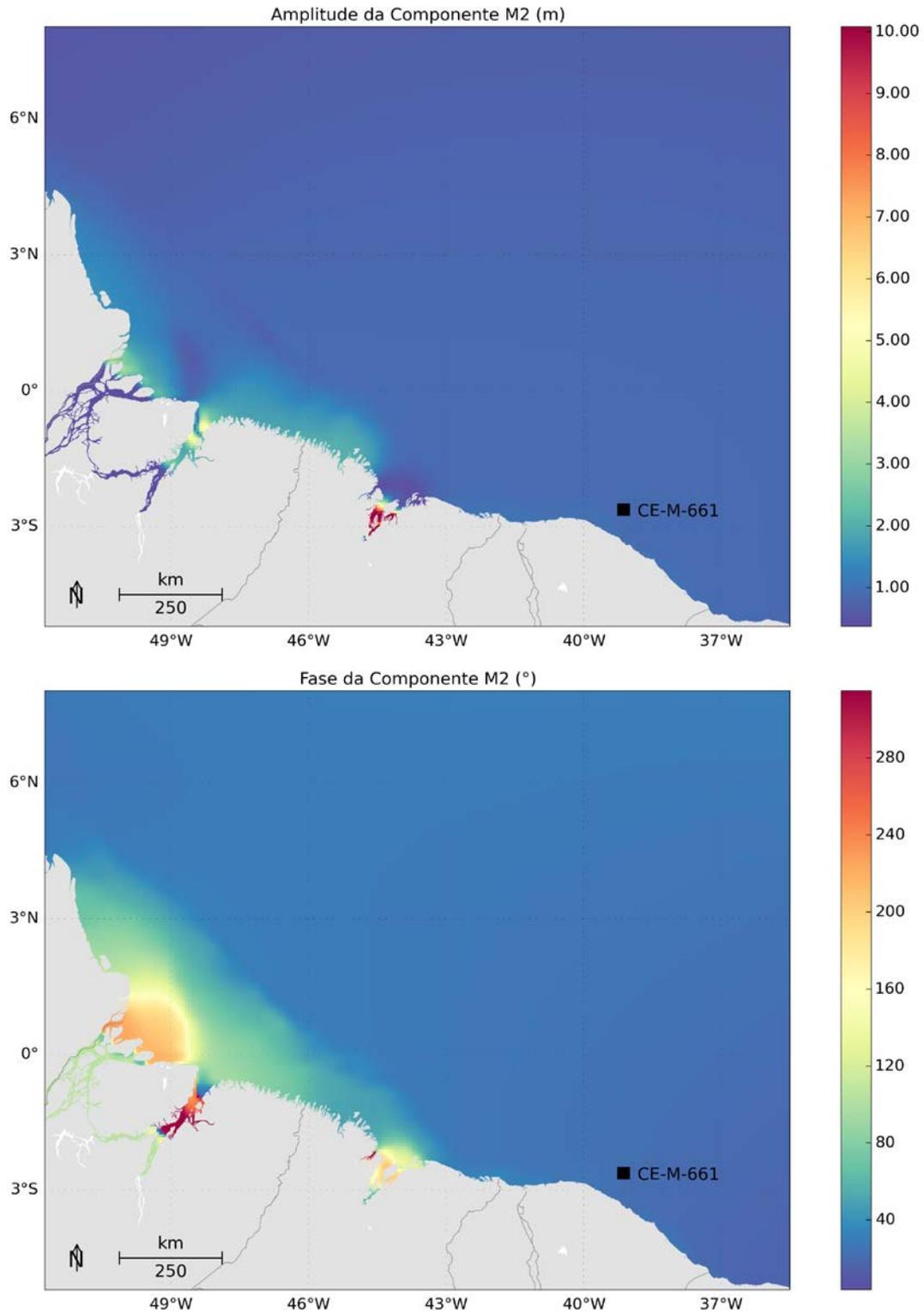


Figura 21: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente M2. Fonte (TPX07)

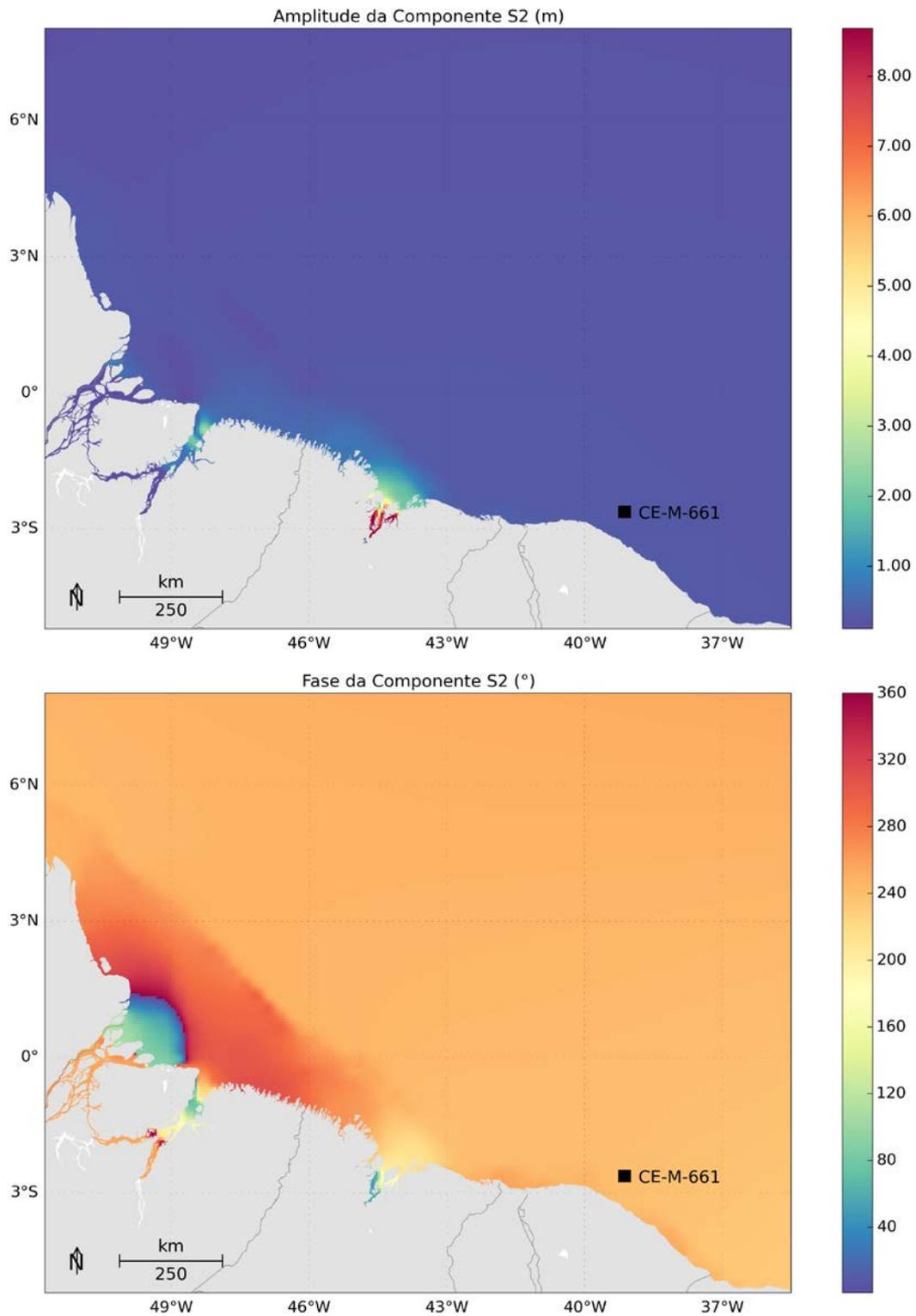


Figura 22: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente S2. Fonte (TPX07).

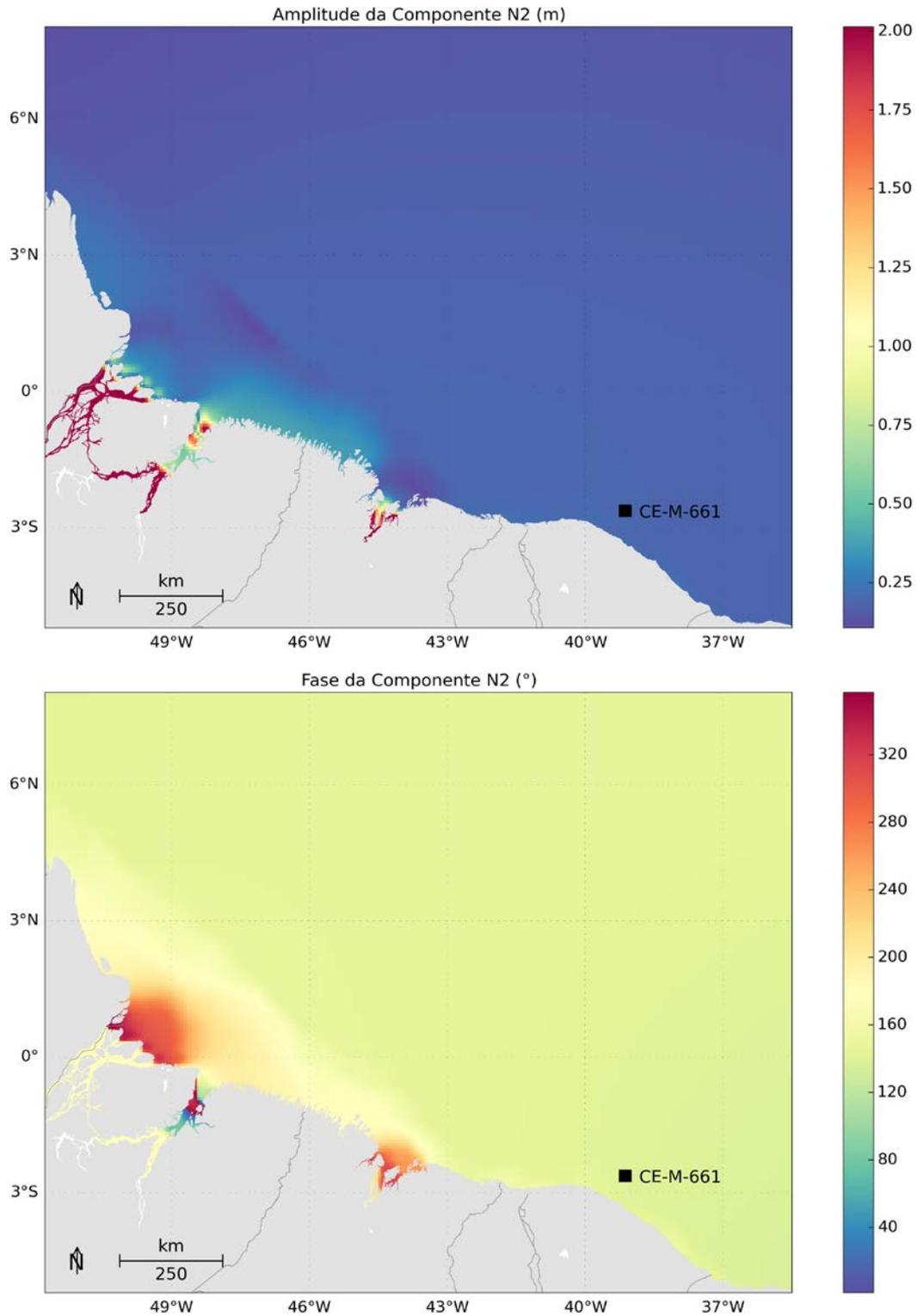


Figura 23: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente N2. Fonte (TPX07)

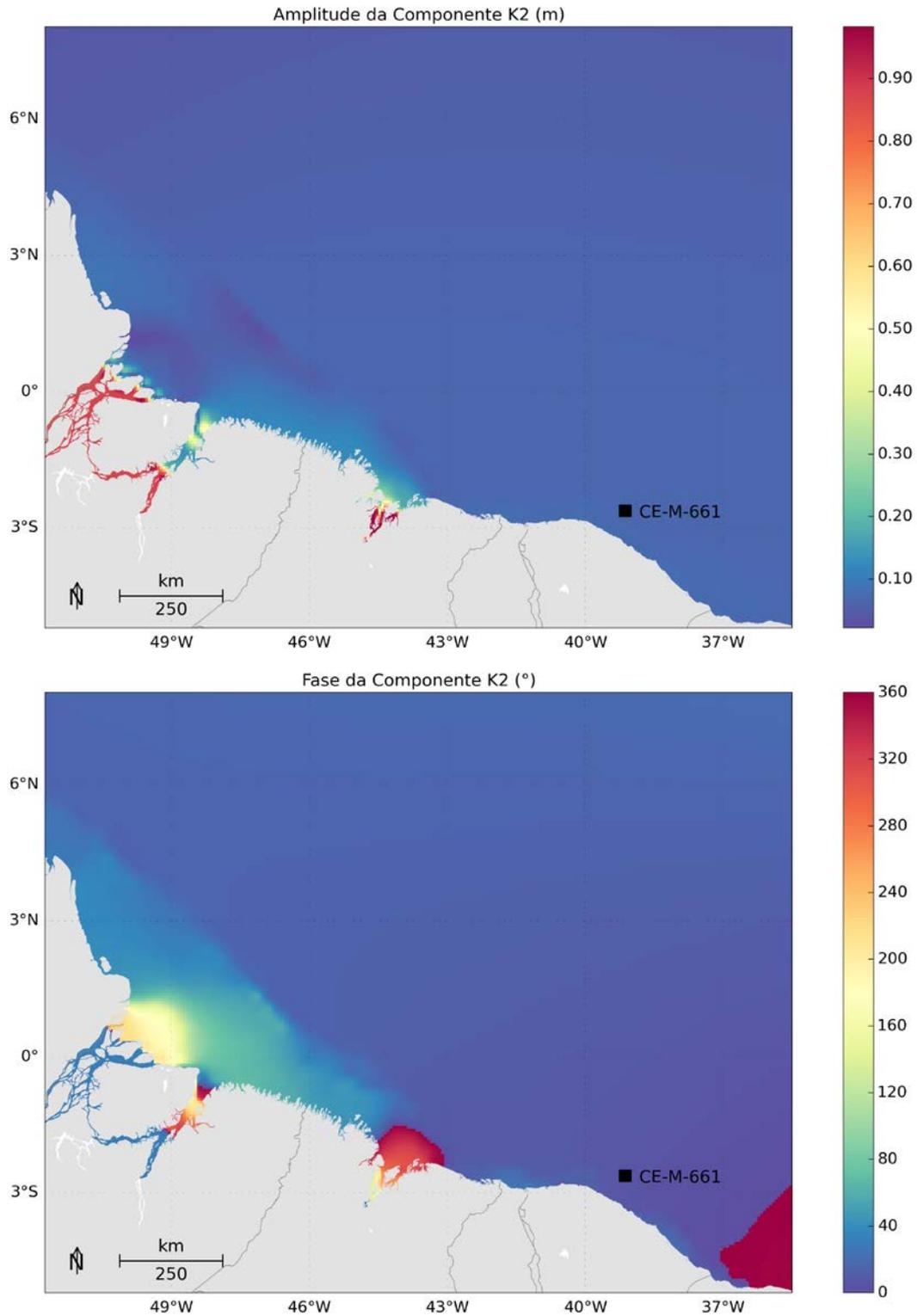


Figura 24: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente K2. Fonte (TPX07).

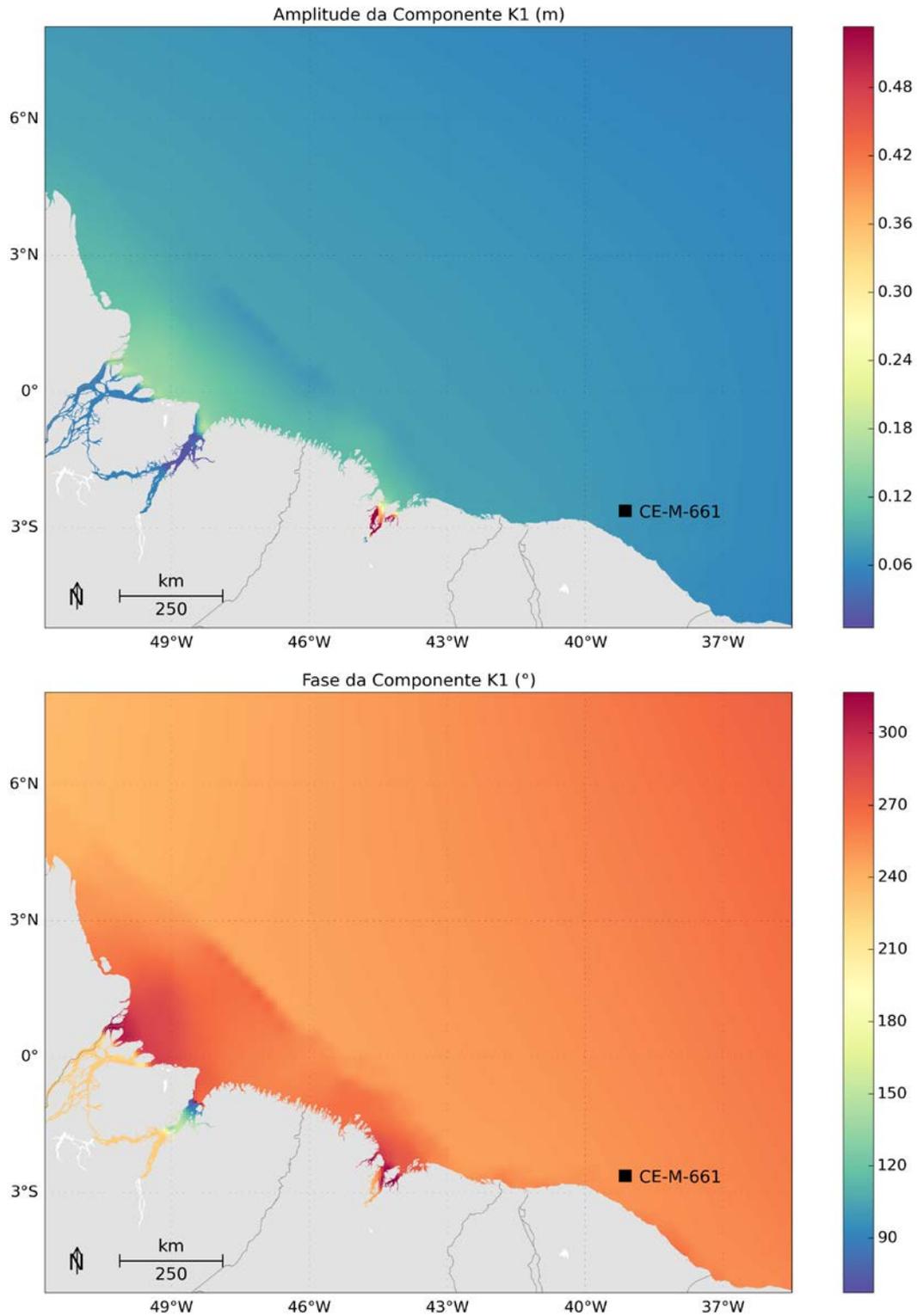


Figura 25: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente K1. Fonte (TPX07).

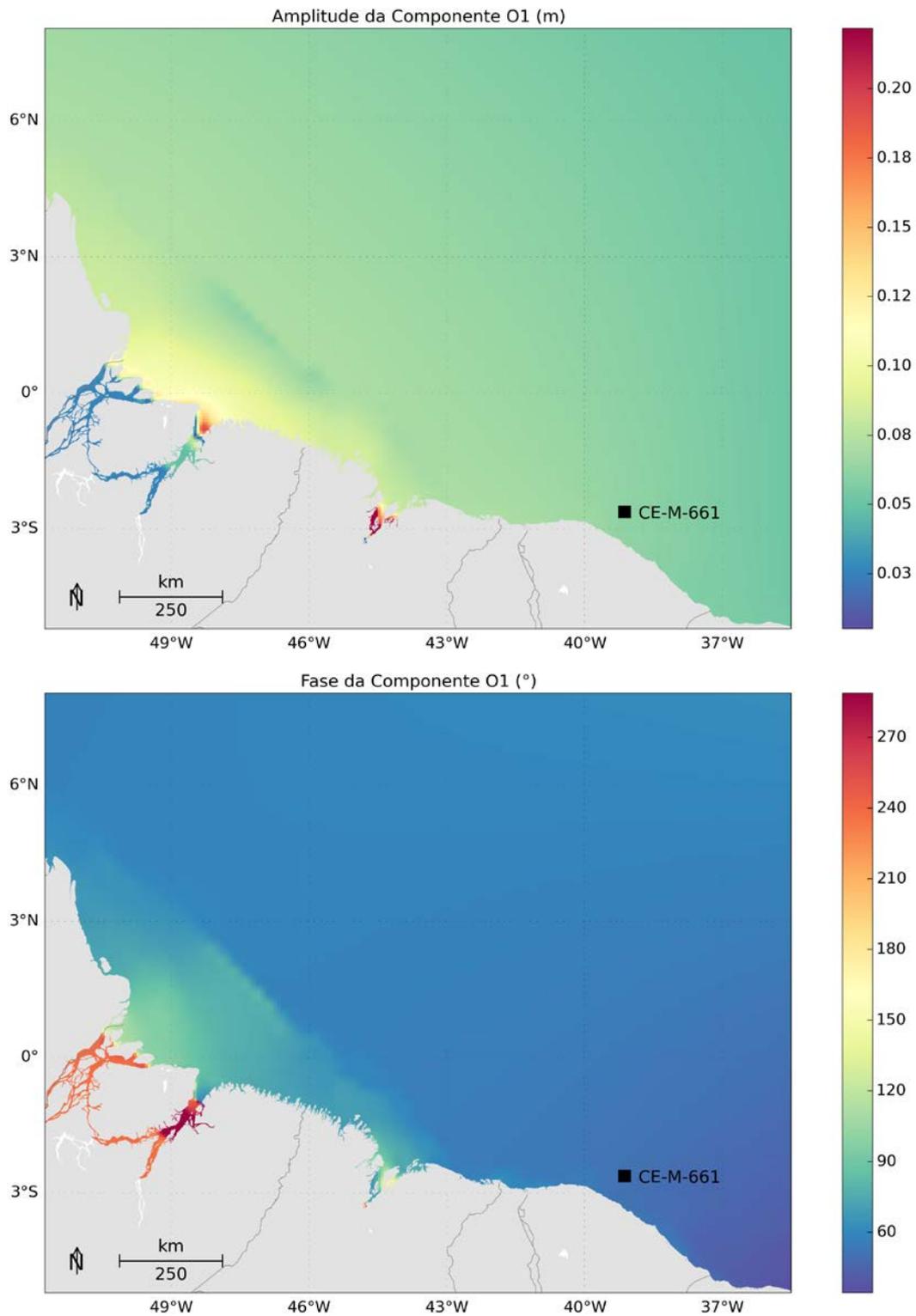


Figura 26: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente O1. Fonte (TPX07).

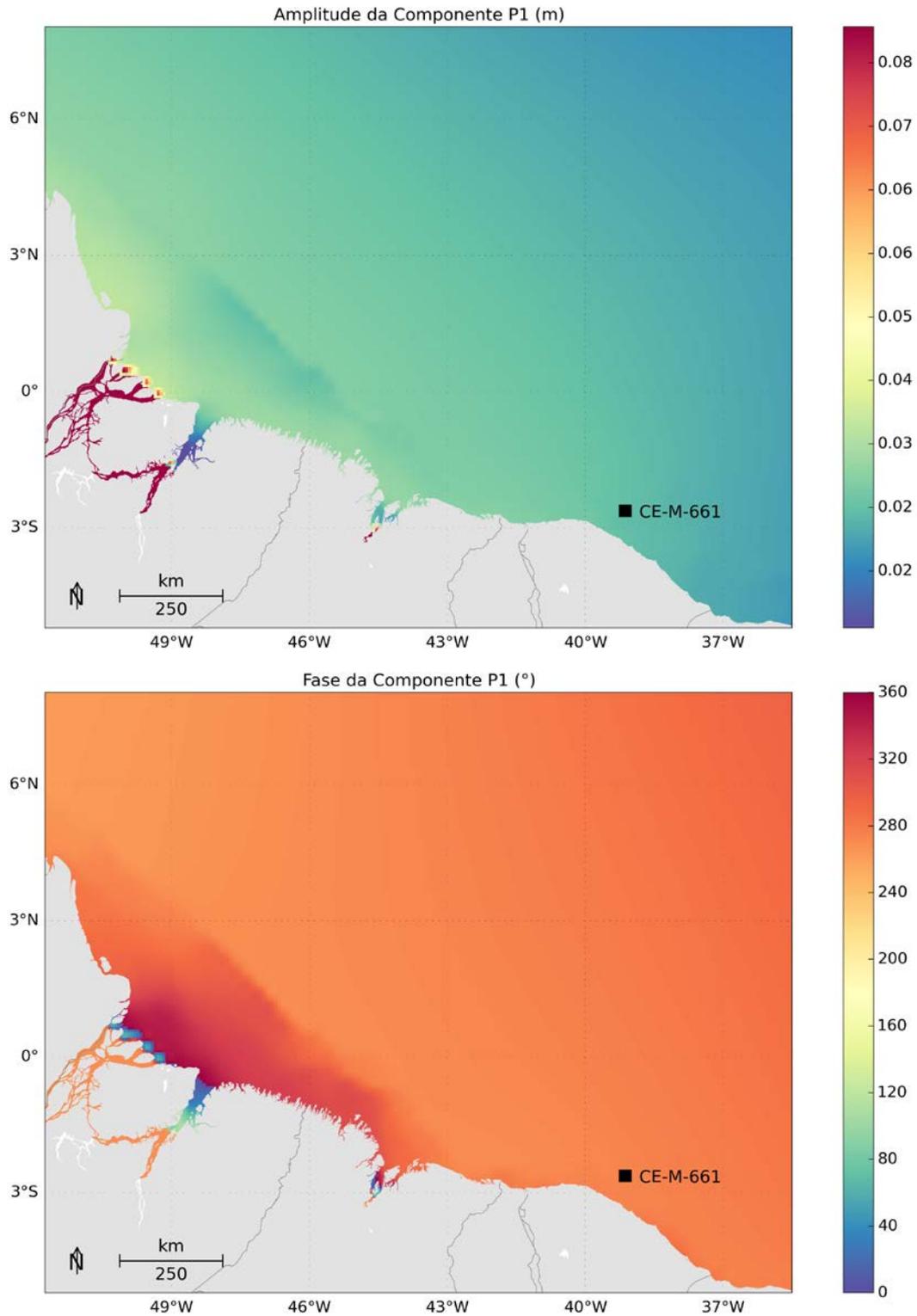


Figura 27: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente P1. Fonte (TPX07).

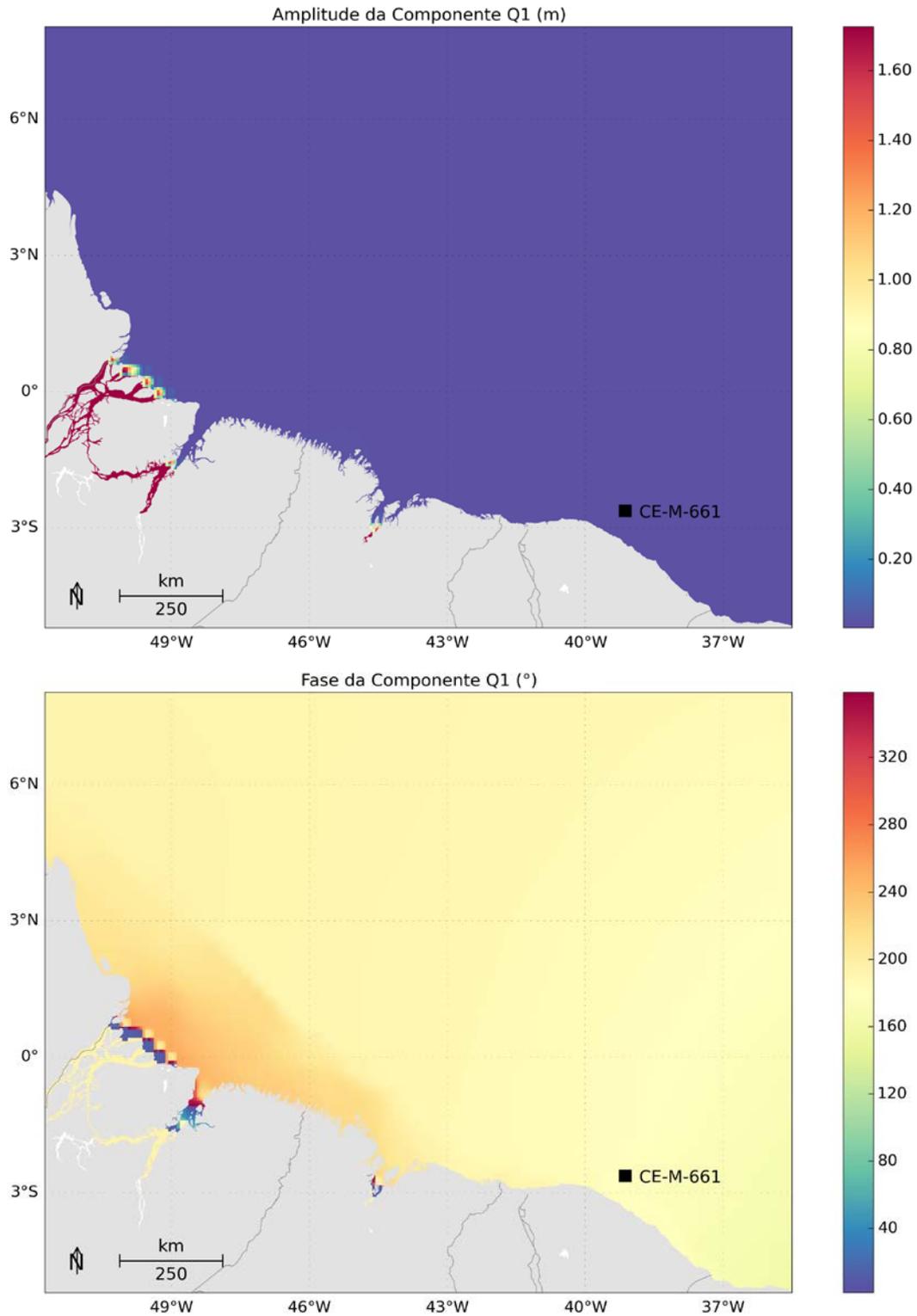


Figura 28: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente Q1. Fonte (TPX07).

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 η 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.

2.4.5 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 drenagem. As estações utilizadas no trabalho de Dai & Trenberth (2002) podem ser visualizadas na Figura 29. 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 30 e na Tabela 3 são apresentadas as estações localizadas na região de interesse.

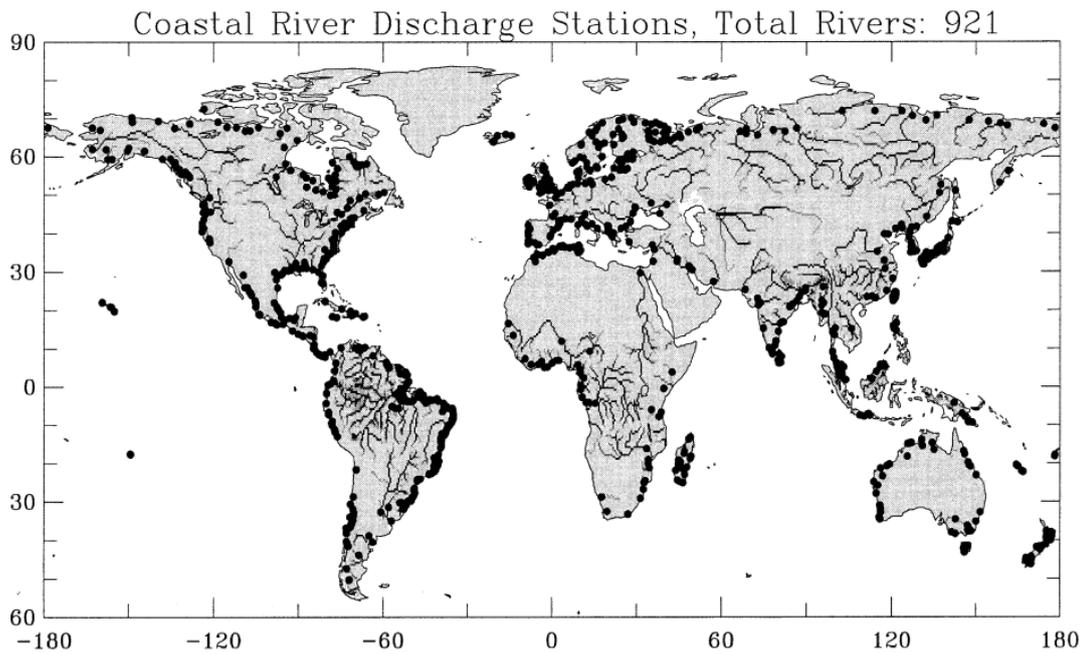


Figura 29: Estações utilizadas ao longo de todo o globo. Fonte: Dai & Trenberth (2002).

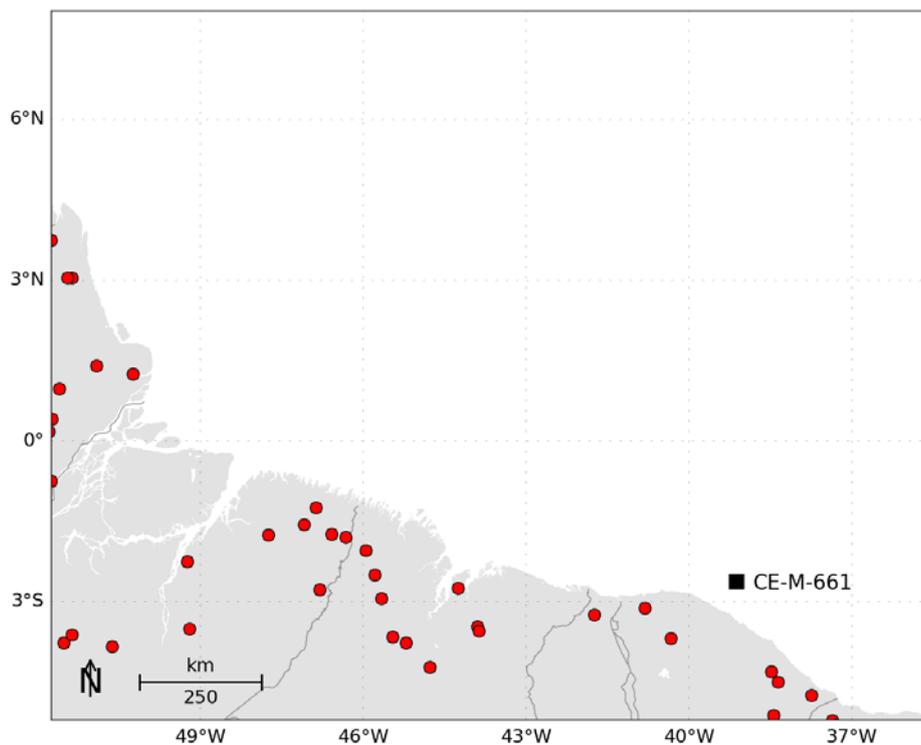


Figura 30: Estações utilizadas em Dai & Trenberth (2002), que se encontram no domínio de modelagem.

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

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

O efeito da descarga fluvial nos resultados do ROMS pode ser exemplificado pela Figura 31, que apresenta a pluma do rio Amazonas, representada pelo campo de salinidade superficial calculado pelo ROMS.

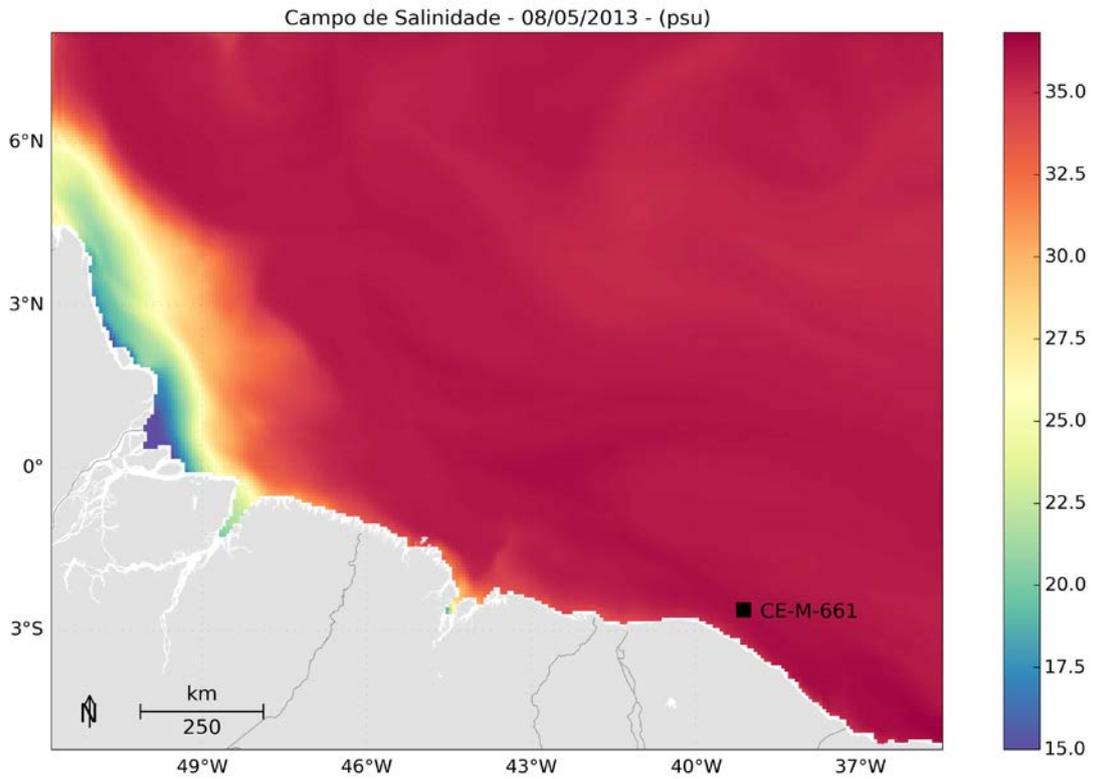


Figura 31: Campo de salinidade superficial obtido do ROMS para o dia 08 de maio de 2013.

2.5. 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:

$$\Delta\phi = DtT(\phi - \phi^{ext}) \quad (8)$$

$$\Delta\phi = \frac{Dt}{T}(\phi - \phi^{ext})$$

Onde ϕ representa uma variável do modelo (ROMS), ϕ^{ext} representa um dado externo (MyOcean), Dt é o passo de tempo do modelo ROMS, T é o incremento imposto à variável e $\Delta\phi$ é a escala de tempo para o *nudging*.

O emprego desta técnica tem o objetivo de aproveitar as vantagens do modelo MyOcean (modelo global com sistema robusto de assimilação de dados) e conseguir 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°). Com isso consegue-se a representação de processos físicos não representados no modelo MyOcean, como a maré.

Conseqüentemente, 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 32).

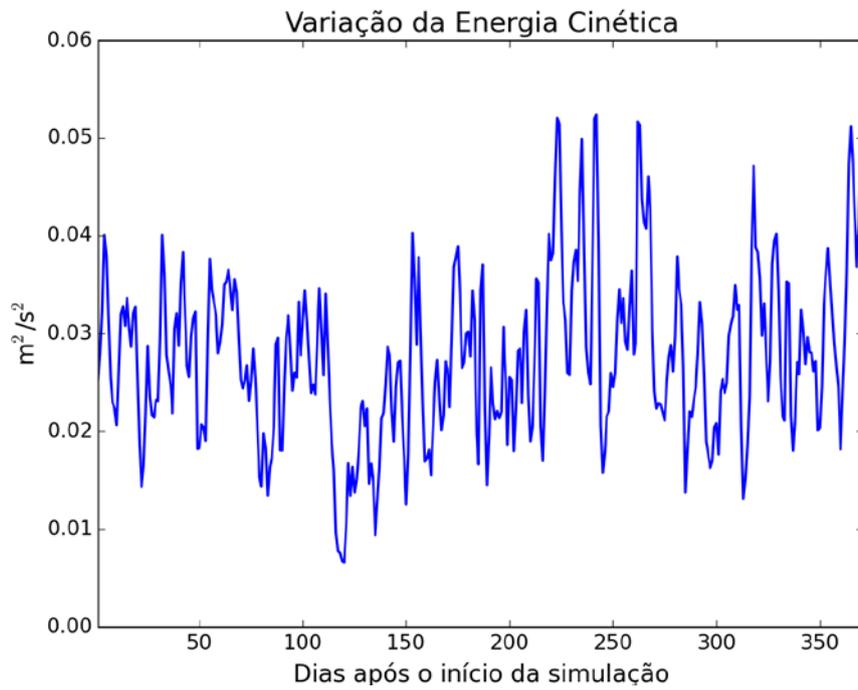


Figura 32: Variação da energia cinética média em superfície ao longo da simulação.

2.6. Avaliação do Modelo

Para que se possa 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, as quais são apresentadas a seguir.

2.6.1 Maré

Para comparar a elevação de maré calculada pelo modelo numérico com dados da região modelada foram escolhidas cinco estações maregráficas (Plataforma Penrod – AP, Ilha dos Irmãos – MA, Mangunça – MA, Luiz Correia – PI e Paracurú - CE) da FEMAR (*Fundação de Estudos do Mar*) situadas ao longo do domínio de modelagem (Figura 33). 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.

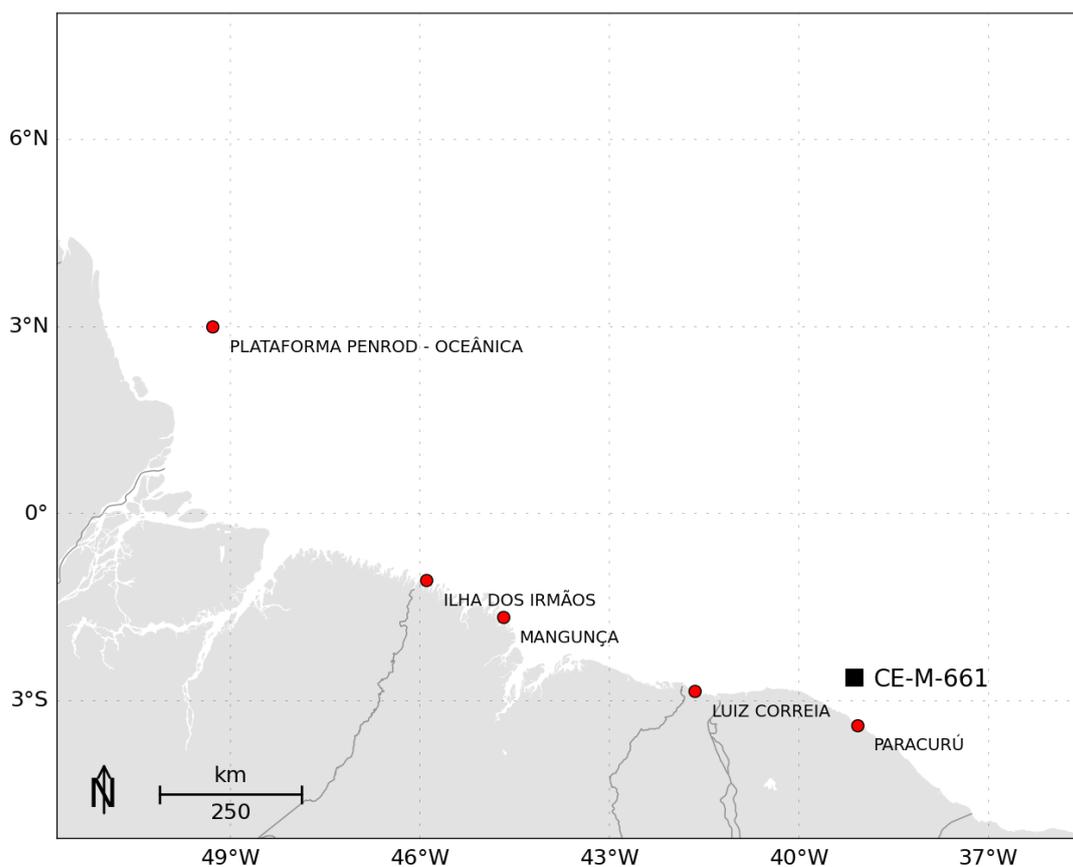


Figura 33: Localização das estações maregráficas da FEMAR, utilizadas na avaliação da representação da maré no modelo.

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 34 a Figura 38). 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.

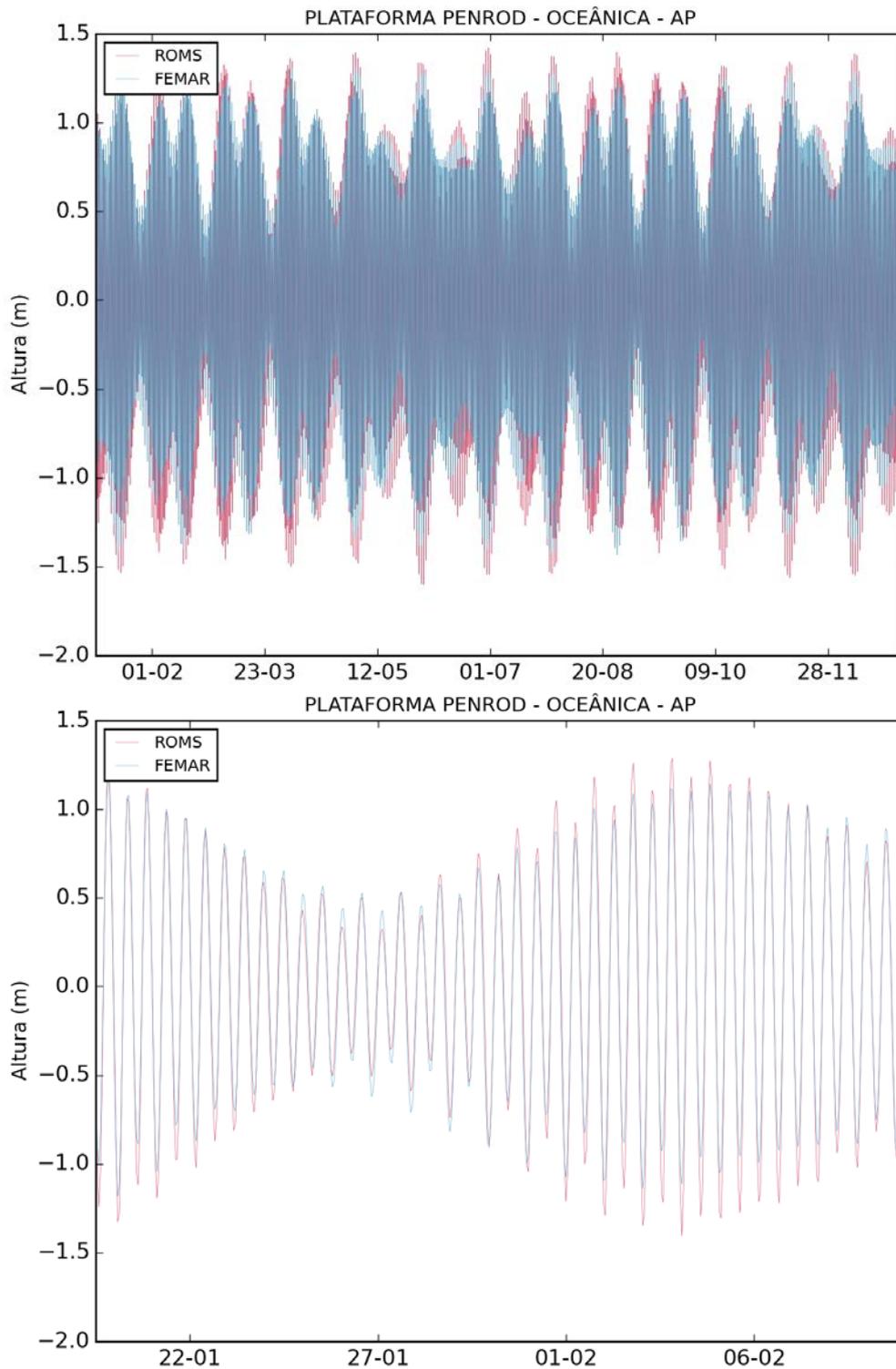


Figura 34: Comparação entre a série maregráfica da estação de Penrod (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).

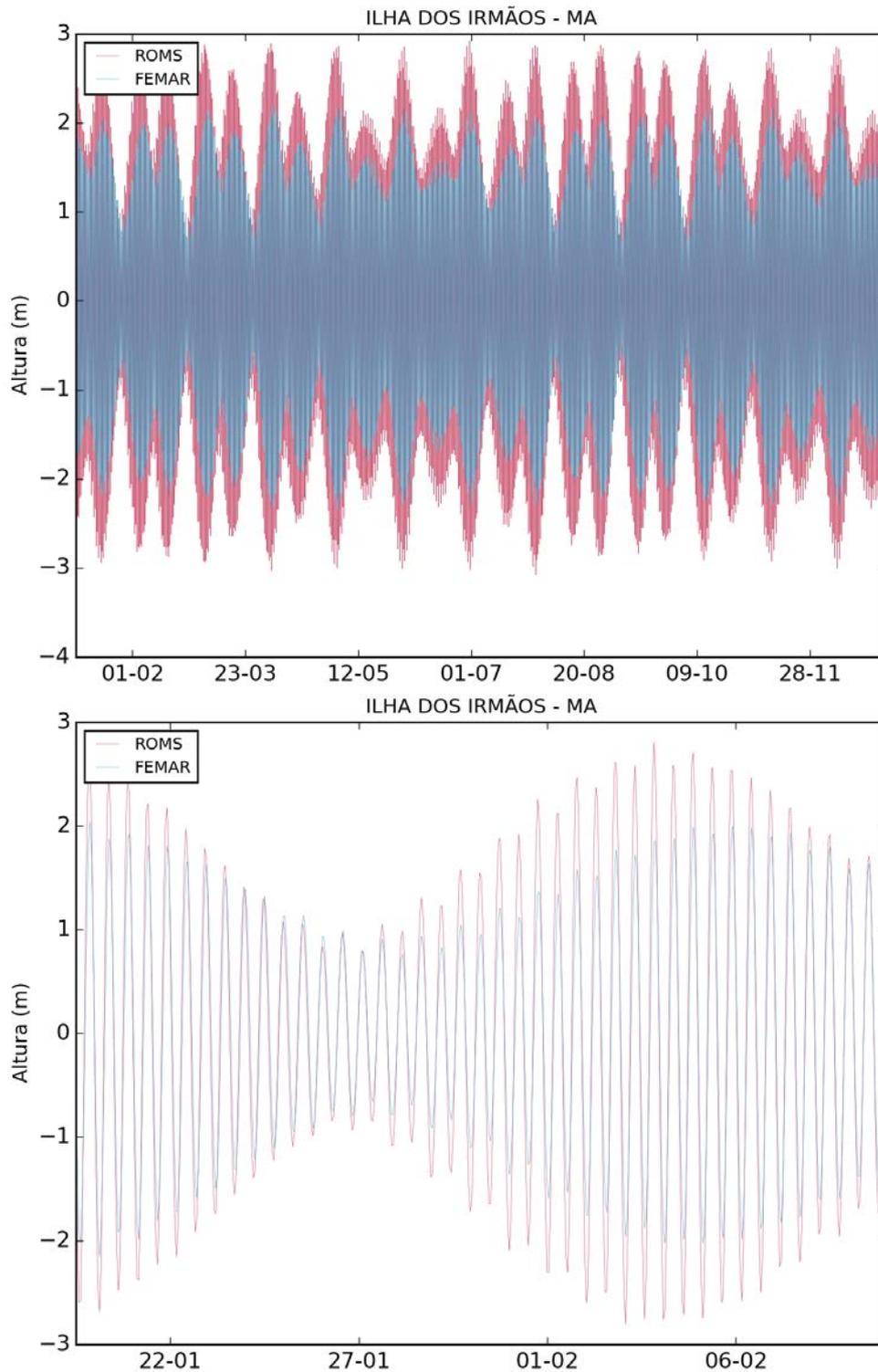


Figura 35: Comparação entre a série maregráfica da estação da Ilha dos Irmãos (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).

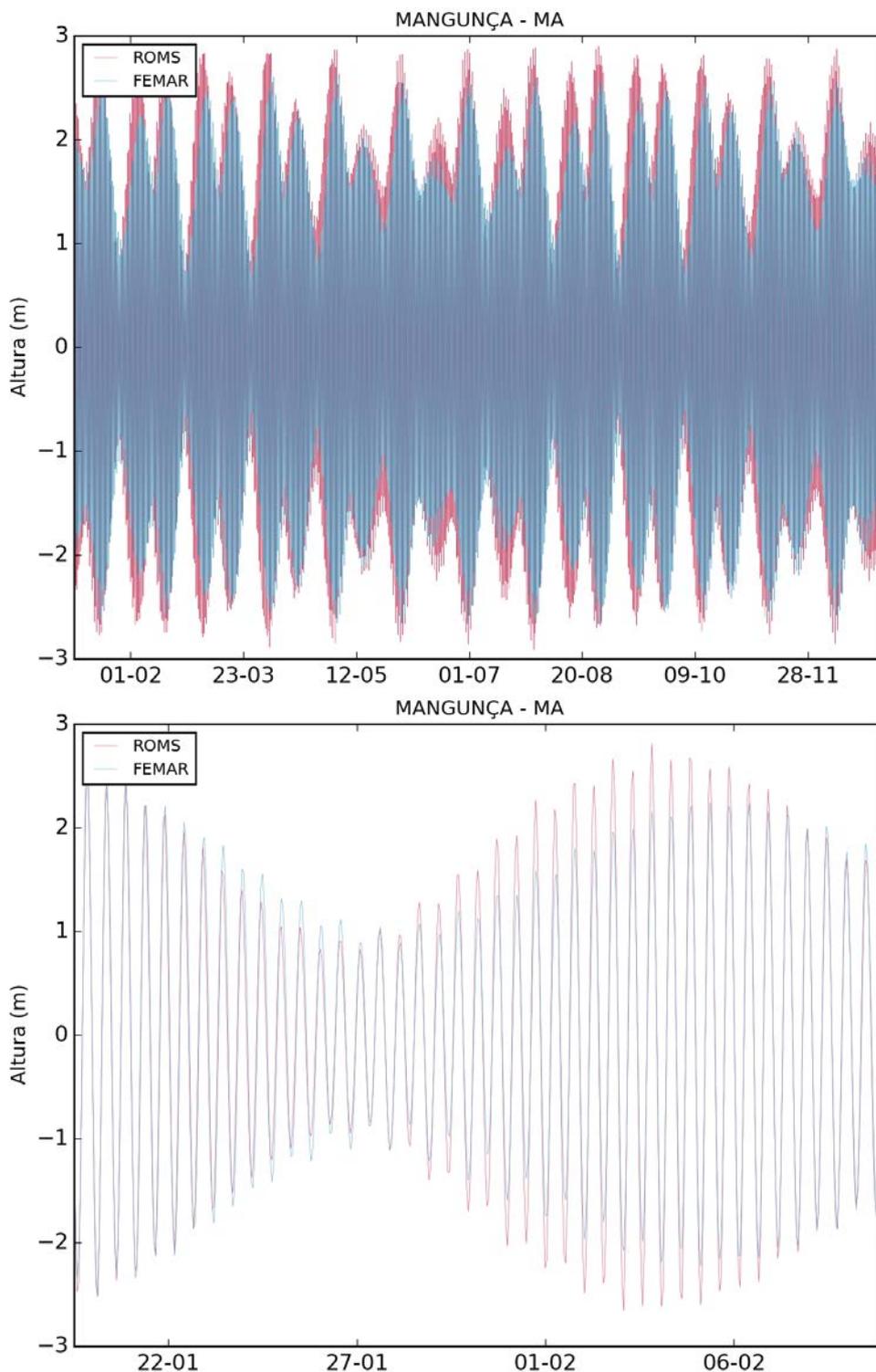


Figura 36: Comparação entre a série maregráfica da estação de Mangunça (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).

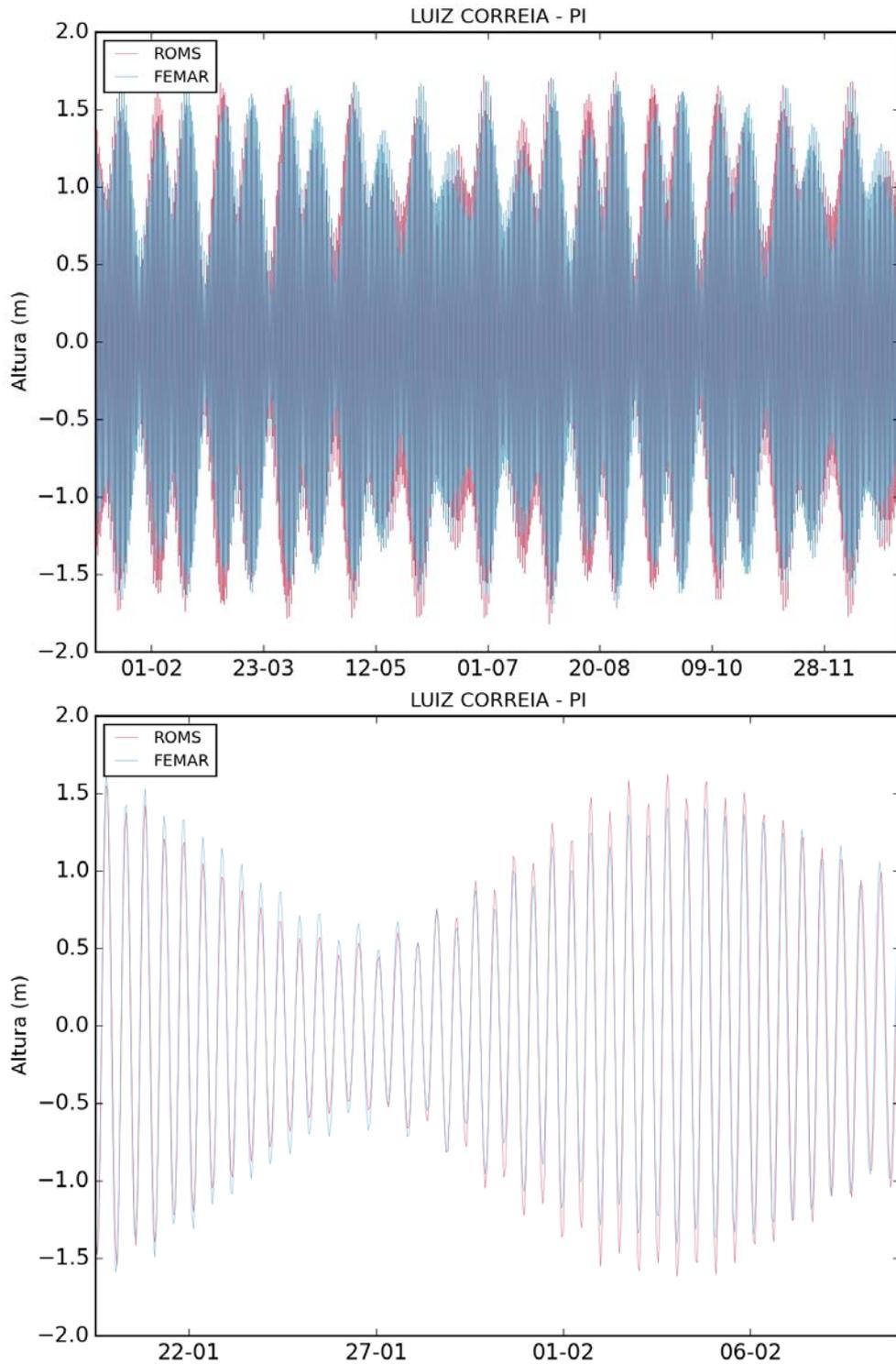


Figura 37: Comparação entre a série maregráfica da estação de Luiz Correia (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).

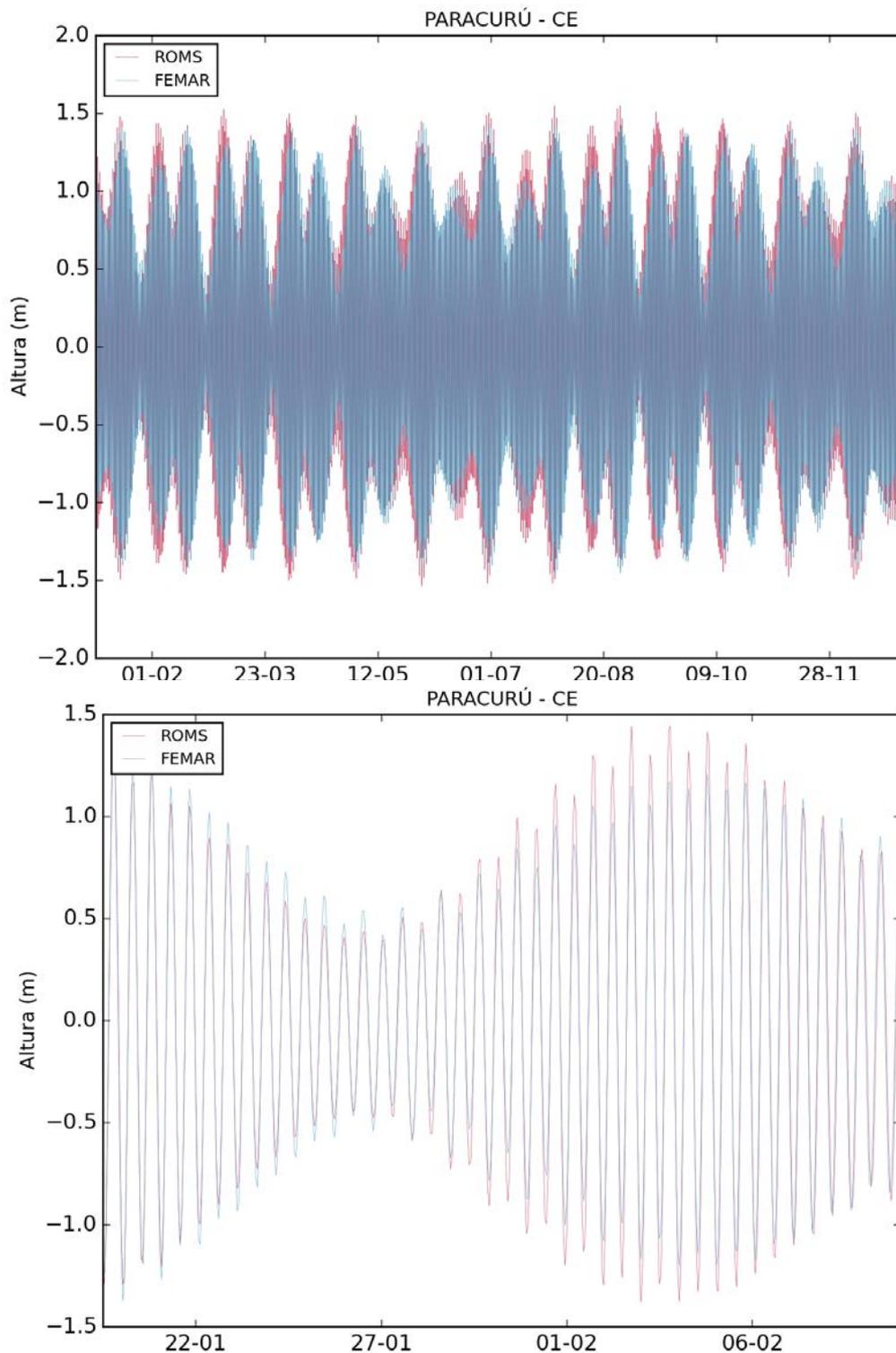


Figura 38: Comparação entre a série maregráfica da estação de Paracurú (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).

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 (1982), representado pela letra “d” e 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, 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, onde um índice igual a 1 significa que a concordância entre as séries é máxima e um índice igual a 0 indica completa discordância (WILMOT, 1982).

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 de Ilha dos Irmãos (0,91).

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

Local	D
Penrod	0,99
Ilha dos Irmãos	0,91
Mangunça	0,97
Luiz Correia	0,98
Paracurú	0,98

Os erros encontrados são esperados devido à grande extensão do domínio, dificultando a calibração da maré para toda a 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, com obtenção de resultados

compatíveis com as medições em todos os casos analisados, pode-se concluir que a maré foi bem representada pelo ROMS.

2.6.2 Temperatura da Superfície do Mar

Da Figura 39 a Figura 50 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 (correspondente a um período de 1 ano incluso dentro do domínio temporal de modelagem), 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.

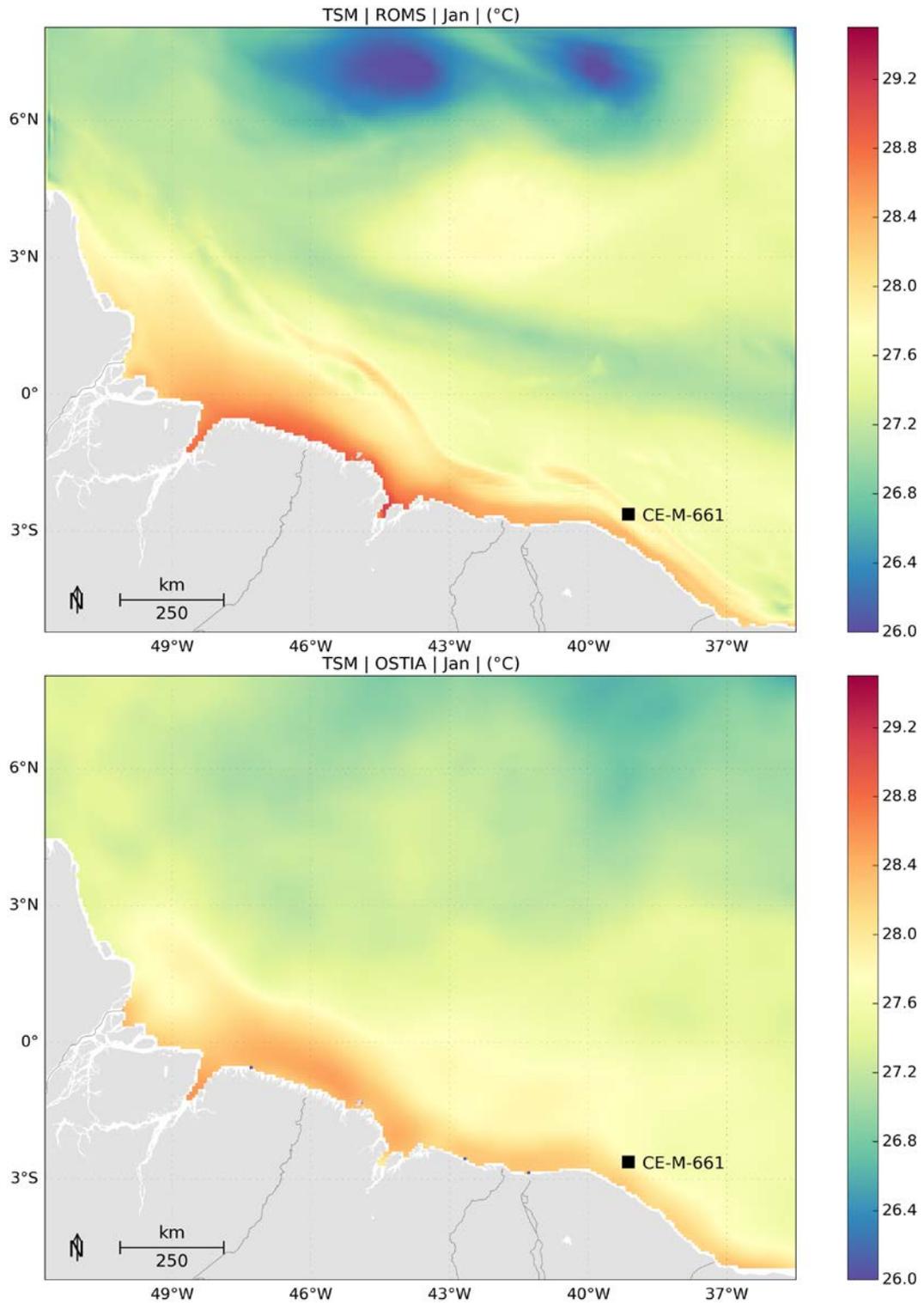


Figura 39: TSM média para Janeiro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

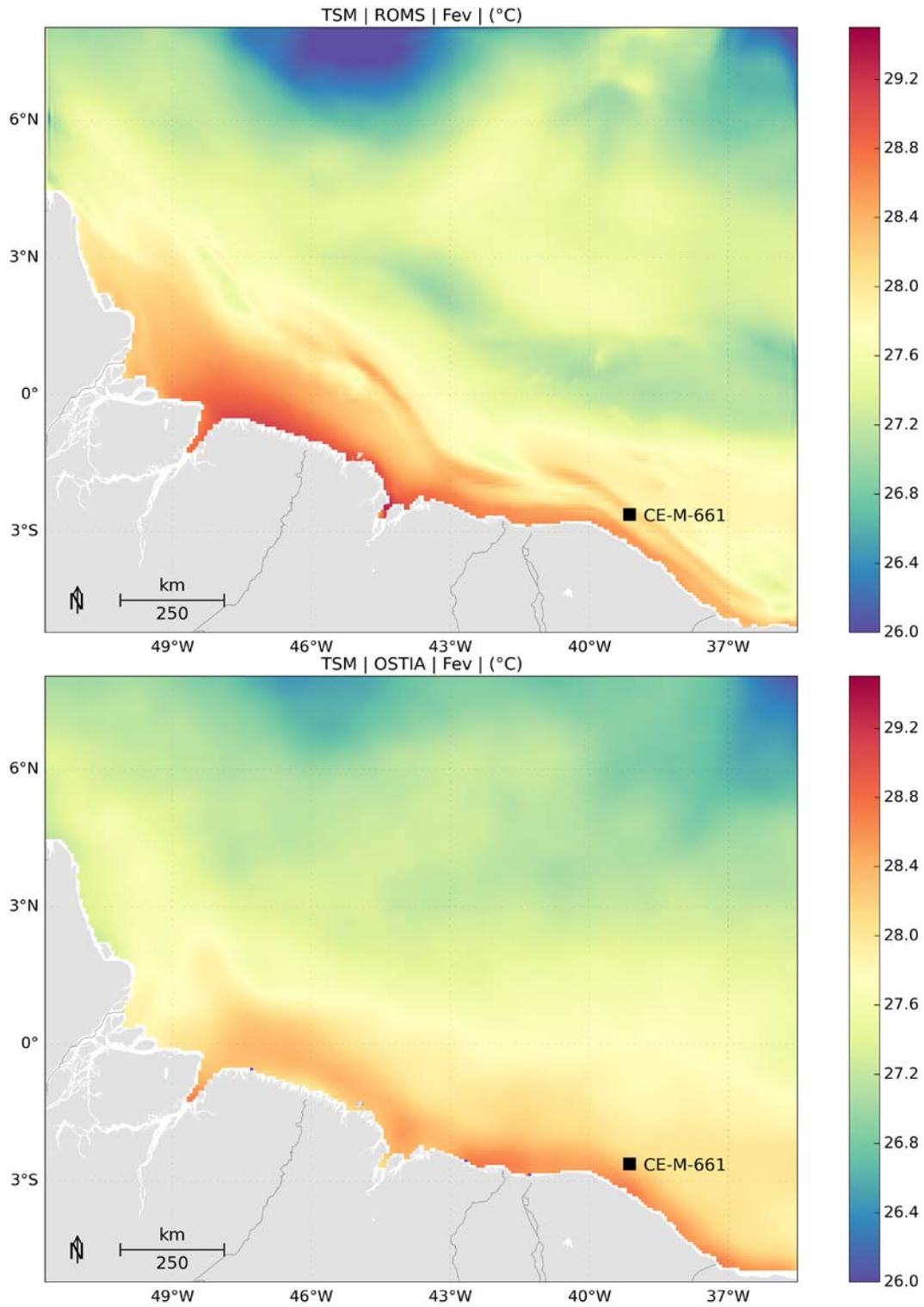


Figura 40: TSM média para Fevereiro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

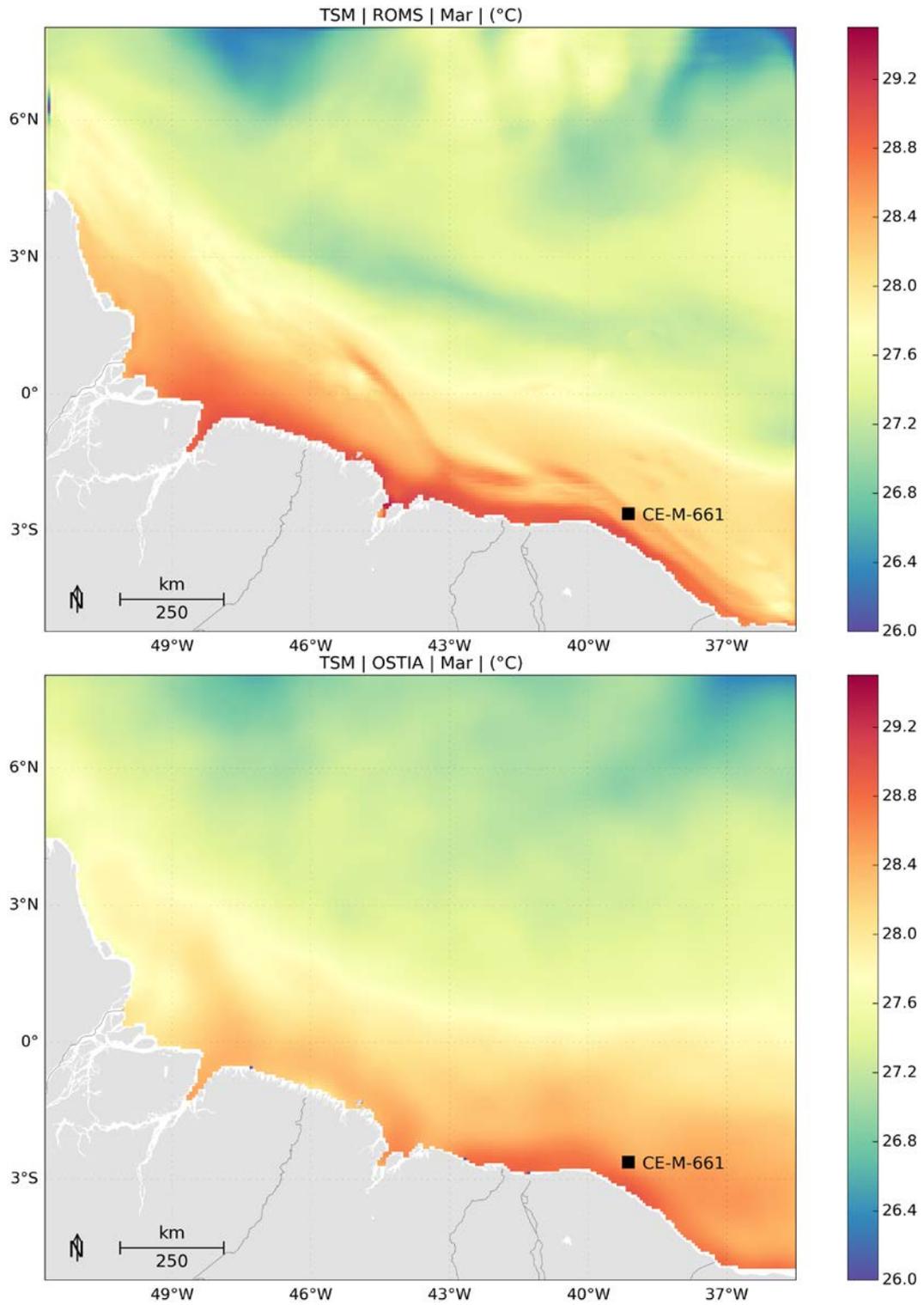


Figura 41: TSM média para Março de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

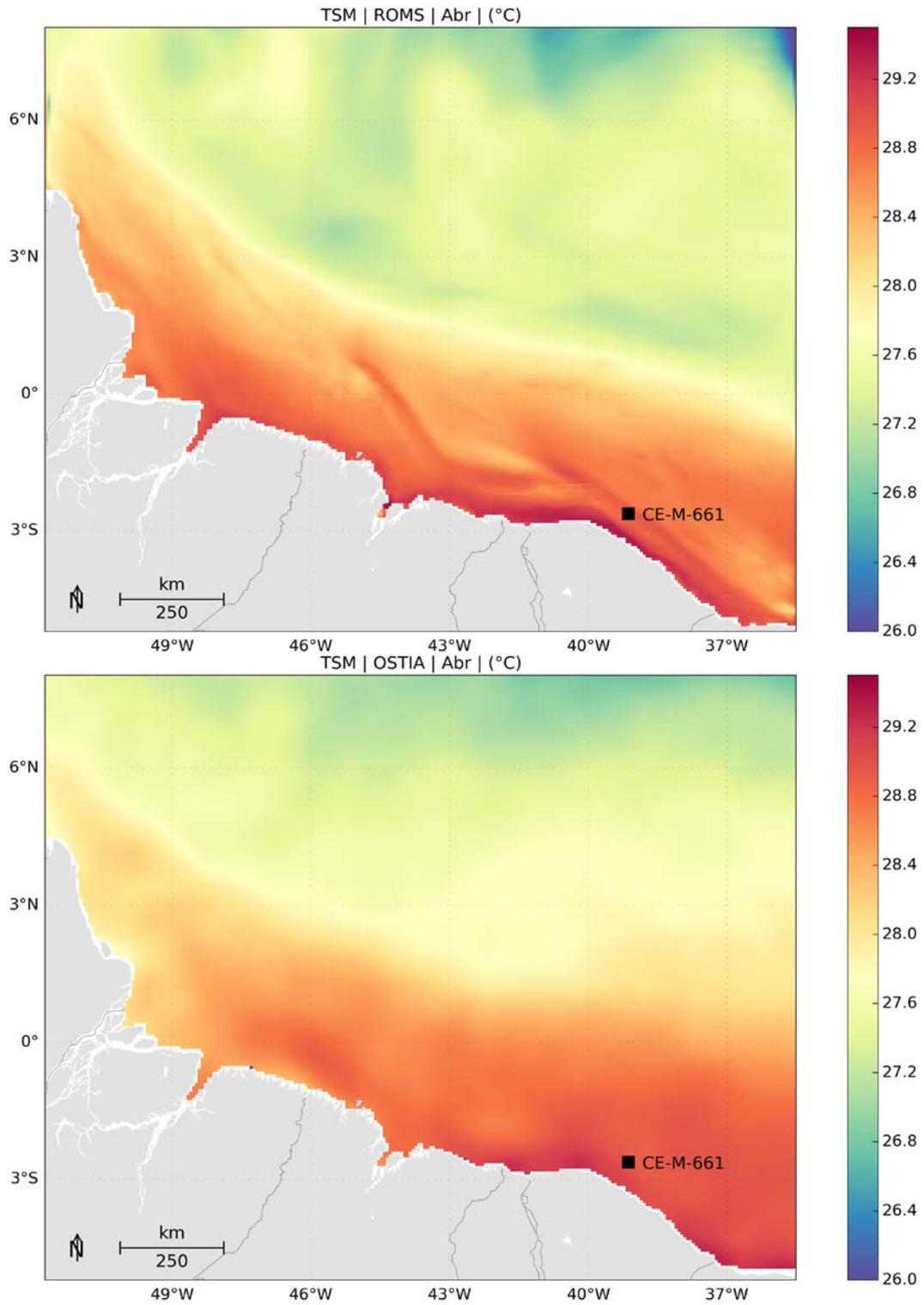


Figura 42: TSM média para Abril de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

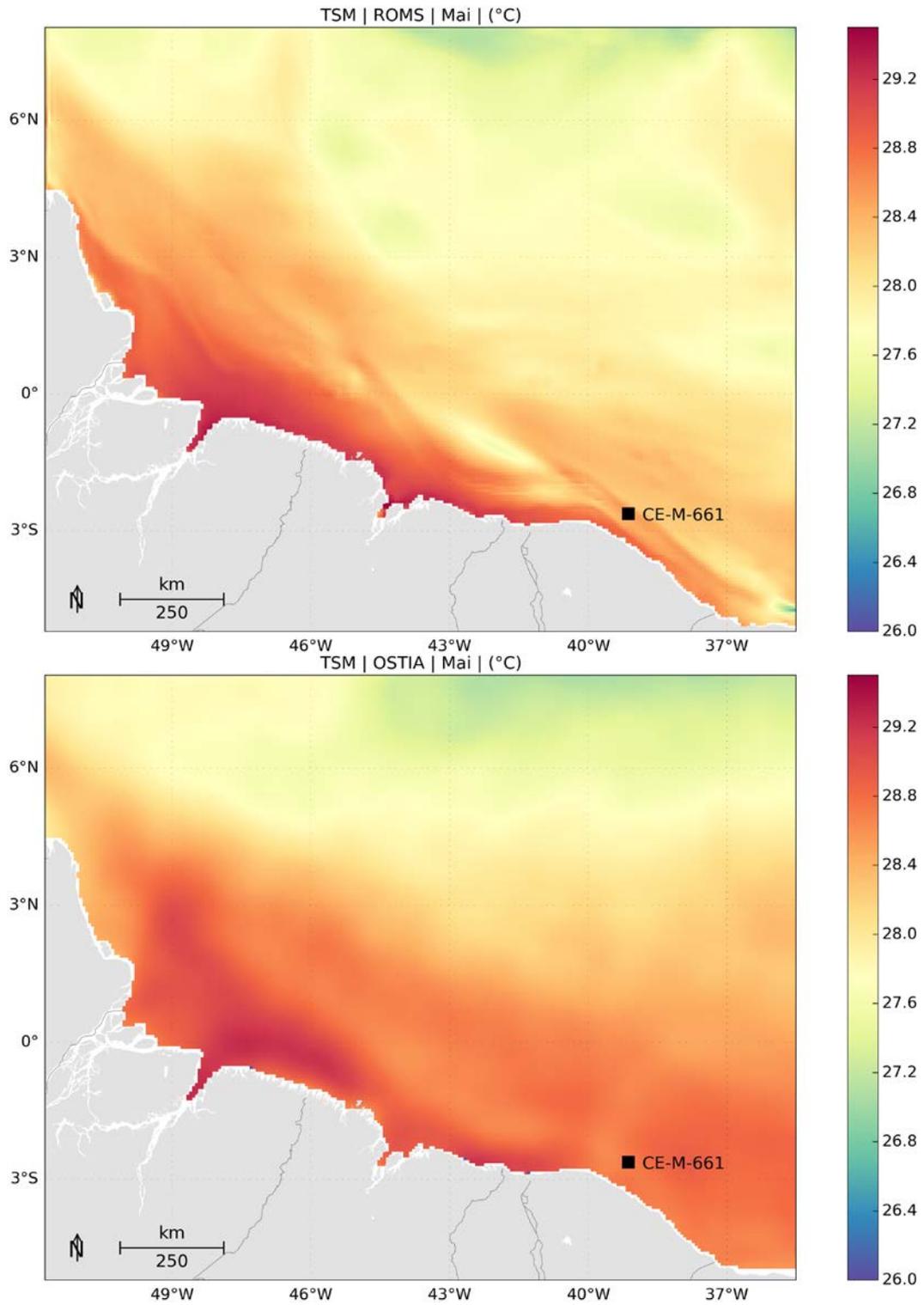


Figura 43: TSM média para Maio de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

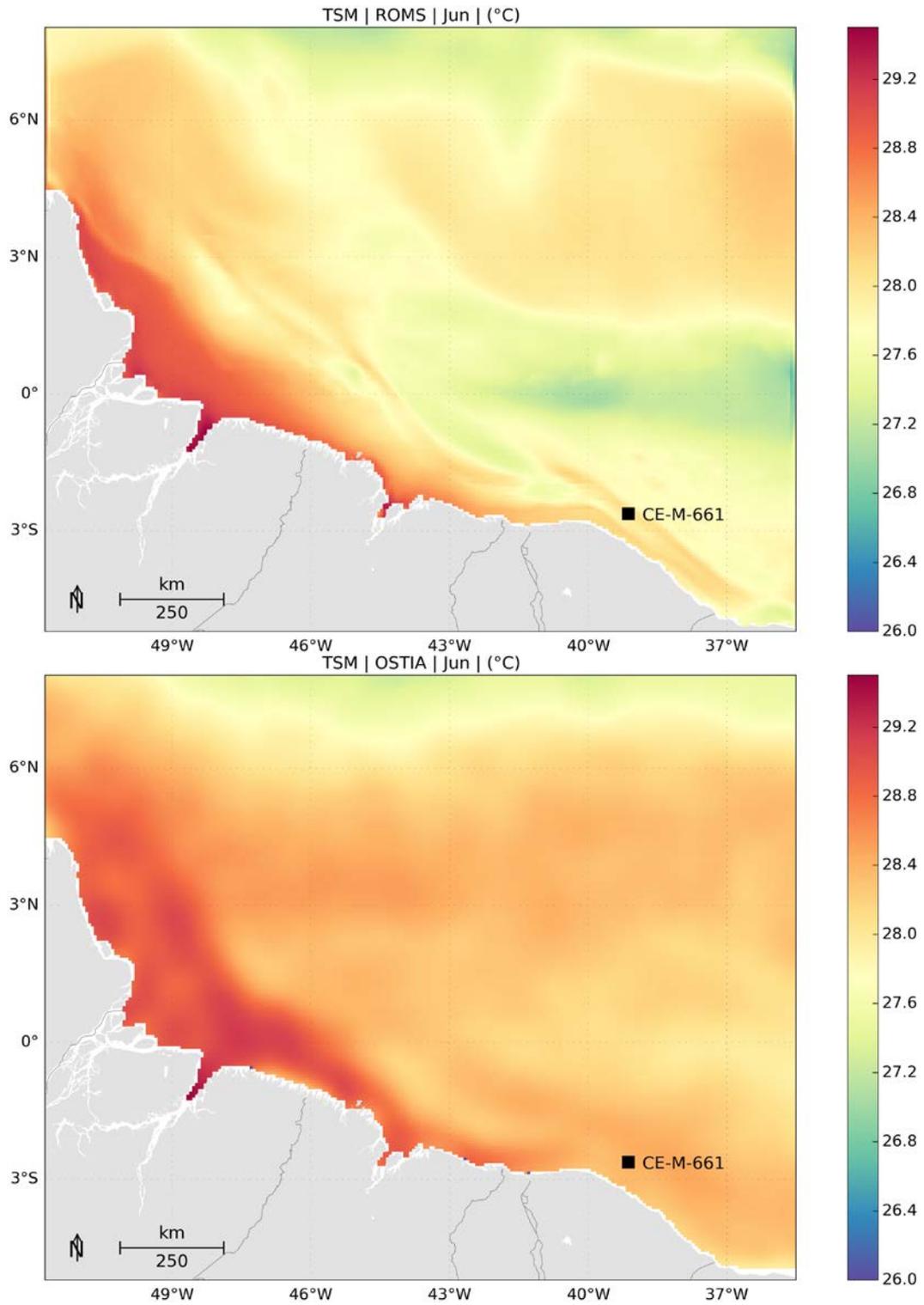


Figura 44: TSM média para Junho de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

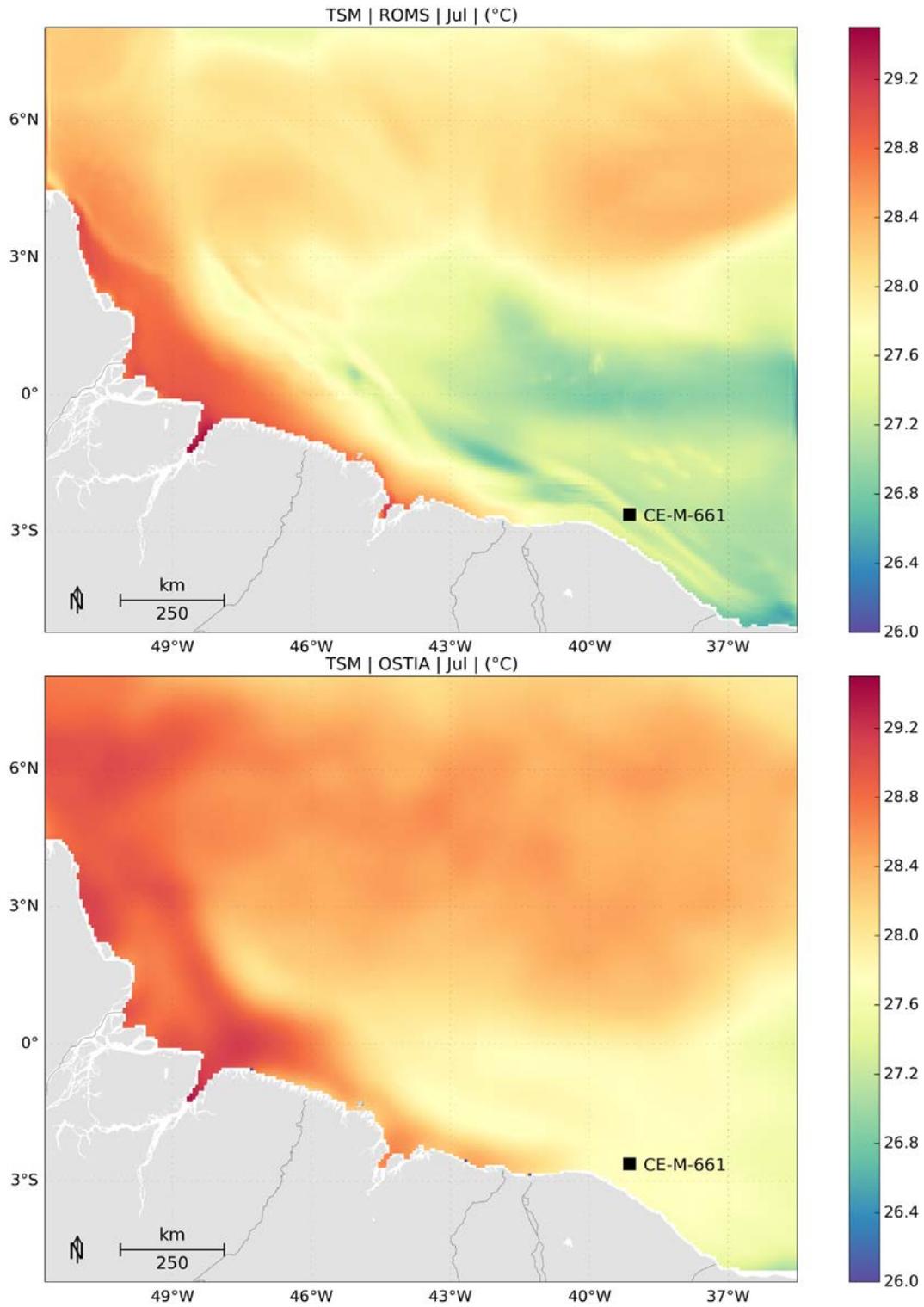


Figura 45: TSM média para Julho de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

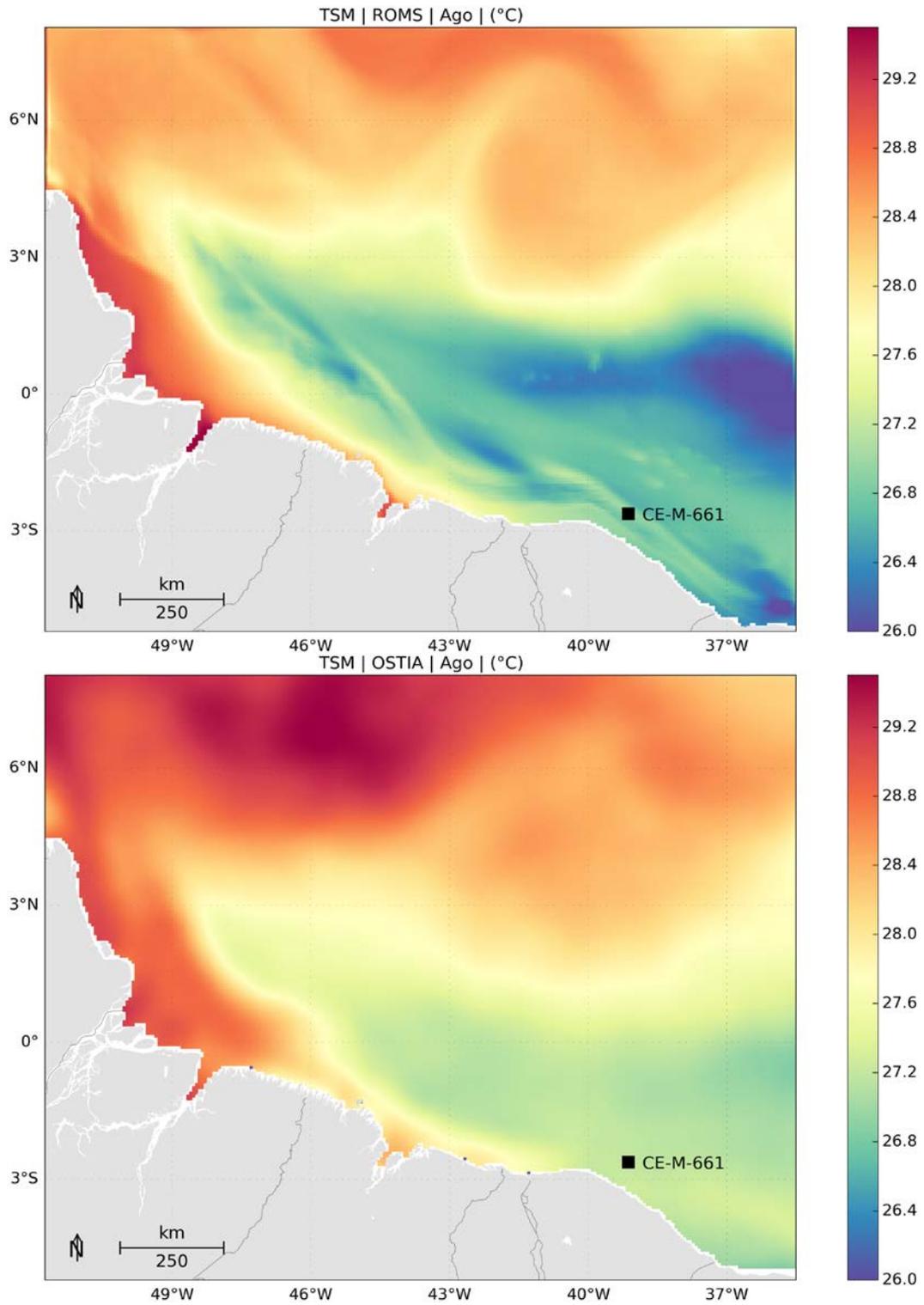


Figura 46: TSM média para Agosto de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

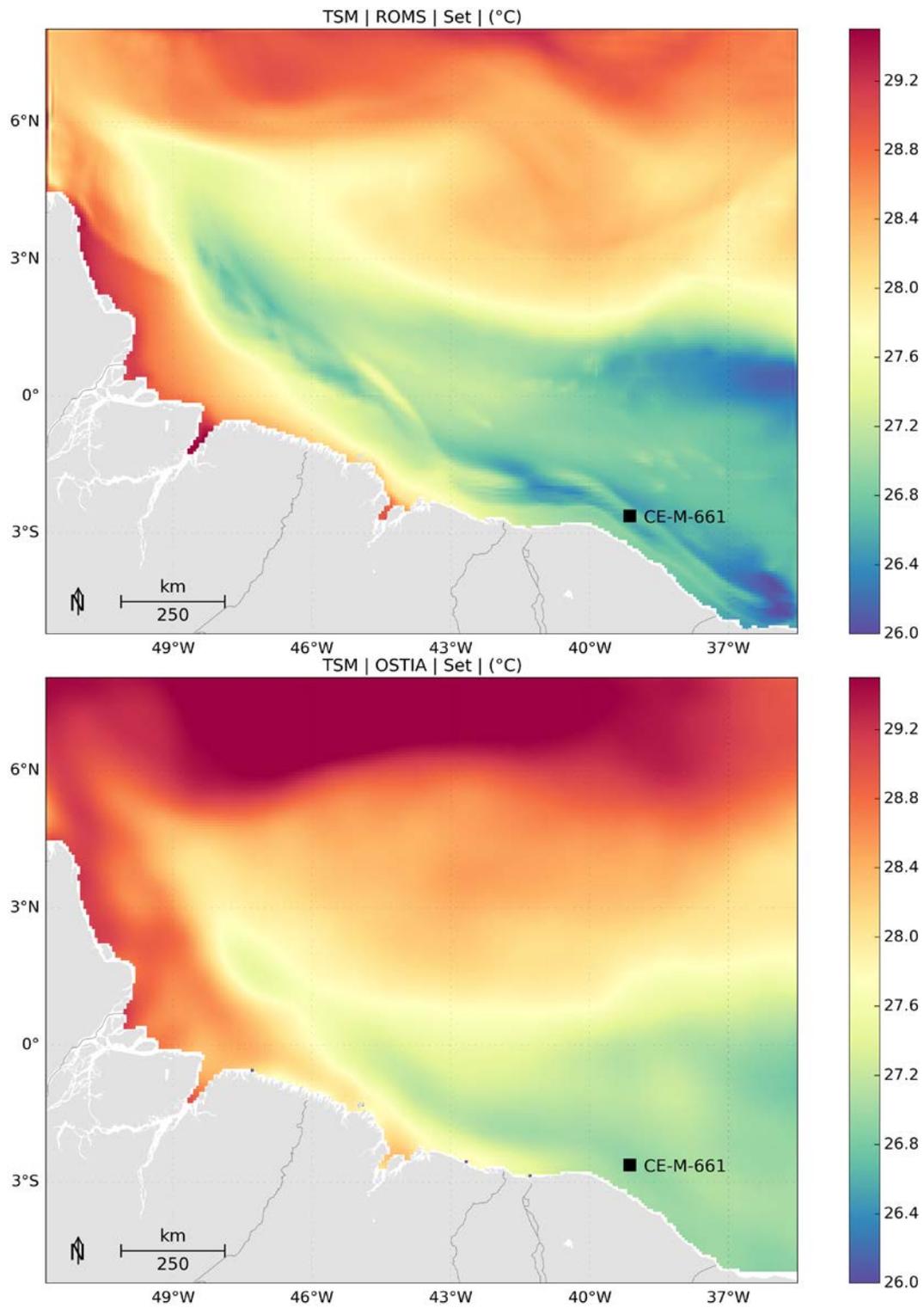


Figura 47: TSM média para Setembro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

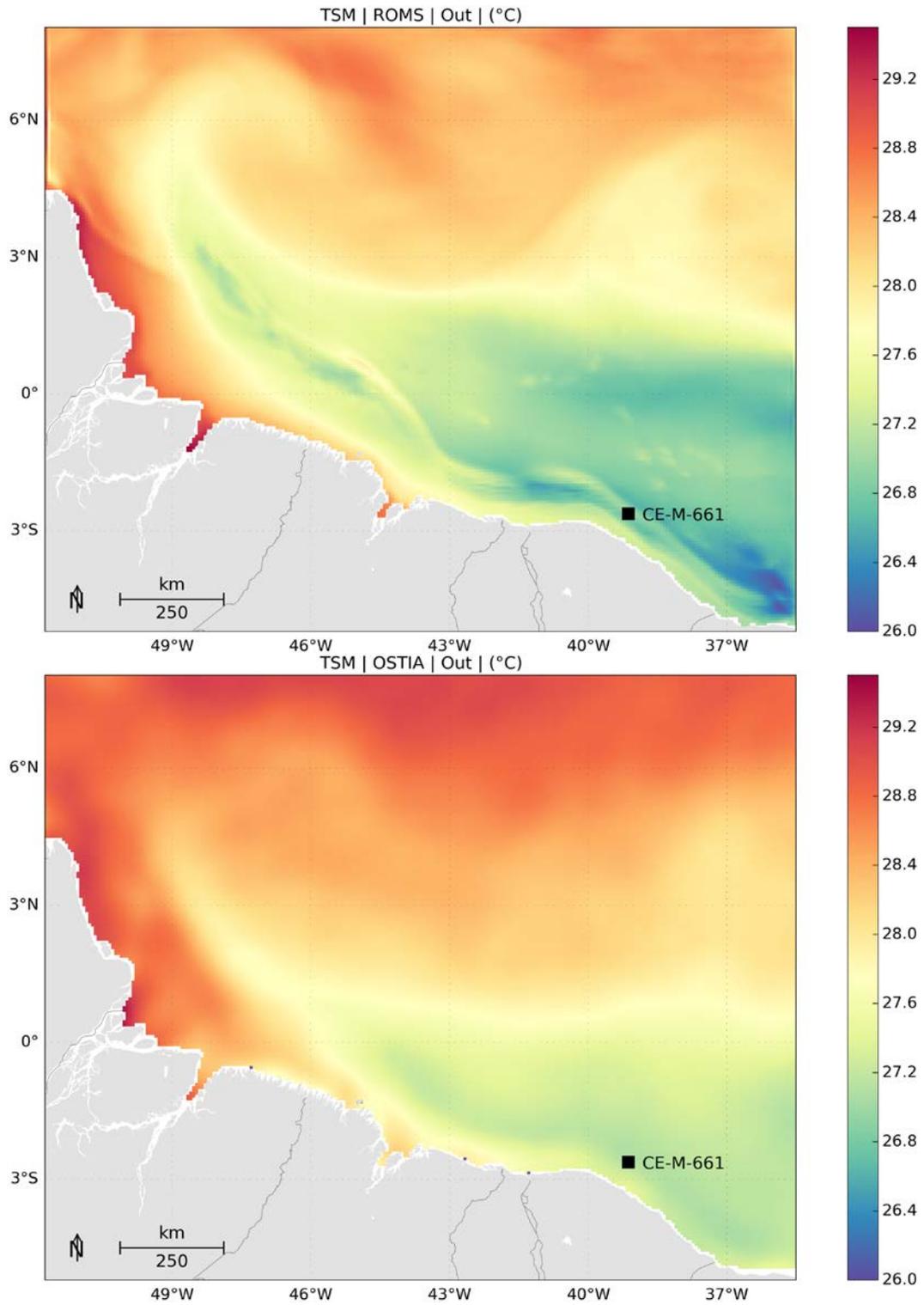


Figura 48: TSM média para Outubro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

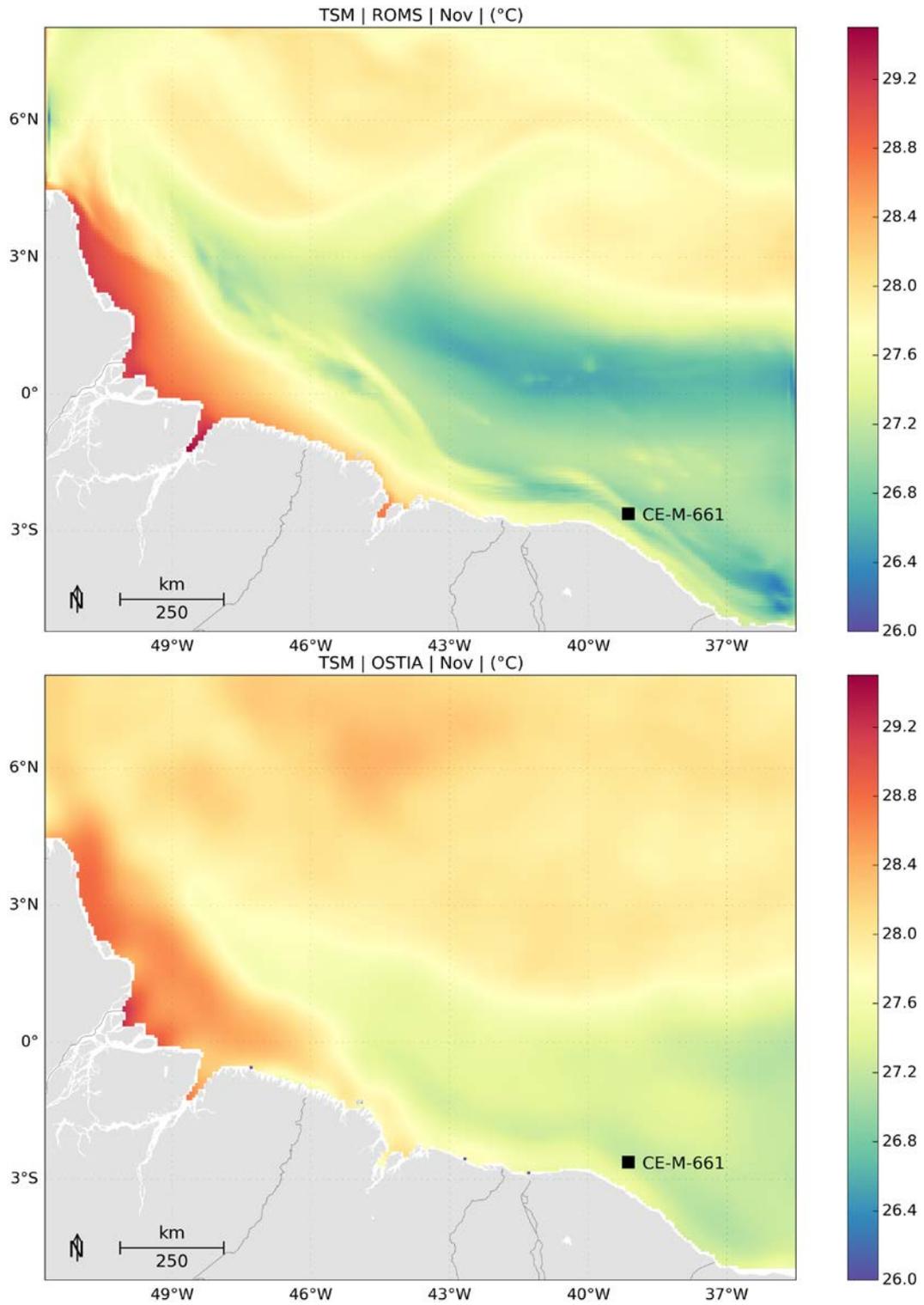


Figura 49: TSM média para Novembro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

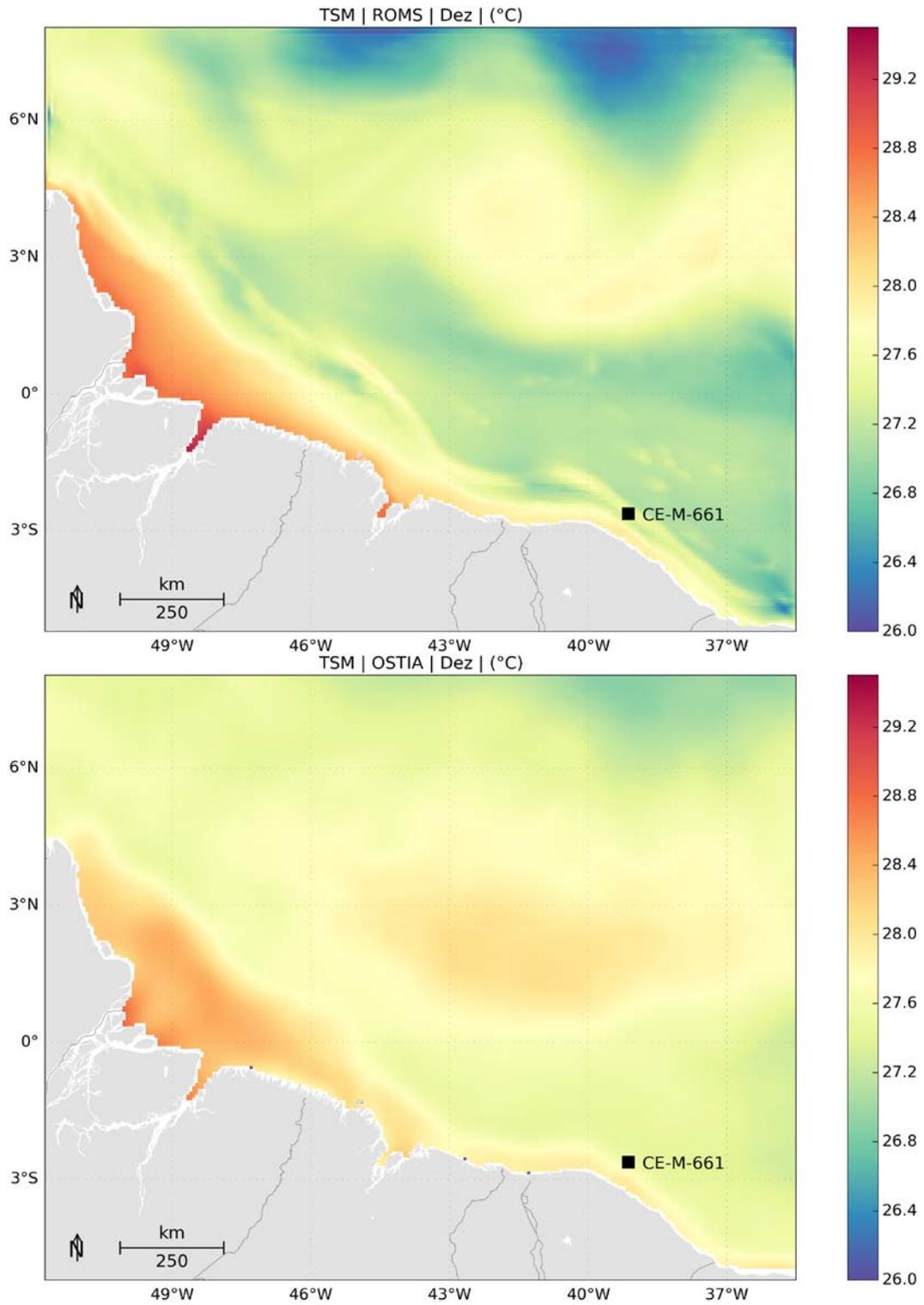


Figura 50: TSM média para Dezembro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

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 a necessidade de possíveis ajustes nos parâmetros de difusão do modelo. A boa representação do campo de temperatura superficial do modelo é um excelente indicador de sua capacidade em representar a hidrodinâmica da região, visto que a distribuição espacial da temperatura é influenciada fortemente pela advecção das correntes.

2.6.3 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 $1,875^\circ\text{S}$ e $38,875^\circ\text{W}$, conforme apresentado na Figura 51.

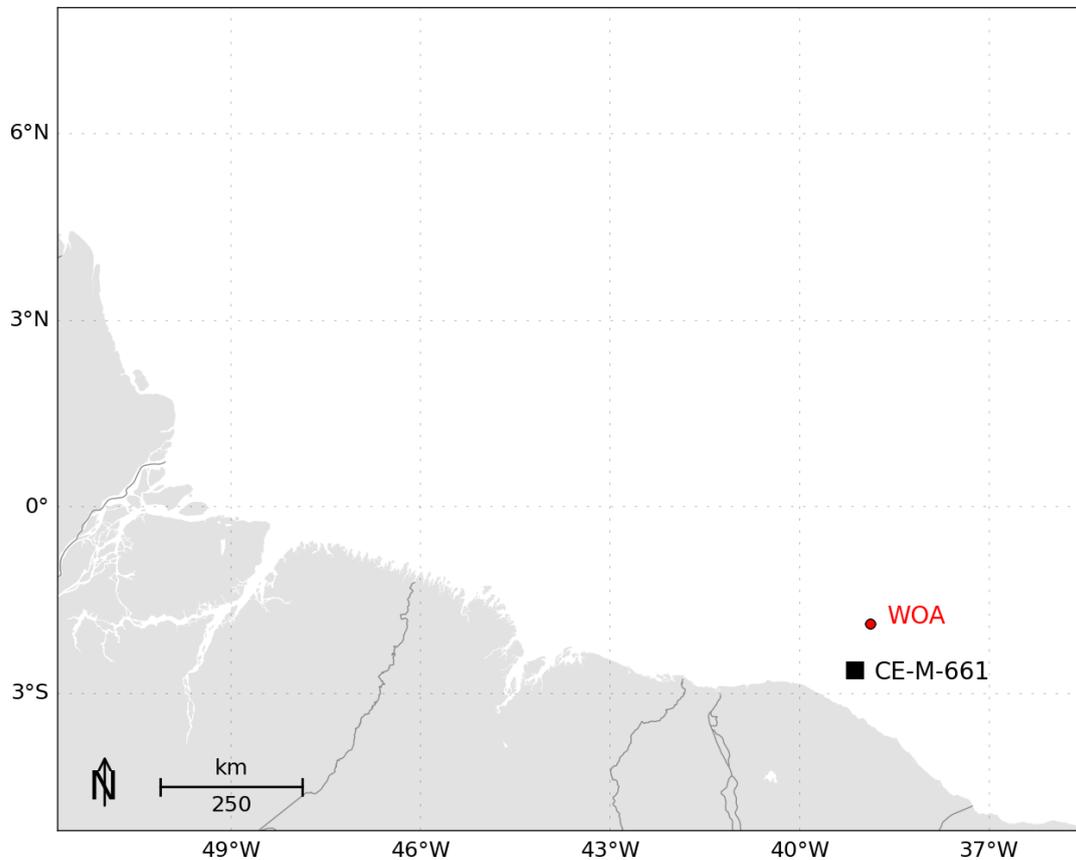


Figura 51: Localização do ponto de grade do WOA utilizado para as comparações.

Na Figura 52, 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 que houve uma boa representação da posição média das massas d'água na costa norte brasileira.

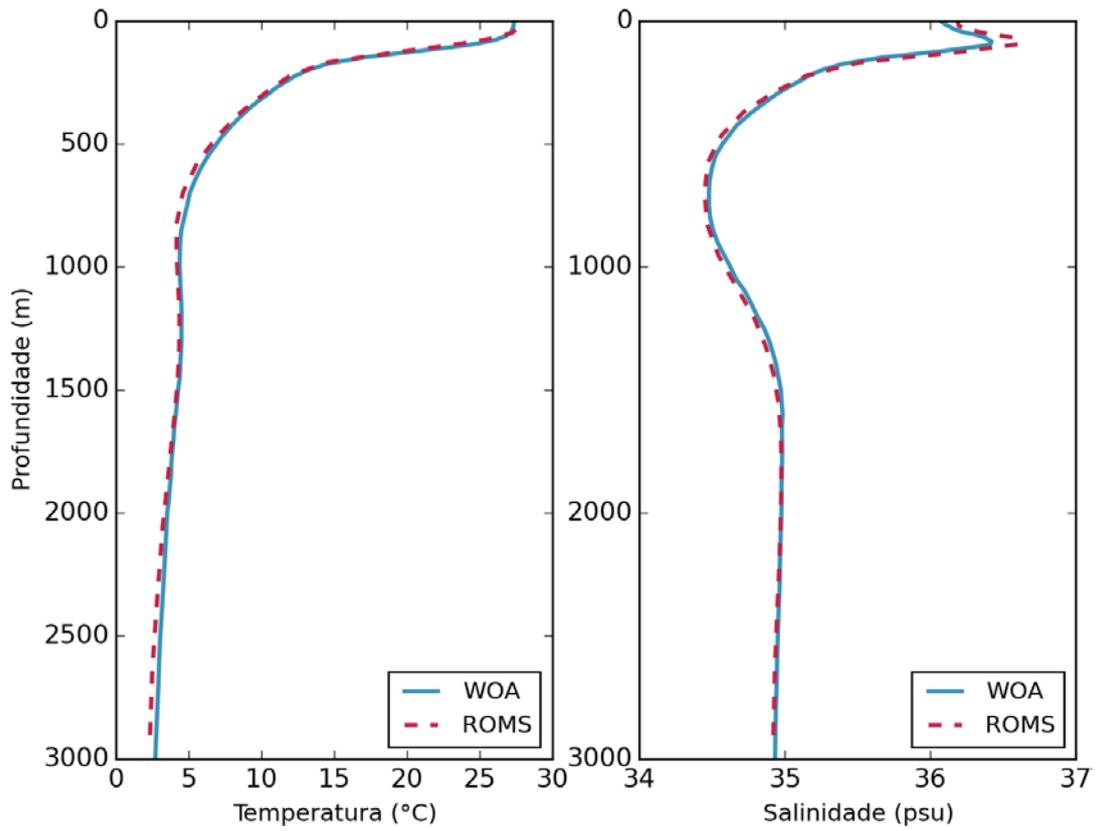


Figura 52: Perfis médios de temperatura e salinidade obtidos do WOA13.

2.6.4 Correntes

2.6.4.1 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 o intuito de forçar simulações de transporte de óleo, deve-se considerar que a menor densidade do óleo em relação à 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 utilizados os dados dos derivadores cuja trajetória está contida no domínio desse estudo (por um tempo superior a 2 semanas) durante o período de dezembro de 2012 até junho de 2013. Nesse contexto, 8 (oito) derivadores aparecem como relevantes para a comparação. A Tabela 5 agrupa as coordenadas do primeiro e último pontos onde cada derivador é encontrado no domínio espacial e temporal desse estudo.

Tabela 5: Data e local de lançamento dos derivadores da primeira campanha de monitoramento.

Derivador	Data Inicial	Longitude	Latitude	Data Final	Longitude	Latitude
01	12/04/2013	44.83°W	8.00°N	13/05/2013	51.75°W	6.61°N
02	12/02/2013	35.51°W	2.40°S	05/03/2013	45.93°W	0.80°N
03	12/02/2013	35.56°W	2.37°S	15/04/2013	51.71°W	7.40°N
04	17/01/2013	35.61°W	4.42°S	12/03/2013	51.69°W	6.50°N
05	02/06/2013	35.60°W	3.71°S	17/06/2013	45.97°W	0.85°S
06	01/06/2013	35.64°W	3.53°S	29/06/2013	47.58°W	0.33°S
07	26/12/2012	36.39°W	4.12°S	16/03/2013	51.74°W	6.84°N
08	28/04/2013	35.64°W	3.64°S	29/06/2013	45.21°W	6.06°N

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 53 a Figura 68 são apresentadas as trajetórias descritas pelos 8 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.

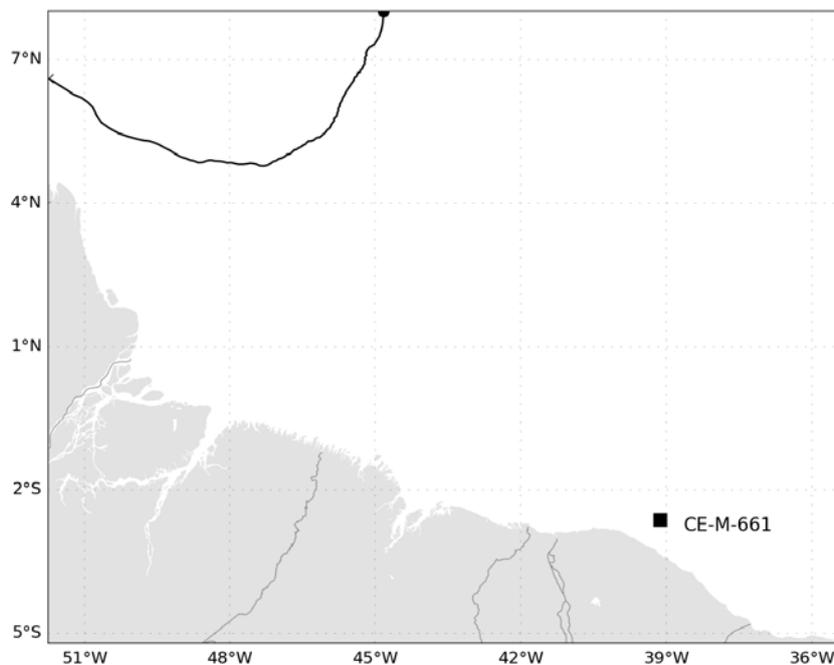


Figura 53: Trajetória descrita pelo derivador 01.

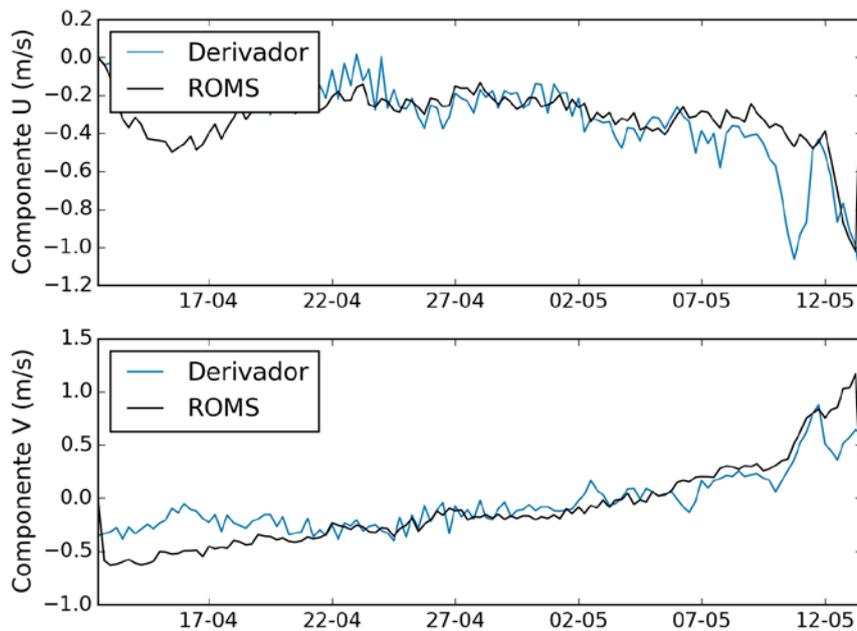


Figura 54: Comparação entre os dados obtidos do derivador 01 e os resultados do ROMS.

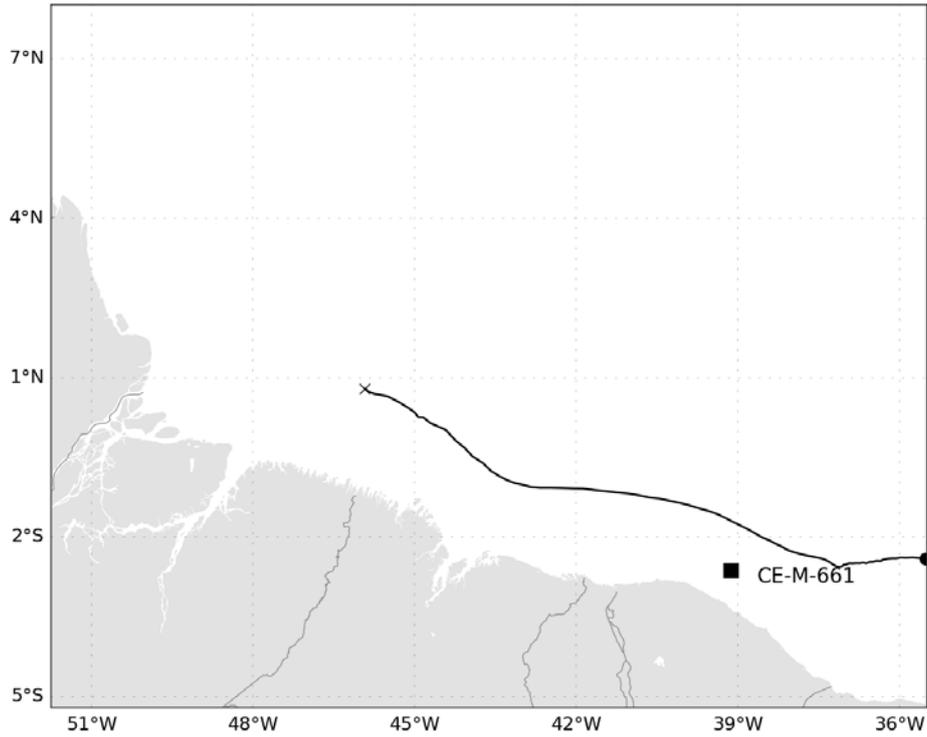


Figura 55: Trajetória descrita pelo derivador 02.

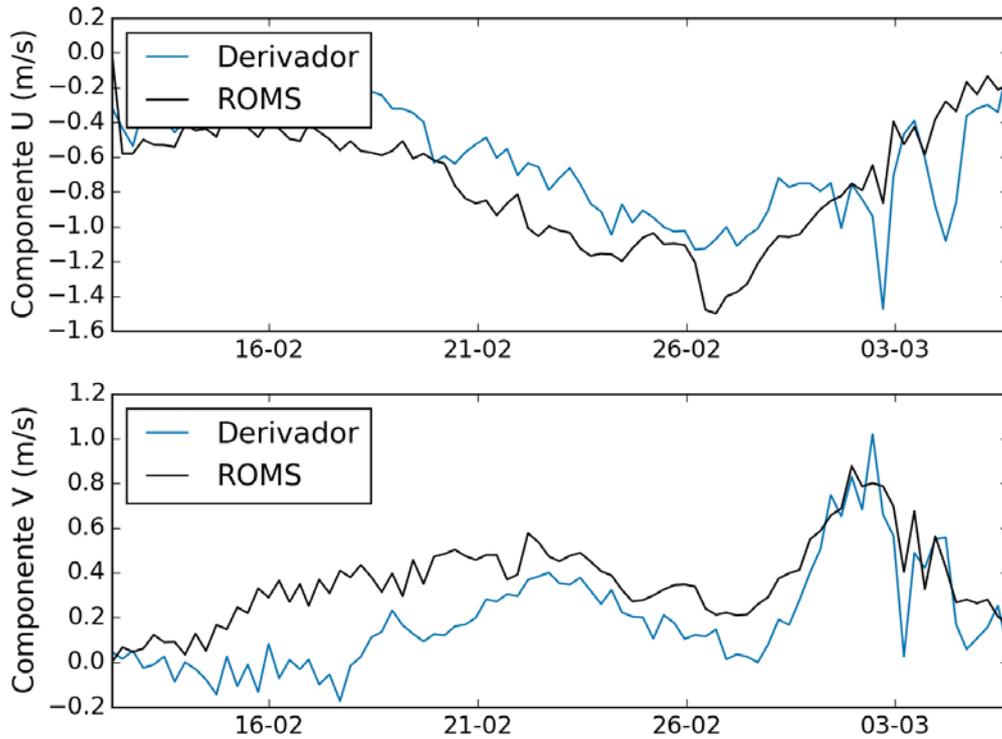


Figura 56: Comparação entre os dados obtidos do derivador 02 e os resultados do ROMS.

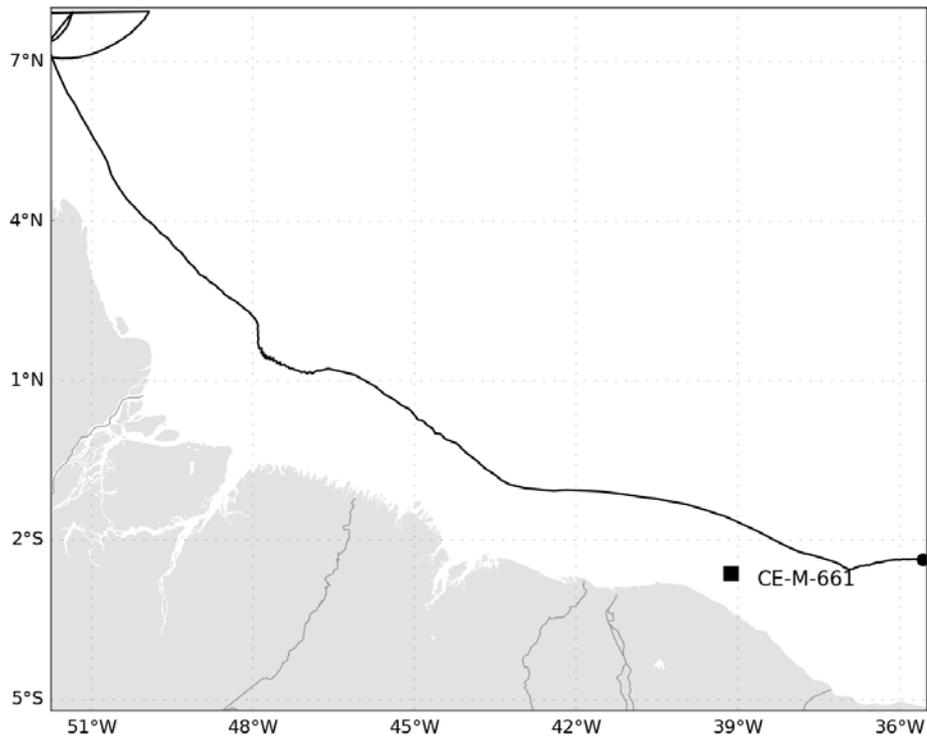


Figura 57: Trajetória descrita pelo derivador 03.

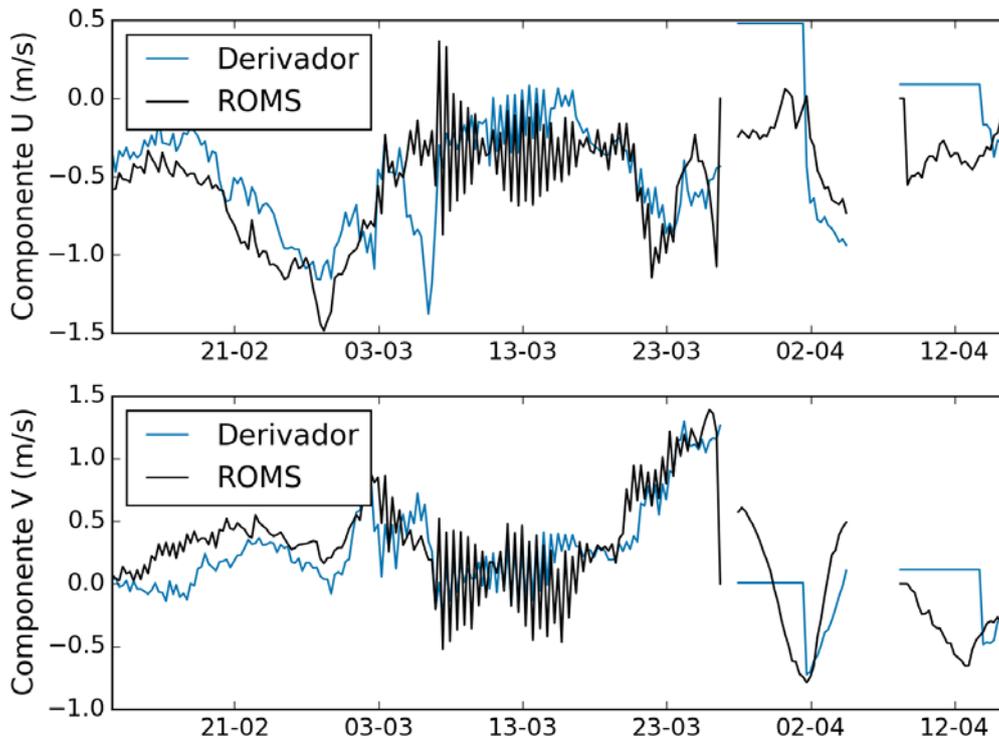


Figura 58: Comparação entre os dados obtidos do derivador 03 e os resultados do ROMS.

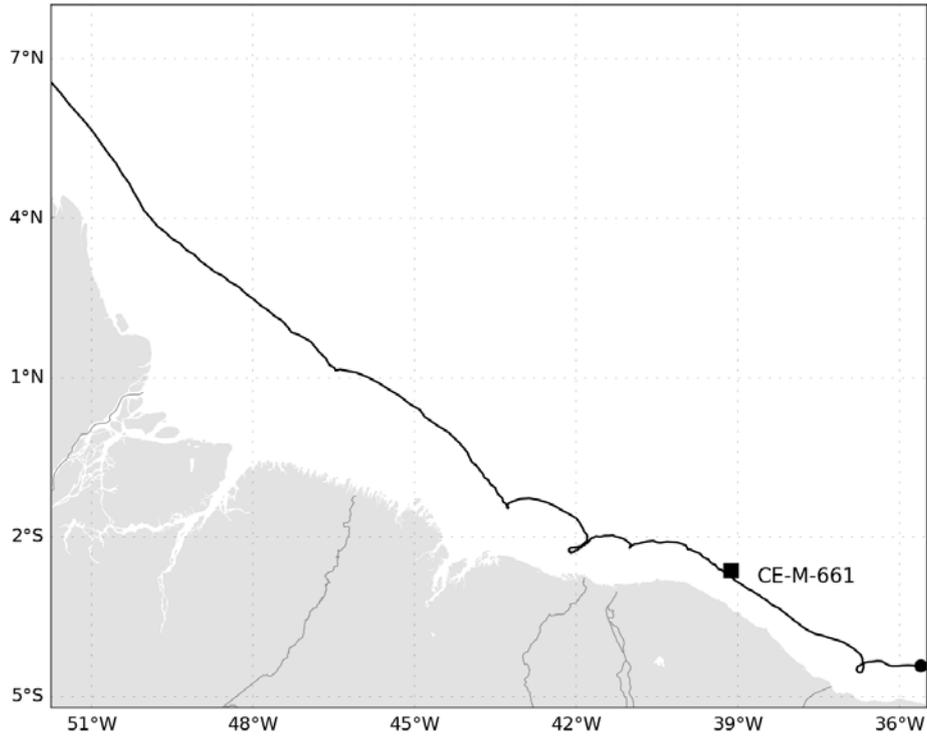


Figura 59: Trajetória descrita pelo derivador 04.

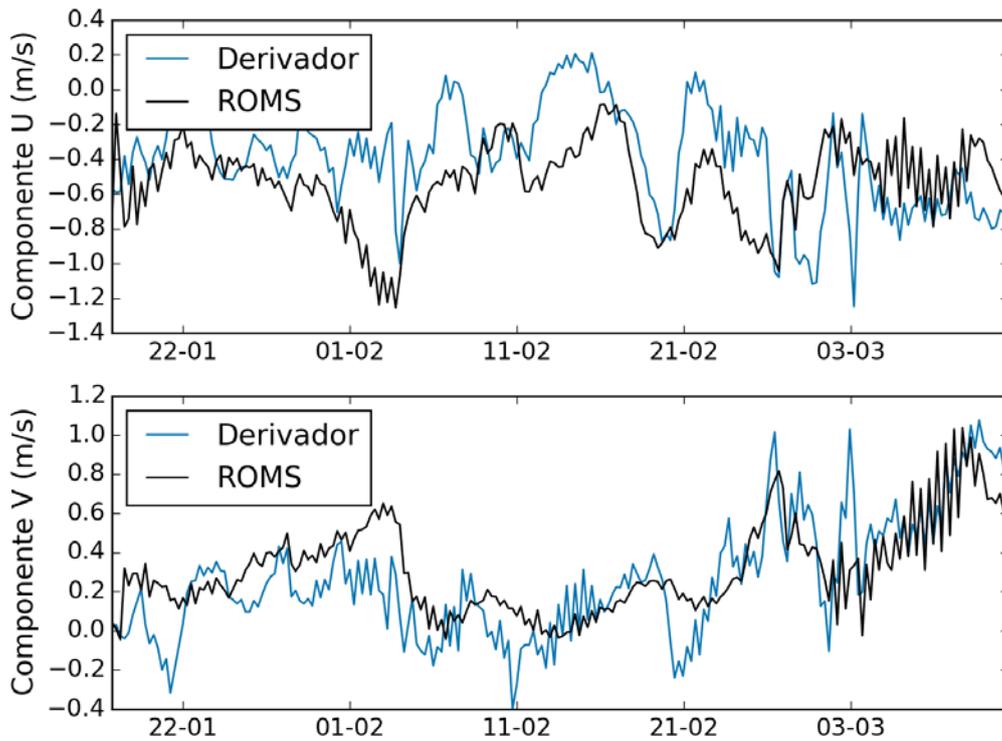


Figura 60: Comparação entre os dados obtidos do derivador 04 e os resultados do ROMS.

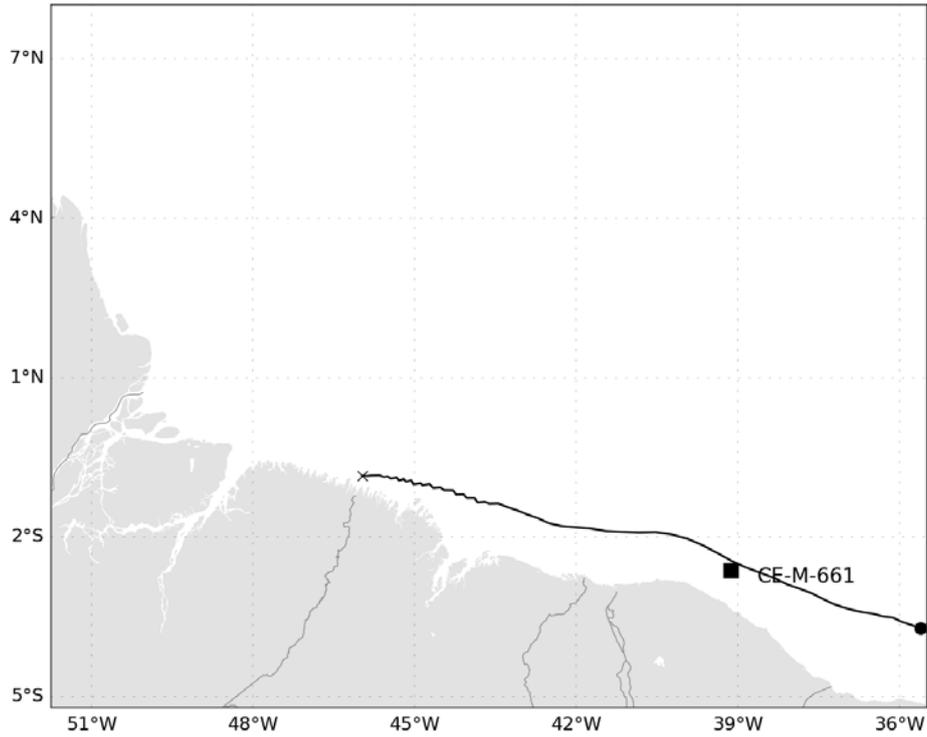


Figura 61: Trajetória descrita pelo derivador 05.

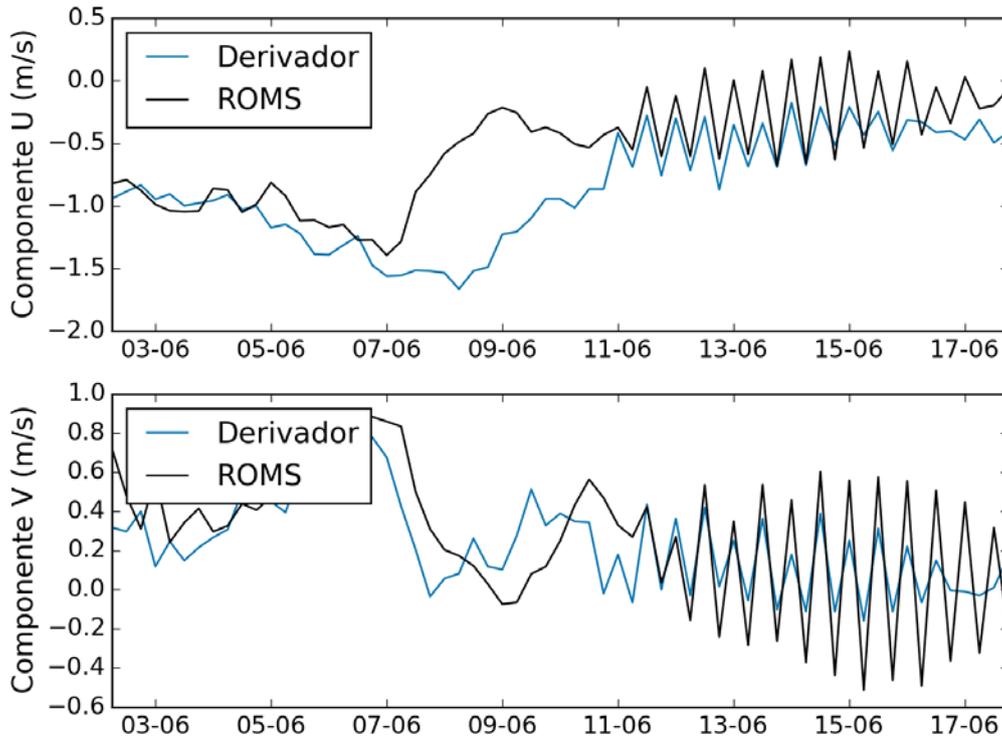


Figura 62: Comparação entre os dados obtidos do derivador 05 e os resultados do ROMS.

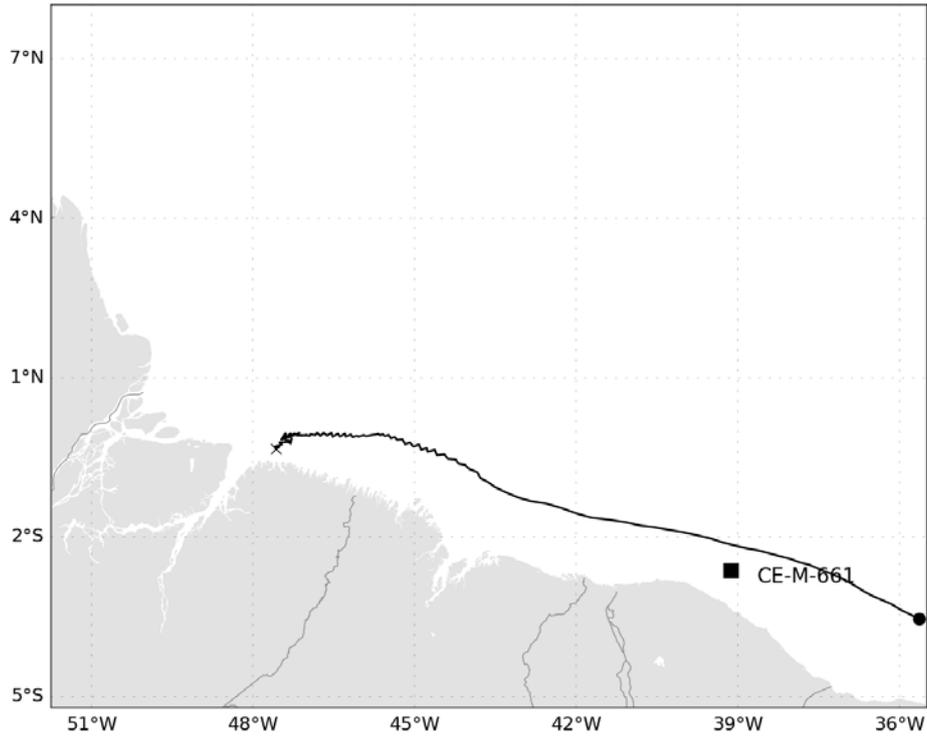


Figura 63: Trajetória descrita pelo derivador 06.

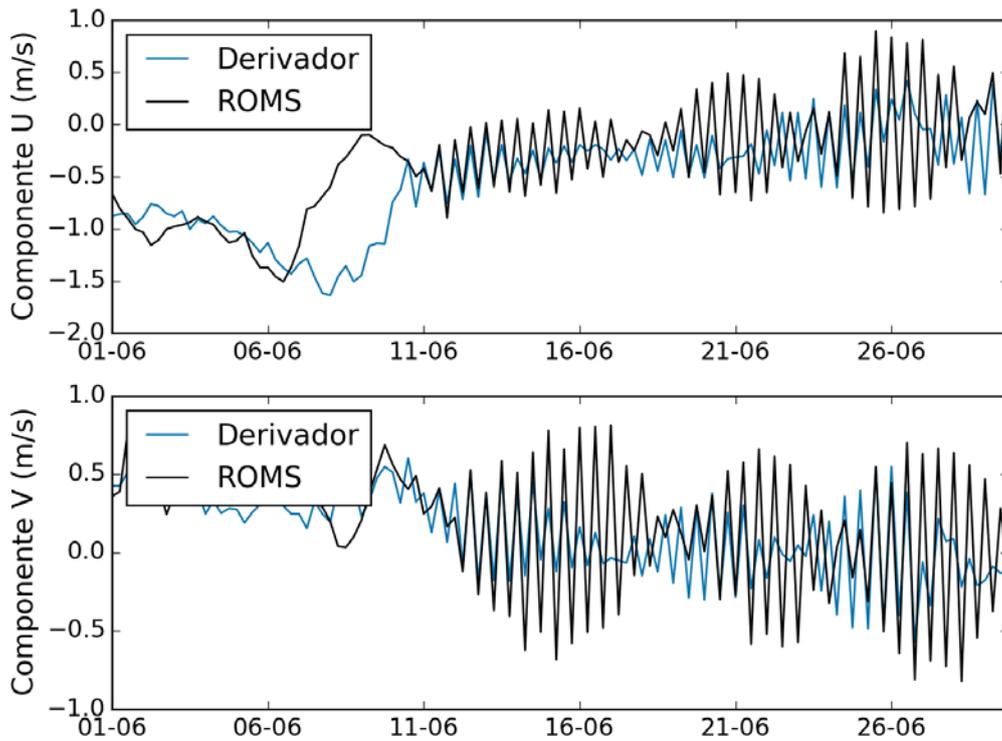


Figura 64: Comparação entre os dados obtidos do derivador 06 e os resultados do ROMS.

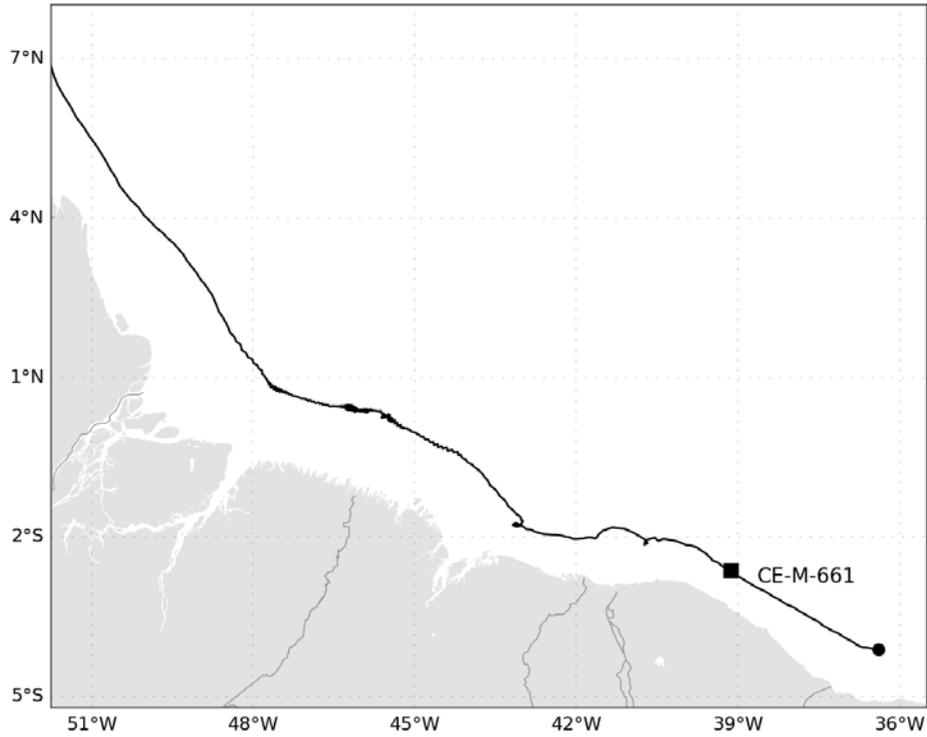


Figura 65: Trajetória descrita pelo derivador 07.

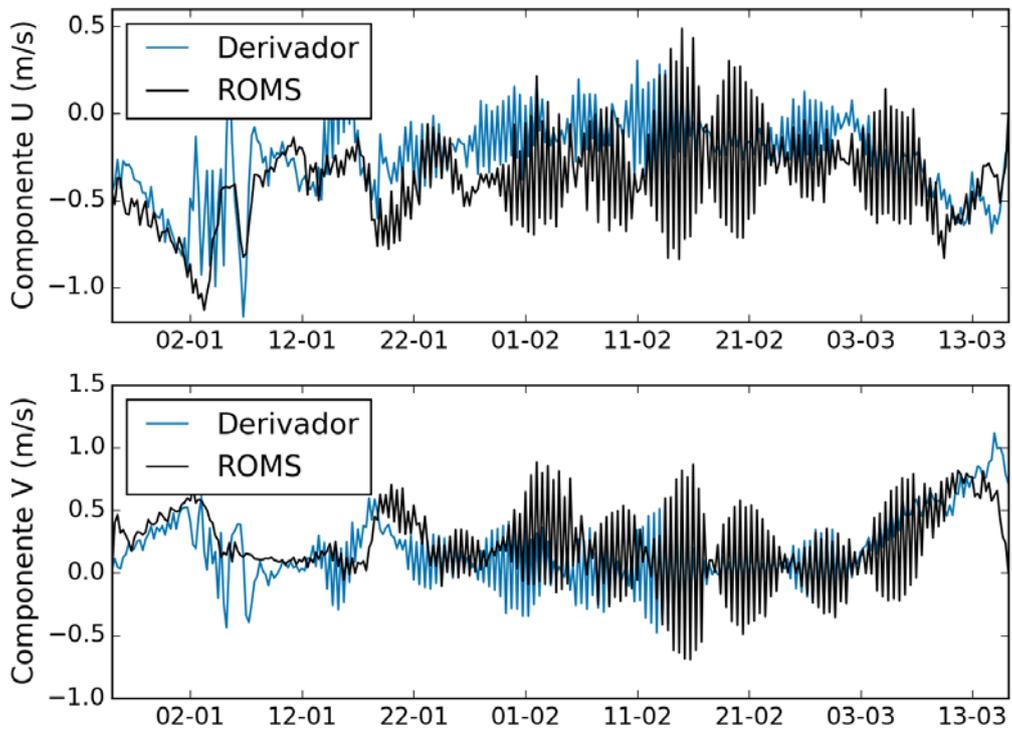


Figura 66: Comparação entre os dados obtidos do derivador 07 e os resultados do ROMS.

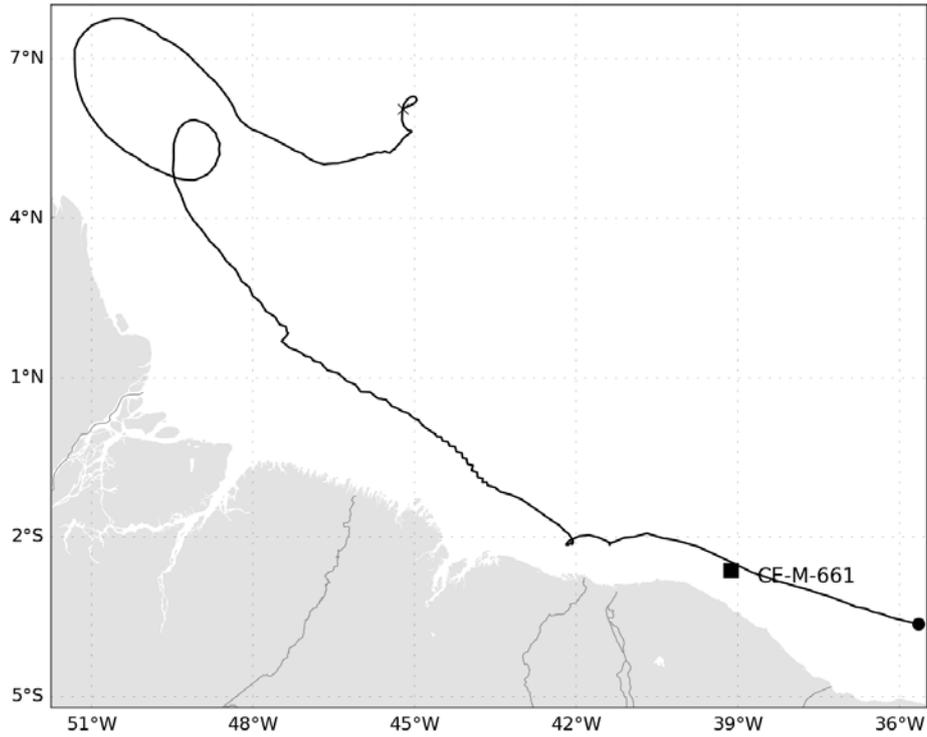


Figura 67: Trajetória descrita pelo derivador 08.

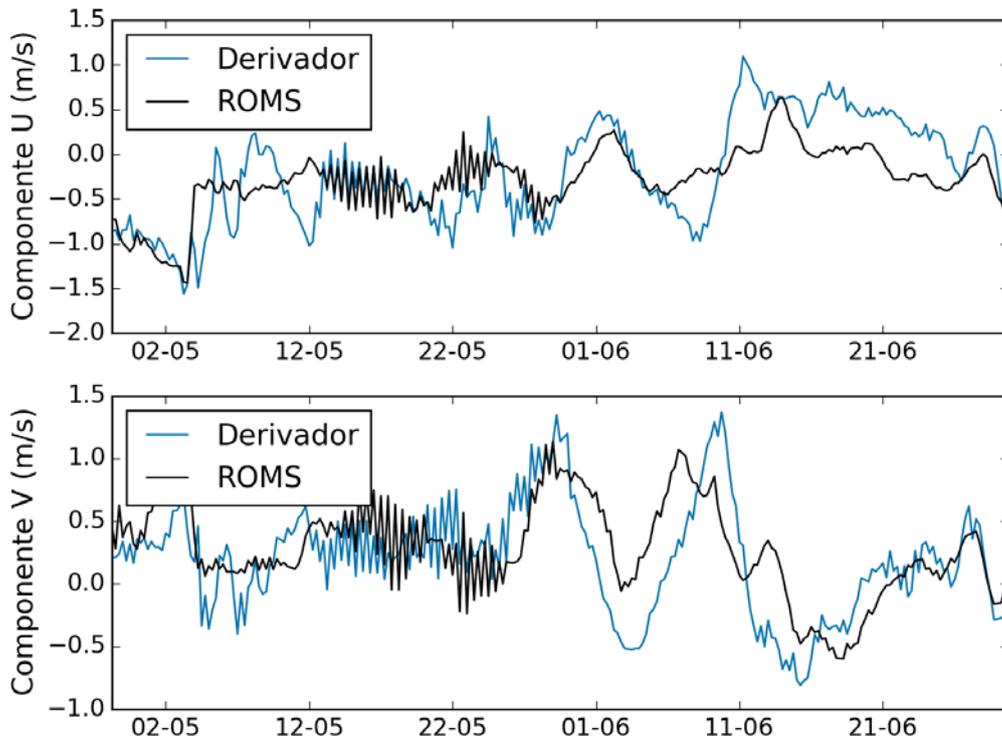


Figura 68: Comparação entre os dados obtidos do derivador 08 e os resultados do ROMS.

Através dos gráficos comparativos acima apresentados 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 2.6.1). 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	0,79
D componente meridional	0,85

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 ao padrão de intensidade e direção.

2.6.4.2 Correntes em Profundidade

As comparações de corrente em profundidade, principalmente na costa norte do Brasil, têm 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 à 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 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

69). 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.

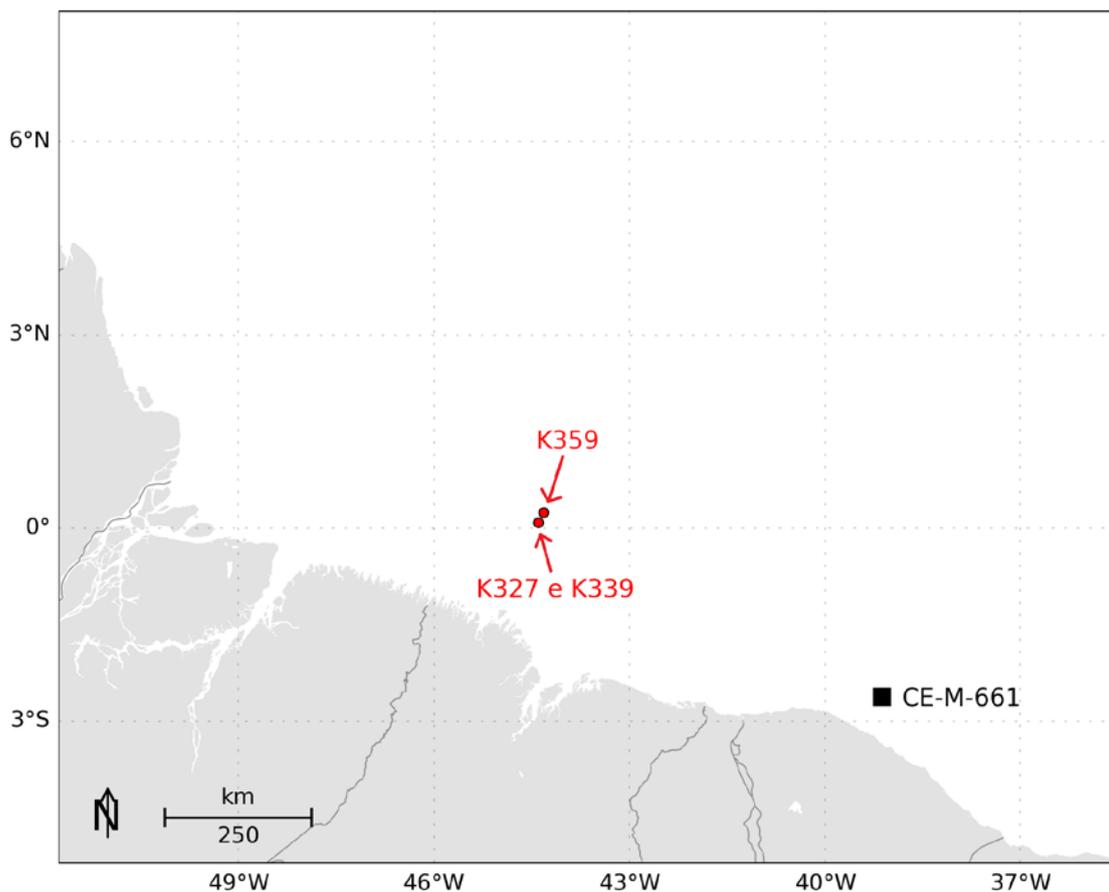


Figura 69: Localização dos fundeios do WOCE utilizados para comparação.

Na Figura 70 são apresentados os perfis verticais médios, retirados dos dados do WOCE e dos resultados do ROMS para o ponto mais próximo ao fundeio K359 (mais profundo). Ressalta-se que as comparações realizadas têm 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.

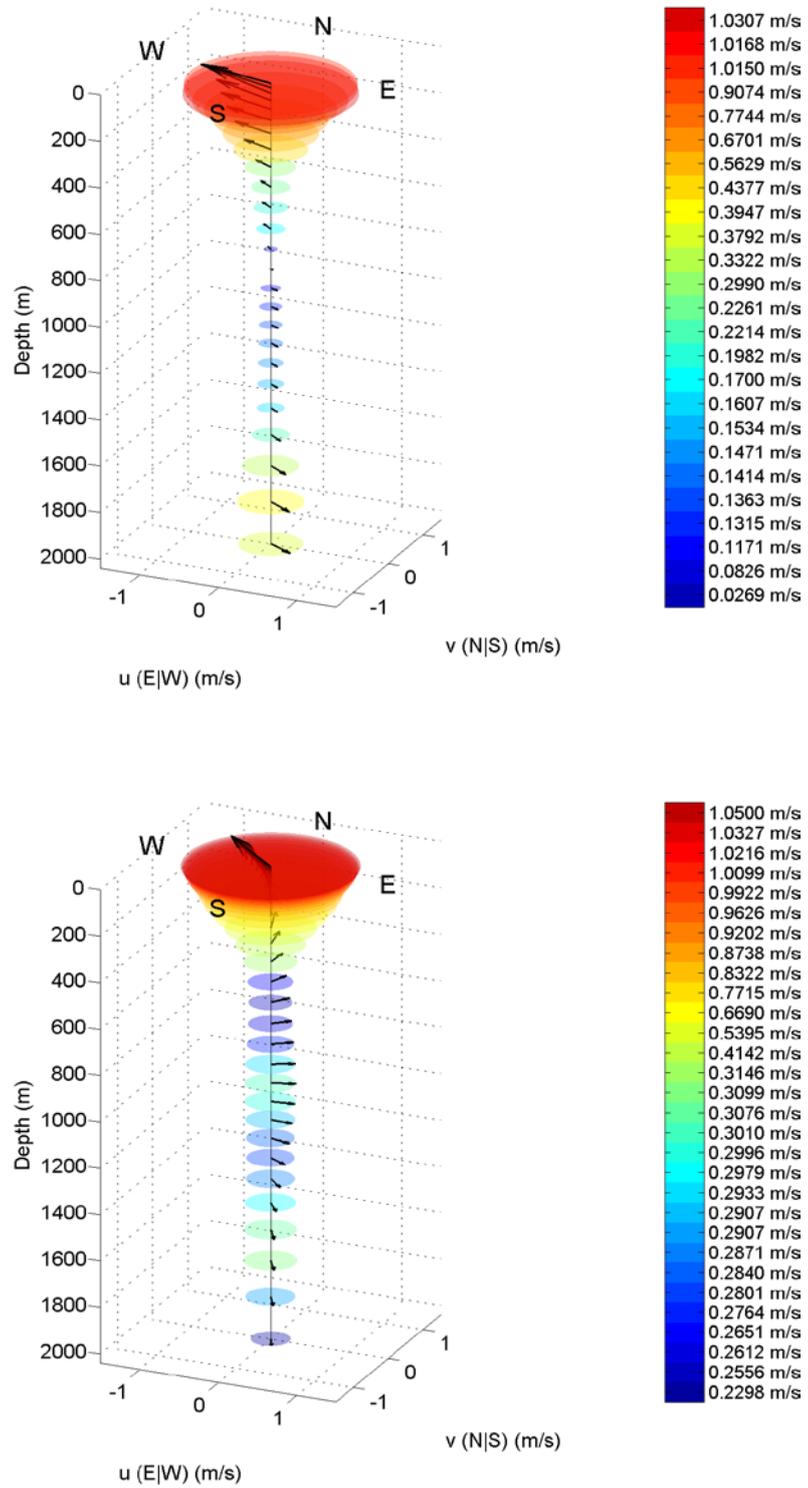


Figura 70: Perfil vertical de correntes retirado do WOCE (acima) e do ROMS (abaixo).

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.

2.7. 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 .

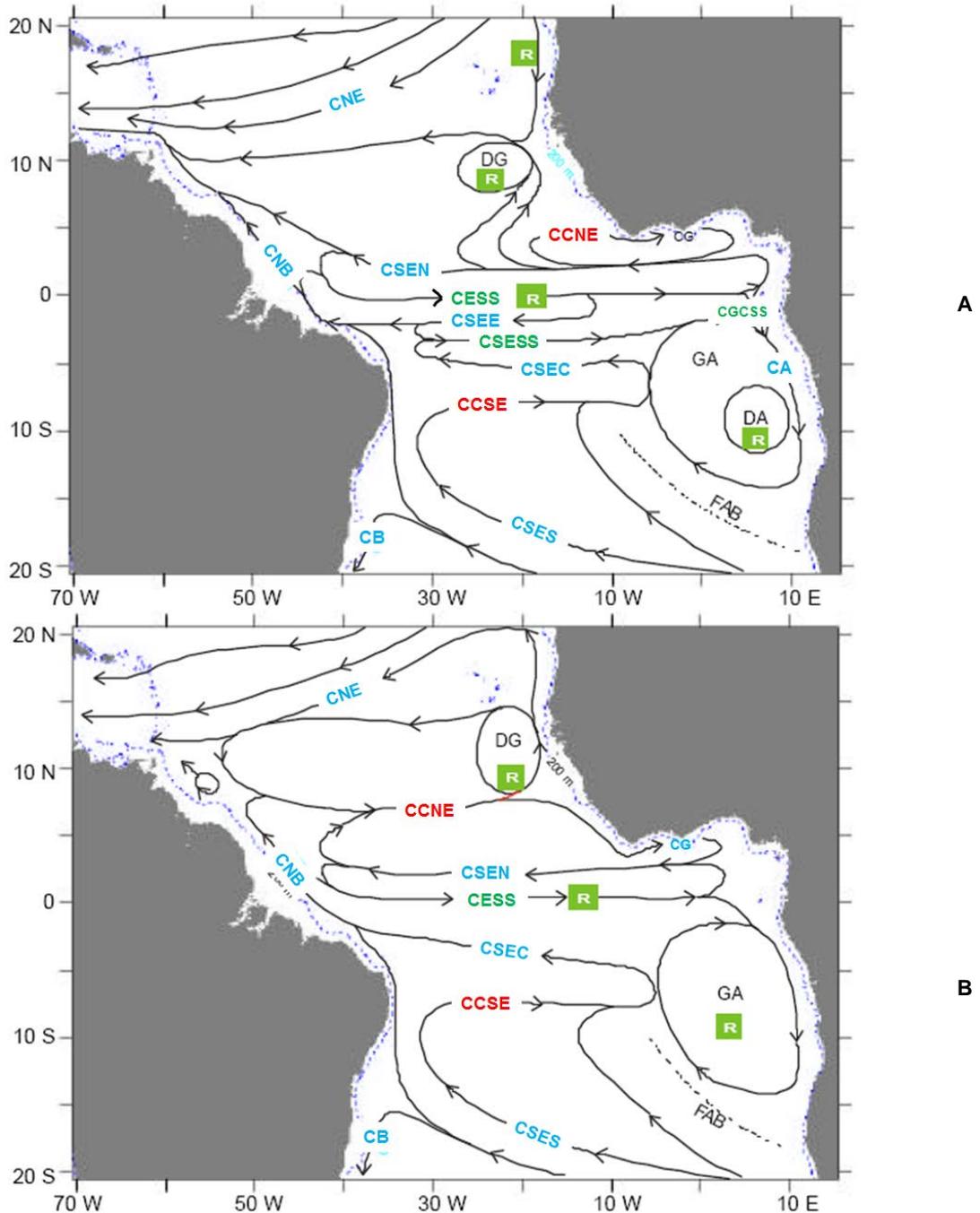


Figura 71: Distribuição esquemática das principais correntes encontradas na camada superficial (entre 0 e 100 m) do Atlântico Tropical: (a) situação típica de outono/HS (março, abril e maio) e (b) situação típica de primavera/HS (setembro, outubro e novembro). Os pontos azuis representam a batimétrica de 200 m. Fonte: Menezes (1999).

Os campos médios mensais de circulação obtidos dos resultados do modelo podem ser observados da Figura 72 até a Figura 83. Estes campos demonstram que a região do Bloco CE-M-661 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.

Embora não haja variabilidade sazonal na direção das correntes na região de estudo, 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).

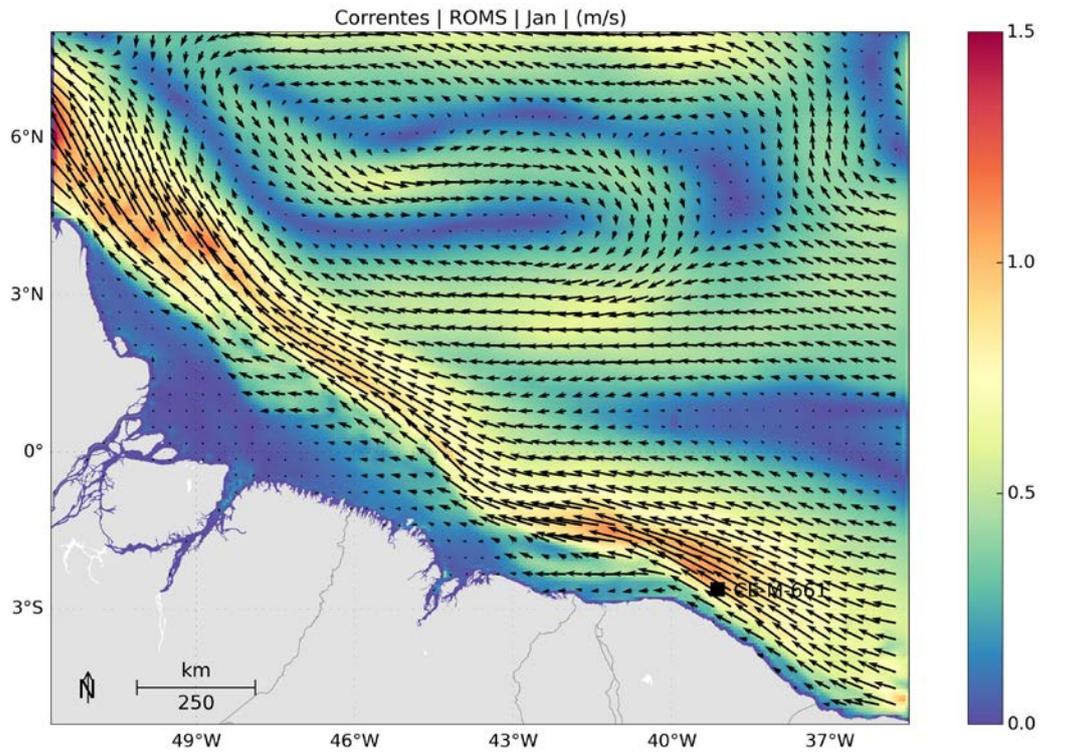


Figura 72: Campo médio de circulação para o mês de janeiro.

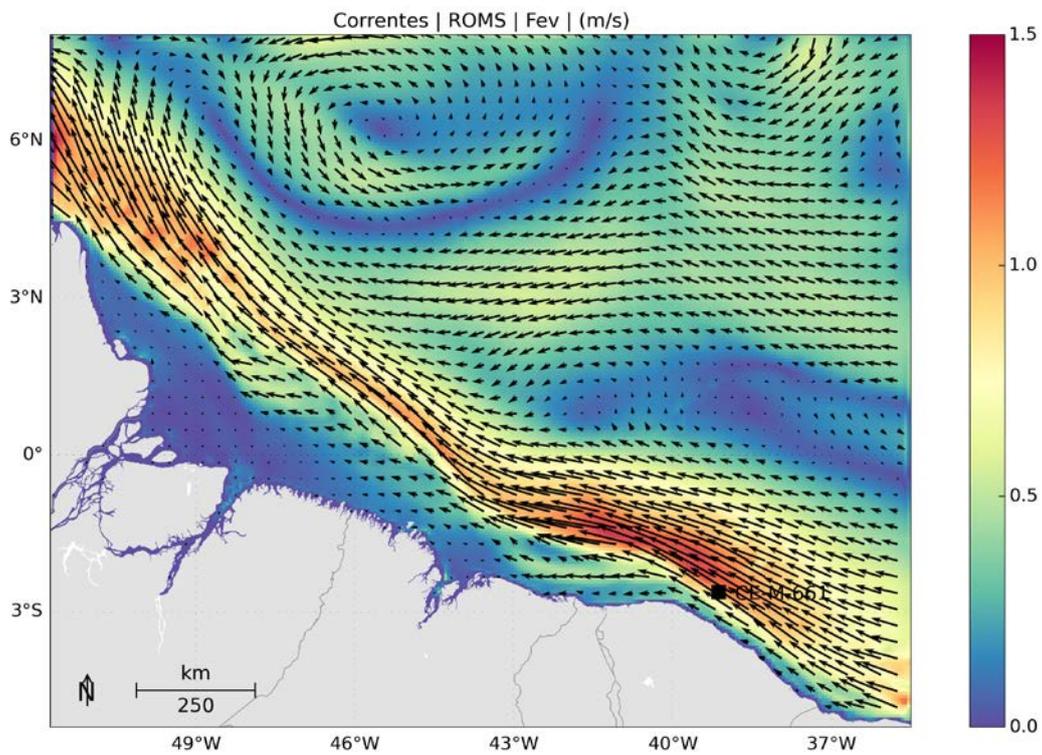


Figura 73: Campo médio de circulação para o mês de fevereiro.

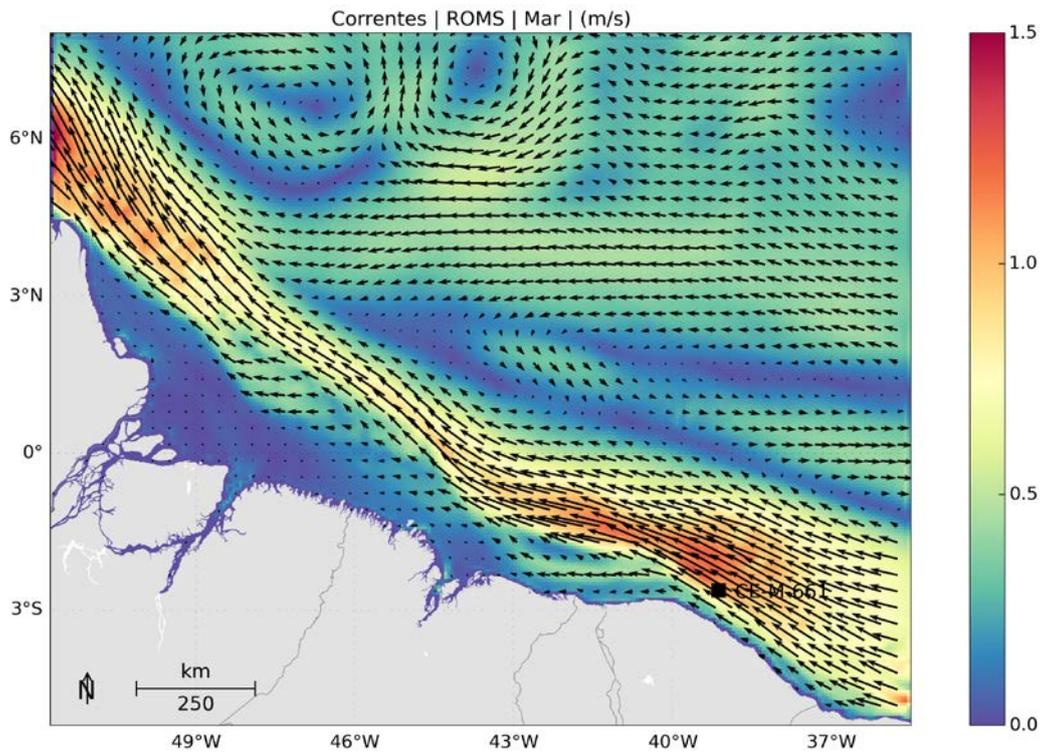


Figura 74: Campo médio de circulação para o mês de março.

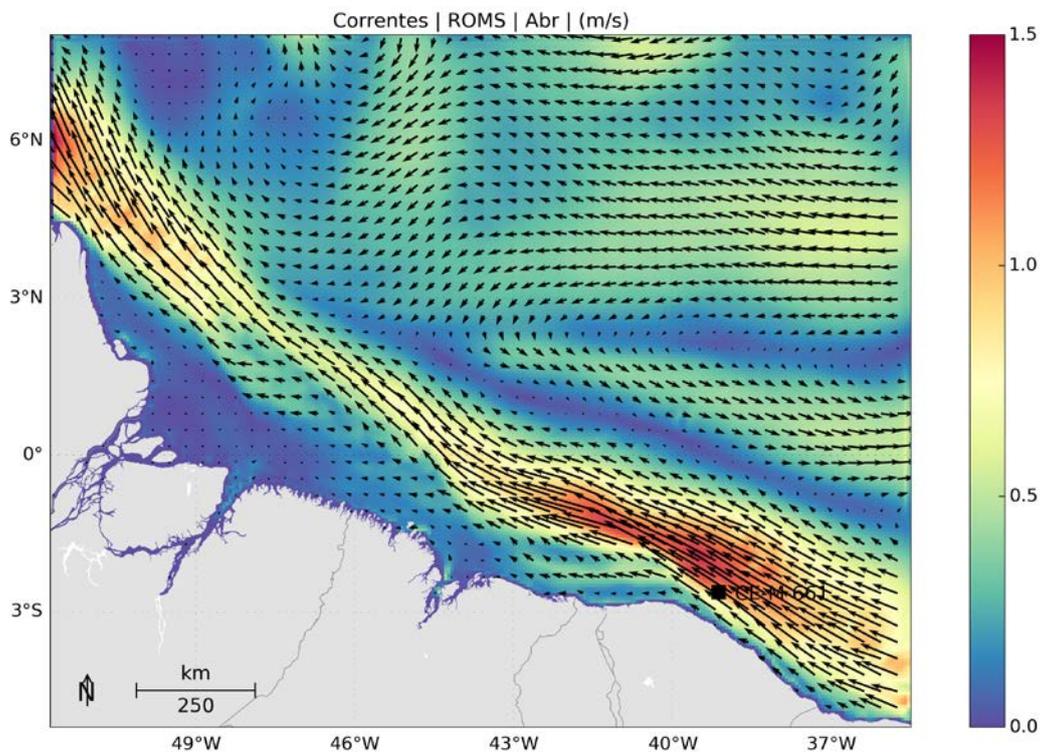


Figura 75: Campo médio de circulação para o mês de abril.

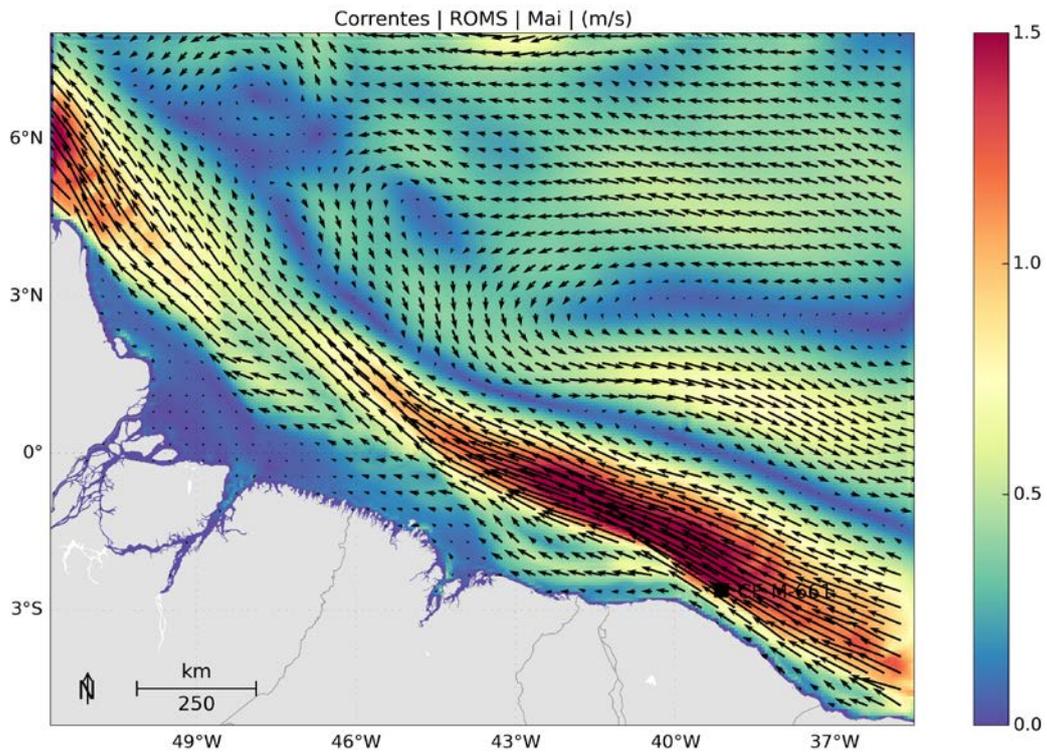


Figura 76: Campo médio de circulação para o mês de maio.

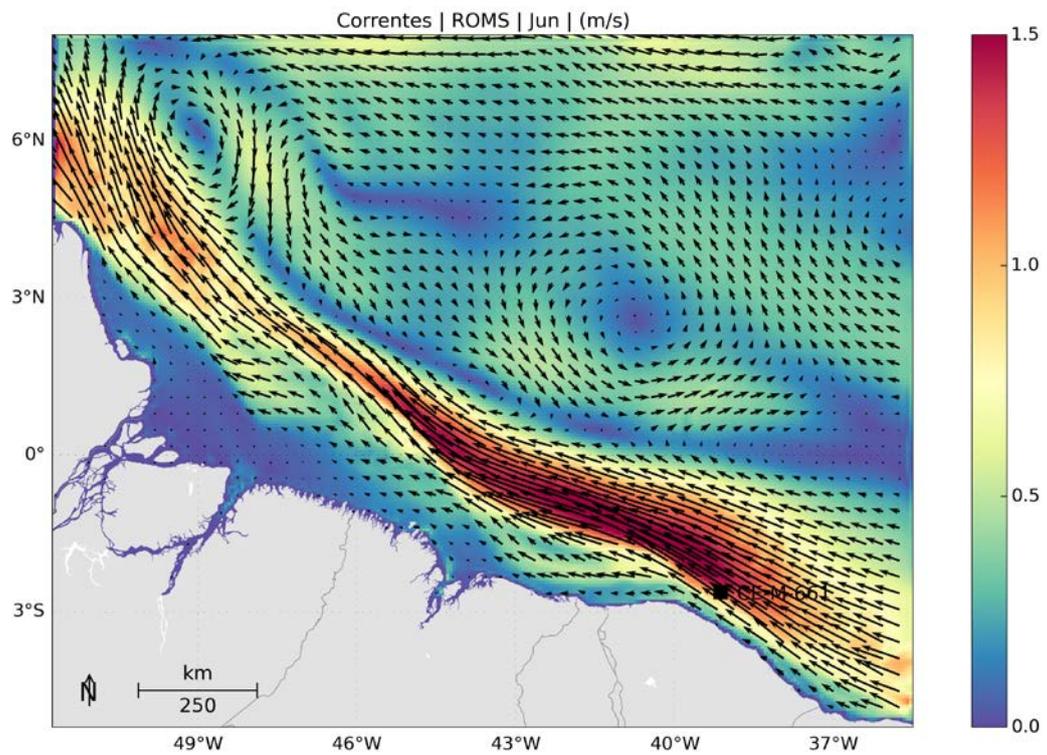


Figura 77: Campo médio de circulação para o mês de junho.

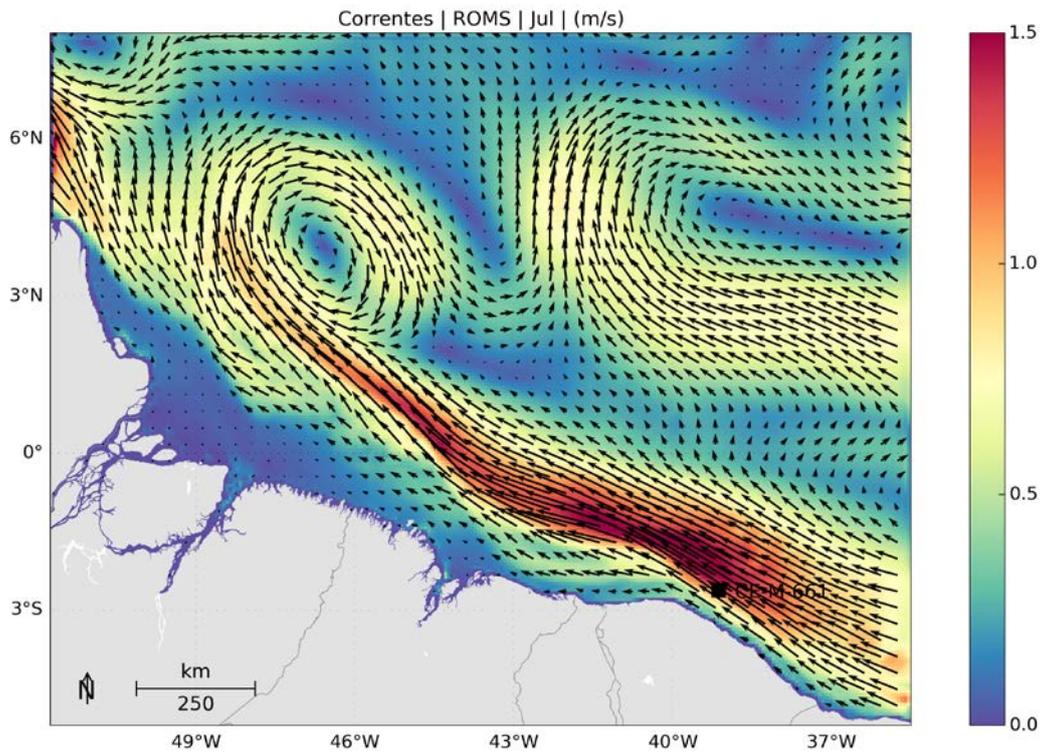


Figura 78: Campo médio de circulação para o mês de julho.

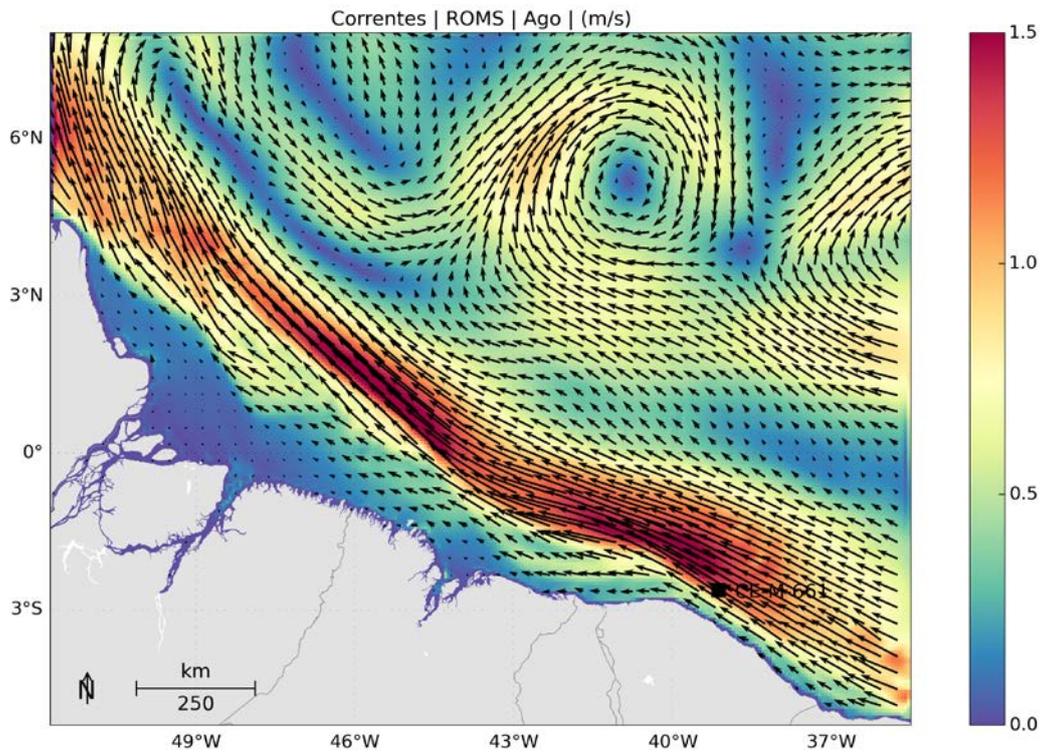


Figura 79: Campo médio de circulação para o mês de agosto.

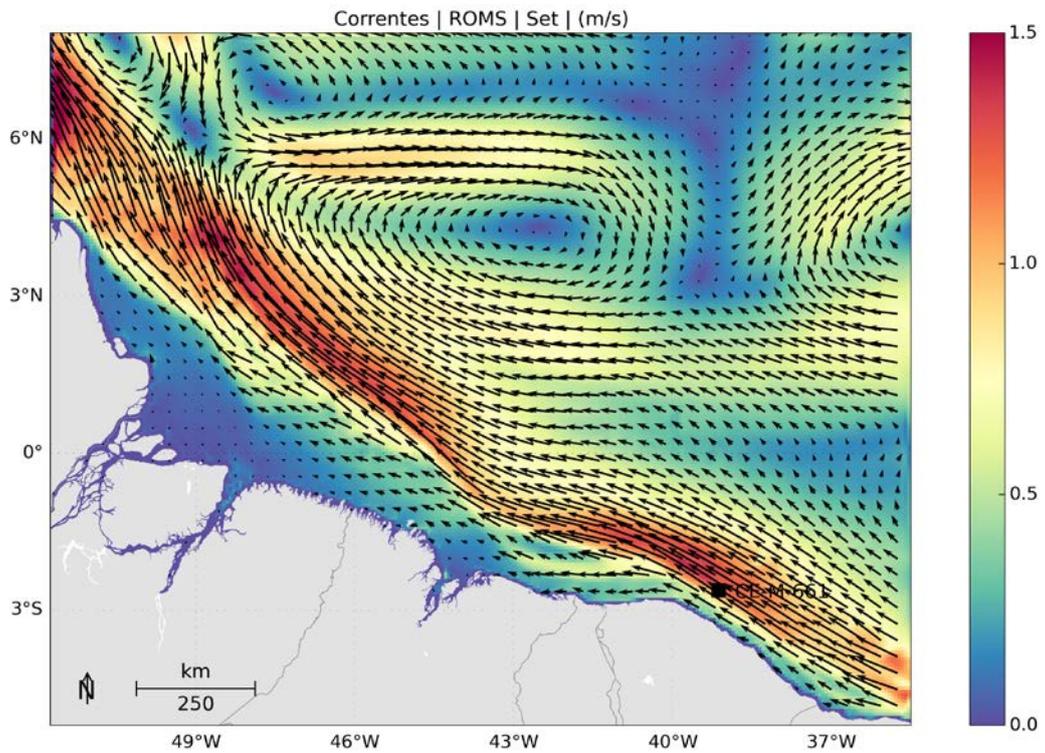


Figura 80: Campo médio de circulação para o mês de setembro.

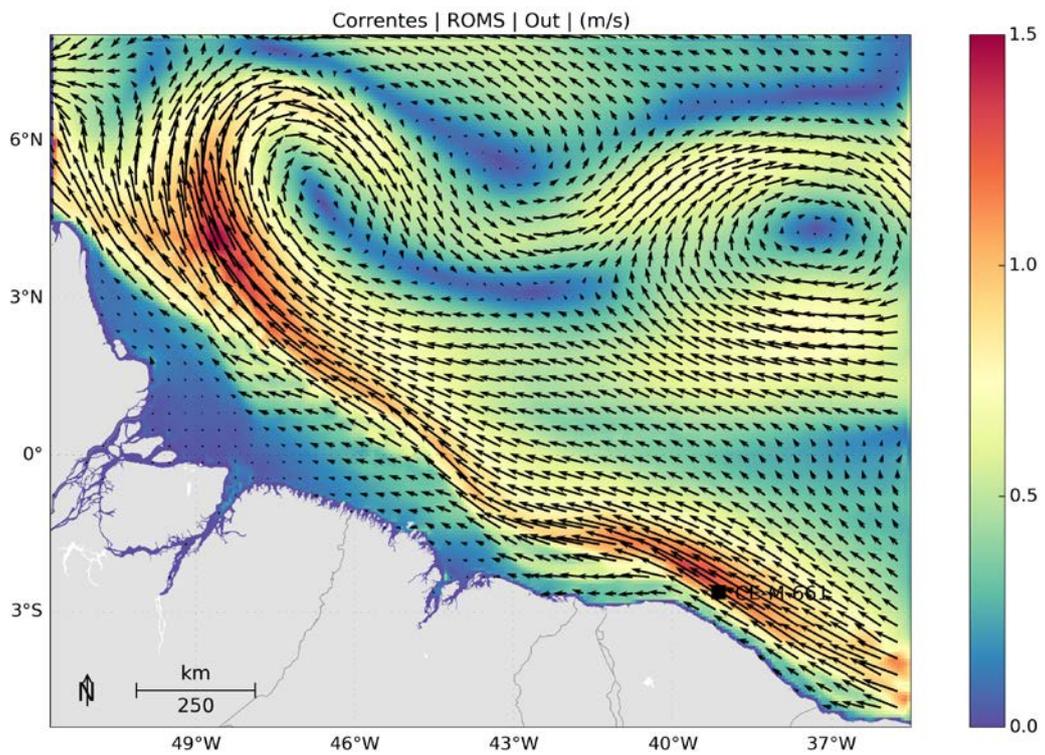


Figura 81: Campo médio de circulação para o mês de outubro.

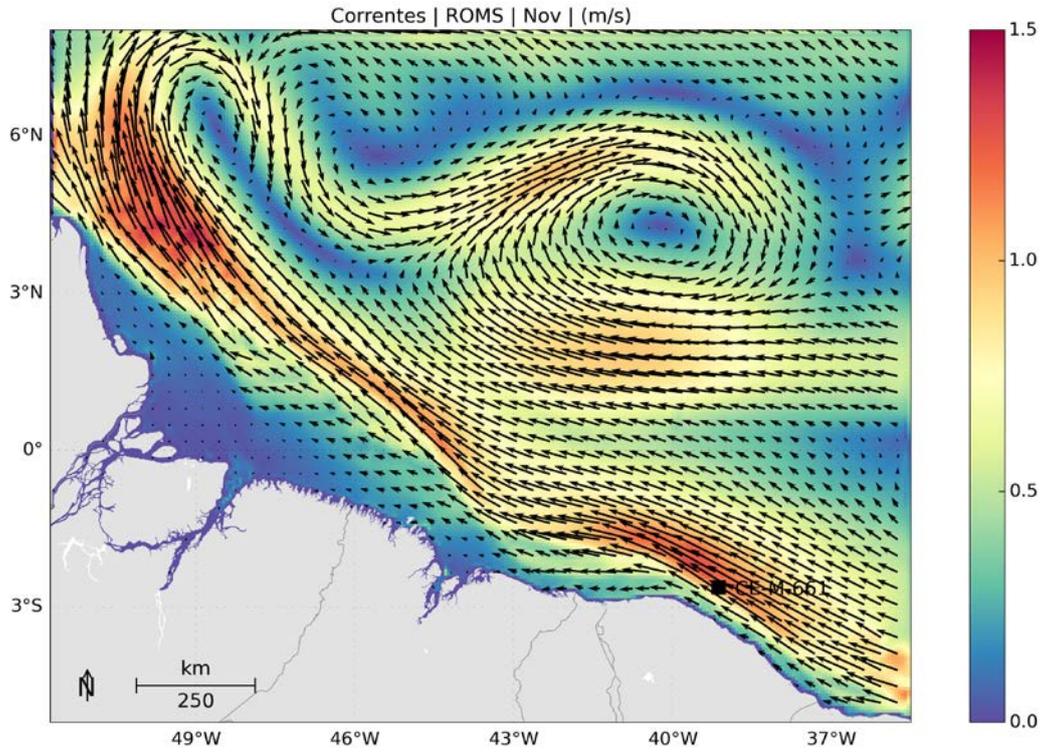


Figura 82: Campo médio de circulação para o mês de novembro.

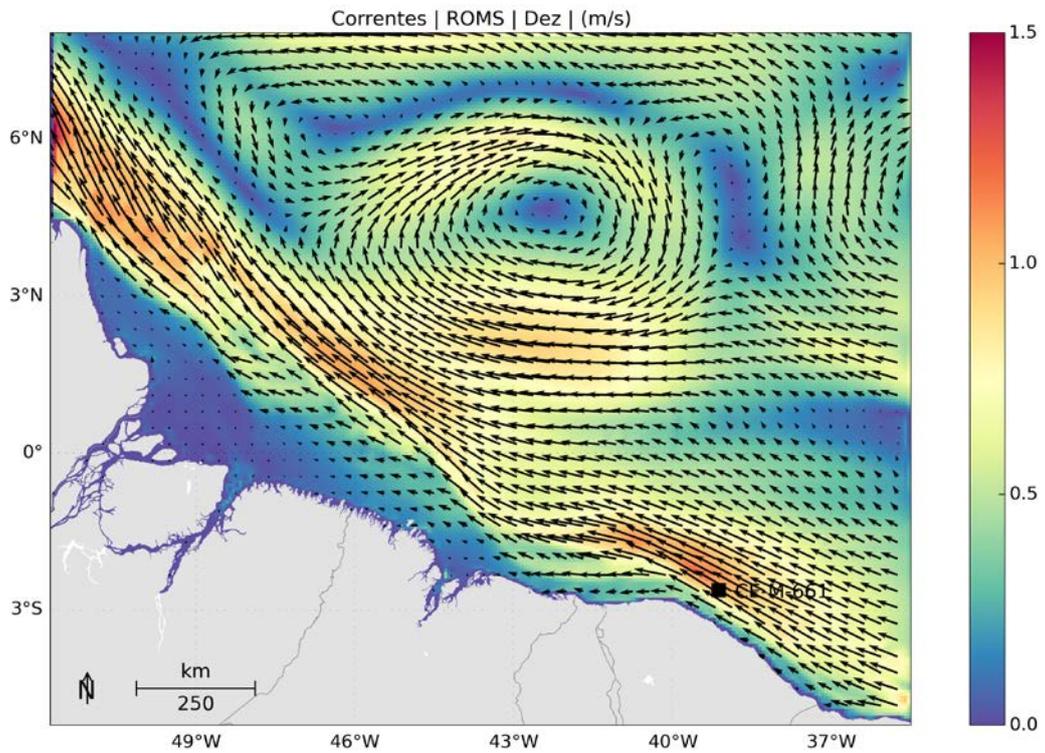


Figura 83: Campo médio de circulação para o mês de dezembro.

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 no Poço Itarema do bloco CE-M-661, Bacia do Ceará, localizado na área de interesse para perfuração, corresponde à porção superior do bloco, de maior profundidade e mais distante da costa. 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 m³;
- Médio Porte - 200 m³;
- Pior caso (maior volume): ~ 13.307 m³ (83.700 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 2.790 bbl/dia, segundo a contratante) com a perda de controle do mesmo (30 dias de vazamento).

No estudo de dispersão de óleo, dois tipos de simulações foram conduzidos: probabilísticas. e determinísticas.

Geralmente são selecionados 2 cenários determinísticos, o que apresenta a maior massa de óleo na costa e o que apresenta o menor tempo de chegada de óleo na costa. Como nos cenários probabilísticos simulados não houve toque de óleo na costa, o critério de seleção do cenário crítico foi a simulação que apresentou, a final de 60 dias, a menor perda de massa de óleo pela soma dos processos de evaporação e degradação.

Na Tabela 7 é apresentado o resumo dos cenários simulados.

Tabela 7: Resumo dos cenários de vazamento simulados.

Modelo	Volume Total (m ³)	Vazamento	Profundidade	Tempo
Probabilístico				
Pequeno Porte	8	instantâneo	superfície	30 dias
Médio Porte	200	instantâneo	superfície	30 dias
Pior Caso	13.307	contínuo (30 dias)	fundo	60 dias
Determinístico				
Crítico - Menor perda de massa de óleo	13.307	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 84 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).

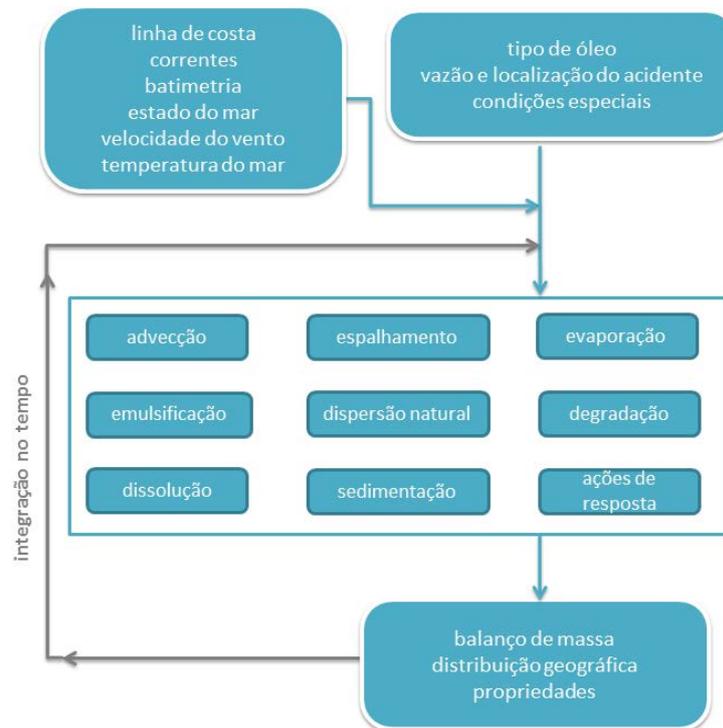


Figura 84: Esquema simplificado dos dados de entrada, processos e dados de saída (resultados) usados e obtidos pelo modelo OSCAR. Adaptado de Reed (2001).

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 da componente governada pela onda (Stokes). A componente turbulenta (w'), por sua vez, 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):

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

para K em cm^2/s e t em segundos.

O coeficiente de difusão turbulenta acima da pycnoclina relacionado às condições de onda, segundo Ichiye (1967, *apud* REED, 2001), 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 $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ (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 ν 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:

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

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), ρ_w é a densidade da água (kg/m^3), μ_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 e 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, $8,206 \times 10^{-5}$ atm- m^3 /mol-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 (kg/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 Δd 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 ν 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 ρ_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 ν 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 (%); Δt 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, *apud* REED,2001):

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

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 (m²); F_i é a fração molar do componente i remanescente na mancha; S_i é a solubilidade do componente i (g/m³, ppm); e C_i é a concentração ambiente do componente i (g/m³).

Para uma mancha de óleo, o coeficiente de transferência de massa K_d é calculado por (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); ν_w é a viscosidade cinemática da água ($\sim 8,9 \times 10^{-7}$ m²/s a 25°C) e D_i a difusividade molecular do componente i (m²/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 feito através da soma da transformação de cada componente do óleo por diferentes formas de degradação. A Figura 85 mostra o esquema de transformação dos componentes considerados no modelo OSCAR.

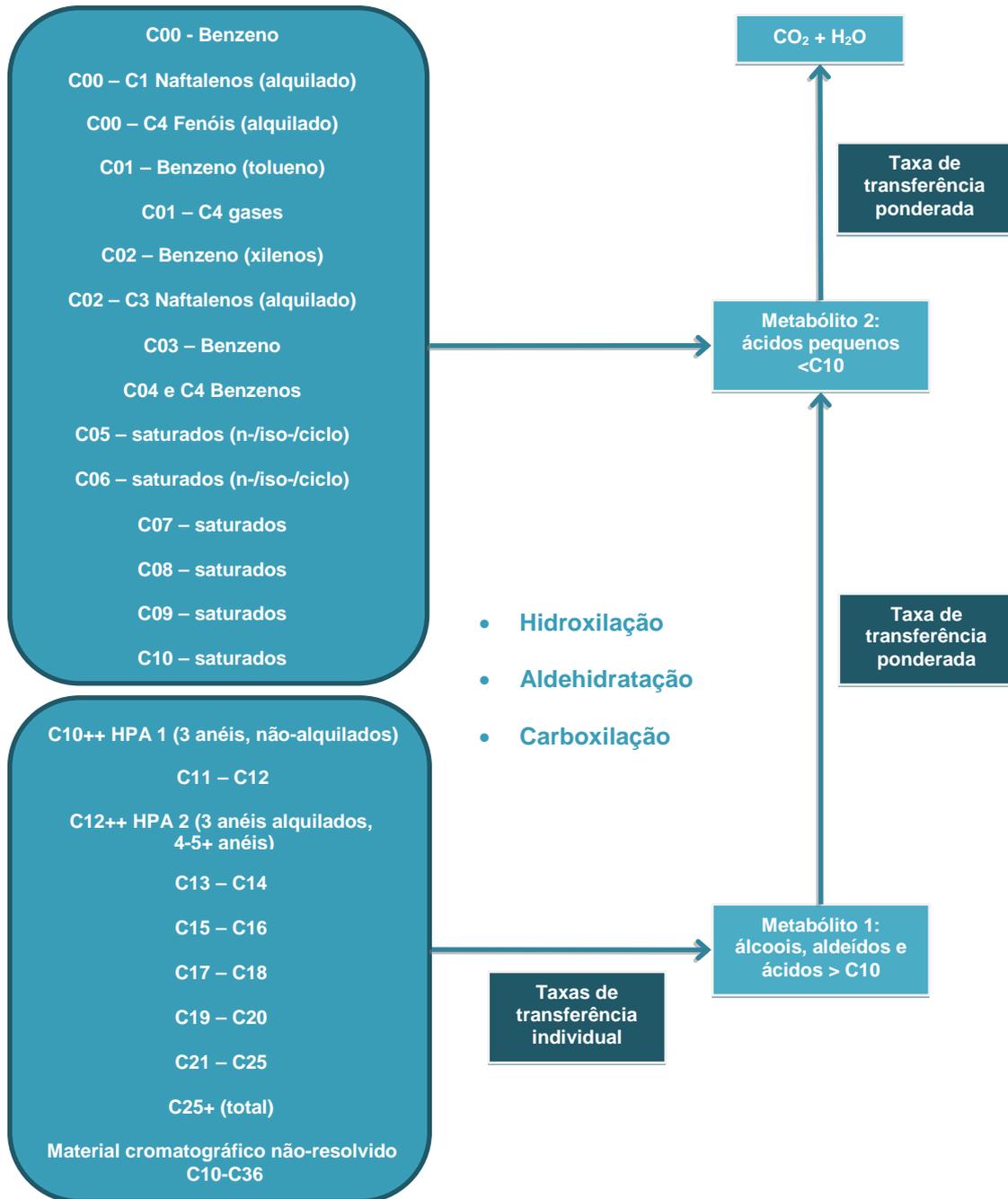


Figura 85: Esquema da degradação dos principais componentes do óleo. Adaptado de Reed (2001).

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 a partir 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 ²	Classe
Parâmetro: K_{ow}		
$\log 1/S = 1,113 \log K_{ow} - 0,926$	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
Parâmetro: K_{oc}		
$\log K_{oc} = 0,937 \log K_{ow} - 0,006$	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 sua densidade e viscosidade. 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 por:

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

sendo $W(t)$ a porcentagem de água (%), ρ_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 a 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. Vale ressaltar que 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 (modelos Lagrangianos) 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 Lagrangianos calculam a distribuição espacial de massa do contaminante, que é 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 uma vantagem em relação a outros modelos Lagrangianos, pois permite essa transformação, inclusive fazendo a distinção entre a 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 intemperismo 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 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*, onde 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.

Sendo assim, 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} (m³), 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 δ_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 tiver 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 Δm é a massa removida no passo de tempo Δt , m_i é a massa na célula de costa i , e r_i é a taxa de remoção 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.

Em seguida, é calculada a distribuição de massa ao longo da linha de costa considerando que o tamanho da linha de costa de cada ponto de grade é a sua diagonal. Assim se tem a quantidade de massa por unidade de comprimento (Ex: toneladas por quilômetro).

3.1.1.6 Óleo nas Unidades de Conservação

Foram separadas todas as Unidades de Conservação (UC) -federais, estaduais e municipais, disponibilizadas no Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (MMA,2014), e nos instrumentos legais de criação, da região em que se verifica probabilidade de óleo na costa ou na região costeiro-oceânica.

Para identificação da probabilidade de presença, tempo mínimo e massa de óleo em cada Unidade de Conservação, estas foram inicialmente separadas em unidades de conservação costeiras e marinhas. No entanto, só foram observadas probabilidades de presença de óleo nas **unidades de conservação marinhas**, nas quais foram utilizados os resultados em **superfície do mar** e na **coluna d'água**, e contabilizada a respectiva área com probabilidade de presença de óleo. As **unidades de conservação** que possuem **parte costeira e parte marinha** foram consideradas como marinhas, pois os **resultados em superfície** apresentam valores mais conservadores do que os de costa, maiores probabilidades e menores tempos de chegada de óleo.

É válido ressaltar que os resultados em superfície e na costa são distintos no que tange à massa máxima, onde a massa em superfície não deve ser interpretada como massa de óleo retida ou acumulada, como é o caso da massa na costa. O resultado em superfície de massa máxima representa a massa de óleo que passou em certa região da UC por certo instante durante a simulação.

Os resultados de probabilidade e tempo mínimo na coluna d'água são calculados da mesma forma que estes resultados em superfície e na costa.

Na Figura 86, a seguir, são apresentadas as Unidades de Conservação consideradas e a separação adotada para diferenciar as UCs costeiras e marinhas. Na Tabela 9 são listadas as Unidades de Conservação identificadas e o tipo de proteção atribuído a cada uma (Proteção Integral ou Uso Sustentável), a esfera e ano de criação, assim como a divisão adotada. -

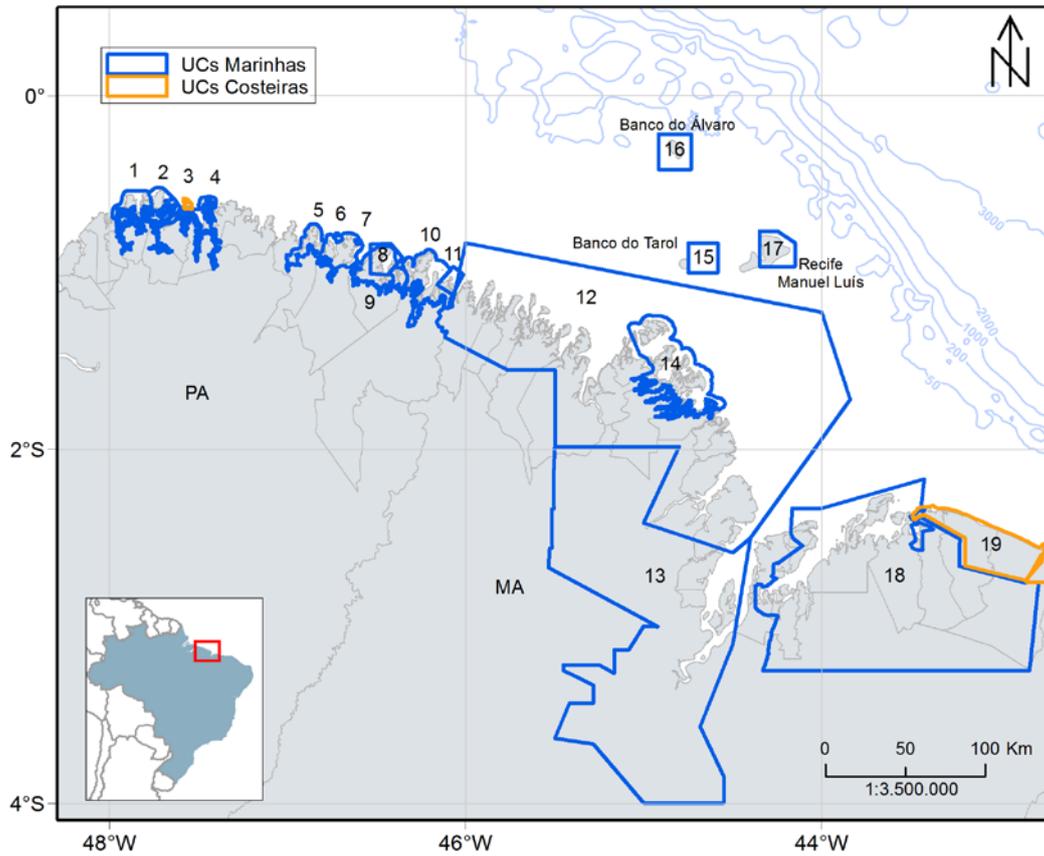


Figura 86: Unidades de Conservação marinhas e costeiras identificadas na área costeiro-oceânica onde se verifica probabilidade de presença de óleo neste estudo.

Tabela 9: Lista de Unidades de Conservação identificadas na área costeiro-oceânica onde se verifica probabilidade de presença de óleo neste estudo. Características das UCs e a divisão adotada em marinhas e costeiras.

Nº	Unidade de Conservação	Tipo	Proteção	Esfera	Gestão	Ano de criação
1	RESEX Mãe Grande de Curuçá	Marinha	Uso Sustentável	Federal	-	2002
2	RESEX Marinha Mestre Lucindo	Marinha	Uso Sustentável	Federal	-	2014
3	APA de Algodual-Maiandeuá	Costeira	Uso Sustentável	Estadual	Pará	1990
4	RESEX Maracanã	Marinha	Uso Sustentável	Federal	-	2002
5	RESEX Marinha Tracuateua	Marinha	Uso Sustentável	Federal	-	2005
6	APA da Ilha do Canela	Marinha	Uso Sustentável	Municipal	Bragança (PA)	1997
7	RESEX Marinha Caeté-Taperaçu	Marinha	Uso Sustentável	Federal	-	2005
7	RESEX Marinha de Gurupi-Piriá	Marinha	Uso Sustentável	Federal	-	2005
8	APA da Costa de Urumajó	Marinha	Uso Sustentável	Municipal	Augusto Corrêa (PA)	1998
9	RESEX Marinha Arai-Peroba	Marinha	Uso Sustentável	Federal	-	2005
11	APA Jabotitua-Jatium	Marinha	Uso Sustentável	Municipal	Viseu (PA)	1998
12	APA das Reentrâncias Maranhenses	Marinha	Uso Sustentável	Estadual	Maranhão	1991
13	APA da Baixada Maranhense	Marinha	Uso Sustentável	Estadual	Maranhão	1991
14	RESEX de Cururupu	Marinha	Uso Sustentável	Federal	-	2004
14	APA de Upaon-Açu/ Miritiba/ Alto Preguiças	Marinha	Uso Sustentável	Estadual	Maranhão	1992
15	PEM do Tarol	Marinha	Proteção Integral	Estadual	Maranhão	2014
16	PEM do Álvaro	Marinha	Proteção Integral	Estadual	Maranhão	2014
17	PEM do Parcel Manuel Luís	Marinha	Proteção Integral	Estadual	Maranhão	1991
19	PARNA dos Lençóis Maranhenses	Costeira	Proteção Integral	Federal	-	1981

3.1.1.7 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 consideração 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 87.

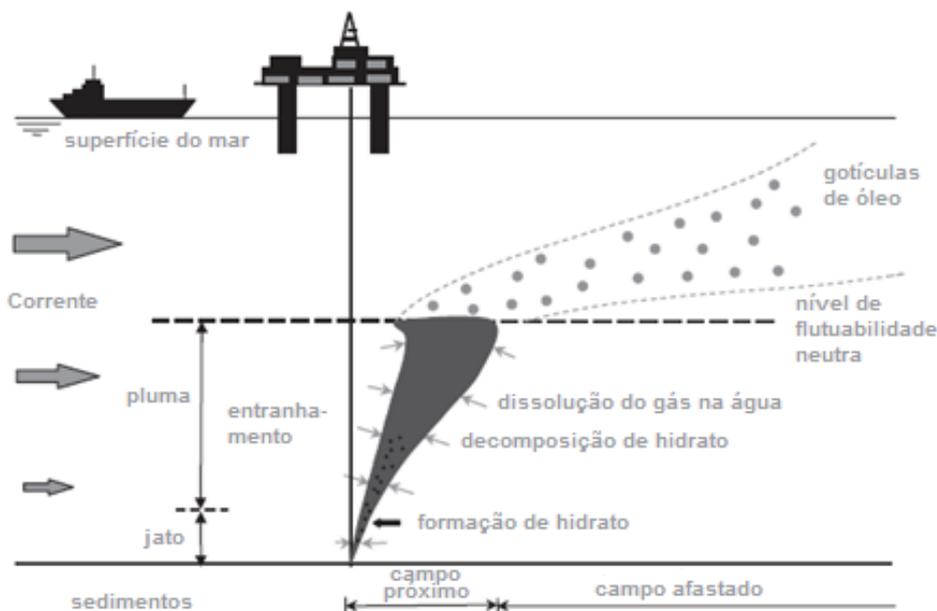


Figura 87: Esquema geral de plumas de *blowout* de óleo em profundidade. Adaptado de Lindersen (2013)

O modelo OSCAR contém um módulo específico para a modelagem de vazamentos de óleo em profundidade. Este módulo, chamado Plume3D e desenvolvido pela SINTEF, contém um modelo de pluma multifásico geral, 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*), permitindo 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 encontrados em Johansen & Durgut (2006) e em Johansen *et al.*, 2012.

Vazamentos de óleo e gás no fundo oceânico resultam 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 tamanhos se movem em conjunto como uma mistura integral. Nesta fase, a dissolução dos gases, a formação de hidratos e o entranhamento de água do ambiente têm papel dominante na densidade da pluma que, por sua vez, controla o seu movimento vertical. 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).

Na fase passiva, 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 à superfície. Na mesma situação, gotículas maiores, com diâmetro maiores que 5 mm, podem chegar à 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 à 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 88.

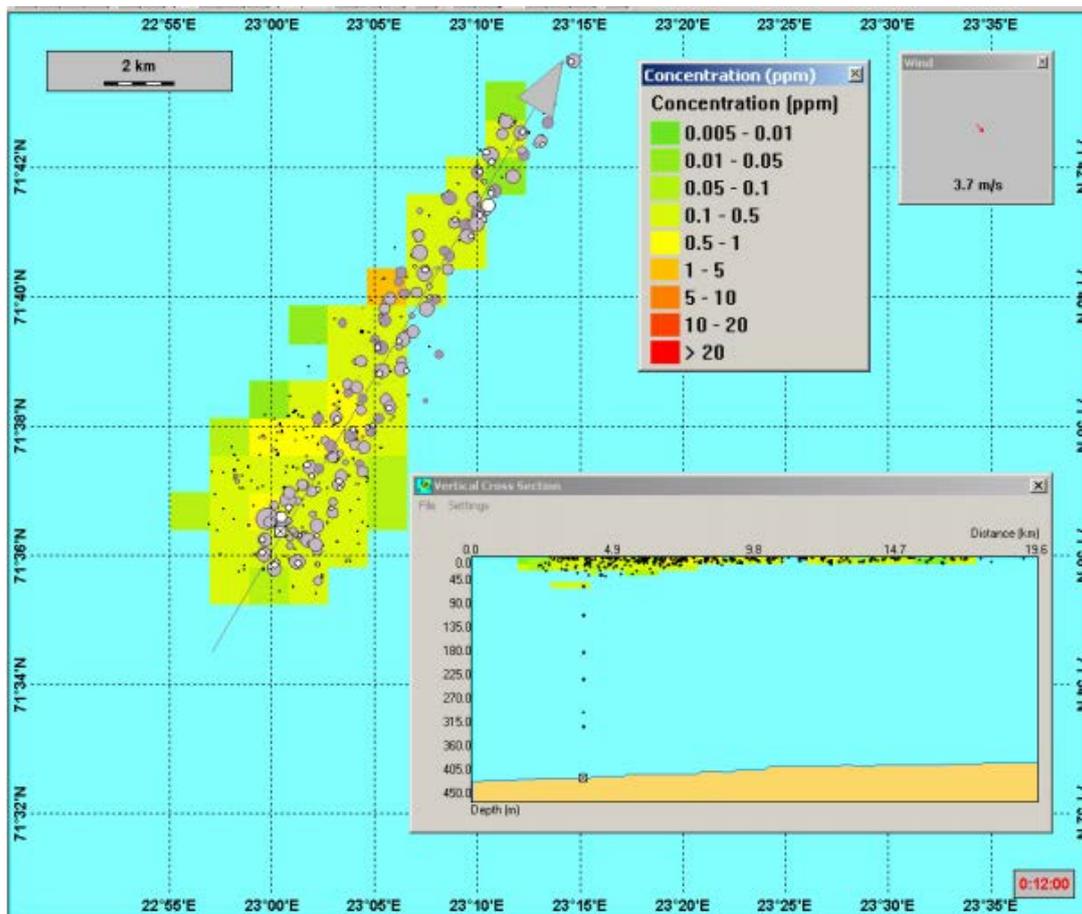


Figura 88: Ilustração de uma simulação de *blowout* no fundo oceânico com o OSCAR. O mapa mostra a distribuição de partículas representando o óleo em superfície (círculos em cinza) e as partículas representando o óleo na coluna d'água (pontos pretos).

3.1.1.8 Resumo dos parâmetros físicos e numéricos

Os parâmetros físicos utilizados no presente modelo de dispersão de óleo são apresentados na Tabela 10, enquanto as constantes são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 10: Parâmetros físicos e químicos utilizados no modelo de óleo.

Parâmetro	Descrição
w'	componente turbulenta
K	coeficiente de dispersão turbulenta
Kx	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
Δd	intervalo do diâmetro das partículas
ν	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
ρ_o	densidade da água do óleo
D_k	coeficiente de difusão turbulenta para $k = x, y$ e z .
ρ_w	densidade da água
μ_w	viscosidade dinâmica da água
ν	viscosidade cinemática da água

Tabela 11: Constantes físicas utilizadas no modelo de óleo.

Constante	Valor	Descrição
K_z	10^{-4} m/s ²	coeficiente de dispersão vertical
g	9,81 m/s ²	aceleração gravitacional
ν	1×10^{-6} m ² /s	viscosidade cinemática da água
R	$8,206 \times 10^{-5}$ atm*m ³ /mol-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 12, são apresentados os parâmetros numéricos utilizados no modelo de dispersão de óleo.

Tabela 12: Parâmetros numéricos utilizados no modelo de óleo.

Constante	Valor	Descrição
Δt	1200 s	Passo de tempo
Δx	3 km	Espaçamento zonal da grade
Δy	3 km	Espaçamento meridional da grade
Δz	20 m (<i>blowout</i>) e 10 m (8 m ³ e 200 m ³)	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 dissolvidas e 5 mil dissolvidas) 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. Conforme exposto anteriormente, 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. Desta forma 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 (outubro a março) e inverno (abril a setembro), por um **orifício de 18 ¾ polegadas** (~476 mm) (informação da contratante), correspondente ao diâmetro da cabeça do poço. 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 13.307 m³, foram ainda realizadas simulações para **vazamentos instantâneos em superfície** de pequeno e médio porte, 8 m³ e 200 m³, respectivamente. Para todos os casos simulados, a deriva do óleo foi acompanhada por 30 dias.

Em todas as simulações optou-se pela modelagem tridimensional, que 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 e adequada para representar o que acontece na realidade dos cenários simulados neste estudo do que a modelagem bidimensional, onde a parcela da massa de óleo que fica na coluna d'água é apenas quantificada, mas não transportada nem mapeada no domínio de modelagem. A modelagem bidimensional é comumente utilizada e mais indicada para modelagem em corpos d'água rasos.

No caso de *blowout*, o vazamento foi considerado como ocorrendo no fundo do mar, uma vez que, 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 e não da superfície. Considerou-se o vazamento a partir da cabeça do poço, orifício de 18 ¾ polegadas (~476 mm). Como regra geral, maiores orifícios resultam na formação de maiores gotículas de óleo. Por sua vez, 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, maximizando-se as velocidades de ascensão do óleo e minimizando-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 m³) e médio (200 m³) 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 maiores ou iguais ao limiar de 3×10^{-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*”.

A 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 que 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 utilizada 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).

Vale ressaltar 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 CE-M-661 o óleo esperado é de 32,1° 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 13 e sua curva de

destilação é apresentada na Tabela 14. 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 15.

Tabela 13: Características do óleo escolhido do banco de dados do modelo OSCAR e utilizado nas simulações.

Propriedade	Valor	Unidade
API	32,1	°
Densidade	0,865	g/cm ³
Ponto de Fluidez (<i>Pour Point</i>)	-27	°C
Viscosidade	24,5 (a 5°C)	cP
Fração máxima de água	57	%

Tabela 14: Curva de destilação do óleo utilizado no estudo.

Temperatura (°C)	% Volume
75	2,65
100	5,17
110	6,4
120	8,03
130	9,83
140	11,41
150	13,42
160	15,21
170	17,23
180	19,1
190	20,92
200	22,3
210	24,7
220	27,46
230	30,25
250	33,9
270	39,2
290	43,37
310	47,9
330	52,23
350	55,2
370	59,7
390	63,9
410	68,02
430	72,4
450	76,5
470	79,92
550	89,7

Tabela 15: Componentes calculados pelo OSCAR a partir da curva de destilação.

Componentes	Fração no óleo (%)
C1-C4 gases (dissolvido no óleo)	0,5598
C5-saturados (n-/iso-/ciclo)	0,8933
C6-saturados (n-/iso-/ciclo)	0,5403
Benzeno	0,1945
C7-saturados (n-/iso-/ciclo)	1,8819
C1-Benzeno (Toluene) et, B	0,5104
C8-saturados (n-/iso-/ciclo)	2,0117
C2-Benzeno (xilenos; usando O-xileno)	0,9460
C9-saturados (n-/iso-/ciclo)	3,8552
C3-Benzeno	3,7901
C10-saturados (n-/iso-/ciclo)	3,1455
C4 e C4 Benzenos	0,1085
C11-C12 (total sat + aro)	3,4788
Fenóis (C0-C4 alquilado)	3,0939
Naftalenos 1 (C0-C1-alkilado)	0,2867
C13-C14 (total sat + aro)	5,7405
Naftalenos 2 (C2-C3-alkilado)	5,1928
C15-C16 (total sat + aro)	0,6010
HPA 1 (Hidrocarbonetos poliaromático médio solúvel (3 anéis-não-alkilado; < 4 anéis))	8,3689
C17-C18 (total sat + aro)	5,0472
C19-C20 (total sat + aro)	4,0736
Materiais cromatográficos não-resolvidos (C10 à C36)	2,7604
C21-C25 (total sat + aro)	3,9274
HPA 2 (Hidrocarbonetos poliaromático baixo solúvel (3 anéis-alkilado; 4-5+ anéis))	0,0497
C25+ (total)	38,9419

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, 5° 09' S, ao norte, 7° 57' N, a oeste, 51° 42' O e a leste, 36° 37' E (Figura 89). Com isso, obteve-se uma matriz com 557 por 484 pontos de grade.

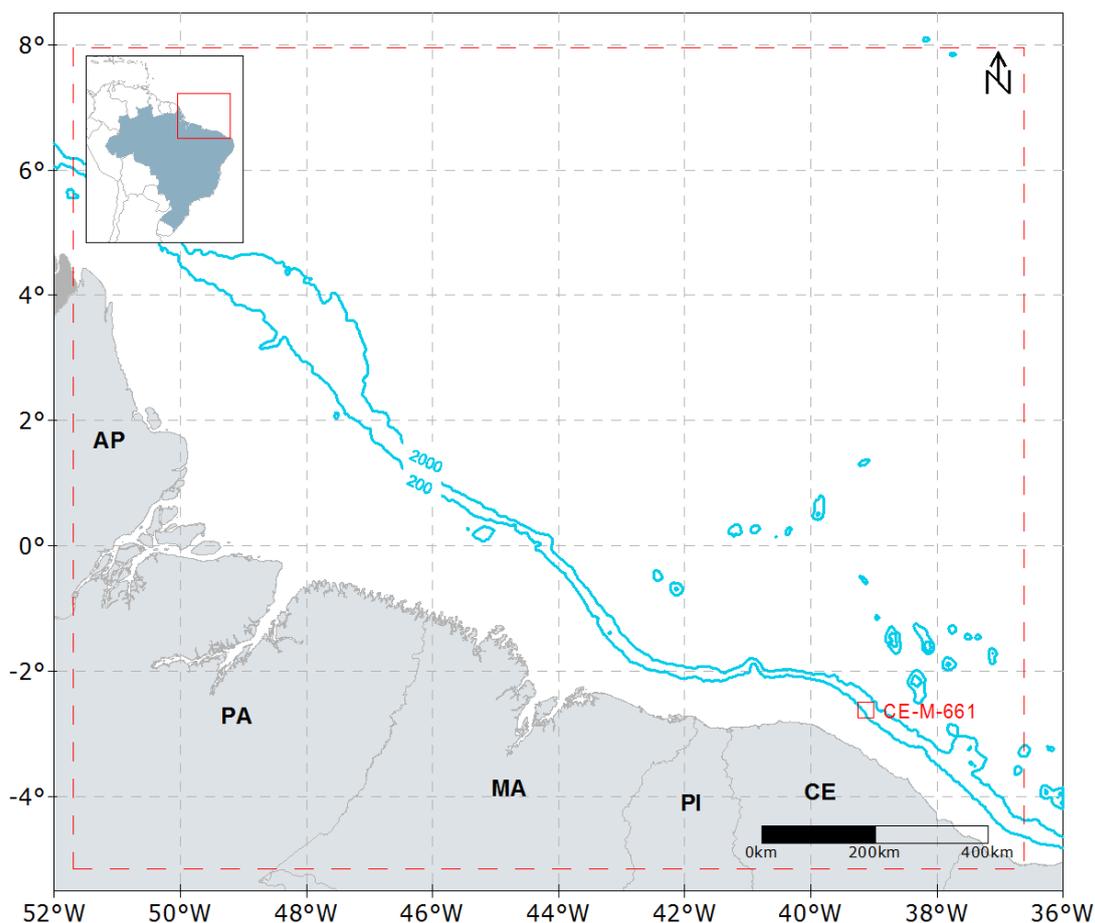


Figura 89: Representação do limite da grade de óleo (linha vermelha tracejada).

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 2.695.588 elementos, enquanto que para o volume de *blowout*, o número de camadas foi de 50, indo de 0 a 1.000 m de profundidade, totalizando 13.479.400 elementos.

A grade do modelo de óleo com a batimetria é apresentada na Figura 90. Para manter a concordância com a modelagem hidrodinâmica, os dados de batimetria utilizados são provenientes da base global batimétrica ETOPO1 (AMANTE; EAKINS, 2009).

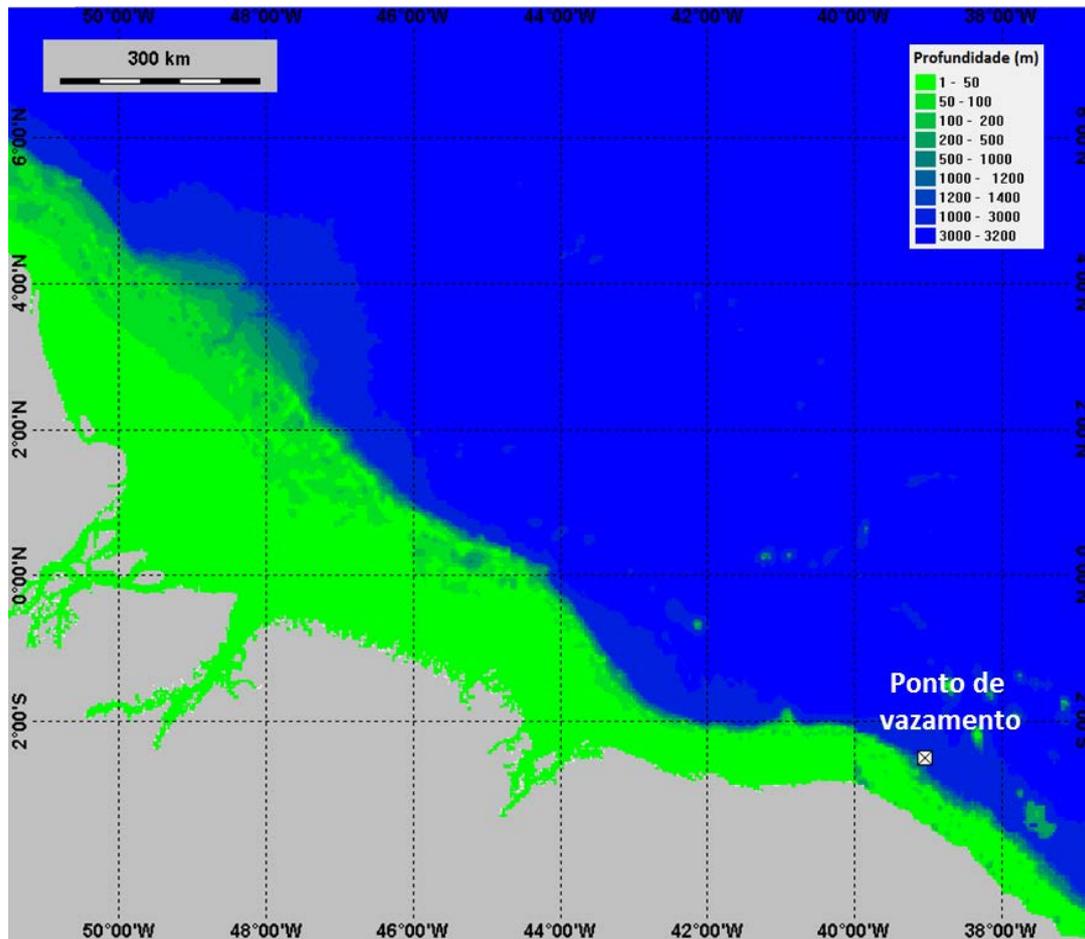


Figura 90: A grade de batimetria utilizada na simulação.

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. O tipo da linha de costa considerado 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 fins da modelagem de óleo foram utilizadas como base as informações das Cartas de Sensibilidade ao Óleo (Cartas SAO), disponibilizadas pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2014), e informações do Projeto de Proteção e Limpeza de Costa (PPLC, 2014).

As Cartas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo constituem uma ferramenta e fonte de informações para o planejamento de contingência e para a implementação de ações de resposta a incidentes de poluição por óleo, uma vez que permitem identificar os ambientes com prioridade de proteção e as eventuais áreas de sacrifício, possibilitando o correto

direcionamento dos recursos disponíveis e a mobilização adequada das equipes de contenção e limpeza (Cartas SAO, 2014).

Neste contexto, as Cartas SAO subsidiam o planejamento de contingência nas escalas nacional, regional e local, desde o Plano Nacional de Contingência (PNC), passando pelos Planos de Área e alcançando os Planos de Emergência Individuais de empreendimentos situados nas bacias petrolíferas mapeadas.

Foi atribuído ao MMA responsabilidades na definição dos limites das áreas ecologicamente sensíveis com relação à poluição causada por lançamento de óleo em águas sob jurisdição nacional. A partir daí, este órgão governamental, em conjunto com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e a Agência Nacional do Petróleo (ANP), preparou as Especificações e Normas Técnicas para a Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para Derramamentos de Óleo na zona costeira e marinha.

As cartas SAO devem incluir três tipos de informações principais: sensibilidade dos ecossistemas costeiros e marinhos, recursos biológicos, e atividades socioeconômicas. A sensibilidade da linha de costa classifica os segmentos do litoral em habitats, de acordo com suas características geomorfológicas, tipo de substrato, regime hidrodinâmico, persistência natural do óleo e condições de limpeza e remoção. Com isso é possível inferir padrões de comportamento do óleo derramado e de transporte de sedimentos.

As bacias sedimentares marítimas foram adotadas como unidade cartográfica deste mapeamento e até o ano de 2014 o mapeamento foi concluído para as Bacias do Ceará e Potiguar (2004); Santos (2007); Espírito Santo (2010) e Sul da Bahia (2013). Além destes, o mapeamento das Bacias de Sergipe–Alagoas/Pernambuco–Paraíba está em fase de conclusão, e os projetos para as Bacias da Foz do Amazonas; Bacia do Pará -Barreirinhas; Bacia de Campos e Bacia de Pelotas foram selecionados.

O Projeto de Proteção e Limpeza de Costa (PPLC), por sua vez, é um Acordo de Cooperação Técnica entre o 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 SAO e contribui à atualização dos Atlas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo, já publicados. Portanto suas informações são complementares e coerentes para a segmentação da linha de costa para a área de estudo em questão.

A segmentação do tipo de substrato da grade da modelagem de óleo foi baseada prioritariamente nas Cartas SAO publicadas pelo MMA. Os trechos para os quais ainda não estão disponíveis informações destas cartas foram complementados com informações do Projeto de Proteção e Limpeza de Costa (PPLC).

Para adequar a segmentação da costa com a resolução do modelo de óleo, adotou-se o critério de que se certo tipo de costa tivesse extensão inferior à resolução da grade (< 3 km), seria considerado para aquele segmento o tipo de costa predominante no entorno.

Para o domínio do estudo foram definidos 3 (três) tipos de costa predominantes:

- Praia arenosa;
- Planície de maré
- Manguezal;

O detalhamento da linha de costa utilizado na grade da modelagem de óleo é apresentado no anexo 1.

3.1.4 Forçantes

3.1.4.1 Ventos

Os dados de vento utilizados como forçante no modelo de transporte de óleo são provenientes da Reanálise I do NCEP (R-1), que 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, incluindo observações de navios, bóias fixas, bóias móveis e estações oceânicas próximas à superfície, dentre outras.
- 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 (cinco) 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 $1,8^\circ$, tendo sido utilizado o ponto de grade do NCEP mais próximo ao ponto de simulação de vazamento do bloco CE-M-661 (Figura 91). A seguir, são apresentadas as rosas dos ventos mensais (Figura 92 e Figura 93), elaboradas para o período analisado (2009 a 2013), além das tabelas de ocorrência de direção e intensidade (Tabela 16 e Tabela 17).

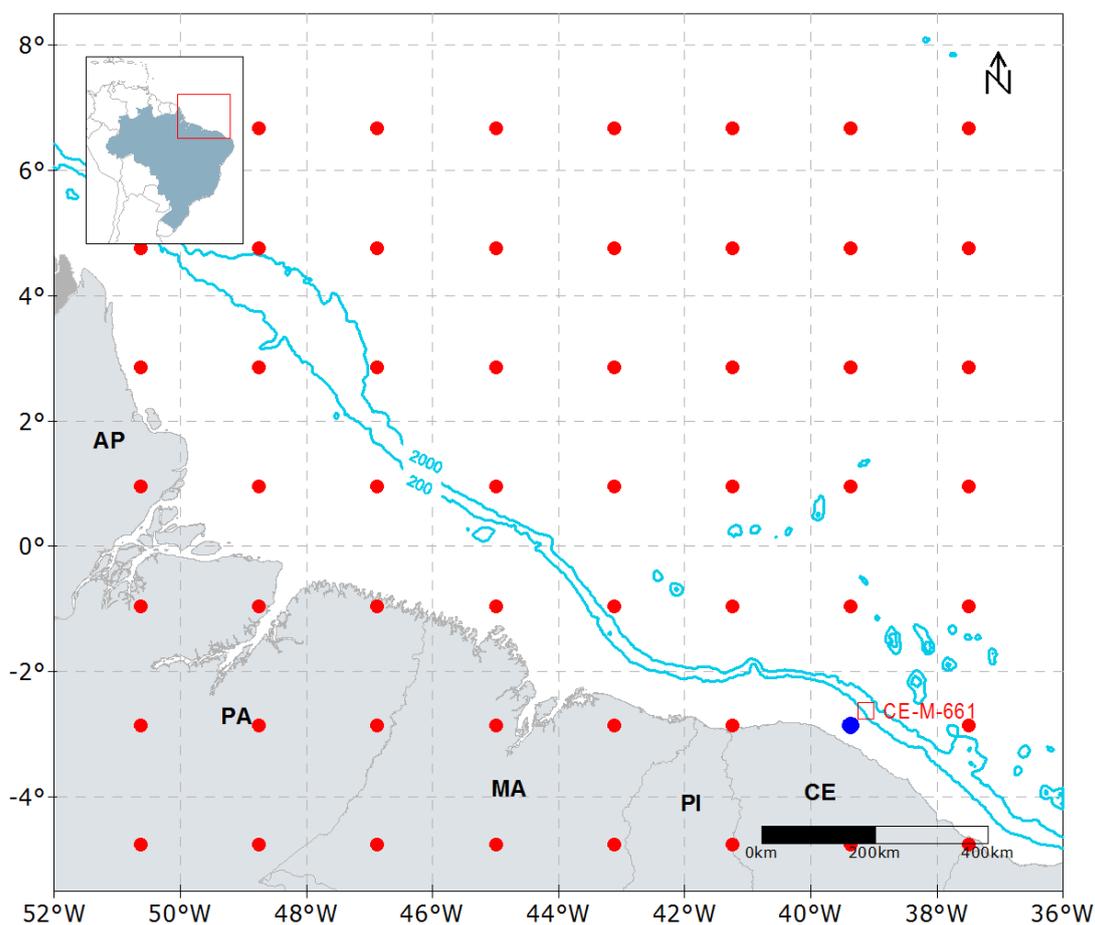


Figura 91: Localização dos pontos de grade do NCEP (em vermelho) em relação ao ponto de vazamento. Ponto em azul é o mais próximo da região de vazamento.

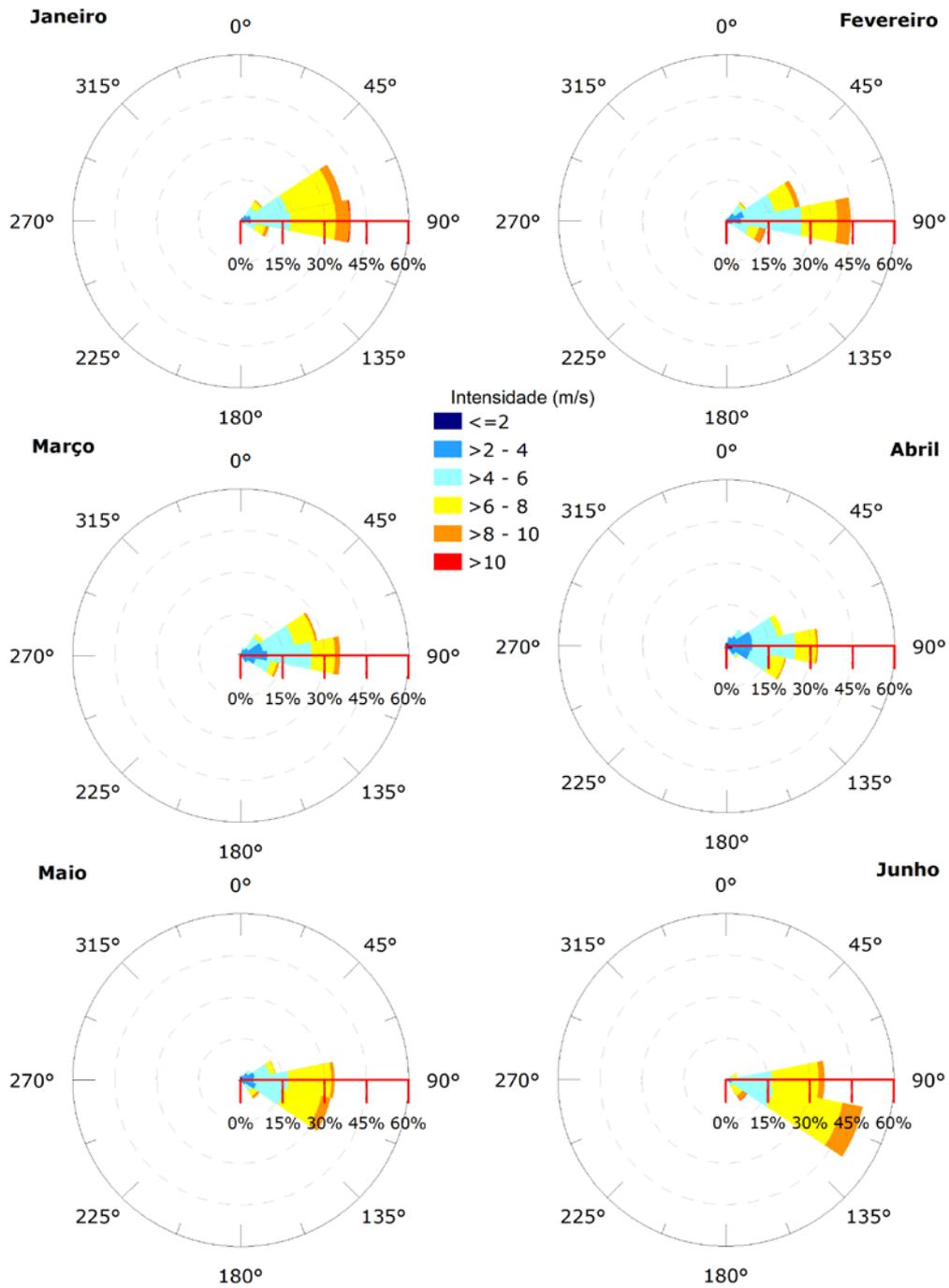


Figura 92: Rosa dos ventos para os meses de janeiro a junho para o ponto mais próximo dos locais de vazamento.

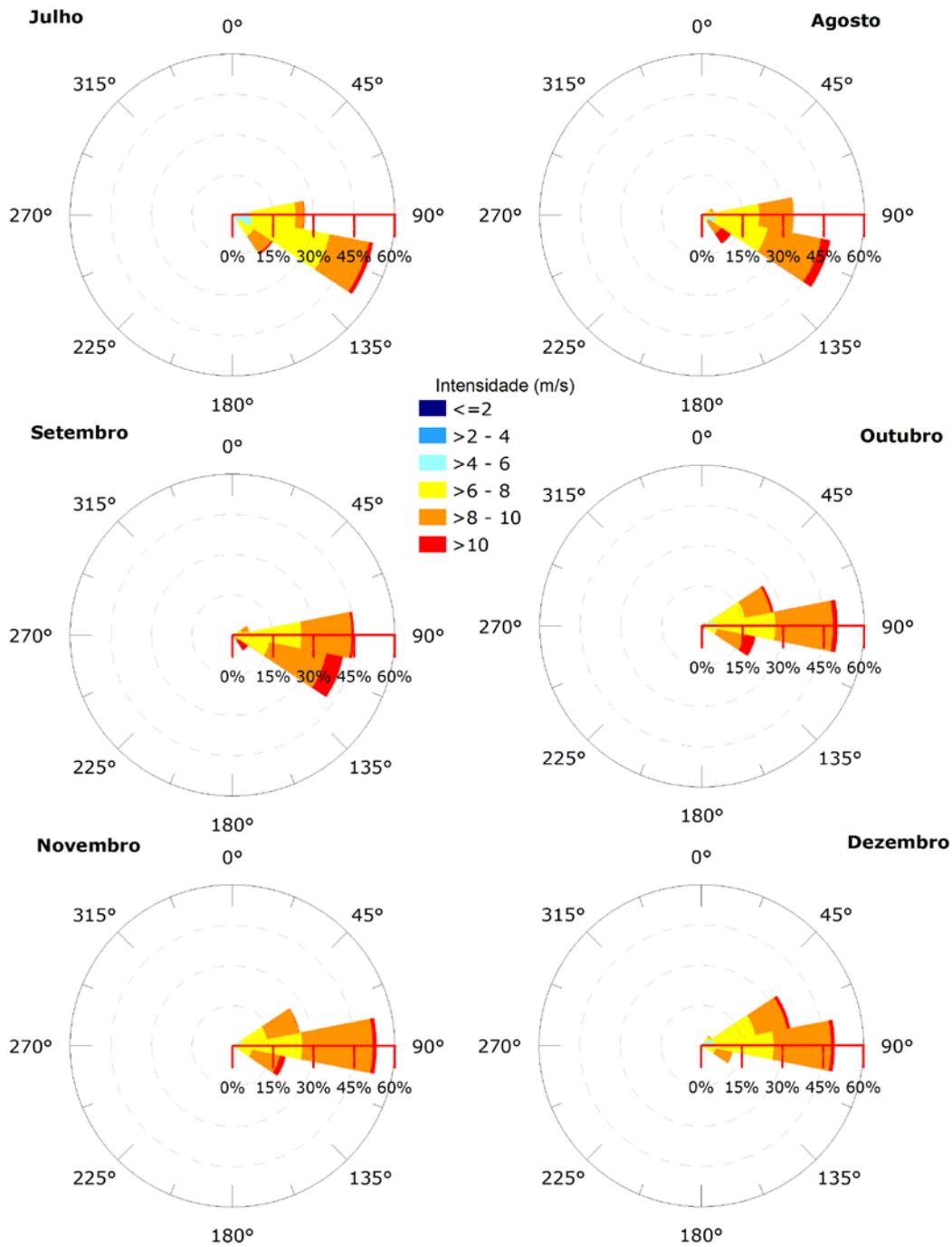


Figura 93: Rosa dos ventos para os meses de julho a dezembro para o ponto mais próximo dos locais de vazamento.

Tabela 16: 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	0,89	1,13	1,33	1,45	-	-	-	-	-	-	-
NNE	1,45	1,77	3,06	3,50	1,77	0,17	-	-	-	-	-	-
NE	9,19	8,33	9,68	7,33	4,52	0,67	-	0,16	-	1,45	1,17	4,52
ENE	36,94	26,60	27,90	20,50	12,74	4,33	1,45	4,35	6,33	26,94	25,33	33,55
E	39,35	44,33	35,65	32,67	33,55	35,33	26,77	33,87	45,00	50,16	53,33	49,35
ESE	10,32	14,18	14,03	21,67	32,74	49,83	53,06	48,39	41,67	20,16	20,00	11,77
SE	1,29	1,95	3,55	5,50	8,06	9,17	17,90	12,90	7,00	1,29	0,17	0,81
SSE	-	0,18	0,48	1,83	1,13	0,17	0,81	0,32	-	-	-	-
S	-	-	0,48	1,00	0,16	0,17	-	-	-	-	-	-
SSO	0,32	0,18	0,48	0,33	0,32	-	-	-	-	-	-	-
SE	0,16	-	-	1,17	0,48	0,17	-	-	-	-	-	-
OSO	-	0,18	0,65	0,83	0,81	-	-	-	-	-	-	-
O	-	0,18	0,32	-	0,65	-	-	-	-	-	-	-
ONO	0,16	0,71	1,13	0,67	0,48	-	-	-	-	-	-	-
NO	-	0,18	0,48	0,67	0,32	-	-	-	-	-	-	-
NNO	0,48	0,35	0,97	1,00	0,81	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 17: 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	> 10
Janeiro	3,06	12,10	35,32	39,35	9,84	0,32
Fevereiro	4,26	17,73	43,97	24,65	9,22	0,18
Março	6,29	30,65	39,19	20,32	3,55	-
Abril	11,83	35,00	37,00	15,00	1,17	-
Maio	8,06	20,32	32,58	33,23	5,81	-
Junho	1,17	5,83	33,67	47,67	11,50	0,17
Julho	-	0,48	17,42	53,55	26,13	2,42
Agosto	-	-	10,65	41,77	39,52	8,06
Setembro	-	-	4,33	39,33	44,67	11,67
Outubro	0,16	0,81	9,19	40,16	42,10	7,58
Novembro	-	0,33	6,67	40,33	48,83	3,83
Dezembro	-	1,45	11,13	44,84	39,84	2,74

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 94 e Figura 95) para o ponto mais próximo do local de vazamento, além das tabelas de ocorrência de direção e intensidade (Tabela 18 e Tabela 19).

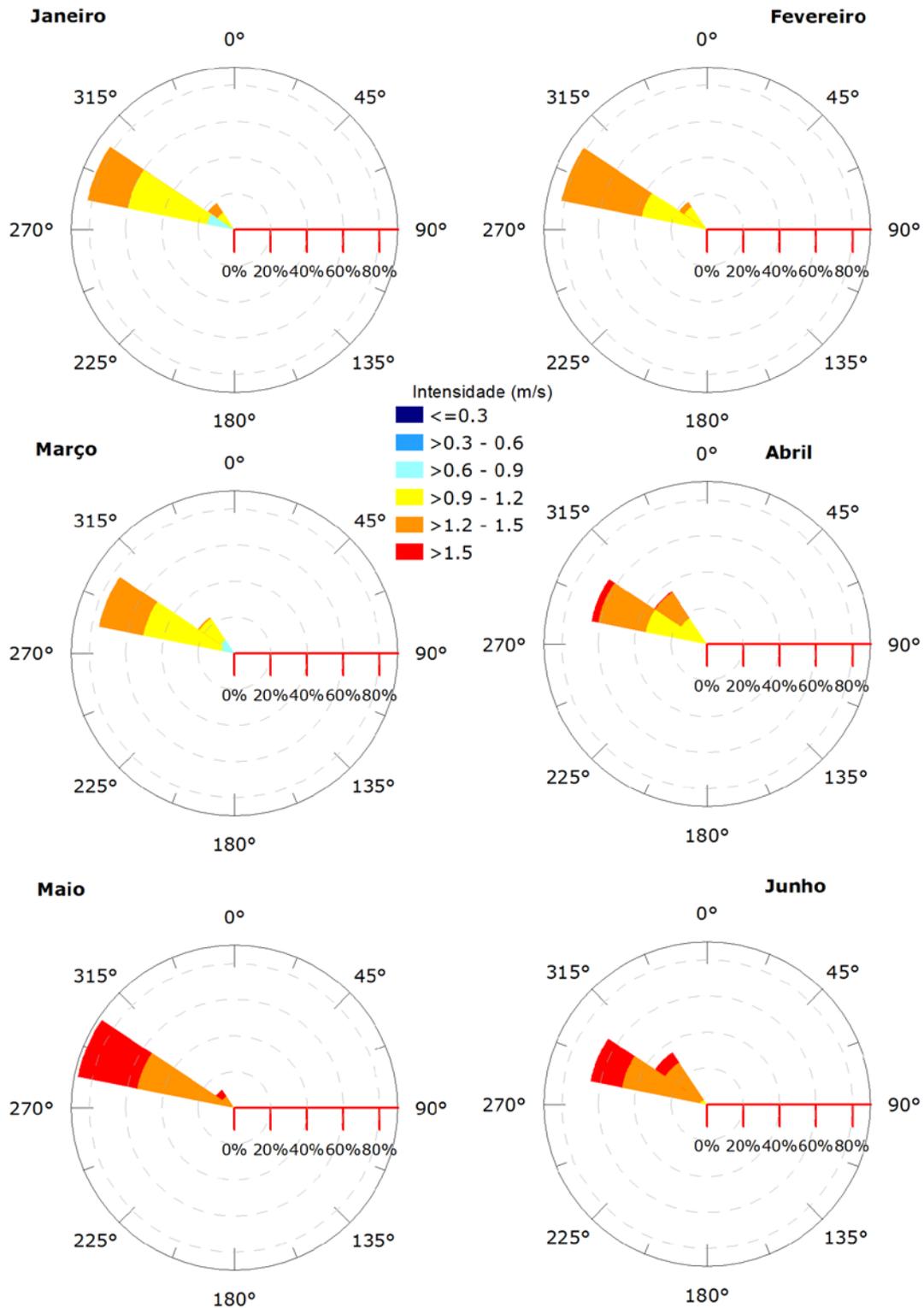


Figura 94: Rosa de correntes para os meses de janeiro a junho para o ponto mais próximo do local de vazamento do bloco CE-M-661.

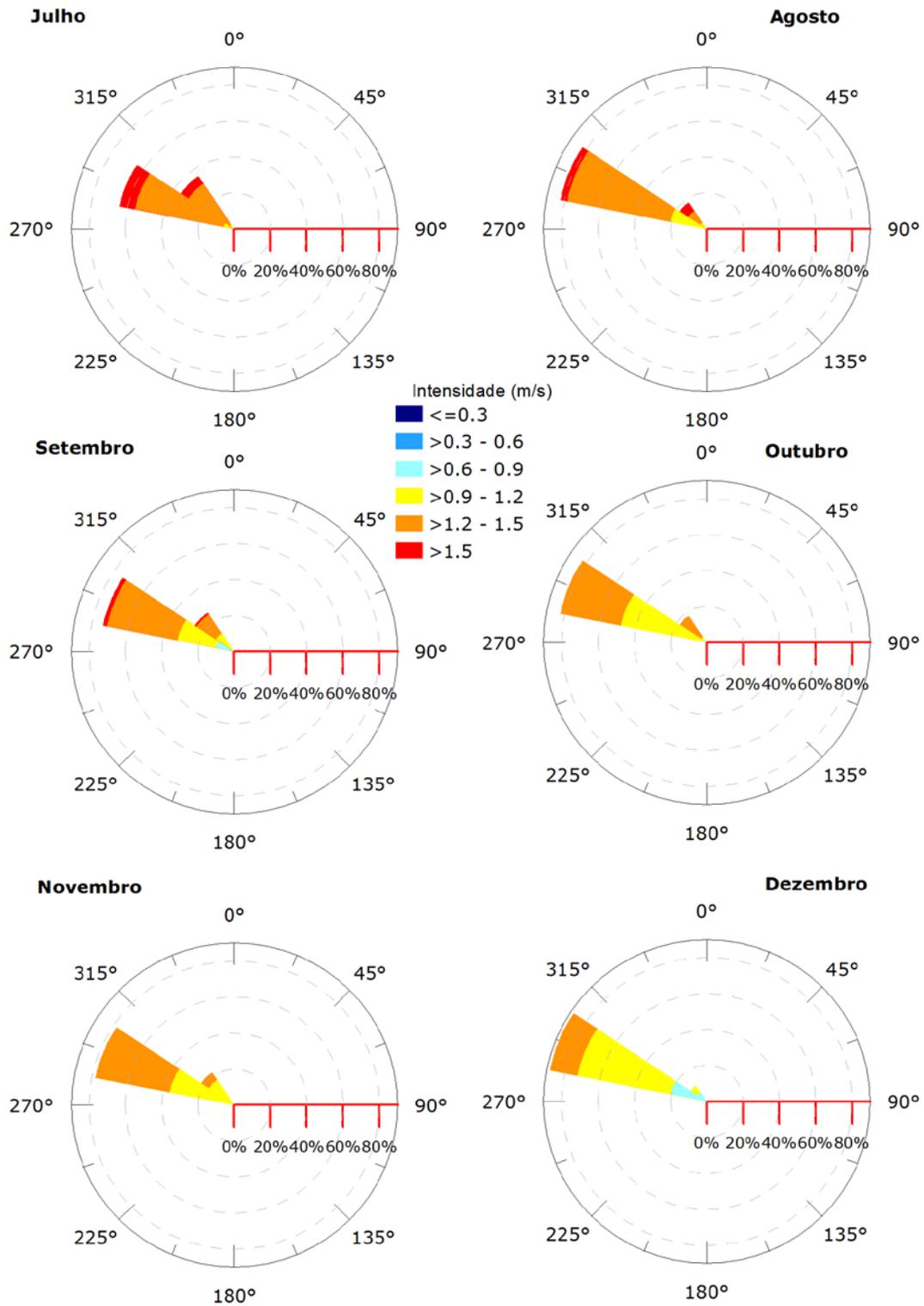


Figura 95: Rosa de correntes para os meses de julho a dezembro para o ponto mais próximo do local de vazamento do bloco CE-M-661.

Tabela 18: Ocorrência mensal de direção das correntes para o ponto mais próximo do local do vazamento do bloco CE-M-661.

Direção	Meses do ano												
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,23
NNE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ENE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ESE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OSO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ONO	82,53	81,71	76,08	65,00	87,90	65,56	64,52	82,26	73,89	82,26	78,06	88,29	
NO	17,47	18,29	23,92	35,00	12,10	34,44	35,48	17,74	26,11	17,74	21,94	10,59	
NNO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,90

Tabela 19: Ocorrência mensal de intensidade das correntes para o ponto mais próximo do local do vazamento do bloco CE-M-661.

Mês	Intensidade (m/s)					
	0-0,3	0,3 - 0,6	0,6 - 0,9	0,9 - 1,2	1,2 - 1,5	> 1,5
Janeiro	-	-	16,80	54,30	28,90	-
Fevereiro	-	-	-	51,54	48,46	-
Março	-	-	16,13	58,06	25,81	-
Abril	-	-	-	51,67	44,17	4,17
Maio	-	-	-	2,69	59,68	37,63
Junho	-	-	-	6,39	69,17	24,44
Julho	-	-	-	8,33	77,96	13,71
Agosto	-	-	-	24,46	66,13	9,41
Setembro	-	-	11,11	33,06	52,50	3,33
Outubro	-	-	3,23	48,66	48,12	-
Novembro	-	-	0,28	53,06	46,67	-
Dezembro	-	-	27,48	56,98	15,54	-

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 **outubro a março** e é caracterizado pela maior frequência de ventos do primeiro quadrante, com predominância de ventos de nordeste e leste-nordeste, e com corrente predominantemente para oeste-noroeste, com intensidades preferencialmente na classe de 0,9 e 1,2 m/s. No segundo período, entre os meses de **abril e setembro**, denominado **período de inverno**, existe a predominância dos ventos do sudeste e leste com correntes também para oeste-noroeste, no entanto com maiores intensidades (predomínio entre 1,2 m/s e 1,5 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 descritos no item 2.4 (Condições iniciais).

Os perfis apresentados (Figura 96) 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).

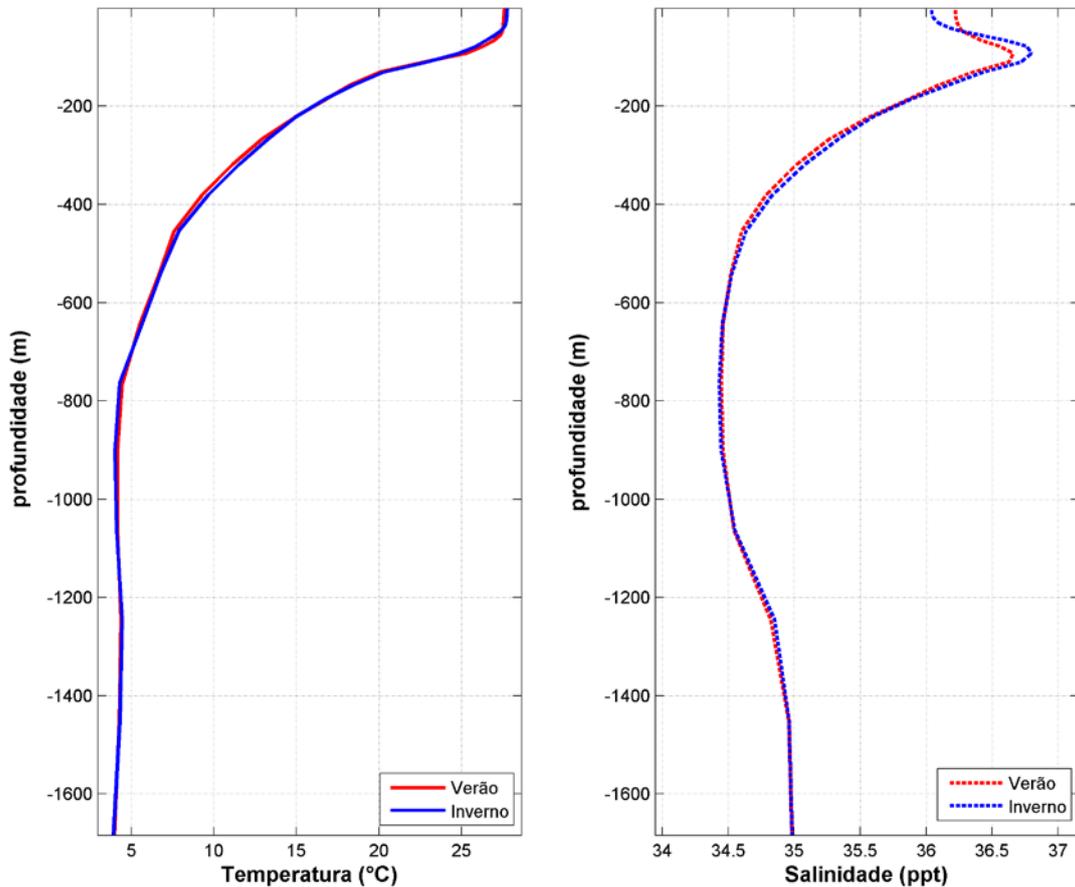


Figura 96: Perfis de salinidade e temperatura para o ponto de vazamento do bloco CE-M-661.

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 97 e na Figura 98, respectivamente.

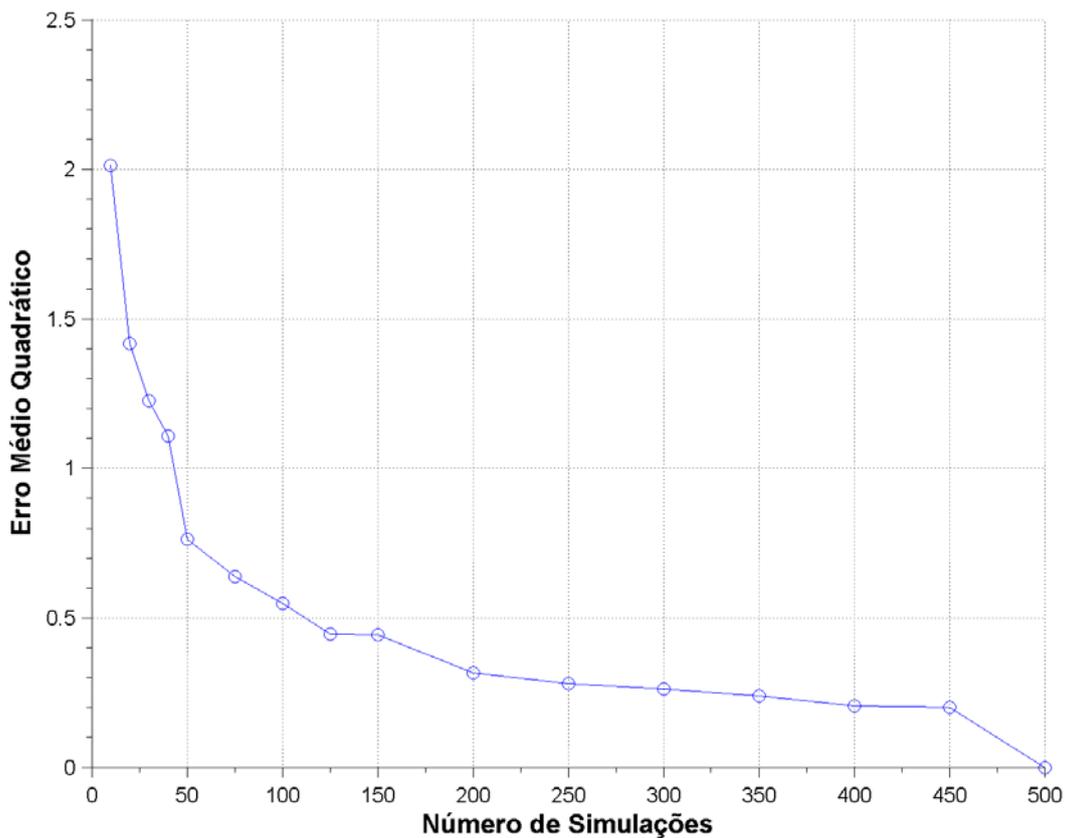


Figura 97: Curva do Erro Médio Quadrático (RMSE).

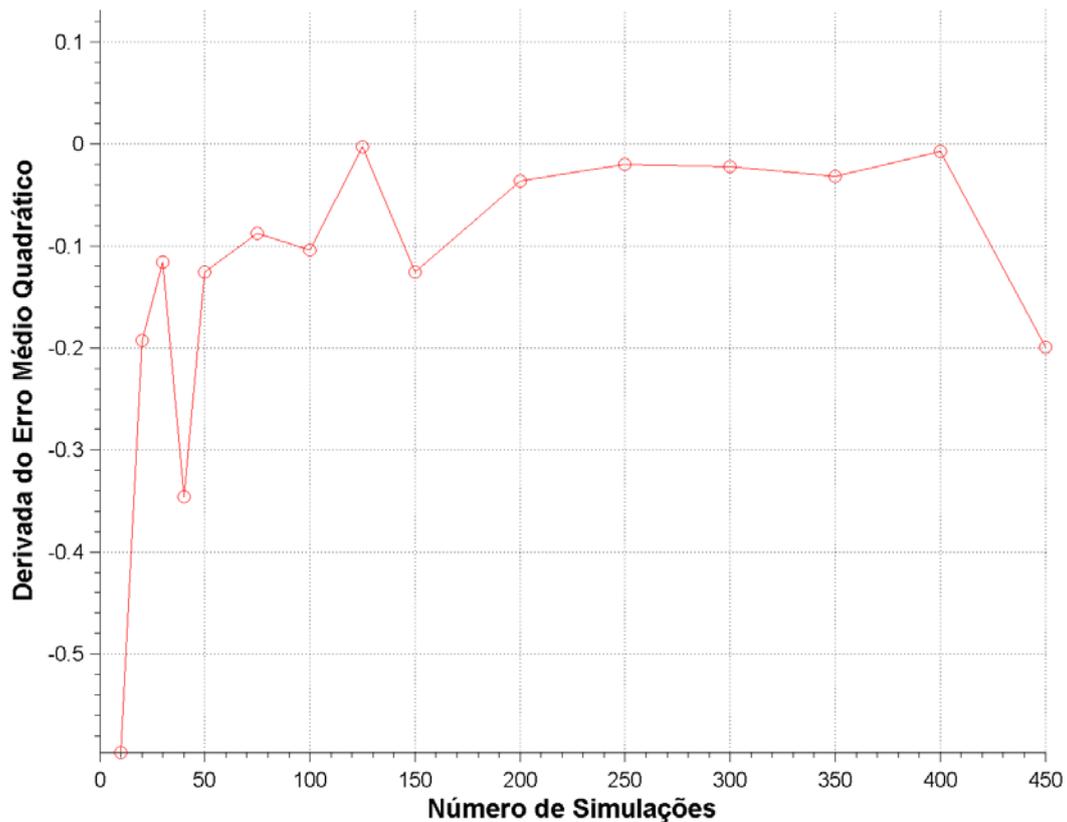


Figura 98: Derivada da curva do Erro Médio Quadrático (RMSE).

Em 300 simulações, número considerado como adequado para a representação da variabilidade da região, 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 do Amazonas para simulações realizadas com 300 e 500 simulações. Estas comparações são consideradas representativas para a área da Bacia do Ceará pelo fato desta estar sob influência do mesmo sistema meteorológico e apresentar condições oceanográficas semelhantes às da Bacia da Foz do Amazonas.

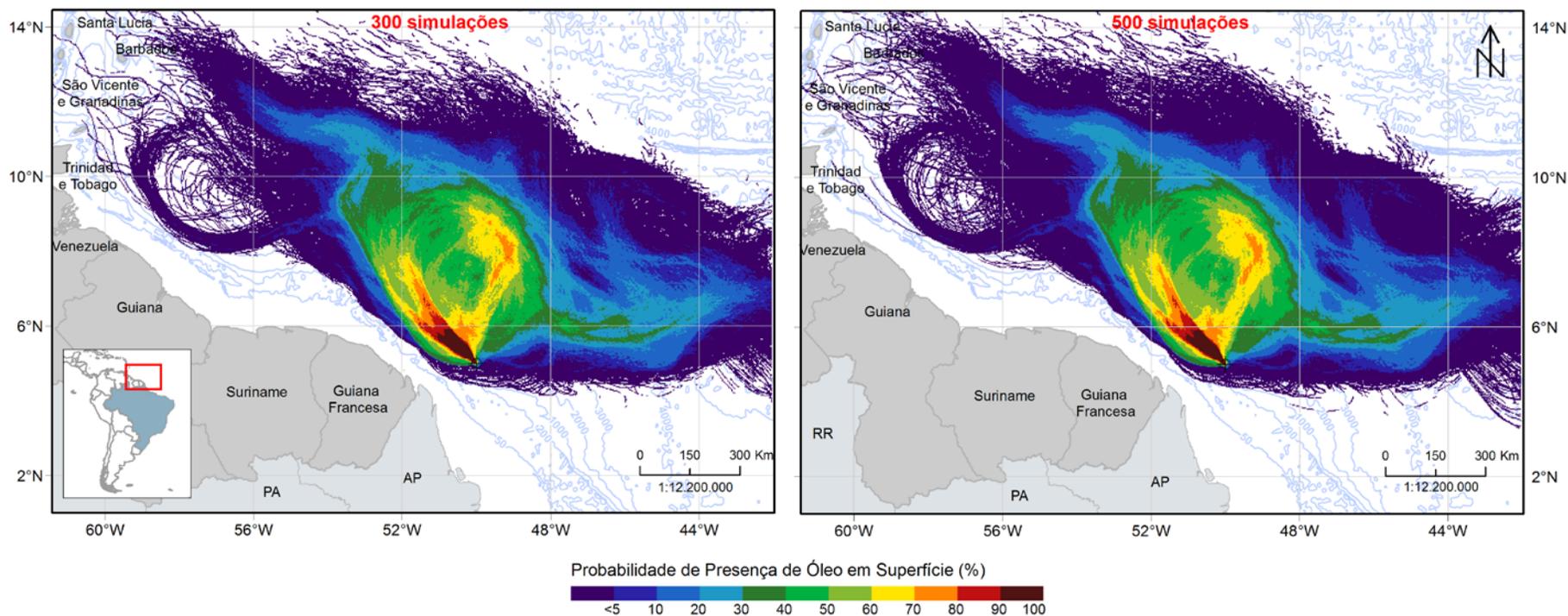


Figura 99: Mapa de probabilidade de presença de óleo para um ponto de risco na Margem Equatorial com 300 e 500 simulações.

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 à análise quantitativa, são apresentados histogramas de diferença de probabilidade, ponto a ponto, entre os dois casos (Figura 100, Figura 101 e Figura 102). Vale ressaltar que 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 100) entre os dois casos mostra um comportamento quase que simétrico (considerando o zero como centro), onde as diferenças estão na mesma intensidade, não tendendo a superestimar ou subestimar algum dos casos. Ao considerar, porém, somente a diferença absoluta (Figura 101), 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 102).

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.

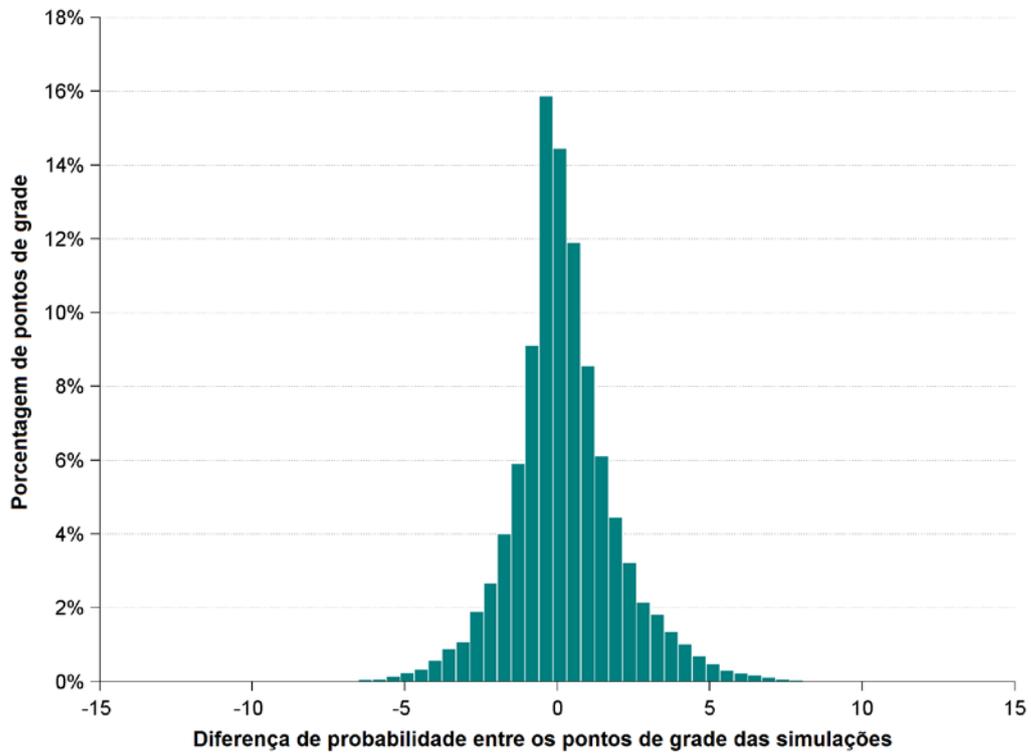


Figura 100: Histograma de diferença de probabilidade de presença de óleos nos casos de 300 e 500 simulações. Valor positivo representa maior probabilidade no caso de 500 simulações. Valor negativo representa maior probabilidade no caso de 300 simulações.

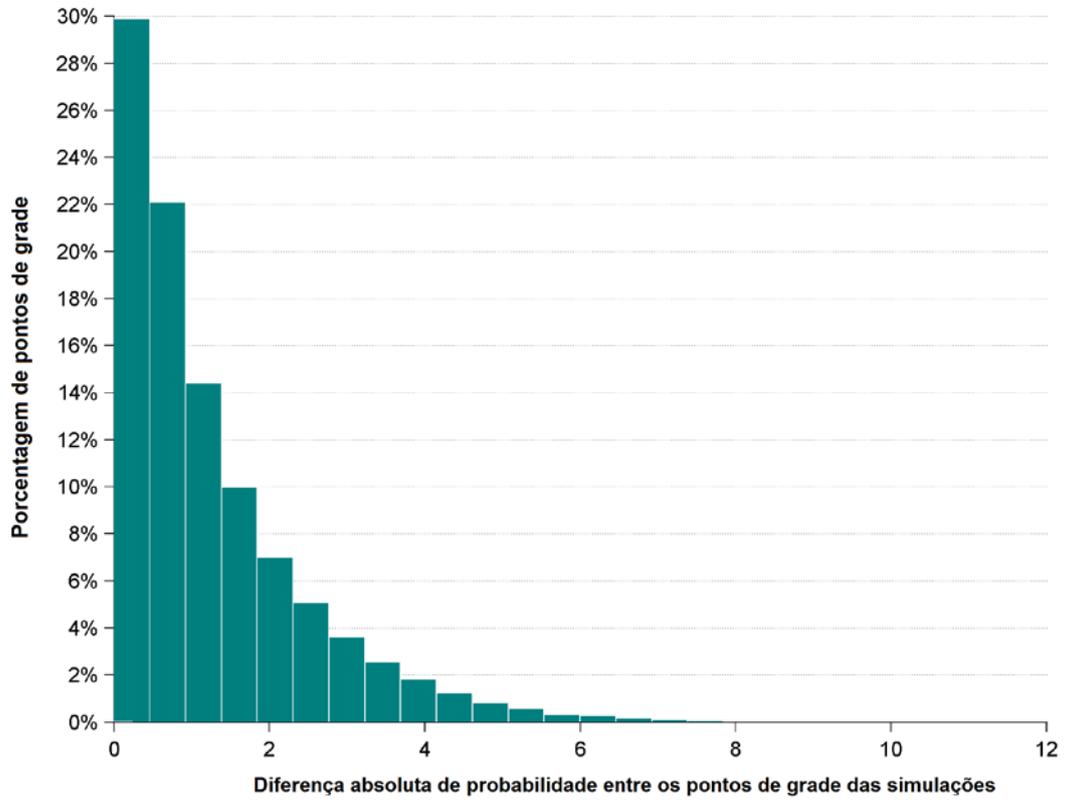


Figura 101: Histograma de diferença absoluta de probabilidade de presença de óleos nos casos de 300 e 500 simulações.

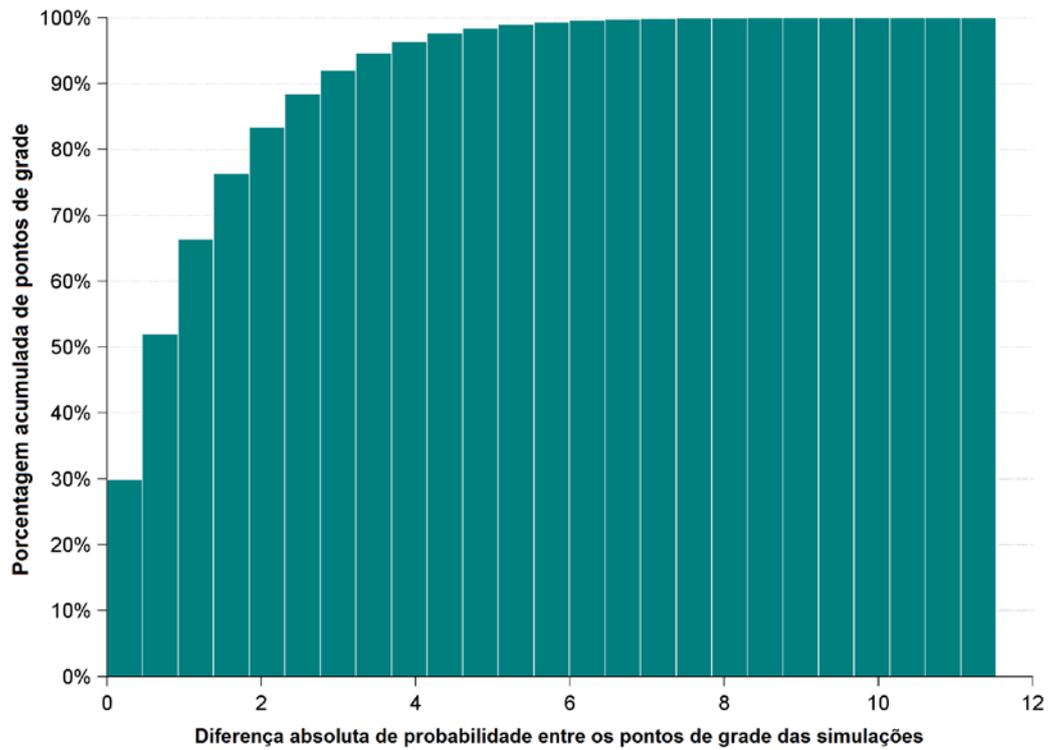


Figura 102: Histograma acumulado de diferença absoluta de probabilidade de presença de óleos nos casos de 300 e 500 simulações.

3.2. Resultados

A seguir serão apresentados os resultados das simulações de deriva do óleo para vazamentos de 8 m³, 200 m³ e pior caso (*blowout* – 13.307 m³), 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, conforme exposto anteriormente, 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 leva em consideração apenas o fato do óleo tocar no fundo oceânico com concentrações superiores a 20 ppb.

Em relação aos resultados na coluna d'água, por experiências em outros processos, sabemos que para vazamentos de fundo a grandes profundidades, nas camadas mais profundas as probabilidades se restringem à região próxima do ponto de vazamento. Portanto, levando em conta a limitação do número de pontos de grade do modelo, para conciliar a melhor resolução em superfície e a melhor resolução possível na coluna d'água, definimos a profundidade das camadas de 20 m, indo até 1000 m de profundidade.

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 103 mostra o esquema da apresentação dos parâmetros no gráfico *box-plot*.

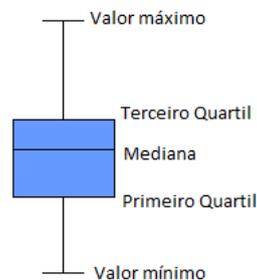


Figura 103: Gráfico do tipo box-plot.

O **cenário crítico** simulado no modo determinístico foi definido através da análise dos resultados sazonais de pior caso, sendo escolhida a situação onde ocorreu **a menor perda de massa** de óleo através da soma dos processos de evaporação e degradação.

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

A Figura 104 resume a forma como os resultados do modo probabilístico e determinístico são apresentados, respectivamente.

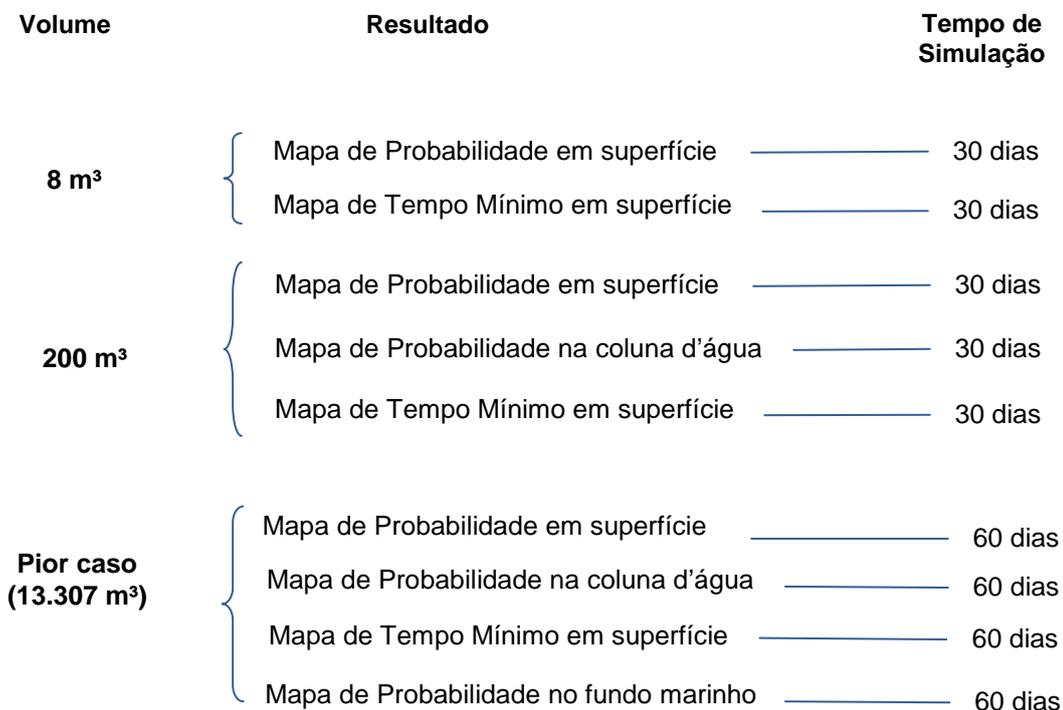


Figura 104: Fluxograma de apresentação dos resultados probabilísticos.

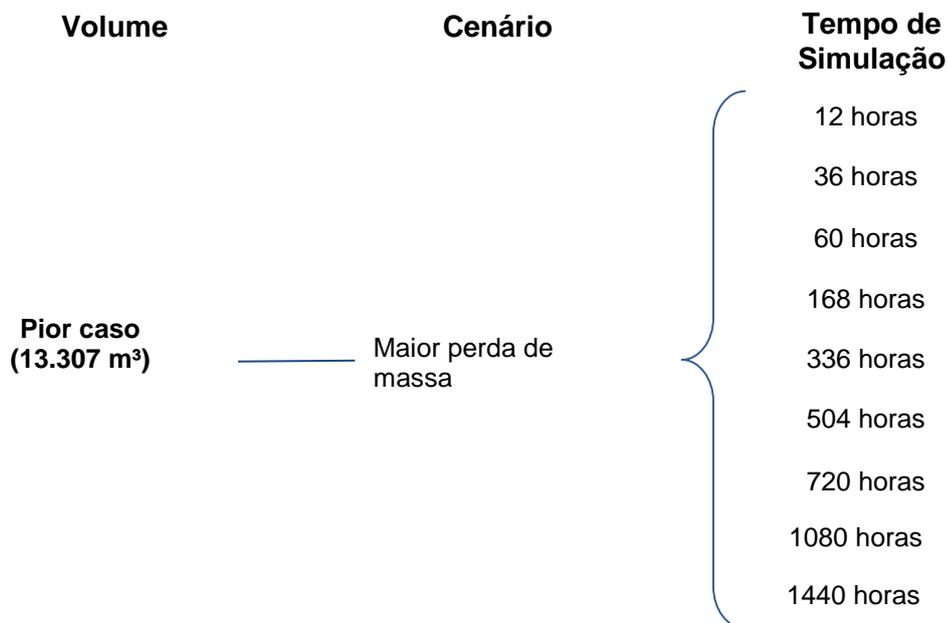


Figura 105: Fluxograma de apresentação dos resultados determinísticos.

3.2.1 Resultados Probabilísticos

A seguir serão apresentados os resultados do modo probabilístico para os vazamentos a partir do bloco CE-M-661 para os três volumes (8 m³, 200 m³ e pior caso - 13.307 m³), nos dois cenários sazonais (verão e inverno).

3.2.1.1 Vazamento de 8 m³

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 m³, no período de verão, são apresentados na Figura 106 e na Figura 107, respectivamente.

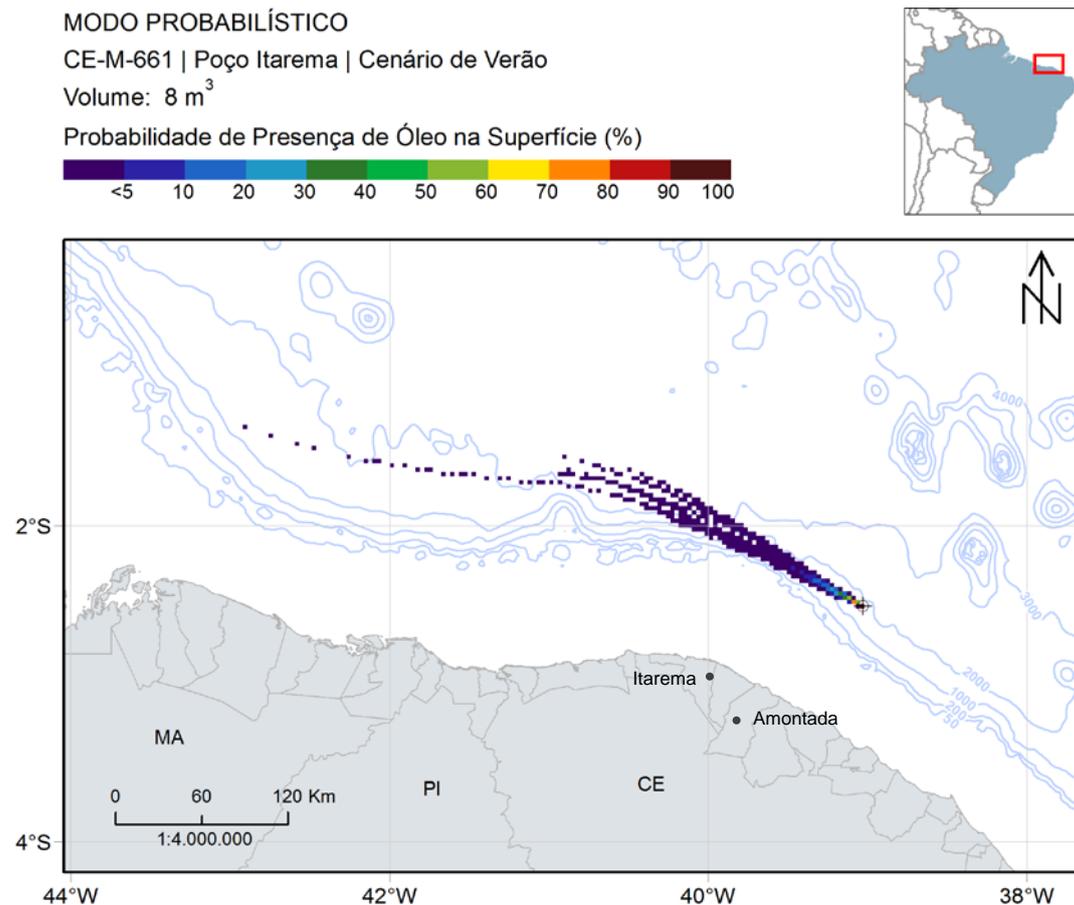


Figura 106: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m³ no período de verão a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).

Nesse cenário, o óleo foi transportado para noroeste do ponto de vazamento, seguindo o fluxo da Corrente Norte do Brasil (CNB). Nesse volume de vazamento, não houve toque de óleo na costa e o óleo ficou compreendido entre as longitudes de 39°W e 43°W. A menor distância do óleo em relação à costa foi de aproximadamente 76 km das cidades de Amontada (CE) e Itarema (CE).

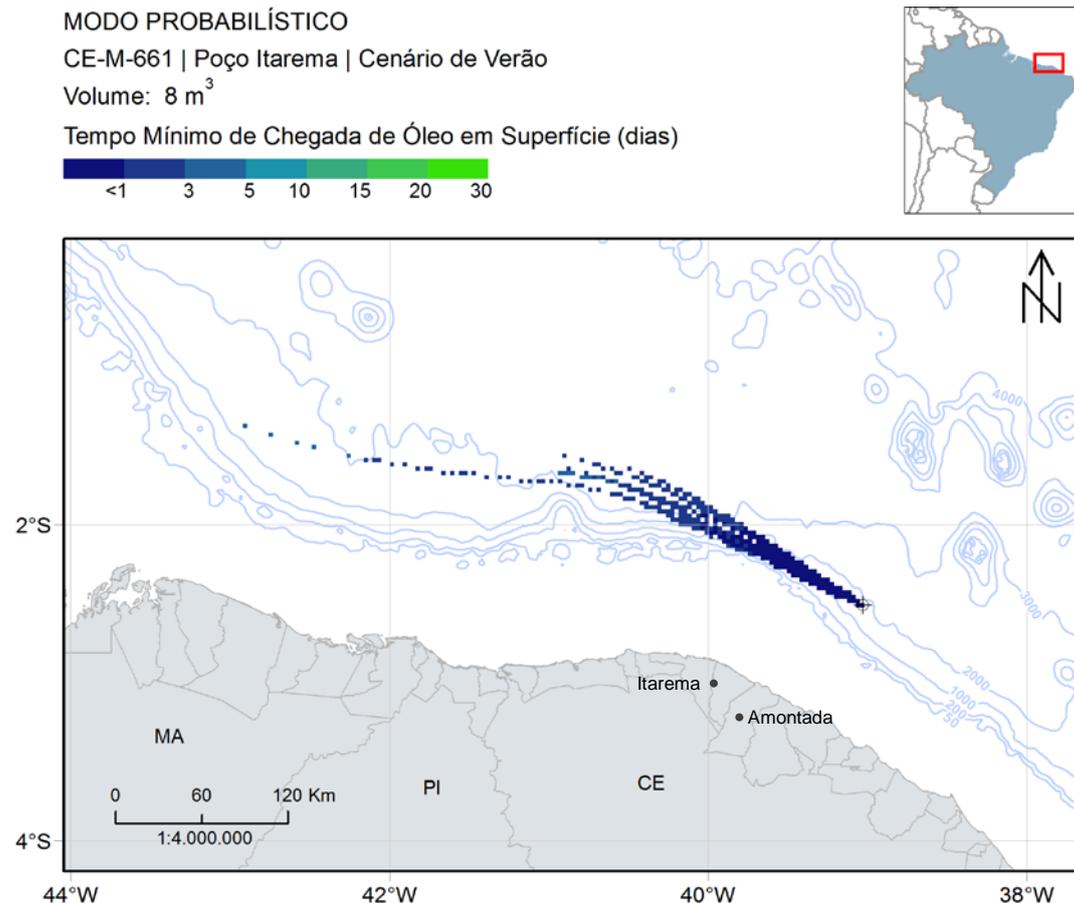


Figura 107: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m³ no período de verão a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).

Observa-se que no 1º dia após o início do vazamento, o óleo pode percorrer uma extensão de até 132 km. As regiões mais afastadas com probabilidade de alcance de óleo apresentam tempo mínimo de chegada de até 4 dias.

A seguir, na Figura 108, são apresentados os percentuais de óleo em cada processo intempérico ao final das simulações. Observa-se que a retirada de óleo da superfície ocorreu, principalmente, através da evaporação (mediana próxima de 40%), seguido pela degradação

(mediana pr. Os valores da dispersão e da sedimentação variaram entre as simulações realizadas, representando até 30% do total de óleo cada processo.

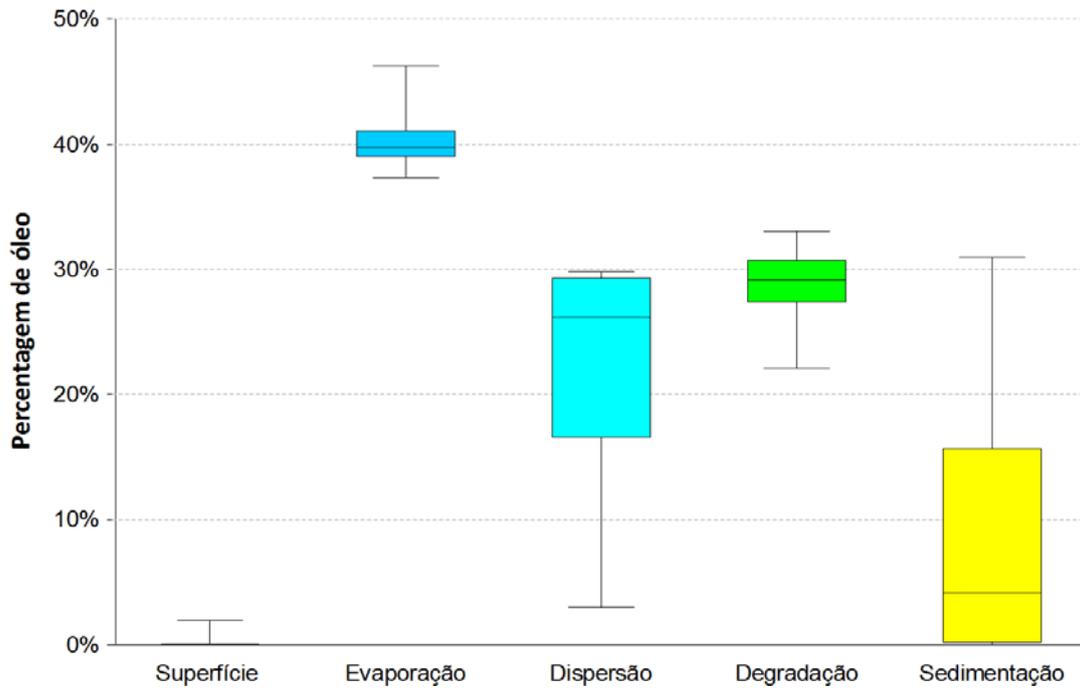


Figura 108: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 8 m³ no cenário de verão a partir do bloco CE-M-661.

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 m³ no período de inverno, encontram-se na Figura 109 e na Figura 110, respectivamente.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-661 | Poço Itarema | Cenário de Inverno

Volume: 8 m³

Probabilidade de Presença de Óleo na Superfície (%)

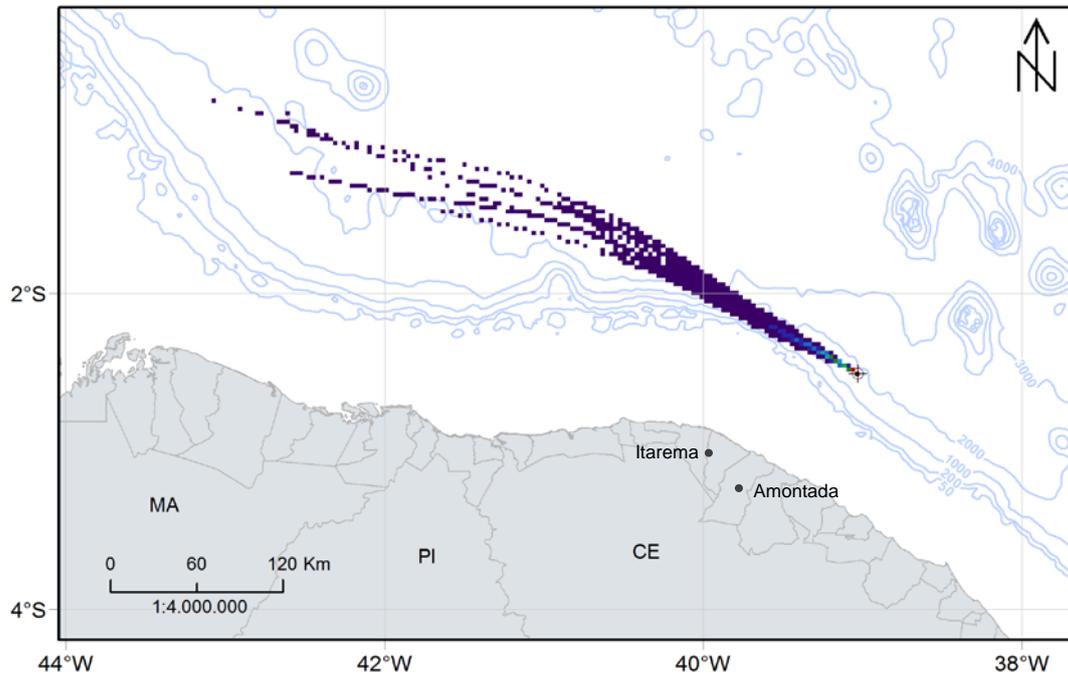
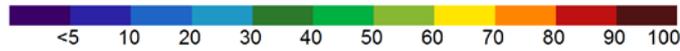


Figura 109: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m³ no período de inverno, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).

Assim como verificado no cenário de verão, a tendência do óleo é deslocar-se para noroeste, seguindo a CNB. O óleo ficou compreendido entre as longitudes de 39-43°W, sem chegada à costa. O deslocamento máximo do óleo foi de até 490 km, sendo que a menor distância da costa foi de 77 km (municípios de Amontada e Itarema), no estado do Ceará.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-661 | Poço Itarema | Cenário de Inverno

Volume: 8 m³

Tempo Mínimo de Chegada de Óleo em Superfície (dias)

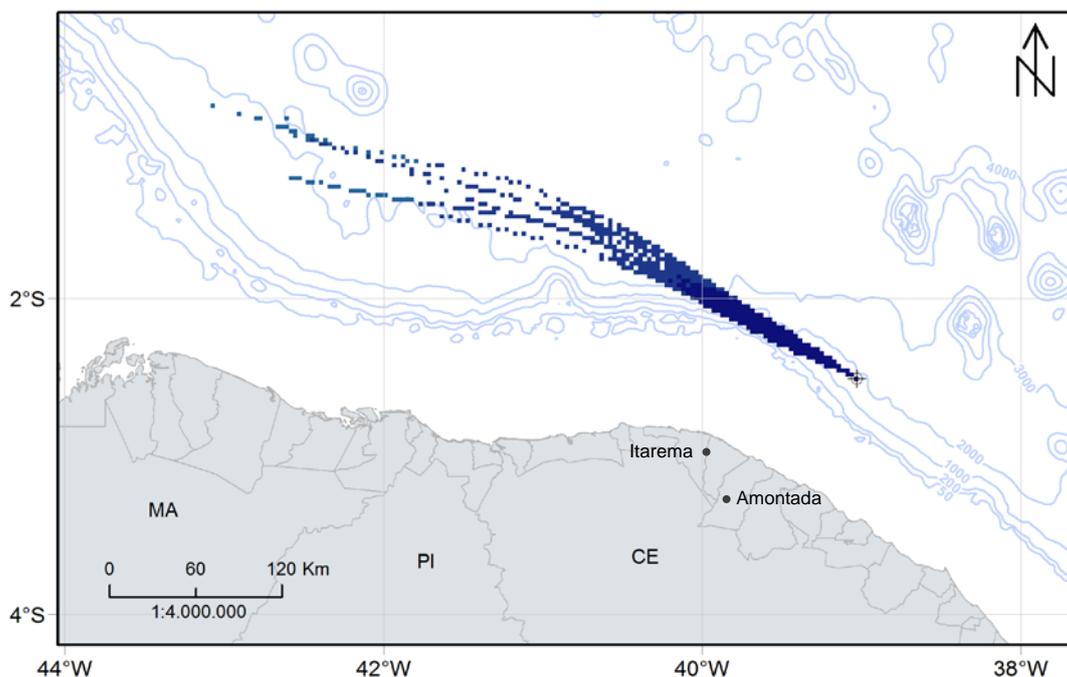


Figura 110: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m³ no período de inverno, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).

Percebe-se que a deriva do óleo pode se estender em até 150 km após um dia do início do vazamento. Os pontos mais próximos da costa (~77 km dos municípios de Amontada (CE) e Itarema (CE)) apresentam um tempo mínimo também de 1 dia, enquanto que os tempos mínimos das regiões mais afastadas se encontram na faixa de 3-5 dias.

A seguir, na Figura 111, são apresentados os percentuais de óleo em 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 próxima de 40%), seguida pela degradação e dispersão na coluna d'água.

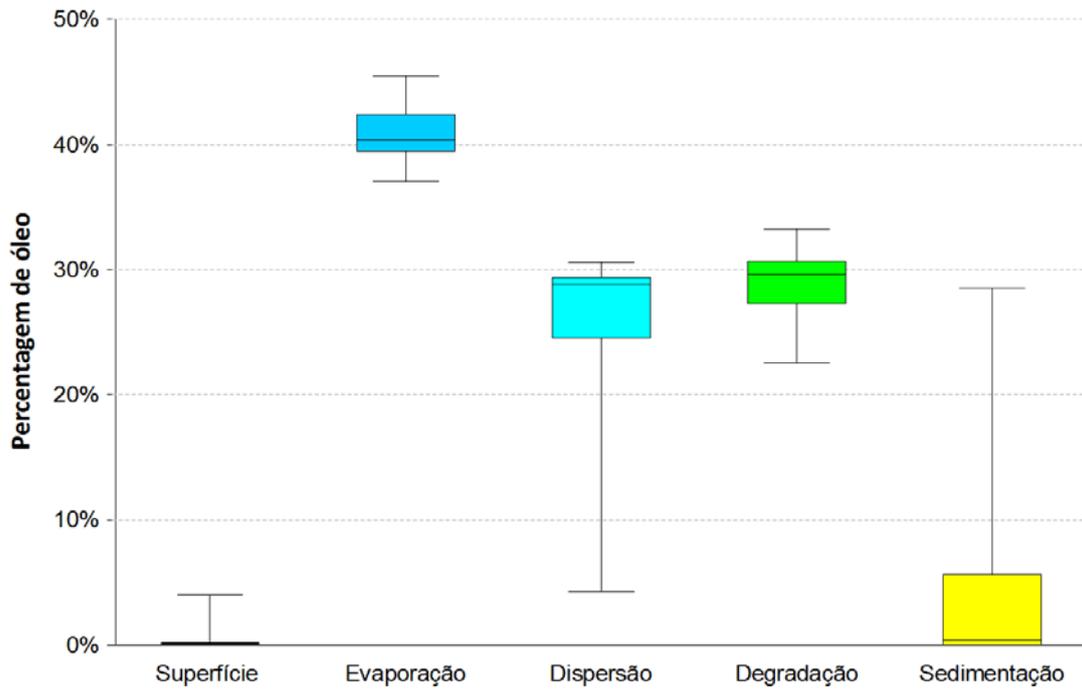


Figura 111: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 8 m³ no cenário de inverno a partir do bloco CE-M-661.

3.2.1.2 Vazamento de 200 m³

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 m³) no período de verão (Figura 112 e Figura 113, respectivamente). O mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície encontra-se na Figura 114.

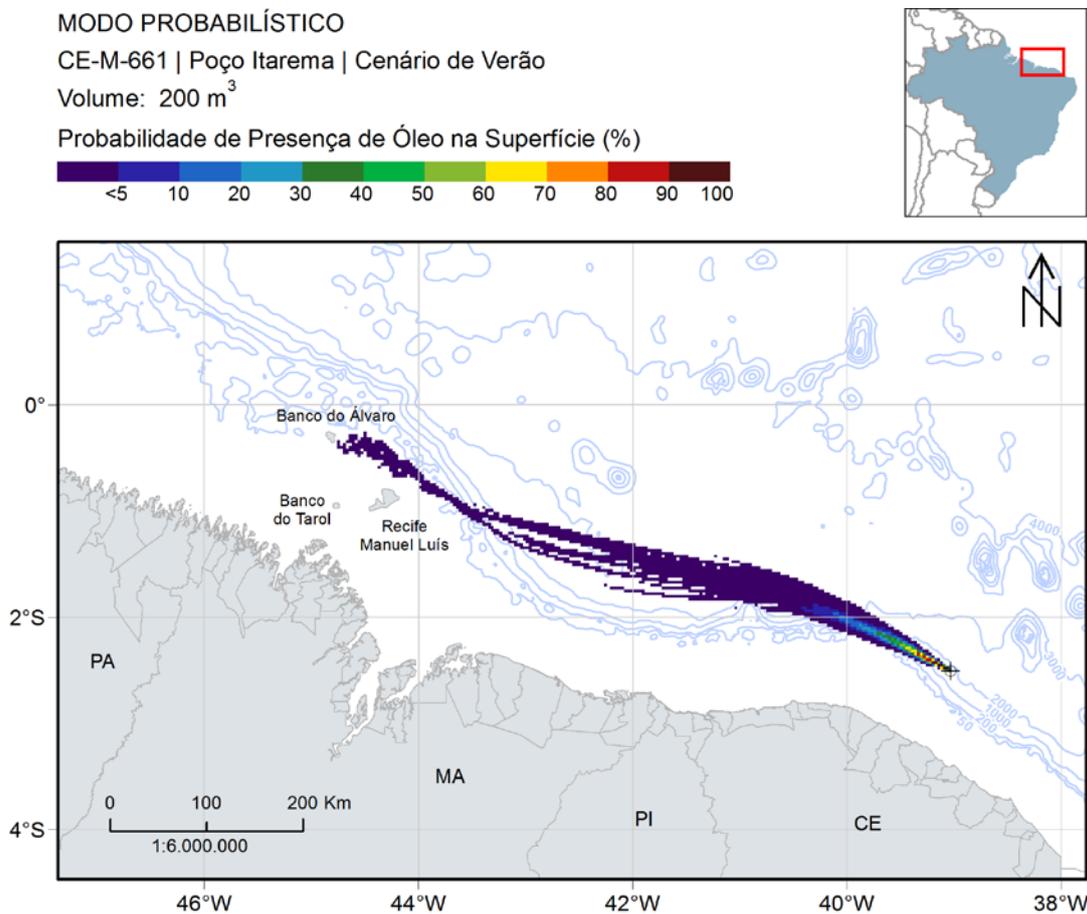


Figura 112: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m³, no período de verão, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-661 | Poço Itarema | Cenário de Verão

Volume: 200 m³

Probabilidade Máxima de Presença de Óleo na Coluna d'Água (%)

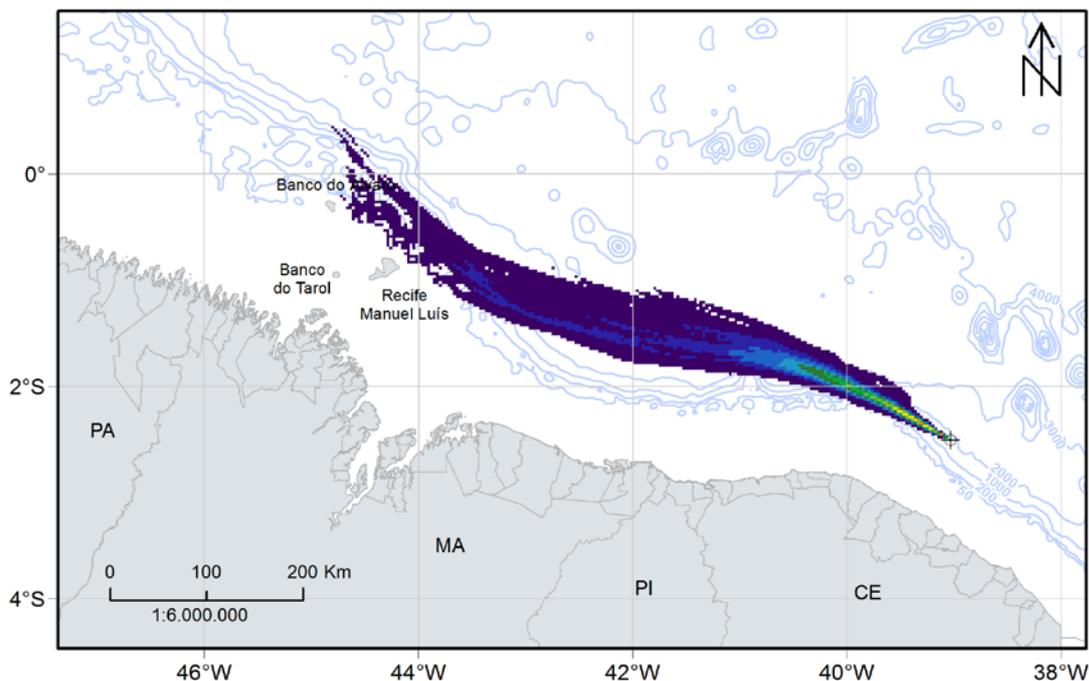


Figura 113: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água para vazamento de 200 m³, no período de verão, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).

Neste cenário de verão, apesar de ser um vazamento de maior porte, o padrão da deriva do óleo é similar ao de 8 m³, 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 uma distância de 683 km em relação ao ponto de vazamento, devido ao maior volume de óleo vazado, que permite que haja óleo acima do limiar de detecção (com espessura acima de 0,3 µm) por mais tempo.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-661 | Poço Itarema | Cenário de Verão

Volume: 200 m³

Tempo Mínimo de Chegada de Óleo em Superfície (dias)

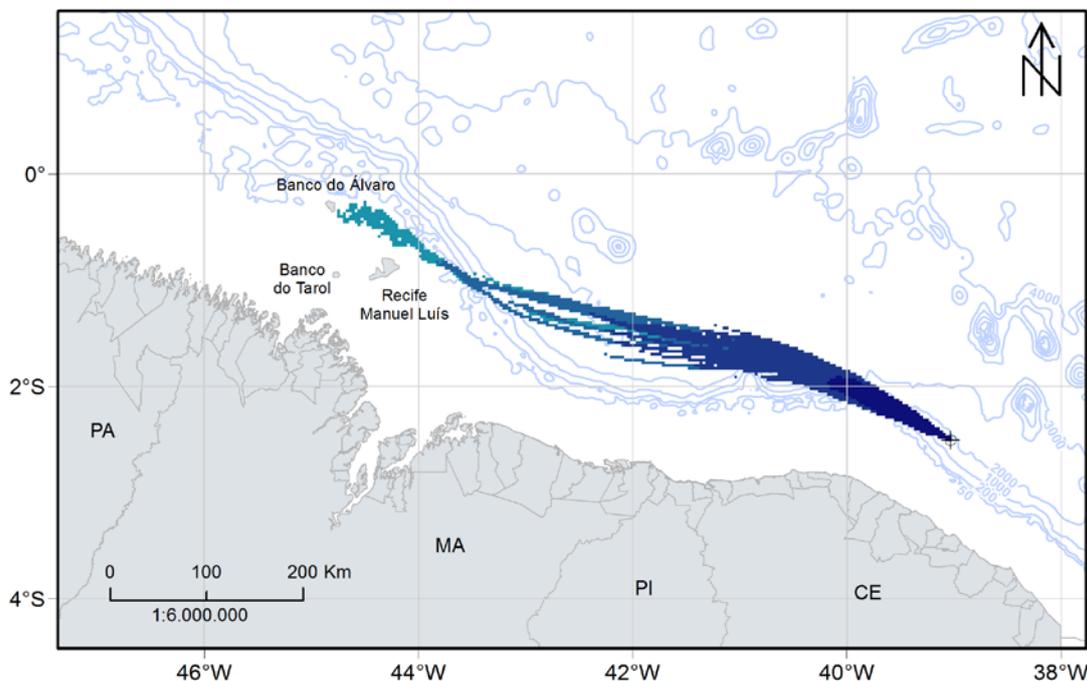


Figura 114: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 200 m³, no período de verão, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).

Observa-se que até 1 dia após o início do vazamento, o óleo pode alcançar até 142 km de extensão, com as regiões mais distantes podendo ser atingidas em até 8 dias.

Das unidades de conservação contidas na região de estudo, apenas o PEM do Álvaro apresentou probabilidade de presença de óleo quando observados os resultados em superfície, com apenas uma simulação atingindo a área após 1 semana do início do vazamento, conforme pode ser visto na Tabela 20, apresentada após a discussão dos resultados de vazamento de 200 m³ em condições de inverno. Em subsuperfície a probabilidade máxima nesta UC foi de 0,3% e o tempo mínimo de chegada de óleo foi de 8 dias (Tabela 21).

A seguir, na Figura 115, são apresentados os percentuais de óleo em cada processo intempérico ao final das simulações. Assim como a deriva, os processos intempéricos do óleo foram similares entre esse cenário e o vazamento de 8 m³, tendo a evaporação se mostrado como processo mais importante na retirada de óleo da superfície.

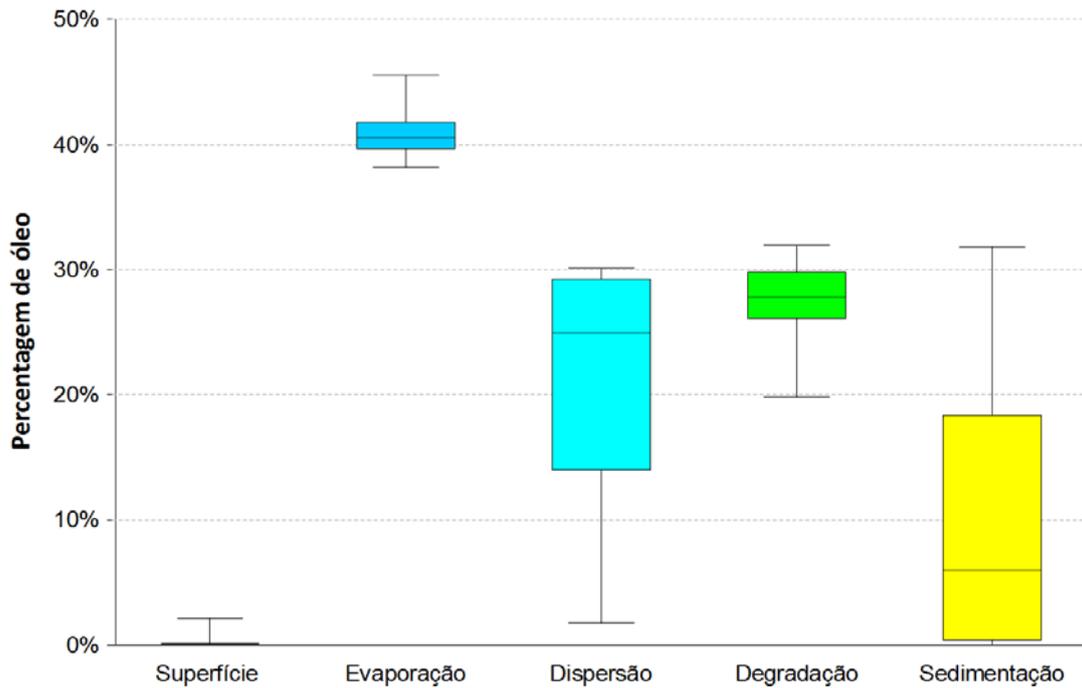


Figura 115: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 200 m³ no cenário de verão a partir do bloco CE-M-661.

3.2.1.2.2 Inverno

A seguir são apresentados, na Figura 116 e na Figura 117, respectivamente, os mapas de probabilidade de presença de óleo em superfície e na coluna d'água, para o vazamento de médio porte (200 m³) no período de inverno. O mapa de tempo mínimo de chegada em superfície encontra-se na Figura 118.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-661 | Poço Itarema | Cenário de Inverno

Volume: 200 m³

Probabilidade de Presença de Óleo na Superfície (%)

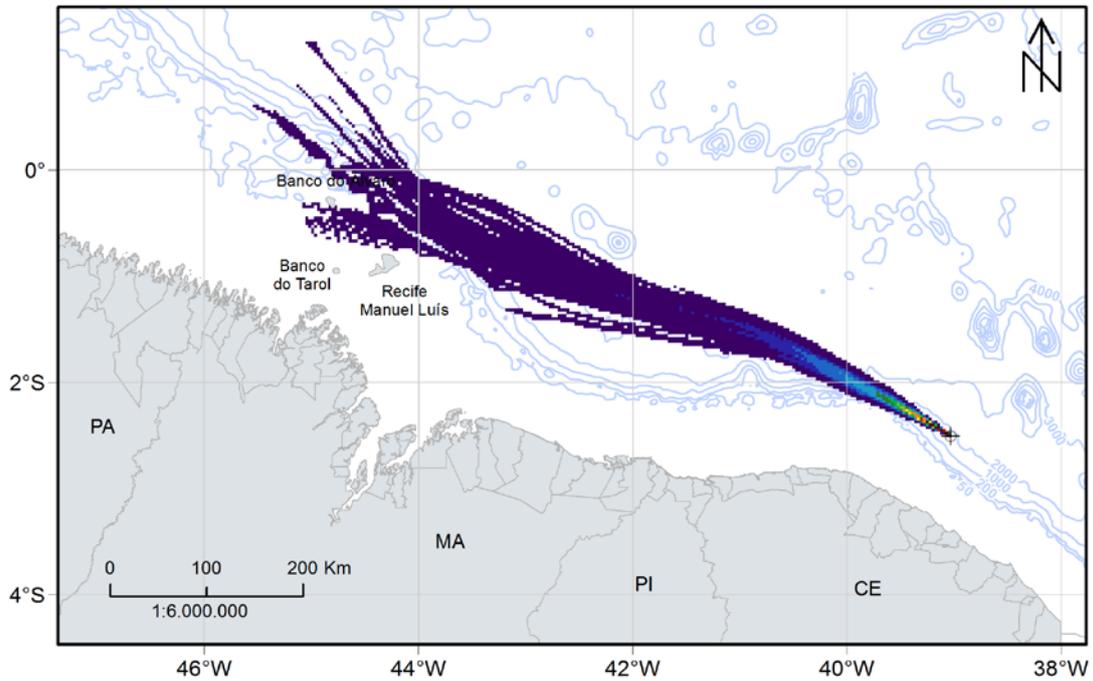
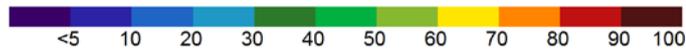


Figura 116: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 200 m³, no período de inverno, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-661 | Poço Itarema | Cenário de Inverno

Volume: 200 m³

Probabilidade Máxima de Presença de Óleo na Coluna d'Água (%)

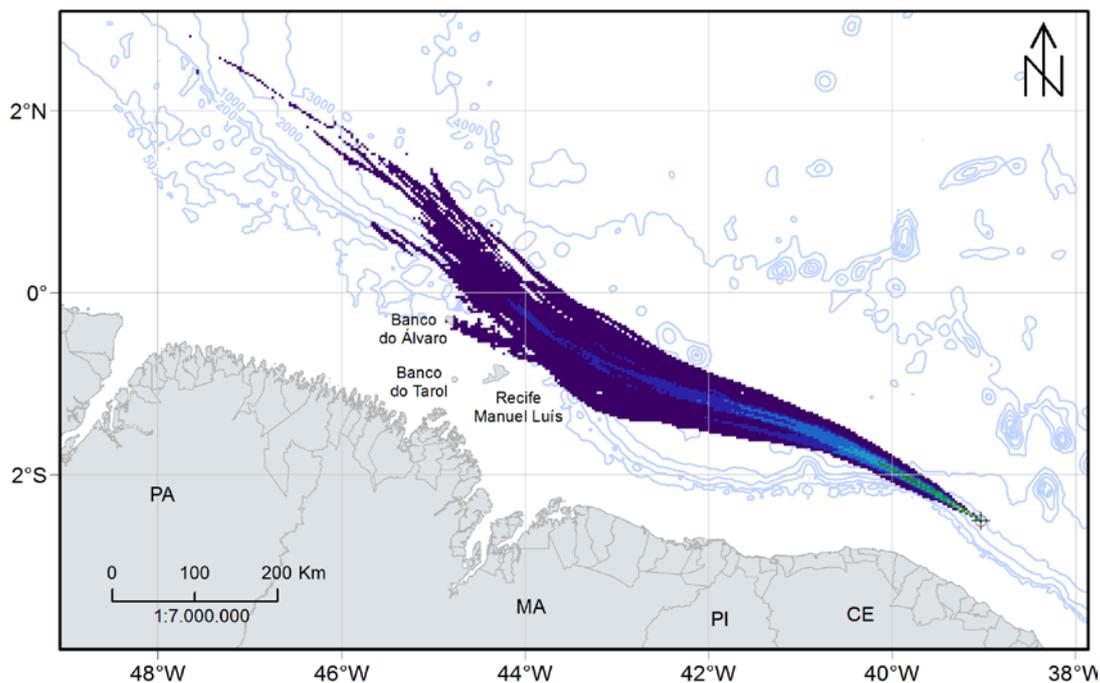


Figura 117: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água para vazamento de 200 m³, no período de inverno, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).

O padrão de deriva e os valores de probabilidade observados em condições de inverno são similares aos observados no cenário de verão, com presença de óleo sobre a plataforma continental na bacia do Pará-Maranhão e chegando ao Banco do Álvaro. Porém, observa-se uma extensão maior da deriva em superfície, alcançando até 785 km do ponto de vazamento.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-661 | Poço Itarema | Cenário de Inverno

Volume: 200 m³

Tempo Mínimo de Chegada de Óleo em Superfície (dias)

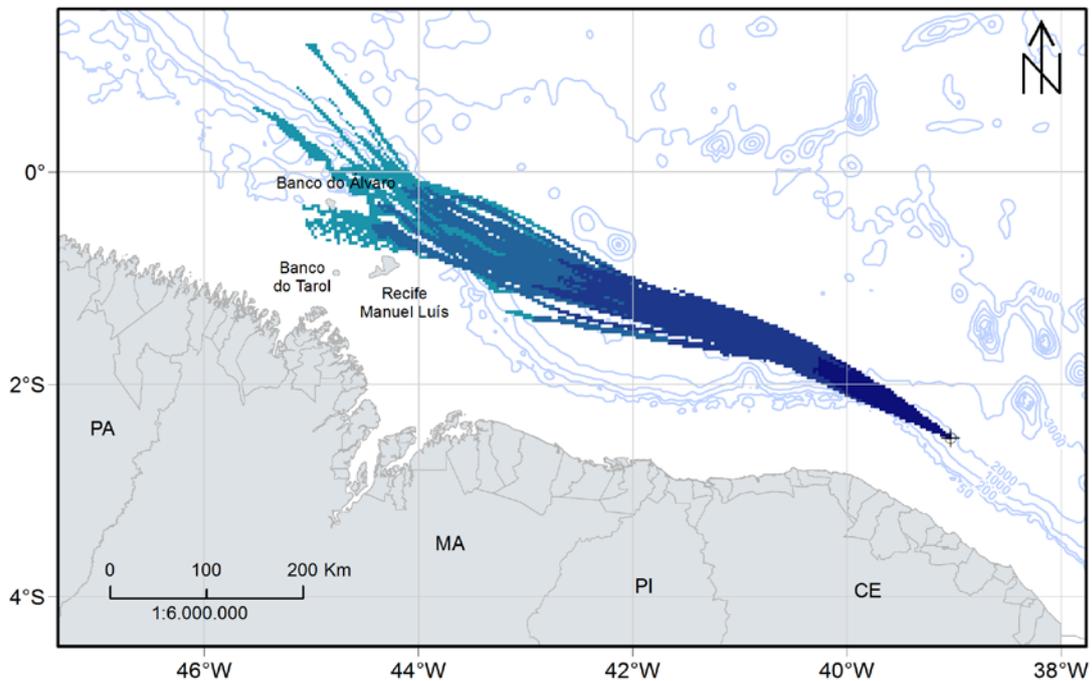


Figura 118: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 200 m³, no período de inverno, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 720 horas (30 dias).

Verifica-se que em até 1 dia após o vazamento, o óleo pode alcançar a distância de 161 km. Os locais mais distantes do ponto de vazamento podem ser alcançados em até 9 dias, enquanto o ponto onde o óleo se encontra mais próximo da costa (Cururupu/MA), o tempo de chegada é de 8 dias.

No que tange às unidades de conservação, o PEM do Álvaro apresentou probabilidade de chegada de óleo em superfície (0,7%) após 6,2 dias do início do vazamento (Tabela 20) Em subsuperfície a probabilidade máxima nesta UC foi de 0,3% com chegada em 6,5 dias (Tabela 21).

A seguir, na Figura 119, são apresentados os percentuais de óleo em cada processo intempérico ao final das simulações. Assim como nos outros casos (verão e inverno para o vazamento de 8m³ e verão para um vazamento de 200 m³), a evaporação foi o principal

processo de retirada de óleo da superfície, seguida pela degradação e dispersão na coluna d'água.

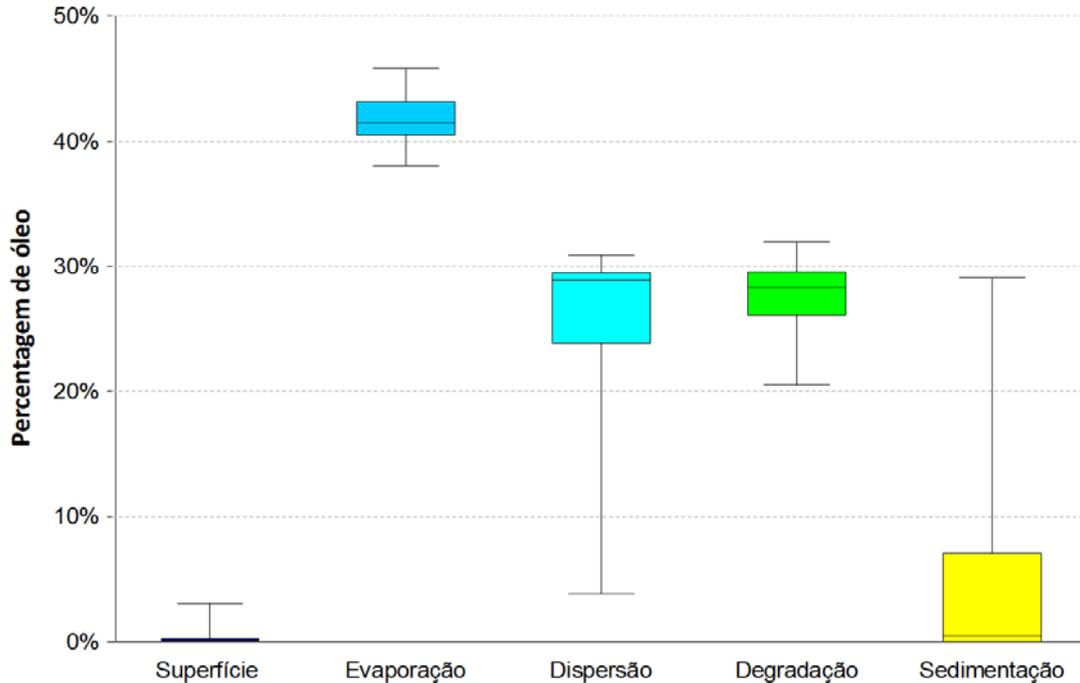


Figura 119: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 200 m³ no cenário de inverno a partir do bloco CE-M-661.

Na Tabela 20 são apresentados os resultados para as Unidades de Conservação marinhas. Ressalta-se que esses valores representam a passagem do óleo na superfície por essas regiões, não representando um acúmulo.

Tabela 20: Área com toque de óleo, massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas Unidades de Conservação marinhas com possibilidade de serem atingidas em um evento derrame de médio porte (200 m³) a partir do bloco CE-M-661, nos cenários de verão e inverno. Os resultados considerados são os de superfície.

Unidade de Conservação	Área com toque de óleo (Km ²)		Massa Máxima (t/km ²)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo (dias)	
	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
PEM do Álvaro	27,0	135,0	0,2	0,4	0,3	0,7	7,7	6,2

Tabela 21: Área com toque de óleo, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas Unidades de Conservação marinhas com possibilidade de serem atingidas em um evento derrame de médio porte (200 m³) a partir do bloco CE-M-661, nos cenários de verão e inverno. Os resultados considerados são os de coluna d'água.

Unidade de Conservação	Área com toque de óleo (Km ²)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo (dias)	
	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
PEM do Álvaro	0,2	153,0	0,3	0,3	8,0	6,5

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 (13.307 m³), em período de verão, 60 dias após o início do vazamento, encontra-se na Figura 120.

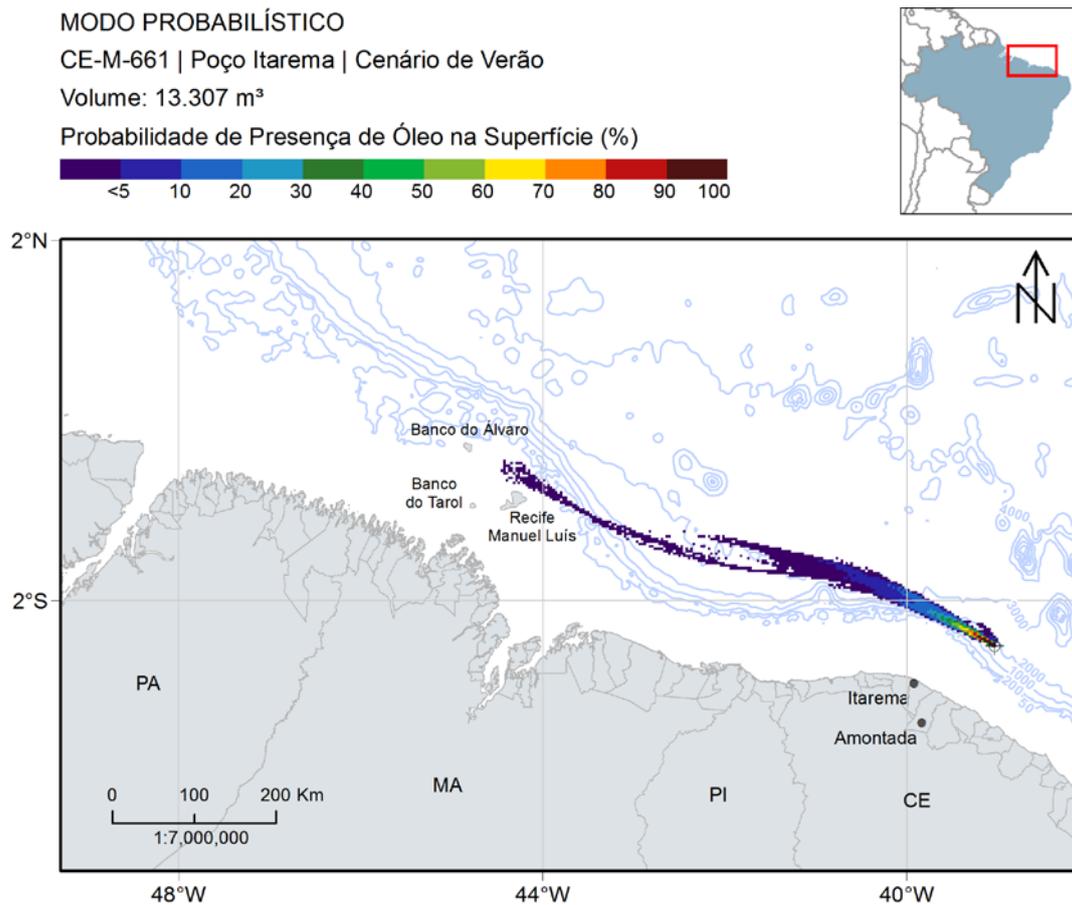


Figura 120: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para um vazamento de *blowout* de 30 dias, no período de verão, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 60 dias.

Observa-se, na Figura 120, que o óleo derivou, preferencialmente, para noroeste do ponto de vazamento, influenciado inicialmente pela CNB, que flui nessa direção. Por se tratar de um ponto de vazamento em águas profundas, próximas a 2000 m, apesar da persistência de ventos de leste neste período sazonal, a deriva do óleo continua sob influência principal da

CNB, não fluindo em direção à costa. A distância mínima da mancha de óleo da costa foi de 75 km, observada nos municípios de Amontada e Itarema, no estado do Ceará.

A probabilidade máxima de presença na coluna d'água é apresentada na Figura 121 e na Figura 122 e na Figura 123, são apresentadas as probabilidades em seis profundidades diferentes.

Assim como na superfície, na coluna d'água também se observa uma tendência de deslocamento do óleo para noroeste do ponto, seguindo a CNB, porém neste caso a área com probabilidade de presença de óleo se estende até o limite do domínio e mostra a presença de meandros na região (Figura 121).

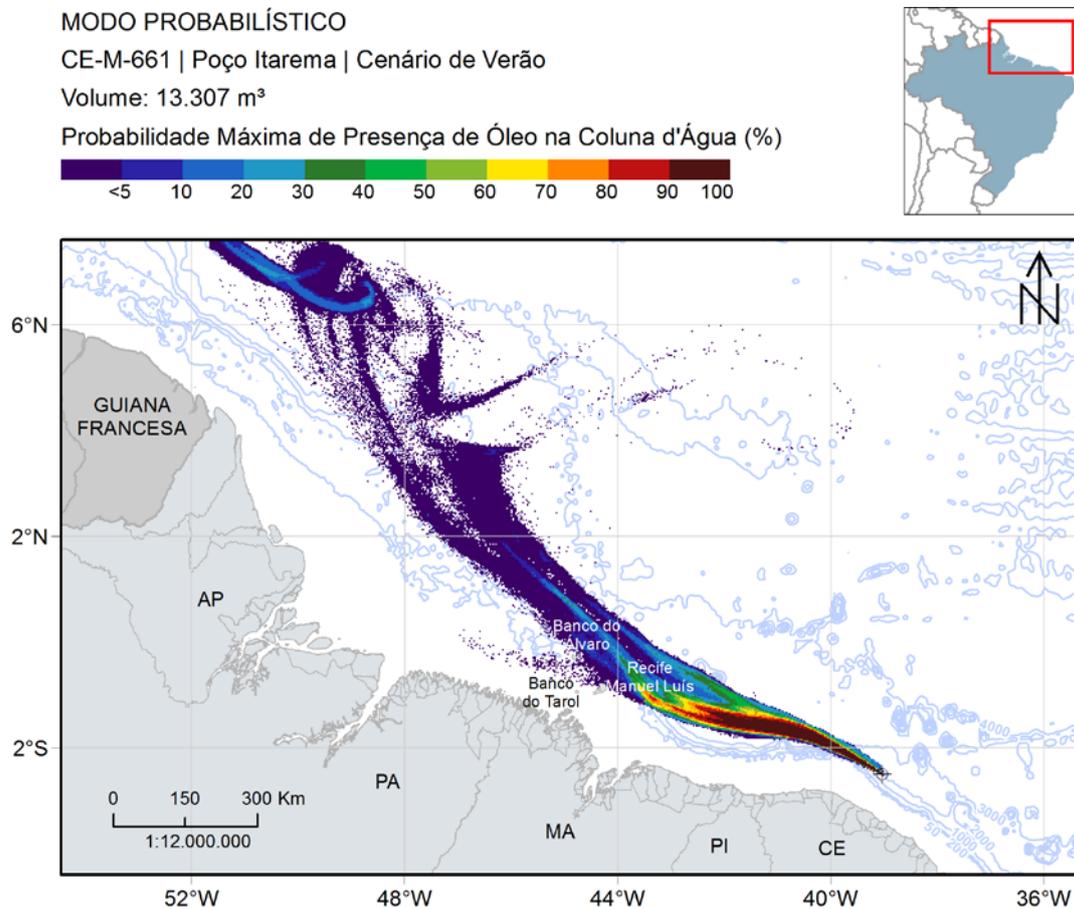


Figura 121: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água para um vazamento de *blowout* de 30 dias, no período de verão, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 60 dias.

As probabilidades máximas de presença de óleo na coluna d'água chegam até 100%, valor observado numa distância de até 294 km do ponto de vazamento. Entretanto, nas camadas mais profundas, só foram observadas concentrações acima do limiar monitorado numa área mais restrita, nas células de grade próximas ao ponto de vazamento. (Figura 122 e Figura 123).

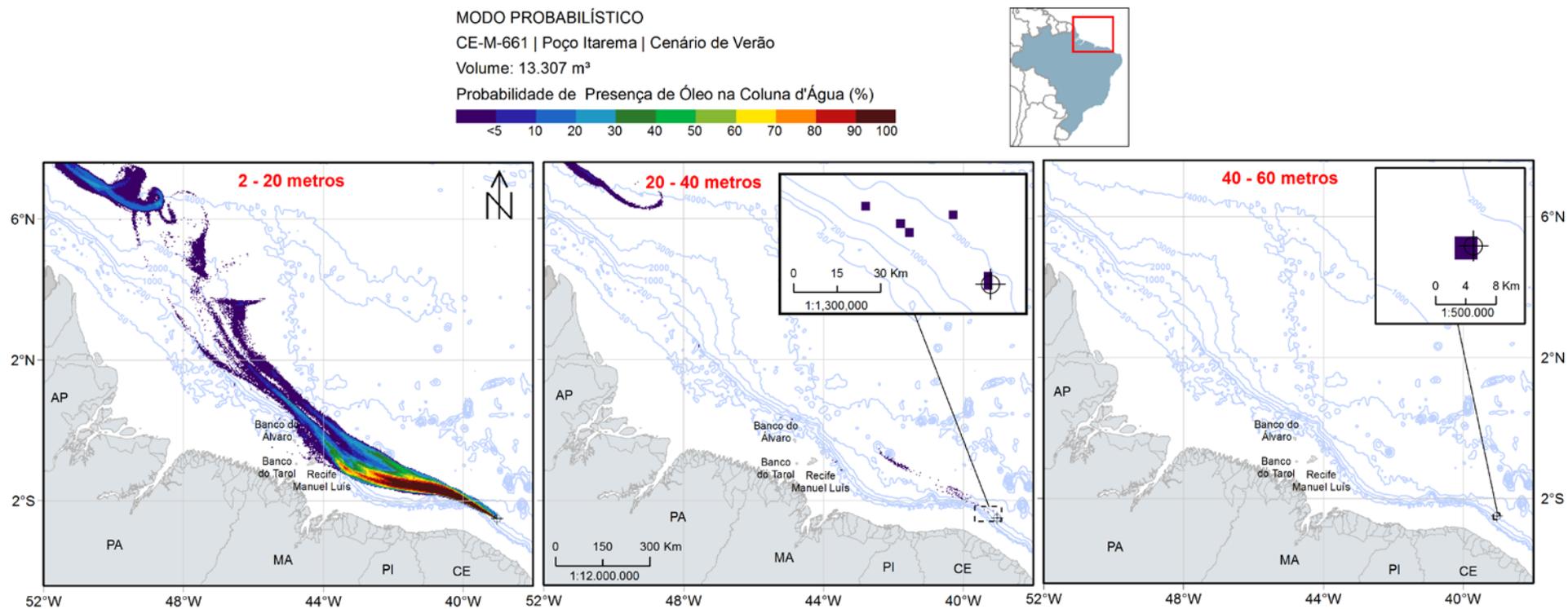


Figura 122: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três camadas (2-20 m, 20-40 m e 40-60 m), para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-661 | Poço Itarema | Cenário de Verão

Volume: 13.307 m³

Probabilidade de Presença de Óleo na Coluna d'Água (%)

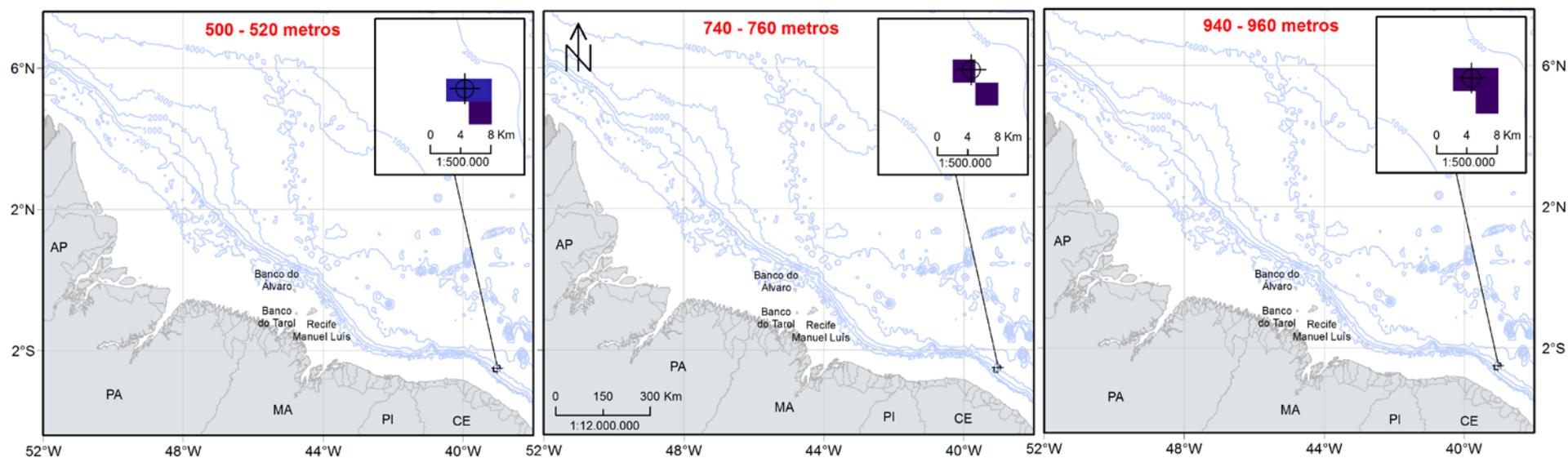
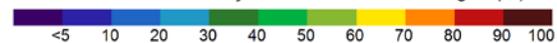


Figura 123: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três camadas (500-520 m, 740-760 m e 940-960 m), para um vazamento de *blowout* de 30 dias, no período de verão, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 60 dias.

Na Figura 124 são apresentadas as probabilidades de presença de óleo no fundo do mar.

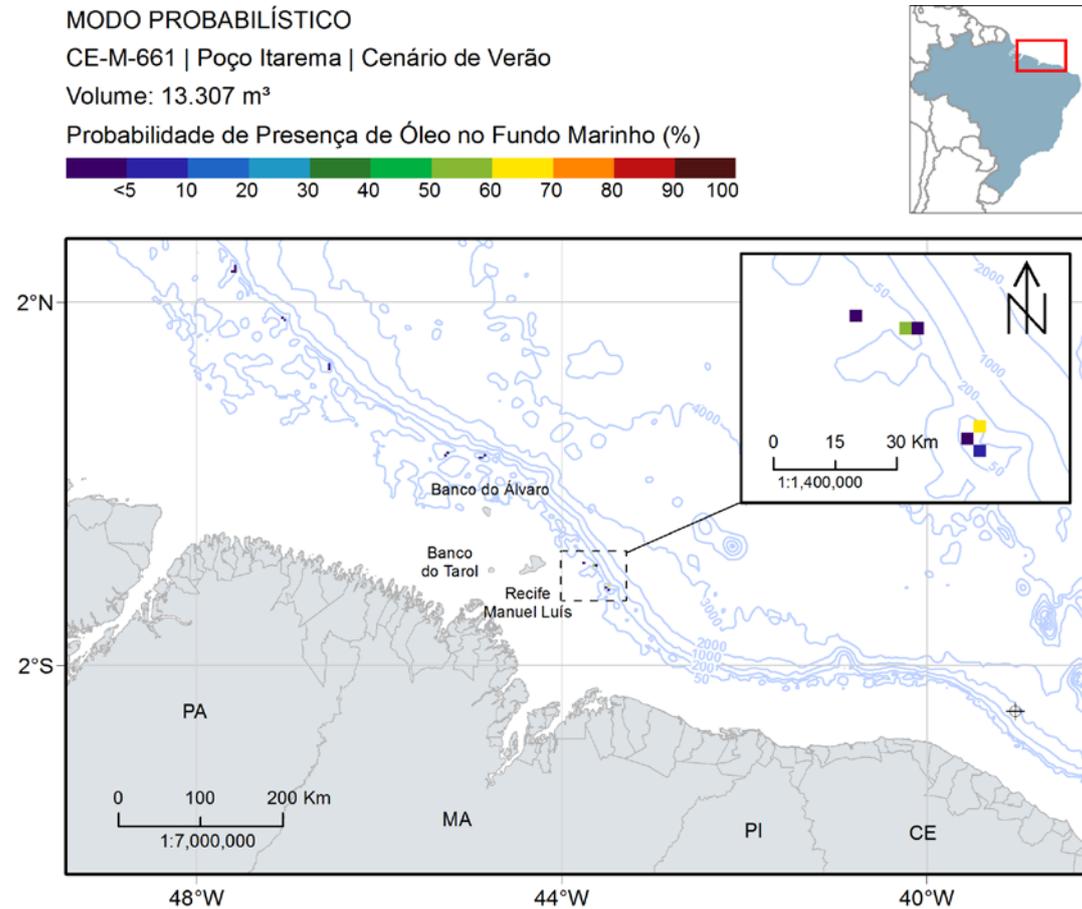


Figura 124: Mapa de probabilidade de presença de óleo no fundo marinho, para um vazamento de blowout de 30 dias, no período de verão, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 60 dias.

As poucas regiões com probabilidade de presença no fundo marinho são esparsas e localizadas em regiões rasas, menores que 50 metros, sendo que o maior valor (61,2%) encontra-se a leste do Parcel Manuel Luís (a aproximadamente 70 km de distância). A área do Parcel por sua vez não foi atingida.

O mapa de tempo mínimo de chegada em superfície é apresentado na Figura 125.

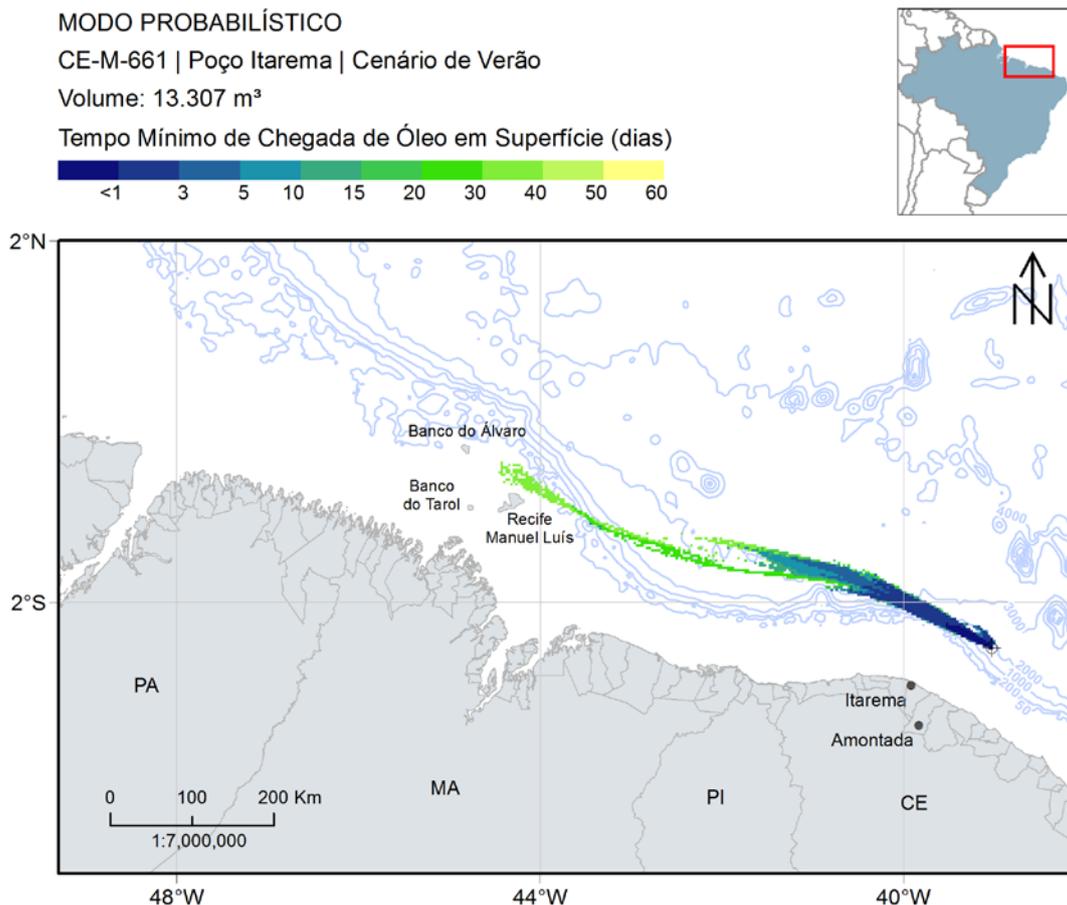


Figura 125: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para um vazamento de *blowout* contínuo de 30 dias, no período de verão, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 60 dias.

Considerando o vazamento de fundo observa-se que até 1 dia após o início do vazamento, o óleo pode alcançar até 64 km de extensão na superfície. As regiões mais afastadas, próximas aos Bancos do Álvaro e Parcel Manuel Luís podem ser alcançadas em 32 dias.

Neste cenário, nenhuma unidade de conservação apresentou probabilidade de chegada de óleo quando considerado o óleo presente na superfície. No entanto quando considerado o óleo presente na coluna d'água, o PEM do Álvaro, o PEM do Tarol e o PEM do Parcel Manuel Luís apresentaram probabilidade de presença de óleo, todas com valores inferiores a 1,5%. O tempo mínimo foi de 8,75 dias no PEM do Parcel Manuel Luís (Tabela 22), apresentada após a discussão dos resultados de vazamento de pior caso em condições de inverno.

A seguir, na Figura 126, são apresentados os percentuais de retirada de massa de óleo por cada processo intempérico ao final das simulações. Dos processos de retirada de óleo da superfície, a degradação foi o mais significativo (mediana de 37%), seguido pela evaporação

(mediana de 27%). O óleo remanescente em superfície foi menor que 0,5% em todas as simulações. A sedimentação foi de até 27% considerando todas as simulações e o remanescente na coluna d'água (dispersão) apresentou mediana de 20%.

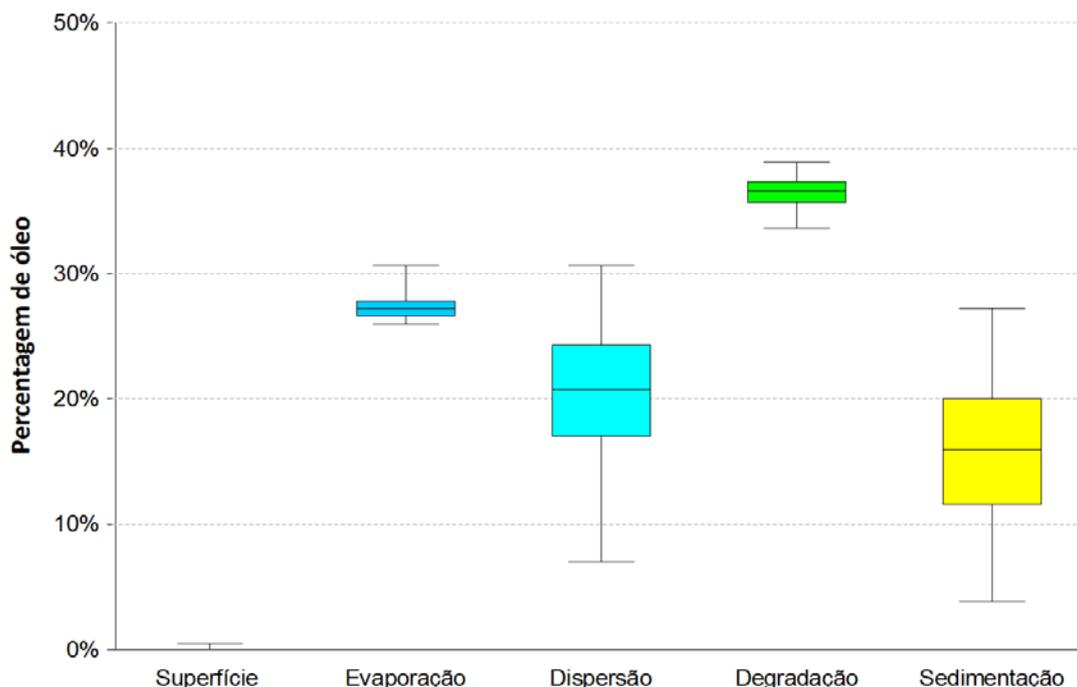


Figura 126: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de pior caso, no cenário de verão, a partir do bloco CE-M-661.

3.2.1.3.2 Inverno

O mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para um evento de pior caso (13.307 m³) em período de inverno, 60 dias após o início do vazamento, encontra-se na Figura 127 abaixo.

Para o cenário de inverno, a área com probabilidade de presença de óleo é maior do que a observada para o verão, se estendendo mais a noroeste, devido à ação dos ventos de segundo quadrante e também por este período apresentar uma intensificação da CNB. A mancha contínua de óleo em superfície alcança latitudes até 0°20'N. A maior proximidade da costa é de 78 km até os municípios de Amontada e Itarema, no Ceará.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-661 | Poço Itarema | Cenário de Inverno

Volume: 13.307 m³

Probabilidade de Presença de Óleo na Superfície (%)

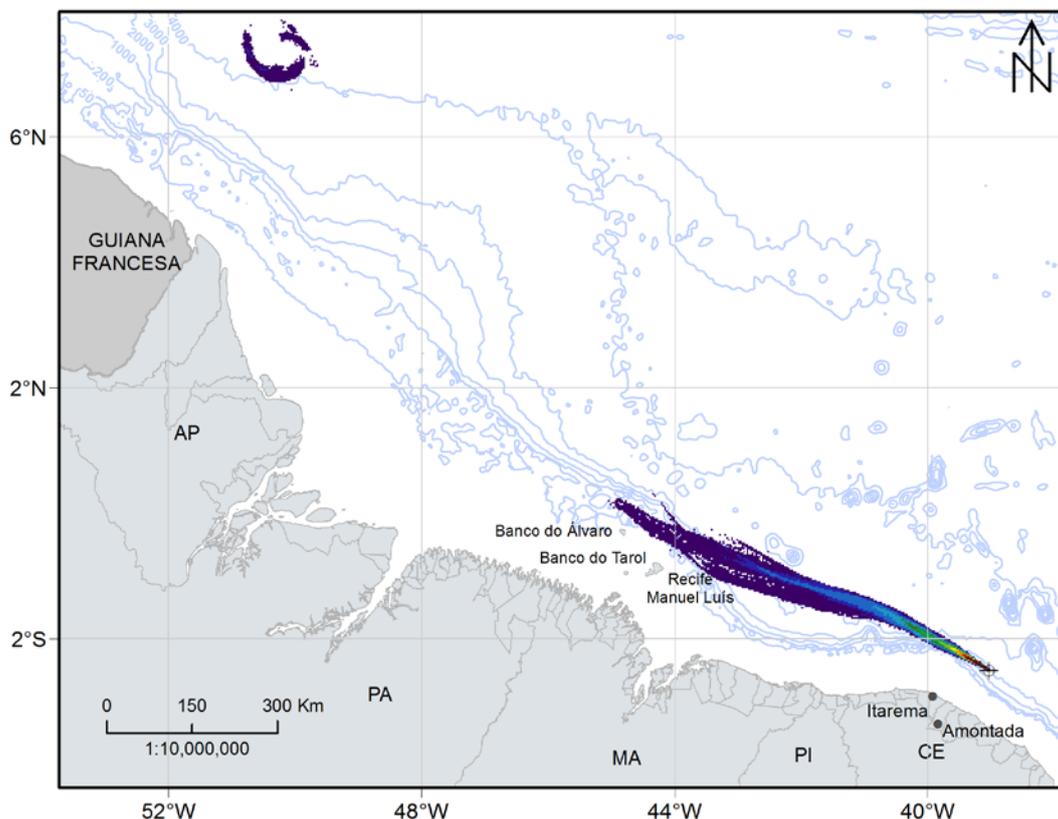


Figura 127: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de *blowout* de 30 dias, no período de inverno, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 60 dias.

Acima de 6° N, observa-se uma área isolada de probabilidades de presença de óleo. Isto ocorre porque o óleo chega até esta região em espessuras abaixo do limiar de detecção (0,3 µm), o que não é observado na figura, e se acumula até chegar a espessuras acima deste limiar.

Esta região de acúmulo de óleo pode ser explicada pela presença de um vórtice anticiclônico na mesma área, destacado em rosa no mapa apresentado na Figura 128, que representa as correntes do modelo hidrodinâmico para o dia 1° de setembro de 2013, incluído no cenário sazonal de inverno das simulações de óleo (de abril a setembro).

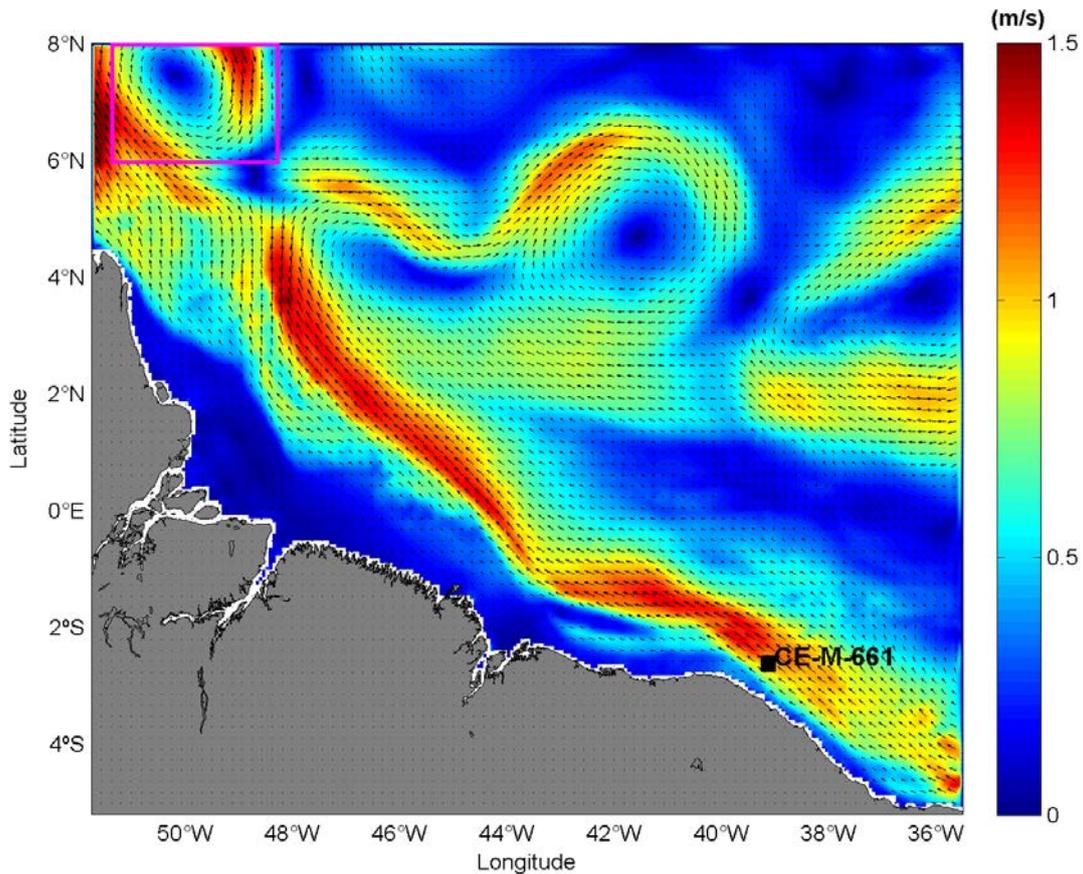


Figura 128: Mapa de correntes do modelo hidrodinâmico para o dia 1º de setembro de 2013, incluído no cenário sazonal de inverno (abril a setembro) com a formação de um vórtice anticiclônico na área destacada em rosa.

Na coluna d'água, as probabilidades máximas chegam até 100% e a área de probabilidade apresenta um padrão dominado pela dinâmica da CNB, apresentando uma área de probabilidade maior que a observada em superfície (Figura 129). Em subsuperfície, também se observa a deriva do óleo para leste, seguindo a retroflexão da CNB.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-661 | Poço Itarema | Cenário de Inverno

Volume: 13.307 m³

Probabilidade Máxima de Presença de Óleo na Coluna d'Água (%)

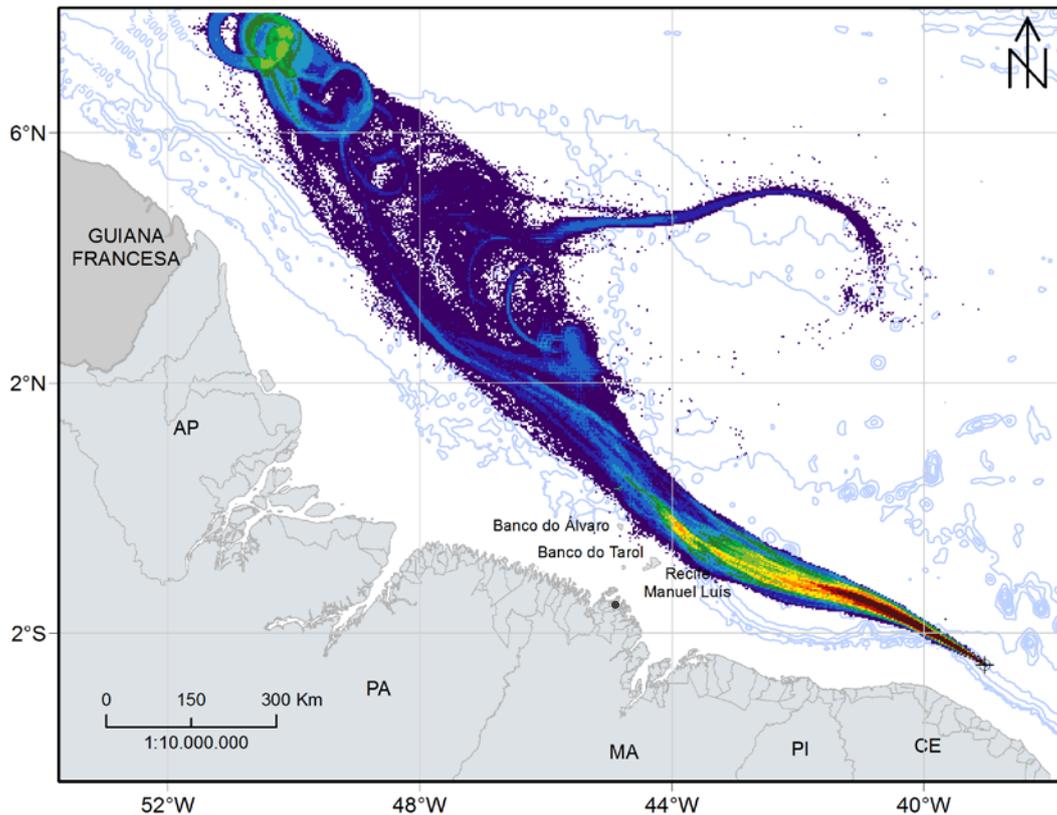
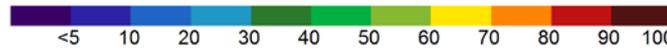


Figura 129: Mapa de probabilidade de presença de óleo na coluna d'água, para um vazamento de *blowout* de 30 dias, no período de inverno, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 60 dias.

Na Figura 130 e na Figura 131 são apresentadas a probabilidades de presença de óleo em seis faixas de profundidade na coluna d'água.

Entre 2 e 20 metros, a área de probabilidade de presença de óleo com 100% alcança uma distância de 220 km. Na camada entre 20 e 40 metros as probabilidades se concentram principalmente no limite norte do domínio, mostrando a presença de meandros na região. Note-se, porém, que em camadas mais profundas só foram observadas probabilidade de concentrações acima do limiar monitorado numa área mais restrita, nas células de grade próximas ao ponto de vazamento.

MODO PROBABILÍSTICO
CE-M-661 | Poço Itarema | Cenário de Inverno
Volume: 13.307 m³
Probabilidade de Presença de Óleo na Coluna d'Água (%)

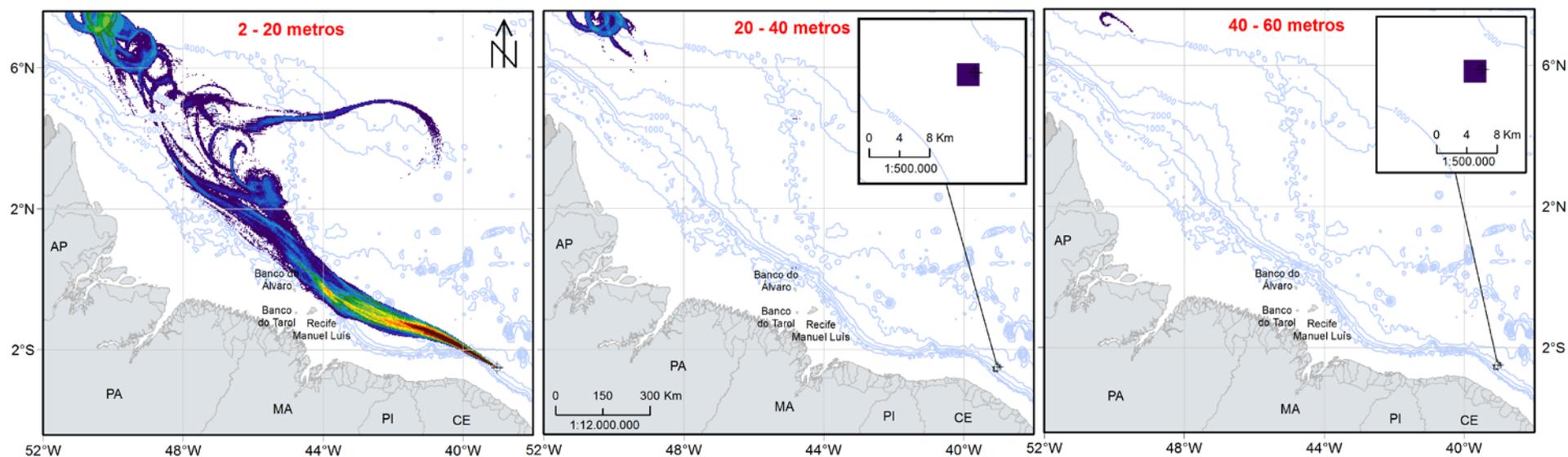


Figura 130: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três camadas (2-20 m, 20-40 m e 40-60 m), para um vazamento de *blowout* de 30 dias, no período de inverno, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 60 dias.

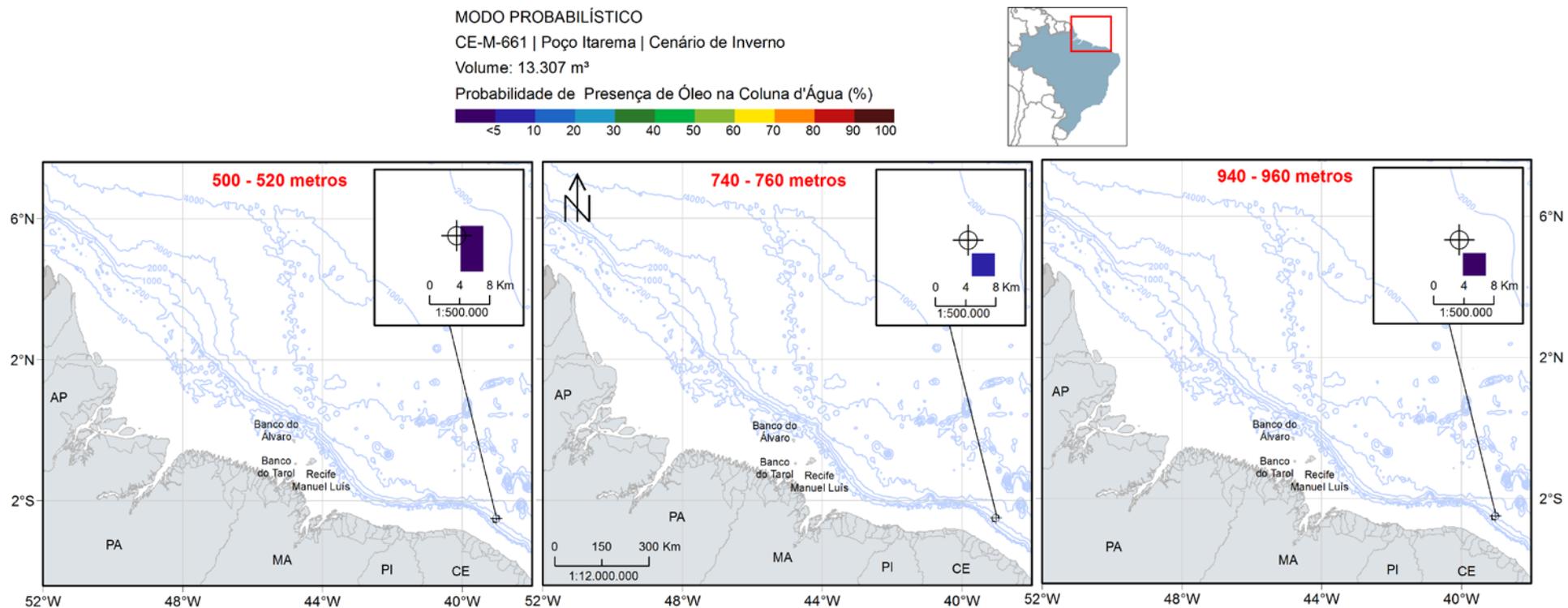


Figura 131: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três camadas (500-520 m, 740-760 m e 940-960 m), para um vazamento de *blowout* de 30 dias, no período de inverno, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 60 dias.

A probabilidade de presença de óleo no fundo é apresentada abaixo, na Figura 132.

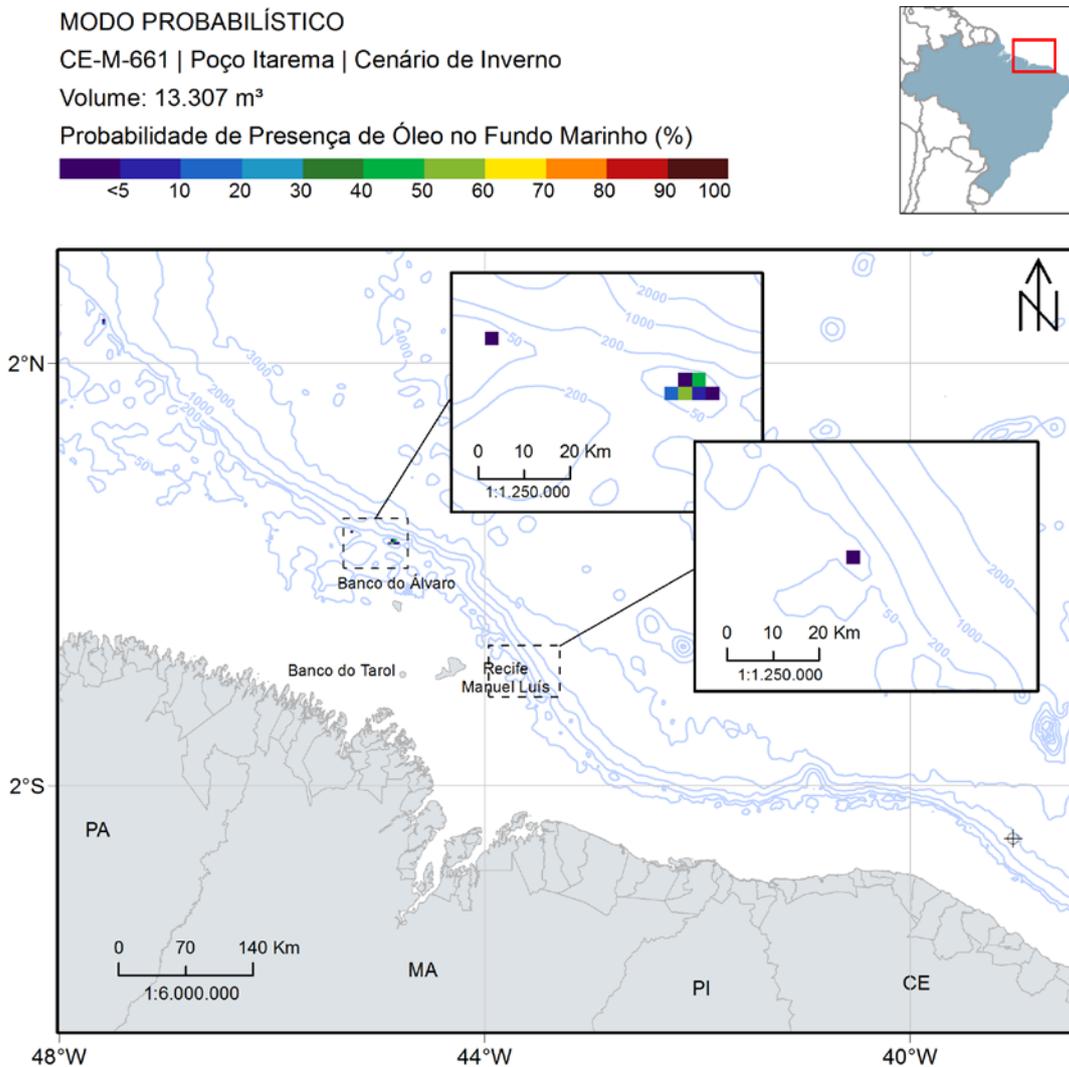


Figura 132: Mapa de probabilidade de presença de óleo no fundo marinho para um vazamento de *blowout* de 30 dias, no período de inverno, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 60 dias.

Pode-se observar que as áreas com probabilidade de presença de óleo no fundo marinho ficam restritas às áreas a norte do PEM do Álvaro (a aproximadamente 70 km de distância e máximo de 50%), a leste do Parcel Manuel Luís (a aproximadamente 60 km de distância e 2,6%) e a norte de 2°N (máximo de 10%), com profundidades inferiores a 50 metros. As regiões dos bancos e parcéis não apresentaram probabilidade de óleo no fundo.

O mapa de tempo mínimo de chegada em superfície é apresentado na Figura 133.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-661 | Poço Itarema | Cenário de Inverno

Volume: 13.307 m³

Tempo Mínimo de Chegada de Óleo na Superfície (dias)

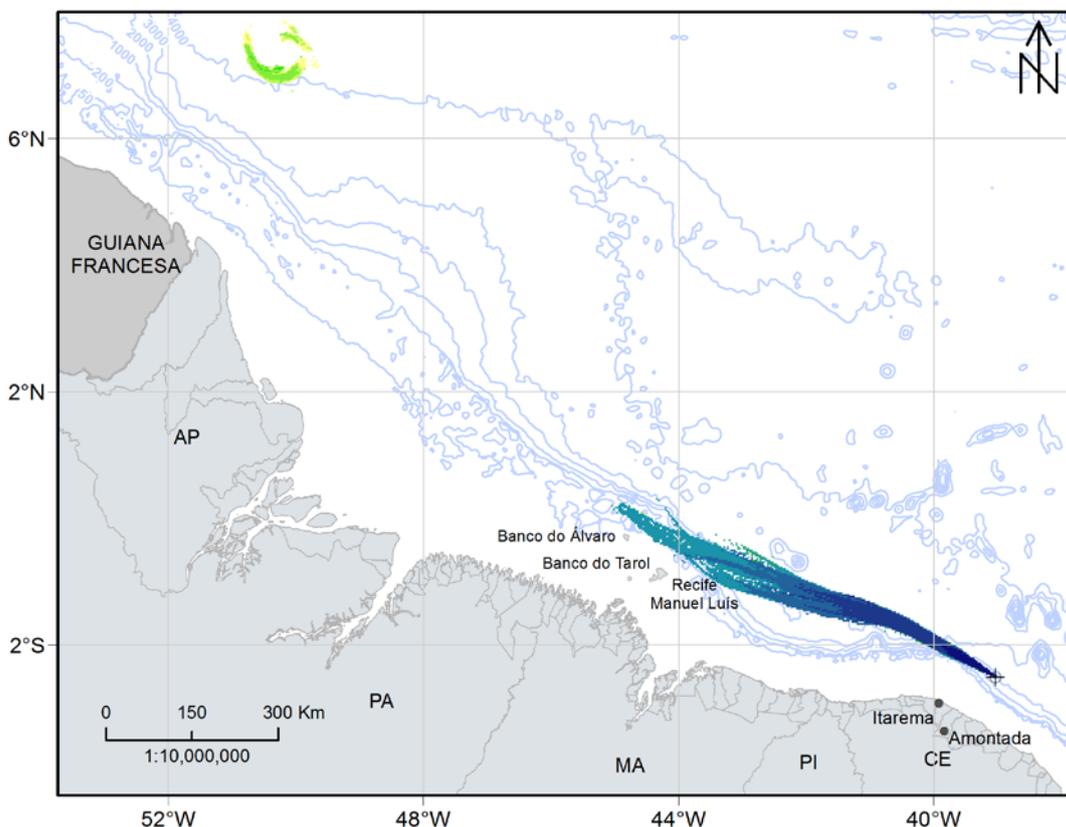


Figura 133: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para um vazamento de *blowout* de 30 dias, no período de inverno, a partir do bloco CE-M-661. Simulação de 60 dias

Considerando o vazamento de fundo observa-se que até 1 dia após o início do vazamento, o óleo pode alcançar até 110 km de extensão na superfície. As regiões mais afastadas, na posição do vórtice anticiclônico a norte de 6°N, podem ser alcançadas a partir de 27 dias.

Assim como no cenário de verão, nenhuma unidade de conservação apresentou probabilidade de chegada de óleo quando considerado o óleo presente na superfície, e diferente do verão, neste cenário também não houve probabilidade quando considerado o óleo em subsuperfície.

A seguir, na Figura 134, são apresentados os percentuais de retirada de óleo por cada processo intempérico ao final das simulações. Semelhante ao cenário de verão, a degradação

e a evaporação foram os processos que mais retiraram óleo da superfície, apresentando as maiores medianas dentre todos os processos, 47% e 27%, respectivamente. O óleo remanescente em superfície foi menor que 2% em todas as simulações e a sedimentação/fora da grade¹ foi de até 7% na metade das simulações. O percentual máximo que permaneceu na coluna d'água foi 25%, com mediana de 20%.

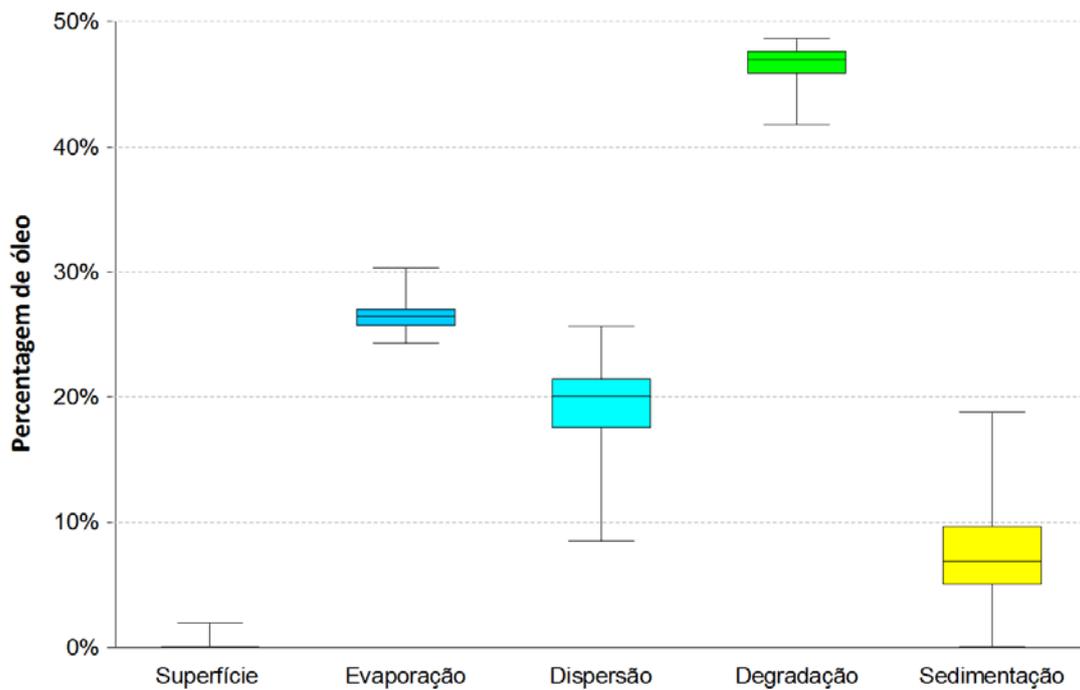


Figura 134: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de pior caso (13.307 m³), no cenário de inverno, a partir do bloco CE-M-661.

¹ Nos resultados do modelo probabilístico não é possível diferenciar o percentual de óleo que fica aderido ao sedimento do que sai do domínio da modelagem.

Na Tabela 22 são apresentados os resultados para as Unidades de Conservação marinhas. Ressalta-se que esses valores representam a passagem de óleo em subsuperfície por essas regiões, uma vez que em nenhum dos dois cenários de pior caso houve chegada de óleo nessas unidades quando considerados os resultados de óleo na superfície do mar.

Tabela 22: Área com toque de óleo, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas Unidades de Conservação marinhas com possibilidade de serem atingidas em um evento de blowout (13.307 m³) a partir do bloco CE-M-661, nos cenários de verão e inverno. Os resultados considerados são os de coluna d'água.

Unidade de Conservação	Área com toque de óleo (Km ²)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo (dias)	
	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
PEM do Álvaro	126.0	-	0.7	-	11.91	-
PEM do Tarol	4.0	-	0.3	-	38.63	-
PEM do Parcel Manuel Luís	189.0	-	1.3	-	8.75	-

3.2.2 Resultados Determinísticos

Com base nos resultados obtidos nas simulações probabilísticas, não houve toque de óleo na costa em nenhum dos cenários, portanto para a definição da simulação crítica foi escolhida a simulação que apresentou, ao final de 60 dias, a menor perda de massa, ou seja, a menor porcentagem da soma do óleo evaporado mais o óleo degradado, para um vazamento de 13.307 m³ a partir do Poço Itarema, no bloco CE-M-661.

A situação crítica ocorreu no período de verão. Na Tabela 23 é apresentada a informação dessa condição selecionada.

Tabela 23: Informações da simulação determinística crítica considerada para um evento de derrame de grande volume (13.307 m³), a partir do bloco CE-M-661.

Cenário	Data da simulação (GMT)	Percentual de perda de massa (%)
Menor perda de massa pela soma da evaporação e degradação	25/12/2011 às 9h	61,3

3.2.2.1.1 Menor perda de massa

A seguir são apresentadas informações relacionadas aos ventos e correntes do período simulado, que se estendeu por 60 dias, de 25/12/2011 às 9h até 24/02/2012 às 9h. Os valores estão relacionados ao ponto de grade mais próximo do local do vazamento.

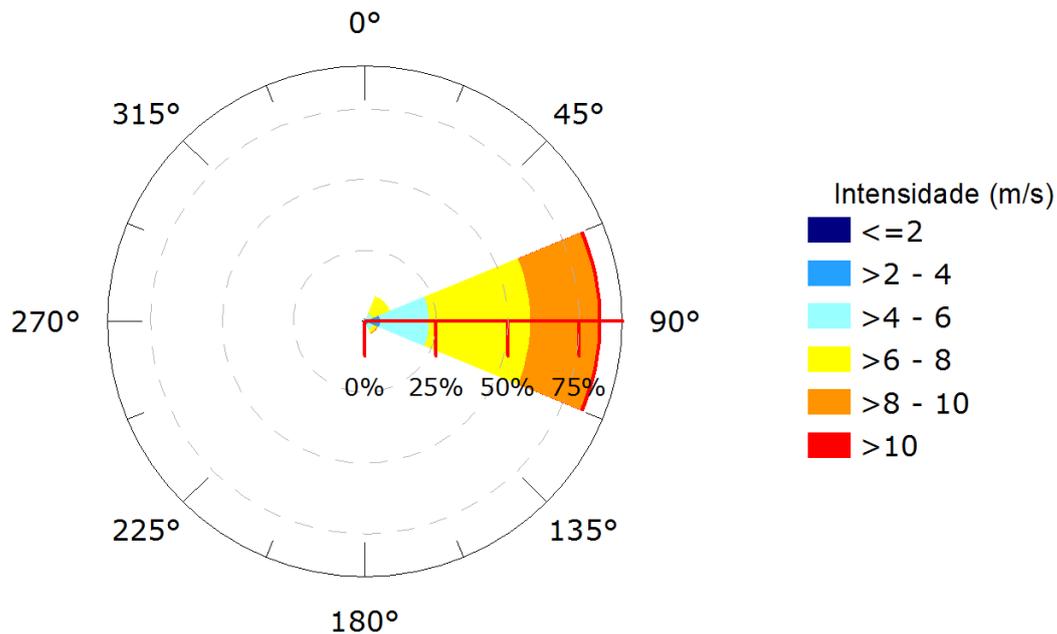


Figura 135: Rosa dos ventos para o período da simulação crítica.

Tabela 24: Ocorrência conjunta entre direção e intensidade dos ventos para o ponto mais próximo do local do vazamento para o período da simulação crítica.

Direção -> Intensidade (m/s)	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Freq. (%)
0-2	1	-	1	-	-	-	2	1	2.1
2-4	1	2	12	3	1	-	-	-	7.9
4-6	-	5	41	5	-	-	-	-	21.3
6-8	-	16	85	3	-	-	-	-	43.3
8-10	-	-	57	1	-	-	-	-	24.2
>10	-	-	3	-	-	-	-	-	1.3
Freq. (%)	0.8	9.6	82.9	5.0	0.4	0.0	0.8	0.4	

Tabela 25: Estatística do vento para o período da simulação crítica.

Direção média (°)	Direção de maiores intensidades (°)	Vel. Média (m/s)	Vel. Mín (m/s)	Vel. máx. (m/s)	Desvio padrão (m/s)
86	105	6,63	0,45	10,24	1,91

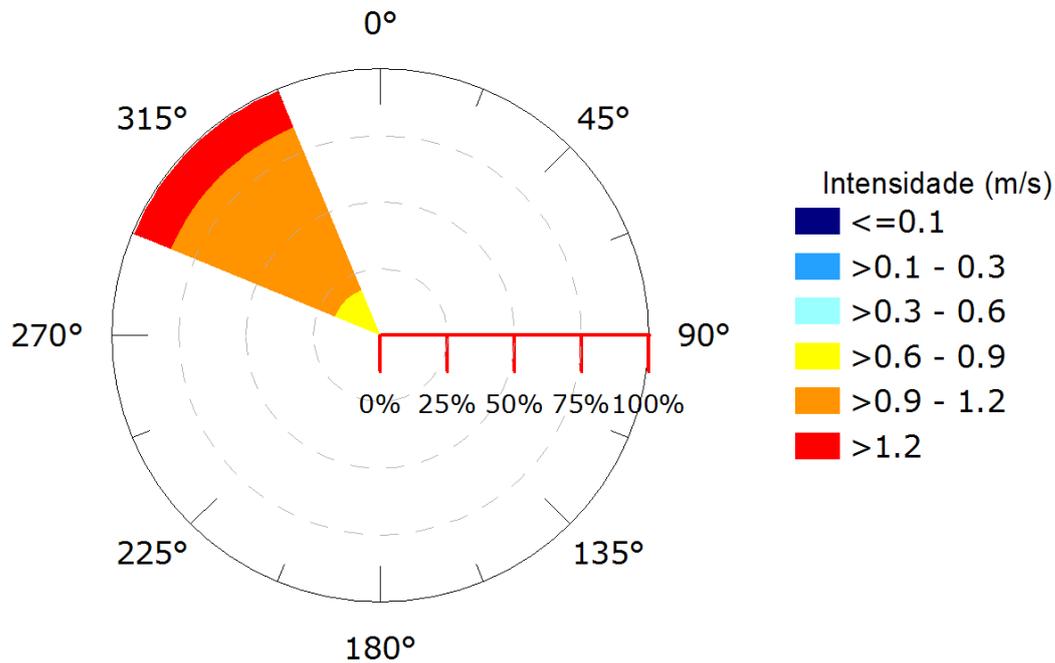


Figura 136: Rosa de corrente para o período de simulação da simulação crítica.

Tabela 26: Ocorrência conjunta entre direção e intensidade de corrente para o ponto mais próximo do local do vazamento para o período da simulação crítica.

Direção ->	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Freq. (%)
Intensidade (m/s)									
<0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,1 - 0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,3 - 0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,6 - 0,9	3	-	-	-	-	-	1	132	18,9
0,9 - 1,2	-	-	-	-	-	-	-	477	66,2
>1,2	-	-	-	-	-	-	-	108	15,0
Freq. (%)	0,4	-	-	-	-	-	0,1	99,4	

Tabela 27: Estatística de corrente para o período da simulação crítica.

Direção média (°)	Direção de maiores intensidades (°)	Vel. Média (m/s)	Vel. Mín (m/s)	Vel máx. (m/s)	Desvio padrão (m/s)
302	302	1,06	0,63	1,41	0,15

Pelos dados de vento (Figura 135, Tabela 24 e Tabela 25) no período da simulação, ocorre a predominância de ventos de leste (82,9%) e predominância de ventos com intensidades entre 6 e 8 m/s (43,3%). As informações de correntes mostram que a direção das correntes é para noroeste (94,%) e que as velocidades se concentram entre 0,9 e 1,2 m/s (Figura 136, Tabela 26 e Tabela 27) .

A seguir, da Figura 137 à Figura 145, é apresentada a deriva do óleo em superfície e na coluna d'água, além da área varrida pela mancha (em amarelo claro nas figuras) 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 à profundidade.

Também é apresentado o mapa de concentração de óleo nos sedimentos ao final da simulação (Figura 146). Os mapas de concentração de óleo no fundo foram construídos considerando um valor limiar de 1g de óleo/m² ².

² Valor baseado em LONG ET AL (1995) considerando uma espessura de contaminação de 10 cm, densidade de sedimentos de 2,6 g/cm³

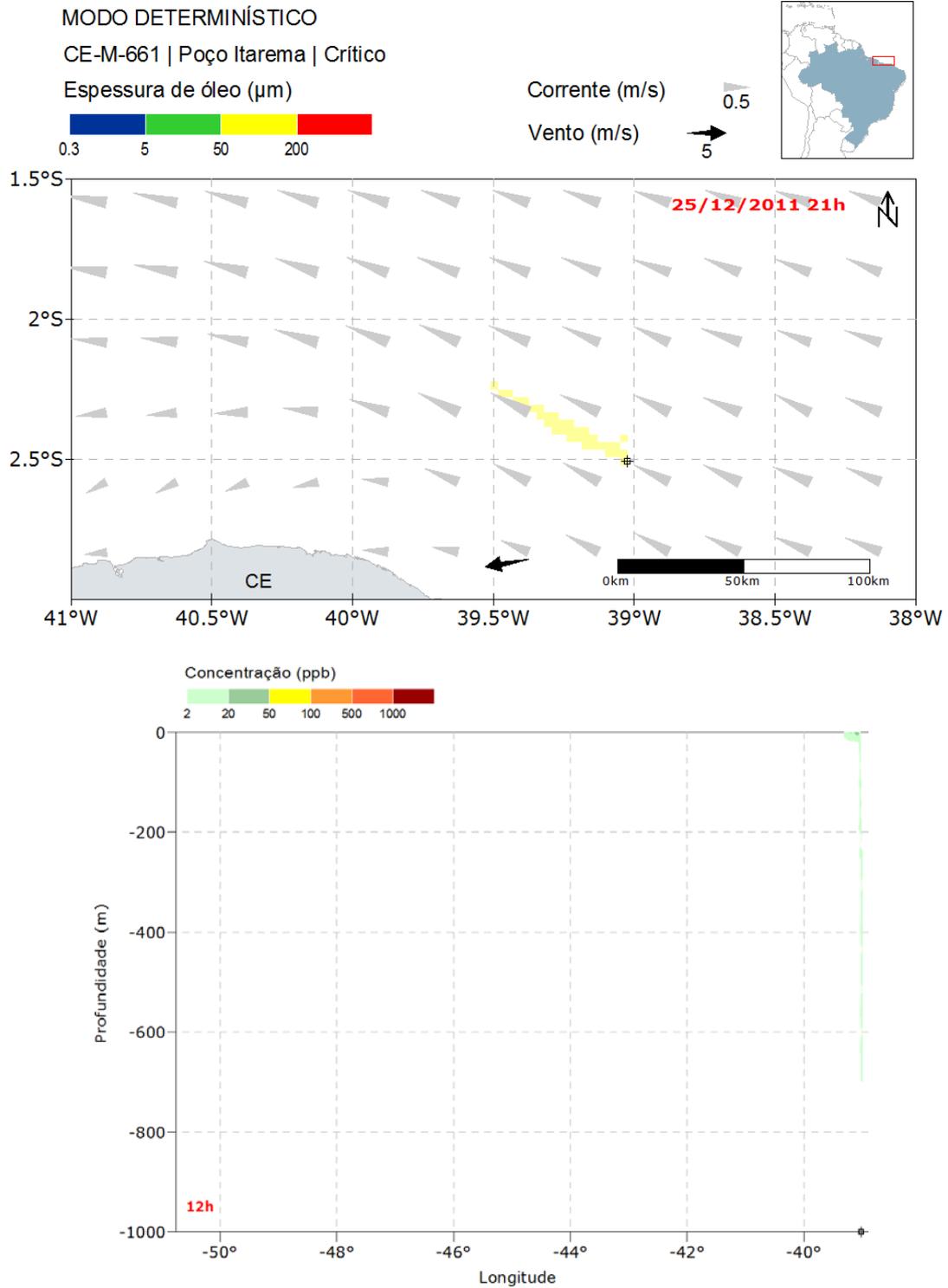


Figura 137: Resultado da simulação determinística em condição crítica após 12 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do bloco CE-M-661.

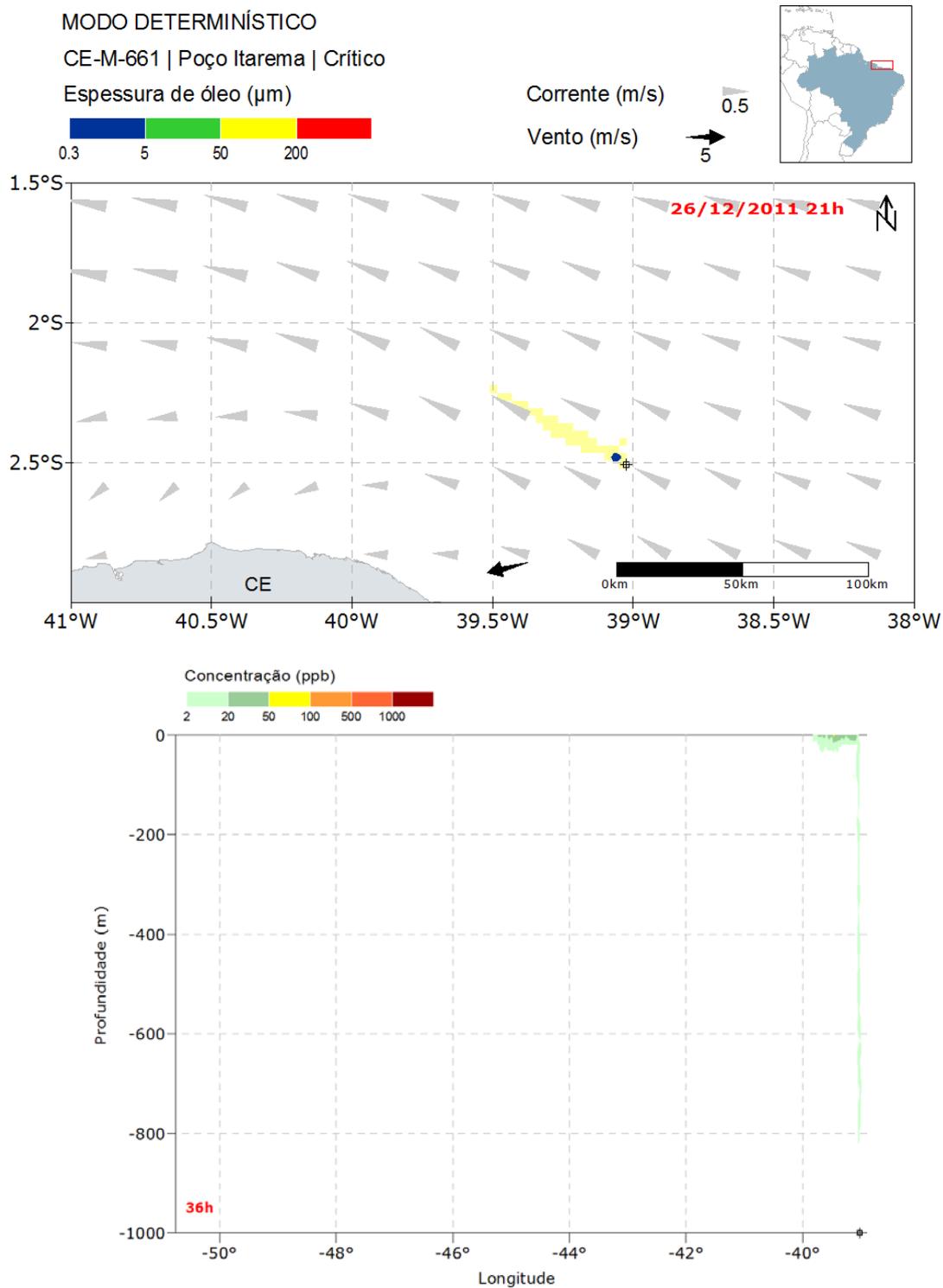


Figura 138: Resultado da simulação determinística em condição crítica após 36 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do bloco CE-M-661.

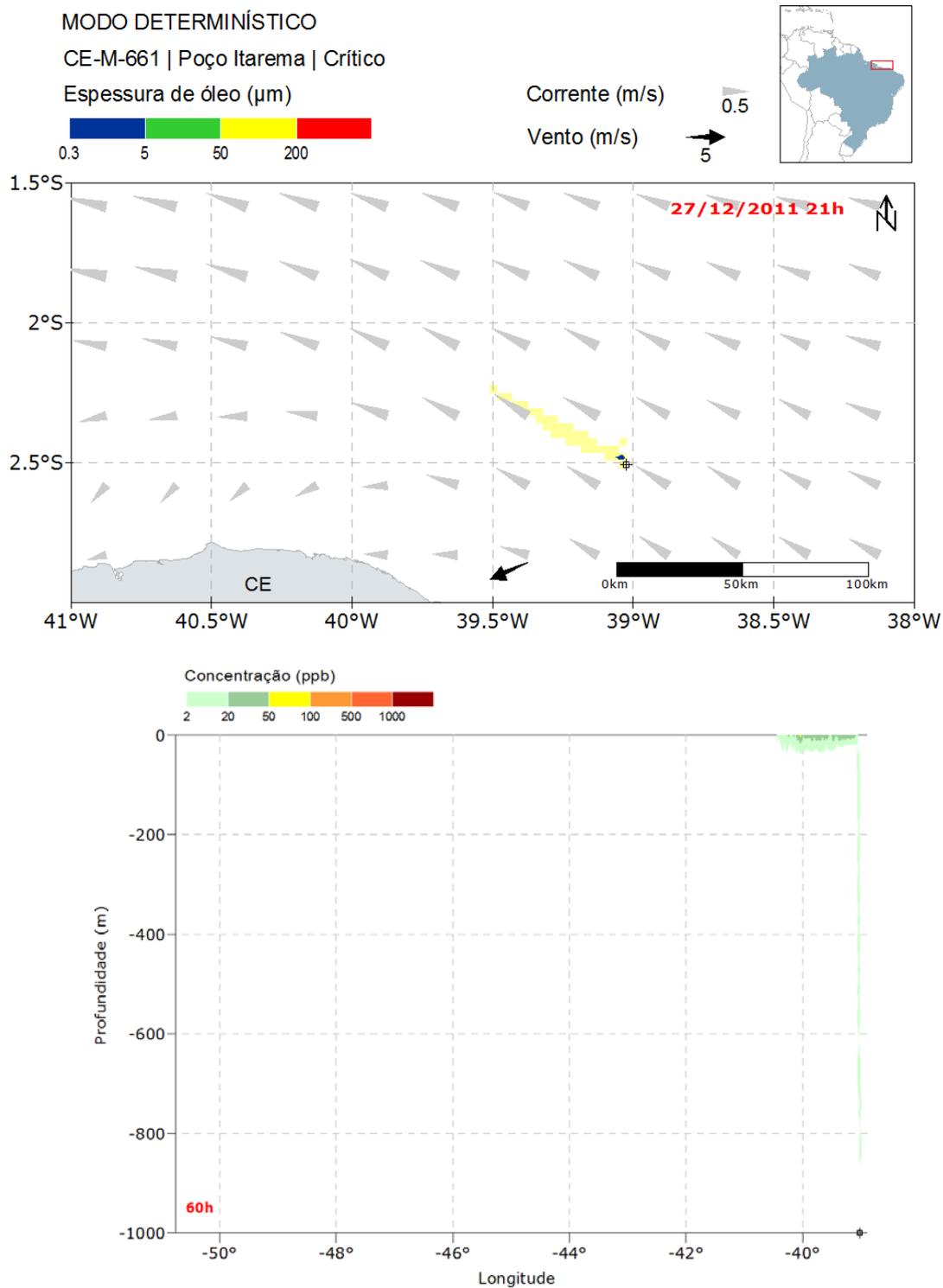


Figura 139: Resultado da simulação determinística em condição crítica após 60 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do bloco CE-M-661.

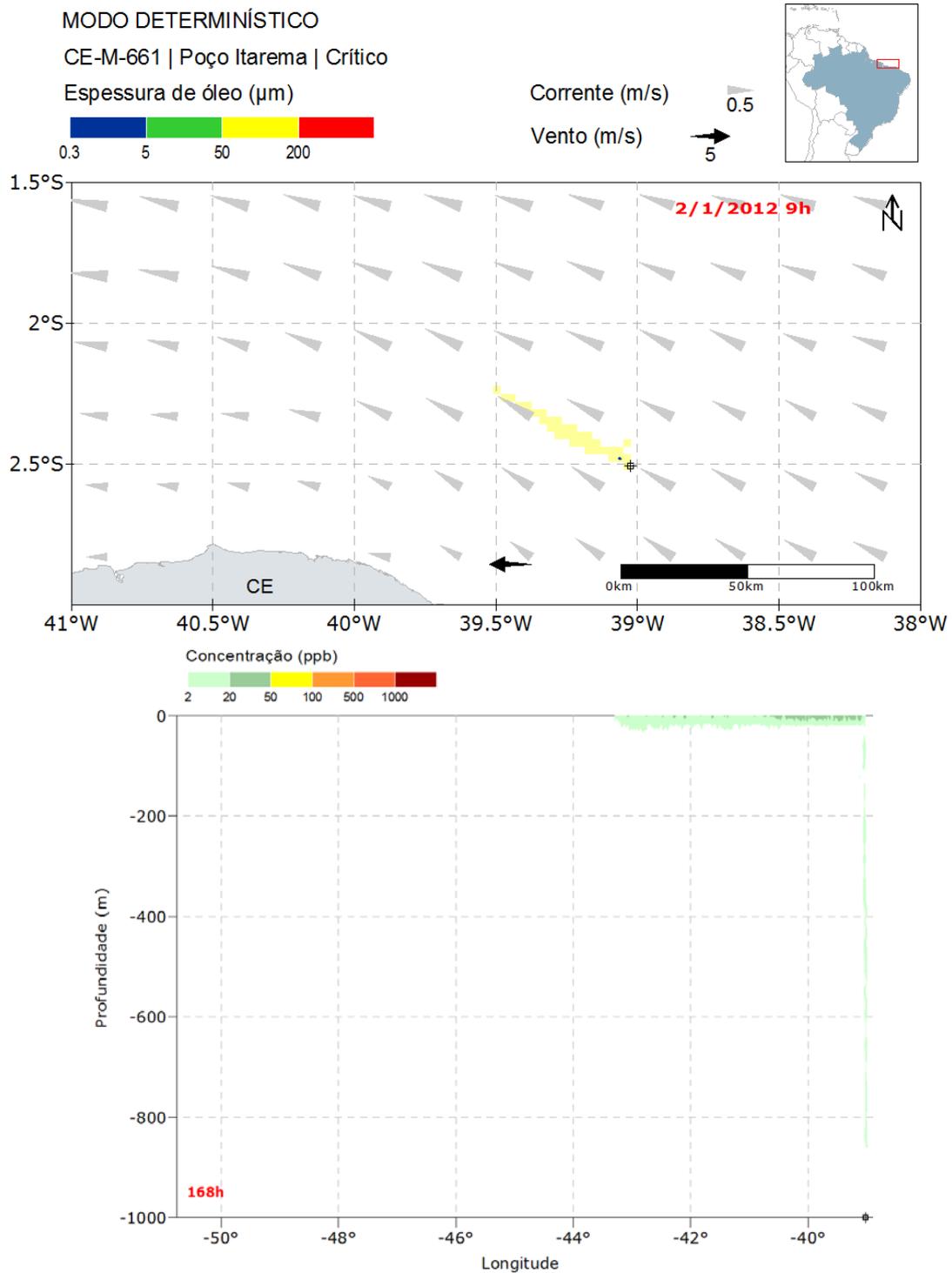


Figura 140: Resultado da simulação determinística em condição crítica após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do bloco CE-M-661.

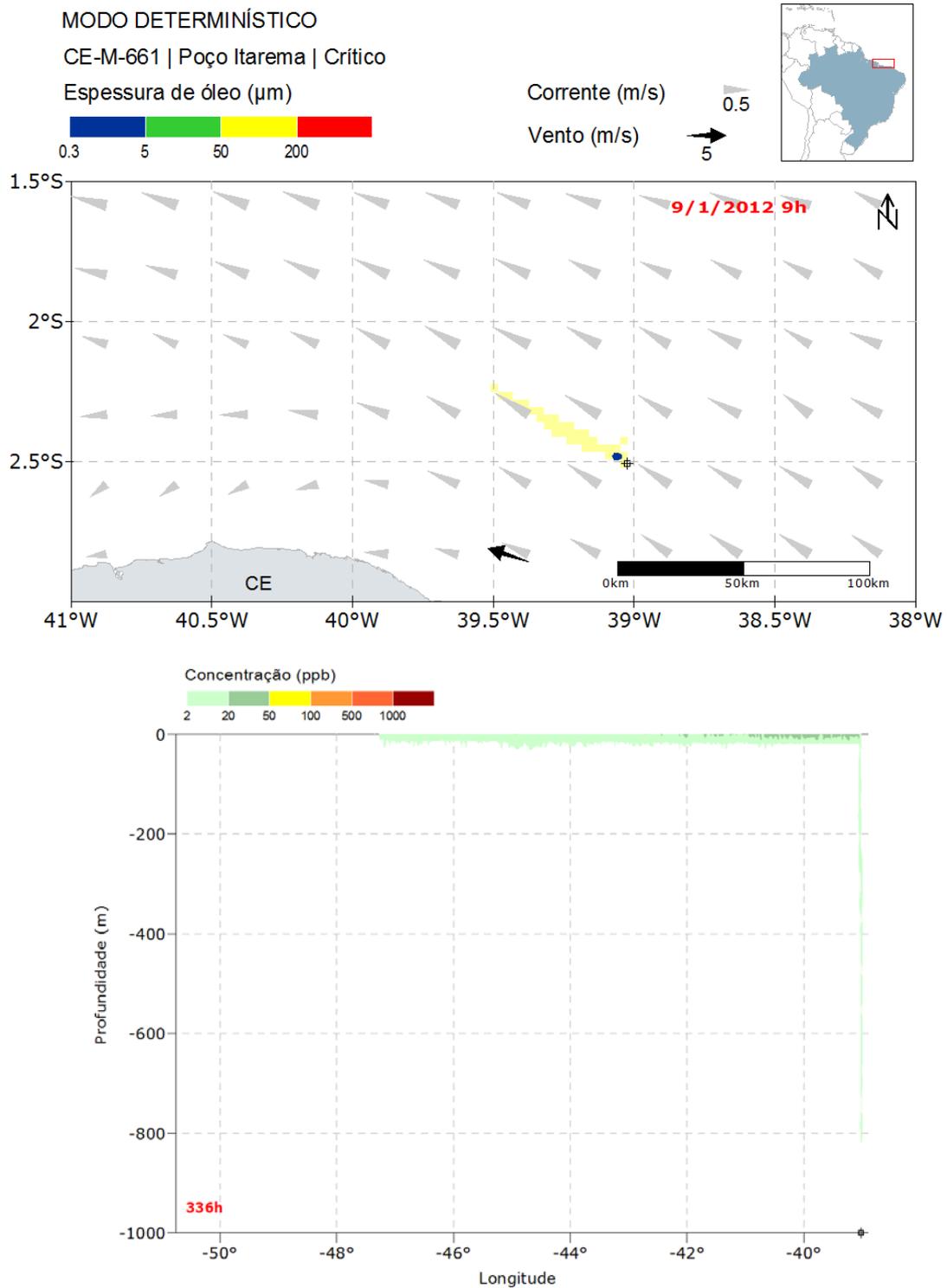


Figura 141: Resultado da simulação determinística em condição crítica após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do bloco CE-M-661.

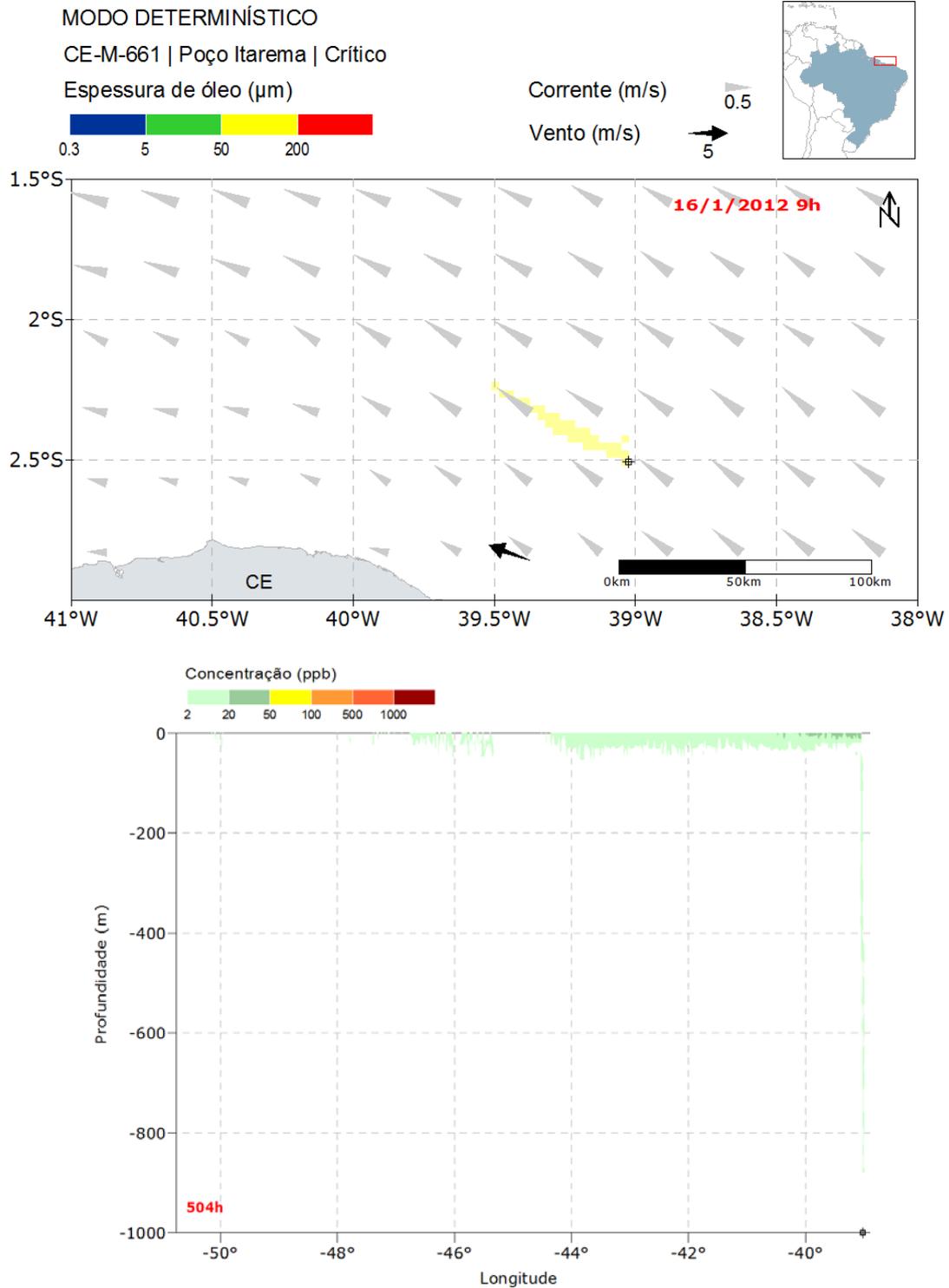


Figura 142: Resultado da simulação determinística em condição crítica após 304 horas (primeiro toque) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do bloco CE-M-661.

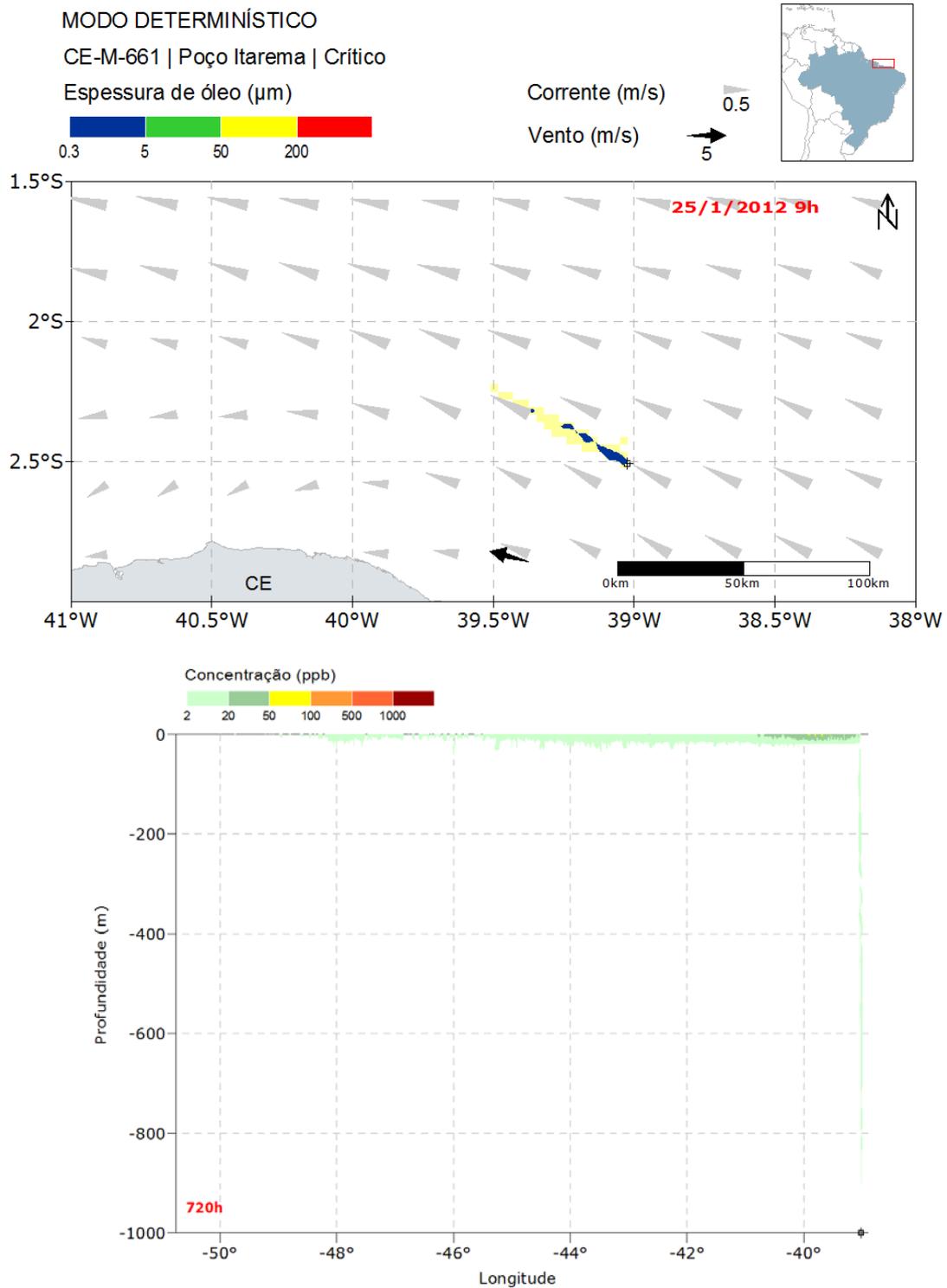


Figura 143: Resultado da simulação determinística em condição crítica após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do bloco CE-M-661.

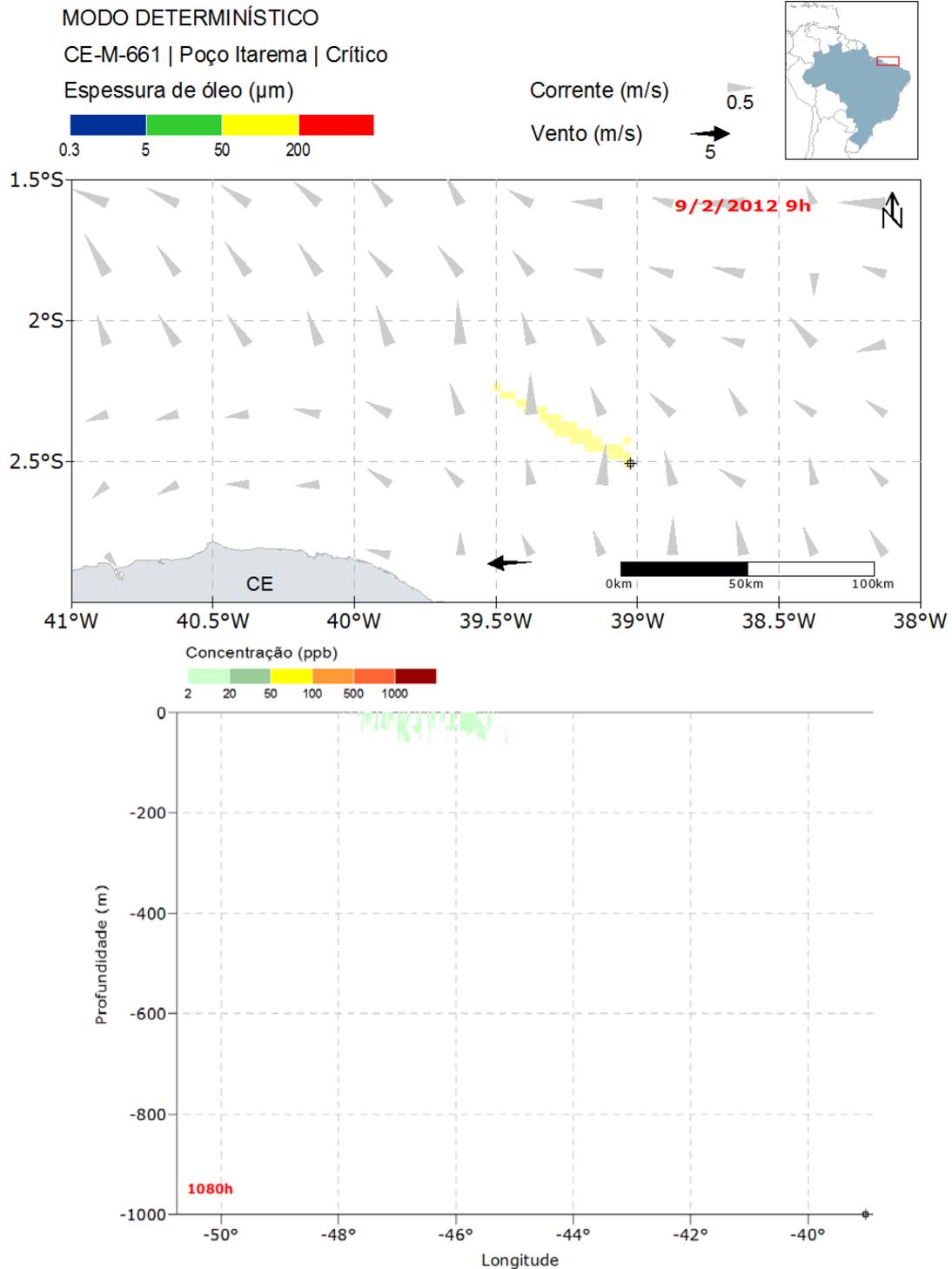


Figura 144: Resultado da simulação determinística em condição crítica após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do bloco CE-M-661.

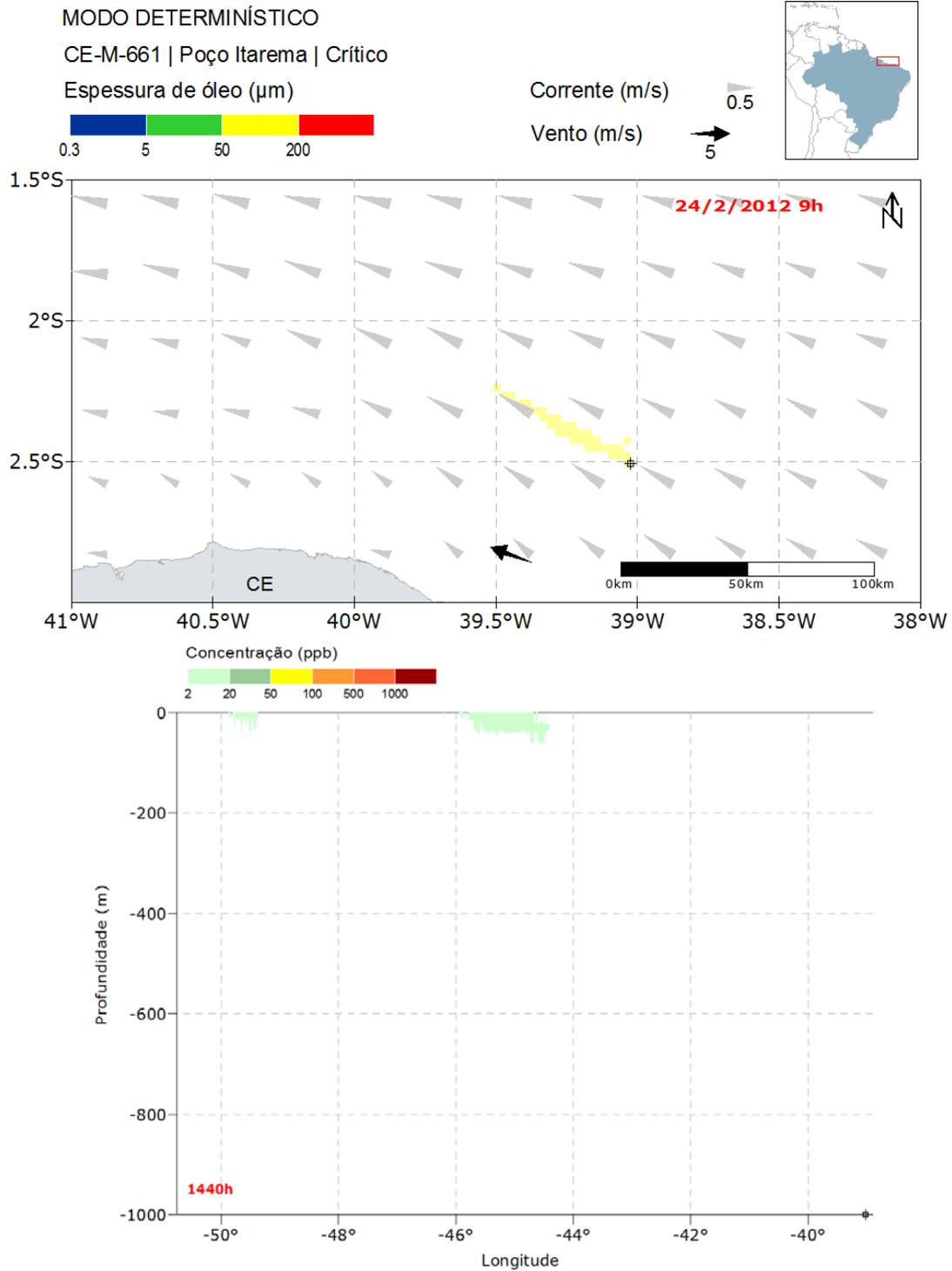


Figura 145: Resultado da simulação determinística em condição crítica após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do bloco CE-M-661.

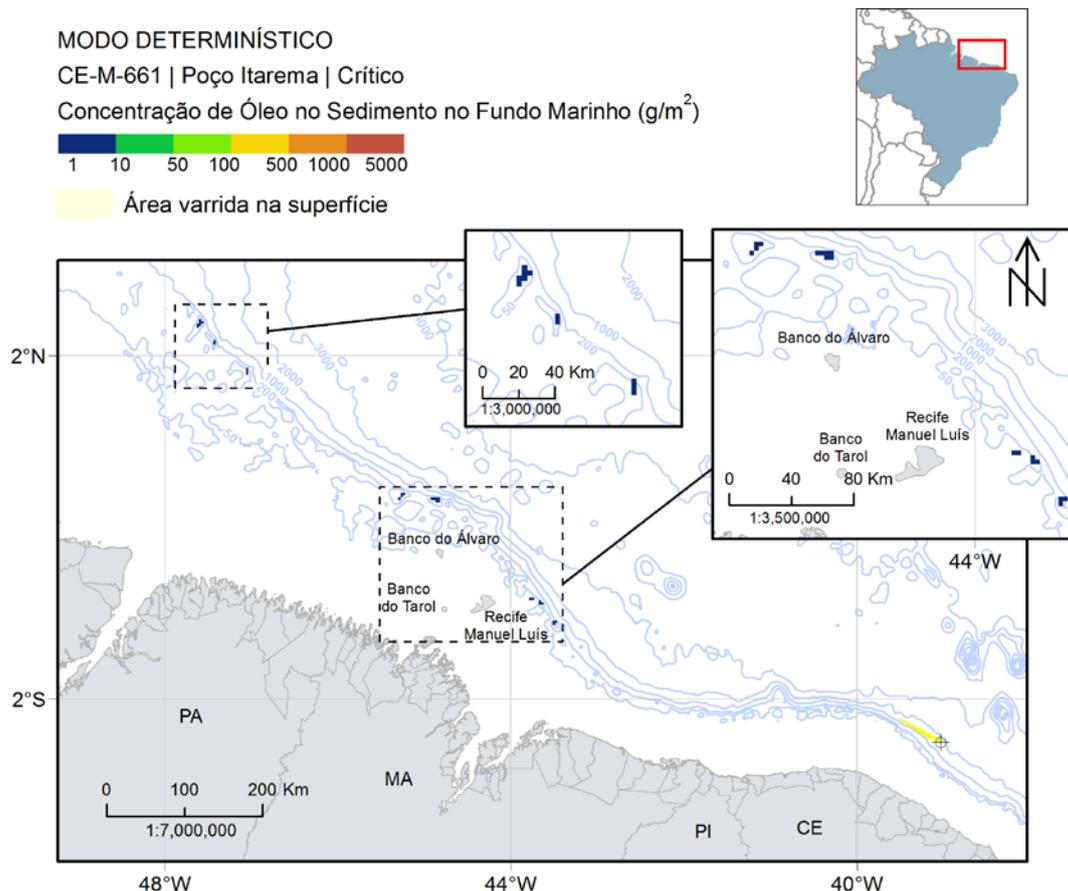


Figura 146: Mapa de concentração de óleo no sedimento do fundo marinho da simulação determinística em condição crítica, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Vazamento de 13.307 m^3 a partir do bloco CE-M-661.

A deriva do óleo ao longo da simulação ocorreu rumo a noroeste do ponto de vazamento, influenciada predominantemente pela Corrente Norte do Brasil e pelos ventos predominantes de leste. Observa-se que em grande parte dos tempos apresentados não houve a formação de uma extensa mancha de óleo, e a área varrida total ao final de 60 dias apresentou uma distância de aproximadamente 60 km do ponto de vazamento. Ao analisar o balanço de massa apresentado na Figura 147, a seguir, 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, com espessuras abaixo de $1,4 \mu\text{m}$.

Em relação à coluna d'água, as maiores concentrações foram verificadas nas camadas superficiais, com valores máximos de 67 ppb, observados após 30 dias (720h) de vazamento. Após esse instante, em 45 e 60 dias, não são observados valores acima de 20 ppb ao longo da coluna d'água, apesar de ~20% do óleo estar disperso.

Já o óleo associado ao sedimento ocorreu em pequenas regiões, em profundidades menores que 50 metros. A concentração máxima foi de 3,2 g/m², observada a leste (77 km) do Parcel Manuel Luis e a norte do Banco do Álvaro (66 km).

A seguir, é apresentada a evolução temporal do balanço de massa do óleo (Figura 147 e Tabela 28) e a evolução da área e a massa de óleo (Figura 148 e Tabela 29) durante a simulação.

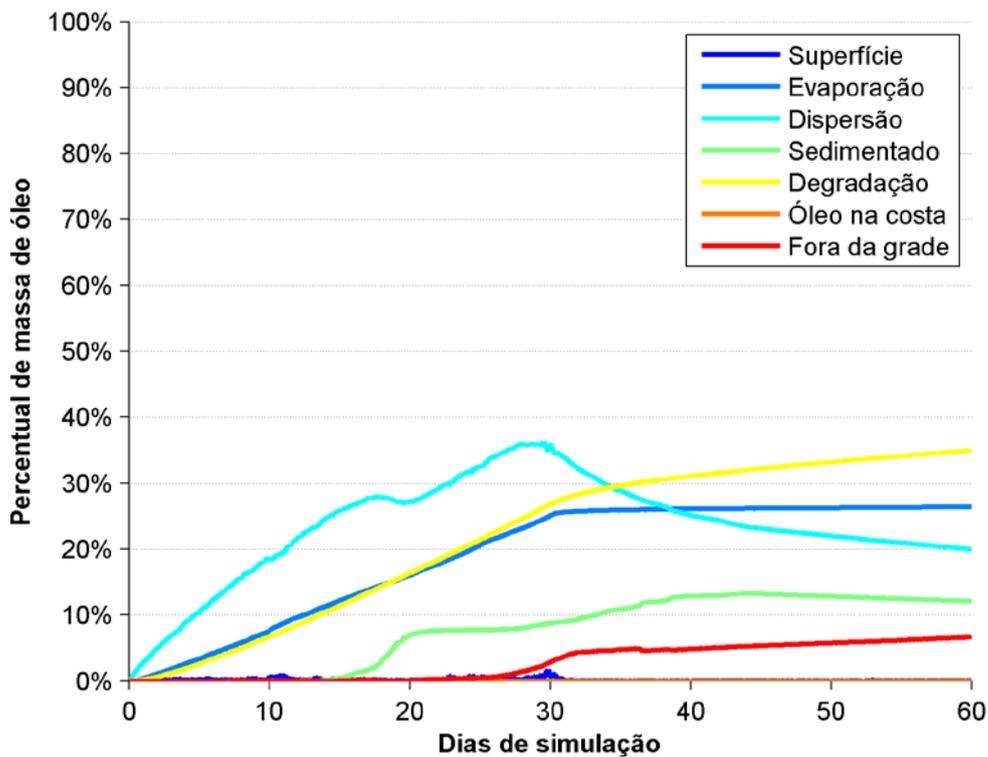


Figura 147: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condição crítica de menor tempo de chegada na costa. Volume de 13.307 m³.

Tabela 28: 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 (%)	Costa (%)	Fora da grade (%)
12	0,06 (7 t)	0,09 (11 t)	1,46 (173 t)	-	0,05 (6 t)	-	-
36	0,12 (15 t)	0,73 (86 t)	3,78 (447 t)	-	0,37 (44 t)	-	-
60	0,19 (22 t)	1,40 (166 t)	5,86 (693 t)	-	0,88 (104 t)	-	-
168	0,21 (24 t)	5,00 (591 t)	14,00 (1655 t)	-	4,14 (489 t)	-	-
336	0,18 (22 t)	11,31 (1337 t)	24,63 (2912 t)	0,16 (18 t)	10,40 (1230 t)	-	-
504	0,14 (17 t)	16,92 (2001 t)	27,93 (3303 t)	7,48 (885 t)	17,34 (2050 t)	-	0,18 (21 t)
720	0,63 (75 t)	25,08 (2966 t)	35,88 (4243 t)	8,77 (1037 t)	26,77 (3165 t)	-	2,86 (338 t)
1080	0,01 (1 t)	26,17 (3094 t)	23,11 (2732 t)	13,19 (1560 t)	32,21 (3808 t)	-	5,32 (629 t)
1440	0,01 (1 t)	26,38 (3119 t)	19,95 (2359 t)	12,08 (1428 t)	34,95 (4133 t)	-	6,63 (784 t)

É observado que a maior parte do óleo ao final da simulação (34,95%) sofreu processo de degradação, enquanto que 26,38% sofreu evaporação, sendo estes os processos mais importantes na retirada de óleo da coluna d'água e superfície. O óleo restante em superfície representa apenas 0,01% do total vazado, enquanto que na coluna d'água, após 1440 horas (60 dias), se encontra 19,95%. Uma porcentagem de 12,08% foi acumulada nos sedimentos e não houver óleo acumulado na costa. O restante, 6,63%, saiu do domínio de modelagem.

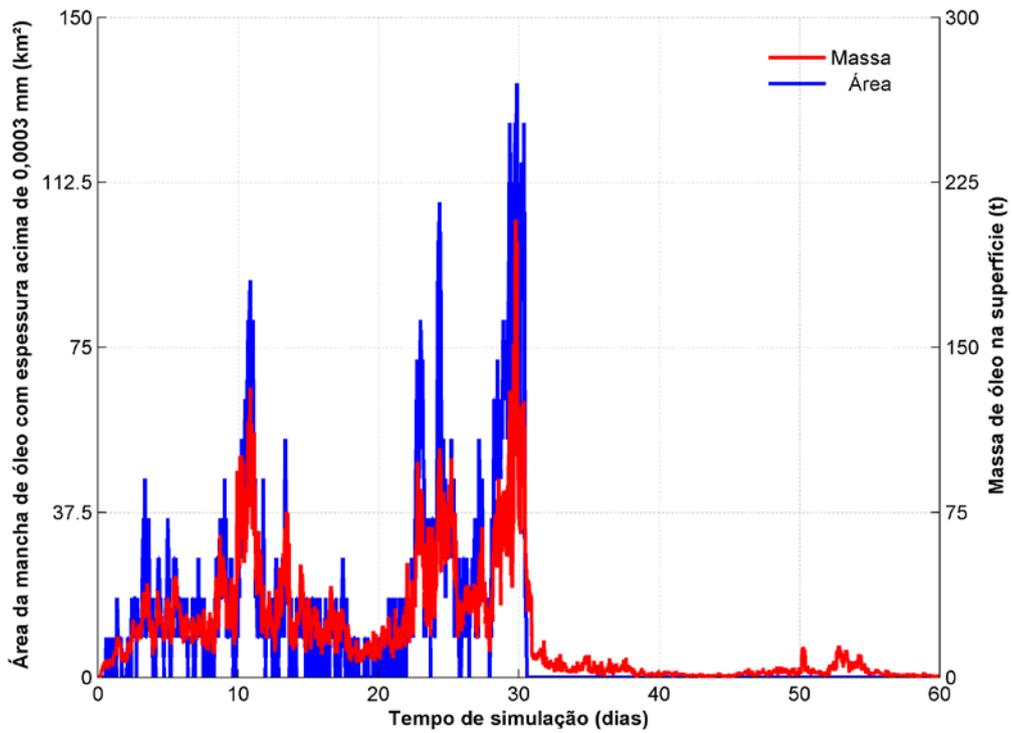


Figura 148: Área superficial da mancha de óleo e a massa de óleo no mar durante a simulação da trajetória em condição crítica.

Tabela 29: Área superficial, massa de óleo e espessura máxima da mancha de óleo durante a simulação.

Tempo (h)	Área (km ²)	Massa (t)	Espessura máxima (µm)
12	-	7	0,3
36	9	14,8	0,7
60	9	22	0,4
168	9	24,4	0,4
336	9	21,8	0,7
504	-	16,8	0,2
720	81,2	75	0,7
1080	-	0,7	-
1440	-	1,2	-

O gráfico da área da mancha de óleo em superfície mostra um valor máximo atingido ao término do vazamento (30 dias ou 720 horas de simulação), a partir do qual inicia-se um rápido decaimento. Ao final da simulação não se observa óleo em superfície.

Os maiores valores de espessura máxima, 0,7 µm, são observados em 3 instantes (36 horas, 2 semanas e 30 dias).

4. Conclusão

O modelo numérico hidrodinâmico de coordenadas sigma ROMS foi aplicado na região do Bloco CE-M-661, 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 quanto para a elevação de maré e para os dados de 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), estrutura termohalina, 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 CE-M-661. 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 de dispersão de óleo, os períodos sazonais apresentaram comportamentos distintos, devido, principalmente, ao comportamento da Corrente Norte do Brasil (CNB). Apesar de em ambos os períodos a deriva do óleo ter sido preferencialmente para noroeste, no inverno, a área com probabilidade de alcance de óleo foi influenciada pela maior intensidade da CNB e pelos meandros existentes neste período, atingindo regiões mais ao norte. Um ponto em comum entre os períodos sazonais foi a ausência de toque de óleo na costa tanto nos vazamentos de superfície, de 8 m³ e de 200 m³, quanto nos vazamento de blowout de fundo. Sendo o ponto de vazamento localizado a uma profundidade próxima de 2000 m sob influência principal da CNB, a contribuição desta na dinâmica local é bem mais intensa do que a dos ventos, e determinante para que o óleo não atingisse a costa.

Os resultados obtidos em relação ao intemperismo do óleo mostraram que nos vazamentos instantâneos ocorridos na superfície (8 e 200 m³), o processo de evaporação foi o principal responsável pela retirada de óleo da superfície da d'água, com mediana próxima de 40%, seguido pela degradação. Nos vazamentos contínuos de fundo (cenário de pior caso - 13.307 m³), a degradação foi o processo mais relevante (mediana de 37% e 47% para verão e inverno, respectivamente), seguido pela evaporação (mediana ~ 27%).

Em relação às unidades de conservação nota-se que apenas os vazamentos de 200 m³ a partir da superfície apresentaram probabilidade de alcançar o PEM do Álvaro, com valores baixos. Nenhuma outra unidade apresentou probabilidade de presença de óleo tanto para esse volume de vazamento quanto para os de *blowout*. Essa diferença está relacionada aos vazamentos de *blowout* terem sido a partir do fundo, de uma lâmina d'água próxima a 2.000 m de profundidade, fazendo com que o processo de degradação e dispersão na coluna d'água fossem mais representativos que os demais processos de intemperismo e diminuíssem a quantidade de óleo que aflora na superfície e, conseqüentemente, o alcance de maiores distâncias na superfície do mar.

Com base nos resultados do modo probabilístico que não apresentaram probabilidade de óleo na costa, foi definido um cenário crítico para o vazamento de 13.307 m³, o que apresentou a menor perda de massa de óleo ao final de 60 dias, pela soma dos processos de evaporação e degradação. Este cenário foi observado no período de verão.

Na simulação determinística, verificou-se que a deriva do óleo ao longo da simulação ocorreu rumo a noroeste do ponto de vazamento, influenciada, predominantemente, pela Corrente Norte do Brasil e pelos ventos predominantes de leste, atingindo uma distância máxima do ponto de vazamento de 60 km. Na coluna d'água concentrações acima de 20 ppb foram observadas apenas nas camadas superficiais.

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. Piegorisch, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester.
- BOWDEN, K.F. 1983. Physical oceanography of coastal waters. John Wiley, NY, 302 p.
- BOURLÈS, B., R.L. MOLINARI, E. JOHNS, W.D. Wilson and K.D. Leaman. (1999). Upper layer currents in the western tropical North Atlantic (1989-1991). J. Geophys. Res., 104(C1),1361-1375.
- 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.
- CARTAS SAO, 2014. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/seguranca-quimica/cartas-de-sensibilidade-ao-oleo>. Acesso em 24 de setembro de 2014.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. 2005. Resolução Conama nº 357. Disponível em:< <http://www.mma.gov.br/port/conama/> > Acesso em 13/03/2015.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. 2007. Resolução Conama nº 393. Disponível em:< <http://www.mma.gov.br/port/conama/> > Acesso em 13/03/2015.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. 2008. Resolução Conama nº 398. Disponível em:< <http://www.mma.gov.br/port/conama/> > Acesso em 13/03/2015.
- 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.
- 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.
- GABARDO. I. T., 2007. Caracterização Química e Toxicológica da água Produzida descartada em plataformas de óleo e gás na costa brasileira e seu comportamento dispersivo no mar. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande Norte. UFRN.
- 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. SCHEPETKIN, 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.
- 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.
- LARNICOL, G., GUINEHUT S., RIO M.H., DREVILLON M., FAUGÈRE Y., HERNANDEZ F. (2006). The global observed ocean products of the French Mercator project. 15 years of radar altimetry symposium, Venice.
- 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.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. 2014. Cadastro Nacional de Unidades de Conservação. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/areas-protegidas/cadastro-nacional-de-ucs/dados-georreferenciados>. Acesso em 20 de dezembro de 2014.
- MYOCEAN, 2015, 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
- PELIZ, A., J. DUBERTt, D. B. HADVOGEL, 2003: Subinertial Response of a Density-Driven Eastern Boundary Poleward Current to Wind Forcing, J. Phys. Oceanogr., 33, 1633-1650.
- PPLC, 2014. Disponível em :<http://www.pplc.com.br/webapp/index.html>. Acesso em 24 de setembro de 2014.
- 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.
- 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.
- 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.
- WILMOT, C. J. 1982. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. Bulletin American Meteorological Society. Vol. 63, No. 11, pp. 1309-1313.

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 - Mapa com Detalhamento de linha de costa utilizado para a definição da grade do modelo do OSCAR

ANEXO II - Justificativa para o volume de blowout

Como preâmbulo à definição usada para o *Worst Case Discharge* para fins de exploração temos:

- O montante máximo de óleo que pode ser descarregado a partir de um poço incompleto, recentemente perfurado ou cimentado / revestido, ao longo de um período de 30 dias, em um dado cenário de descontrole de fluxo no poço oriundo do primeiro reservatório alvo.

A queda da pressão é o principal mecanismo que possibilita que o poço flua naturalmente. Isto é causado pela diferença entre a pressão do reservatório e as pressões hidrostáticas + contra-pressões mecânicas aplicadas acima do reservatório. Para um poço *offshore* fluir para o fundo do mar, a pressão do reservatório precisa, necessariamente, ser maior que a acumulação das pressões da coluna hidrostática aquosa + coluna hidrostática do fluido + contra-pressões mecânicas de retorno.

Os parâmetros a seguir são a chave para o fluxo do poço:

- **Permeabilidade**: A habilidade do fluido em fluir para fora do reservatório dada a conectividade dos espaços entre os poros dentro do reservatório, medido em Darcy ou mili-Darcy. (1 Darcy = $1 \times 10^{-12} \cdot \text{m}^2$)
- **Espessura do reservatório**: Área total do reservatório exposto/acessível para fluir e preencher com hidrocarbonetos. Em um poço vertical, esta é apenas a altura da área do reservatório.
- **Viscosidade do óleo** – baixa viscosidade do óleo possibilita um fluxo mais acessível para fora do reservatório a partir da conexão entre espaços de poros.
- **Área total de drenagem relacionada ao raio do poço** – Um raio maior aonde é aplicada pressão leva a taxas de fluxo menores. Quanto maior o poço, maior é a vazão.
- **Fator de dano** – Calculado como uma variável adimensional que é baseada no dano na proximidade do poço, impedindo a permeabilidade, ou num pseudo-dano, impedindo o fluxo.

A lei de Darcy rege o fluxo do poço e é expressa da seguinte forma:

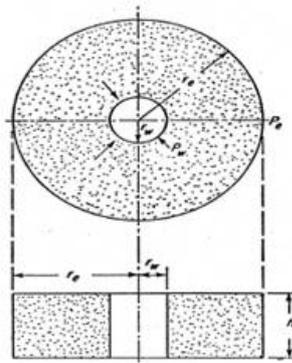


Figure 6.1 Model for radial flow of fluids to the wellbore

$$q = \frac{kh(p_e - p_{wf})}{141.2\mu B_o \ln\left(\frac{r_e}{r_w} + S\right)}$$

Onde

- **k = Permeabilidade da Rocha Reservatório (md)**
- **h = espessura do reservatório (ft)**
- **Pe-Pwf = Pressão externa do reservatório – Pressão de fluxo do poço aka. Queda de Pressão (psi)**
- **m = Viscosidade do fluido (cp)**
- **Bo = Fator de volume de Formação (res bbl/STB)**
- **Re/Rw = Raio de drenagem externa/Radio do poço (ft)**
- **S = Fator de dano – Obstrução do fluxo próximo à área do poço**
- **141.2 = Fator de conversão do SI para unidades de óleo e gás**

Hipótese para o poço do Bloco CE-M-661, na Bacia do Ceará:

- Queda de pressão - 10.5ppg Reservatório @ 4050m TVD
 - Poço inteiro preenchido com óleo de 32 graus API (7.2ppg)

- Gradiente da água do mar de 8,6ppg na cabeça do poço, em 2.140m de lâmina d'água
- Fricção zero ou outra perda de pressão mecânica através do fluxo do poço. Ausente de gás ou restrições de queda de pressão por fluxo turbulento.
- Permeabilidade – 10mD (areias turbidíticas)
 - Mais alta probabilidade para o pior caso = média de permeabilidade de 10mD no reservatório
- Espessura do reservatório – 50m
 - Anúncio de descobertas da Petrobras em águas profundas
 - Poços em campos de produção na plataforma da Bacia do Ceará
- Viscosidade do óleo – 1.02 cP
 - Óleo de campo de produção Curimã
- Fator de volume de formação – 1.0
 - Menor possível
- Raio de drenagem – 2000ft, Diâmetro do poço – 12.25”
 - Possibilidade razoavelmente mais baixa e maior espessura de poço ao longo da seção do reservatório
- Fator de dano – ZERO
 - Estimativa muito conservadora dado um poço completamente preenchido de fluido e/ou cimentado

Considerando as premissas acima listadas, o fluxo no poço do Bloco CE-M-661, na Bacia do Ceará, seguindo as leis de Darcy, deverá ser de 2790 bbls/dia