



Relatório Técnico [rev.00]

Modelagem Hidrodinâmica e Dispersão de Óleo

Bacia do Ceará

/PRO_

Preparado para: Chevron

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

13 de agosto 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	29
2. Modelagem Hidrodinâmica	31
2.1. Modelo Numérico Utilizado	31
2.2. Domínio do Modelo	36
2.3. Condições Iniciais	38
2.4. Condições de Contorno	42
2.5. Estabilização da Energia Cinética	73
2.6. Avaliação do Modelo	74
2.7. Resultados	119
3. Modelagem de Dispersão de Óleo	133
3.1. Metodologia	134
3.2. Resultados	190
3.3. Resumo dos resultados	341
4. Conclusão	342
5. Bibliografia	344
Anexos	349

Índice das imagens

Figura 1: Localização dos pontos de vazamento (preto), em relação ao bloco CE-M-715 (vermelho).....	29
Figura 2: Região de modelagem. Polígono vermelho pontilhado representa os limites da grade do modelo hidrodinâmico.....	36
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.....	37
Figura 4: Campo de temperatura superficial (°C) no dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.....	39
Figura 5: Campo de salinidade superficial no dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.....	40
Figura 6: Campo de Elevação da Superfície Livre (m) do dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.....	41
Figura 7: Campo de Correntes superficiais (m/s) do dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.....	42
Figura 8: Representação esquemática das condições de contorno a serem definidas em um modelo de área limitada.....	43
Figura 9: Batimetria da grade do modelo numérico.....	44
Figura 10: Carta Náutica 040 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN).....	45
Figura 11: Batimetria do ETOPO1 (painel superior) e da Carta Náutica 040 (painel inferior) interpoladas para a grade do ROMS.....	46
Figura 12: Batimetria do ETOPO1 (painel superior) e das Cartas Náuticas 21700, 21800 e 21900 (painel inferior) interpoladas para a grade do ROMS.....	47
Figura 13: Pontos de Grade do NCEP (pontos vermelhos) na região do domínio de modelagem (retângulo branco).....	49
Figura 14: Campo médio dos dados de temperatura do ar a 2 m da Reanálise I utilizados como forçante para o período de verão (superior) e para o período de inverno (inferior).	51

Figura 15: Campo médio dos dados de precipitação da Reanálise I utilizados como forçante para o período de verão (superior) e para o período de inverno (inferior).....	52
Figura 16: Campo médio dos dados de umidade relativa do ar da Reanálise I utilizados como forçante para o período de verão (superior) e para o período de inverno (inferior).	53
Figura 17: Campo médio dos dados de pressão atmosférica da Reanálise I utilizados como forçante para o período de verão (superior) e para o período de inverno (inferior).	54
Figura 18: Campo médio dos dados de radiação de onda curta da Reanálise I utilizados como forçante para o período de verão (superior) e para o período de inverno (inferior).	55
Figura 19: Campo médio dos dados de radiação de onda longa da Reanálise I utilizados como forçante para o período de verão (superior) e para o período de inverno (inferior).	56
Figura 20: Campo médio dos dados de vento da Reanálise I utilizados como forçante para o período de verão (superior) e para o período de inverno (inferior).....	57
Figura 21: Mapa de amplitudes da elevação (superior) e fases (inferior) da componente M2. Fonte (TPX07)	59
Figura 22: Mapa de amplitudes da elevação (superior) e fases (inferior) da componente S2. Fonte (TPX07).	60
Figura 23: Mapa de amplitudes da elevação (superior) e fases (inferior) da componente N2. Fonte (TPX07)	61
Figura 24: Mapa de amplitudes da elevação (superior) e fases (inferior) da componente K2. Fonte (TPX07).	62
Figura 25: Mapa de amplitudes da elevação (superior) e fases (inferior) da componente K1. Fonte (TPX07).	63
Figura 26: Mapa de amplitudes da elevação (superior) e fases (inferior) da componente O1. Fonte (TPX07).	64
Figura 27: Mapa de amplitudes da elevação (superior) e fases (inferior) da componente P1. Fonte (TPX07).	65
Figura 28: Mapa de amplitudes da elevação (superior) e fases (inferior) da componente Q1. Fonte (TPX07).	66
Figura 29: Estações utilizadas ao longo de todo o globo. Fonte: Dai & Trenberth (2002).	69

Figura 30: Estações utilizadas em Dai & Trenberth (2002), que se encontram no domínio de modelagem.	70
Figura 31: Campo de salinidade superficial obtido do ROMS para o dia 08 de maio de 2013. .	72
Figura 32: Variação da energia cinética média em superfície ao longo da simulação.	74
Figura 33: Localização das estações maregráficas da FEMAR, utilizadas na avaliação da representação da maré no modelo.	76
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).	77
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).	78
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).	79
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).	80
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).	81
Figura 39: TSM média para janeiro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	84
Figura 40: TSM média para fevereiro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	85
Figura 41: TSM média para março de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	86
Figura 42: TSM média para abril de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	87

Figura 43: TSM média para maio de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	88
Figura 44: TSM média para junho de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	89
Figura 45: TSM média para julho de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	90
Figura 46: TSM média para agosto de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	91
Figura 47: TSM média para setembro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	92
Figura 48: TSM média para outubro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	93
Figura 49: TSM média para novembro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	94
Figura 50: TSM média para dezembro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).....	95
Figura 51: Localização do ponto de grade do WOA utilizado para as comparações.	97
Figura 52: Perfis médios de temperatura e salinidade obtidos do WOA13.	98
Figura 53: Trajetória descrita pelo derivador 01.	100
Figura 54: Comparação entre os dados obtidos do derivador 01 e os resultados do ROMS... ..	101
Figura 55: Trajetória descrita pelo derivador 02.	102
Figura 56: Comparação entre os dados obtidos do derivador 02 e os resultados do ROMS... ..	103
Figura 57: Trajetória descrita pelo derivador 03.	104
Figura 58: Comparação entre os dados obtidos do derivador 03 e os resultados do ROMS... ..	105
Figura 59: Trajetória descrita pelo derivador 04.	106
Figura 60: Comparação entre os dados obtidos do derivador 04 e os resultados do ROMS... ..	107
Figura 61: Trajetória descrita pelo derivador 05.	108

Figura 62: Comparação entre os dados obtidos do derivador 05 e os resultados do ROMS...	109
Figura 63: Trajetória descrita pelo derivador 06.	110
Figura 64: Comparação entre os dados obtidos do derivador 06 e os resultados do ROMS...	111
Figura 65: Trajetória descrita pelo derivador 07.	112
Figura 66: Comparação entre os dados obtidos do derivador 07 e os resultados do ROMS...	113
Figura 67: Trajetória descrita pelo derivador 08.	114
Figura 68: Comparação entre os dados obtidos do derivador 08 e os resultados do ROMS...	115
Figura 69: Localização do fundeio do WOCE utilizado para comparação.....	117
Figura 70: Perfil vertical de correntes retirado do WOCE (acima) e do ROMS (abaixo).	118
Figura 71: Diagrama esquemático das correntes superficiais e subsuperficiais do Oceano Atlântico Tropical. Adaptado de Bourlès <i>et al.</i> (1999).....	120
Figura 72: Campo médio de circulação para o mês de janeiro.	121
Figura 73: Campo médio de circulação para o mês de fevereiro.	122
Figura 74: Campo médio de circulação para o mês de março.	123
Figura 75: Campo médio de circulação para o mês de abril.	124
Figura 76: Campo médio de circulação para o mês de maio.	125
Figura 77: Campo médio de circulação para o mês de junho.	126
Figura 78: Campo médio de circulação para o mês de julho.....	127
Figura 79: Campo médio de circulação para o mês de agosto.	128
Figura 80: Campo médio de circulação para o mês de setembro.	129
Figura 81: Campo médio de circulação para o mês de outubro.	130
Figura 82: Campo médio de circulação para o mês de novembro.	131
Figura 83: Campo médio de circulação para o mês de dezembro.	132
Figura 84: Esquema simplificado dos dados de entrada, processos e dados de saída (resultados) usados e obtidos pelo modelo OSCAR. Adaptado de Reed (2001).	135

Figura 85: Esquema da degradação dos principais componentes do óleo. Adaptado de Reed (2001).....	143
Figura 86: Unidades de Conservação marinhas e costeiras consideradas neste estudo.	152
Figura 87: Esquema geral de plumas de <i>blowout</i> de óleo em profundidade. Adaptado de Lindersen (2013).....	154
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 e marrons).....	156
Figura 89: Representação do limite da grade de óleo (linha vermelha tracejada).	164
Figura 90: A grade de batimetria utilizada na simulação.	165
Figura 91: Localização dos pontos de grade do NCEP (em vermelho) em relação ao bloco CE-M-715. Ponto em azul é o mais próximo da região de vazamento.....	170
Figura 92: Rosa dos ventos para os meses de janeiro a junho para o ponto mais próximo dos locais de vazamento.	171
Figura 93: Rosa dos ventos para os meses de julho a dezembro para o ponto mais próximo dos locais de vazamento.	172
Figura 94: Rosa de correntes para os meses de janeiro a junho para o ponto mais próximo do local de vazamento do poço Pinguim (Ponto A).....	175
Figura 95: Rosa de correntes para os meses de julho a dezembro para o ponto mais próximo do local de vazamento do poço Pinguim (Ponto A).....	176
Figura 96: Rosa de correntes para os meses de janeiro a junho para o ponto mais próximo do local de vazamento do poço Gaivota (Ponto B).....	178
Figura 97: Rosa de correntes para os meses de julho a dezembro para o ponto mais próximo do local de vazamento do poço Gaivota (Ponto B).....	179
Figura 98: Perfis de salinidade e temperatura para os pontos de vazamento.....	182
Figura 99: Curva do Erro Médio Quadrático (RMSE).	183
Figura 100: Derivada da curva do Erro Médio Quadrático (RMSE).....	184
Figura 101: Mapa de probabilidade de presença de óleo para um ponto de risco na Margem Equatorial com 300 e 500 simulações.....	185

Figura 102: 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.	187
Figura 103: Histograma de diferença absoluta de probabilidade de presença de óleos nos casos de 300 e 500 simulações.	188
Figura 104: Histograma acumulado de diferença absoluta de probabilidade de presença de óleos nos casos de 300 e 500 simulações.	189
Figura 105: Gráfico do tipo <i>box-plot</i>	191
Figura 106: Fluxograma de apresentação dos resultados probabilístico.	192
Figura 107: Fluxograma de apresentação dos resultados determinísticos.	193
Figura 108: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m ³ no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).	195
Figura 109: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água para vazamento de 8 m ³ no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).	196
Figura 110: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m ³ no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).	197
Figura 111: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 8 m ³ no cenário de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A).	198
Figura 112: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m ³ no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).	199
Figura 113: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 8 m ³ no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).	200
Figura 114: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m ³ no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).	201

Figura 115: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 8 m ³ no cenário de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A).	202
Figura 116: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m ³ no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).	203
Figura 117: 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 poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).	204
Figura 118: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 200 m ³ no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).	205
Figura 119: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 200 m ³ no cenário de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A).	206
Figura 120: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m ³ no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).	208
Figura 121: 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 poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).	209
Figura 122: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para vazamento de 200 m ³ , no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).	210
Figura 123: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 200 m ³ no cenário de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A).	211
Figura 124: 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 poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.	213
Figura 125: 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 poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.....	214

Figura 126: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três camadas (2-40 m, 40-80 m e 1040-1080 m), para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.....	215
Figura 127: 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 poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.	216
Figura 128: Mapa de probabilidade de presença de óleo na costa, para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.	217
Figura 129: 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 poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.....	218
Figura 130: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo na costa para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.	219
Figura 131: Gráfico de tempo mínimo de chegada de óleo na costa nas simulações em que houve probabilidade de presença de óleo na costa a partir do poço Pinguim (Ponto A). 220	
Figura 132: Massa máxima de óleo por célula de costa para o vazamento de pior caso no cenário de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A).	221
Figura 133: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de pior caso no cenário de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A).	222
Figura 134: 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 poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.	224
Figura 135: 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 poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.....	225
Figura 136: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três camadas (2-40 m, 40-80 m e 1040-1080 m), para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.....	226

Figura 137: 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 poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.....	227
Figura 138: Mapa de probabilidade de presença de óleo na costa, para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.	228
Figura 139: 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 poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.	229
Figura 140: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo na costa, para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.	230
Figura 141: Massa máxima de óleo por célula de costa para o vazamento de pior caso no cenário de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A).....	231
Figura 142: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de pior caso no cenário de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A).	232
Figura 143: 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.....	234
Figura 144: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m ³ no período de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).	237
Figura 145: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 8 m ³ no período de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).	238
Figura 146: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m ³ no período de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).	239
Figura 147: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 8 m ³ no cenário de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B).....	240

Figura 148: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m ³ no período de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).	241
Figura 149: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 8 m ³ no período de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).	242
Figura 150: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m ³ no período de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).	243
Figura 151: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 8 m ³ no cenário de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B).	244
Figura 152: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m ³ no período de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).	245
Figura 153: 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 poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).	246
Figura 154: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 200 m ³ no período de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).	247
Figura 155: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 200 m ³ no cenário de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B).	248
Figura 156: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m ³ no período de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).	249
Figura 157: 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 poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).	250
Figura 158: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para vazamento de 200 m ³ , no período de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).	251

Figura 159: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 200 m ³ no cenário de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B).....	252
Figura 160: 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 poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.	254
Figura 161: 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 poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.....	255
Figura 162: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três camadas (2-40 m, 40-80 m e 800-840 m), para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.	256
Figura 163: 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 poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.	257
Figura 164: Mapa de probabilidade de presença de óleo na costa, para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.	258
Figura 165: 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 poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.....	259
Figura 166: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo na costa para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.	260
Figura 167: Gráfico de tempo mínimo de chegada de óleo na costa nas simulações em que houve probabilidade de presença de óleo na costa a partir do poço Gaivota (Ponto B). 260	
Figura 168: Massa máxima de óleo por célula de costa para o vazamento de pior caso no cenário de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B).....	261
Figura 169: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de pior caso no cenário de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B).....	262

Figura 170: 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 poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.	264
Figura 171: 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 poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.....	265
Figura 172: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três camadas (2-40 m, 40-80 m e 800-840 m), para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.	266
Figura 173: 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 poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.....	267
Figura 174: Mapa de probabilidade de presença de óleo na costa, para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.	268
Figura 175: 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 poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.	269
Figura 176: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo na costa, para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.	270
Figura 177: Gráfico de tempo mínimo de chegada de óleo na costa nas simulações em que houve probabilidade de presença de óleo na costa a partir do poço Gaivota (Ponto B).	271
Figura 178: Massa máxima de óleo por célula de costa para o vazamento de pior caso no cenário de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B).....	272
Figura 179: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de pior caso no cenário de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B).....	273
Figura 180: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m ³ no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).	278

Figura 181: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 8 m ³ no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).....	279
Figura 182: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m ³ no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).....	280
Figura 183: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m ³ no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).	281
Figura 184: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 8 m ³ no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).....	282
Figura 185: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m ³ no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).	283
Figura 186: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m ³ no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).	284
Figura 187: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 200 m ³ no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).....	285
Figura 188: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 200 m ³ no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).	286
Figura 189: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m ³ no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).	287
Figura 190: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 200 m ³ no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).....	288

Figura 191: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para vazamento de 200 m ³ , no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).	289
Figura 192: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.	291
Figura 193: 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. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.	292
Figura 194: Mapa de probabilidade de presença de óleo na costa, para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.	293
Figura 195: 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. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.	294
Figura 196: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo na costa para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.	295
Figura 197: Massa máxima de óleo por célula de costa para o vazamento de pior caso no cenário de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.	296
Figura 198: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.	297
Figura 199: 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. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.	298
Figura 200: Mapa de probabilidade de presença de óleo na costa, para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.	299

Figura 201: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.	300
Figura 202: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo na costa, para um vazamento de <i>blowout</i> de 30 dias no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.	301
Figura 203: Massa máxima de óleo por célula de costa para o vazamento de pior caso no cenário de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.	302
Figura 204: Rosa dos ventos para o período de simulação da situação de menor tempo de toque na costa.	308
Figura 205: Rosa de corrente para o período de simulação da situação de menor tempo de toque na costa.	309
Figura 206: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 12 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m ³ a partir do poço Gaivota (Ponto B).	311
Figura 207: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 36 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m ³ a partir do poço Gaivota (Ponto B).	312
Figura 208: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 60 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m ³ a partir do poço Gaivota (Ponto B).	313
Figura 209: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m ³ a partir do poço Gaivota (Ponto B).	314
Figura 210: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 265 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 m ³ a partir do poço Gaivota (Ponto B).	315
Figura 211: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m ³ a partir do poço Gaivota (Ponto B).	316
Figura 212: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m ³ a partir do poço Gaivota (Ponto B).	317
Figura 213: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m ³ a partir do poço Gaivota (Ponto B).	318
Figura 214: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície. Vazamento de 13.307 m ³ a partir do poço Gaivota (Ponto B).	319
Figura 215: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície. Vazamento de 13.307 m ³ a partir do poço Gaivota (Ponto B).	320
Figura 216: Mapa de concentração de óleo no sedimento no fundo marinho da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Vazamento de 13.307 m ³ a partir do poço Gaivota (Ponto B). .	321
Figura 217: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condição crítica de menor tempo de chegada. Volume de 13.307 m ³	322
Figura 218: Área superficial da mancha de óleo e a massa de óleo na superfície do mar durante a simulação da trajetória em condição crítica de menor tempo de chegada.	324
Figura 219: Rosa dos ventos para o período de simulação da situação de maior massa de óleo acumulada na costa.	325
Figura 220: Rosa de corrente para o período de simulação da situação de maior massa de óleo acumulada na costa.	326

- Figura 221: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, 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 poço Pinguim (Ponto A)..... 328
- Figura 222: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, 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 poço Pinguim (Ponto A)..... 329
- Figura 223: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, 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 poço Pinguim (Ponto A)..... 330
- Figura 224: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, 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 poço Pinguim (Ponto A)..... 331
- Figura 225: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, 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 poço Pinguim (Ponto A)..... 332
- Figura 226: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Pinguim (Ponto A)..... 333
- Figura 227: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, 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 poço Pinguim (Ponto A)..... 334
- Figura 228: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, 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 poço Pinguim (Ponto A)..... 335

Figura 229: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície. Vazamento de 13.307 m ³ a partir do poço Pinguim (Ponto A).	336
Figura 230: Mapa de concentração de óleo no sedimento no fundo marinho da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Vazamento de 13.307 m ³ a partir do poço Pinguim (Ponto A).....	337
Figura 231: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condição crítica de maior massa acumulada na costa. Volume de 13.307 m ³	338
Figura 232: Área superficial da mancha de óleo e a massa de óleo na superfície do mar durante a simulação da trajetória em condição crítica de maior massa acumulada na costa.	339

Índice das tabelas

Tabela 1: Pontos de vazamento no bloco CE-M-715. Datum SIRGAS 2000	30
Tabela 2: Parâmetros e constantes utilizadas no modelo hidrodinâmico	35
Tabela 3: Estações utilizadas em Dai & Trenberth (2002), que se encontram no domínio de modelagem. Fonte: Dai & Trenberth (2002).	71
Tabela 4: Comparação estatística entre os dados de elevação do ROMS e os dados medidos.	82
Tabela 5: Data e local de lançamento dos derivadores da primeira campanha de monitoramento.	99
Tabela 6: Índice de Wilmot das comparações modelo/derivadores.	115
Tabela 7: Resumo dos cenários de vazamento simulados para cada ponto de vazamento. ...	134
Tabela 8: Equações de regressão para estimativa dos parâmetros Koc e Kow para diferentes componentes químicos. Fonte: Reed, 2001.	145
Tabela 9: Lista de Unidades de Conservação consideradas neste estudo, suas características e a divisão adotada em marinhas e costeiras.....	153
Tabela 10: Parâmetros físicos e químicos utilizados no modelo de óleo.	157
Tabela 11: Constantes físicas utilizadas no modelo de óleo.	158
Tabela 12: Parâmetros numéricos utilizados no modelo de óleo.	159
Tabela 13: Características do óleo escolhido do banco de dados do modelo OSCAR e utilizado nas simulações.	161
Tabela 14: Curva de destilação do óleo utilizado no estudo.	162
Tabela 15: Componentes calculados pelo OSCAR a partir da curva de destilação do óleo selecionado no banco de dados.	163
Tabela 16: Ocorrência mensal de direção dos ventos para o ponto mais próximo do local do vazamento.	173
Tabela 17: Ocorrência mensal de intensidade dos ventos para o ponto mais próximo do local do vazamento.	173

Tabela 18: Ocorrência mensal de direção das correntes para o ponto mais próximo do local do vazamento do poço Pinguim (Ponto A).	177
Tabela 19: Ocorrência mensal de intensidade das correntes para o ponto mais próximo do local do vazamento do poço Pinguim (Ponto A).	177
Tabela 20: Ocorrência mensal de direção das correntes para o ponto mais próximo do local do vazamento do poço Gaivota (Ponto B).	180
Tabela 21: Ocorrência mensal de intensidade das correntes para o ponto mais próximo do local do vazamento do poço Gaivota (Ponto B).	180
Tabela 22: 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 poço Pinguim (Ponto A), nos cenários de verão e inverno.	212
Tabela 23: Extensão de toque, massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um derrame de grande volume (13.307 m ³) a partir do poço Pinguim (Ponto A), nos cenários de verão e inverno.	235
Tabela 24: 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 derrame de grande volume (13.307 m ³) a partir do poço Pinguim (Ponto A), nos cenários de verão e inverno.....	236
Tabela 25: Extensão de toque, massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas unidades de conservação costeiras com possibilidade de serem atingidas em um derrame de grande volume (13.307 m ³) a partir do poço Pinguim (Ponto A), nos cenários de verão e inverno.	236
Tabela 26: 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 poço Gaivota (Ponto B), nos cenários de verão e inverno.	253
Tabela 27: Extensão de toque, massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um derrame de grande volume (13.307 m ³) a partir do poço Gaivota (Ponto B), nos cenários de verão e inverno.	275

Tabela 28: Massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas Unidades de Conservação marinhas com possibilidade de serem atingidas em um derrame de grande volume (13.307 m ³) a partir do poço Gaivota (Ponto B), nos cenários de verão e inverno.	276
Tabela 29: Massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas Unidades de Conservação costeiras com possibilidade de serem atingidas em um derrame de grande volume (13.307 m ³) a partir do poço Gaivota (Ponto B), nos cenários de verão e inverno.	277
Tabela 30: 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 dos poços Pinguim e Gaivota, nos cenários de verão e inverno.	290
Tabela 31: Extensão de toque, massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um derrame de grande volume (13.307 m ³) considerando os vazamentos a partir dos poços Pinguim e Gaivota, nos cenários de verão e inverno.	303
Tabela 32: Massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas Unidades de Conservação marinhas com possibilidade de serem atingidas em um derrame de grande volume (13.307 m ³) considerando os vazamentos a partir dos poços Pinguim e Gaivota, nos cenários de verão e inverno.	305
Tabela 33: Massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas unidades de conservação costeiras com possibilidade de serem atingidas em um derrame de grande volume (13.307 m ³) considerando os vazamentos a partir dos poços Pinguim e Gaivota, nos cenários de verão e inverno.	305
Tabela 34: Informações das simulações determinísticas críticas consideradas para um evento derrame de grande volume (13.307 m ³).	307
Tabela 35: Ocorrência conjunta entre direção e intensidade dos ventos para o ponto mais próximo do local do vazamento para o período da condição de menor tempo de toque na costa.	308
Tabela 36: Estatística do vento para o período da condição de menor tempo de toque na costa.	309

Tabela 37: Ocorrência conjunta entre direção e intensidade de corrente para o ponto mais próximo do local do vazamento para o período da condição de menor tempo de toque na costa. Ponto	309
Tabela 38: Estatística de corrente para o período da condição de menor tempo de toque na costa.	310
Tabela 39: Balanço de massa do óleo durante a simulação em valores percentuais e de massa de óleo.	323
Tabela 40: Área superficial, massa de óleo e a espessura máxima da mancha de óleo e a massa de óleo do óleo durante a simulação.	324
Tabela 41: Ocorrência conjunta entre direção e intensidade dos ventos para o ponto mais próximo do local do vazamento para o período da condição de maior massa de óleo acumulada na costa.....	326
Tabela 42: Estatística do vento para o período da condição de maior massa de óleo acumulada na costa.	326
Tabela 43: Ocorrência conjunta entre direção e intensidade de corrente para o ponto mais próximo do local do vazamento para o período da condição de maior massa de óleo acumulada na costa.....	327
Tabela 44: Estatística de corrente para o período da condição de menor tempo de toque na costa.	327
Tabela 45: Balanço de massa do óleo durante a simulação em valores percentuais e de massa de óleo.	339
Tabela 46: Área superficial, massa de óleo e a espessura máxima da mancha de óleo e a massa de óleo do óleo durante a simulação.	340
Tabela 47: Resumo dos principais resultados obtidos na modelagem de dispersão de óleo no mar para os poços Gaivota e Pinguim.....	341

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): Todas

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 do transporte de óleo no mar para os cenários acidentais de vazamentos localizados em dois pontos do Bloco CE-M-715, poços Gaivota e Pinguim, Bacia do Ceará. A localização dos poços Pinguim, doravante Ponto A, e Gaivota, doravante Ponto B, assim como a localização do bloco, é apresentada na Figura 1 e as coordenadas dos pontos na Tabela 1.

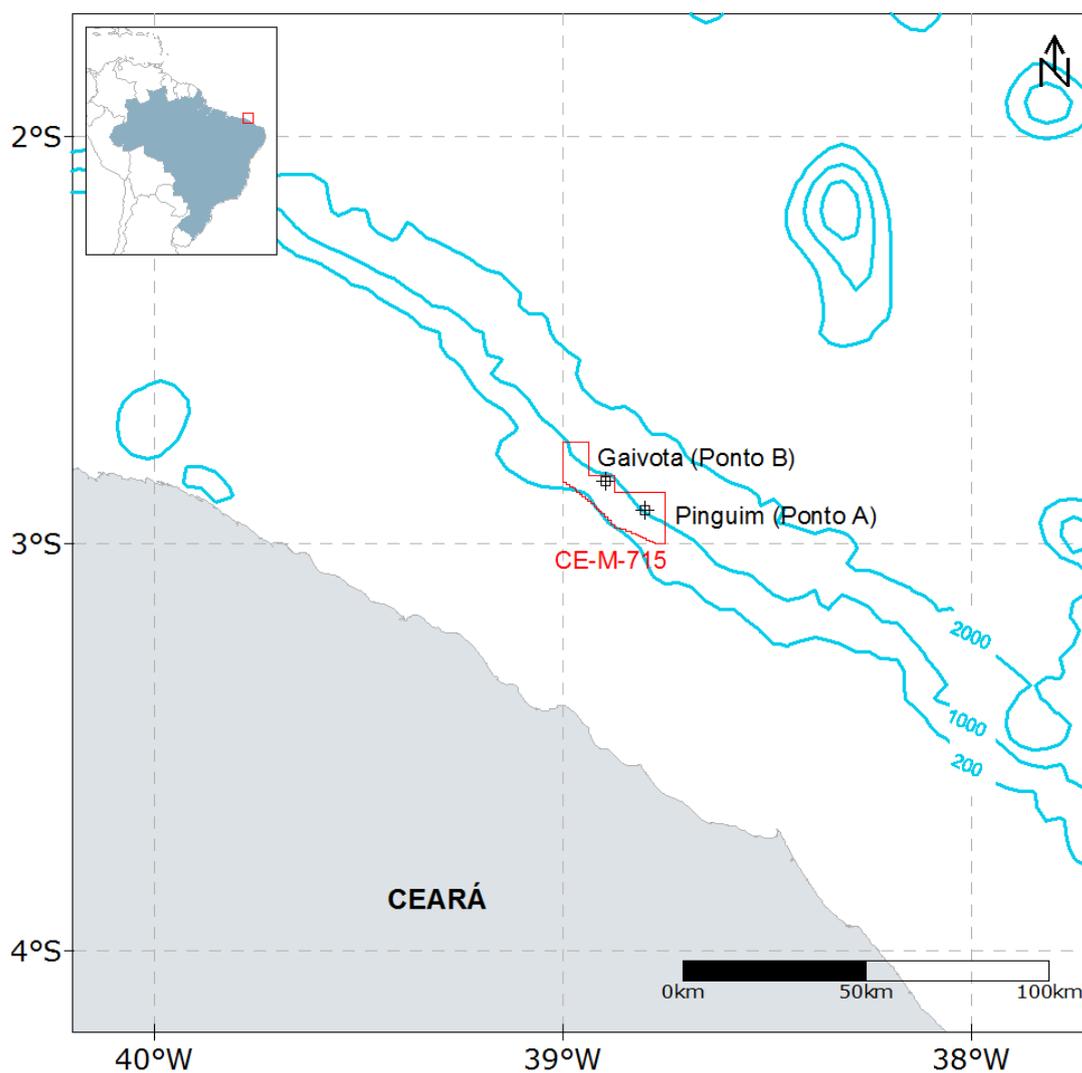


Figura 1: Localização dos pontos de vazamento (preto), em relação ao bloco CE-M-715 (vermelho).

Tabela 1: Pontos de vazamento no bloco CE-M-715. Datum SIRGAS 2000

Poço	Identificação	Profundidade (m)	Latitude	Longitude
Pinguim	Ponto A	925	2° 55' 4,171" S	38° 47' 56,124" O
Gaivota	Ponto B	965	2° 50' 53,301" S	38° 53' 43,264" O

As posições dos vazamentos foram definidas considerando as locações dos poços previstas pela Chevron.

O estudo foi dividido em duas etapas. A primeira consiste na análise das características meteorológicas e simulações hidrodinâmicas da região, mais especificamente os parâmetros capazes de afetar o comportamento do óleo derramado (item Modelagem Hidrodinâmica).

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

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-715.

2.1. Modelo Numérico Utilizado

Para as simulações hidrodinâmicas na região do bloco CE-M-715 foi utilizado o modelo *Regional Ocean Modeling System* - ROMS (HAIDVOGEL *et al.*, 2008). O ROMS é um modelo oceânico de superfície livre, coordenadas seguidoras de terreno e equações primitivas, utilizado amplamente pela comunidade científica em uma vasta gama de aplicações (por exemplo, HAIDVOGEL *et al.*, 2000; MARCHESIELLO *et al.*, 2003; PELIZ *et al.*, 2003). Os algoritmos não lineares que formam o cerne computacional do ROMS são descritos em detalhes em Shchepetkin & McWilliams (2003, 2005). O ROMS inclui modelos acoplados para processos biogeoquímicos, bio-ópticos, transporte de sedimentos e também inclui diversos regimes de mistura vertical (WARNER *et al.*, 2005), níveis múltiplos de aninhamento e grades compostas.

As equações hidrostáticas primitivas de momento são resolvidas utilizando um passo de tempo dividido explicitamente e modos barotrópico (bidimensional) e baroclínico (tridimensional) acoplados. Um número finito de passos de tempo barotrópicos é efetuado em cada passo de

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

Atualmente, todas as equações em duas e três dimensões são discretizadas no tempo usando um algoritmo de passo de tempo previsor (*Leap-Frog*) e corretor (Adams-Molton) de terceira ordem, que é altamente robusto e estável. A estabilidade reforçada pelo esquema permite passos de tempo mais longos, por um fator de aproximadamente quatro, o qual mais do que compensa o custo elevado do algoritmo previsor-corretor.

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

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

Existem várias opções para esquemas de advecção: diferenças centradas de segunda e quarta ordens; e terceira ordem, *upstream biased*. Este último esquema, padrão do modelo, apresenta uma dissipação hiper-difusa dependente da velocidade como erro dominante de truncamento

(SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 1998). Estes esquemas são estáveis para a metodologia de previsão e correção do modelo. Além disso, há uma opção para representação da advecção vertical, utilizando *spline* parabólico conservativo, que tem propriedades de dispersão similares a um esquema convencional preciso de oitava ordem.

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

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

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

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

O conjunto de equações governantes do ROMS é formado pelas equações primitivas do movimento, fazendo uso das aproximações de *Boussinesq*, plano 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:

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

Equação da conservação da quantidade de movimento na direção meridional:

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

Equação da conservação de calor:

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

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-715, 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).

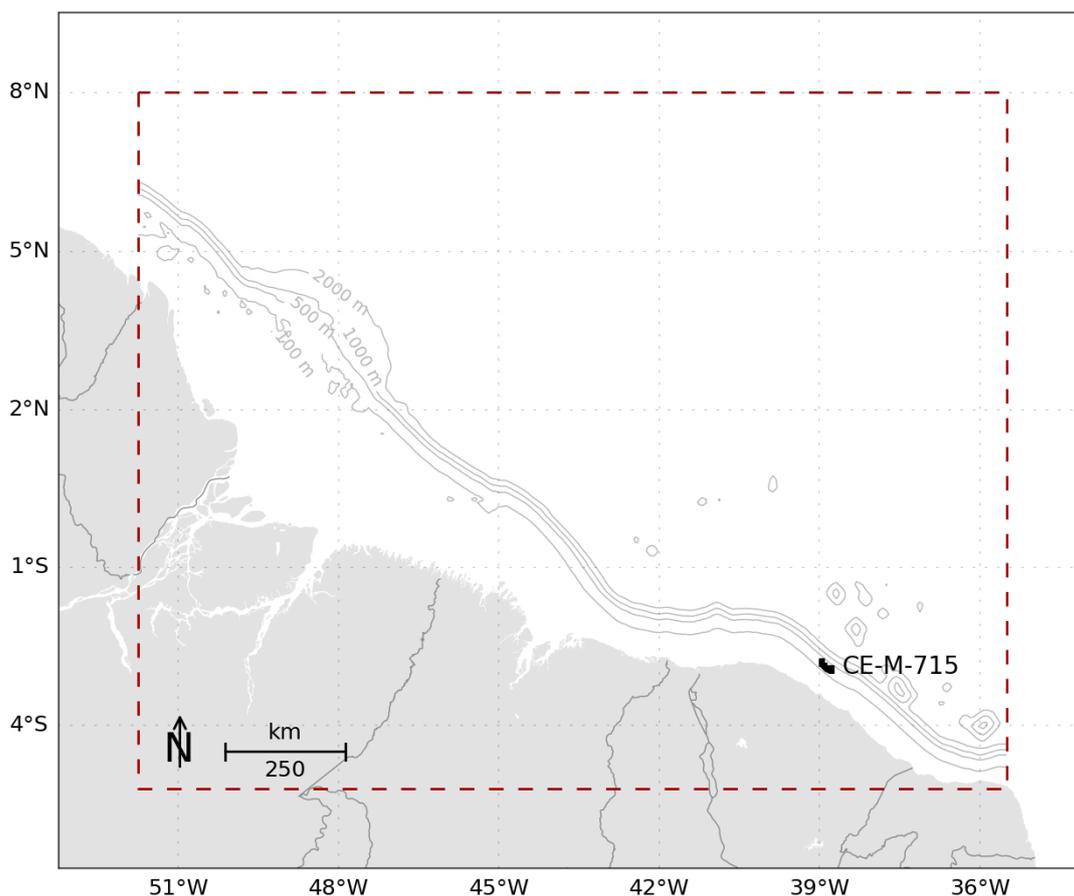


Figura 2: Região de modelagem. Polígono vermelho pontilhado representa os limites da grade do modelo hidrocinâmico.

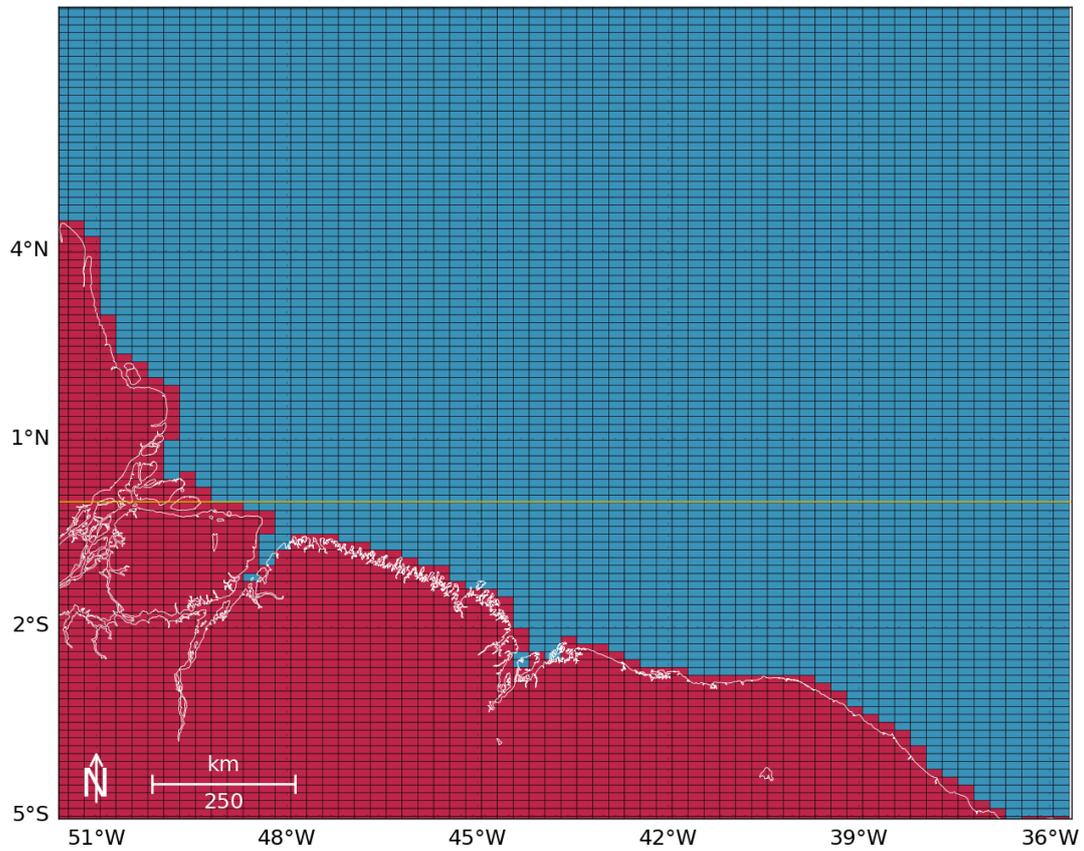


Figura 3: Detalhamento da representação da linha de costa pela grade do modelo hidrodinâmico. Os retângulos em vermelho representam as células consideradas como terra pelo modelo, e a linha branca mostra a linha de costa da região. A linha do Equador é representada pela cor amarela.

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-715, 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 à disponibilidade de dados do MyOcean, que se inicia em 26/12/2012.

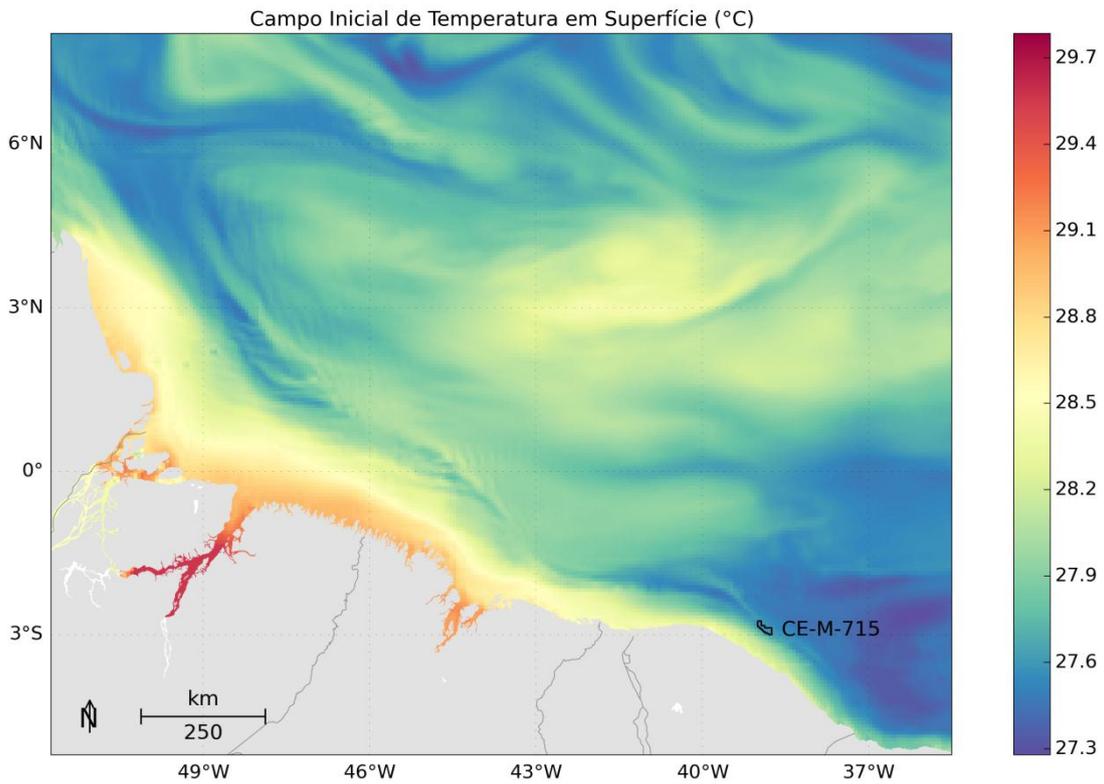


Figura 4: Campo de temperatura superficial (°C) no dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.

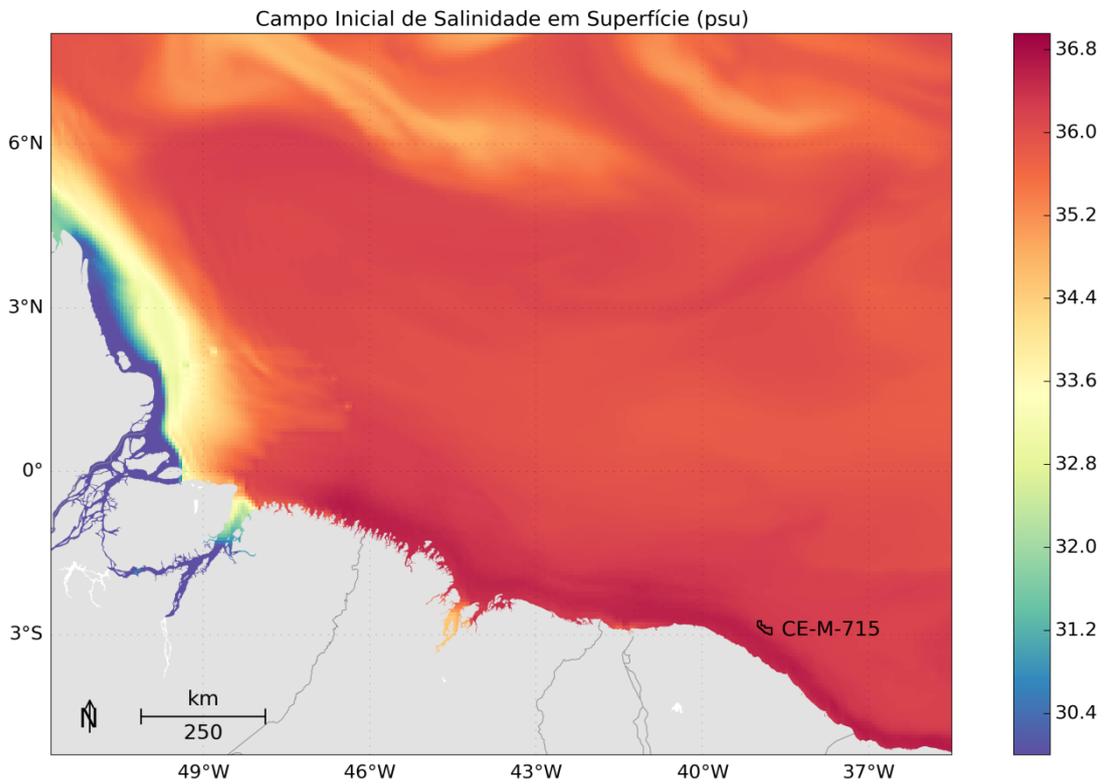


Figura 5: Campo de salinidade superficial no dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.

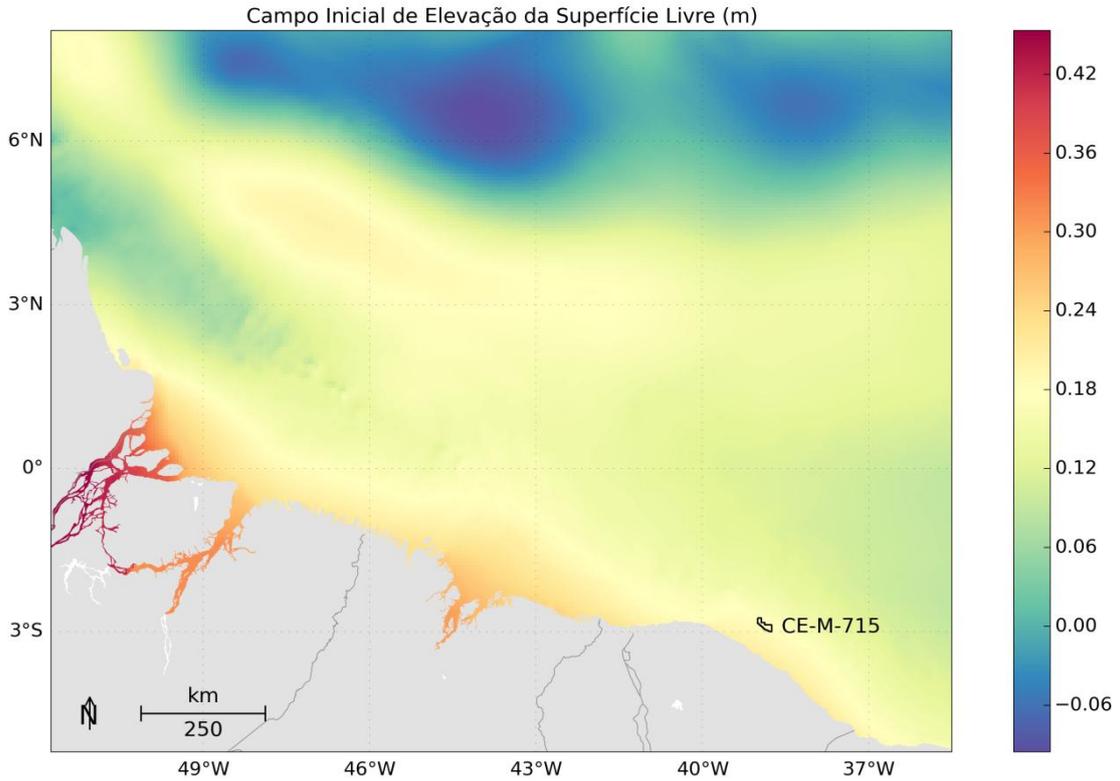


Figura 6: Campo de Elevação da Superfície Livre (m) do dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.

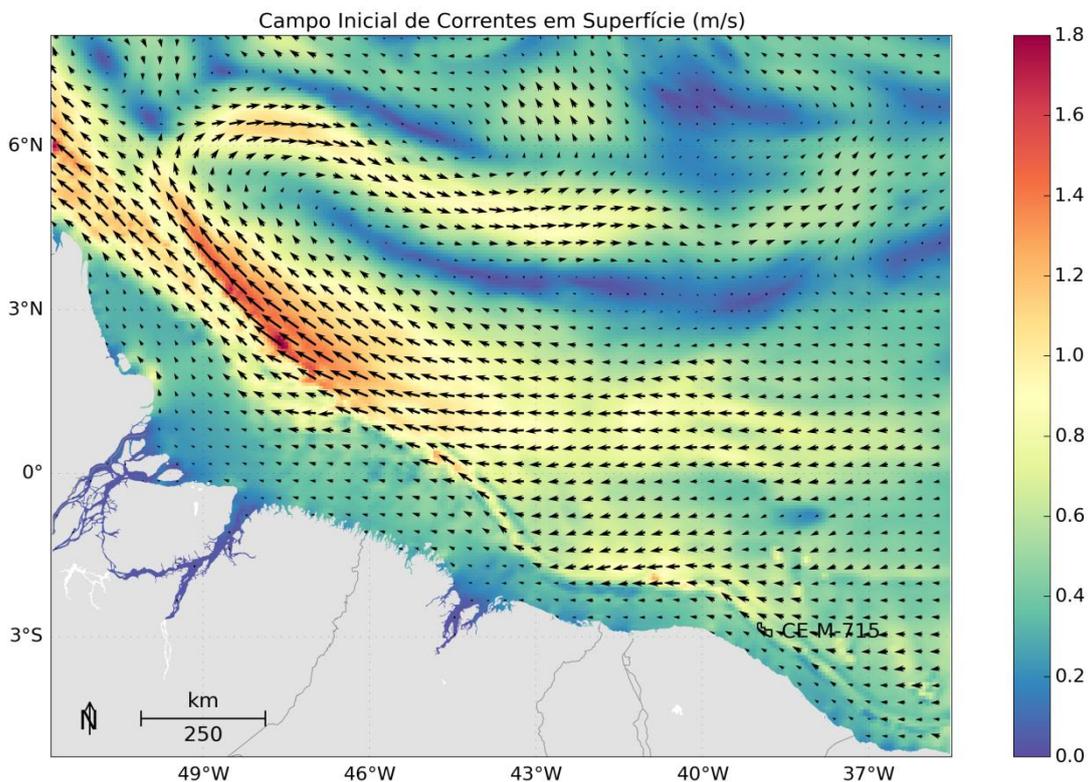


Figura 7: Campo de Correntes superficiais (m/s) do dia 26 de dezembro de 2012, interpolado para a grade do ROMS.

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.

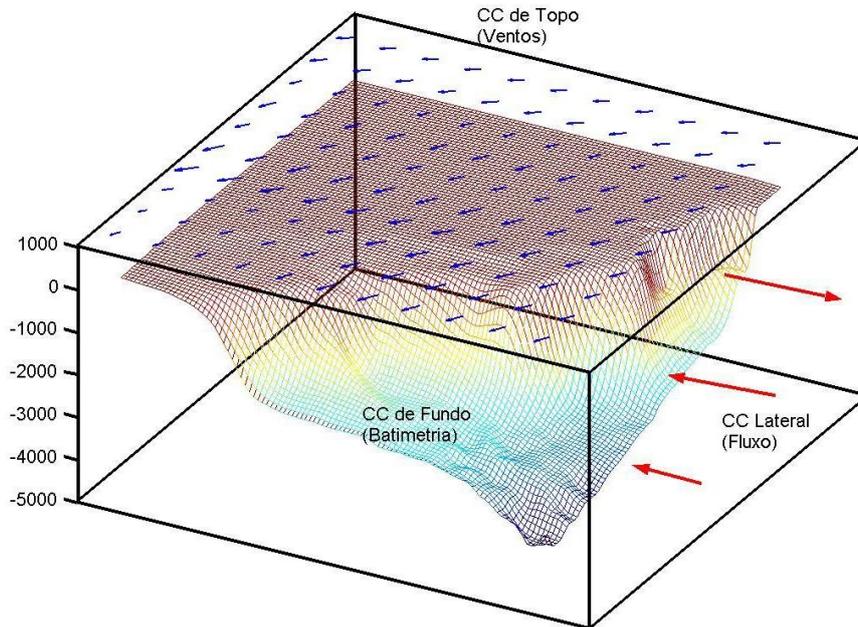


Figura 8: Representação esquemática das condições de contorno a serem definidas em um modelo de área limitada.

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

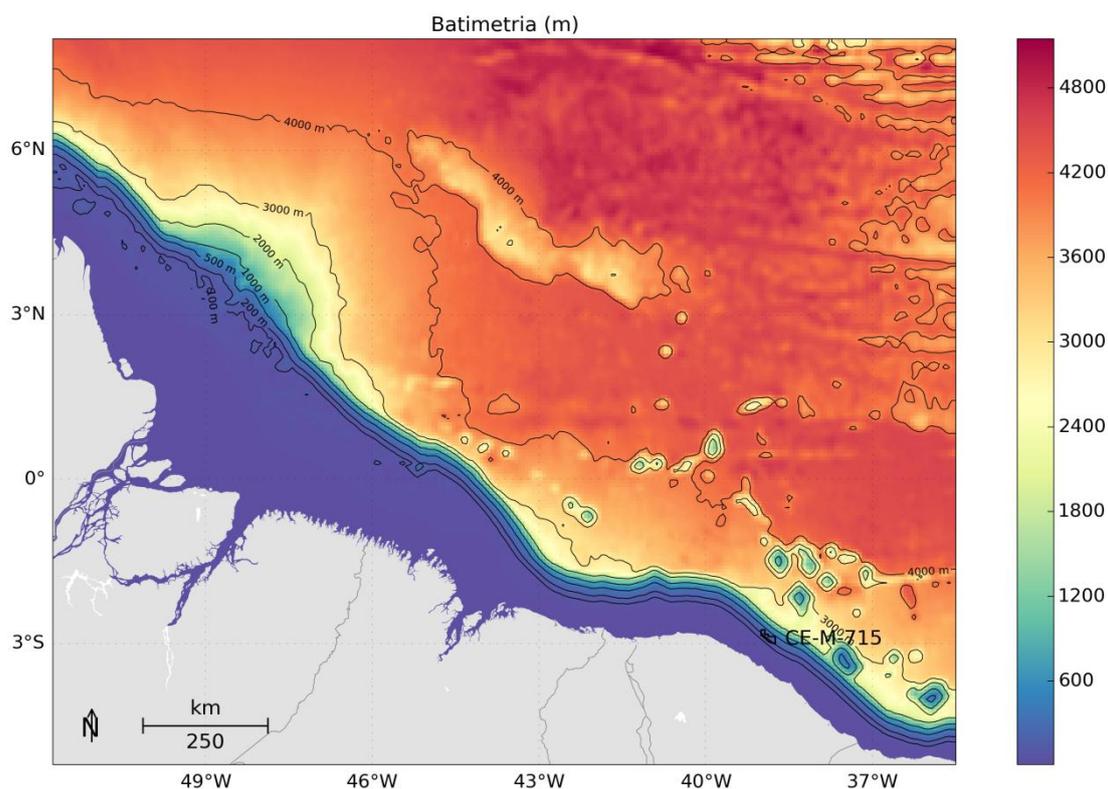


Figura 9: Batimetria da grade do modelo numérico.

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 Iapoque ao Rio Parnaíba) da Diretoria de Hidrografia e Navegação (Figura 10). Esta carta é a que apresenta maior cobertura no domínio de modelagem.

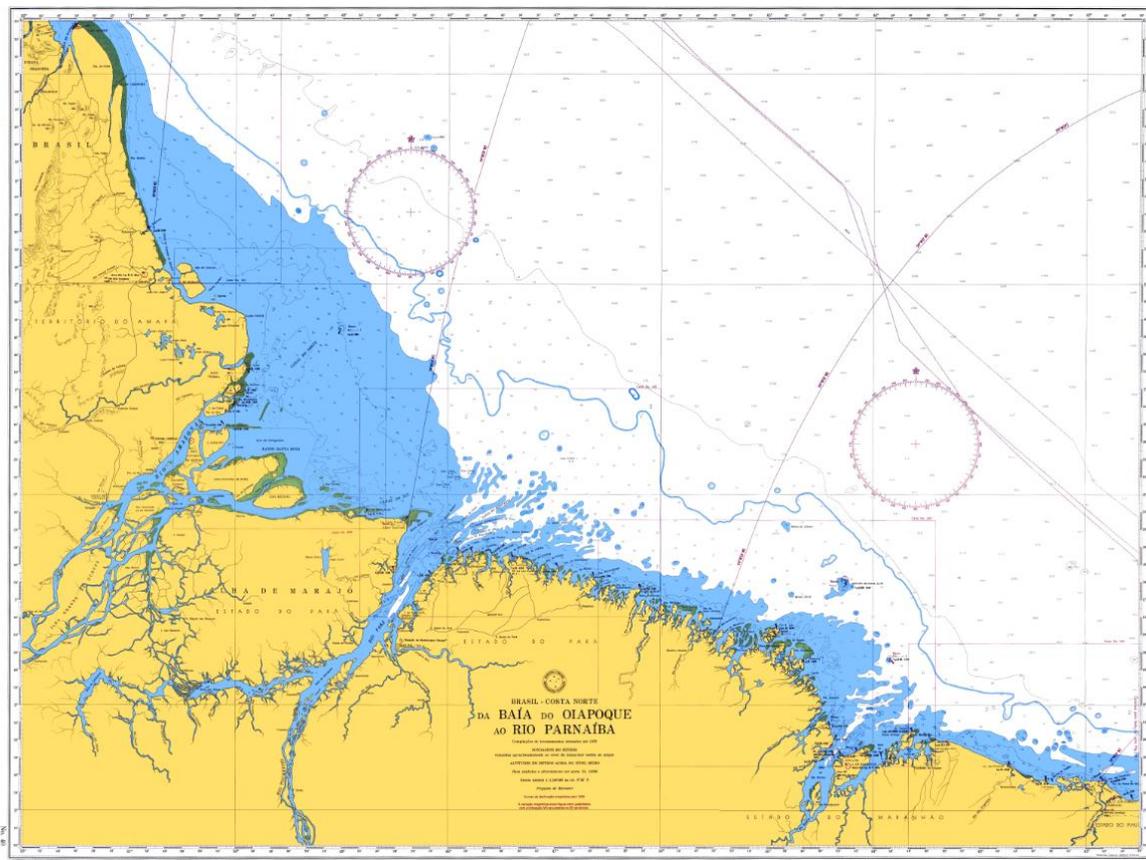


Figura 10: Carta Náutica 040 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN).

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.

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.

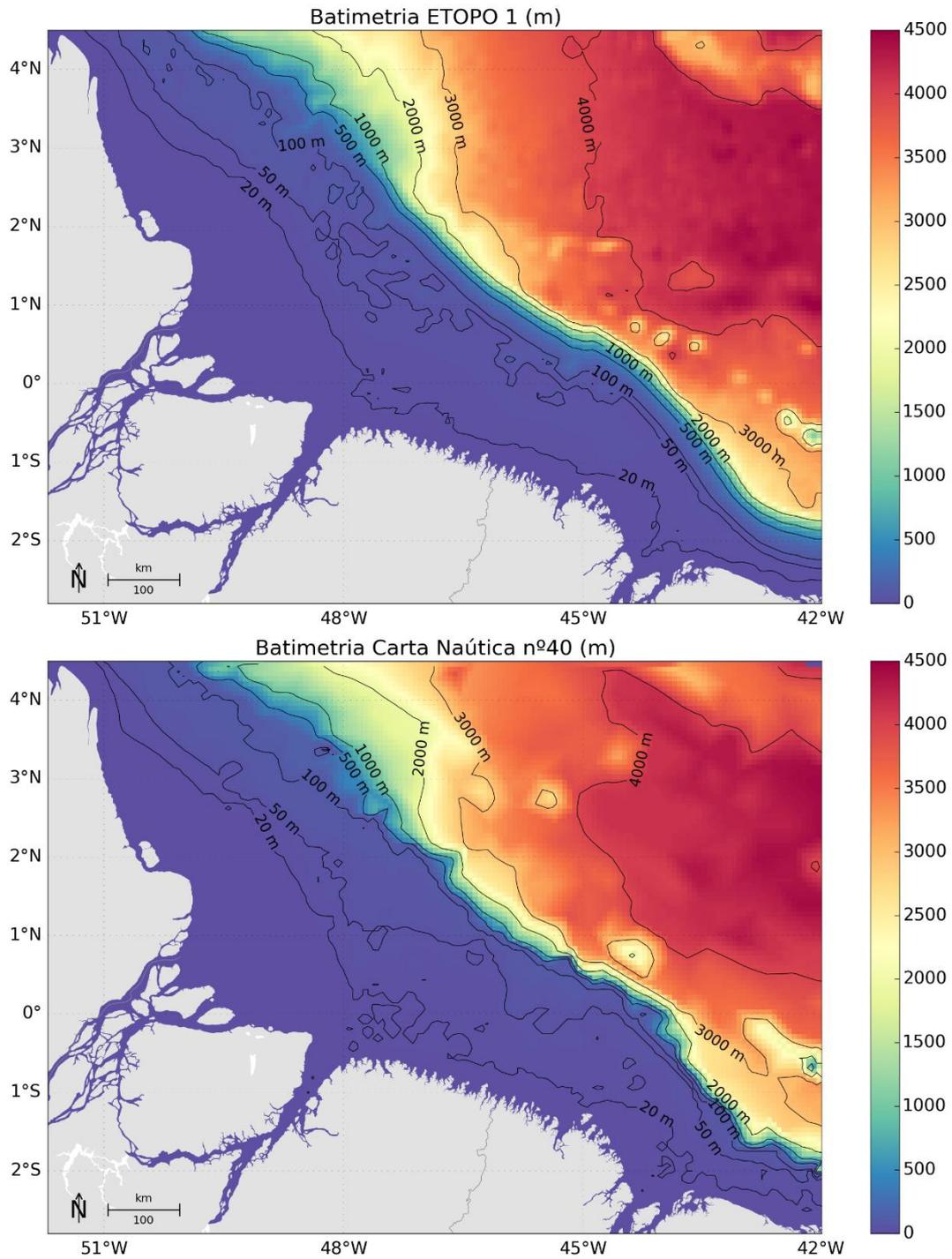


Figura 11: Batimetria do ETOPO1 (painel superior) e da Carta Náutica 040 (painel inferior) interpoladas para a grade do ROMS.

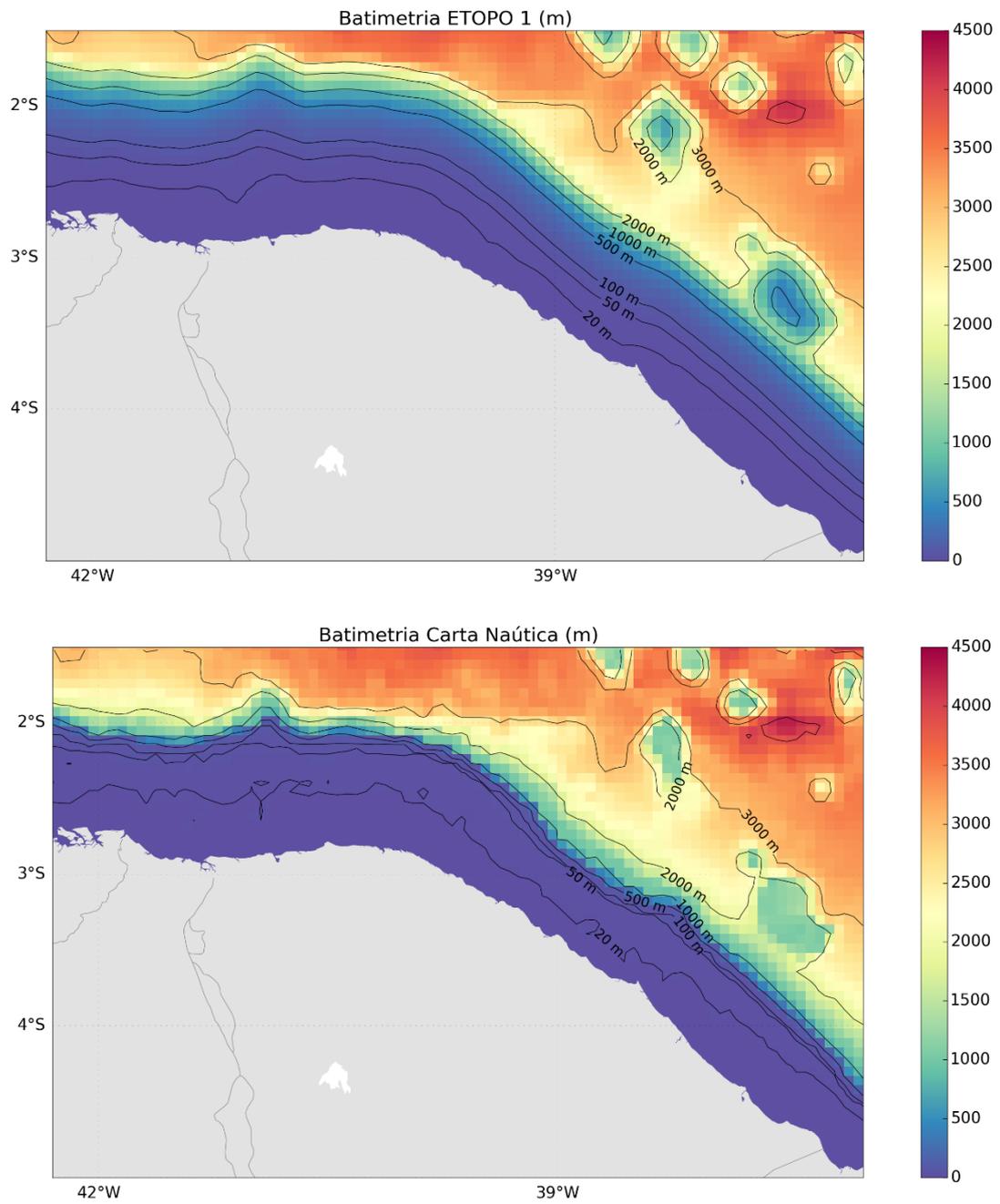


Figura 12: Batimetria do ETOPO1 (painel superior) e das Cartas Náuticas 21700, 21800 e 21900 (painel inferior) interpoladas para a grade do ROMS.

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° 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.

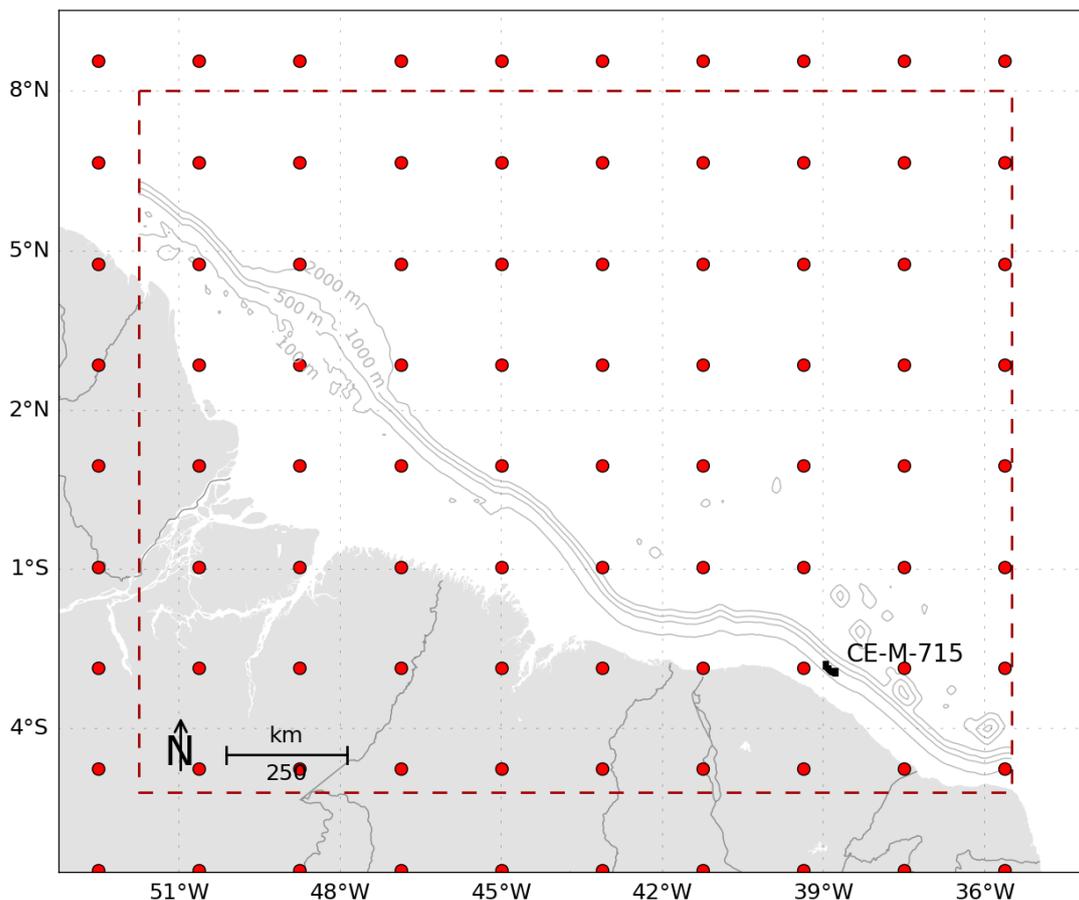


Figura 13: Pontos de Grade do NCEP (pontos vermelhos) na região do domínio de modelagem (retângulo branco).

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 de verão (outubro a março) e para o período de inverno (abril a setembro).

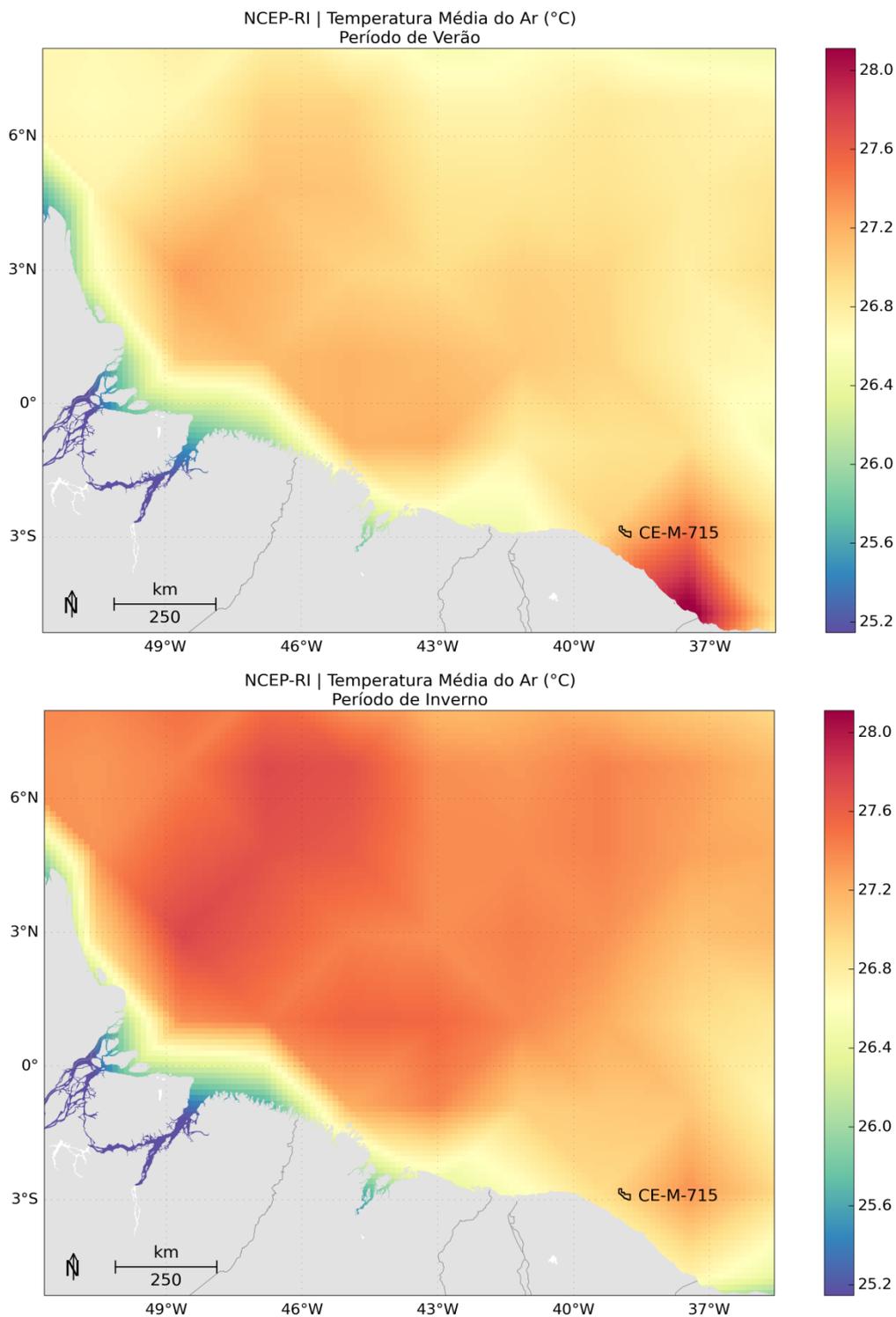


Figura 14: Campo médio dos dados de temperatura do ar a 2 m da Reanálise I utilizados como forçante para o período de verão (superior) e para o período de inverno (inferior).

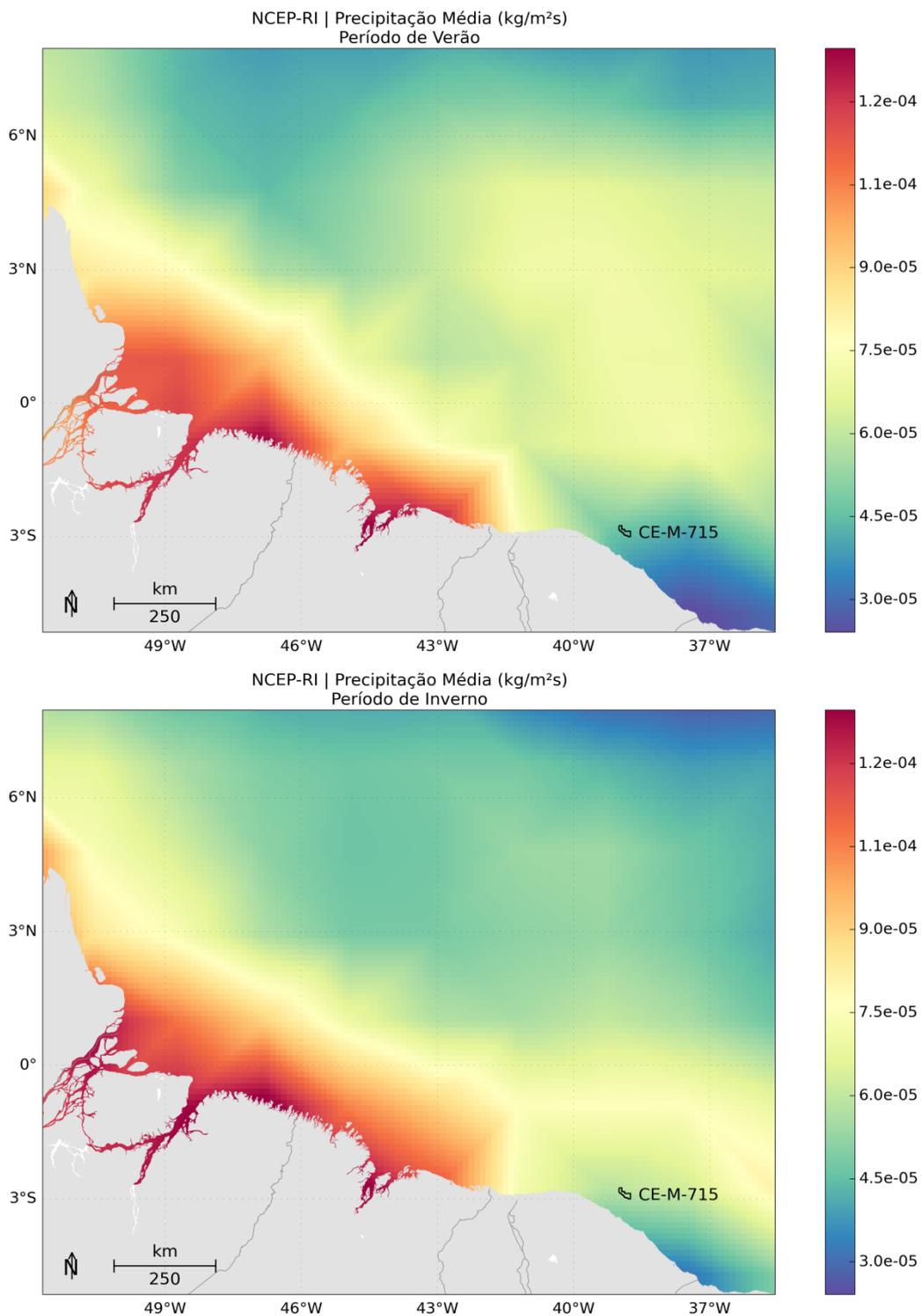


Figura 15: Campo médio dos dados de precipitação da Reanálise I utilizados como forçante para o período de verão (superior) e para o período de inverno (inferior).

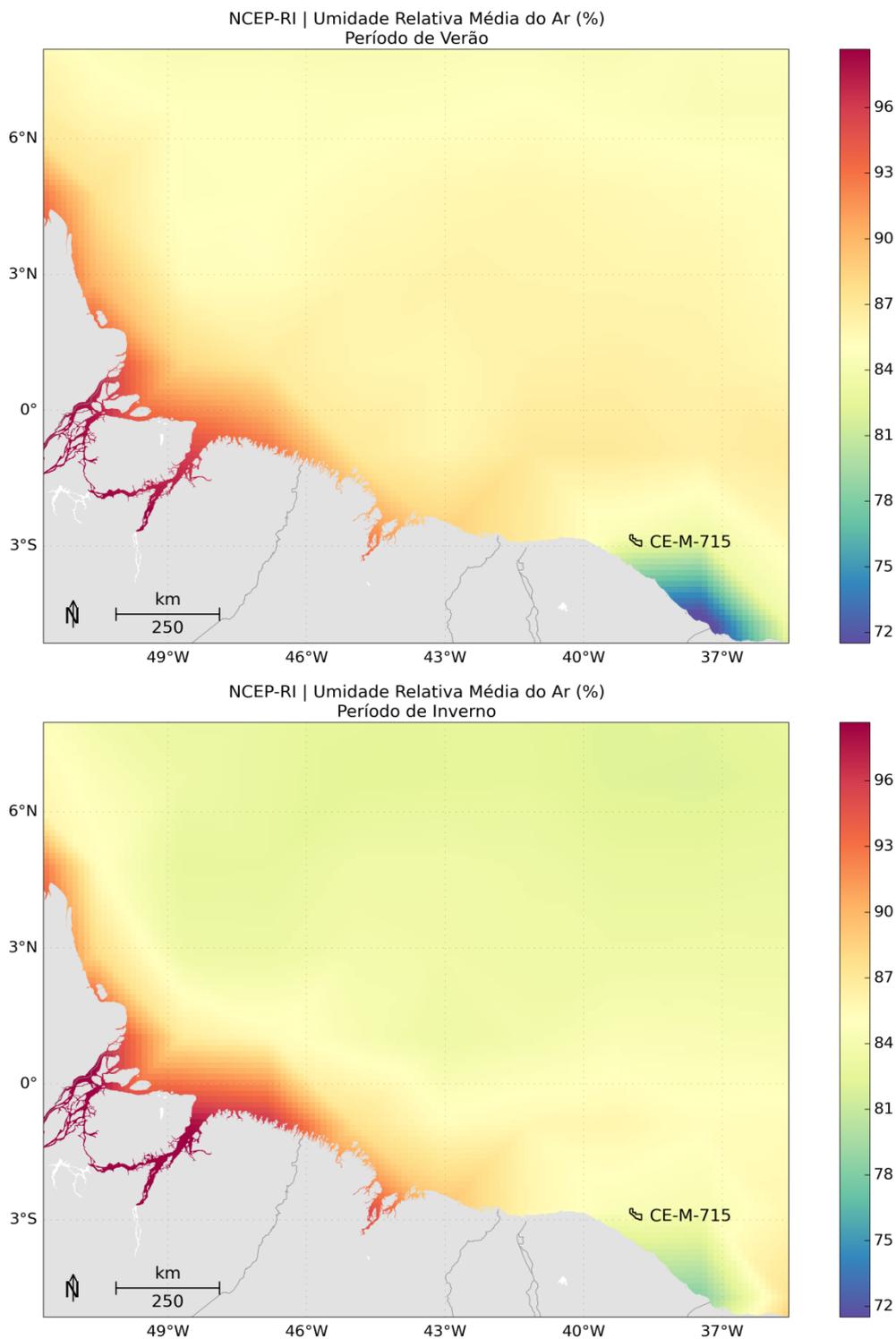


Figura 16: Campo médio dos dados de umidade relativa do ar da Reanálise I utilizados como forçante para o período de verão (superior) e para o período de inverno (inferior).

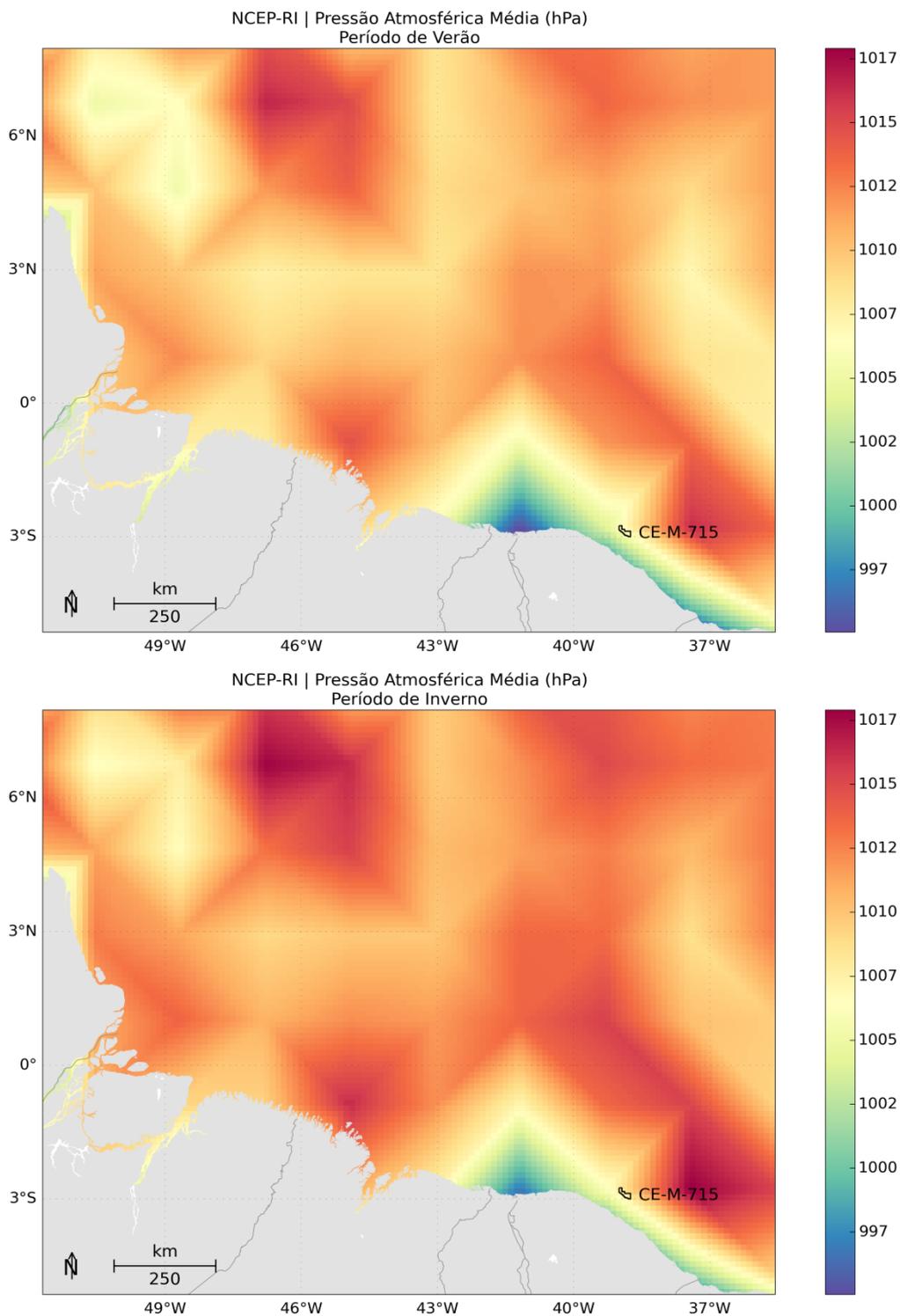


Figura 17: Campo médio dos dados de pressão atmosférica da Reanálise I utilizados como forçante para o período de verão (superior) e para o período de inverno (inferior).

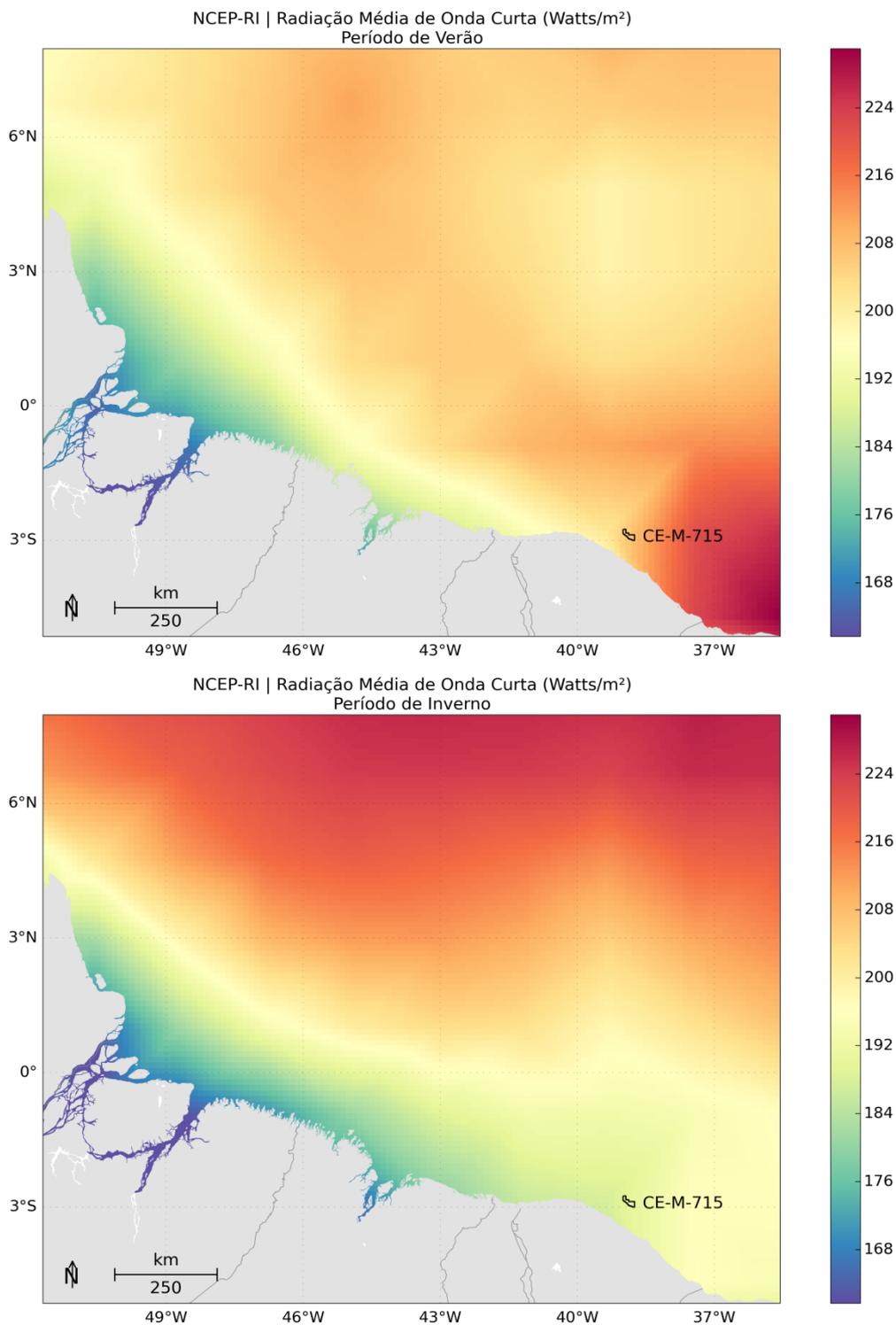


Figura 18: Campo médio dos dados de radiação de onda curta da Reanálise I utilizados como forçante para o período de verão (superior) e para o período de inverno (inferior).

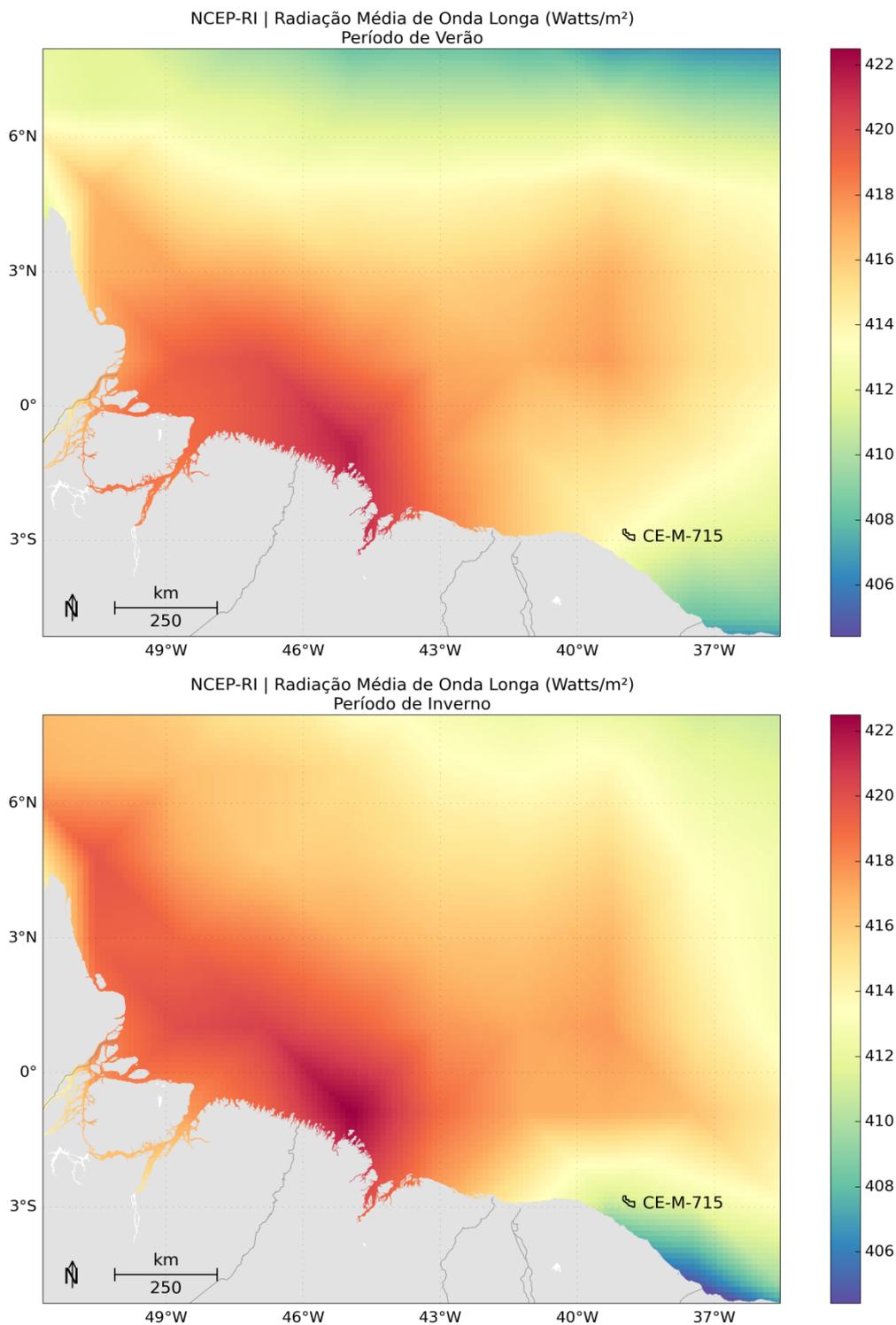


Figura 19: Campo médio dos dados de radiação de onda longa da Reanálise I utilizados como forçante para o período de verão (superior) e para o período de inverno (inferior).

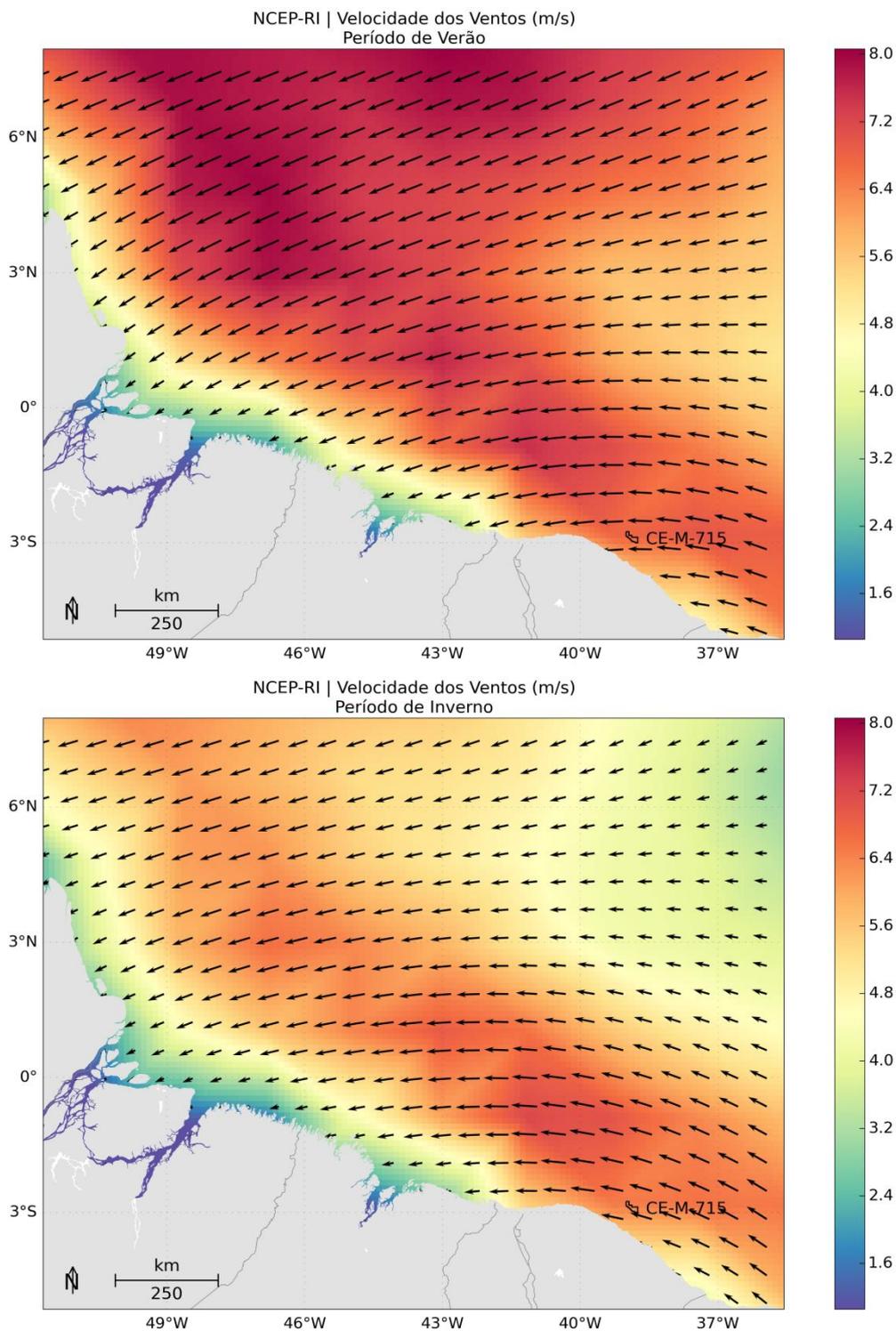


Figura 20: Campo médio dos dados de vento da Reanálise I utilizados como forçante para o período de verão (superior) e para o período de inverno (inferior).

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 $1/12^\circ$ e temporal de 1 dia. Para passar estas informações ao ROMS, os resultados do MyOcean foram interpolados em seções verticais localizadas nas bordas do modelo. Assim, a cada dia simulado, o modelo faz a leitura destas informações no contorno, propagando-as para o interior do domínio.

2.4.4 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.

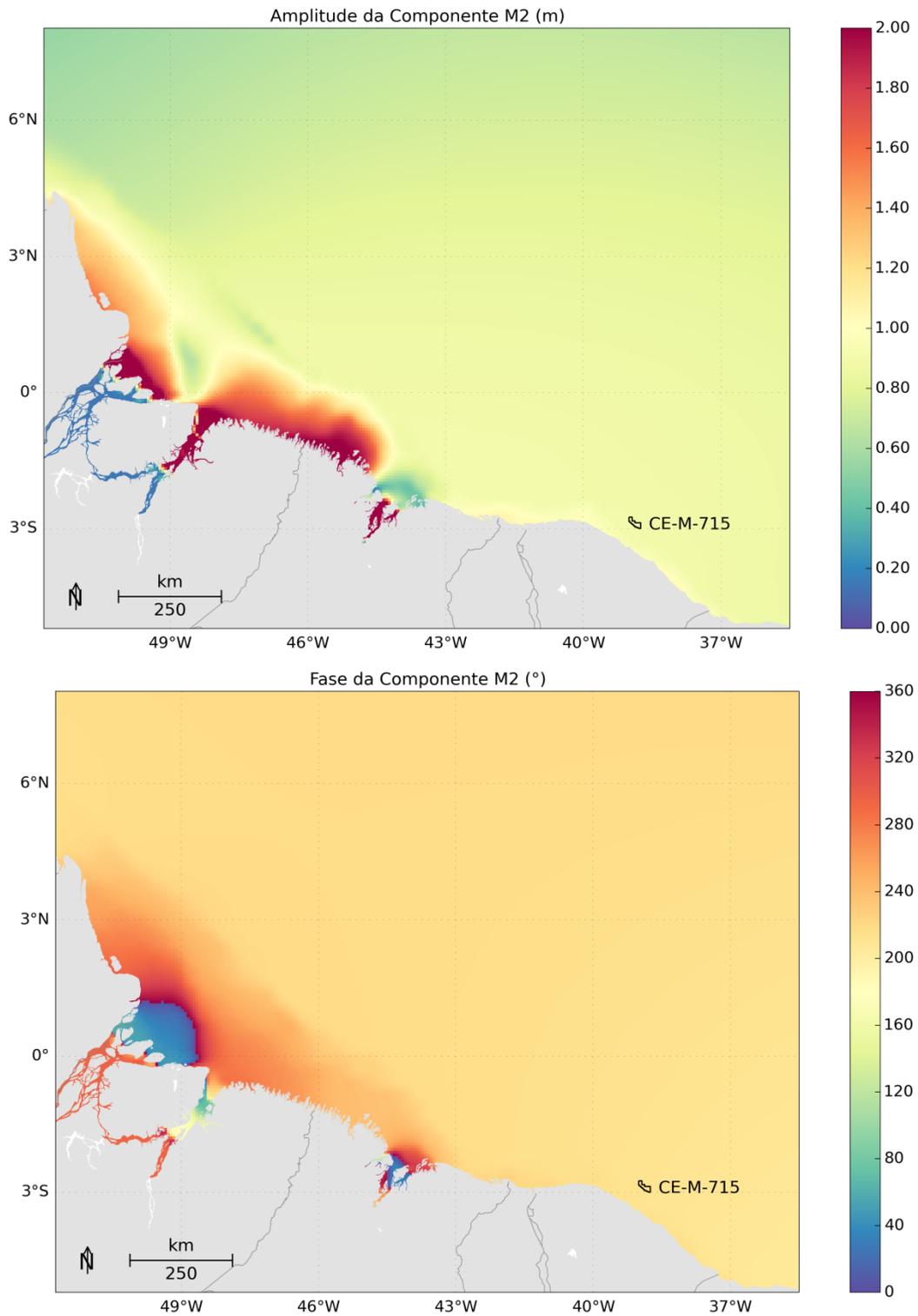


Figura 21: Mapa de amplitudes da elevação (superior) e fases (inferior) da componente M2. Fonte (TPX07)

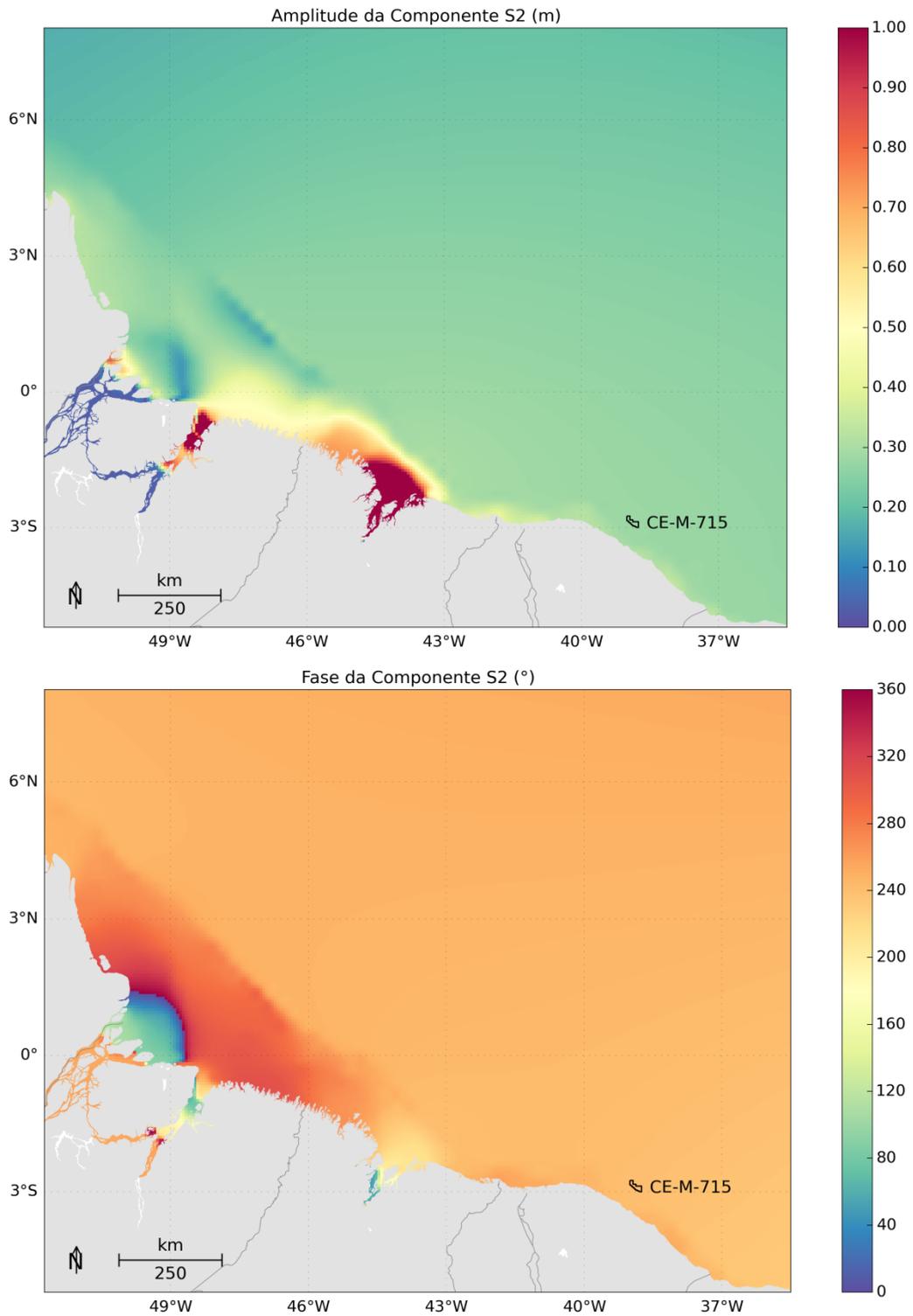


Figura 22: Mapa de amplitudes da elevação (superior) e fases (inferior) da componente S2. Fonte (TPX07).

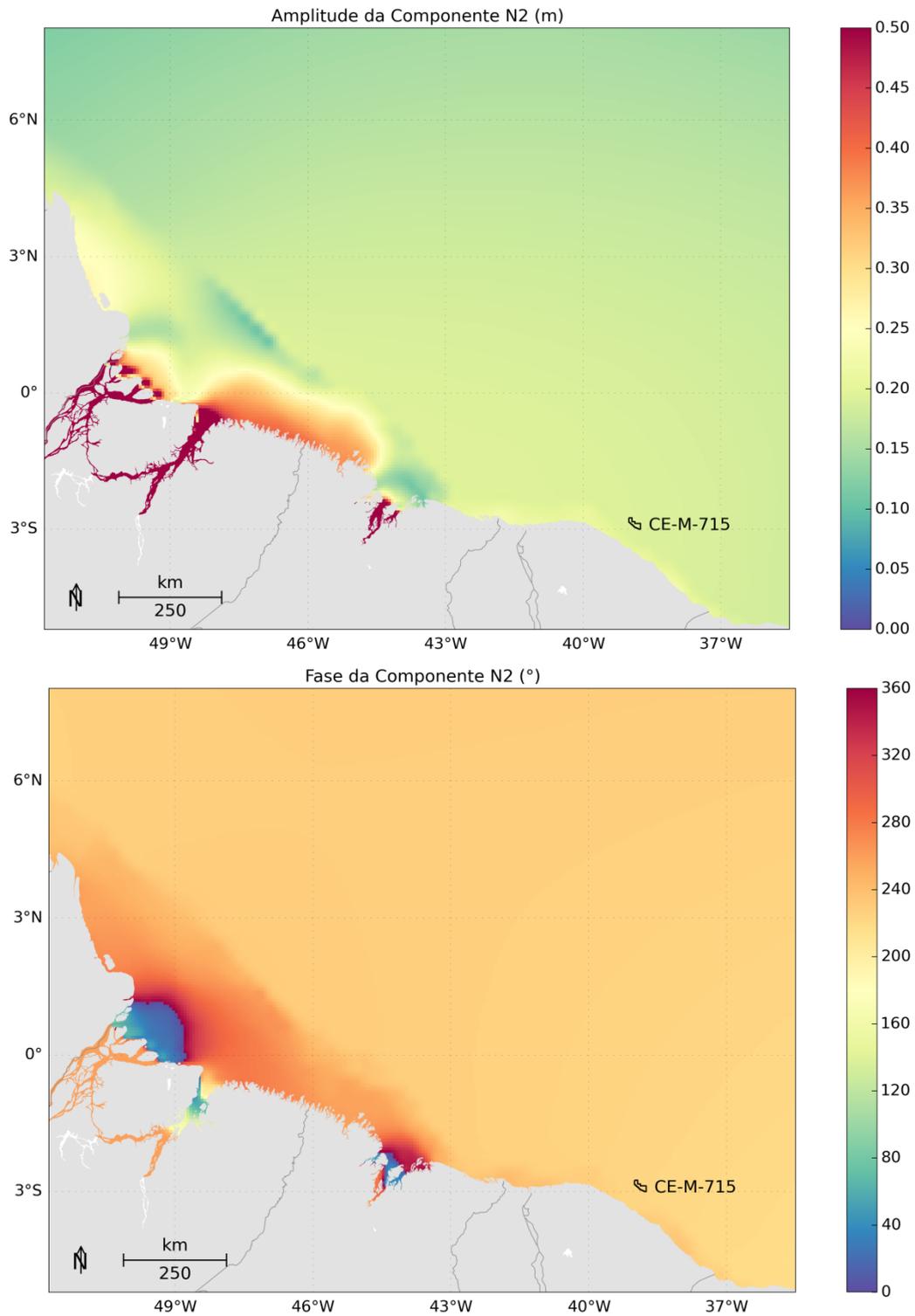


Figura 23: Mapa de amplitudes da elevação (superior) e fases (inferior) da componente N2. Fonte (TPX07)

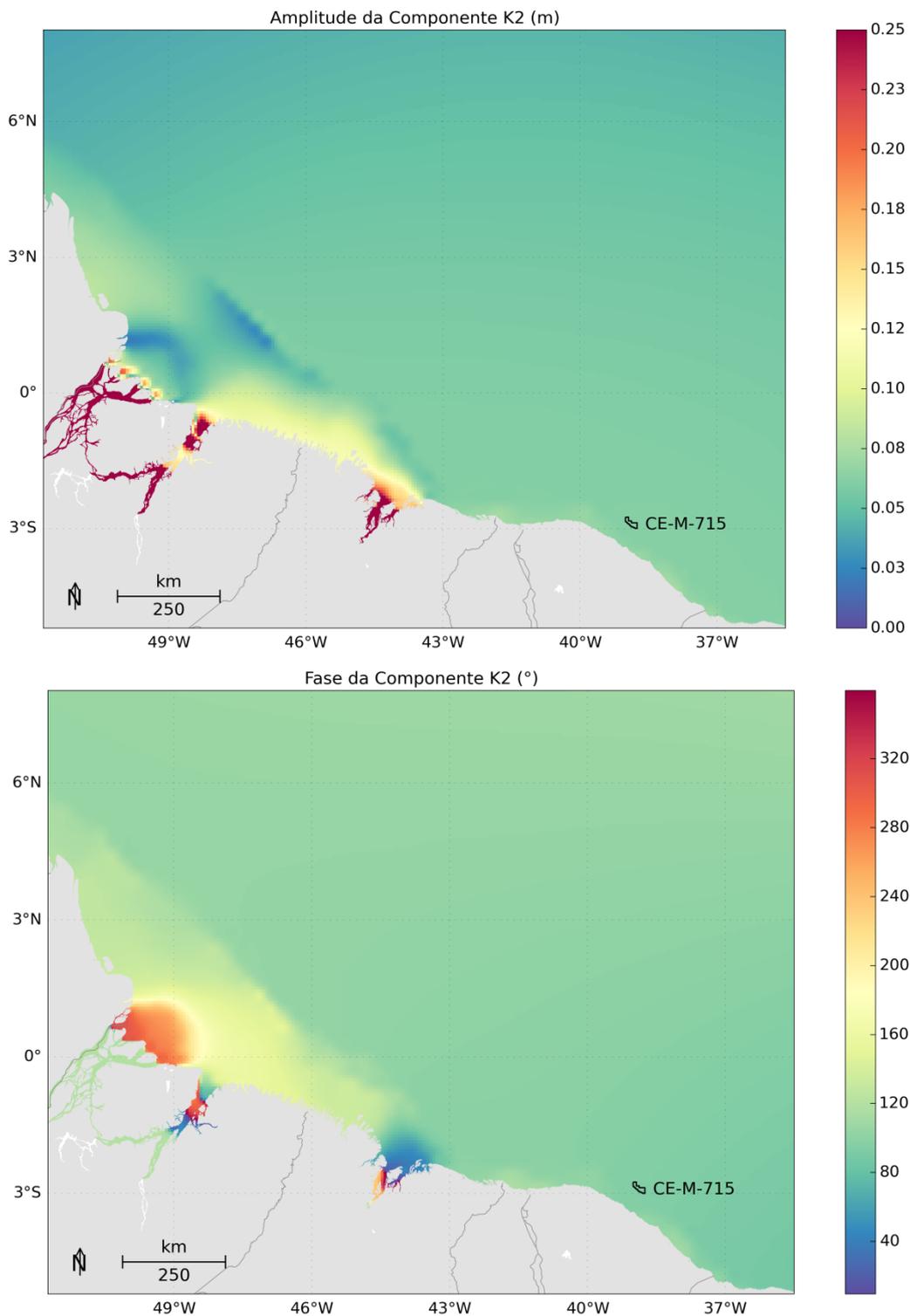


Figura 24: Mapa de amplitudes da elevação (superior) e fases (inferior) da componente K2. Fonte (TPX07).

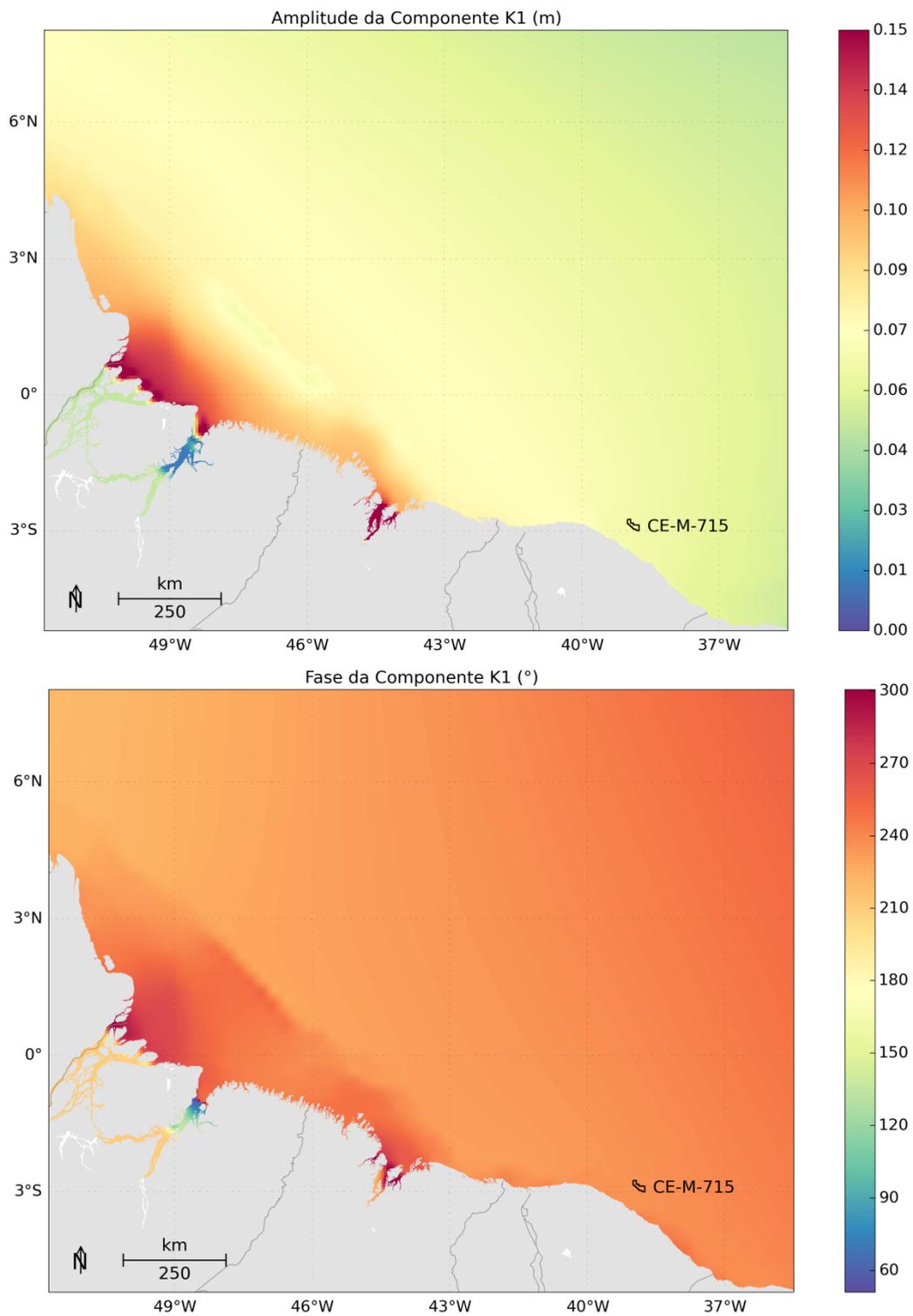


Figura 25: Mapa de amplitudes da elevação (superior) e fases (inferior) da componente K1. Fonte (TPX07).

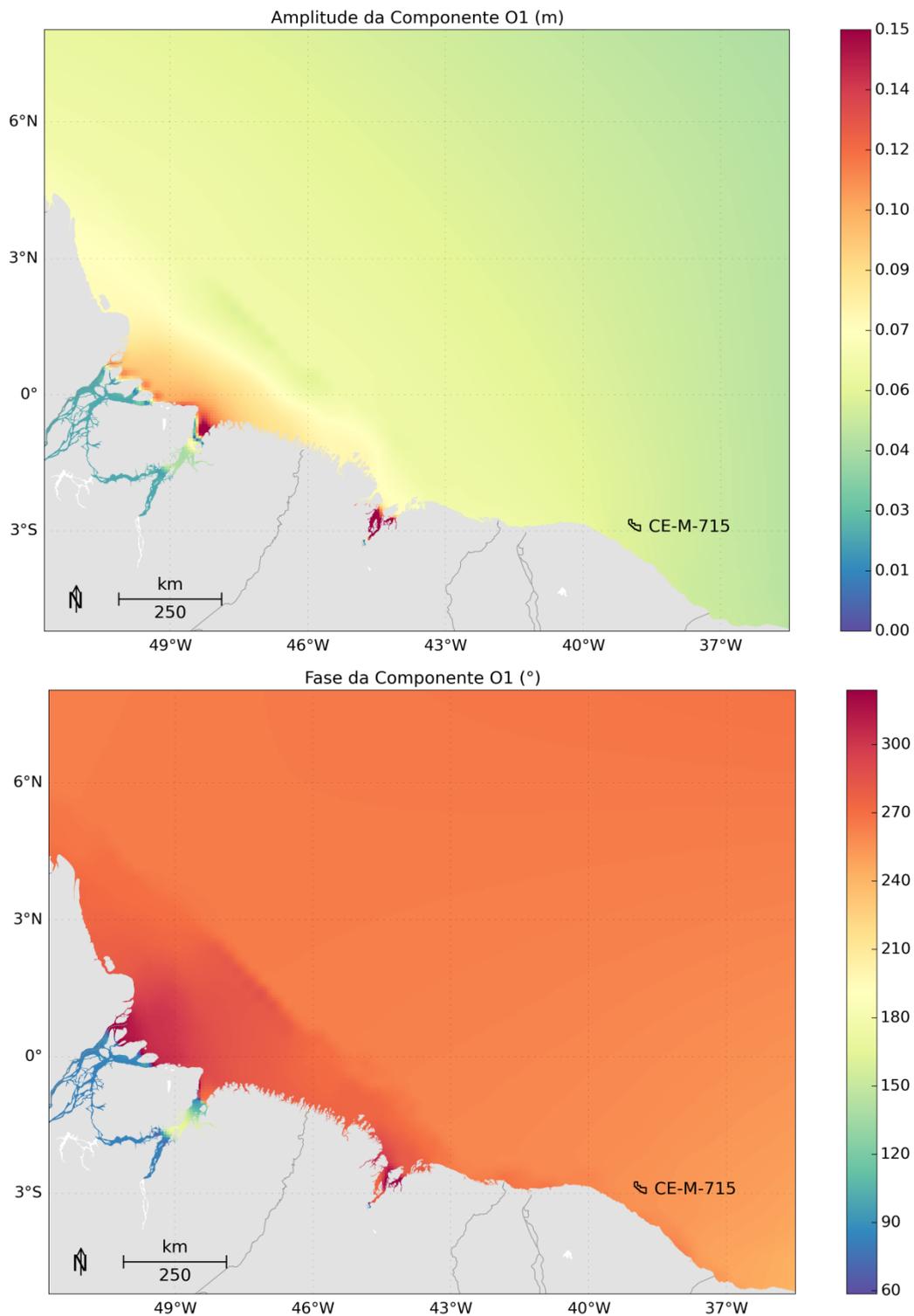


Figura 26: Mapa de amplitudes da elevação (superior) e fases (inferior) da componente O1. Fonte (TPX07).

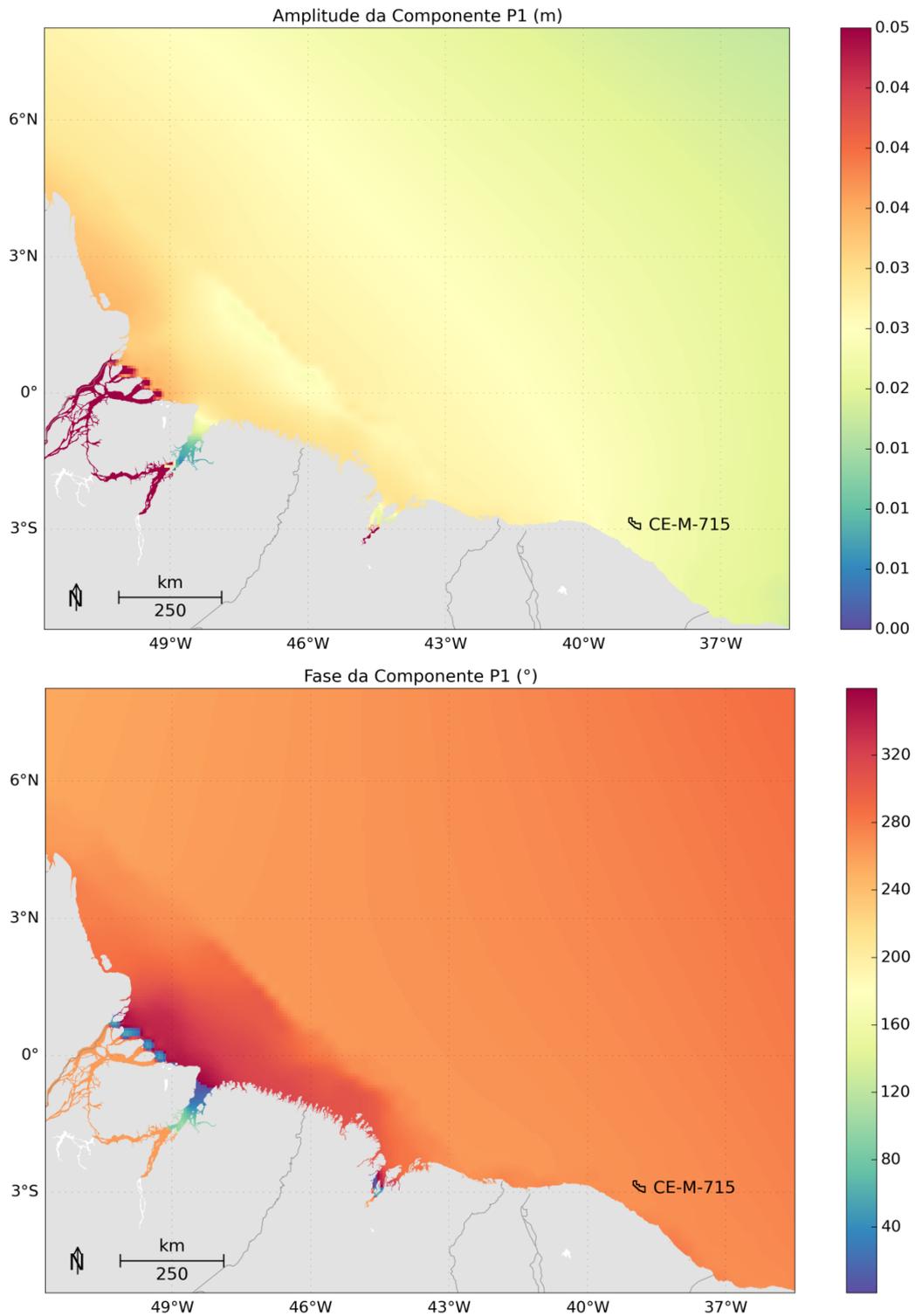


Figura 27: Mapa de amplitudes da elevação (superior) e fases (inferior) da componente P1. Fonte (TPX07).

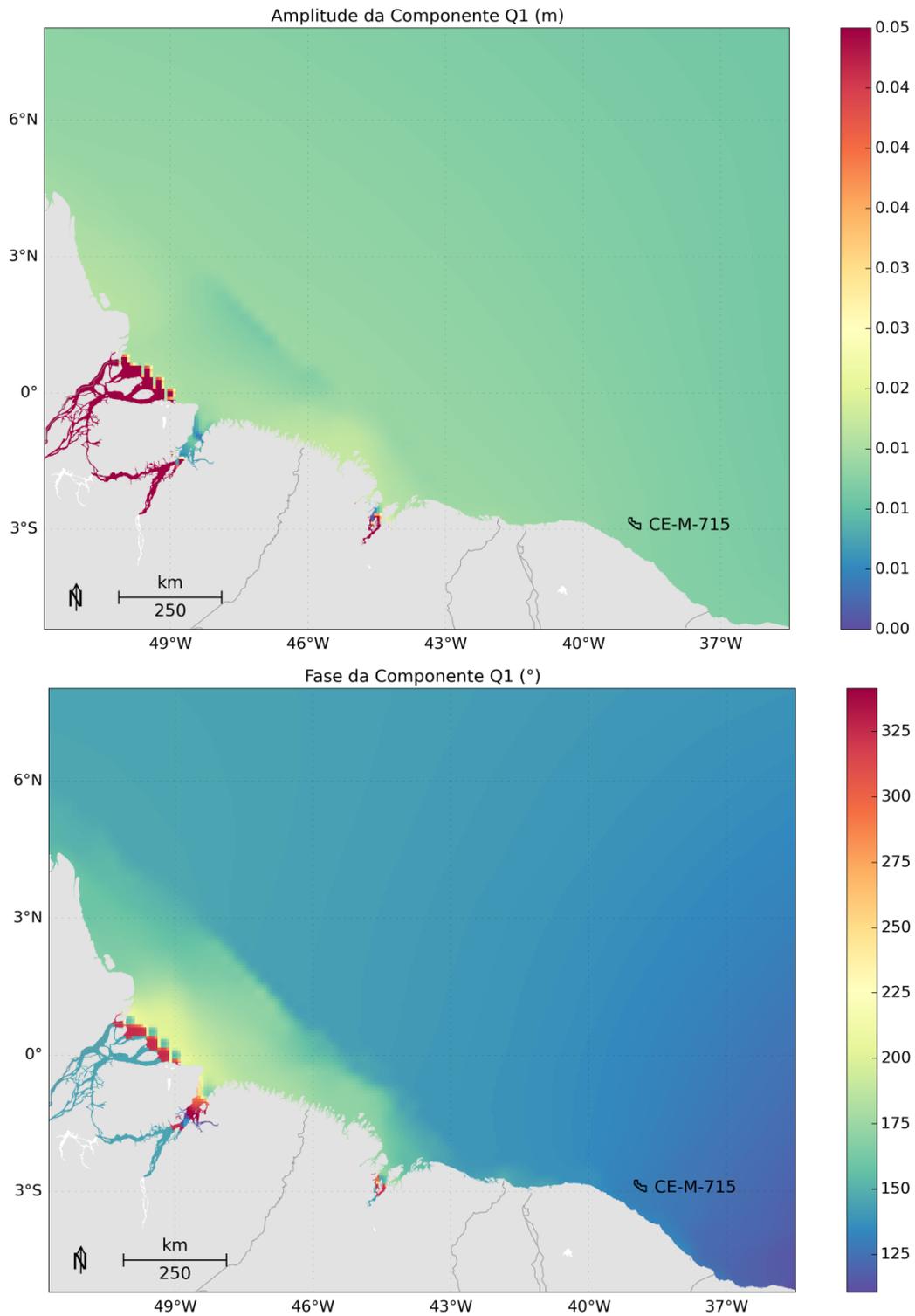


Figura 28: Mapa de amplitudes da elevação (superior) e fases (inferior) da componente Q1. Fonte (TPX07).

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 unidimensional 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 2.5 (Estabilização da Energia Cinética), o ROMS foi configurado para usar os resultados do MyOcean como condição inicial, 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 diverjam, 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.

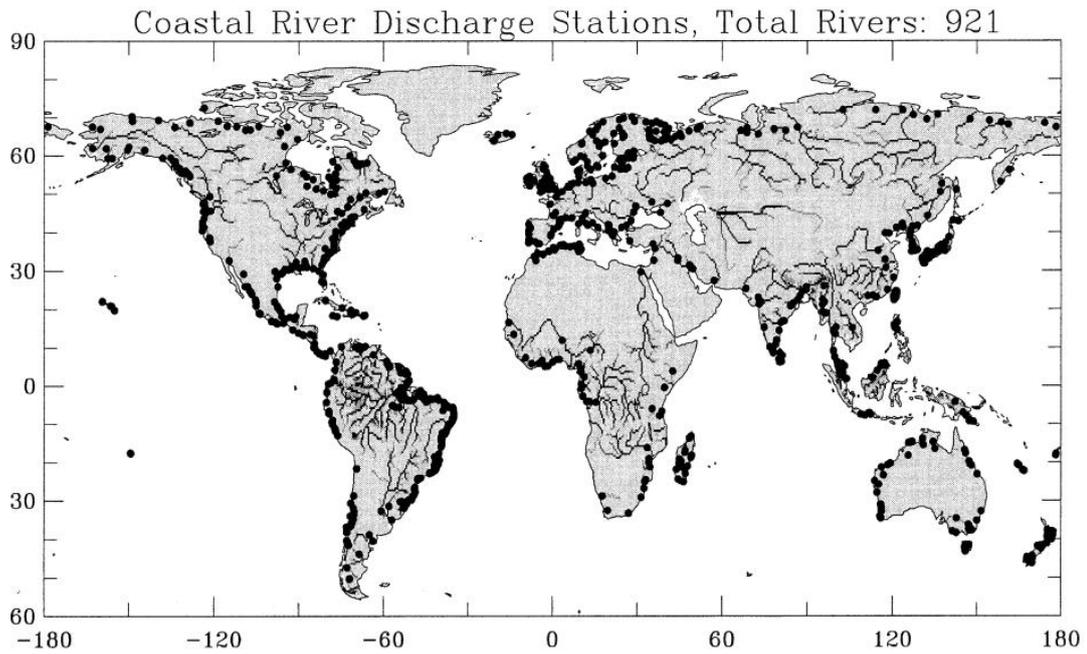


Figura 29: Estações utilizadas ao longo de todo o globo. Fonte: Dai & Trenberth (2002).

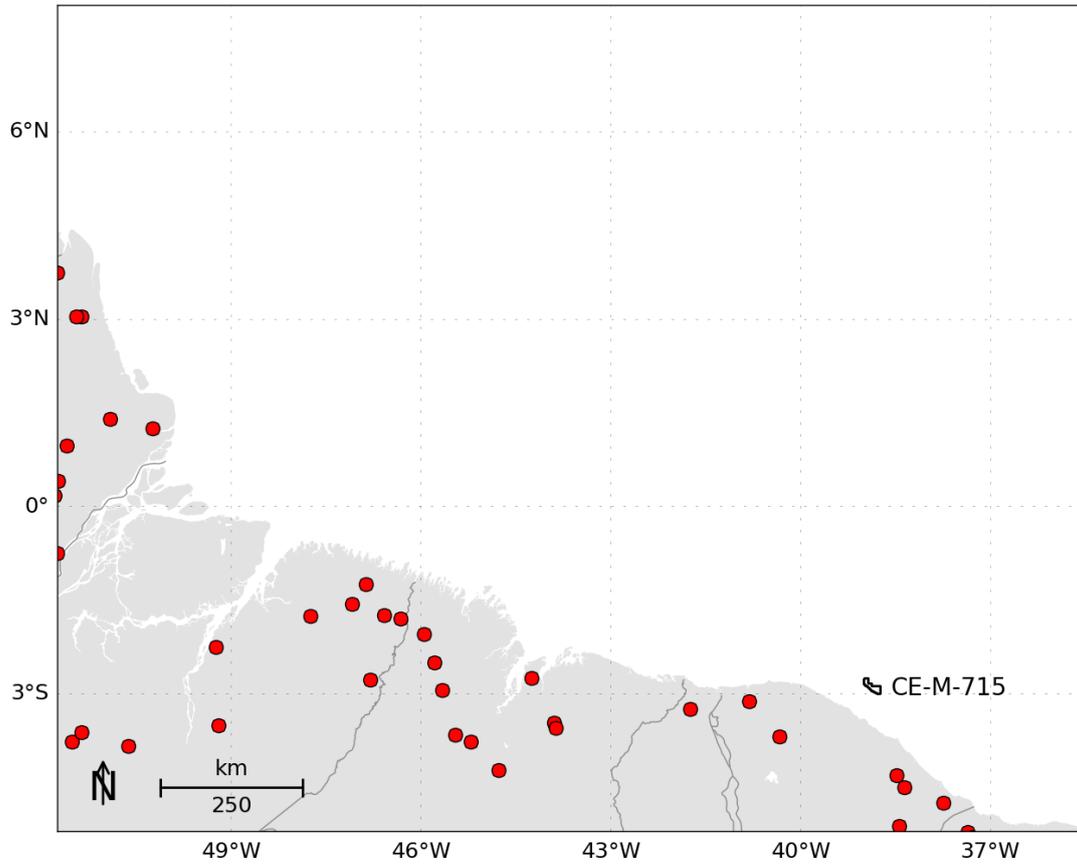


Figura 30: Estações utilizadas em Dai & Trenberth (2002), que se encontram no domínio de modelagem.

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

Rio Estudado	Longitude da Estação	Latitude da Estação
Tocantins	49,67° W	3,76° S
Araguari	51,44° W	0,71 ° N
Parnaíba	42,37° W	3,46° S
Capim	47,77° W	2,51° S
Itapecuru	44,38° W	3,63° S
Gurupi	46,32° W	1,80° S
Bacaja	51,52° W	3,77° S
Cacipore	51,37° W	3,05° N
Pindaré	45,46° W	3,66° S
Guama	47,10° W	1,56° S
Moju	49,21° W	3,51° S
Falsino	51,60° W	0,97° N
Pacajás	50,63° W	3,84° S
Munim	43,90° W	3,46° S
Mearim	44,77° W	4,22° S
Grajau	45,22° W	3,77° S
Anapu	51,37° W	3,62° S
Turiaçu	45,67° W	2,94° S
Piria	46,59° W	1,74° S
Uraim	46,80° W	2,77° S
Tartarugal Gran	50,92° W	1,40° N
Maracacume	45,96° W	2,05° S
Acaraú	40,34° W	3,69° S
Banabuiu	38,44° W	5,12° S
Caeté	46,87° W	1,25° S
Vila Nova	51,74° W	0,41° N
Coreau	40,82° W	3,12° S
Varador	51,46° W	3,04° N
Iguara	43,87° W	3,55° S
Parua	45,79° W	2,50° S
Choro	38,48° W	4,30° S
Pirangi	38,36° W	4,50° 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.

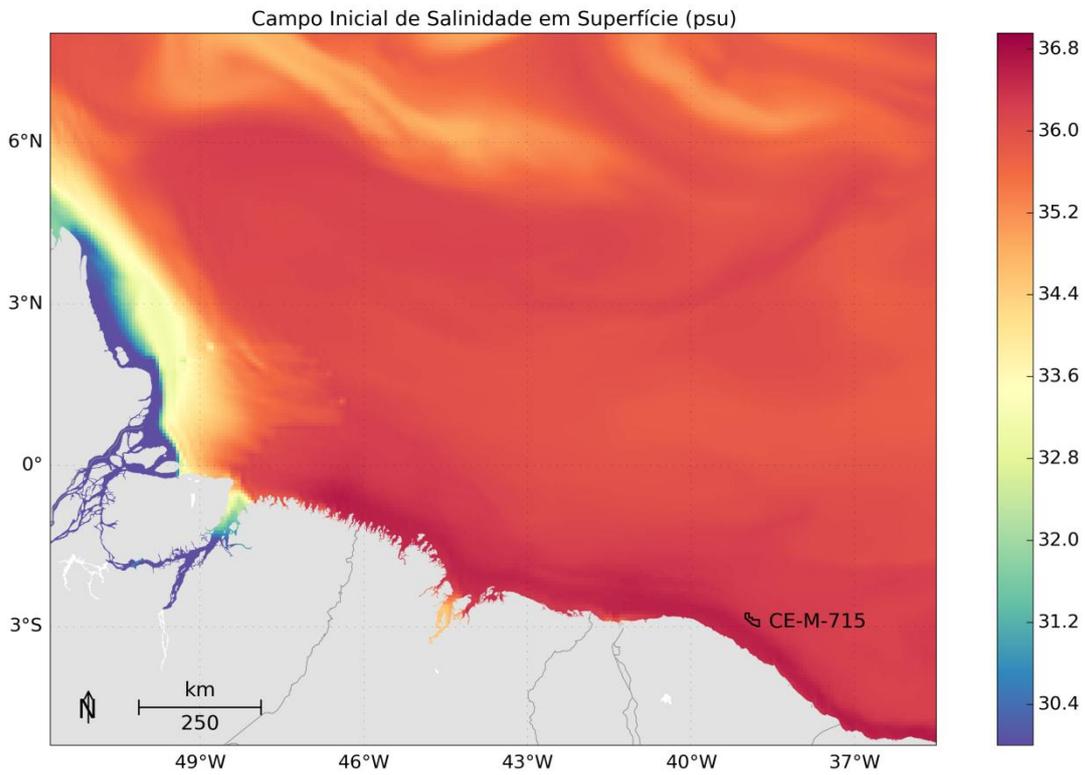


Figura 31: Campo de salinidade superficial obtido do ROMS para o dia 08 de maio de 2013.

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:

$$\Delta\phi = \frac{Dt}{T}(\phi - \phi^{\text{ext}}) \quad (8)$$

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

O emprego desta técnica tem o objetivo de 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.

Consequentemente, 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).

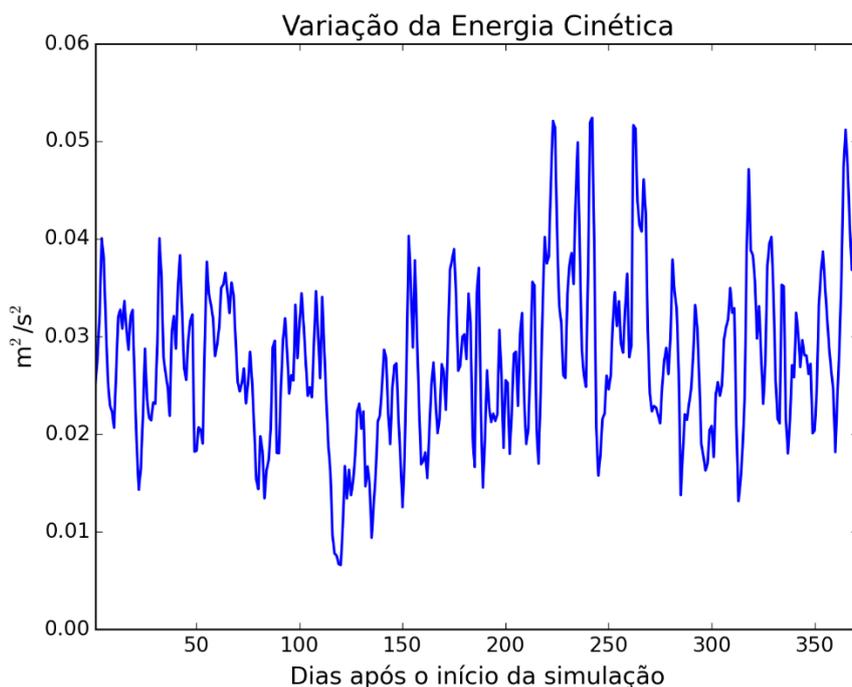


Figura 32: Variação da energia cinética média em superfície ao longo da simulação.

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.

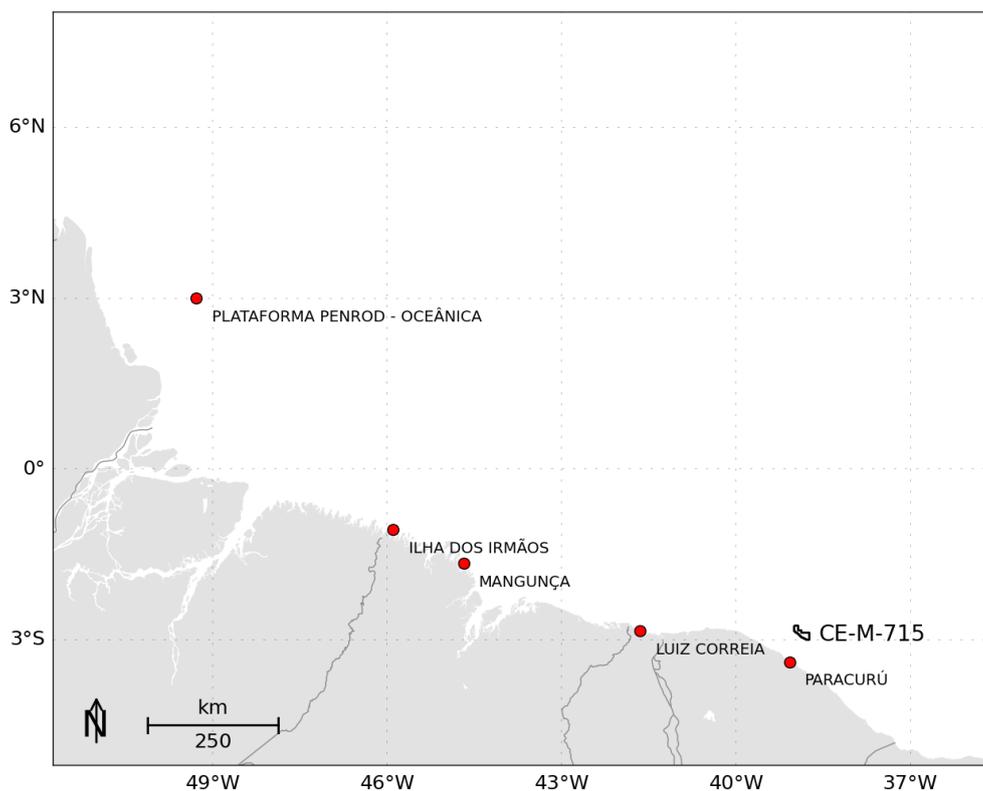


Figura 33: Localização das estações mareográficas da FEMAR, utilizadas na avaliação da representação da maré no modelo.

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.

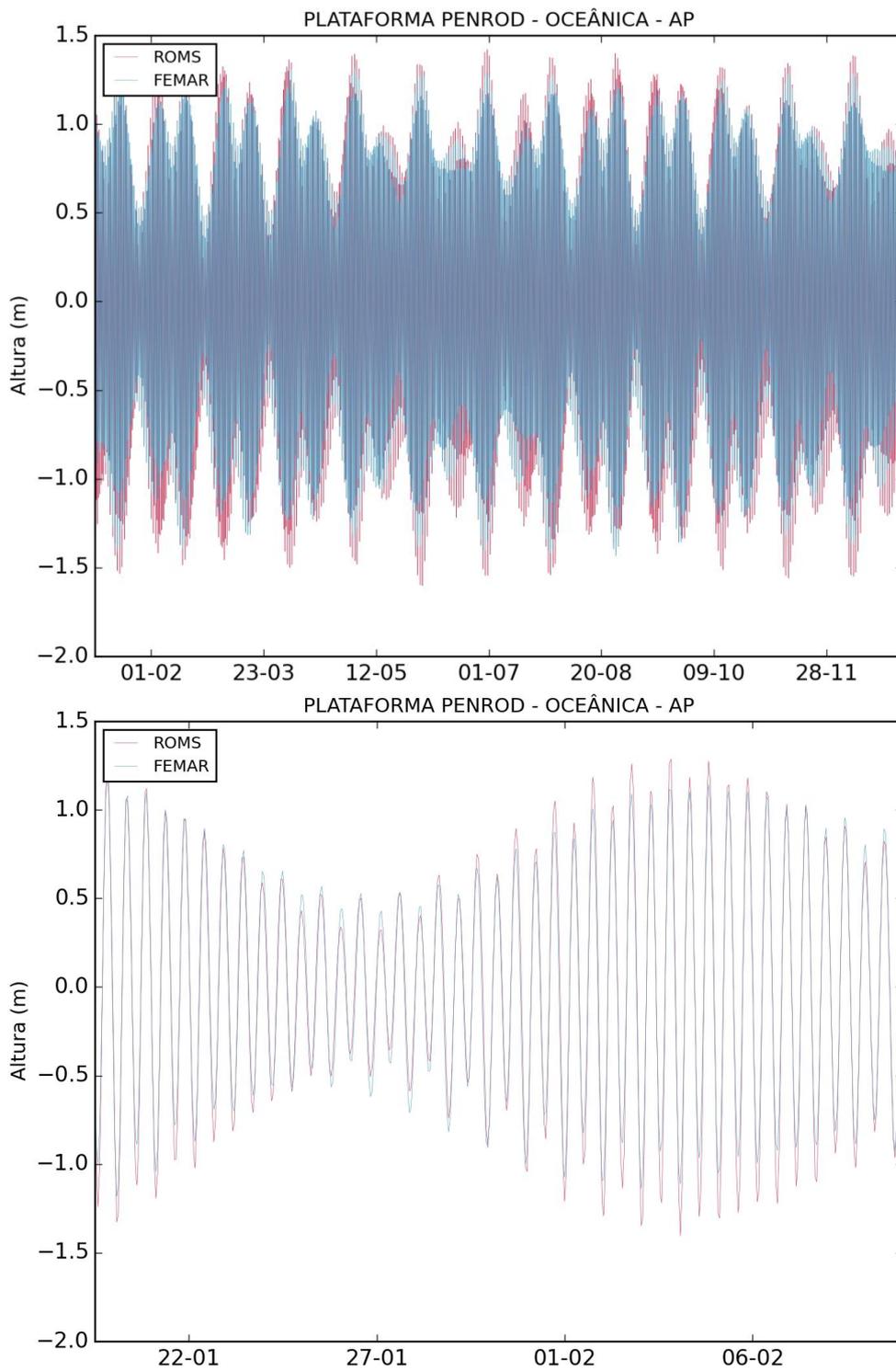


Figura 34: Comparação entre a série maregráfica da estação de Penrod (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).

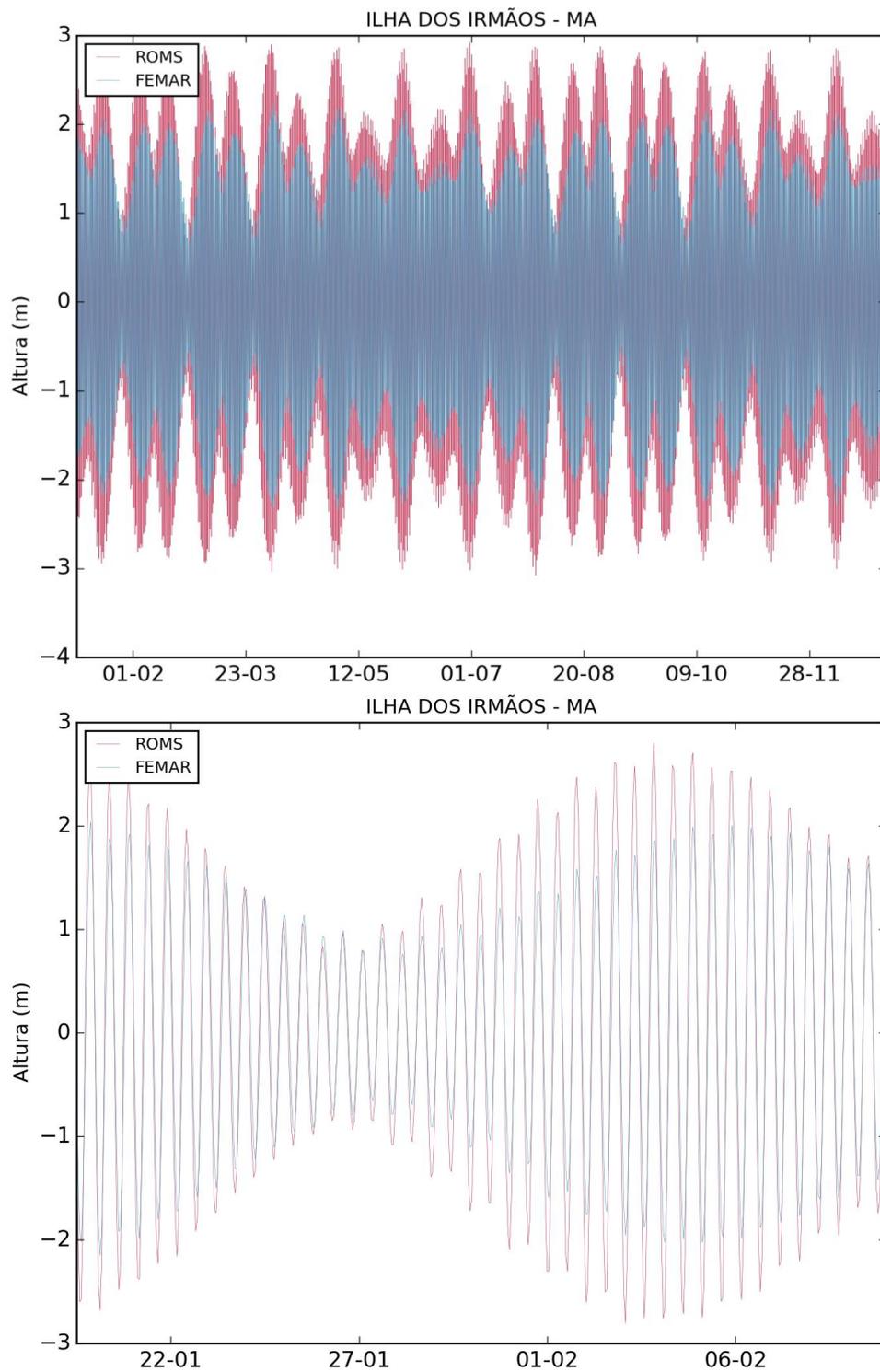


Figura 35: Comparação entre a série maregráfica da estação da Ilha dos Irmãos (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).

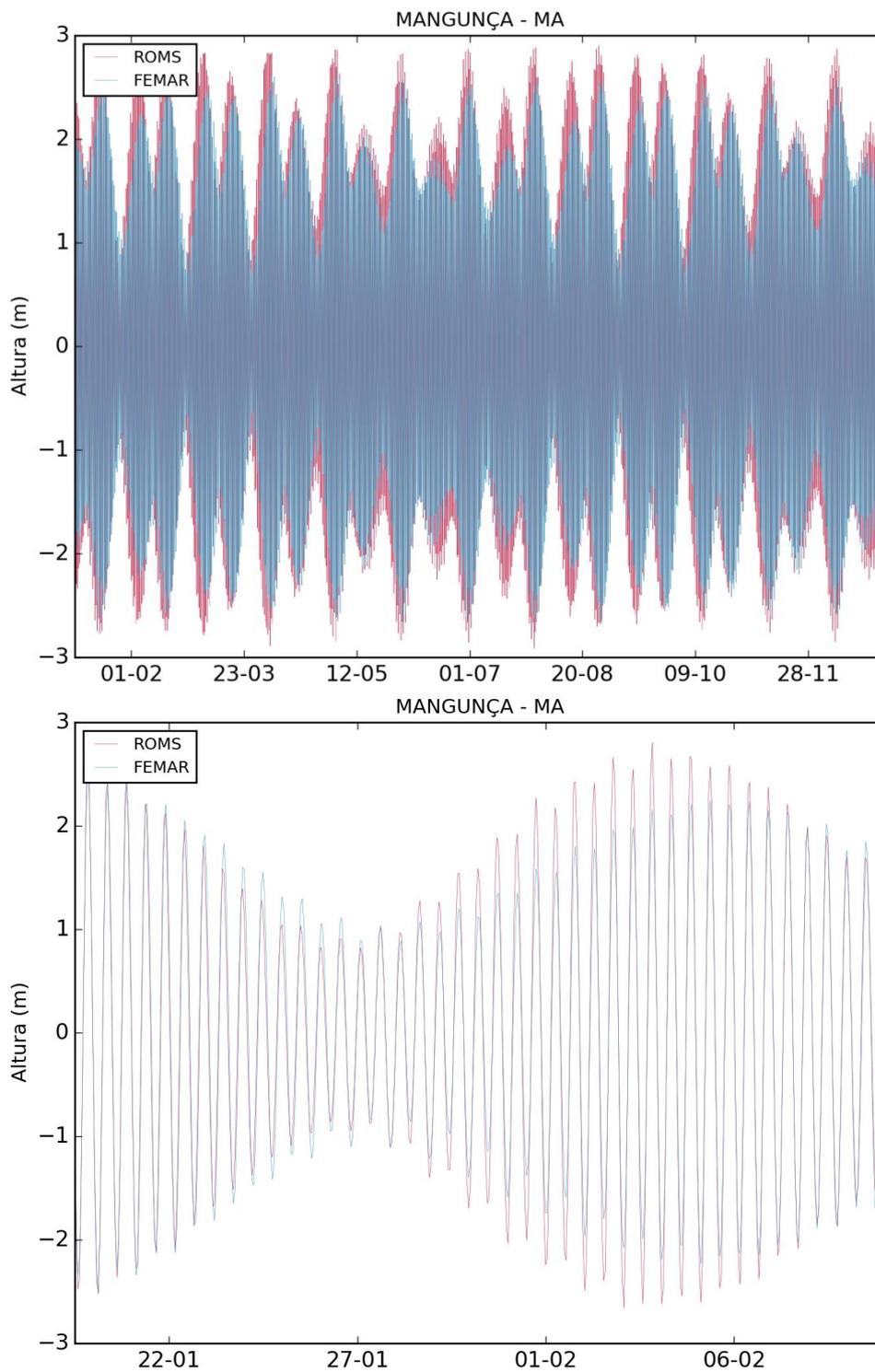


Figura 36: Comparação entre a série maregráfica da estação de Mangunça (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).

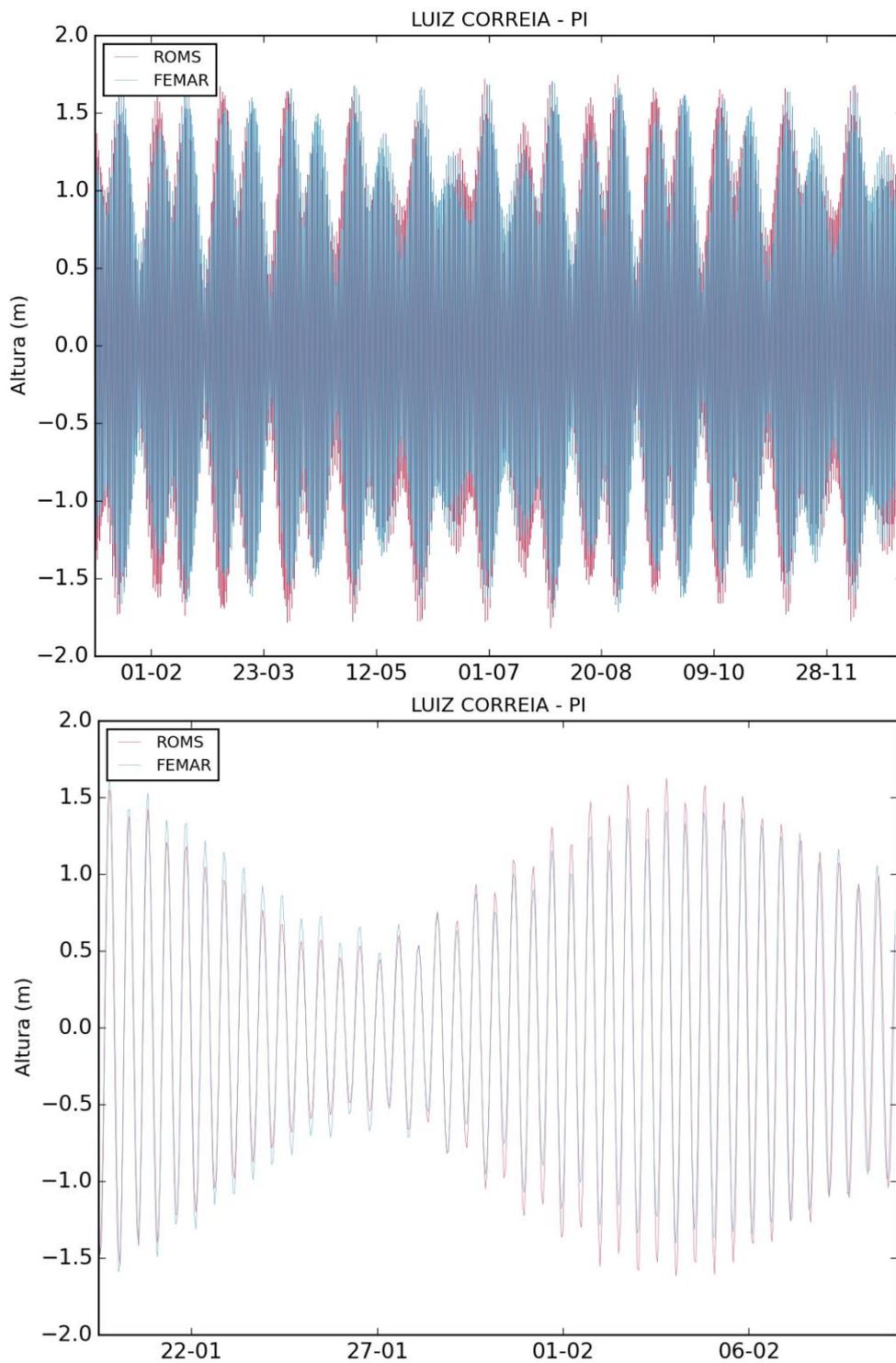


Figura 37: Comparação entre a série maregráfica da estação de Luiz Correia (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).

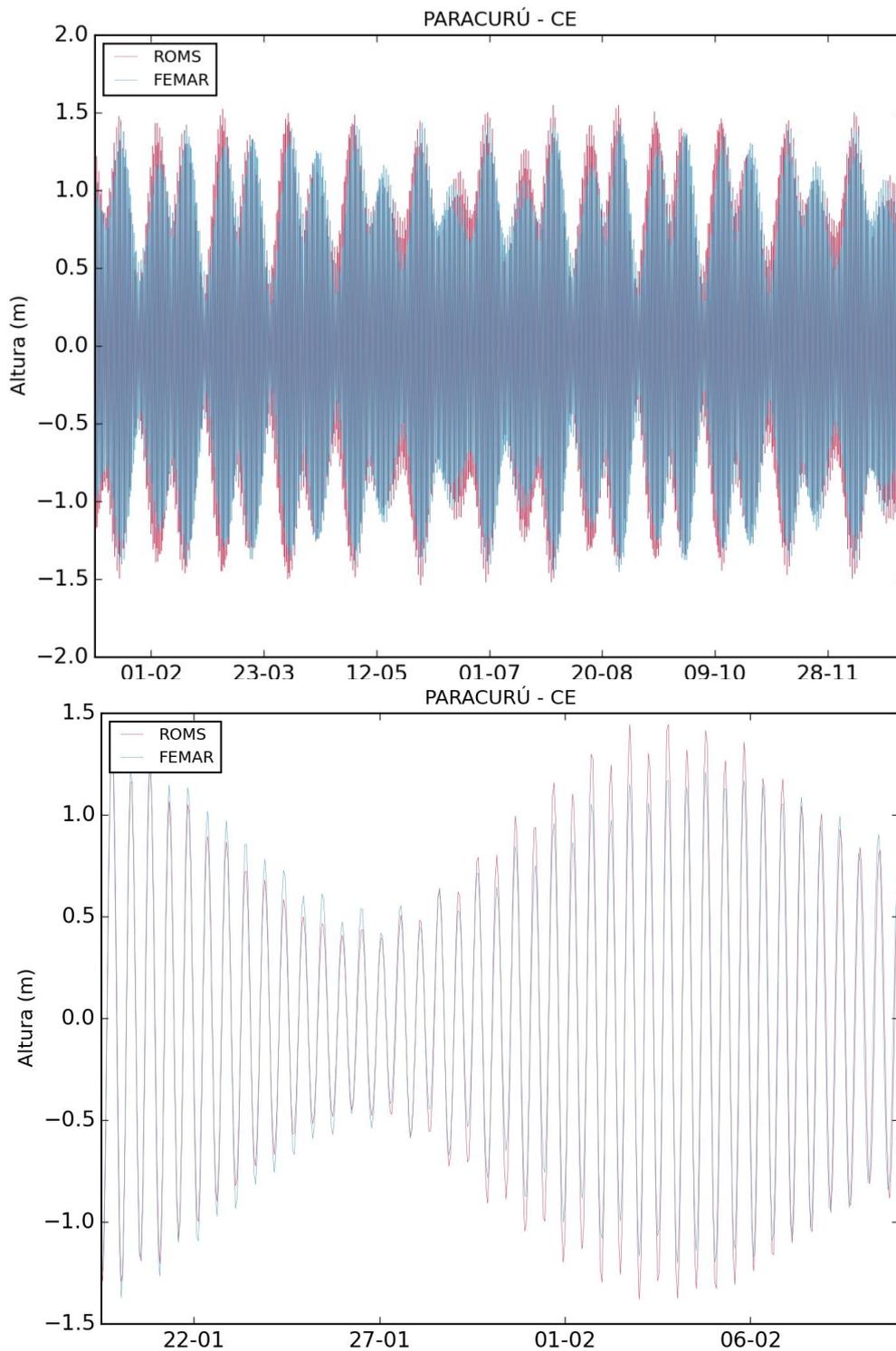


Figura 38: Comparação entre a série maregráfica da estação de Paracurú (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).

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
Manguça	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 bons resultados na maioria dos casos, 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.

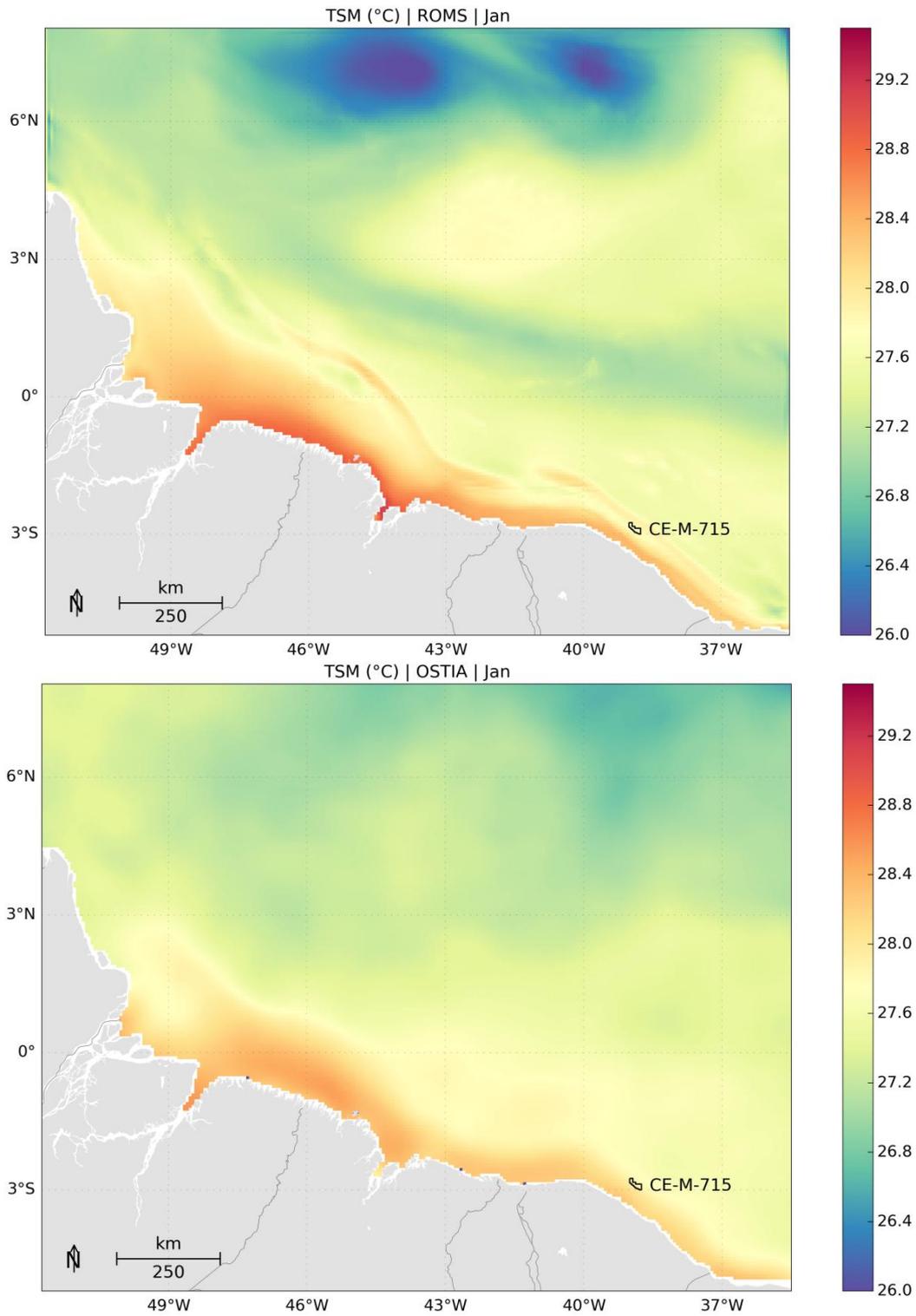


Figura 39: TSM média para janeiro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

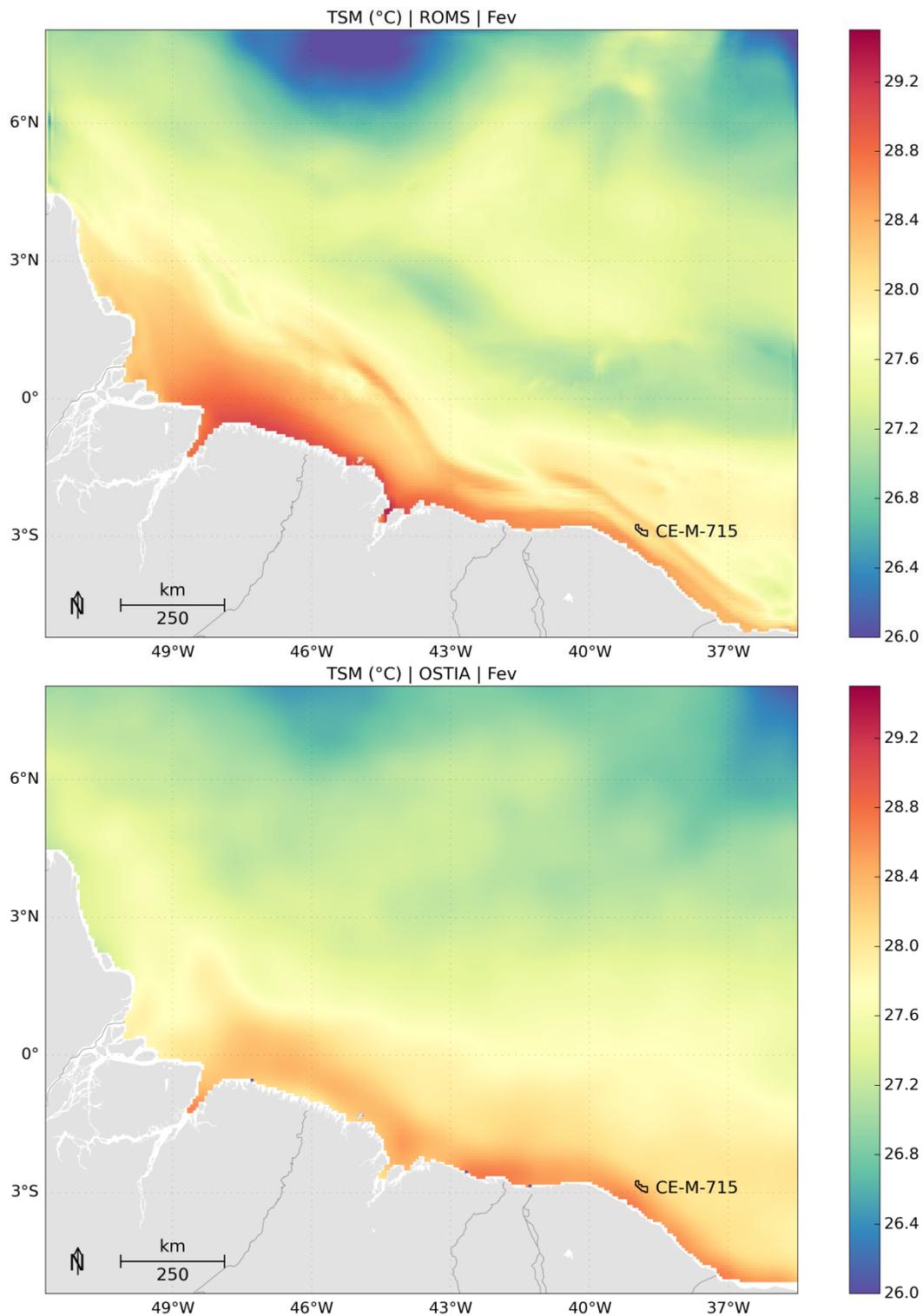


Figura 40: TSM média para fevereiro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

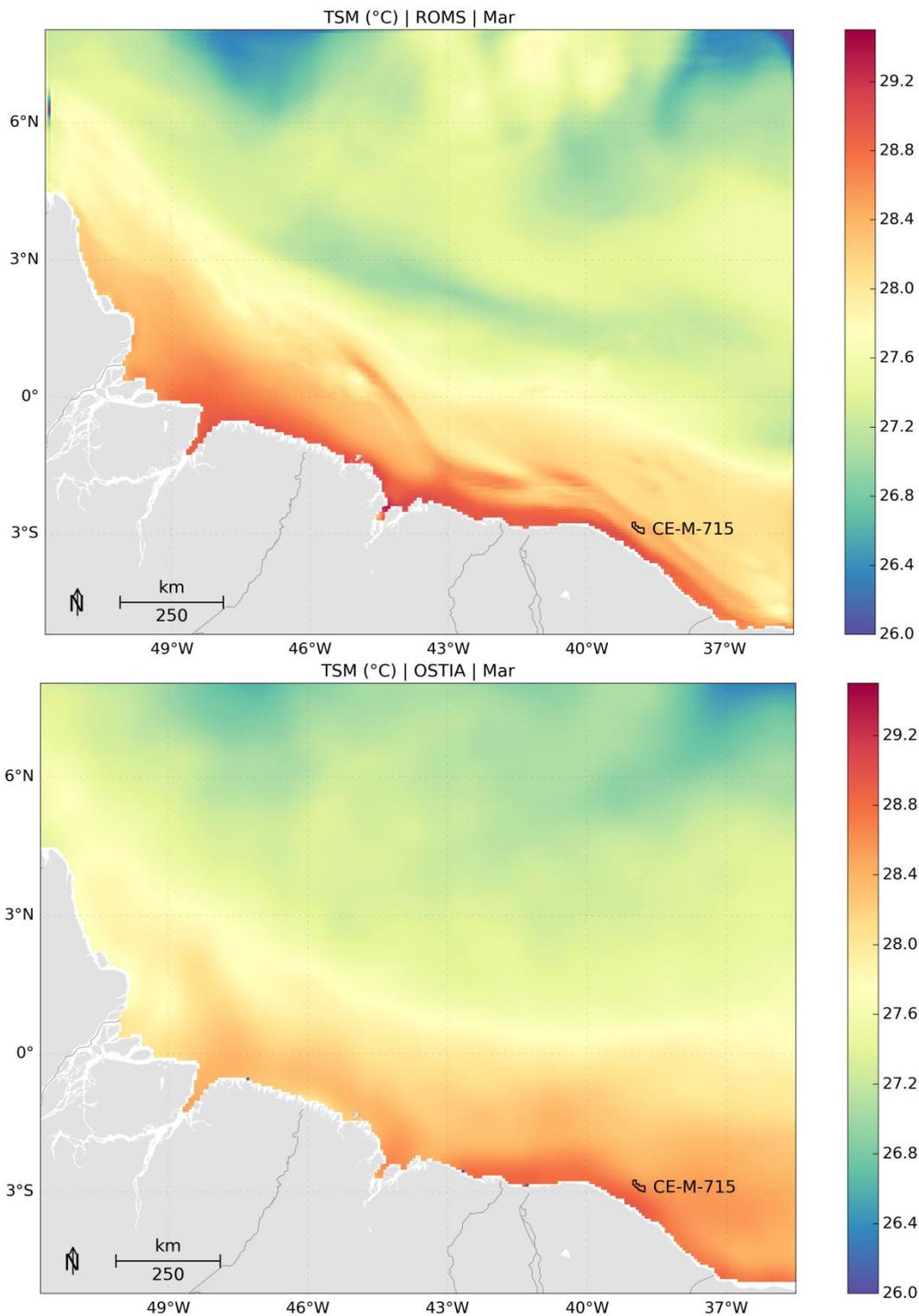


Figura 41: TSM média para março de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

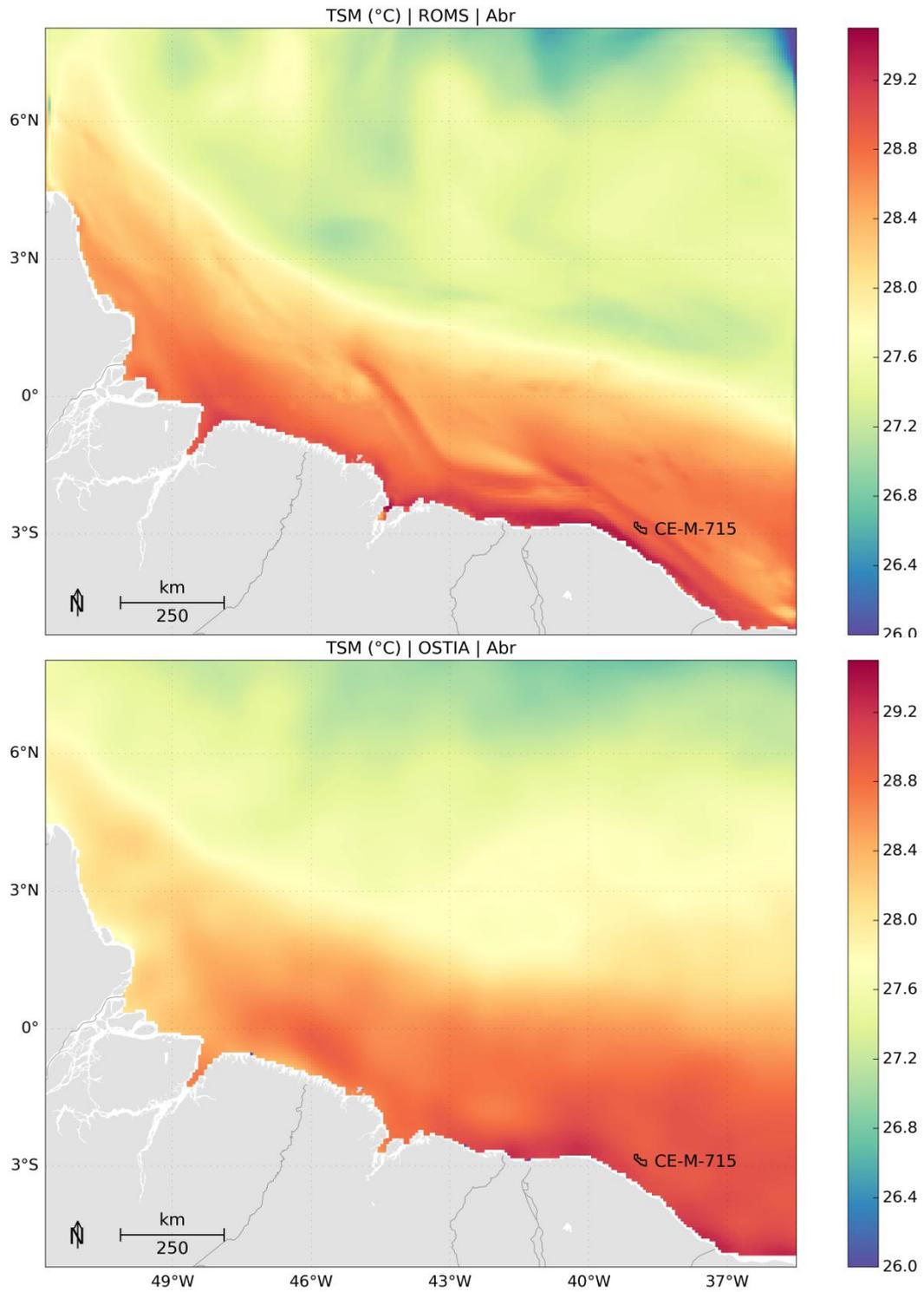


Figura 42: TSM média para abril de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

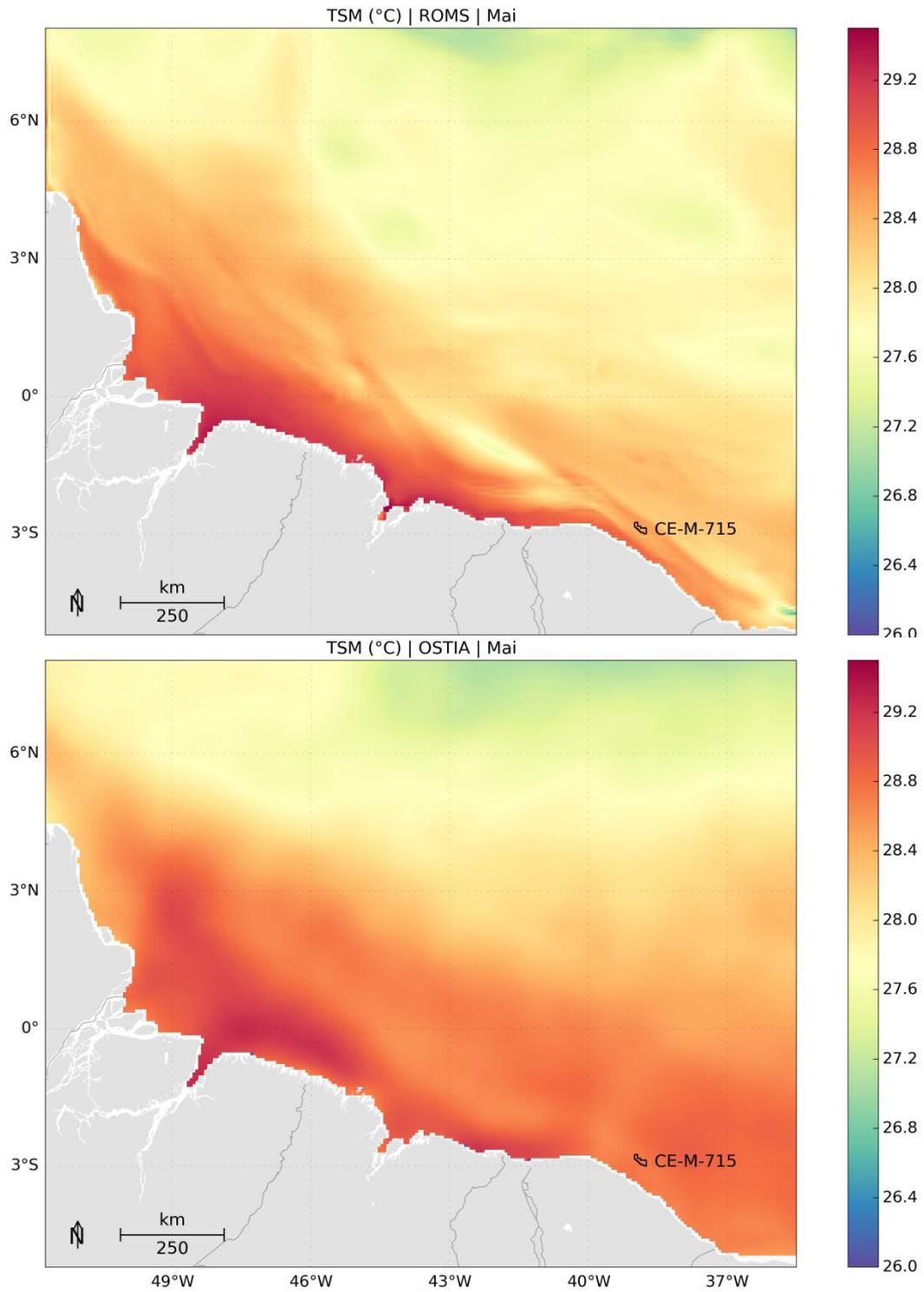


Figura 43: TSM média para maio de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

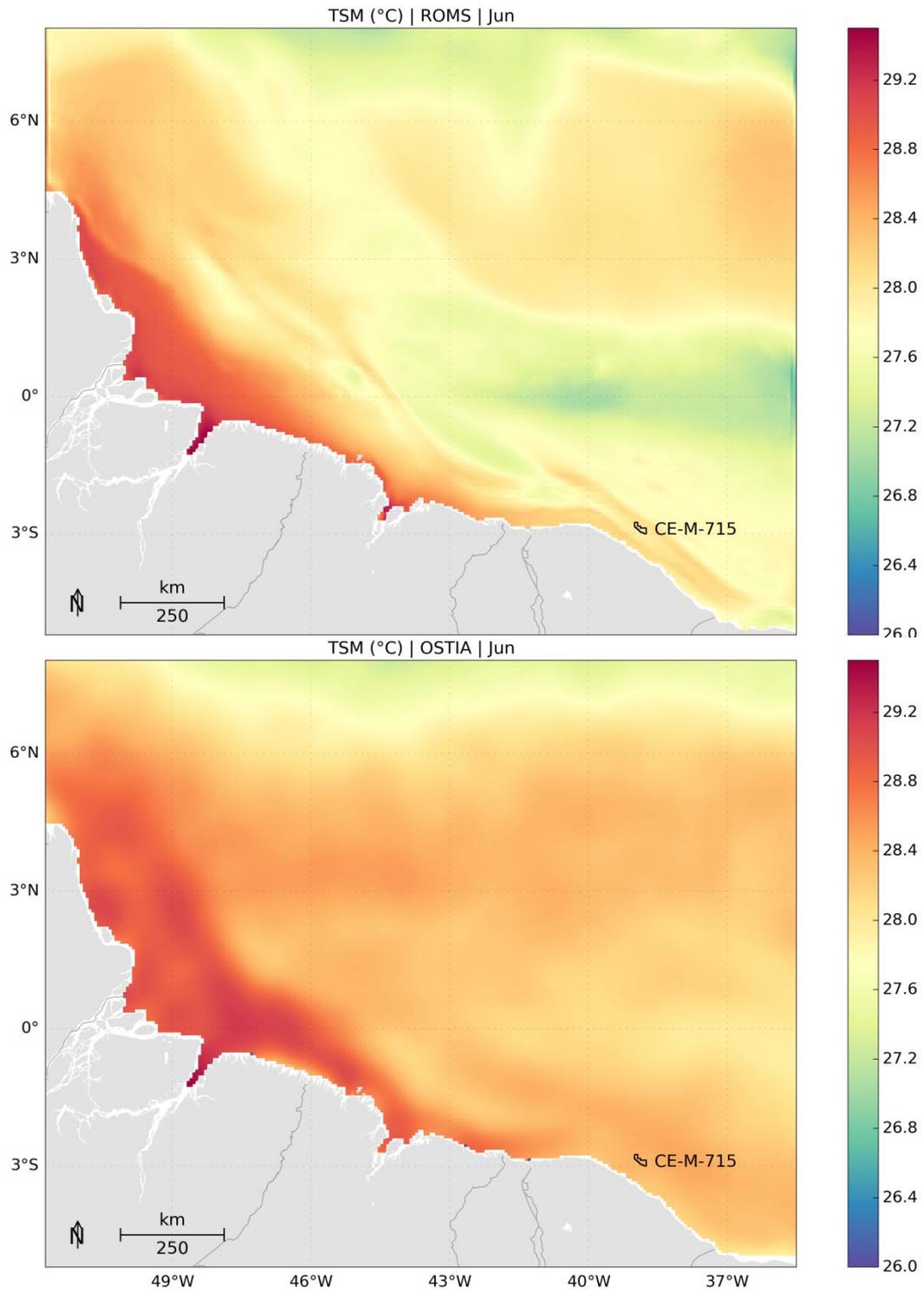


Figura 44: TSM média para junho de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

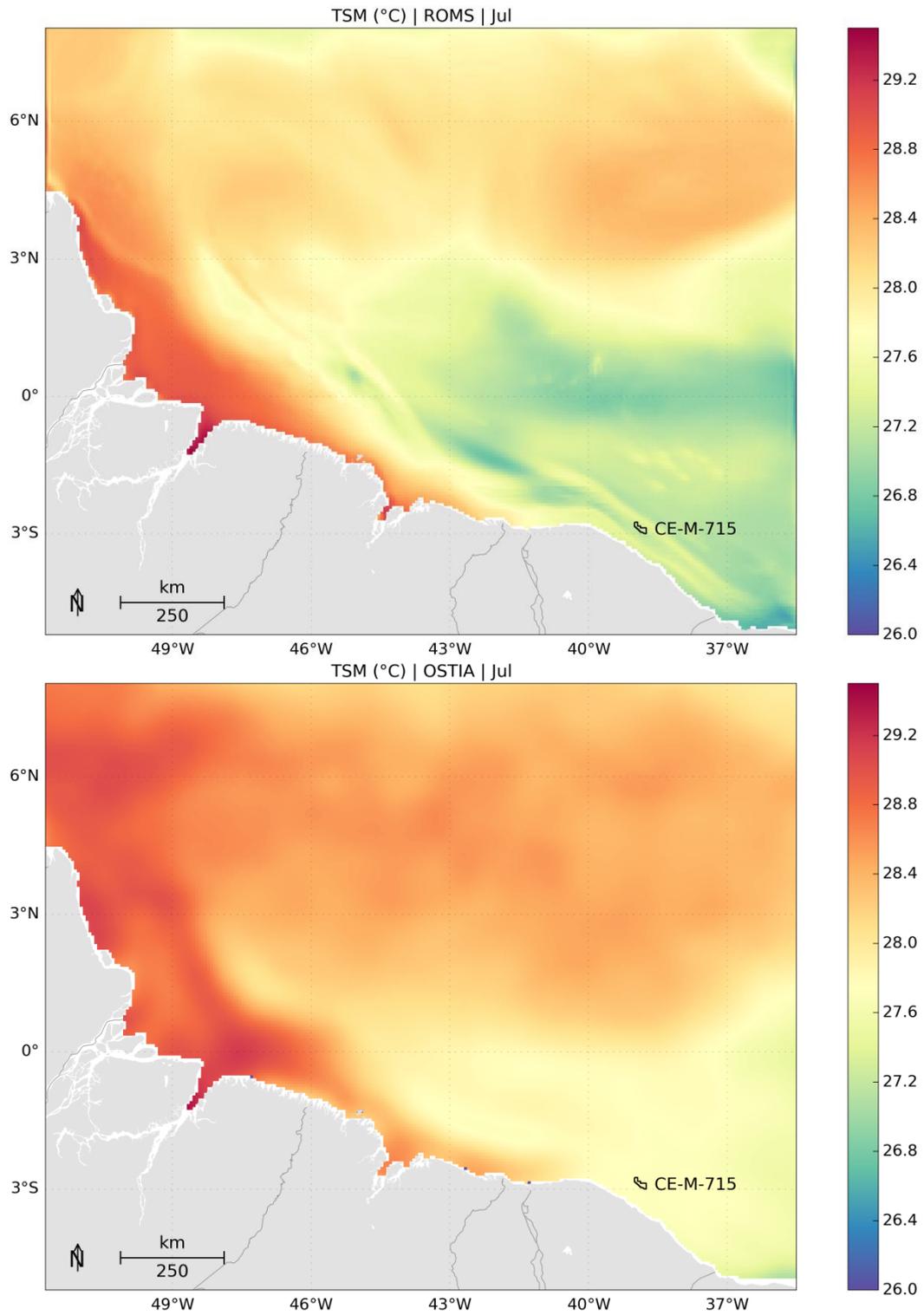


Figura 45: TSM média para julho de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

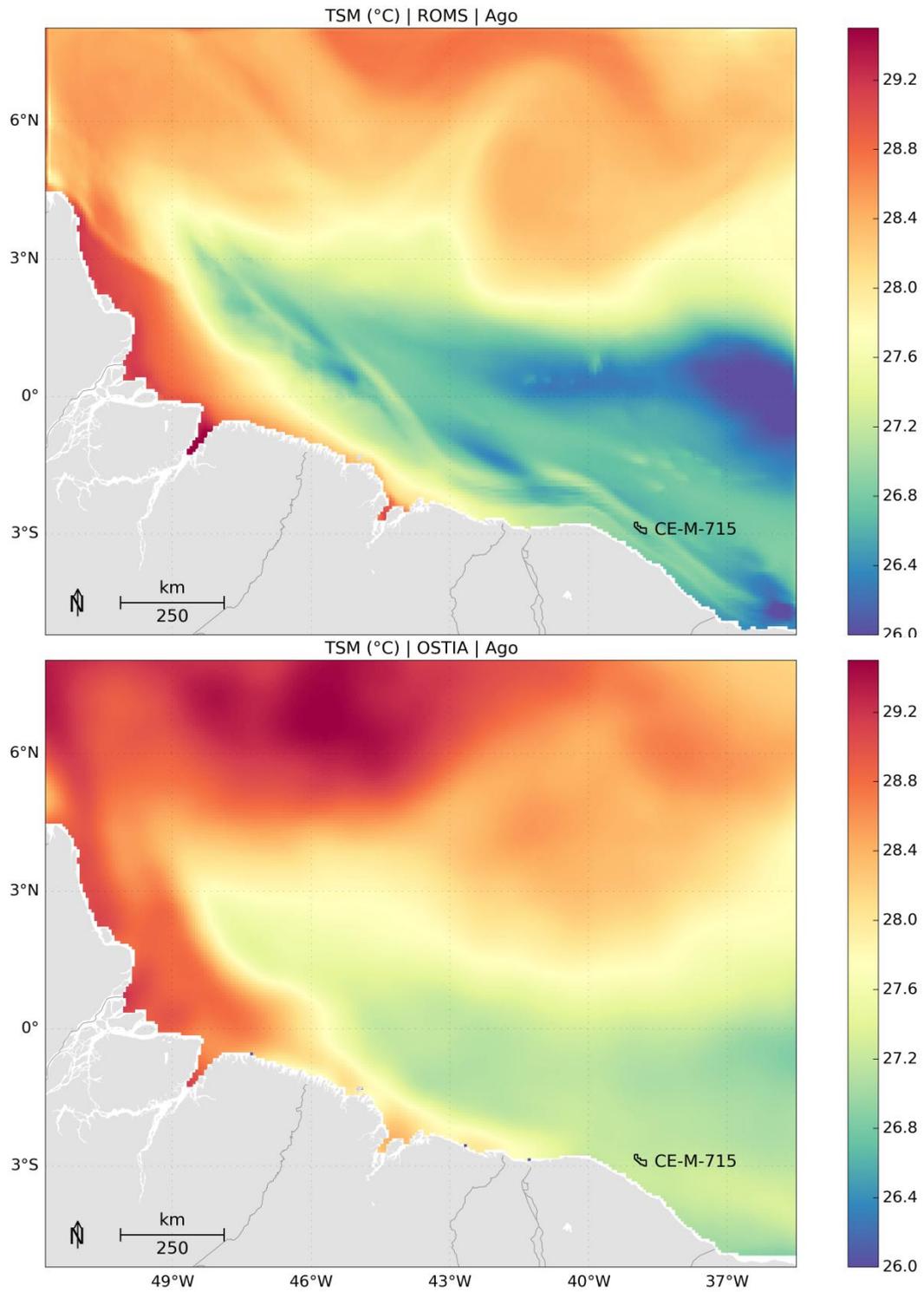


Figura 46: TSM média para agosto de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

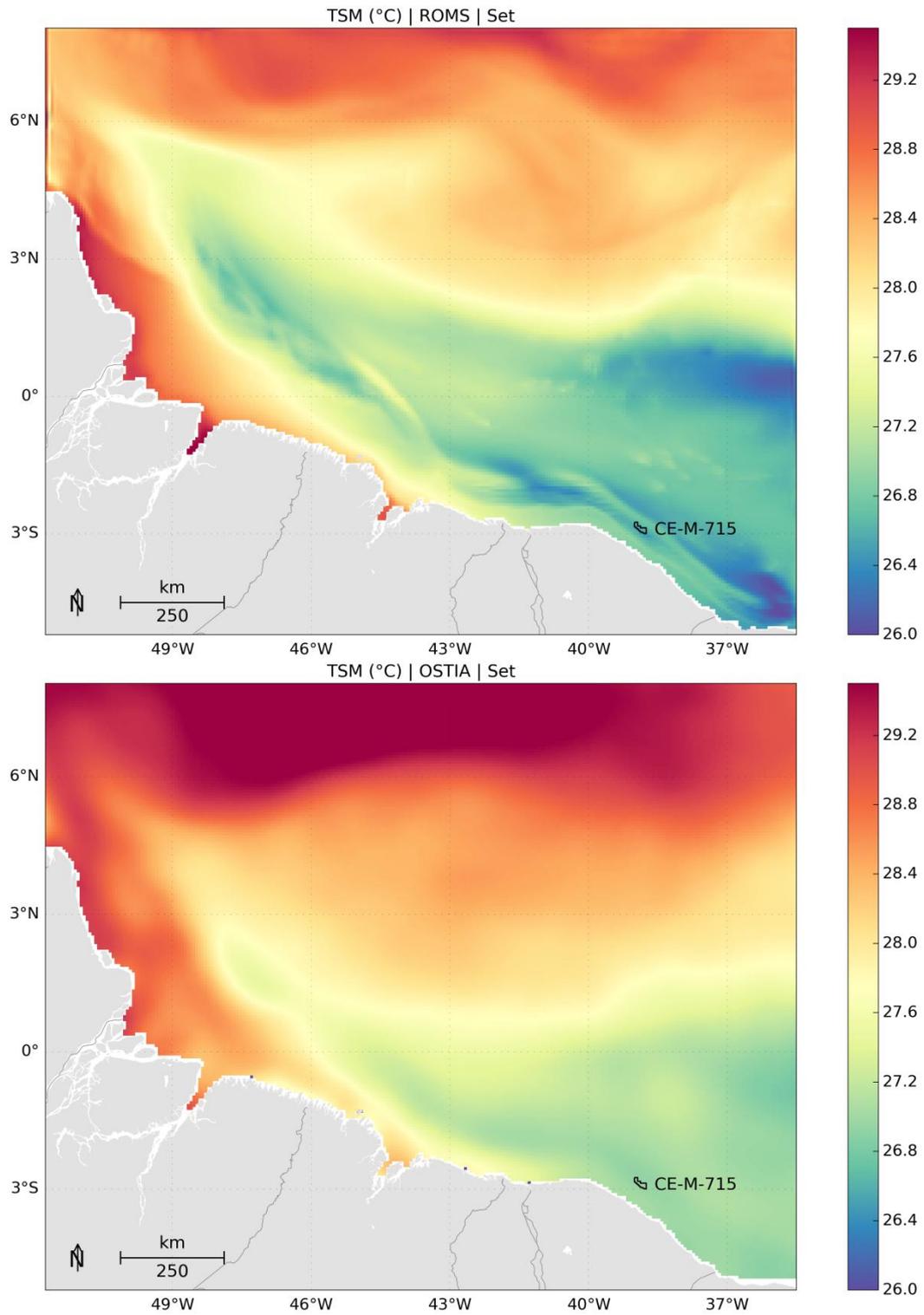


Figura 47: TSM média para setembro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

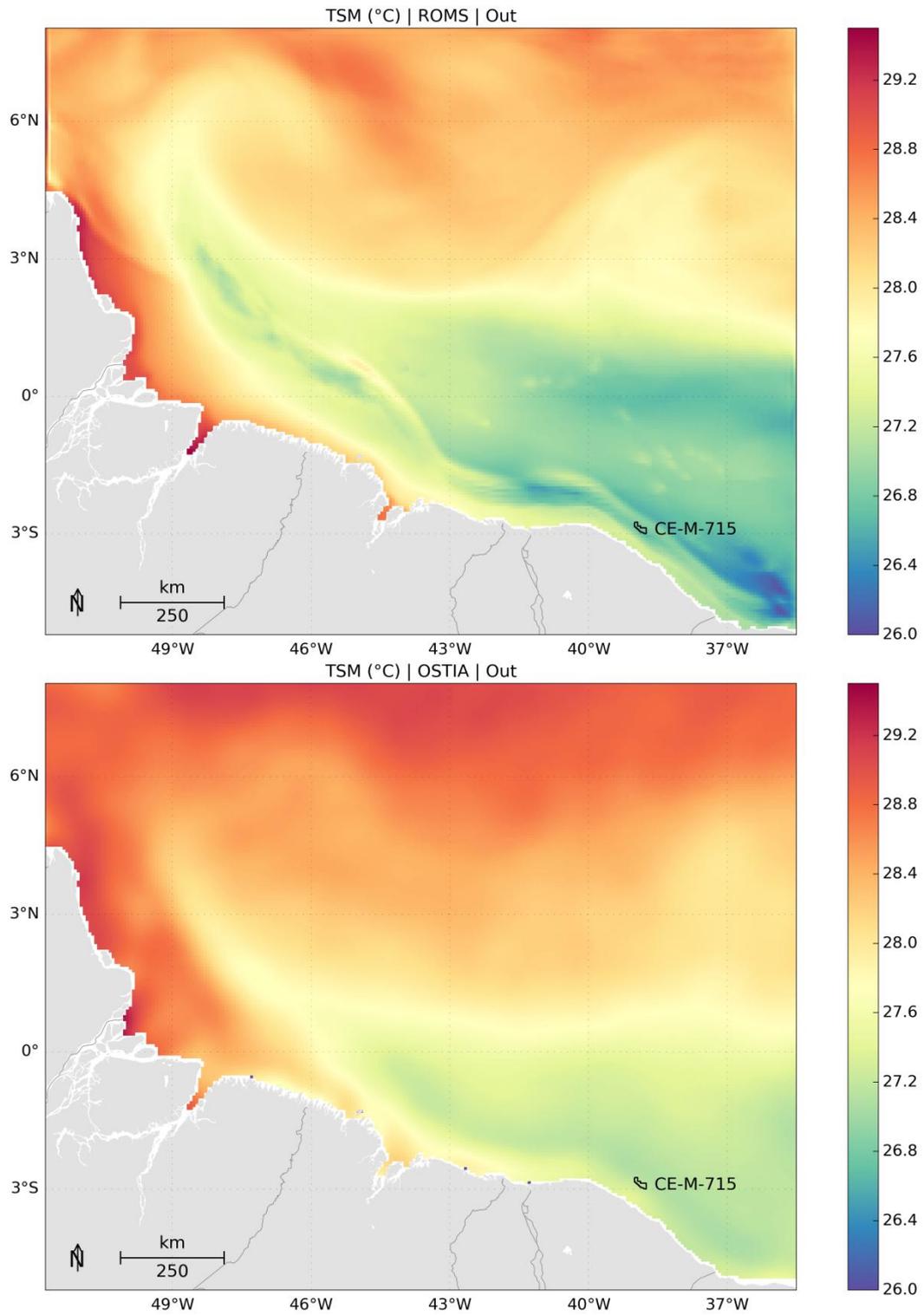


Figura 48: TSM média para outubro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

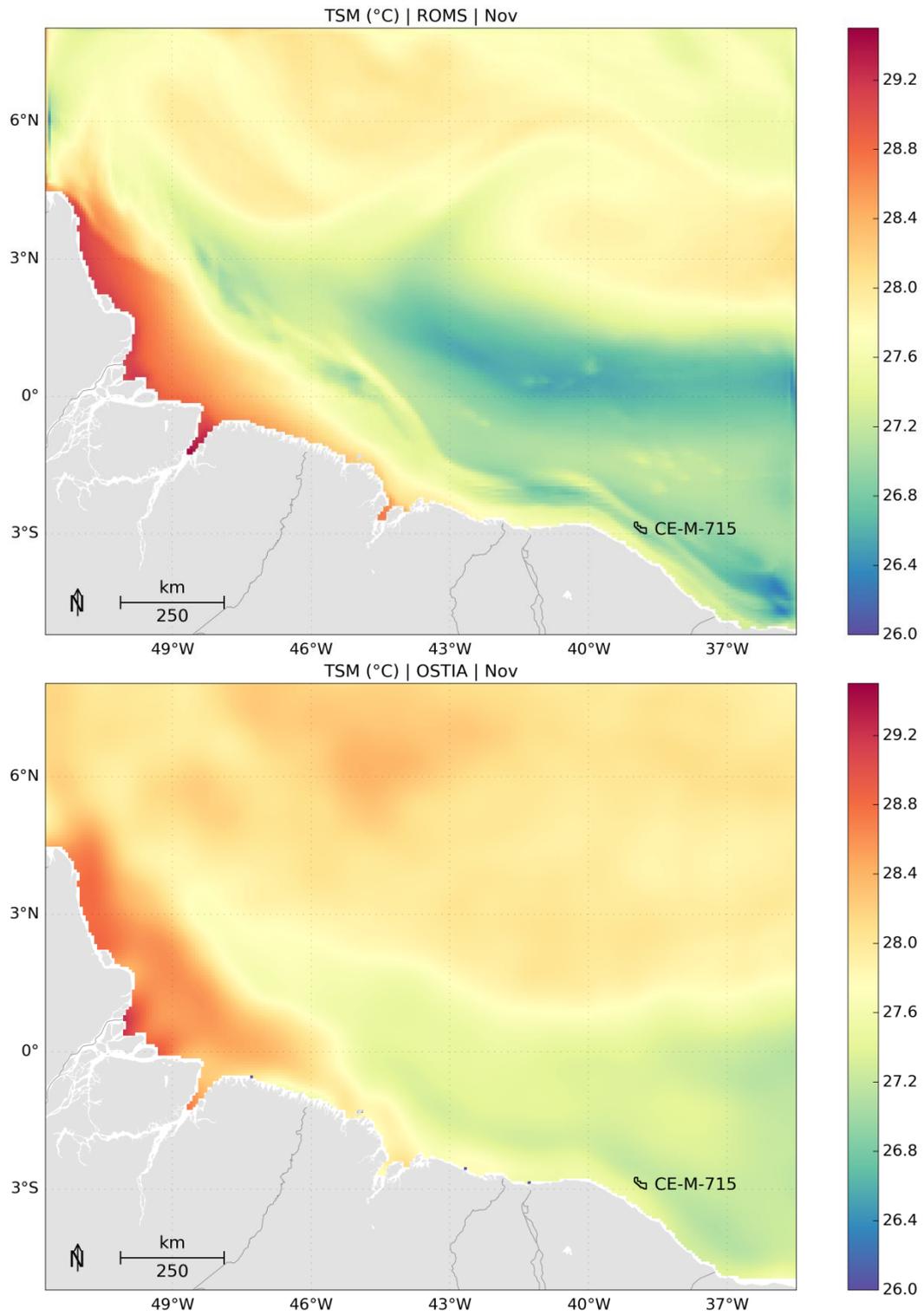


Figura 49: TSM média para novembro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

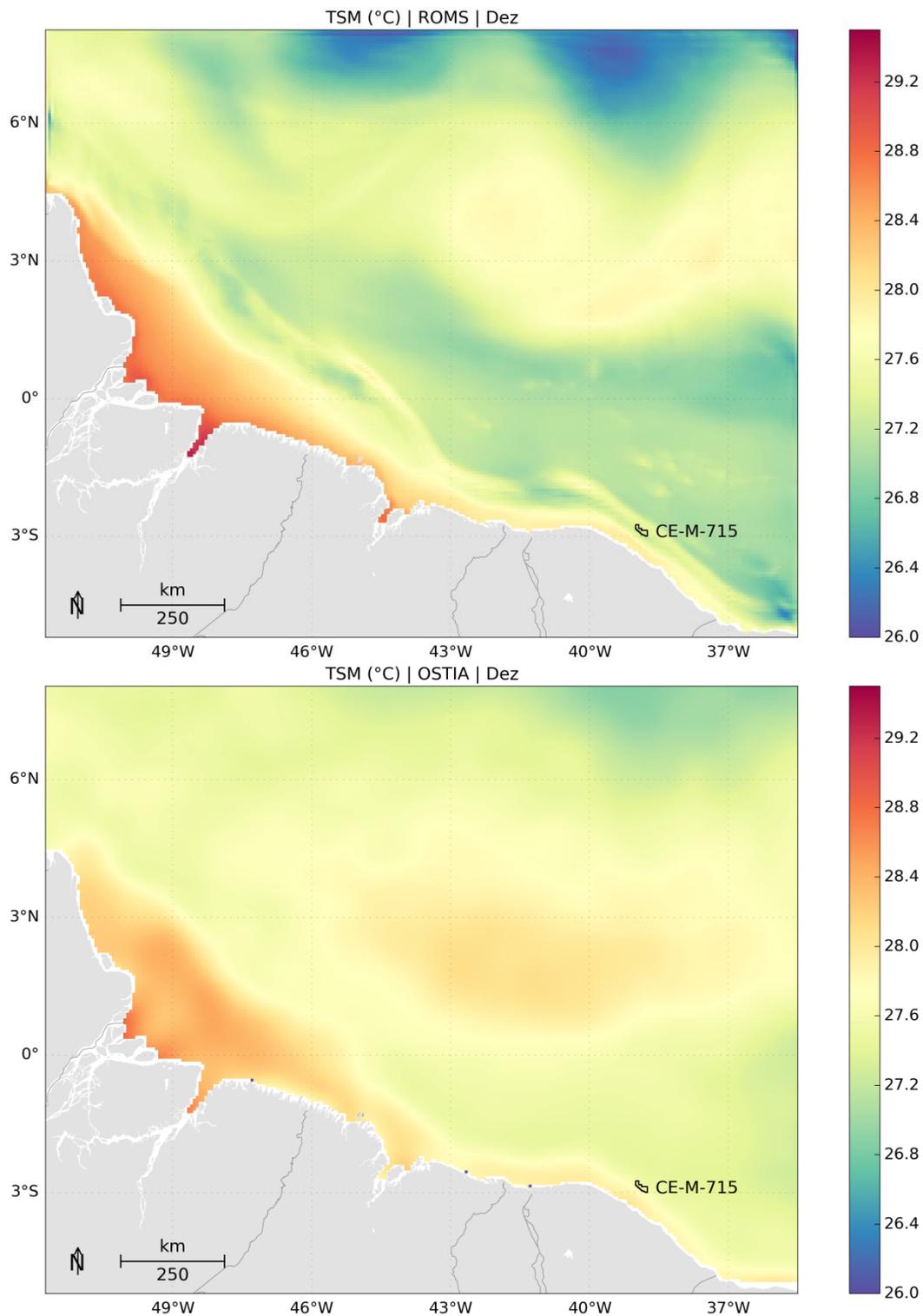


Figura 50: TSM média para dezembro de 2013. Dados obtidos do ROMS (superior) e do OSTIA (inferior).

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. 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.

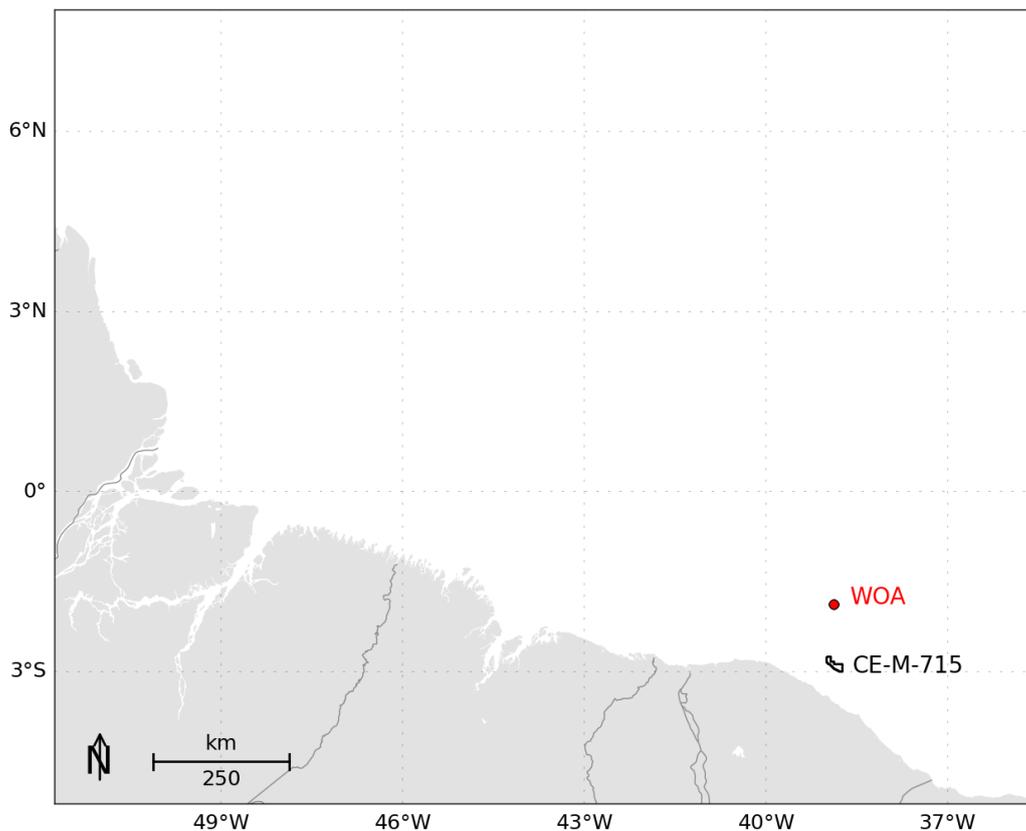


Figura 51: Localização do ponto de grade do WOA utilizado para as comparações.

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.

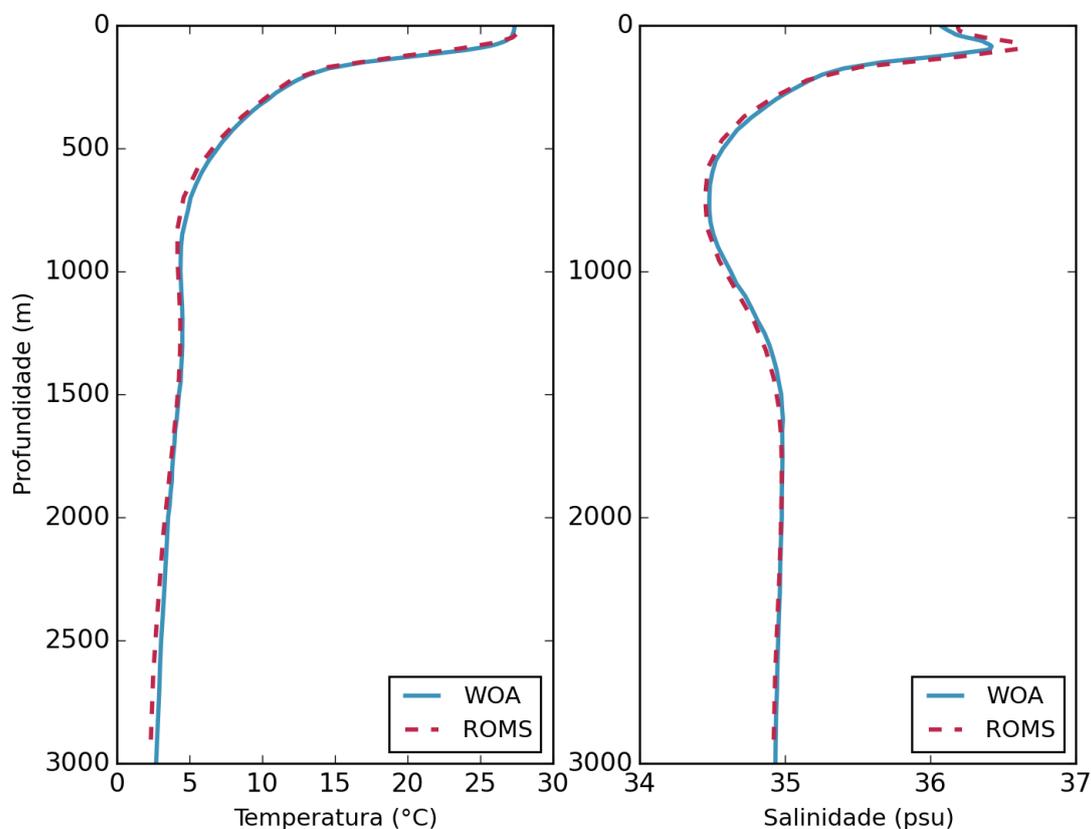


Figura 52: Perfis médios de temperatura e salinidade obtidos do WOA13.

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 ponto e último 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 1,8 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.

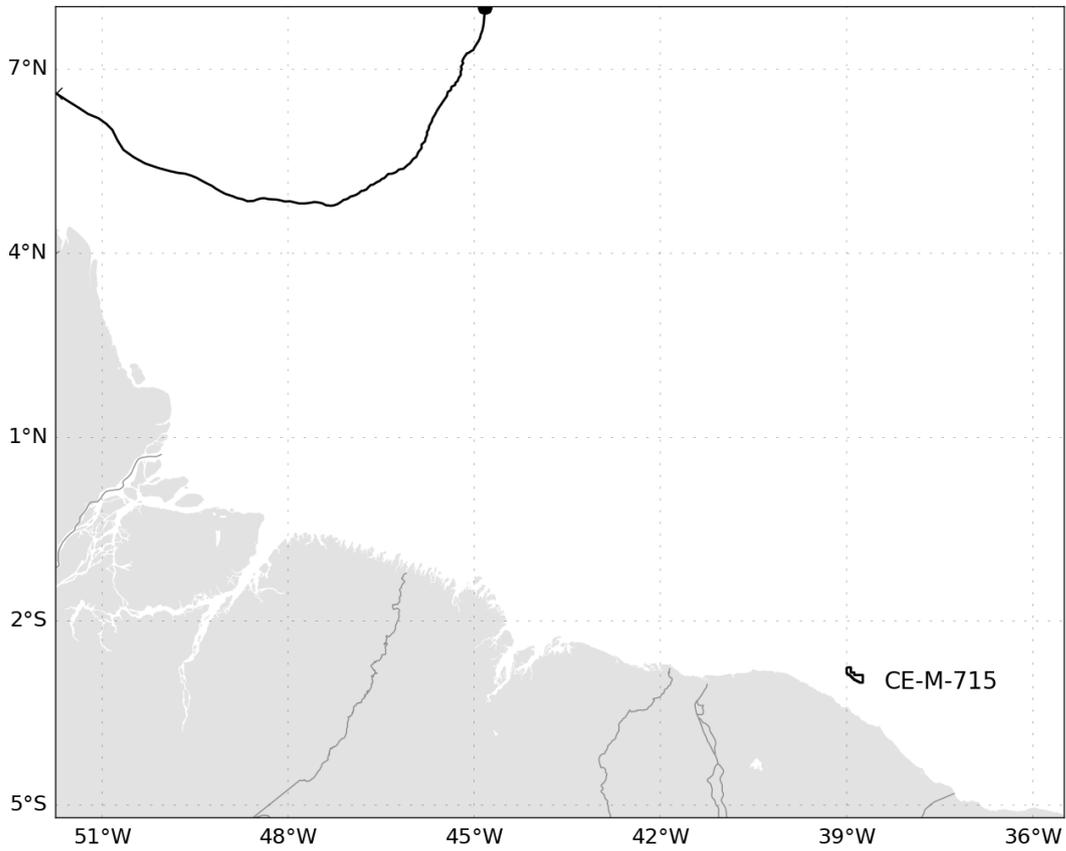


Figura 53: Trajetória descrita pelo derivador 01.

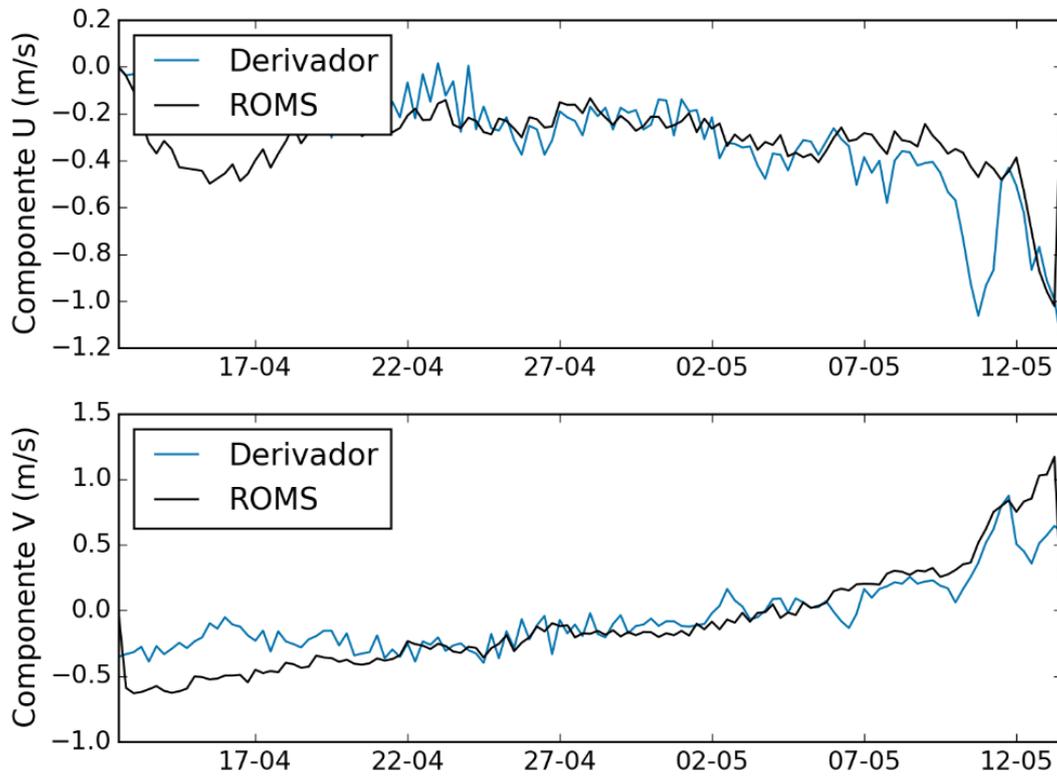


Figura 54: Comparação entre os dados obtidos do derivador 01 e os resultados do ROMS.

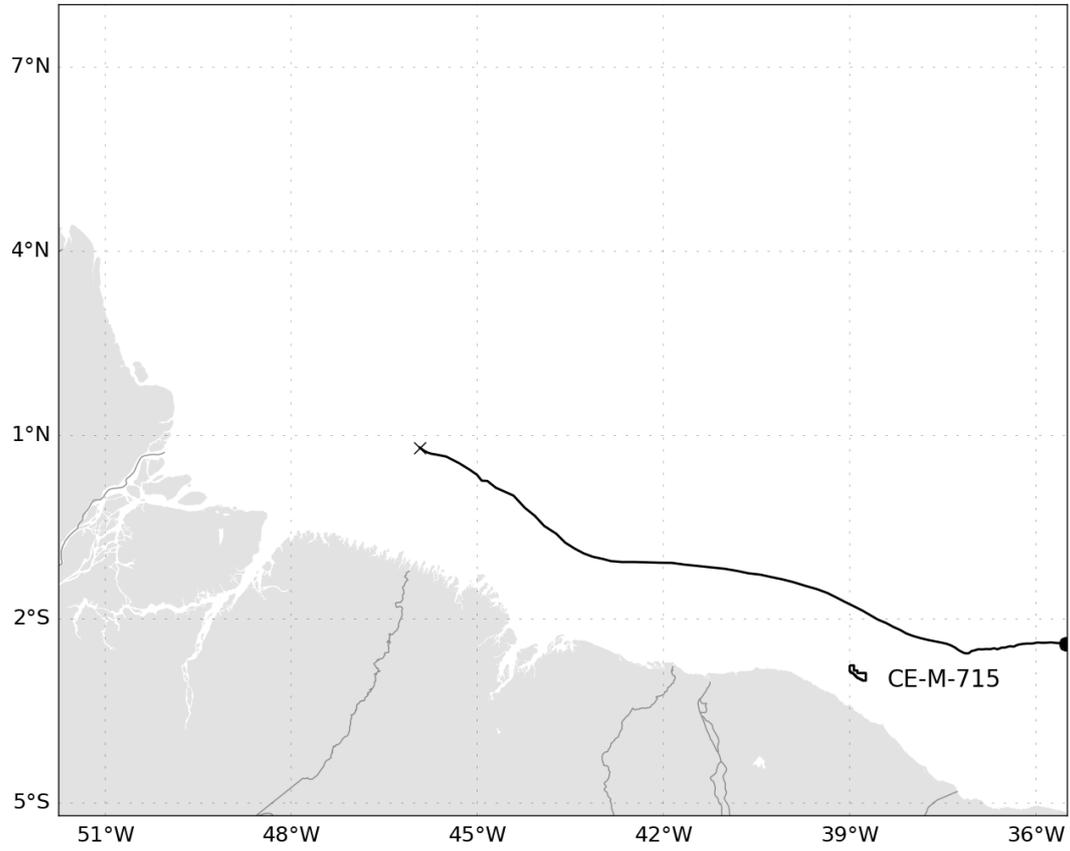


Figura 55: Trajetória descrita pelo derivador 02.

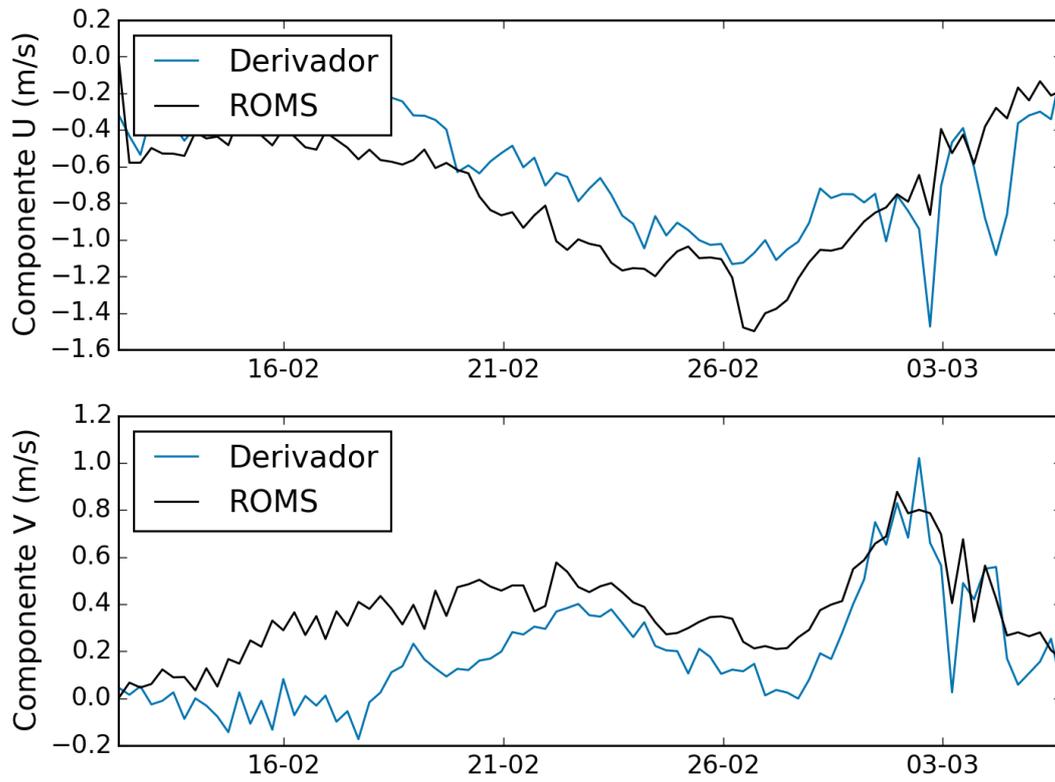


Figura 56: Comparação entre os dados obtidos do derivador 02 e os resultados do ROMS.

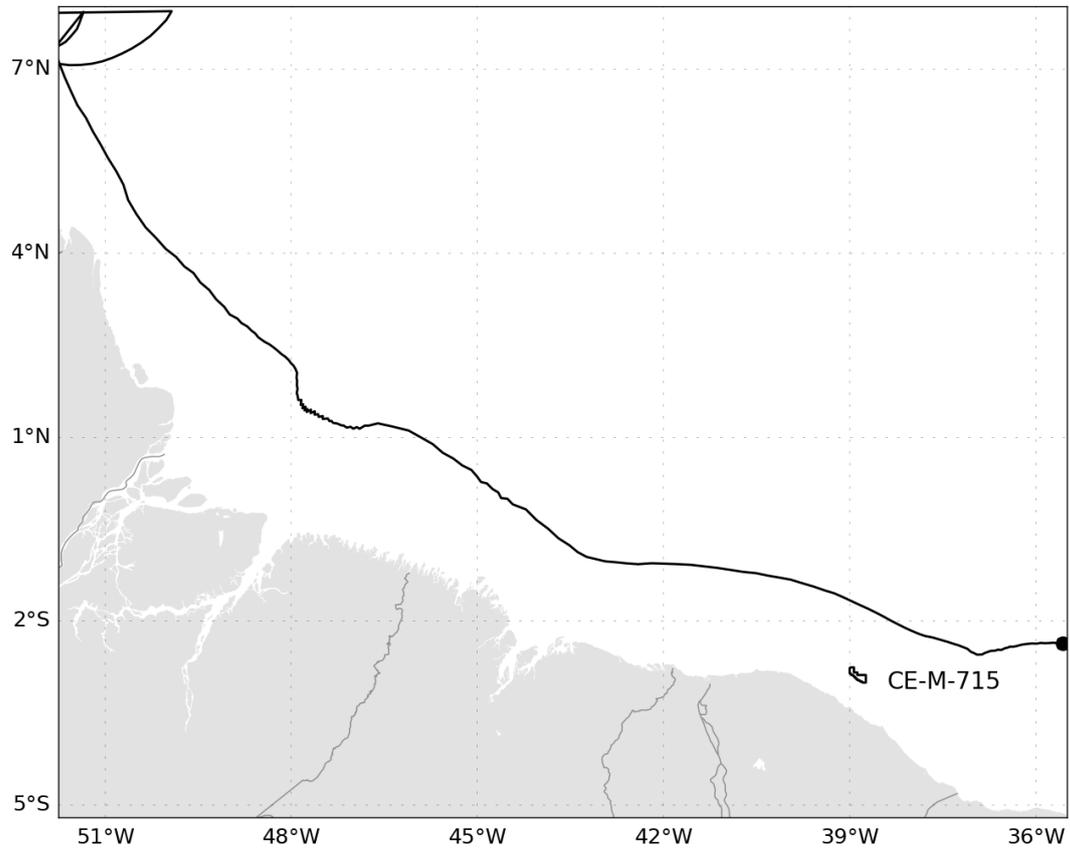


Figura 57: Trajetória descrita pelo derivador 03.

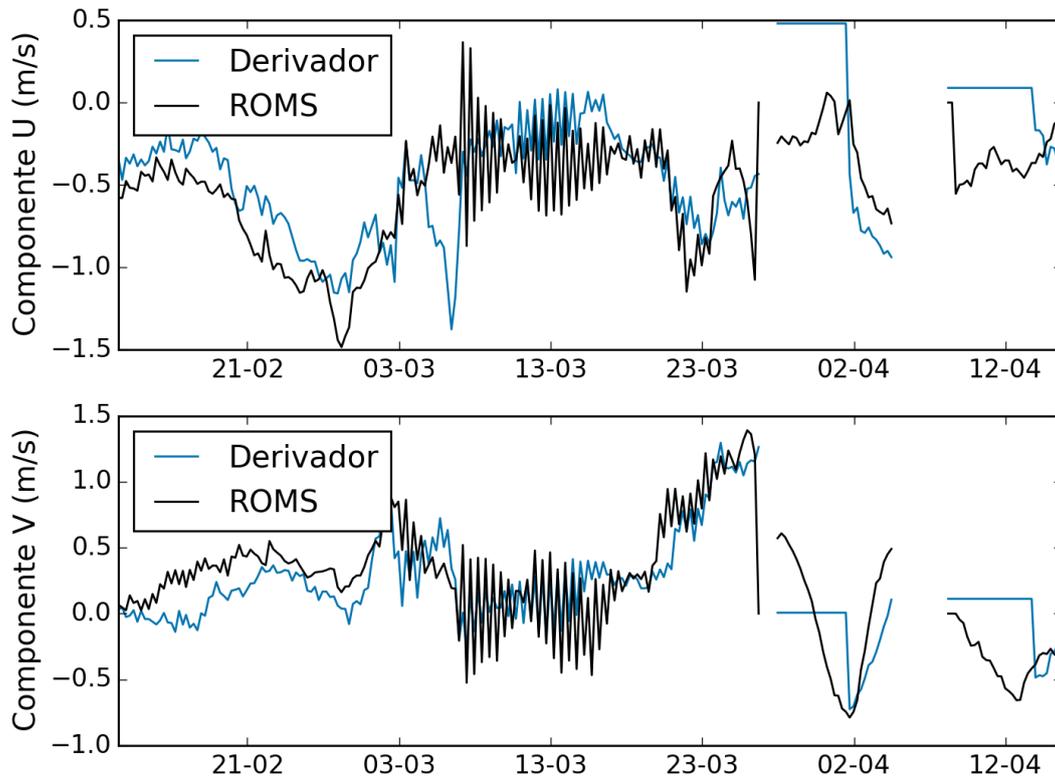


Figura 58: Comparação entre os dados obtidos do derivador 03 e os resultados do ROMS.

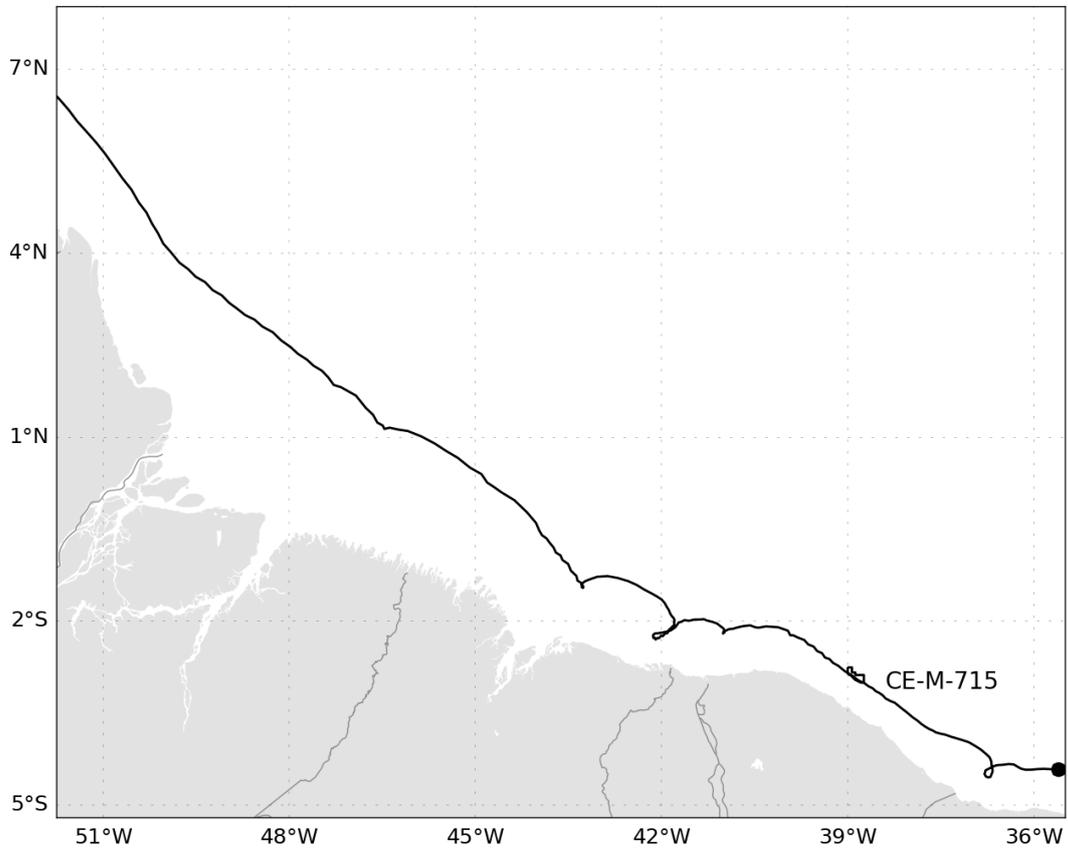


Figura 59: Trajetória descrita pelo derivador 04.

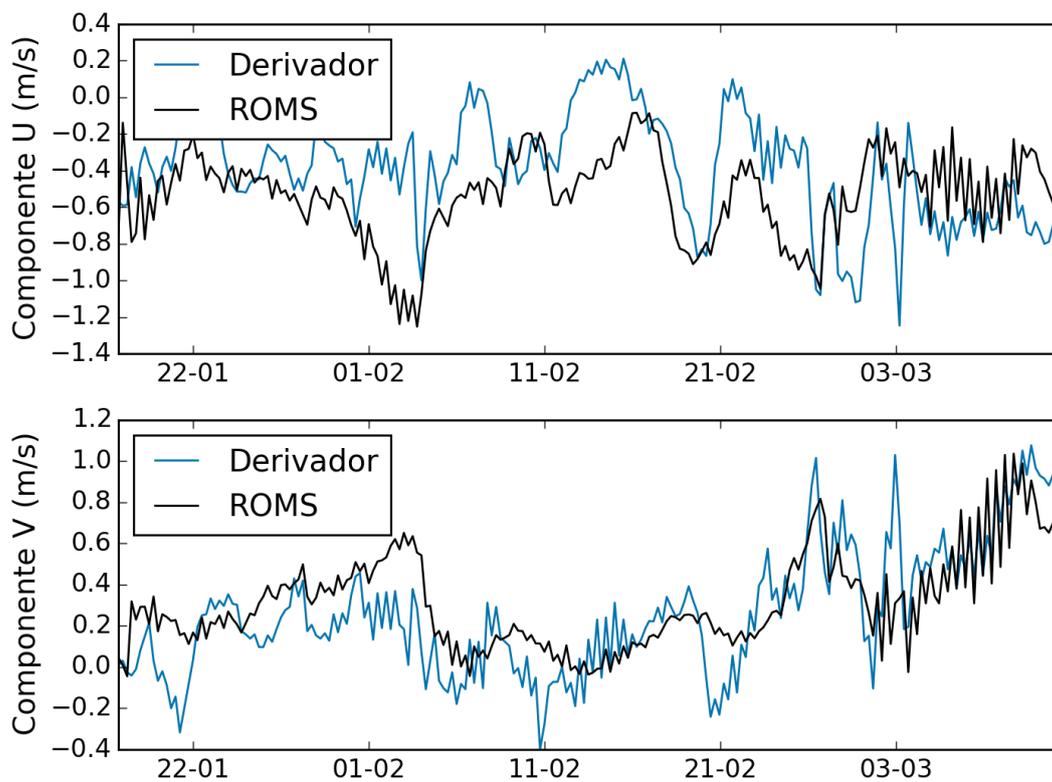


Figura 60: Comparação entre os dados obtidos do derivador 04 e os resultados do ROMS.

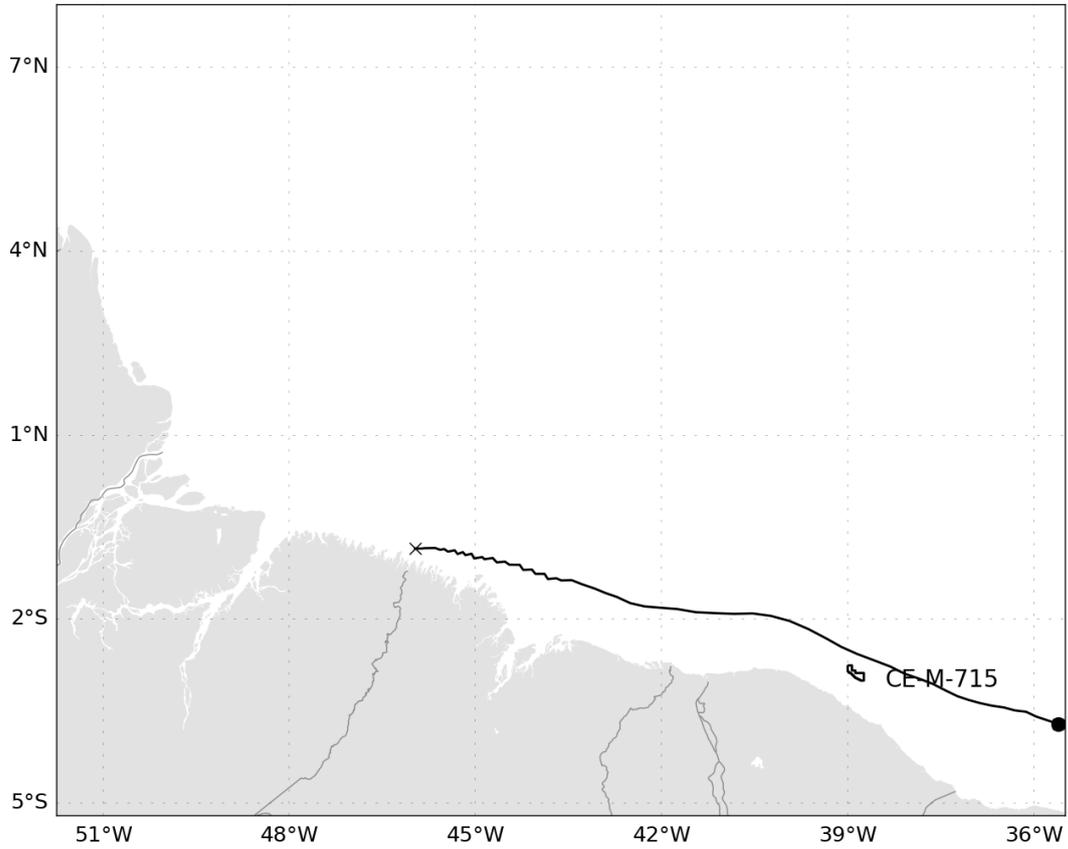


Figura 61: Trajetória descrita pelo derivador 05.

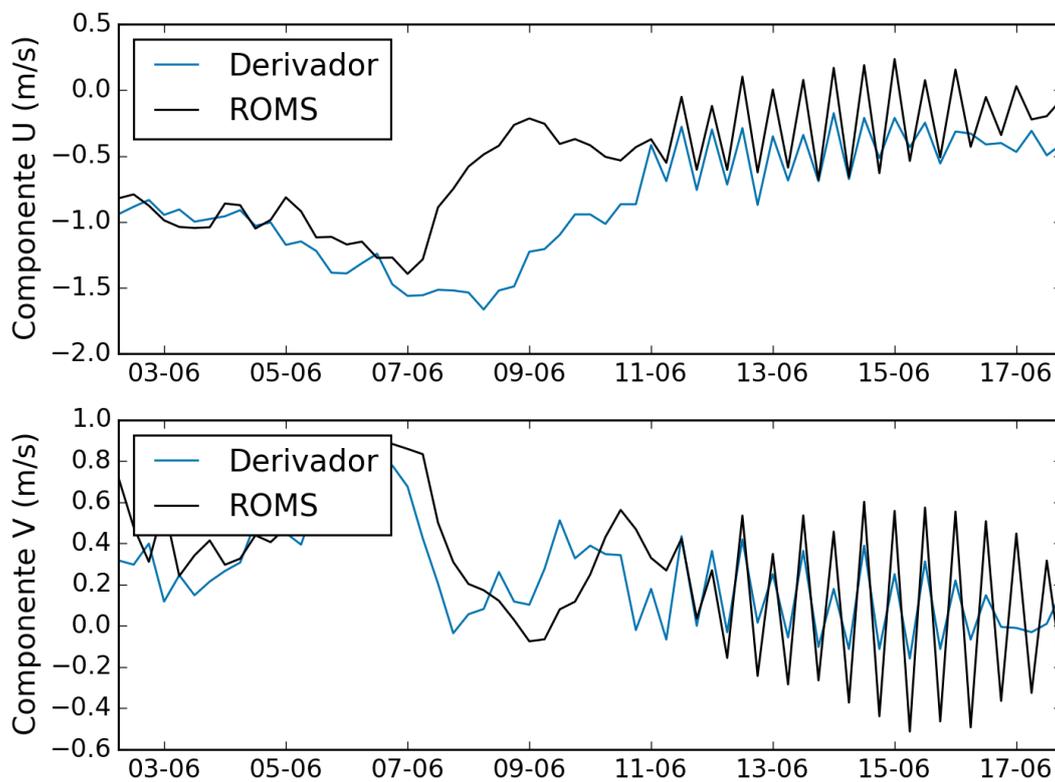


Figura 62: Comparação entre os dados obtidos do derivador 05 e os resultados do ROMS.

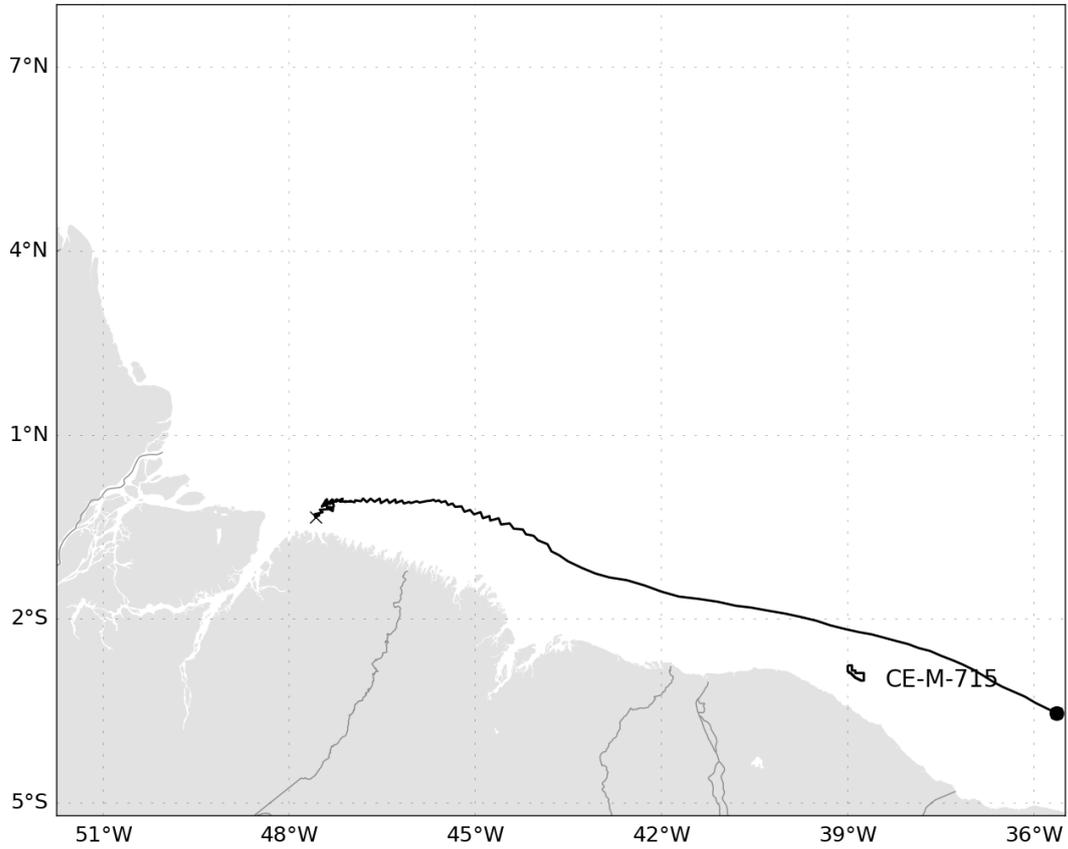


Figura 63: Trajetória descrita pelo derivador 06.

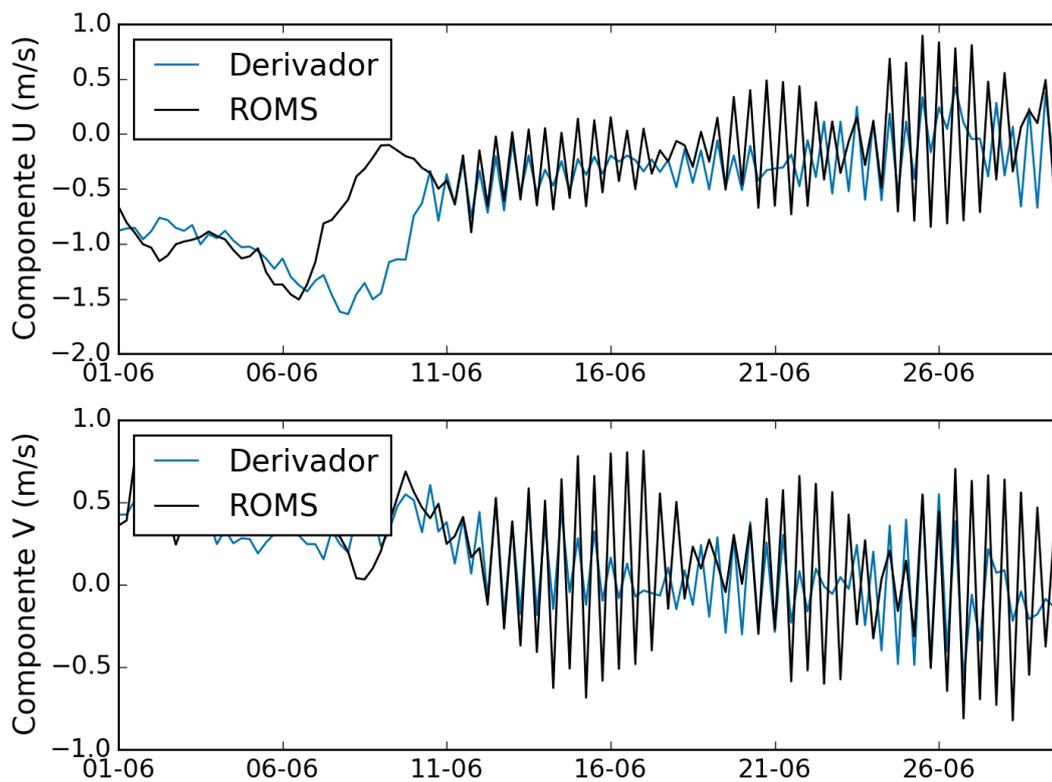


Figura 64: Comparação entre os dados obtidos do derivador 06 e os resultados do ROMS.

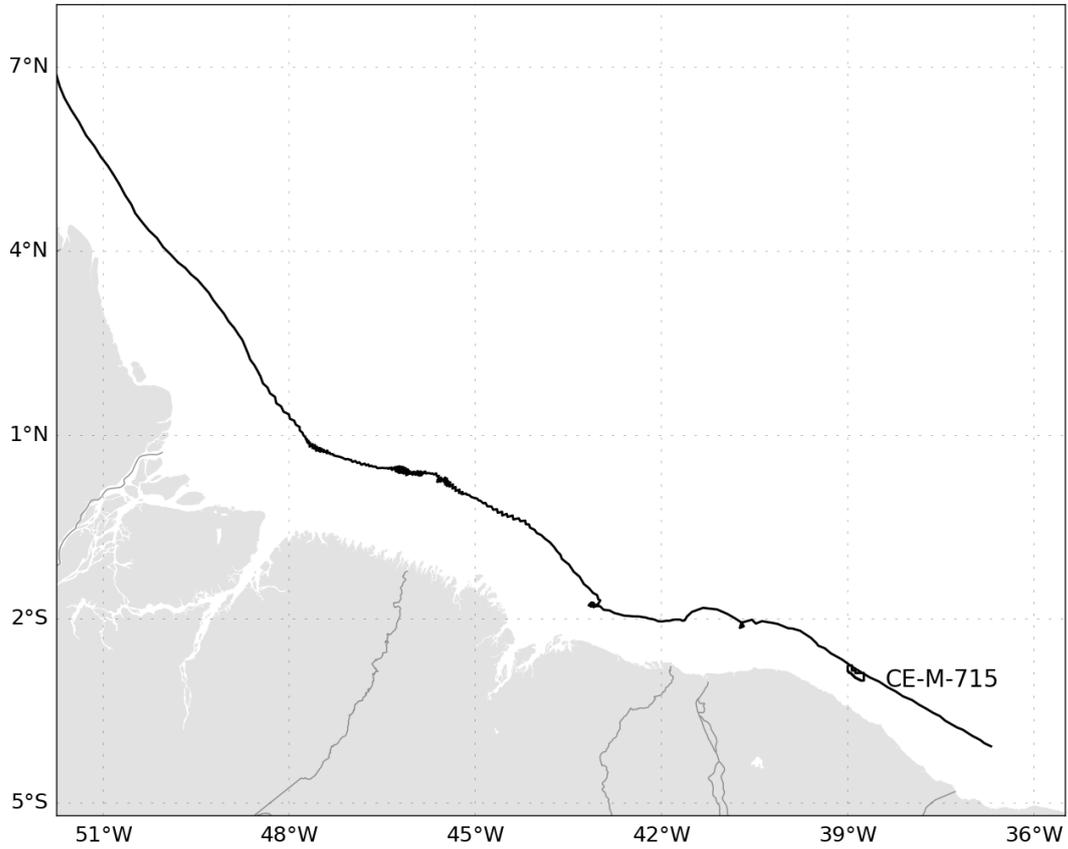


Figura 65: Trajetória descrita pelo derivador 07.

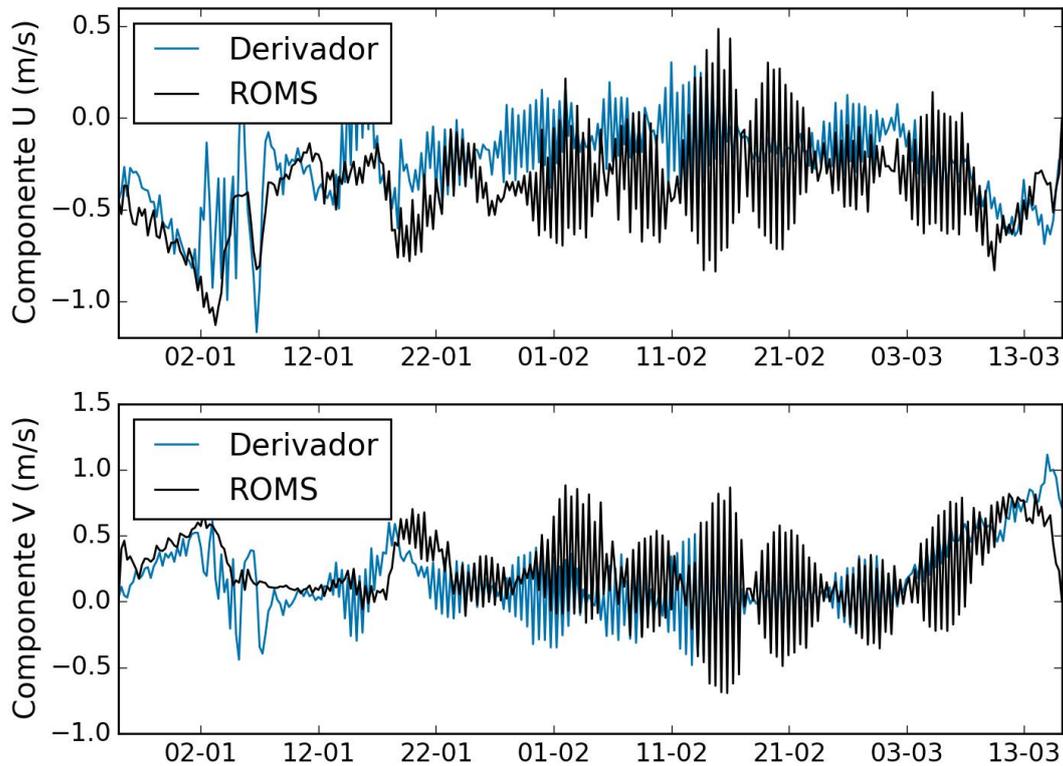


Figura 66: Comparação entre os dados obtidos do derivador 07 e os resultados do ROMS.

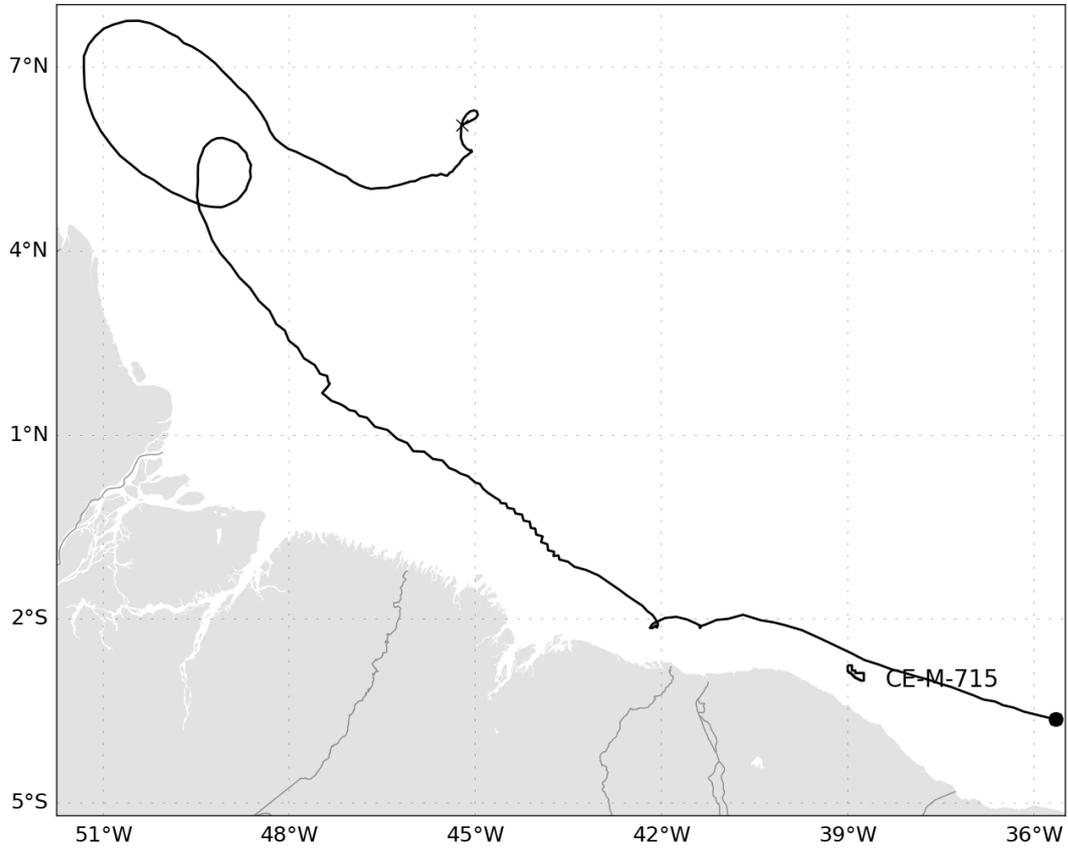


Figura 67: Trajetória descrita pelo derivador 08.

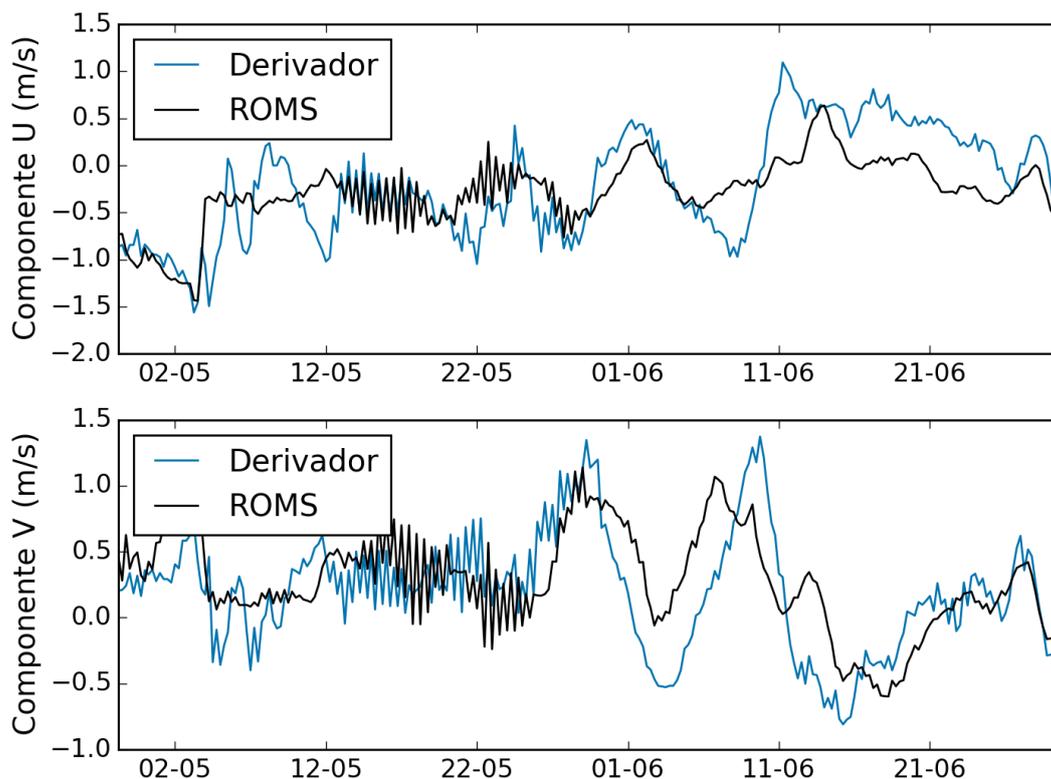


Figura 68: Comparação entre os dados obtidos do derivador 08 e os resultados do ROMS.

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 o fundeio K359, localizado na latitude de $0,243^{\circ}$ N e longitude $44,310^{\circ}$ W (Figura 69). Destaca-se que este fundeio foi efetuado de outubro de 1992 a fevereiro de 1994. Para avaliação da estrutura vertical de correntes, foram retiradas médias de velocidade de corrente nas profundidades nas quais foram realizadas as medições.

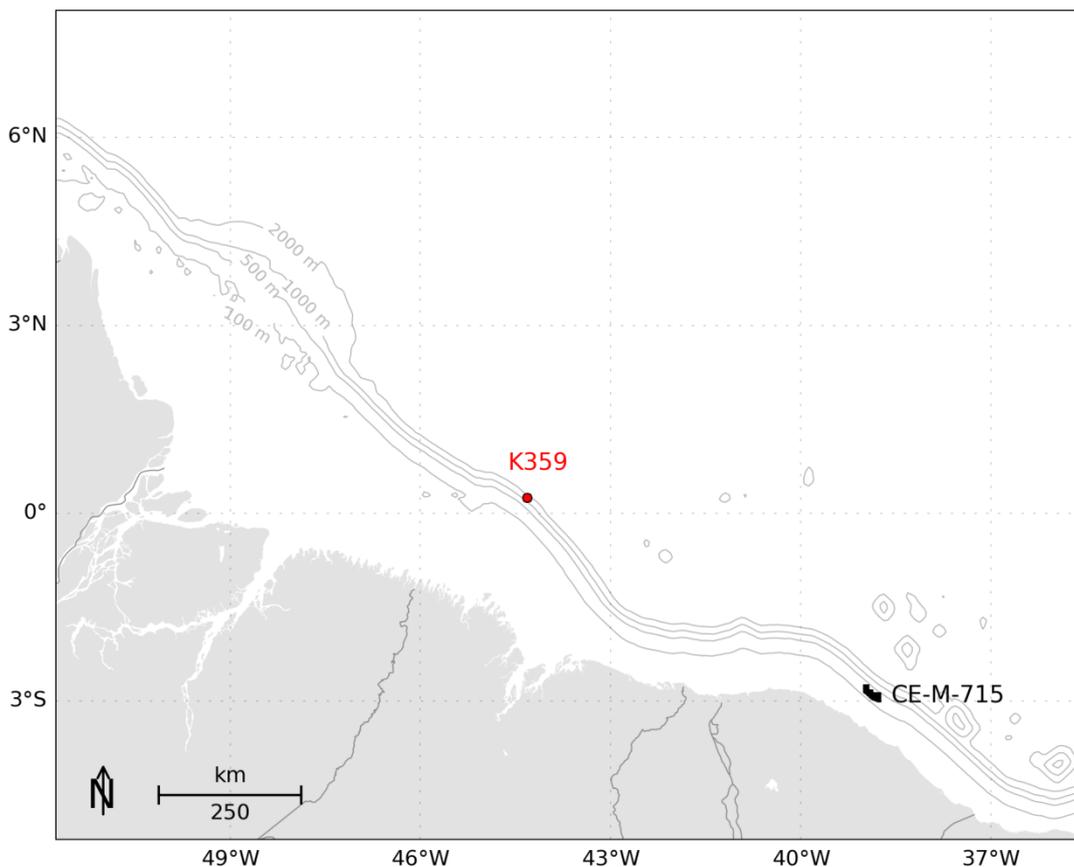


Figura 69: Localização do fundeio do WOCE utilizado para comparação.

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. 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.

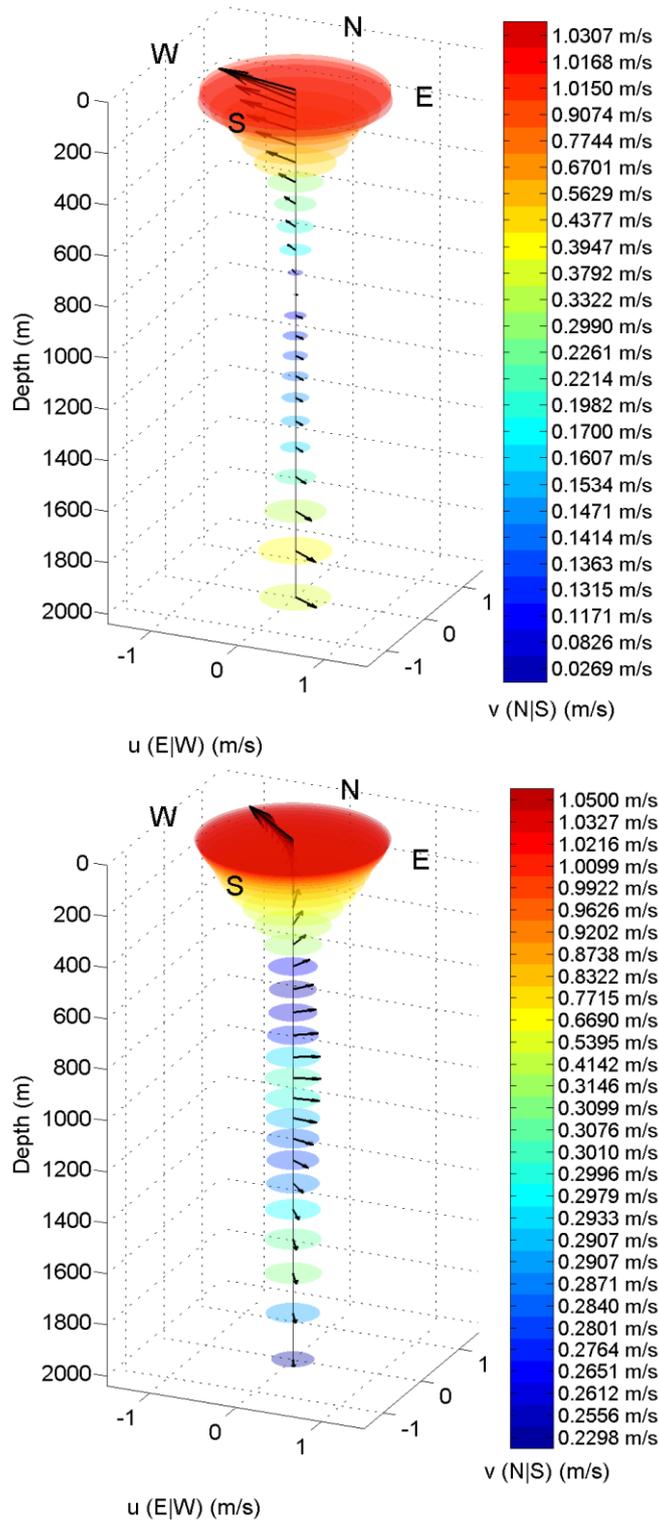


Figura 70: Perfil vertical de correntes retirado do WOCE (acima) e do ROMS (abaixo).

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.

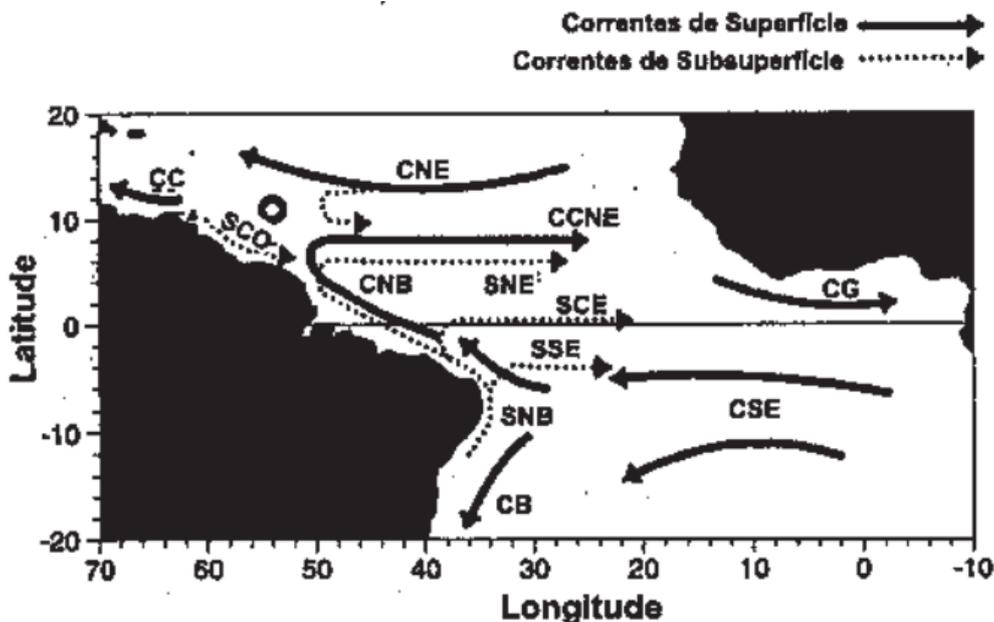


Figura 71: Diagrama esquemático das correntes superficiais e subsuperficiais do Oceano Atlântico Tropical. Adaptado de Bourlès *et al.* (1999).

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-715 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 de verão (outubro a março) e de E no período de inverno (abril a setembro).

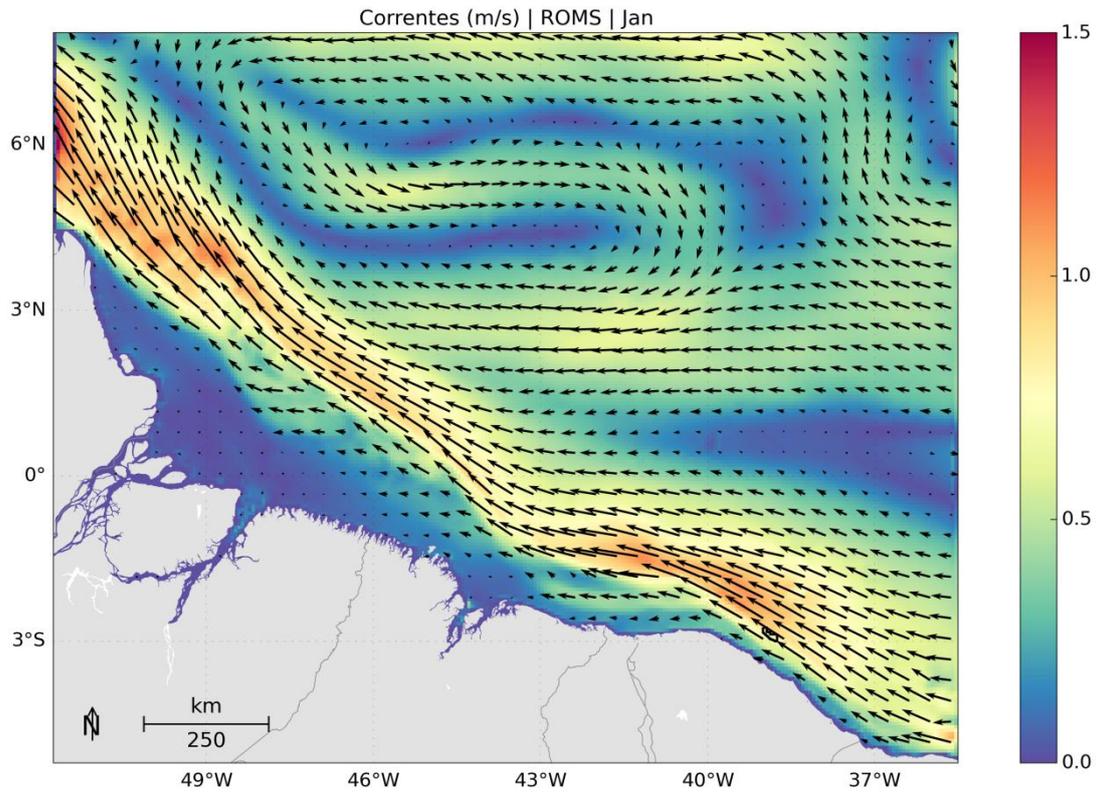


Figura 72: Campo médio de circulação para o mês de janeiro.

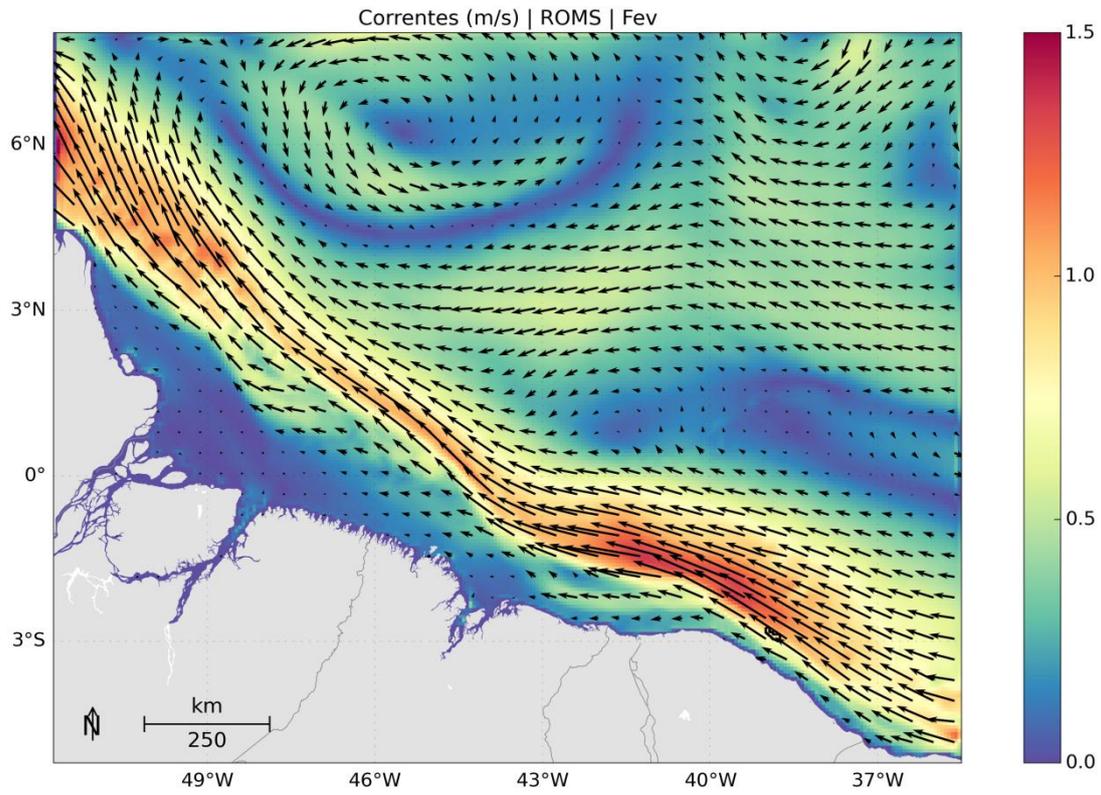


Figura 73: Campo médio de circulação para o mês de fevereiro.

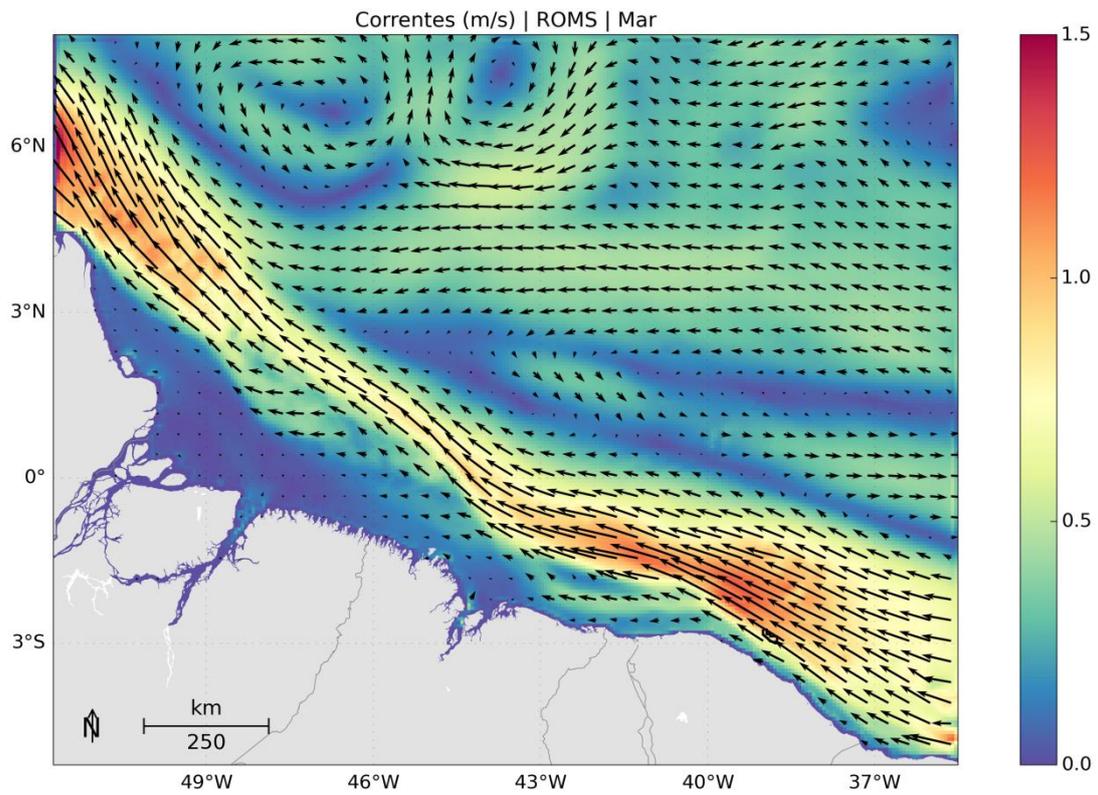


Figura 74: Campo médio de circulação para o mês de março.

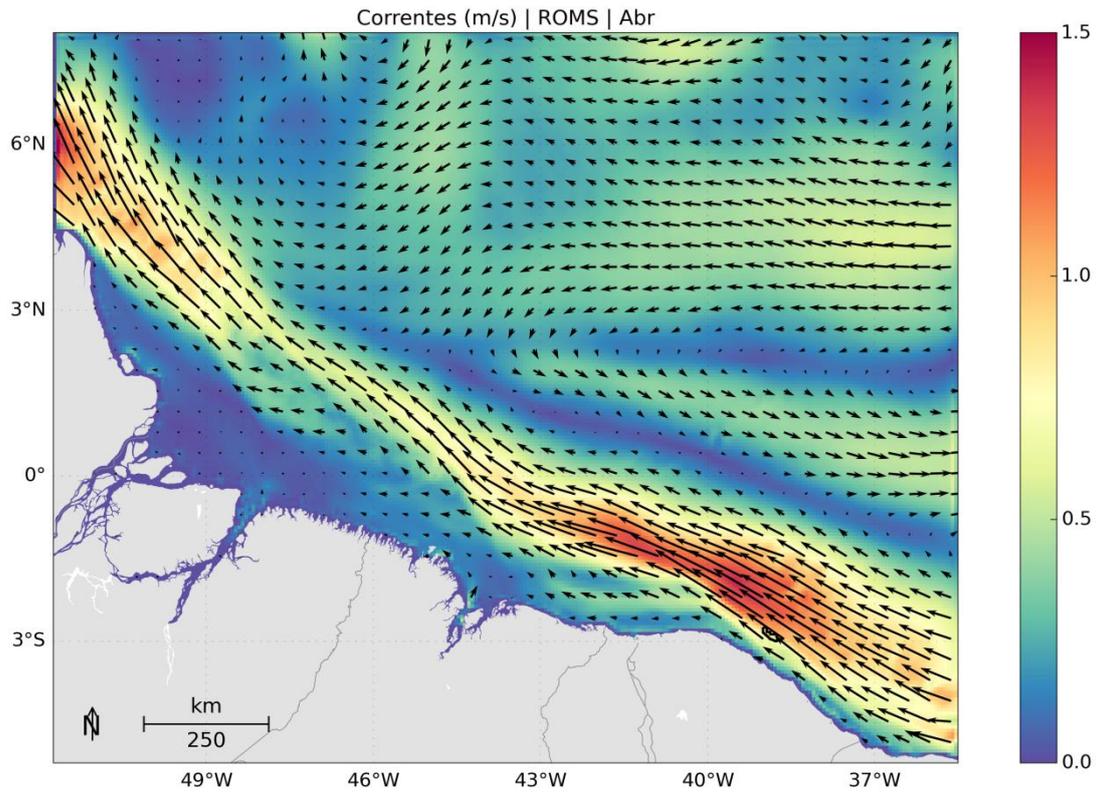


Figura 75: Campo médio de circulação para o mês de abril.

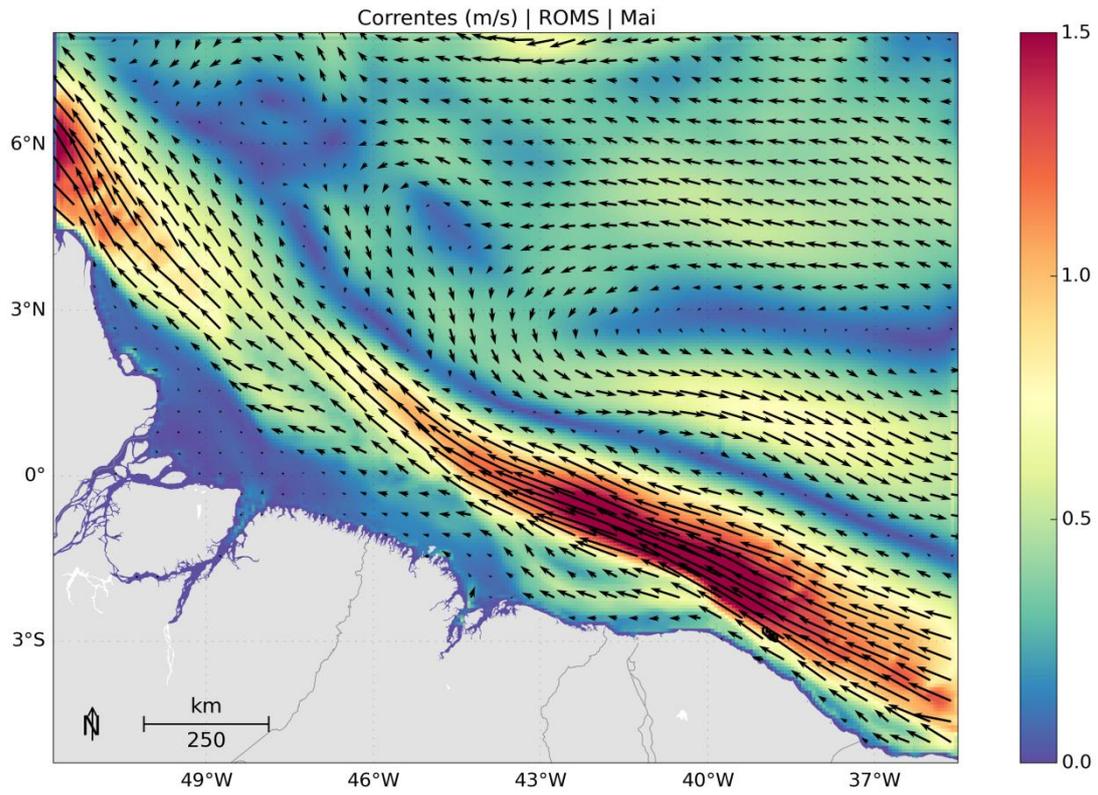


Figura 76: Campo médio de circulação para o mês de maio.

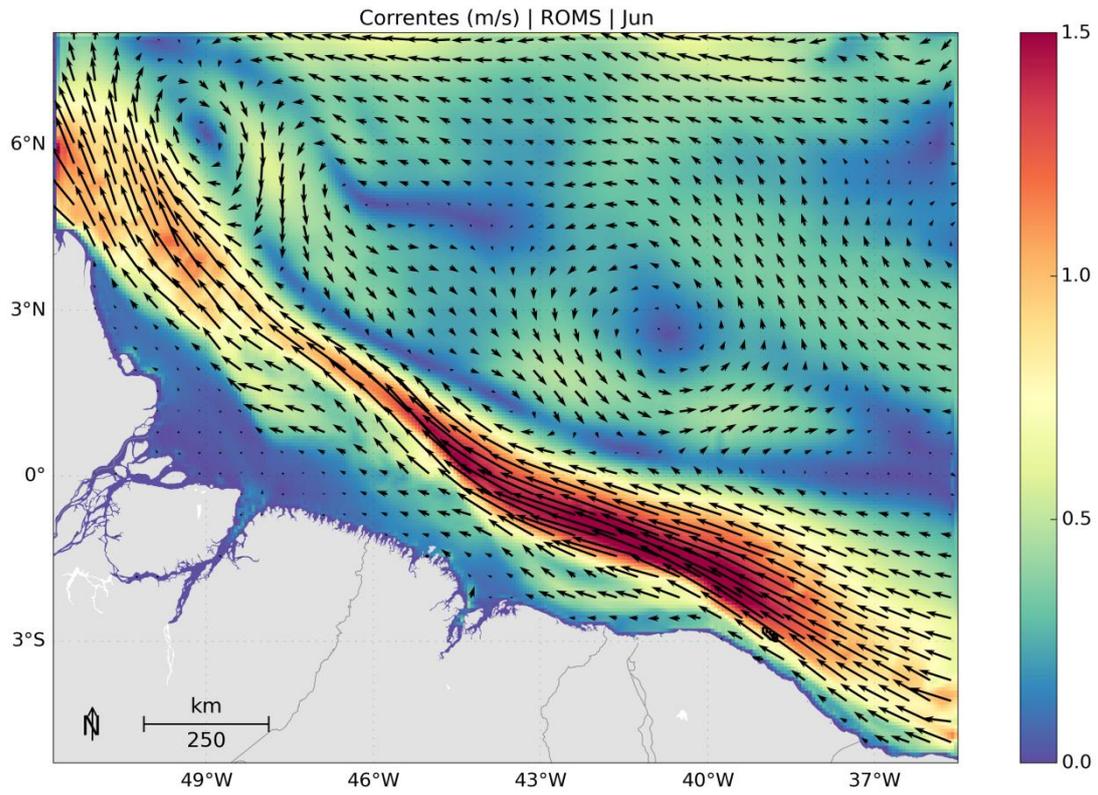


Figura 77: Campo médio de circulação para o mês de junho.

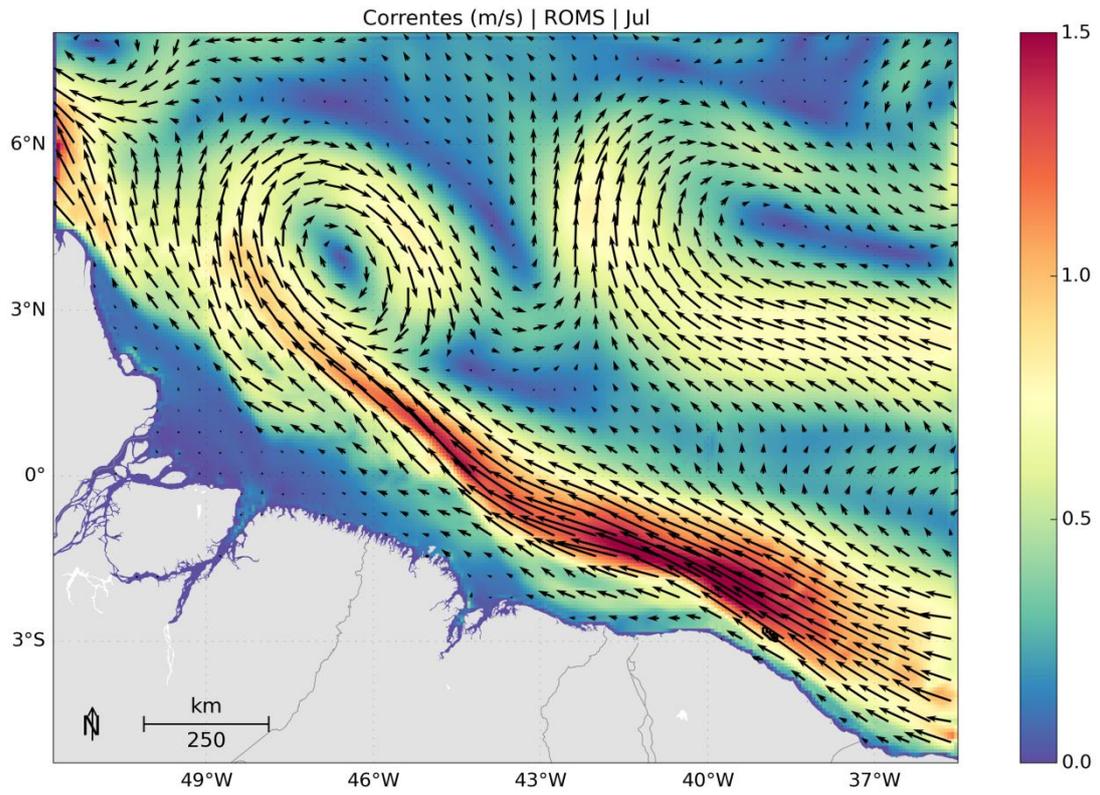


Figura 78: Campo médio de circulação para o mês de julho.

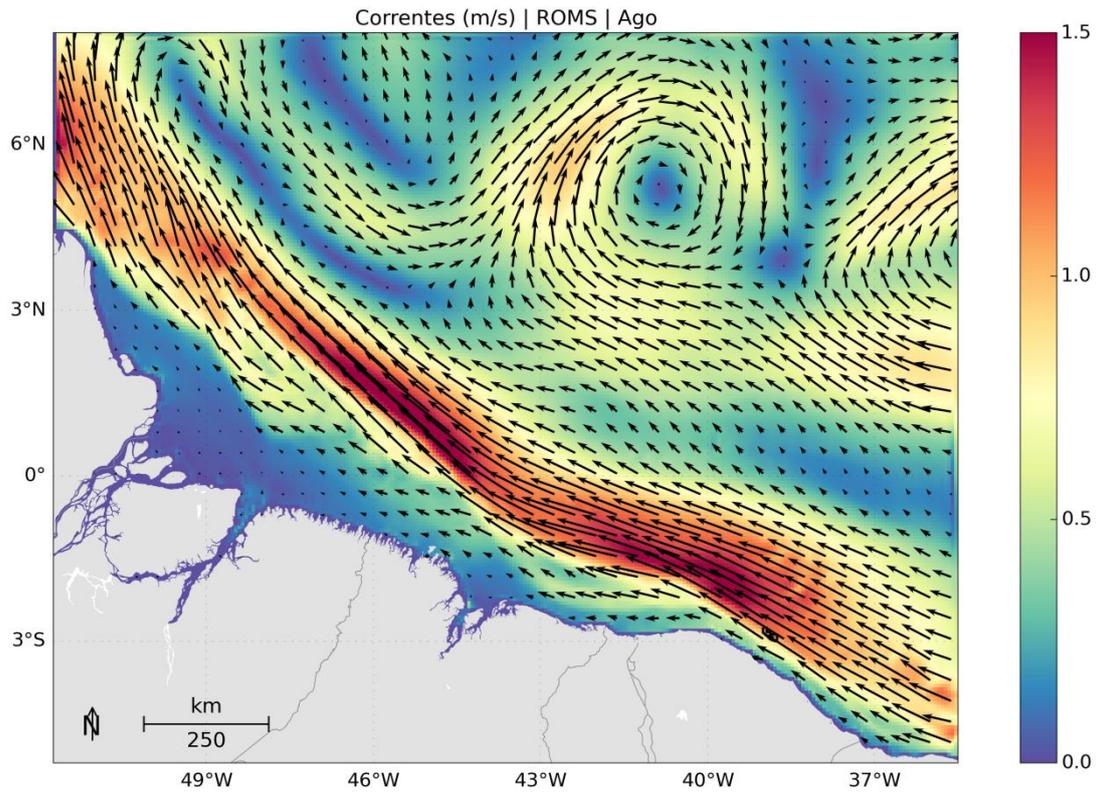


Figura 79: Campo médio de circulação para o mês de agosto.

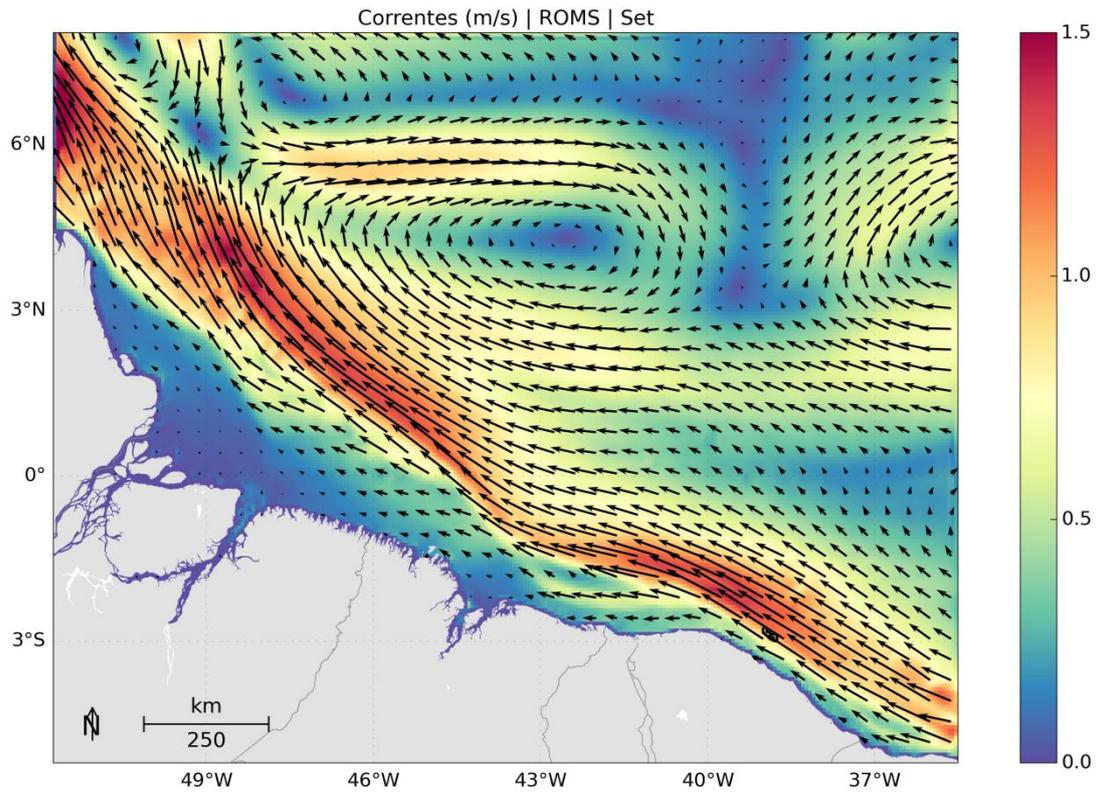


Figura 80: Campo médio de circulação para o mês de setembro.

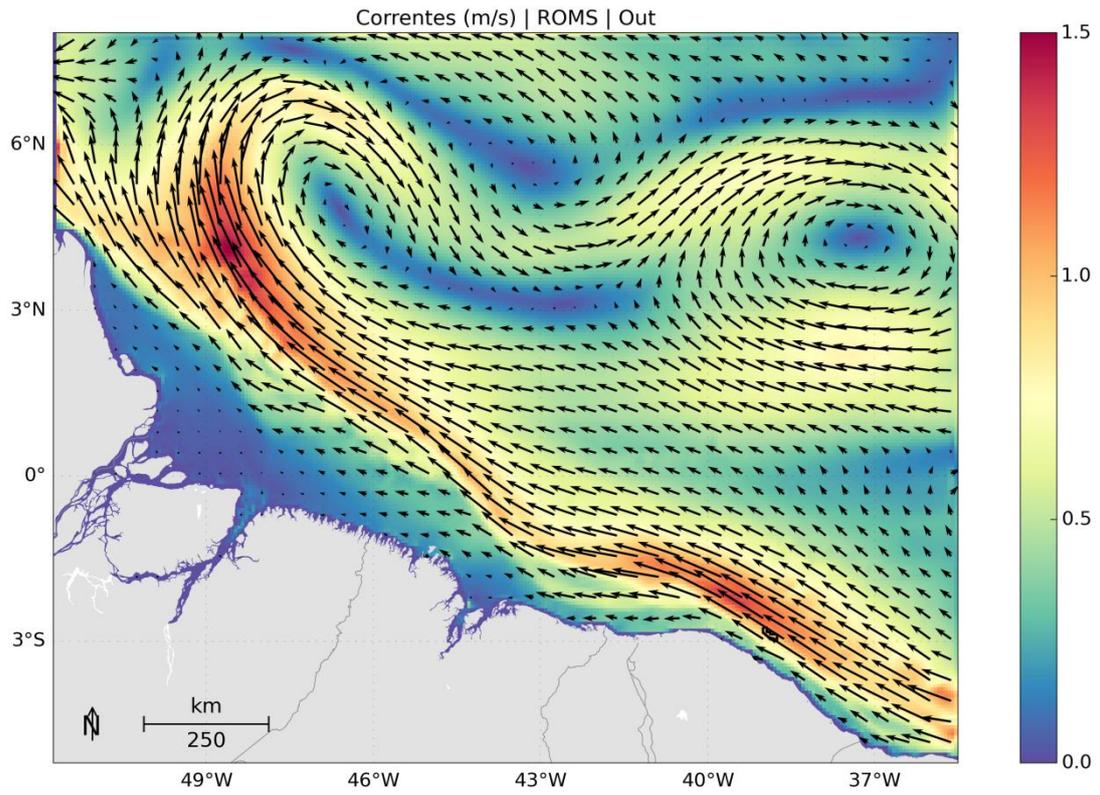


Figura 81: Campo médio de circulação para o mês de outubro.

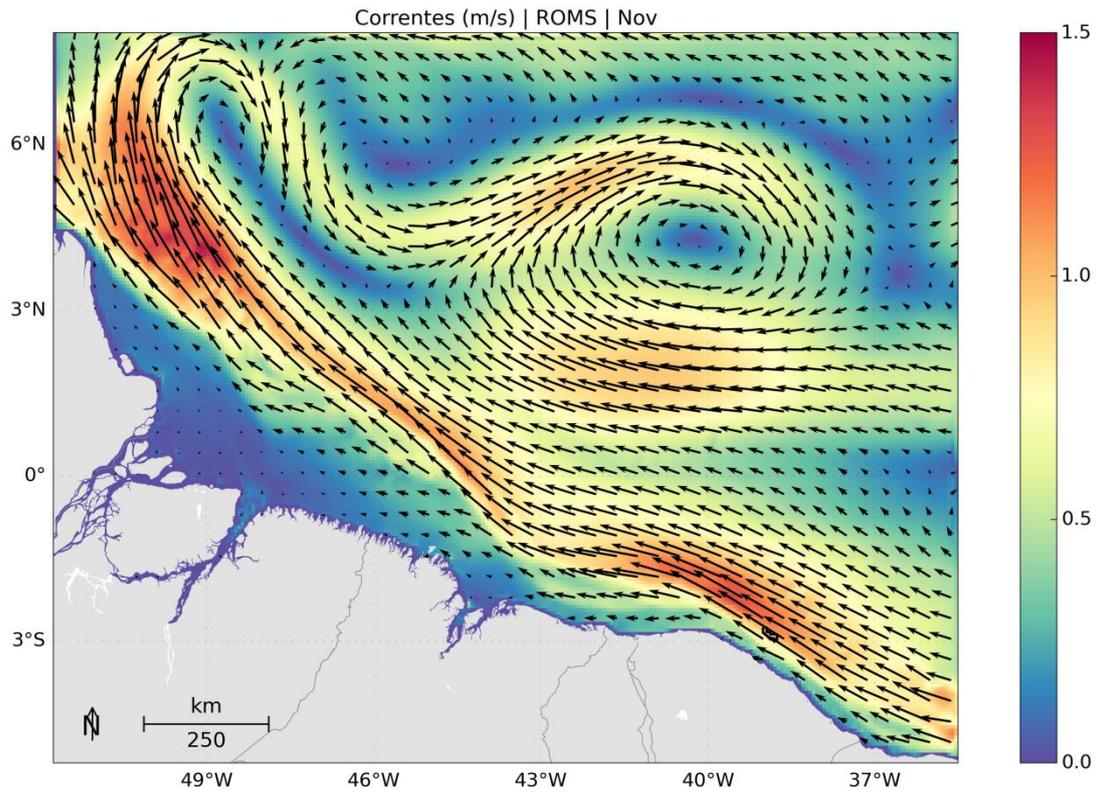


Figura 82: Campo médio de circulação para o mês de novembro.

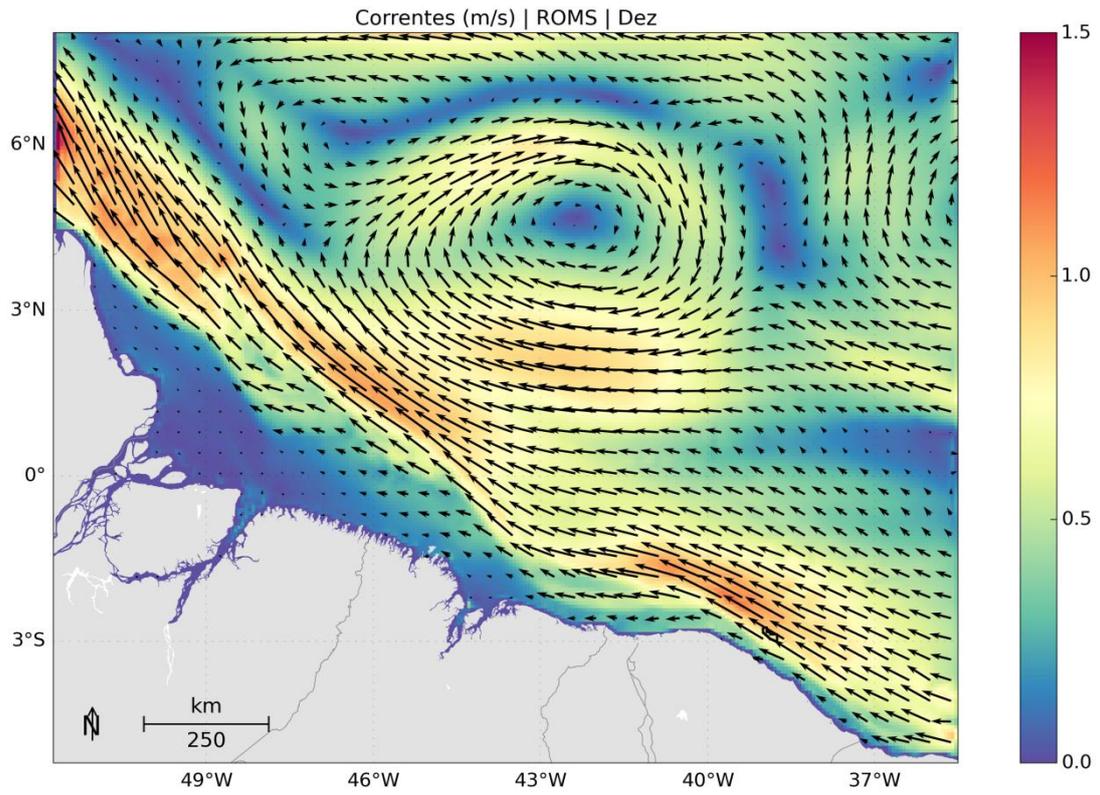


Figura 83: Campo médio de circulação para o mês de dezembro.

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 em dois pontos do bloco CE-M-715, Bacia do Ceará. A localização dos pontos de vazamento foi apresentada na Figura 1 e na Tabela 1.

Para os pontos 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 poço (30 dias de vazamento).

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

Tabela 7: Resumo dos cenários de vazamento simulados para cada ponto de vazamento.

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 tempo de toque de óleo na costa	13.307	contínuo (30 dias)	fundo	60 dias
Crítico - Maior massa de óleo acumulado na costa	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).

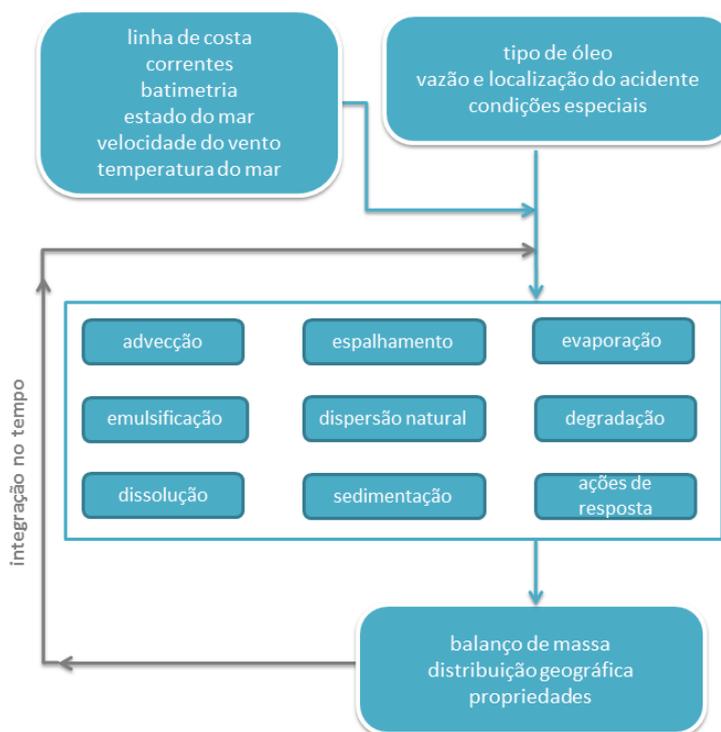


Figura 84: Esquema simplificado dos dados de entrada, processos e dados de saída (resultados) usados e obtidos pelo modelo OSCAR. Adaptado de Reed (2001).

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 a componente governada pela onda (Stokes). A componente turbulenta (w') é expressa como:

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

onde R é um número aleatório que varia entre -1 e 1, K é o coeficiente de dispersão turbulenta, estimado para as direções horizontais e verticais, e t o tempo.

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

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

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), 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} m/s^2 (KULLENBERG, 1984 *apud*

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

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

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

onde,

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

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

sendo $g' = g(\rho_\alpha - \rho_0) / \rho_\alpha$ onde g é a aceleração gravitacional e 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 as suas frações molares em qualquer localização da mancha superficial, e calculada como. (MACKAY *et al.*, 1980; SEBASTIÃO & SOARES, 1995; REED *et al.*, 1999):

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

onde m_i é a massa associada ao i -ésimo componente do vazamento; t é o tempo (s); K_e é o coeficiente de transferência de massa evaporada (m/s); T é a temperatura (K); P_i é a pressão de vapor para o i -ésimo componente (atm); A é a área da mancha de óleo (m^2); M_i é o peso molecular da i -ésimo componente (g/mol); F_i é a fração molar do i -ésimo componente remanescente na mancha; e R é a constante universal dos gases, $8,206 \times 10^{-5}$ atm-m³/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 $1000 \text{ J}/\text{m}^3\text{s}$); 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):

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

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 (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 ($\sim 8,9 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a 25°C) e D_i a difusividade molecular do componente i (m^2/s).

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

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

3.1.1.1.7 Degradação

O cálculo da degradação do óleo no modelo OSCAR é feita através da soma da transformação de cada componente do óleo por diferentes formas de degradação. A Figura 85 mostra o esquema de transformação dos componentes considerados no modelo OSCAR.

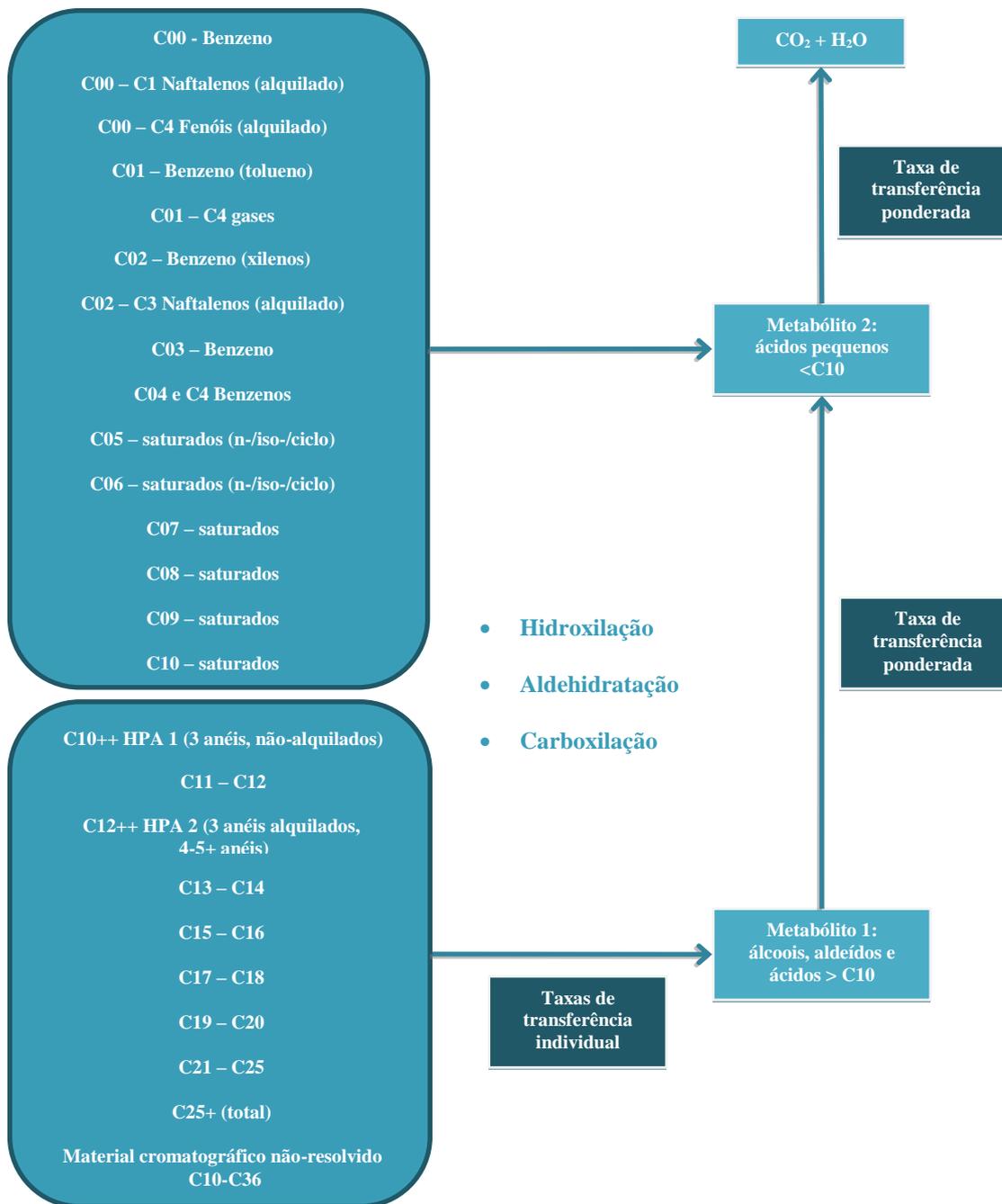


Figura 85: Esquema da degradação dos principais componentes do óleo. Adaptado de Reed (2001).

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

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

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

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

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

sendo $W(t)$ a porcentagem de água (%), 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 lagrangianas para representar o campo de concentração. Os termos r_j são taxas de vários processos, tais como a evaporação, emulsificação e espalhamento das manchas superficiais e volatilização dos compostos do óleo.

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

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

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

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

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

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

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

3.1.1.4 Óleo na costa

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

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

- Características físico-químicas do óleo

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

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

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

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

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

O volume máximo de óleo, V_{max} (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 estiver sido atingido, a massa de óleo que chega à costa não é mais depositada e o óleo continua a ser transportado pelos ventos e correntes para outras regiões.

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

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

Onde 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 de por tipo de costa i .

3.1.1.5 Massa Máxima de Óleo na Costa

Para obter a massa máxima de óleo na costa, os elementos de grade são monitorados ao longo de toda a simulação. São armazenadas as informações de massa máxima de óleo que atingiram **cada elemento de grade** ao longo das n simulações. Ao final, têm-se um mapa das massas máximas por ponto de grade ou célula de costa 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) da região do estudo, federais, e estaduais, disponibilizadas no Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (MMA, 2014) e as criadas mais recentemente pelas leis nº 10.171 e 10.172 de Maranhão (2014).

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. Para as **unidades de conservação costeiras**, os cálculos foram realizados com os **resultados de costa**, sendo informada a extensão do toque de óleo. Já para as **unidades de conservação marinhas**, foram utilizados os resultados em **superfície do mar** 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 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 massa máxima. 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.

Na Figura 86 a seguir, são apresentadas as Unidades de Conservação consideradas e a separação adotada para diferenciar as costeiras e marinhas. Na Tabela 9 são listadas as Unidades de Conservação 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.

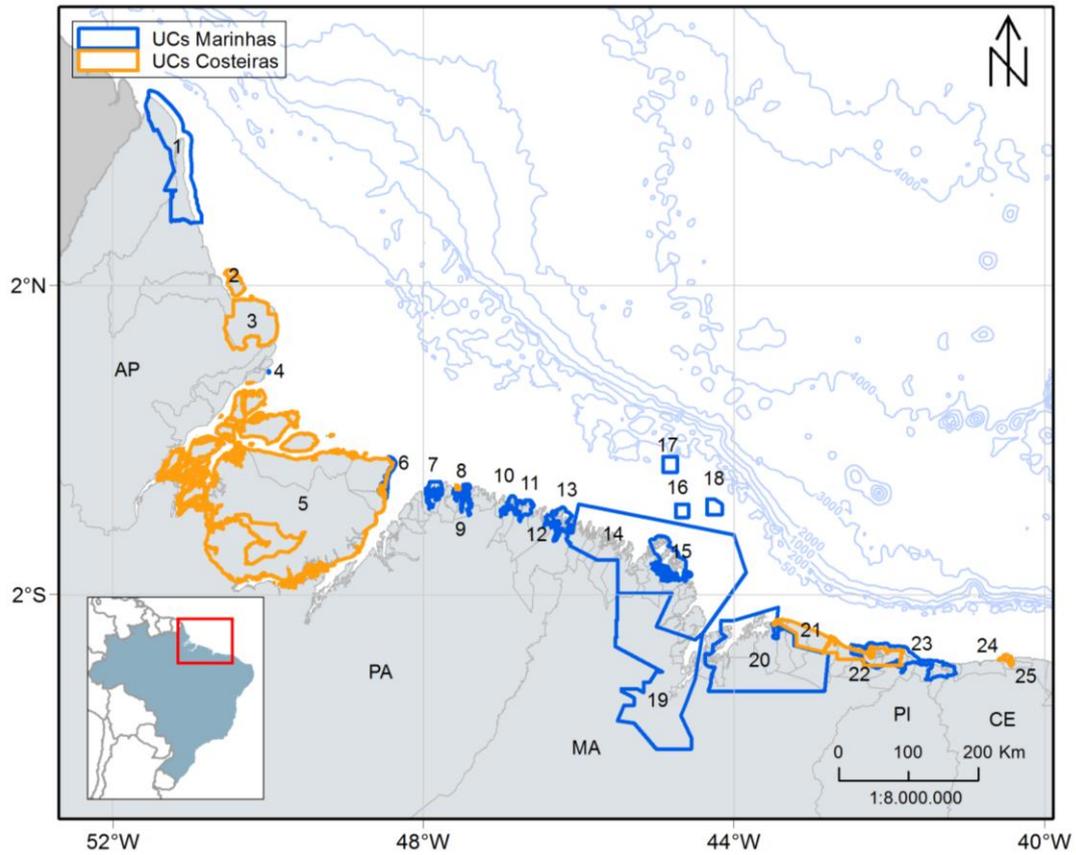


Figura 86: Unidades de Conservação marinhas e costeiras consideradas neste estudo.

Tabela 9: Lista de Unidades de Conservação consideradas neste estudo, suas características e a divisão adotada em marinhas e costeiras.

Nº	Unidade de Conservação	Tipo	Proteção	Esfera	Ano de criação
1	PARNA DO CABO ORANGE	Marinha	Proteção Integral	Federal	1980
2	ESEC DE MARACÁ JIPIOCA	Costeira	Proteção Integral	Federal	1981
3	REBIO DO LAGO PIRATUBA	Costeira	Proteção Integral	Federal	1980
4	REBIO DO PARAZINHO	Marinha	Proteção Integral	Estadual	1985
5	APA DO ARQUIPÉLAGO DO MARAJÓ	Costeira	Uso Sustentável	Estadual	1989
6	RESEX MARINHA DE SOURE	Marinha	Uso Sustentável	Federal	2001
7	RESEX MAE GRANDE DE CURUÇÁ	Marinha	Uso Sustentável	Federal	2002
8	APA DE ALGODOAL-MAIANDEUA	Costeira	Uso Sustentável	Estadual	1990
9	RESEX MARACANÃ	Marinha	Uso Sustentável	Federal	2002
10	RESEX MARINHA TRACUATEUA	Marinha	Uso Sustentável	Federal	2005
11	RESEX MARINHA CAETÉ-TAPERAU	Marinha	Uso Sustentável	Federal	2005
12	RESEX MARINHA ARAI-PEROBA	Marinha	Uso Sustentável	Federal	2005
13	RESEX MARINHA DE GURUPI-PIRIÁ	Marinha	Uso Sustentável	Federal	2005
14	APA DAS REENTRÂNCIAS MARANHENSES	Marinha	Uso Sustentável	Estadual	1991
15	RESEX DE CURURUPU	Marinha	Uso Sustentável	Federal	2004
16	PEM DO BANCO DO TAROL	Marinha	Proteção Integral	Estadual	2014
17	PEM DO BANCO DO ÁLVARO	Marinha	Proteção Integral	Estadual	2014
18	PEM DO PARCEL DE MANUEL LUÍS	Marinha	Proteção Integral	Estadual	1991
19	APA DA BAIXADA MARANHENSE	Marinha	Uso Sustentável	Estadual	1991
20	APA DE UPAON-AÇU / MIRITIBA / ALTO PREGUIÇAS	Marinha	Uso Sustentável	Estadual	1992
21	PARNA DOS LENÇÓIS MARANHENSES	Costeira	Proteção Integral	Federal	1981
22	APA DA FOZ DO RIO DAS PREGUIÇAS - PEQUENOS LENÇÓIS - REGIÃO LAGUNAR ADJACENTE	Costeira	Uso Sustentável	Estadual	1991
23	APA DELTA DO PARNAIBA	Marinha	Uso Sustentável	Federal	1996
24	PARNA DE JERICOACOARA	Costeira	Proteção Integral	Federal	2013
25	APA DA LAGOA DA JIJOCA	Costeira	Uso Sustentável	Estadual	2000

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 consideram três diferentes fases: a fase de jato, a fase de pluma e uma fase passiva com velocidade vertical controlada pelo tamanho das gotículas de óleo, conforme ilustrado na Figura 87.

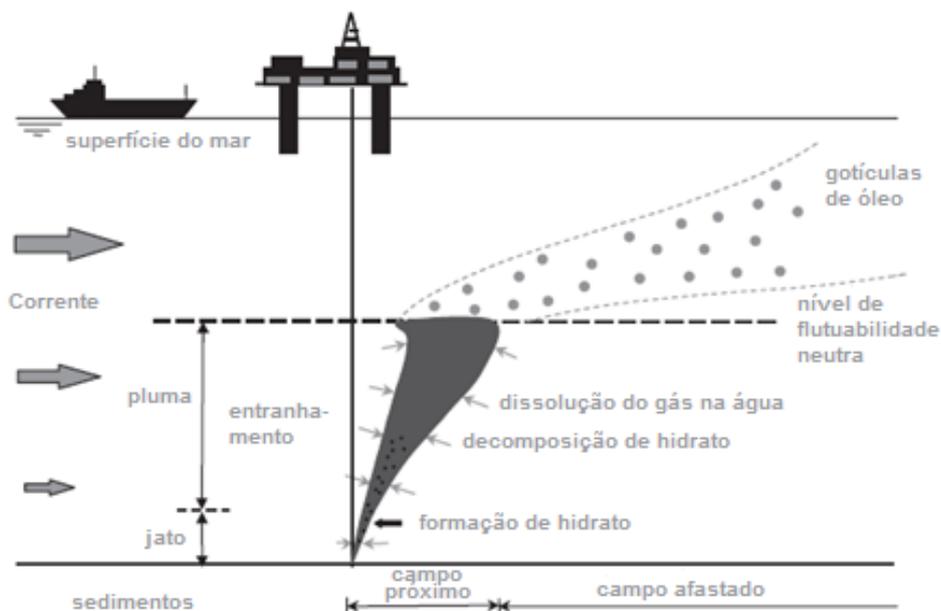


Figura 87: Esquema geral de plumas de *blowout* de óleo em profundidade. Adaptado de Lindersen (2013)

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

Vazamentos de óleo e gás no fundo oceânico resultarão na formação de gotículas de óleo e bolhas de gás respectivamente. Na fase de jato os movimentos são dominados pelas correntes

induzidas pelo próprio vazamento e o tamanho dessas bolhas e gotículas não são consideradas.

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

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

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

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

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

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

- Macro-características do óleo (viscosidade, densidade, etc);

- Dimensões do vazamento;
- Vazão do *blowout*;
- Correntes.

O acoplamento do Plume3D com o modelo de partículas lagrangiano do OSCAR permite um mapeamento tridimensional das partículas em cada instante e, conseqüentemente, o cálculo das concentrações de óleo na coluna d'água e espessuras de óleo em superfície, conforme ilustrado na Figura 88.

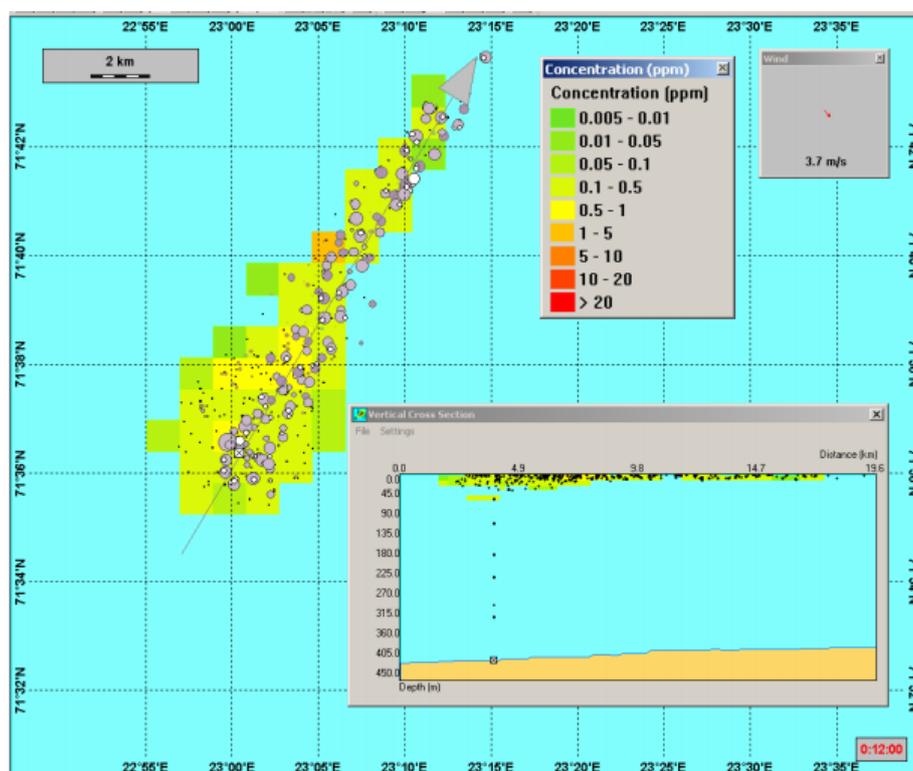


Figura 88: Ilustração de uma simulação de *blowout* no fundo oceânico com o OSCAR. O mapa mostra a distribuição de partículas representando o óleo em superfície (círculos em cinza) e as partículas representando o óleo na coluna d'água (pontos pretos e marrons).

3.1.1.8 Resumo dos parâmetros físicos e numéricos

Os parâmetros físicos utilizados no 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
K_x	coeficiente de dispersão horizontal
H e H_b	altura de onda
$T(1)$	período de onda
x_{le}	largura da mancha de óleo
$\Delta\rho$	diferença entre as densidades da água e do óleo
m	1/2 da taxa de liberação de massa dividido pela corrente superficial
m_i	massa associada ao i-ésimo componente de vazamento
K_e	coeficiente de transferência de massa evaporada
$T(2)$	Temperatura do óleo
P_i	pressão de vapor para o i-ésimo componente
F_i	fração molar do i-ésimo componente remanescente na mancha
C_d	coeficiente de atrito entre a atmosfera e o ar
$U(t)$	velocidade do vento
Q_{di}	taxa de dispersão por unidade de área das gotículas de óleo
C^*	coeficiente de dispersão derivado empiricamente
D	energia da onda dissipada por unidade de área
S	fração da superfície do oceano coberta por óleo
F	fração da superfície do mar coberta pela arrebentação de ondas por unidade de tempo
d_i	diâmetro média das partículas na classe de tamanho i
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
$a'_{\mu, p, p}$	fatores de regressão
$b'_{\mu, p, p}$	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	900 s	Passo de tempo
Δx	3 km	Espaçamento zonal da grade
Δy	3 km	Espaçamento meridional da grade
Δz	40 m	Espaçamento na coluna d'água da grade
n_p	20 mil dissolvidas e 20 mil sólidas	Número de partículas lagrangianas

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

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

3.1.2 Estratégias de Modelagem

As simulações foram realizadas considerando eventos de *blowout* com **vazamentos contínuos no fundo marinho** de 30 dias em 2 cenários sazonais, verão e inverno, por um **orifício de 18 ¾ polegadas** (~476 mm) (informação da contratante). Após 30 dias de vazamento foram ainda simulados mais 30 dias para observação do comportamento da deriva do óleo, totalizando 60 dias (1.440 horas) de simulação.

Além da simulação de pior caso, na qual é considerado o volume de 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 considerou-se como critério de existência de óleo na superfície espessuras maior ou igual 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*”.

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

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

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

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

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

Segundo informações da contratante, para os blocos o óleo esperado é de 32,1° API. Dessa forma foi escolhido um óleo com características similares no banco de dados do OSCAR. As características do óleo utilizado nas simulações são apresentadas na Tabela 13.

A curva de destilação do óleo utilizado 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 do óleo selecionado no banco de dados.

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-alquilado)	0,2867
C13-C14 (total sat + aro)	5,7405
Naftalenos 2 (C2-C3-alquilado)	5,1928
C15-C16 (total sat + aro)	0,6010
HPA 1 (Hidrocarbonetos poliaromático médio solúvel (3 anéis-não-alquilado; < 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-alquilado; 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' O (Figura 89). Com isso, obteve-se uma matriz com 557 por 484 pontos de grade. Para todos os volumes de vazamento, o número de camadas foi de 30, indo de 0 a 1.200 m de profundidade, totalizando 8.087.640 elementos.

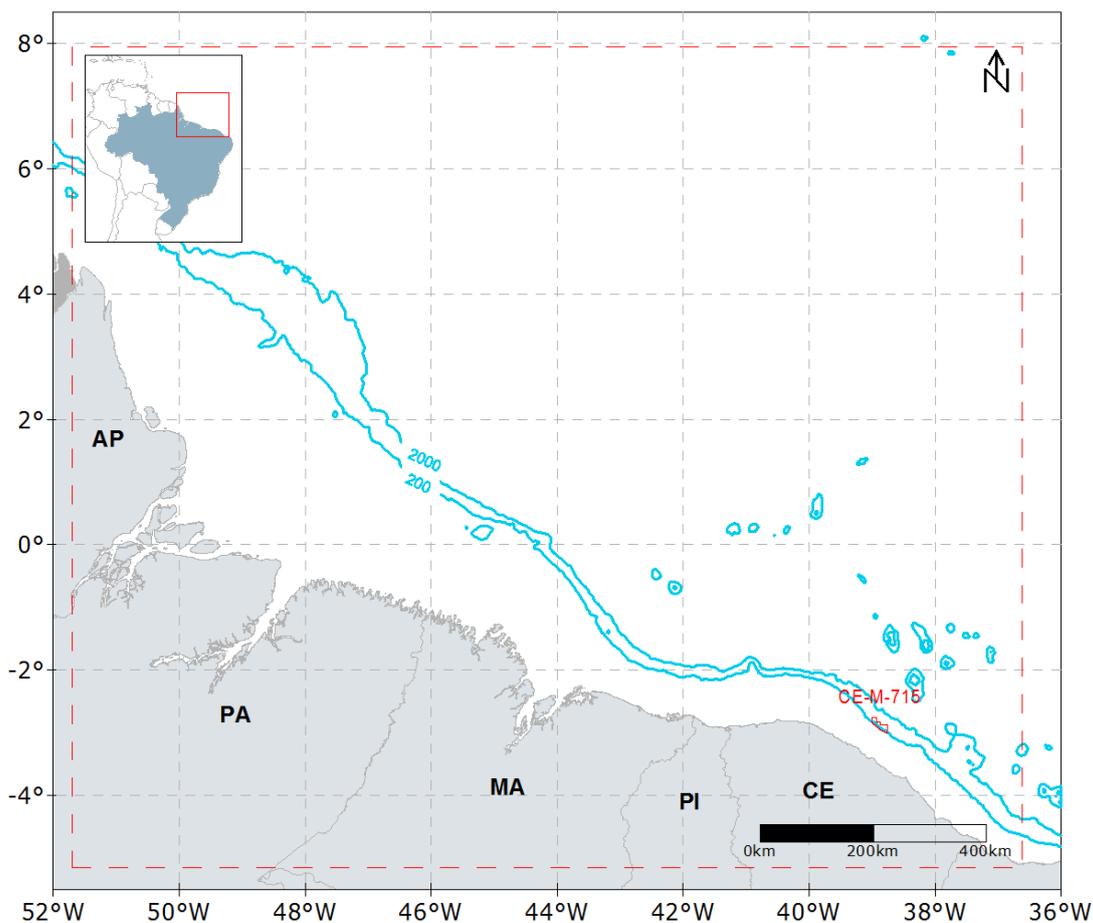


Figura 89: Representação do limite da grade de óleo (linha vermelha tracejada).

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).

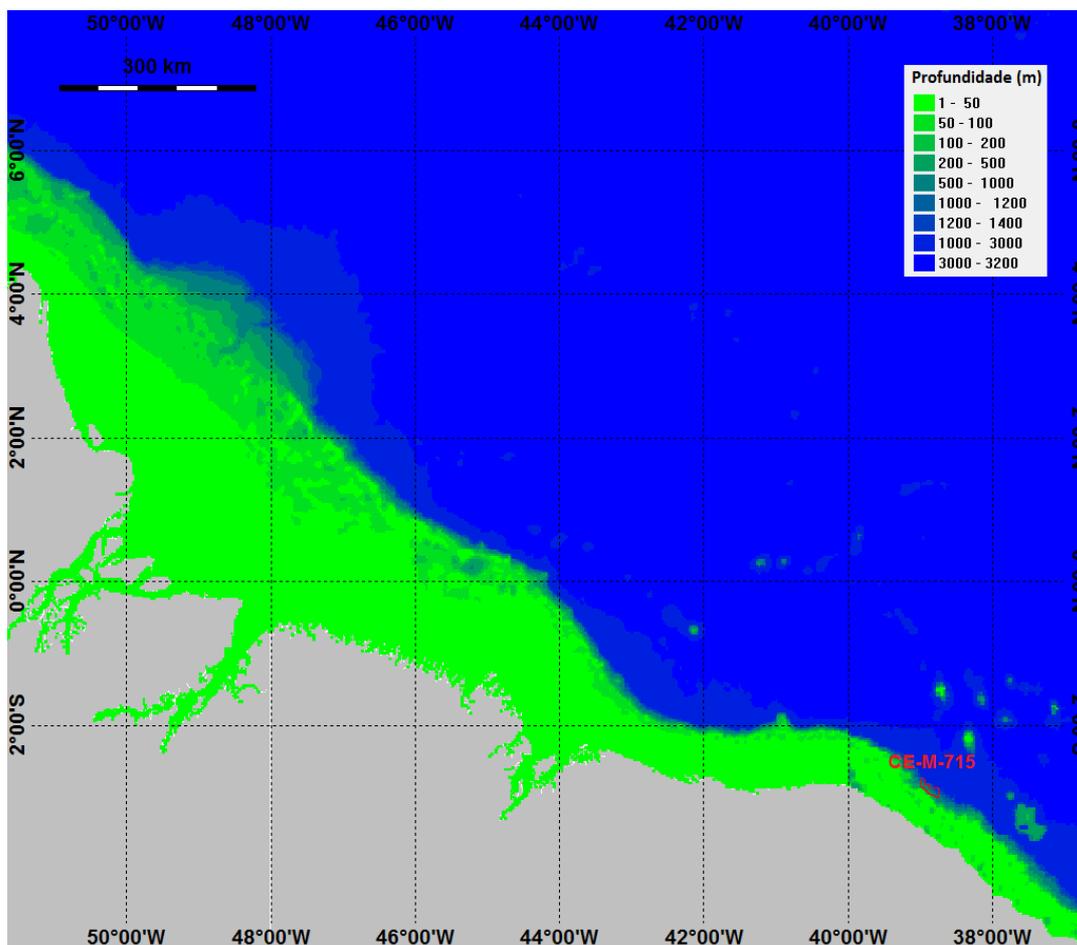


Figura 90: A grade de batimetria utilizada na simulação.

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. Este vai definir a máxima capacidade de retenção do óleo nos pontos da grade do modelo que representam a costa.

Para a definição do tipo de costa para modelagem de óleo foi utilizado como base as informações das Cartas de Sensibilidade ao Óleo (Cartas SAO) disponibilizadas pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) e 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, preparou as Especificações e Normas Técnicas para a Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para Derramamentos de Óleo na zona costeira e marinha, em conjunto com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e a Agência Nacional do Petróleo (ANP).

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: 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 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 nos quais ainda não estão disponíveis informações destas cartas foram complementados com informações do Projeto de Proteção e Limpeza de Costa.

Para adequar a segmentação da costa com a resolução do modelo de óleo, adotou-se o critério que se certo tipo de costa tivesse extensão inferior a 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 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 são provenientes das Reanálises do NCEP – *National Centers for Environmental Prediction* – (KALNAY *et al.*, 1996). A base de dados conhecida como “Reanálises do NCEP” foi originada a partir de uma cooperação entre o NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) e o NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), com intuito de produzir inicialmente uma rede de 40 anos de dados meteorológicos globais com base nas análises dos campos atmosféricos (KALNAY *et al.*, 1996). Posteriormente, esse projeto foi ampliado para uma janela de tempo de 50 anos (KISTLER *et al.*, 2001), e atualmente, estão disponíveis mais de 60 anos (1948-atual) de dados.

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

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

- Dados globais de radiossondas.
- Dados da superfície do mar obtidos através do projeto COADS (*Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set*) no período de 1983 a 1996 (14 anos), originados de diversas fontes, dentre elas, observações de navios, bóias fixas, bóias móveis e estações oceânicas próximas à superfície.
- Dados aéreos, originados de observações por aeronaves em todo o globo, geralmente associados a projetos como GARP (*Global Atmospheric Research Program*) e GATE (*Global Atlantic Tropical Experiment*), por exemplo.
- Dados de Satélite, que começaram a ser obtidos em 1967, através de diversos programas. Atualmente, o NCEP/NCAR utiliza dados fornecidos pelo projeto TOVS (*Operational Vertical Sounder System*), com variáveis em três dimensões, cuja resolução espacial média é de 2,5 graus.
- Dados de vento em superfície, obtidos pelo sensor espacial *Microwave/Imager* (SSM/I) a partir de 1987, submetidos ao tratamento feito pela rede neural de Kransnopolsky *et al.* (1995) *apud* Kalnay *et al.* (1996).

- Dados de cobertura de nuvens obtidos por estimativas dos dados de Satélites Meteorológicos Geoestacionários (SMG). Esses dados estão disponíveis desde 1978.

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

Para este estudo foram tratados 5 anos de dados (2009 a 2013) com uma frequência temporal de 6 horas (4 dados por dia). A resolução espacial na área em questão é de aproximadamente 1,8°. Para a descrição das características locais dos ventos foi utilizado o ponto de grade do NCEP mais próximo aos pontos de simulação (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).

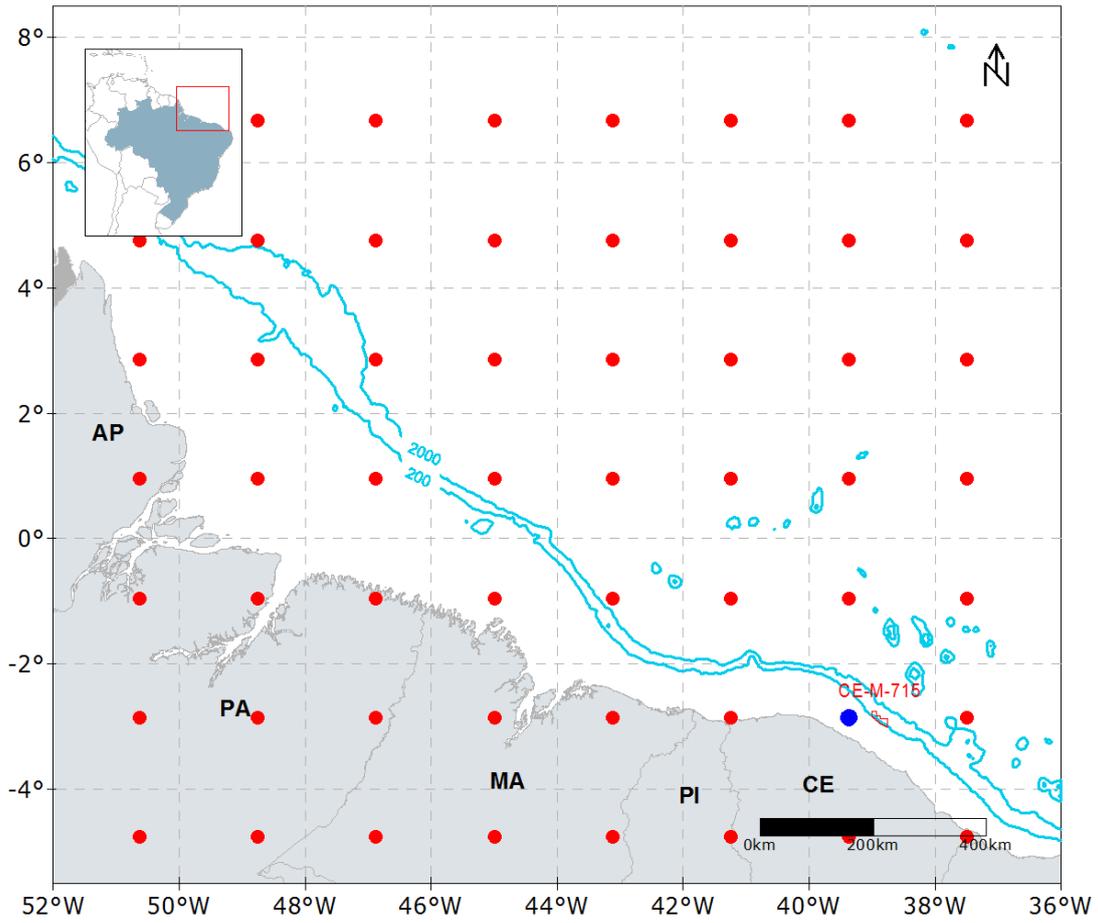


Figura 91: Localização dos pontos de grade do NCEP (em vermelho) em relação ao bloco CE-M-715. Ponto em azul é o mais próximo da região de vazamento.

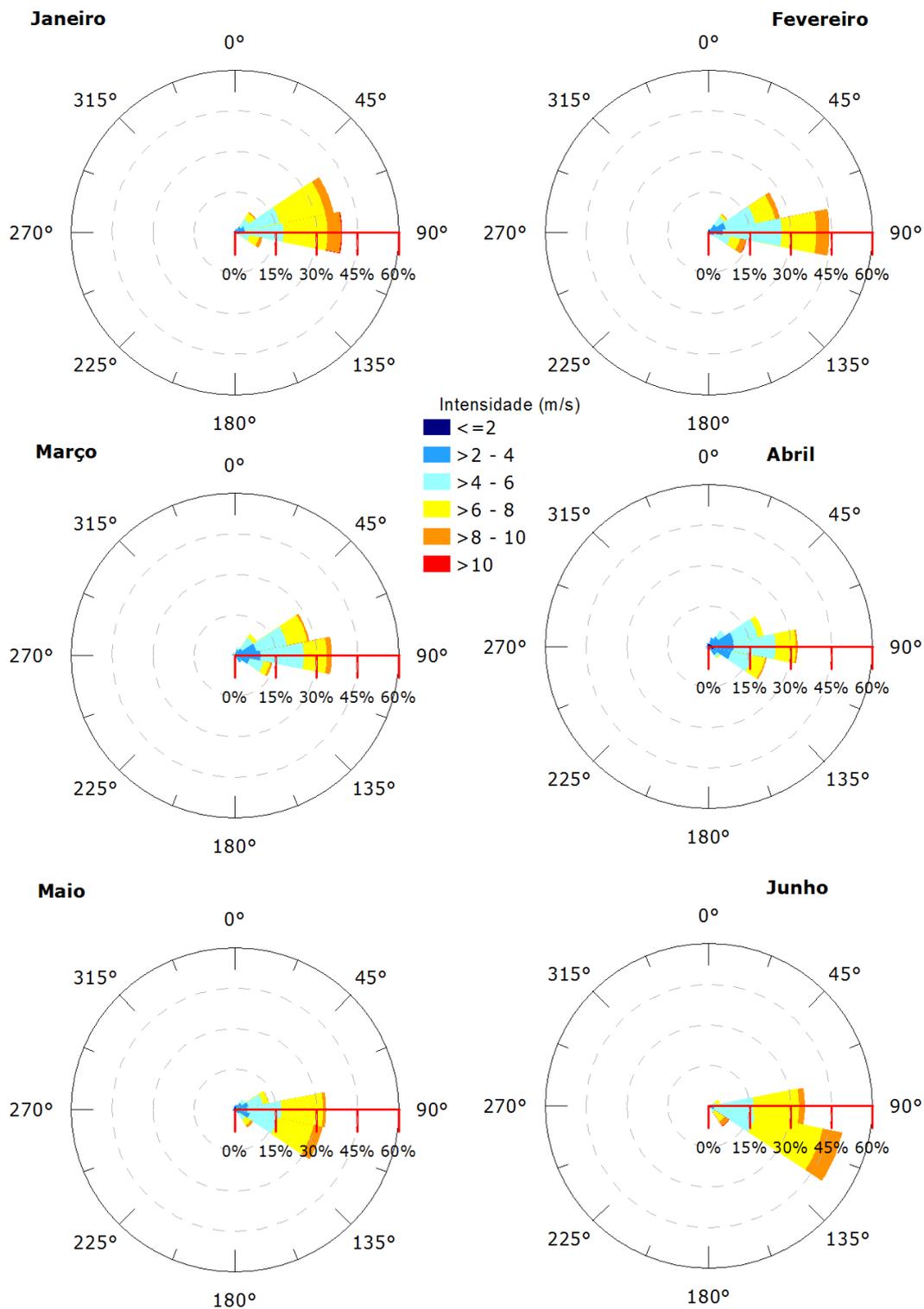


Figura 92: Rosa dos ventos para os meses de janeiro a junho para o ponto mais próximo dos locais de vazamento.

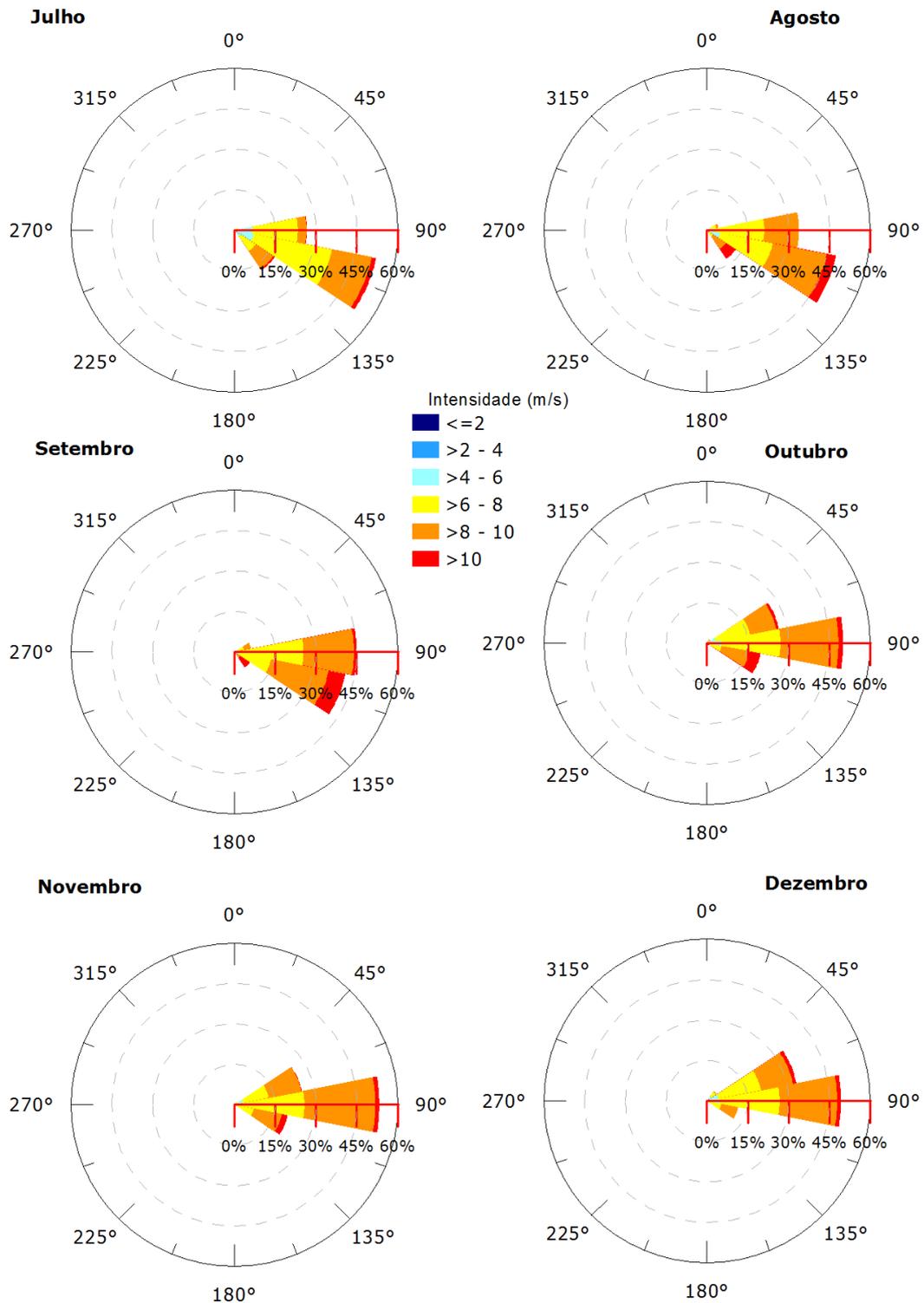


Figura 93: Rosa dos ventos para os meses de julho a dezembro para o ponto mais próximo dos locais de vazamento.

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	-	-	-	-	-	-	-
SO	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	-
Mai	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 à Figura 97) para ponto mais próximo dos locais de vazamento, além das tabelas de ocorrência de direção e intensidade (Tabela 18 à Tabela 21).

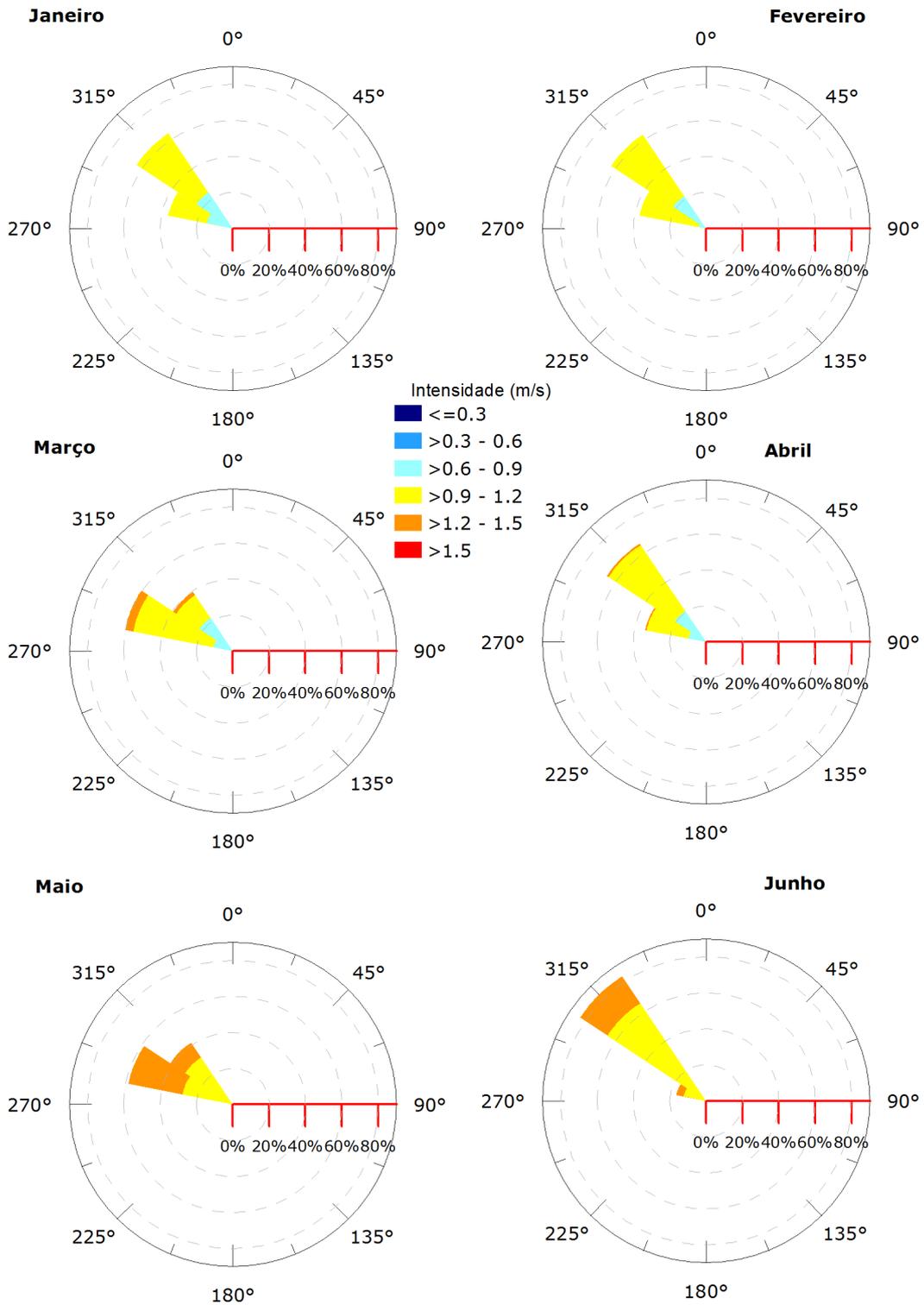


Figura 94: Rosa de correntes para os meses de janeiro a junho para o ponto mais próximo do local de vazamento do poço Pinguim (Ponto A).

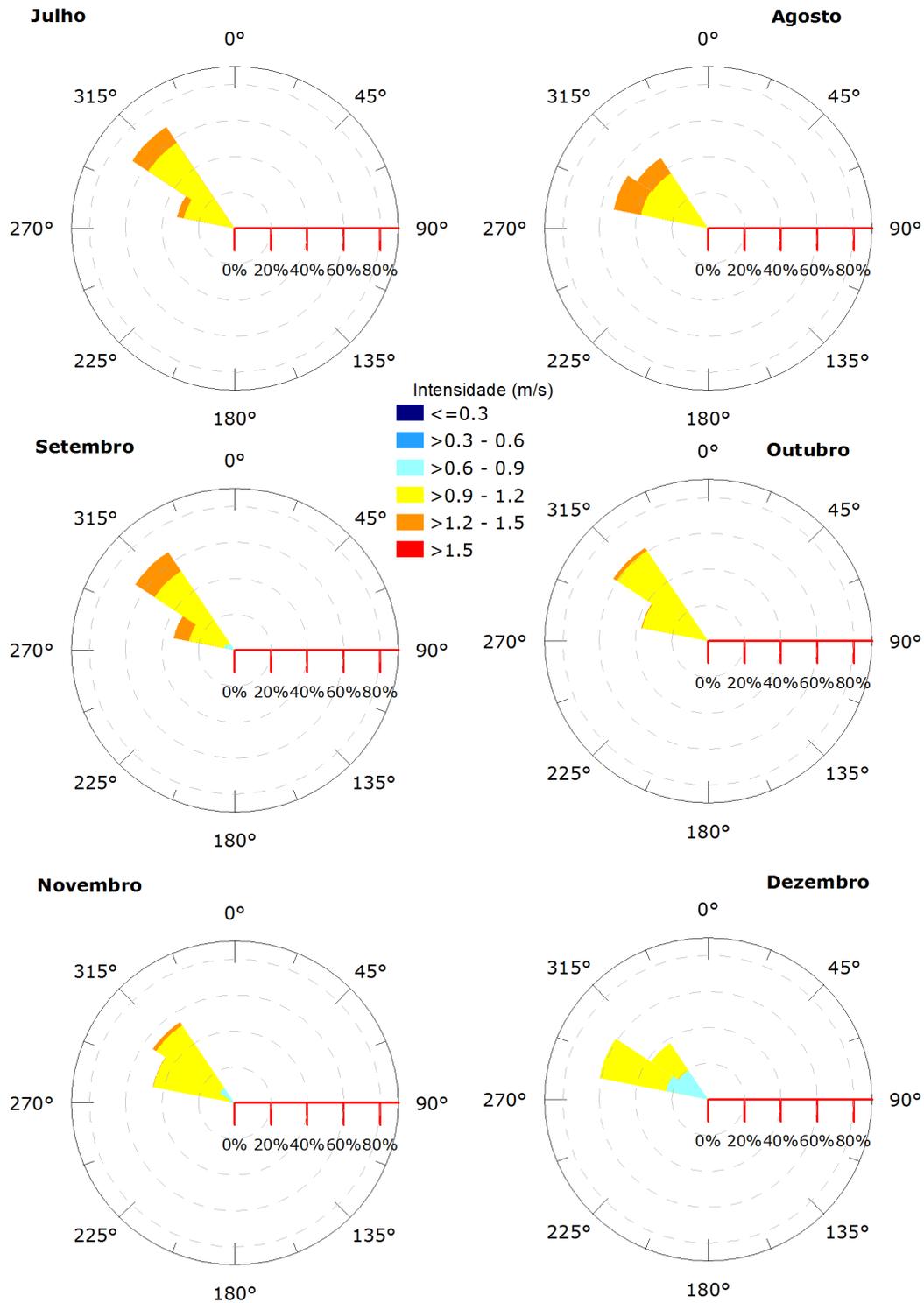


Figura 95: Rosa de correntes para os meses de julho a dezembro para o ponto mais próximo do local de vazamento do poço Pinguim (Ponto A).

Tabela 18: Ocorrência mensal de direção das correntes para o ponto mais próximo do local do vazamento do poço Pinguim (Ponto A).

Direção	Meses do ano											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,90
NNE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ENE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ESE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OSO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ONO	36,29	37,29	60,48	34,17	58,60	16,67	32,26	52,96	34,17	37,37	45,83	61,04
NO	63,71	62,71	39,52	65,83	41,40	83,33	67,74	47,04	65,83	62,63	54,17	37,61
NNO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,45

Tabela 19: Ocorrência mensal de intensidade das correntes para o ponto mais próximo do local do vazamento do poço Pinguim (Ponto A).

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	-	-	38,58	61,42	-	-
Fevereiro	-	-	25,65	74,35	-	-
Março	-	-	32,80	60,48	6,72	-
Abril	-	-	30,28	67,78	1,94	-
Maio	-	-	-	59,68	40,32	-
Junho	-	-	0,83	76,94	22,22	-
Julho	-	-	-	85,75	14,25	-
Agosto	-	-	-	74,46	25,54	-
Setembro	-	-	10,28	68,33	21,39	-
Outubro	-	-	1,61	95,70	2,69	-
Novembro	-	-	12,78	84,72	2,50	-
Dezembro	-	0,23	43,02	56,76	-	-

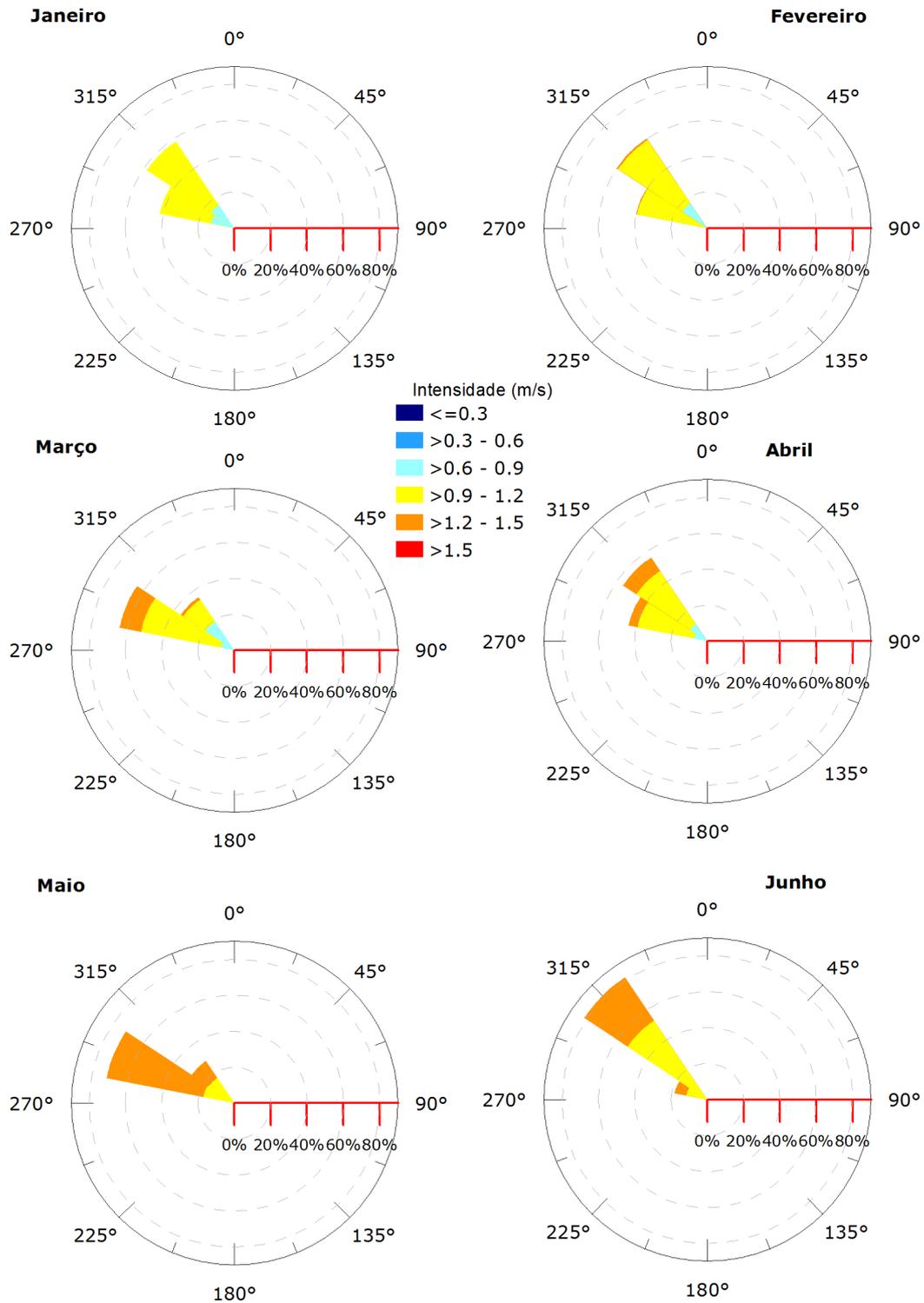


Figura 96: Rosa de correntes para os meses de janeiro a junho para o ponto mais próximo do local de vazamento do poço Gaivota (Ponto B).

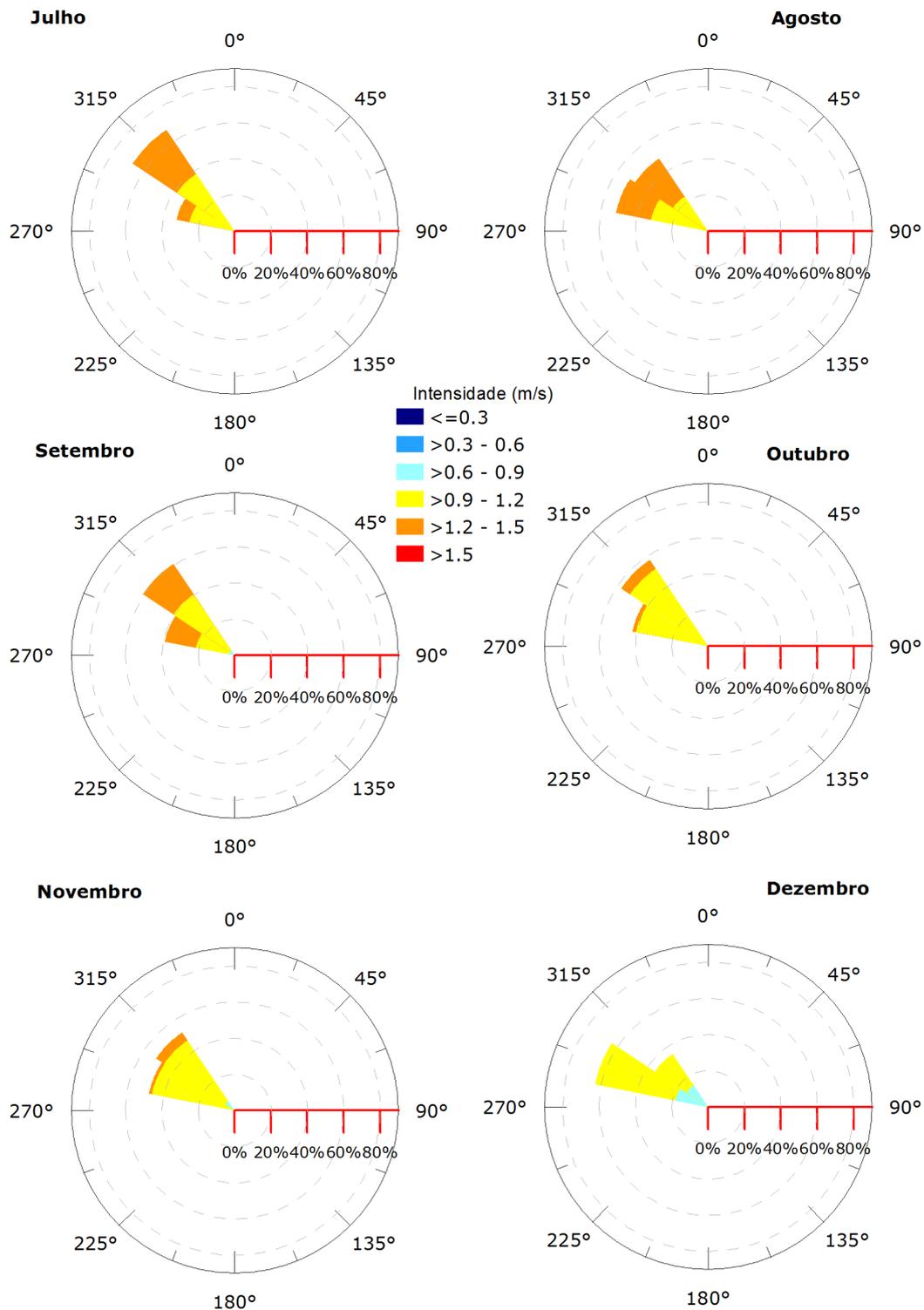


Figura 97: Rosa de correntes para os meses de julho a dezembro para o ponto mais próximo do local de vazamento do poço Gaivota (Ponto B).

Tabela 20: Ocorrência mensal de direção das correntes para o ponto mais próximo do local do vazamento do poço Gaivota (Ponto B).

Direção	Meses do ano											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,90
NNE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ENE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ESE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SSO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OSO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ONO	41,94	39,90	64,52	44,17	71,77	18,33	32,53	51,61	39,17	42,47	48,06	63,51
NO	58,06	60,10	35,48	55,83	28,23	81,67	67,47	48,39	60,83	57,53	51,94	35,14
NNO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,45

Tabela 21: Ocorrência mensal de intensidade das correntes para o ponto mais próximo do local do vazamento do poço Gaivota (Ponto B).

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	-	-	28,49	71,51	-	-
Fevereiro	-	-	18,29	80,29	1,43	-
Março	-	-	26,61	59,68	13,71	-
Abril	-	-	18,89	67,22	13,89	-
Maio	-	-	-	34,41	65,59	-
Junho	-	-	-	64,44	35,56	-
Julho	-	-	-	63,44	36,56	-
Agosto	-	-	-	55,11	44,89	-
Setembro	-	-	6,39	55,83	37,78	-
Outubro	-	-	-	91,94	8,06	-
Novembro	-	-	6,11	86,94	6,94	-
Dezembro	-	0,23	32,66	67,12	-	-

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** é caracterizado pela maior frequência de ventos de leste-nordeste e leste. No segundo período, entre os meses de **abril e setembro**, denominado **período de inverno**, existe a predominância dos ventos de sudeste e leste.

No que tange aos dados de corrente, é observado que ao longo do ano há um predomínio direcional de oeste-noroeste e noroeste para todos os pontos de vazamento, não apresentando um padrão bem definido de sazonalidade.

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 dos resultados da Modelagem Hidrodinâmica apresentados no item 2.

Os perfis apresentados (Figura 98) representam a média dos dados para o ponto de grade mais próximo do ponto de vazamento com maior profundidade e dentro dos períodos sazonais escolhidos.

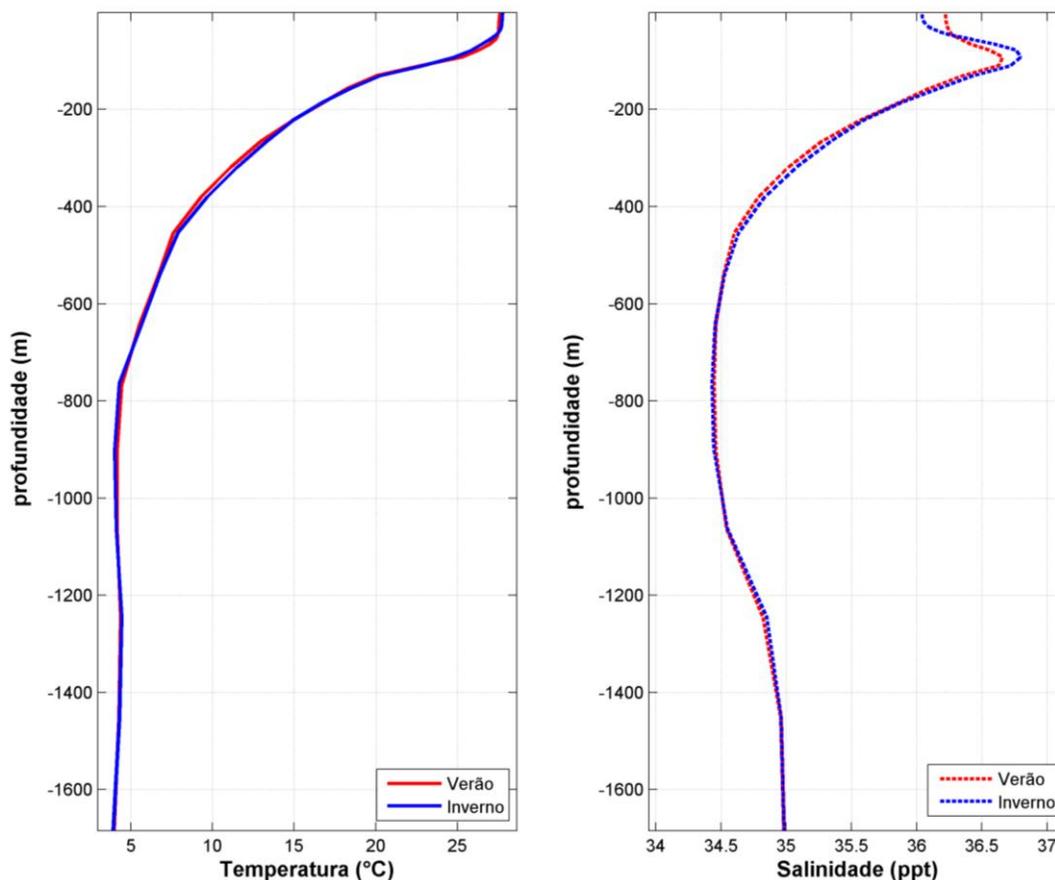


Figura 98: Perfis de salinidade e temperatura para os pontos de vazamento.

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:

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

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 99 e na Figura 100, respectivamente.

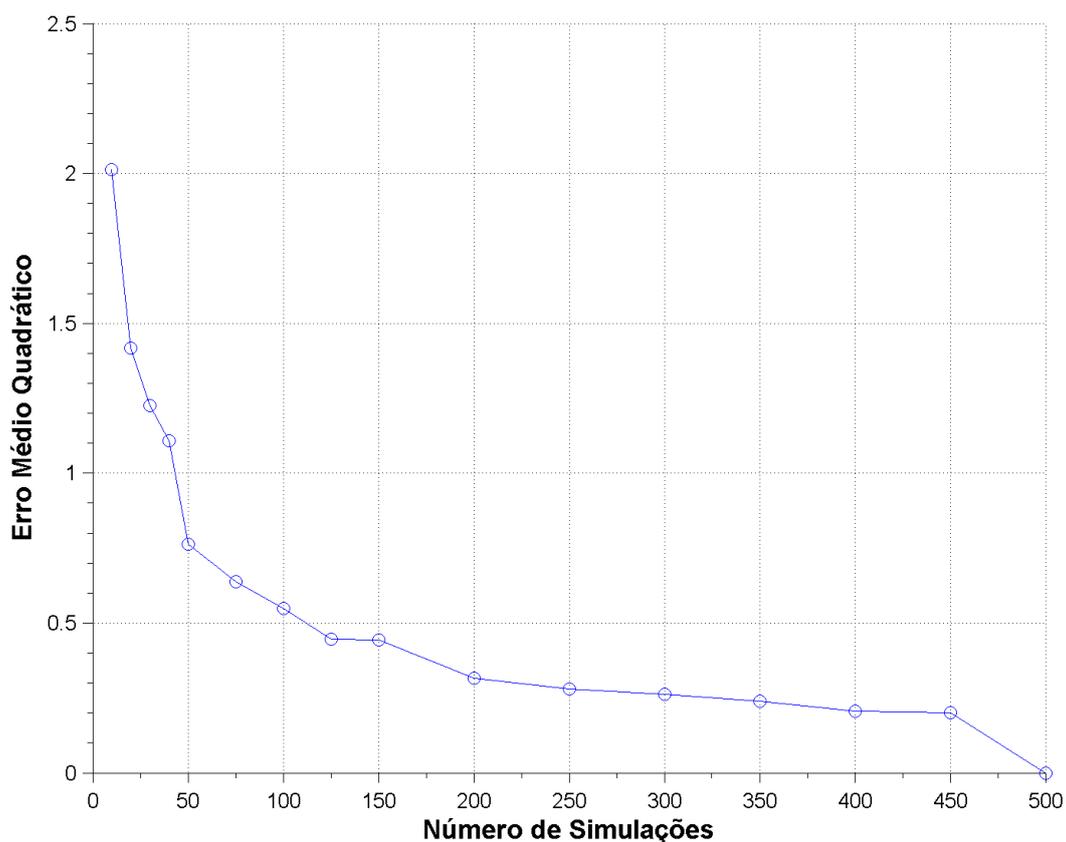


Figura 99: Curva do Erro Médio Quadrático (RMSE).

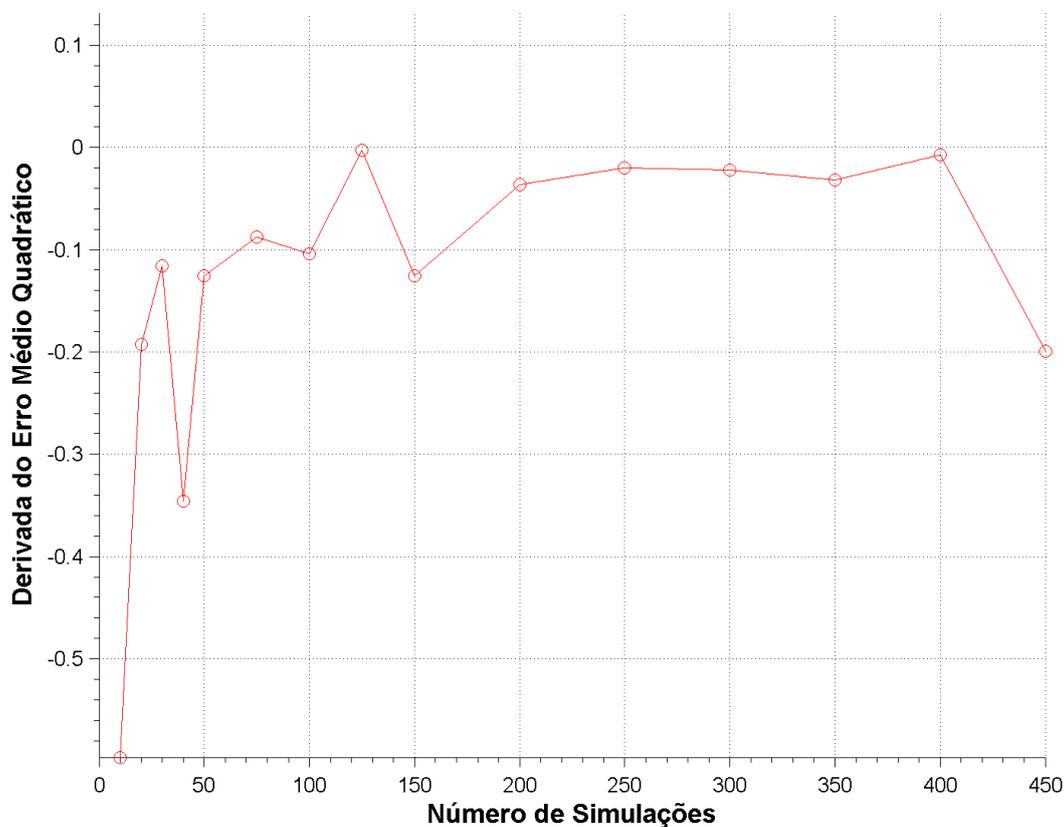


Figura 100: Derivada da curva do Erro Médio Quadrático (RMSE).

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

Porém, para ilustrar ainda mais a escolha de 300 simulações, a seguir são apresentados mapas de probabilidade de presença de óleo para a região da Bacia da Foz do Amazonas para simulações realizadas com 300 e 500 simulações. Estas comparações são consideradas representativas para a área da Bacia do Ceará por estarem sob influência do mesmo sistema meteorológico e condições oceanográficas semelhantes a da Bacia da Foz do Amazonas.

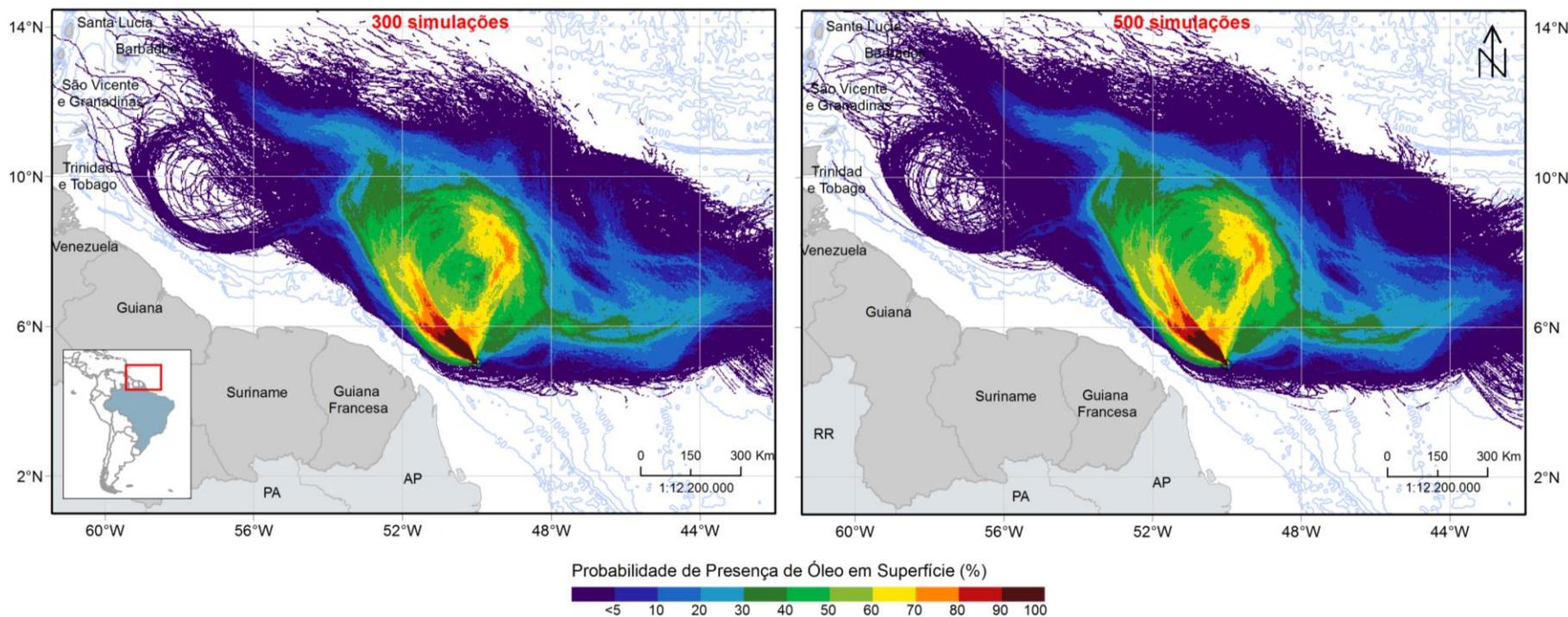


Figura 101: Mapa de probabilidade de presença de óleo para um ponto de risco na Margem Equatorial com 300 e 500 simulações.

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 102, Figura 103 e Figura 104). 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 102) entre os dois casos mostra um comportamento quase que simétrico (considerando o zero como centro), onde as diferenças estão na mesma intensidade, não tendendo sobestimar ou subestimar algum dos casos. Agora ao considerar somente a diferença absoluta (Figura 103), 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 104).

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.

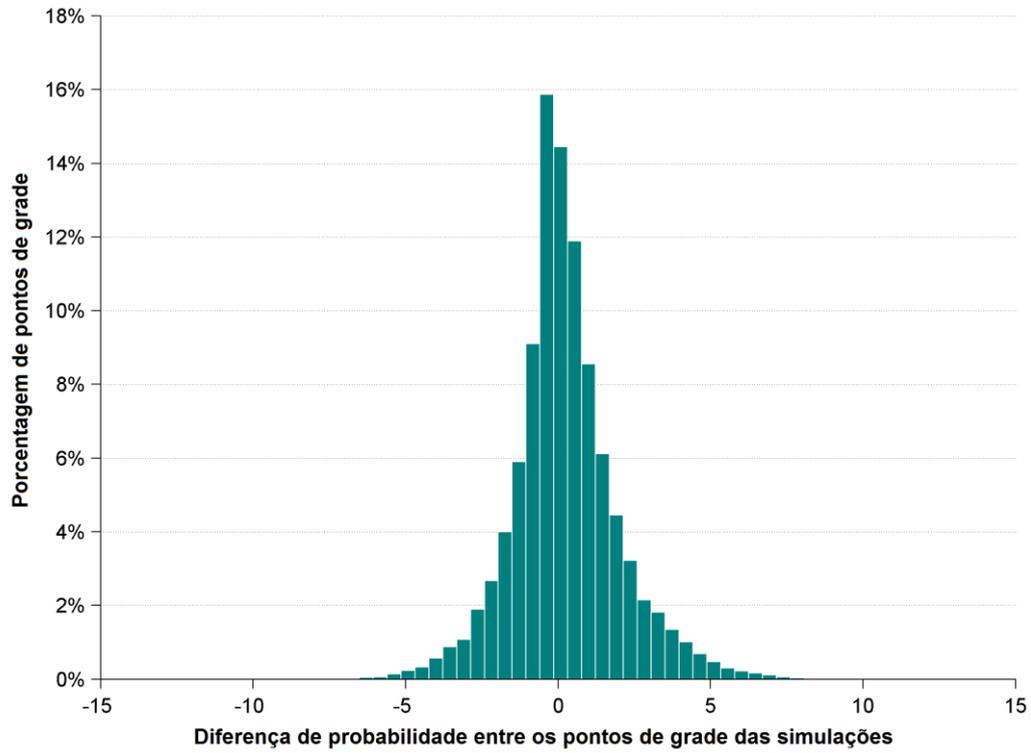


Figura 102: Histograma de diferença de probabilidade de presença de óleos nos casos de 300 e 500 simulações. Valor positivo representa maior probabilidade no caso de 500 simulações. Valor negativo representa maior probabilidade no caso de 300 simulações.

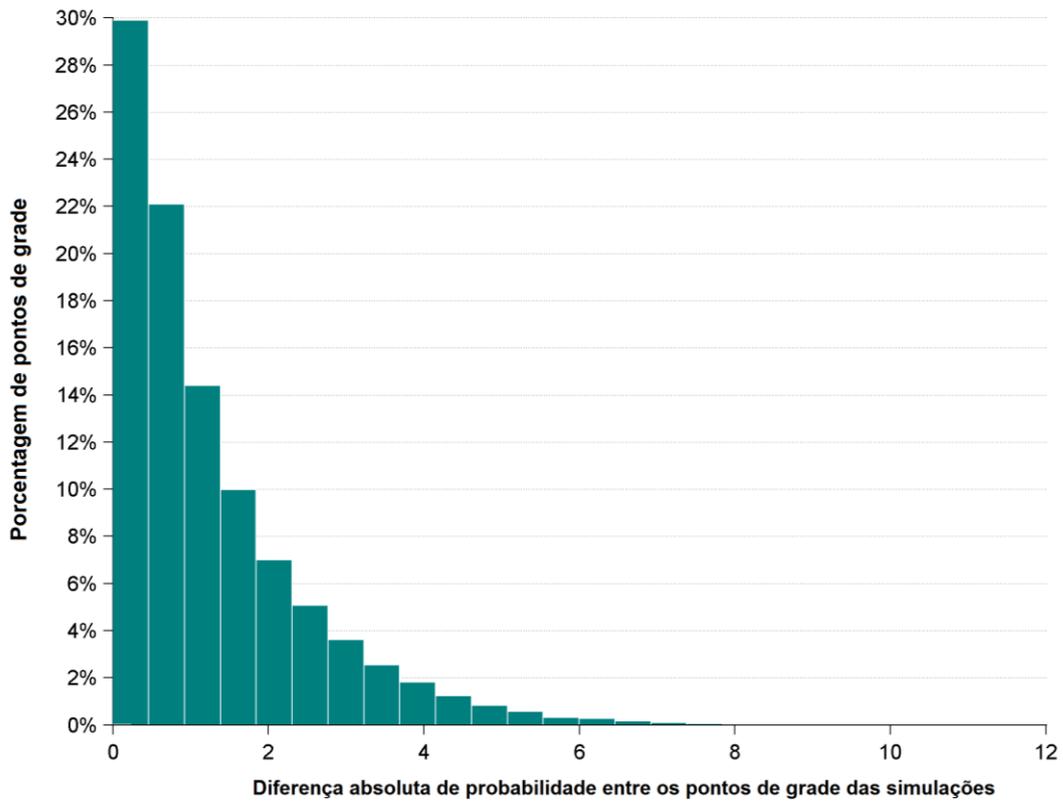


Figura 103: Histograma de diferença absoluta de probabilidade de presença de óleos nos casos de 300 e 500 simulações.

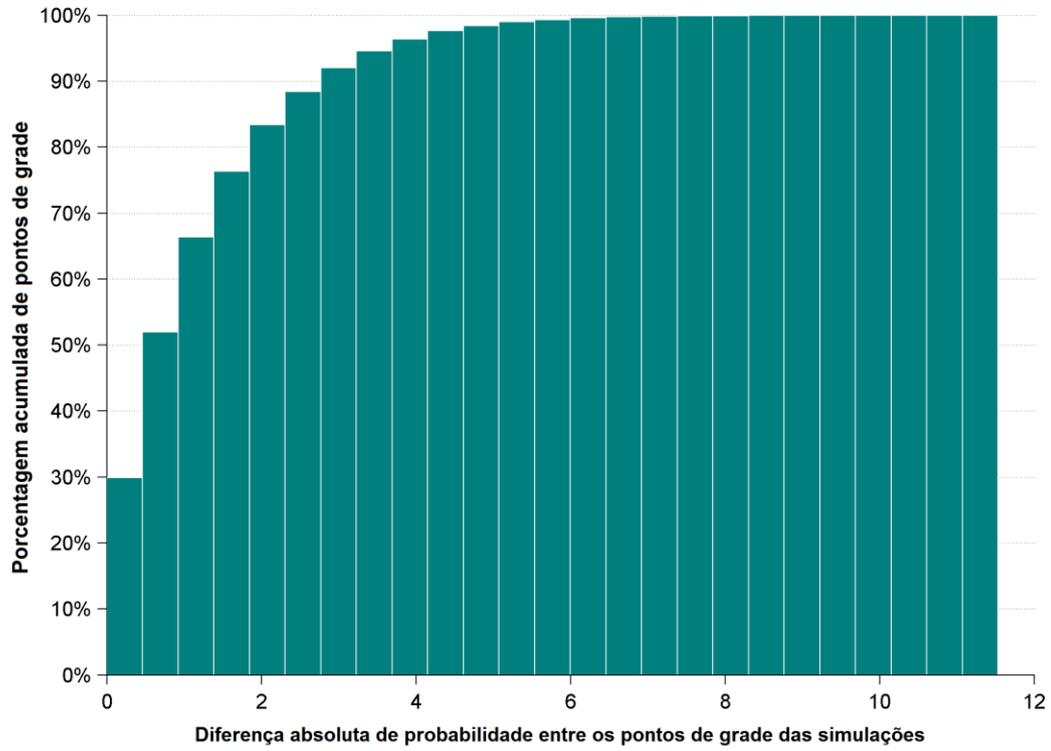


Figura 104: Histograma acumulado de diferença absoluta de probabilidade de presença de óleos nos casos de 300 e 500 simulações.

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, para cada ponto de vazamento.

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

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

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

Para avaliar a contribuição dos processos de intemperismo no balanço de massa do óleo nas simulações determinísticas que compõem os cenários probabilísticos, são apresentados gráficos do tipo *box-plot*. Nesse tipo de gráfico, é possível representar graficamente uma amostra de dados através de parâmetros estatísticos básicos como valores mínimo, máximo, mediana, primeiro e terceiro quartis. A Figura 105 mostra o esquema da apresentação dos parâmetros no gráfico *box-plot*.

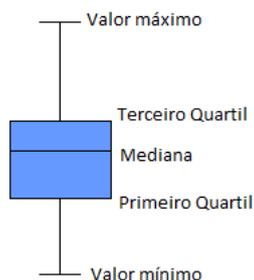


Figura 105: Gráfico do tipo *box-plot*.

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

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

A Figura 106 e a Figura 107 resumem a forma como os resultados dos modos probabilísticos e determinísticos serão apresentados, respectivamente.

Volume	Resultado	Tempo de Simulação
8 m ³	Mapa de Probabilidade em superfície	30 dias
	Mapa de Tempo Mínimo em superfície	30 dias
	Balço de Massa de Óleo	30 dias
200 m ³	Mapa de Probabilidade em superfície	30 dias
	Mapa de Probabilidade na coluna d'água	30 dias
	Mapa de Tempo Mínimo em superfície	30 dias
	Balço de Massa de Óleo	30 dias
Pior caso (13.307 m ³)	Mapa de Probabilidade em superfície	60 dias
	Mapa de Probabilidade na coluna d'água	60 dias
	Mapa de Probabilidade na costa	60 dias
	Mapa de Probabilidade no fundo marinho	60 dias
	Mapa de Tempo Mínimo em superfície	60 dias
	Mapa de Tempo Mínimo na costa	60 dias
	Mapa de Massa Máxima na Costa	60 dias
	Balço de Massa de Óleo	60 dias

Figura 106: Fluxograma de apresentação dos resultados probabilístico.

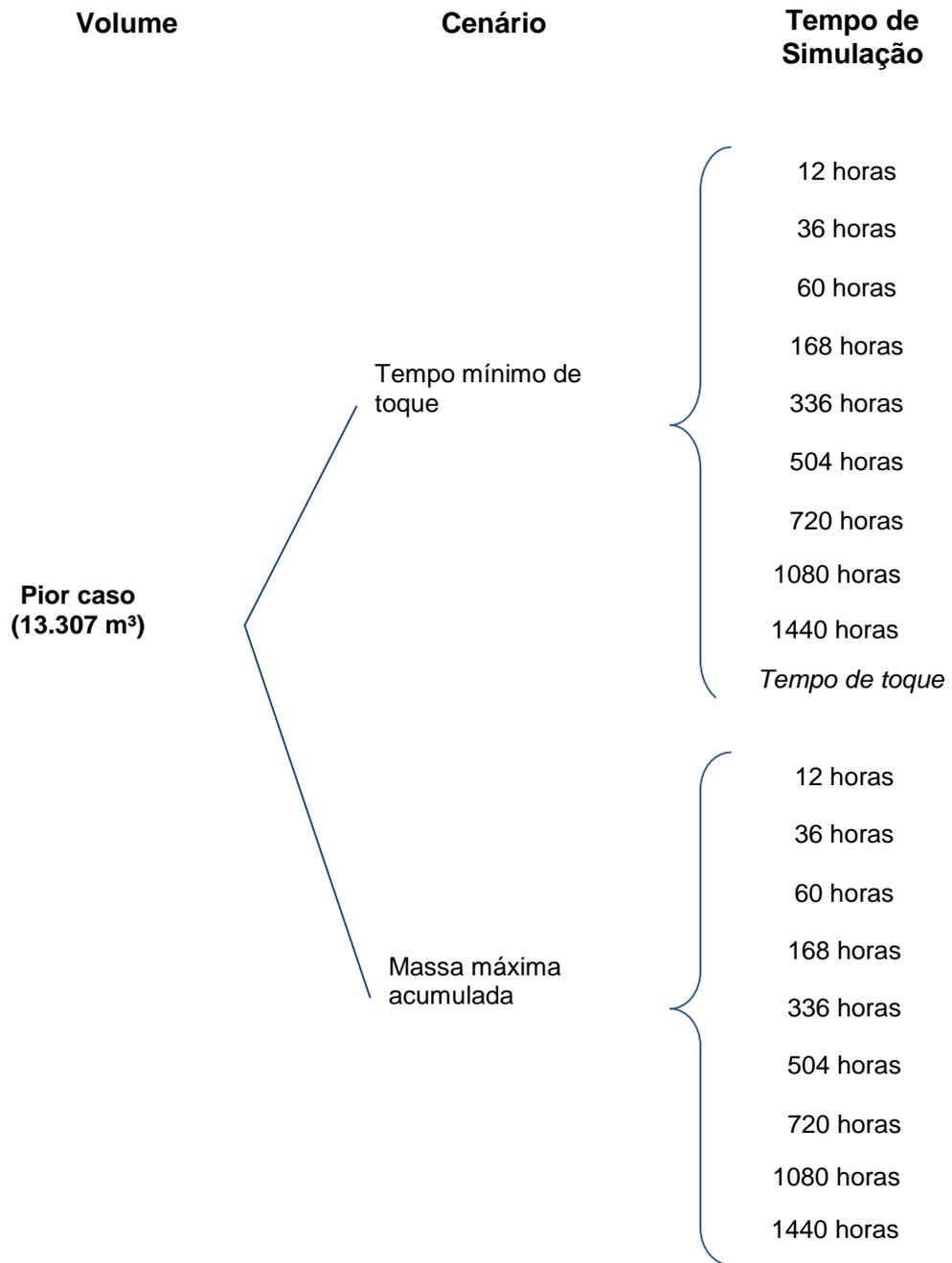


Figura 107: Fluxograma de apresentação dos resultados determinísticos.

3.2.1 Resultados Probabilísticos

A seguir serão apresentados os resultados do modo probabilístico para os vazamentos a partir dos pontos de vazamento do bloco CE-M-715 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 Poço Pinguim (Ponto A)

3.2.1.1.1 Vazamento de 8 m³

3.2.1.1.1.1 Verão

A seguir são apresentados os resultados de probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada e o balanço de massa ao final das simulações para o vazamento de 8 m³ no período de verão.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto A | Verão

Volume: 8 m³

Probabilidade de Presença de Óleo na Superfície (%)

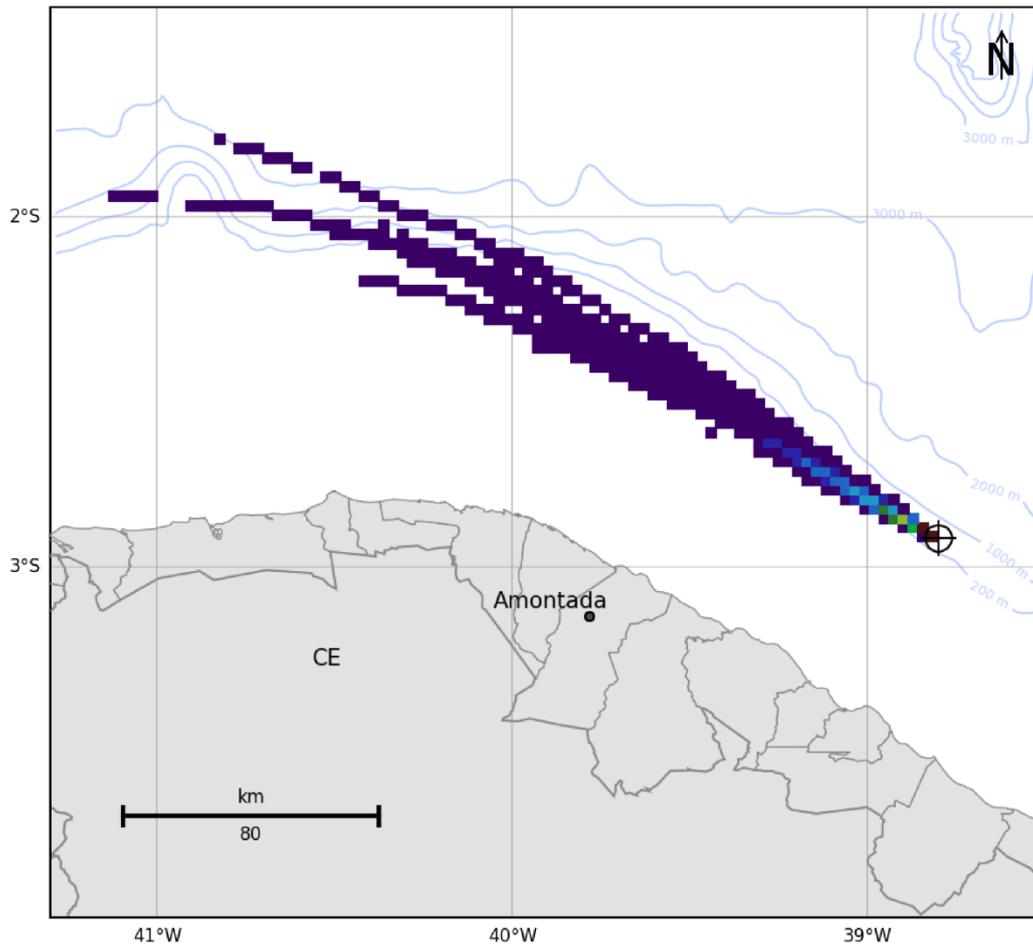
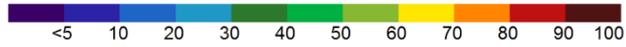


Figura 108: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m³ no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto A | Verão

Volume: 8 m³

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

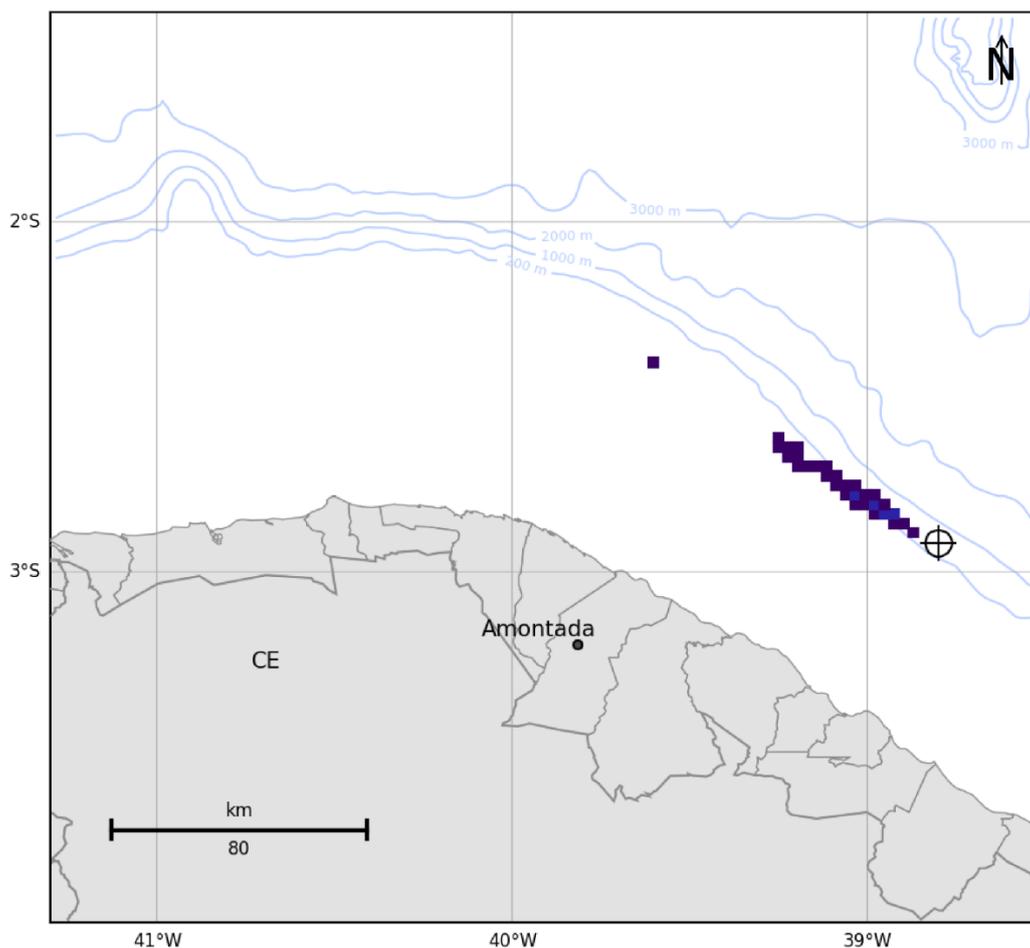


Figura 109: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água para vazamento de 8 m³ no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto A | Verão

Volume: 8 m³

Tempo Mínimo de Chegada de Óleo na Superfície (dias)

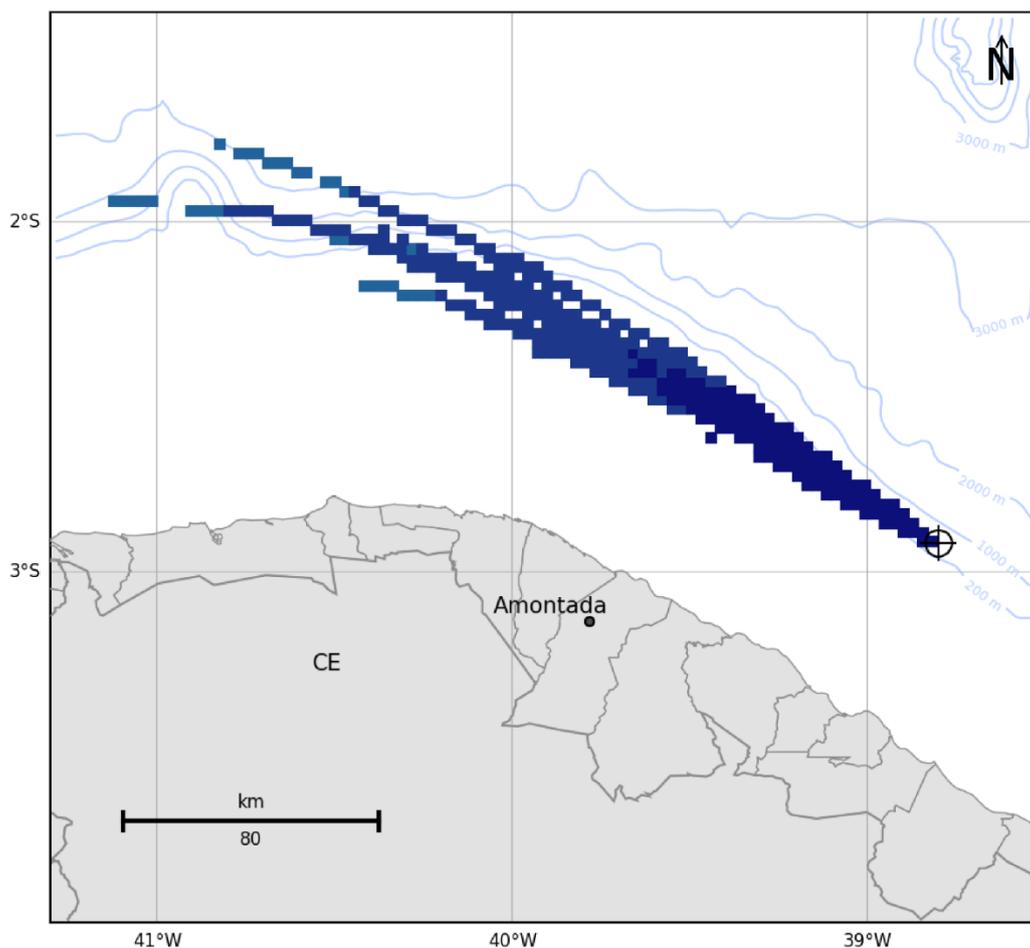


Figura 110: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m³ no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).

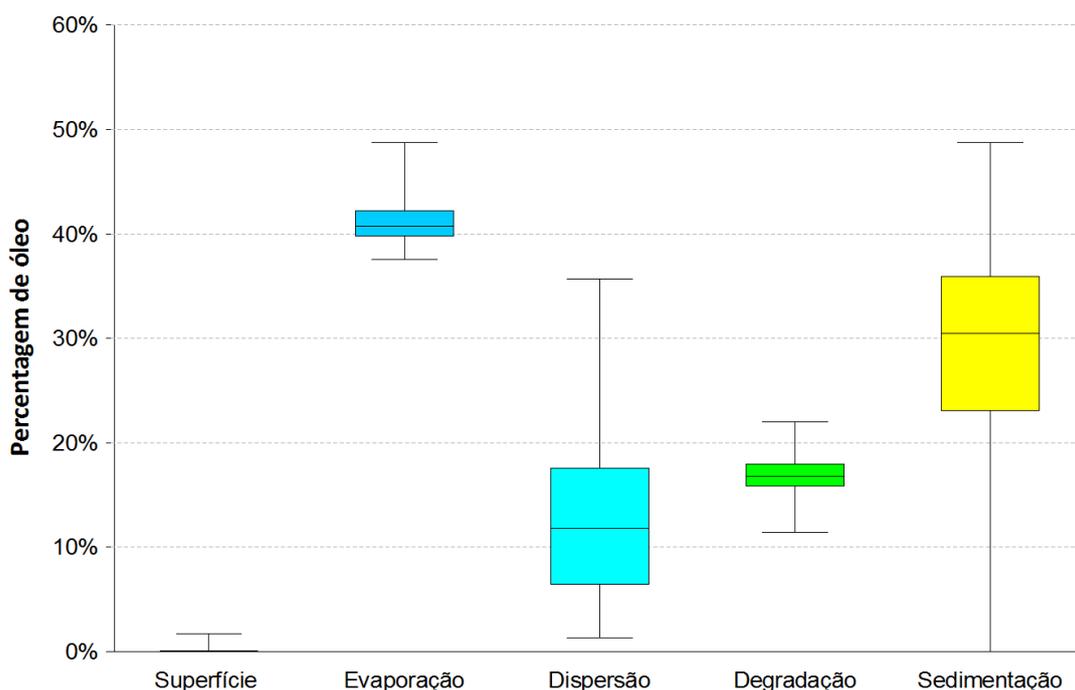


Figura 111: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 8 m³ no cenário de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A).

O óleo neste cenário teve deriva para noroeste do ponto de vazamento, seguindo o fluxo da Corrente Norte do Brasil (CNB), paralelamente à costa, chegando a uma distância de 280 km do ponto de vazamento em superfície. A menor distância em relação à costa foi de 47 km até Amontada-CE e nenhuma unidade de conservação da região apresentou probabilidade de presença de óleo.

Observa-se que em até 1 dia após o início do vazamento, o óleo pode percorrer uma extensão de até 115 km. As regiões mais afastadas com probabilidade apresentam tempo mínimo de chegada de até 5 dias e os pontos mais próximos da costa são alcançados entre 1-3 dias.

Na coluna d'água, as probabilidades de presença de óleo são inferiores a 10% e o óleo atinge uma distância de cerca de 108 km do ponto de vazamento.

Observa-se que a retirada de óleo da superfície ocorreu principalmente através da evaporação (mediana de ~41%). Os valores da dispersão e da sedimentação apresentaram grande variação entre os valores mínimos e máximos, sendo que a dispersão oscilou nos valores mais baixos e a sedimentação com valores mais altos.

Esta alta porcentagem de óleo associado ao fundo (acima de 23% do total de óleo vazado) em 75% das simulações se deve ao fato que em regiões rasas sobre a plataforma continental com presença de vento forte, como verificado na região (Tabela 17), o óleo é entranhado e misturado na coluna d'água e, conseqüentemente, tem alta probabilidade de atingir o fundo

marinho. Esse comportamento ocorre principalmente com as gotículas de óleo que tiveram grande deslocamento a partir do ponto de vazamento em direção às áreas rasas, uma vez que estas estão espalhadas por uma grande área espacial, ocupando grande parte da coluna d'água.

3.2.1.1.2 Inverno

A seguir são apresentados os resultados de probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada e o balanço de massa ao final das simulações para o vazamento de 8 m³ no período de inverno.

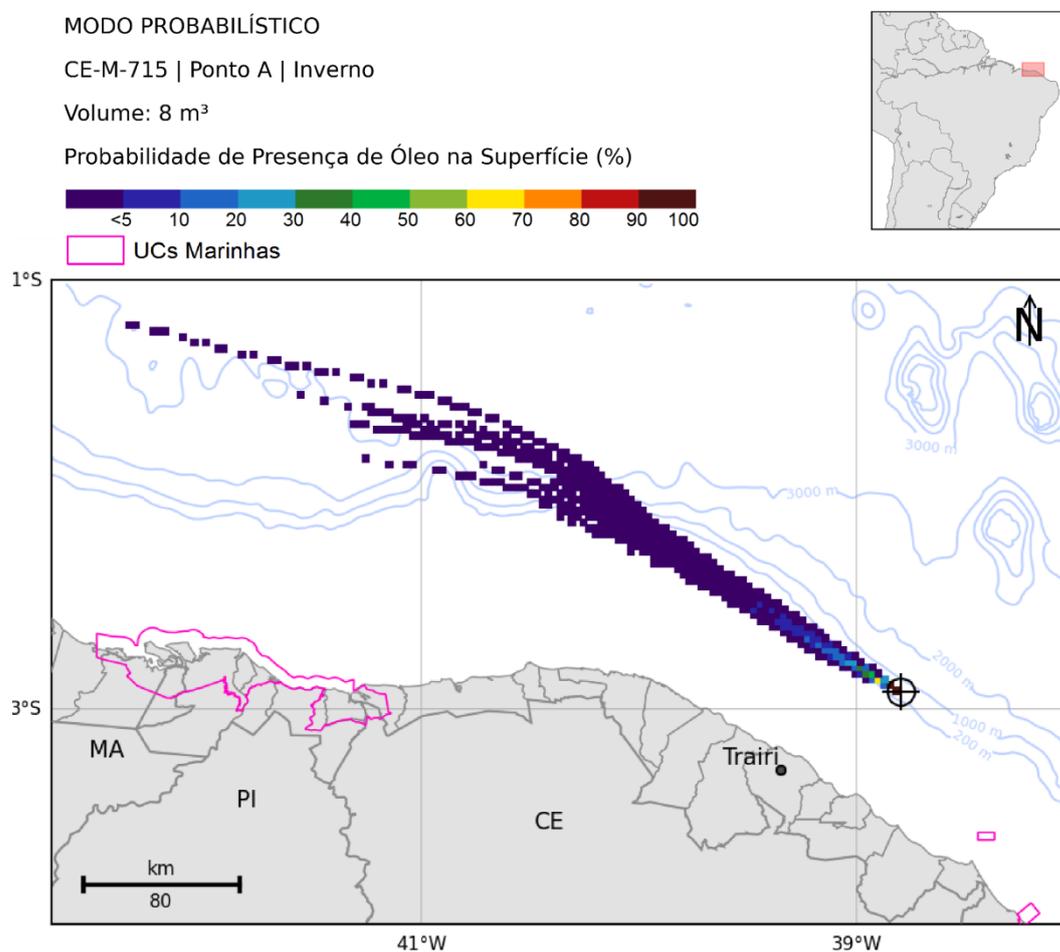


Figura 112: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m³ no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).

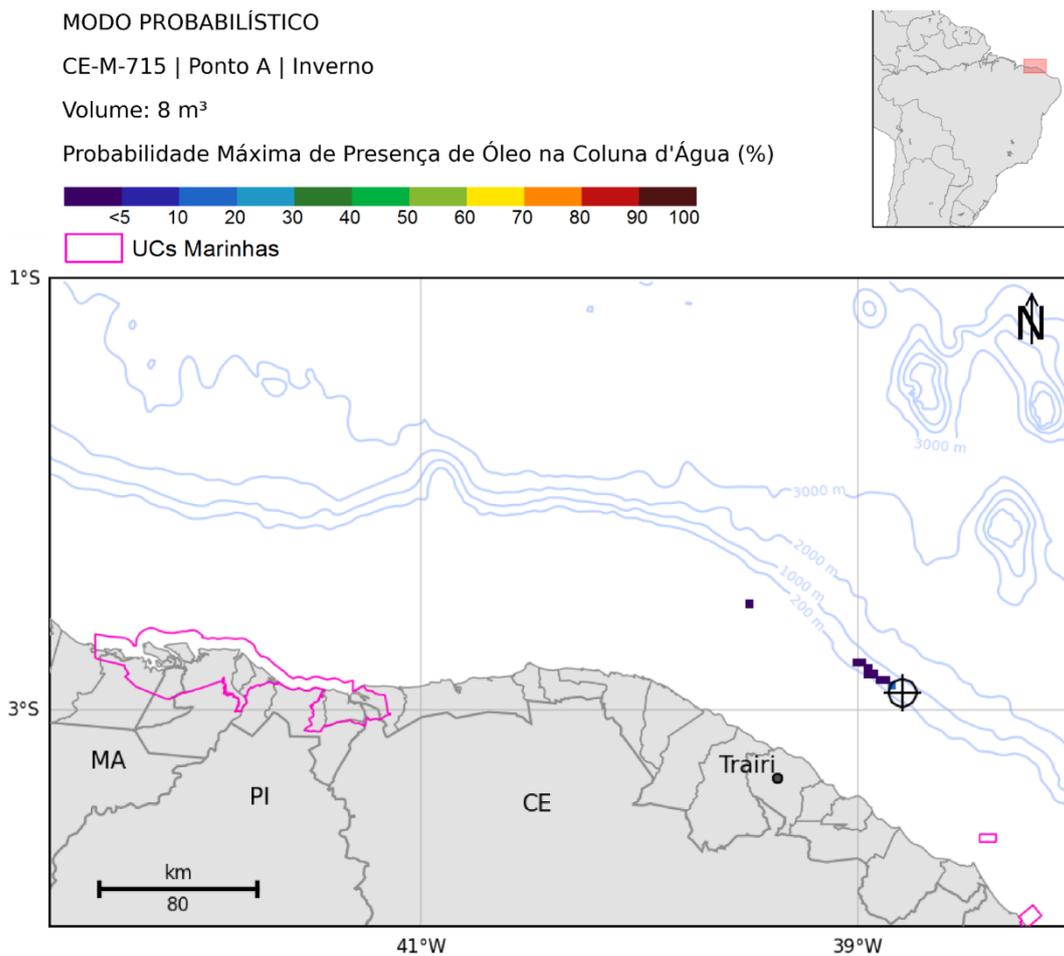


Figura 113: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 8 m³ no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).

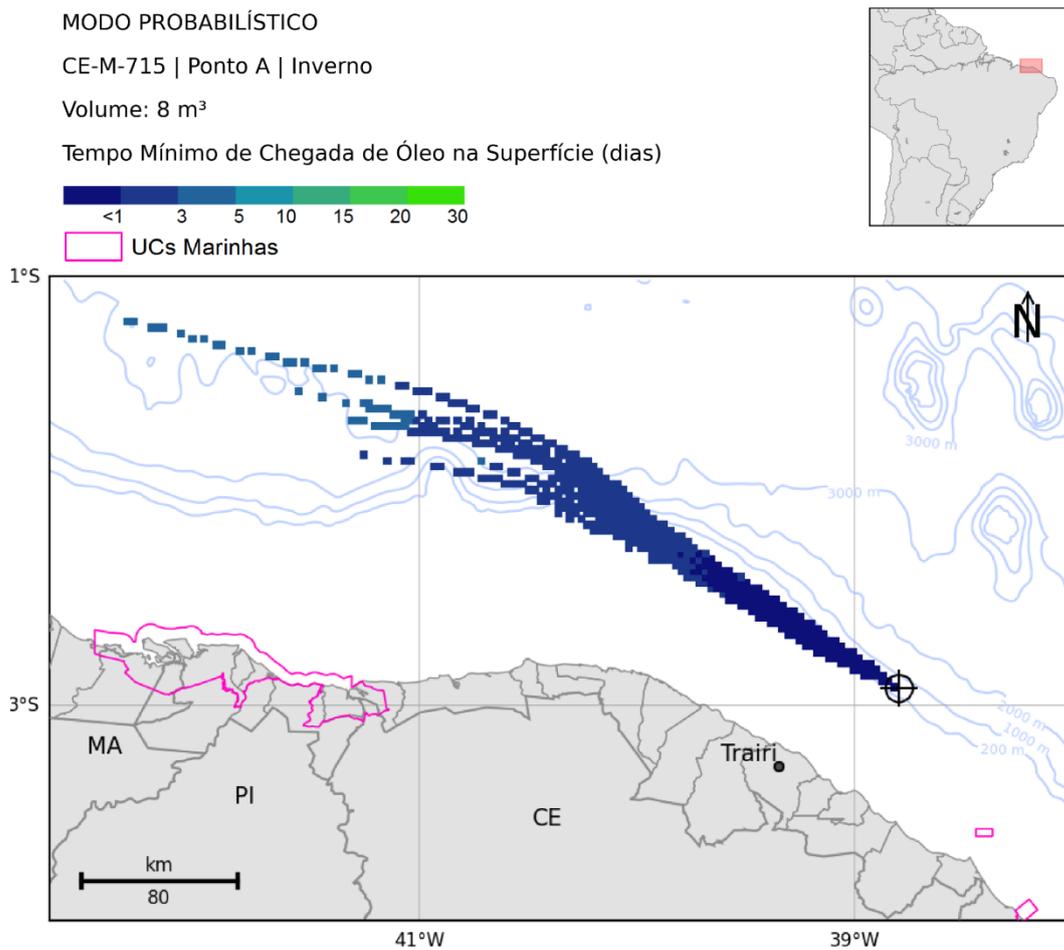


Figura 114: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m³ no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).

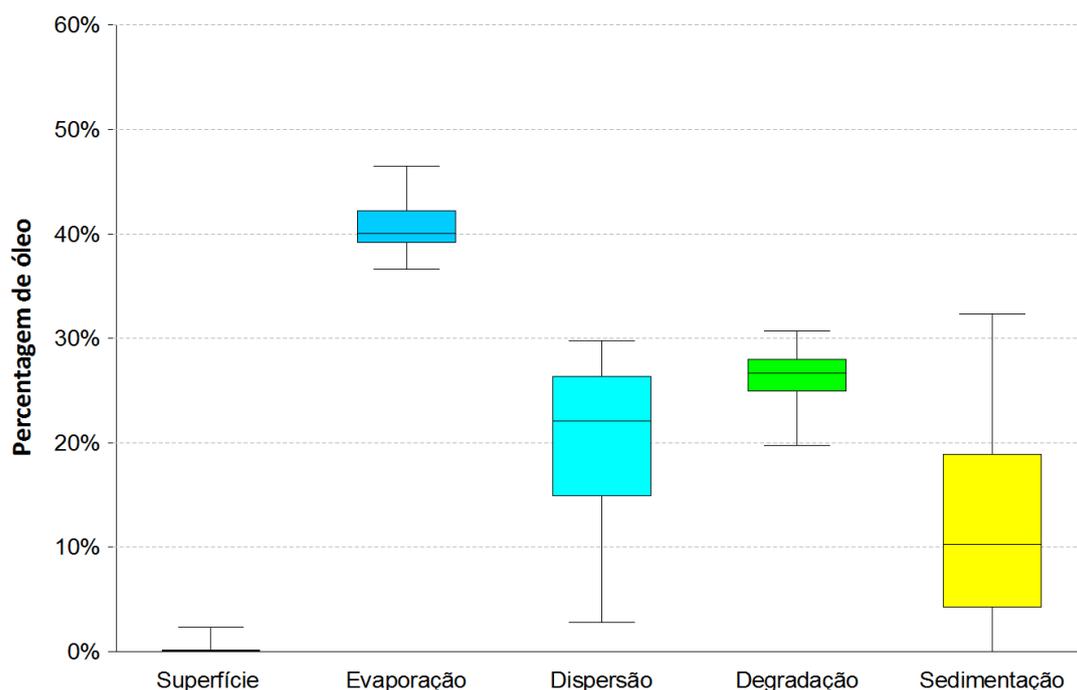


Figura 115: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 8 m³ no cenário de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A).

Assim como no cenário de verão, a tendência do óleo é deslocar-se para noroeste, seguindo a CNB. Nesse caso, o óleo atinge uma distância maior devido à maior intensidade desta corrente, chegando a até 440 km do ponto de vazamento. A menor distância da costa foi de 54 km do município de Trairi, no estado do Ceará e, como no verão, não há nenhuma unidade de conservação da região com probabilidade de presença de óleo.

A deriva do óleo pode se estender em até 130 km no primeiro dia após o início do vazamento. Os pontos mais próximos da costa podem ser alcançados no 1º dia após o vazamento. Observa-se que os tempos mínimos das regiões mais afastadas estão na classe de 3-5 dias.

Na coluna d'água observa-se que a região alcançada pelo óleo tem probabilidades de até 20% e chega a uma distância máxima de 90 km do ponto de vazamento.

Assim como no verão, observa-se que a retirada de óleo da superfície ocorreu principalmente através da evaporação (mediana de ~40%). Os valores da dispersão e da sedimentação também apresentaram grande variação entre os valores mínimos e máximos, porém com valores mais baixos na sedimentação (entre 5% e 32%) comparados com verão.

Como dito anteriormente, a alta porcentagem de óleo no fundo marinho ocorre devido à associação de regiões rasas e a presença de vento forte na região.

3.2.1.1.2 Vazamento de 200 m³

3.2.1.1.2.1 Verão

A seguir são apresentados os resultados de probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada e o balanço de massa ao final das simulações para o vazamento de médio porte (200 m³) no período de verão.

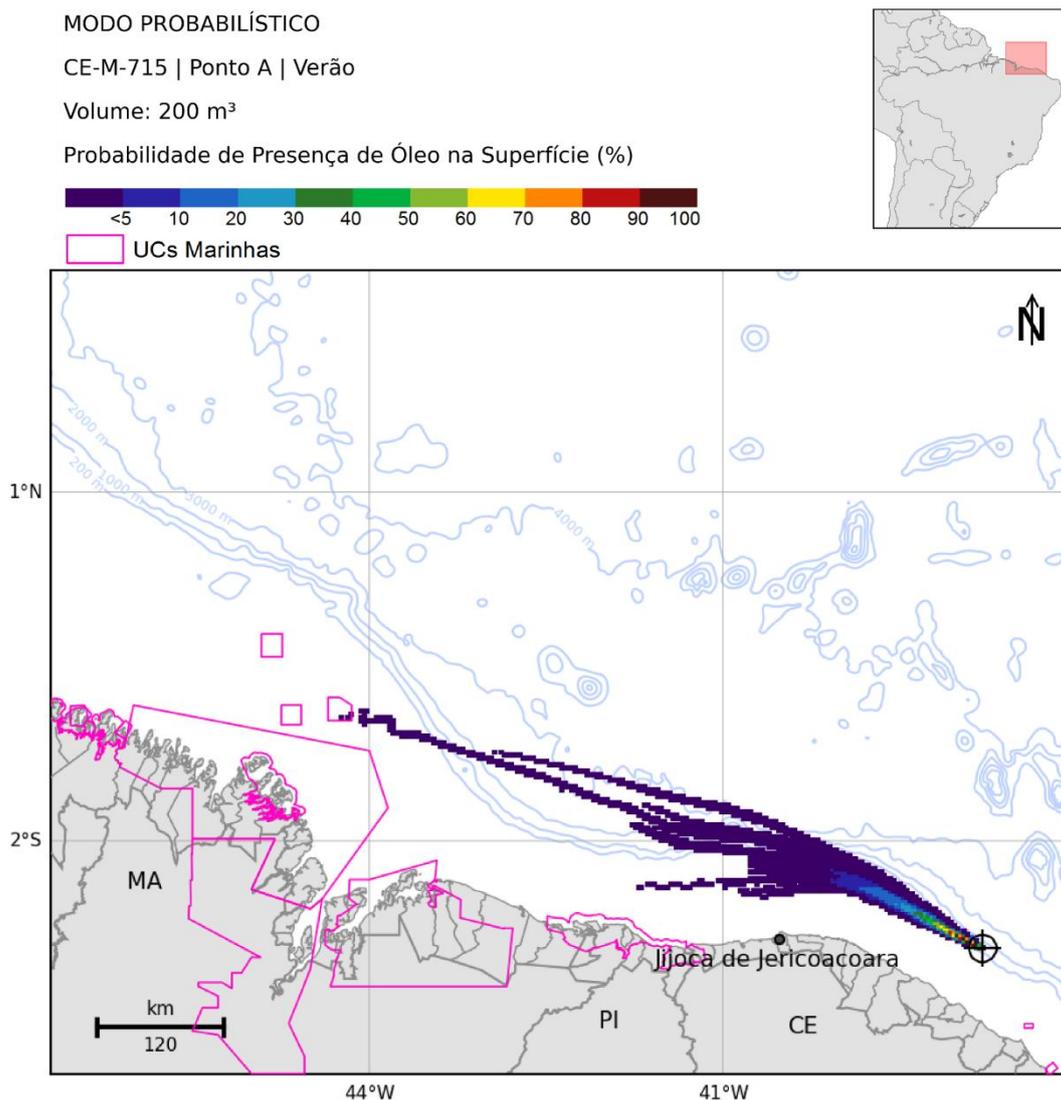


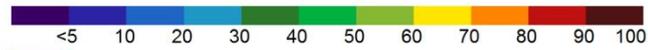
Figura 116: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m³ no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto A | Verão

Volume: 200 m³

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



UCs Marinhas

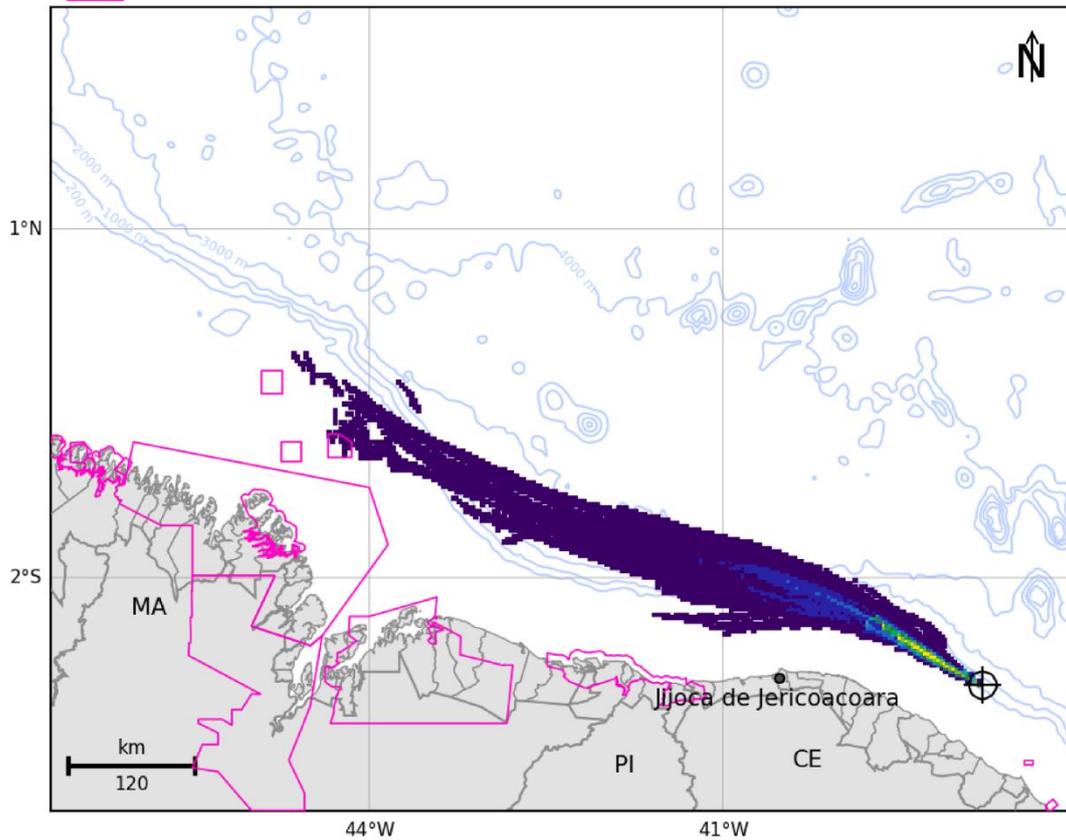


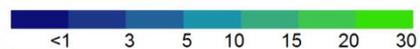
Figura 117: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 200 m³ no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto A | Verão

Volume: 200 m³

Tempo Mínimo de Chegada de Óleo na Superfície (dias)



UCs Marinhas

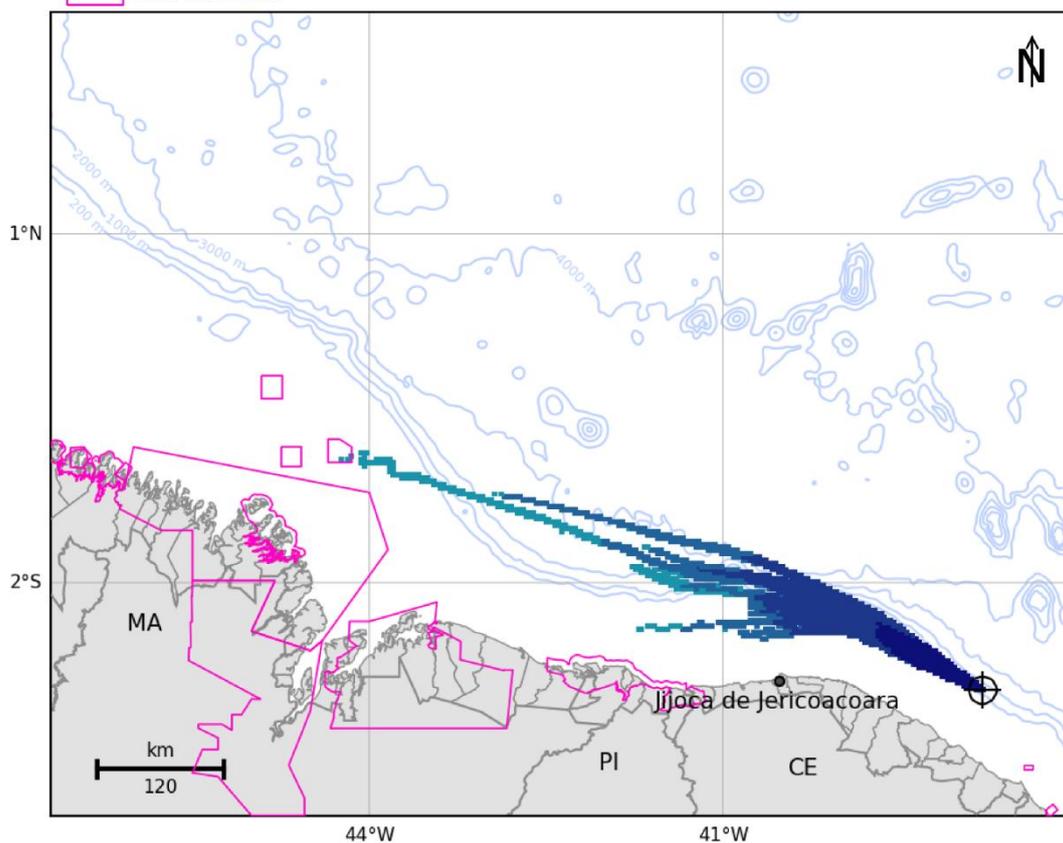


Figura 118: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 200 m³ no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).

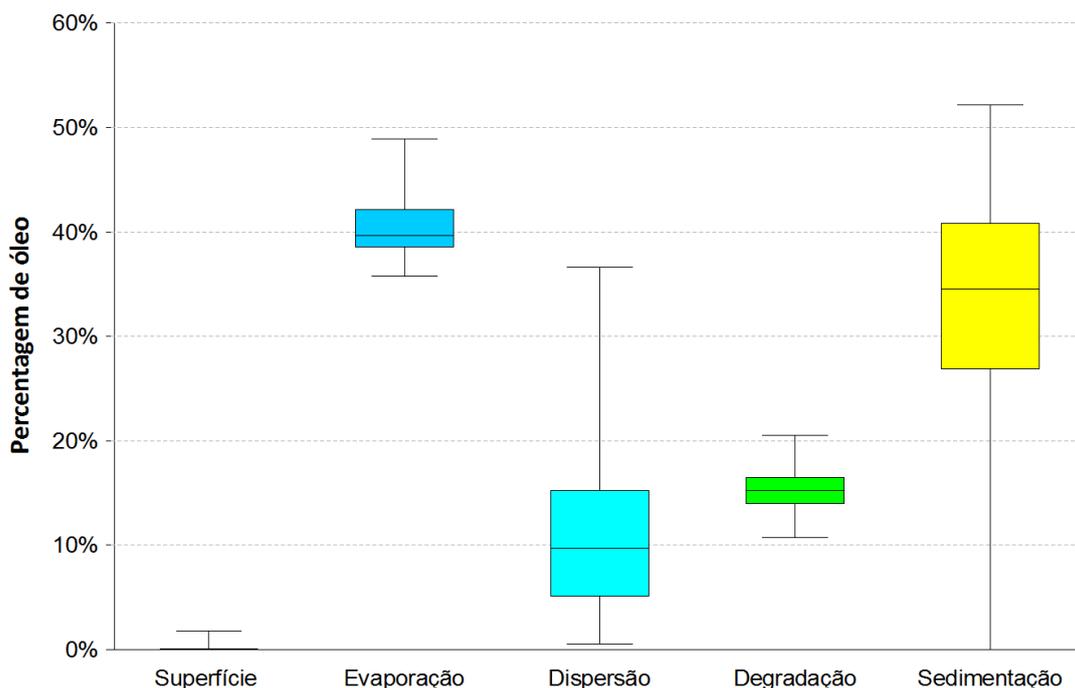


Figura 119: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 200 m³ no cenário de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A).

A deriva de óleo é similar à observada para o vazamento de 8 m³, para noroeste do ponto de vazamento e sem chegada à costa. No entanto, a área se estende até 645 km, devido ao maior volume de óleo vazado que permite que haja óleo com espessura acima de 0,3 µm por mais tempo. A maior proximidade da costa é em relação ao município de Jijoca de Jericoacoara, distando 34 km.

Em relação aos resultados das modelagens probabilísticas nas unidades de conservação marinhas, é importante destacar que estes devem ser vistos de maneira diferenciada em relação aos resultados na costa. Isto porque, em áreas marinhas, os resultados da modelagem representam a passagem da mancha de óleo, não representando um acúmulo e sim, um possível contato com óleo de caráter transitório. Os resultados probabilísticos críticos nas unidades de conservação marinhas são apresentados na Tabela 22.

Observa-se que até 1 dia após o início do vazamento, o óleo pode alcançar até 120 km de extensão. As regiões mais distantes, incluindo o Parque Estadual Marinho do Parcel Manuel Luís, podem ser atingidas em até 10 dias.

A área com probabilidade de presença de óleo na coluna d'água é maior que a observada em superfície, chegando a 720 km de distância do ponto de vazamento, o que indica grande entranhamento de óleo na coluna d'água devido aos ventos fortes na região. No entanto, os valores de probabilidades foram menores, classes de até 70%, e se restringiram aos primeiros metros da coluna d'água.

O resultado dos processos intempéricos do óleo nesse cenário mostra que a evaporação e a sedimentação foram os principais processos de retirada de óleo da água, sendo que a sedimentação apresentou maior oscilação entre as simulações. Com relação aos outros processos, a degradação apresentou um valor mediano de 15% enquanto a dispersão apresentou valores menores que 15% em 75% das simulações.

Como ocorrido no vazamento de 8 m³, a porcentagem de óleo associado aos sedimentos foi elevada. Como dito anteriormente, este comportamento está relacionado à presença de ventos fortes com regiões de batimetria rasa.

3.2.1.1.2.2 Inverno

A seguir são apresentados os resultados de probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada e o balanço de massa ao final das simulações para o vazamento de médio porte (200 m³) no período de inverno. Ao final é apresentada tabela com estes resultados para as unidades de conservação marinhas para os dois períodos sazonais.

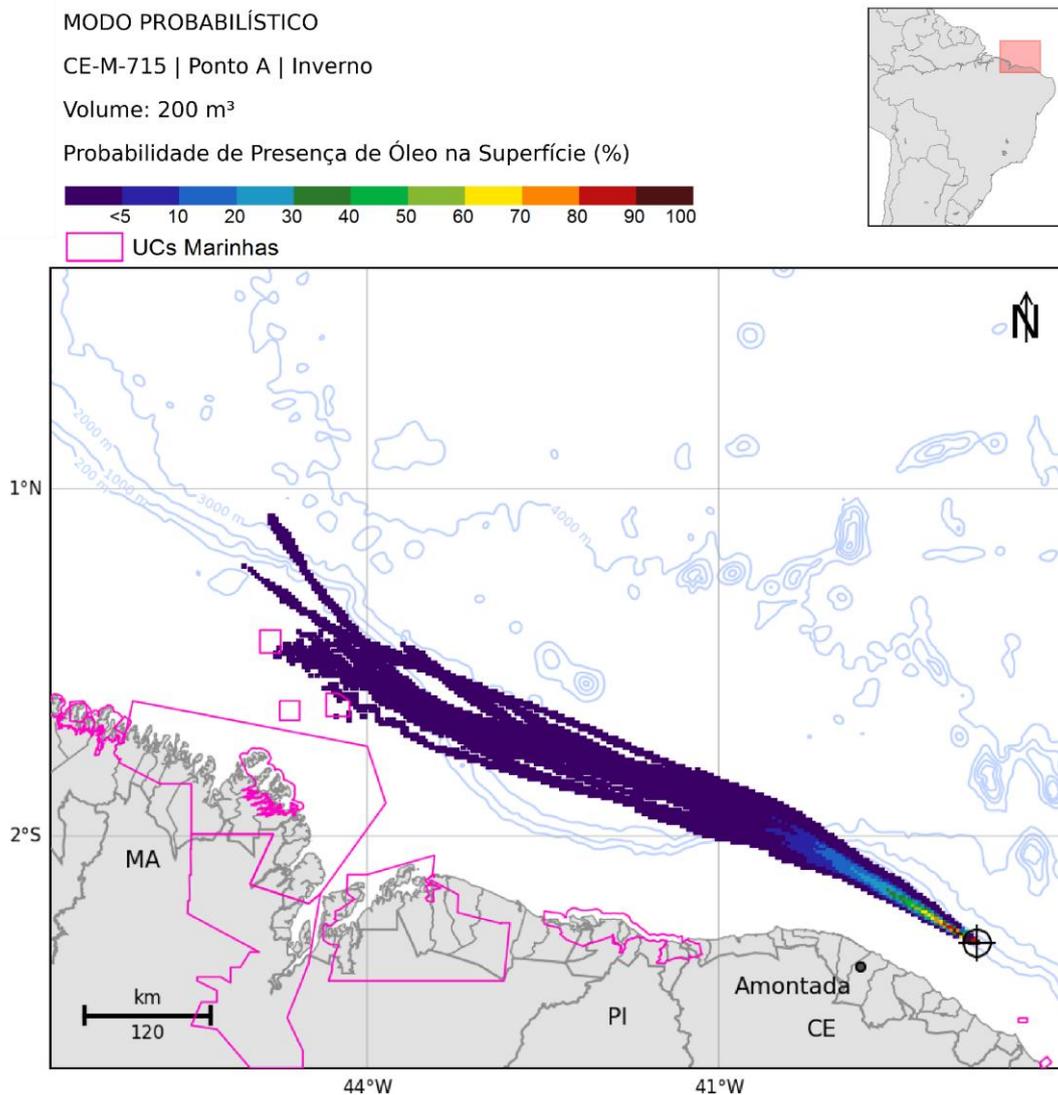


Figura 120: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m³ no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).

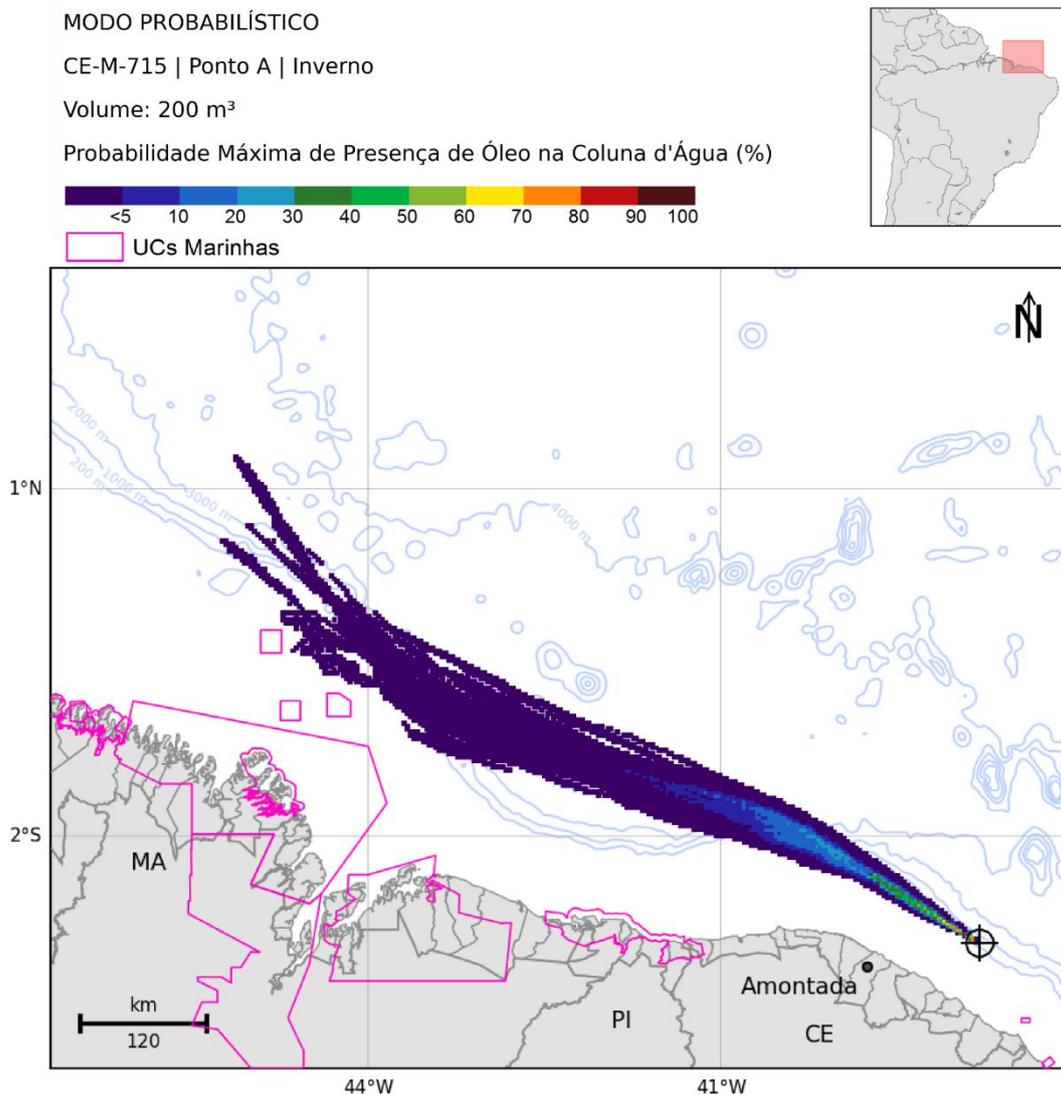


Figura 121: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 200 m³ no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).

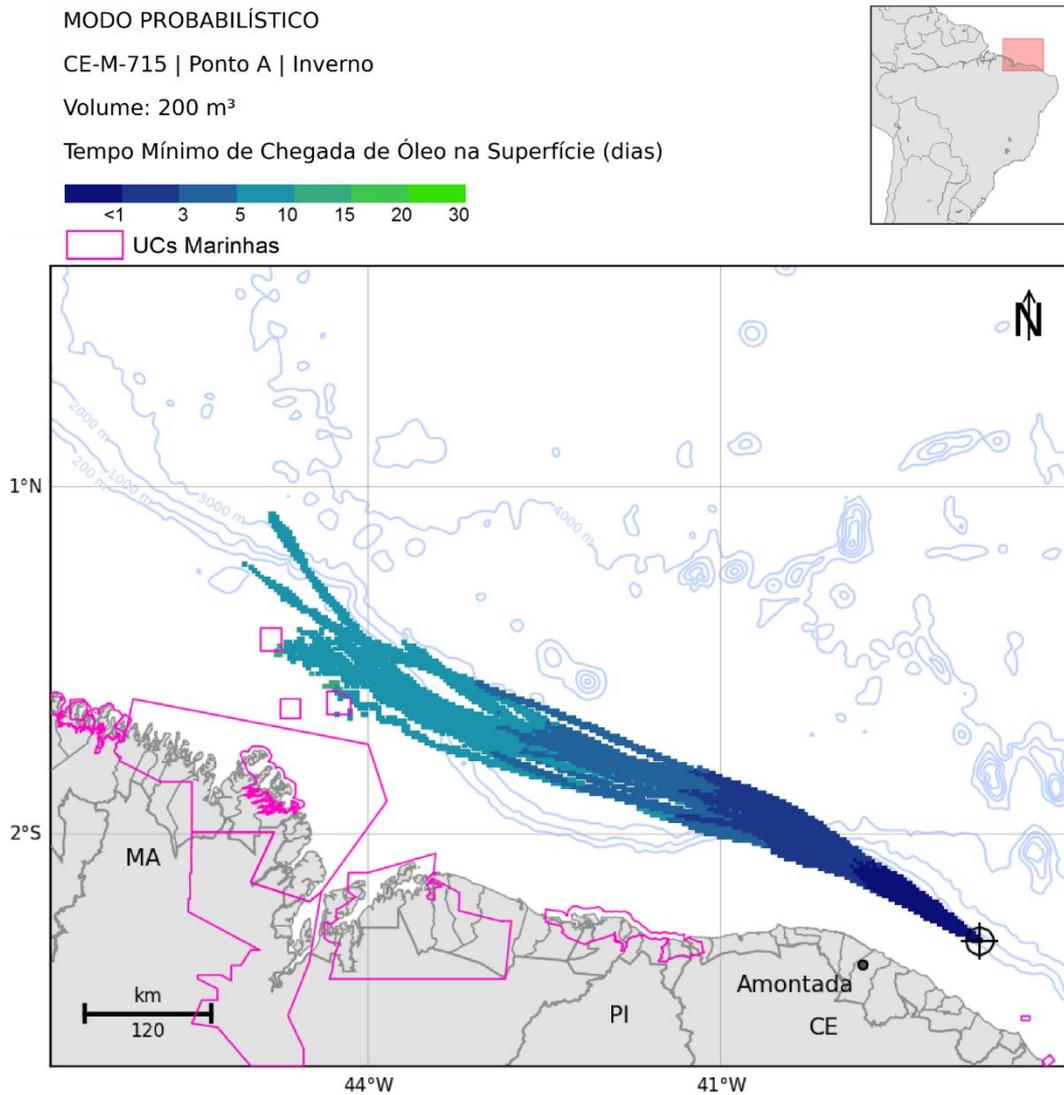


Figura 122: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para vazamento de 200 m³, no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 720 horas (30 dias).

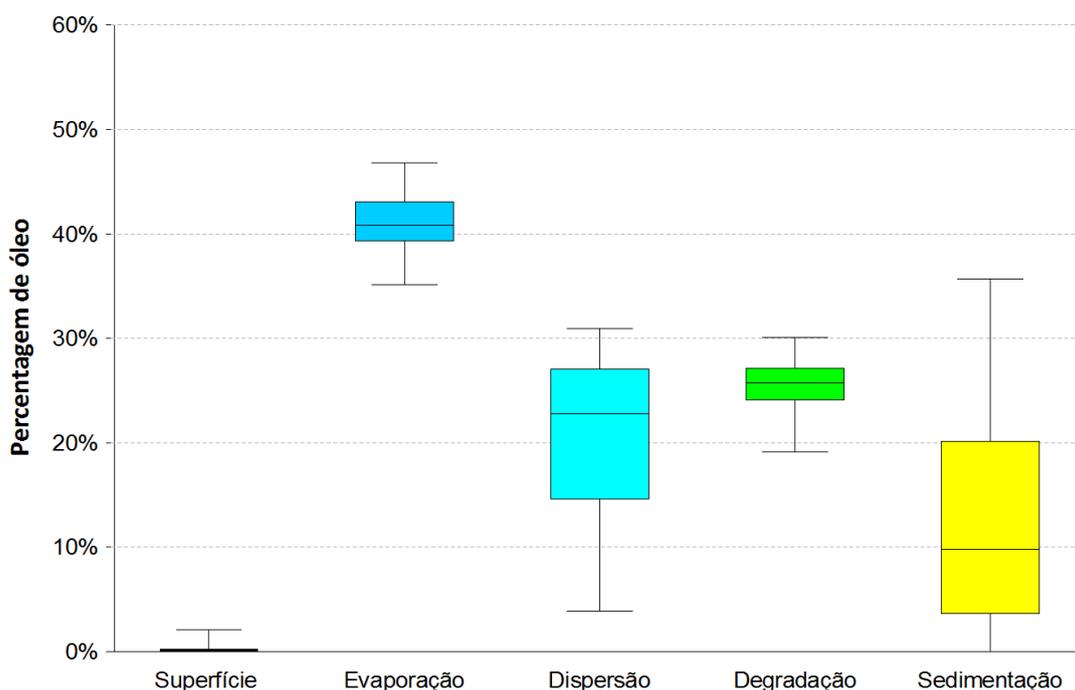


Figura 123: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 200 m³ no cenário de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A).

O padrão de deriva deste cenário segue o fluxo principal da CNB e se estendeu mais do que o observado no verão (790 km). Também não houve toque de óleo na costa e a menor distância observada foi de aproximadamente 47 km do município de Amontada, no estado do Ceará.

Em até 1 dia após o vazamento, o óleo pode alcançar a distância de até 145 km. Os locais mais distantes do ponto de vazamento podem ser alcançados em até 15 dias, enquanto os mais próximos da costa em até 1 dia.

Em relação à coluna d'água, observa-se que a extensão atingida foi similar a da área em superfície, alcançando uma distância maior, de 840 km. No entanto, apresentou valores de probabilidades menores e estes valores se restringiram aos primeiros metros da coluna d'água.

Em relação aos resultados das modelagens probabilísticas nas unidades de conservação marinhas, é importante destacar que estes devem ser vistos de maneira diferenciada em relação aos resultados na costa. Isto porque, em áreas marinhas, os resultados da modelagem representam a passagem da mancha de óleo, não representando um acúmulo e sim, um possível contato com óleo de caráter transitório. Os resultados probabilísticos críticos nas unidades de conservação marinhas são apresentados na Tabela 22.

Assim como no vazamento de 8 m³, observa-se que a retirada de óleo da superfície ocorreu principalmente pela evaporação (mediana de ~41%) e os valores da dispersão e da sedimentação apresentaram grande variação.

Tabela 22: 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 poço Pinguim (Ponto A), nos cenários de verão e inverno.

Unidade de Conservação	Massa Máxima (t/km ²)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo (horas)	
	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
PEM do Parcel de Manuel Luís	0,19*	0,24*	0,3	0,3	195	174
PEM do Banco do Álvaro	-	0,22*	-	0,3	-	244

* Esses valores representam a passagem do óleo na superfície por essas regiões, não representando um acúmulo.

3.2.1.1.3 Vazamento de Pior Caso

3.2.1.1.3.1 Verão

A seguir são apresentados os resultados de probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada, massa máxima na costa e o balanço de massa ao final das simulações para o vazamento de pior caso (13.307 m³) no período de verão.

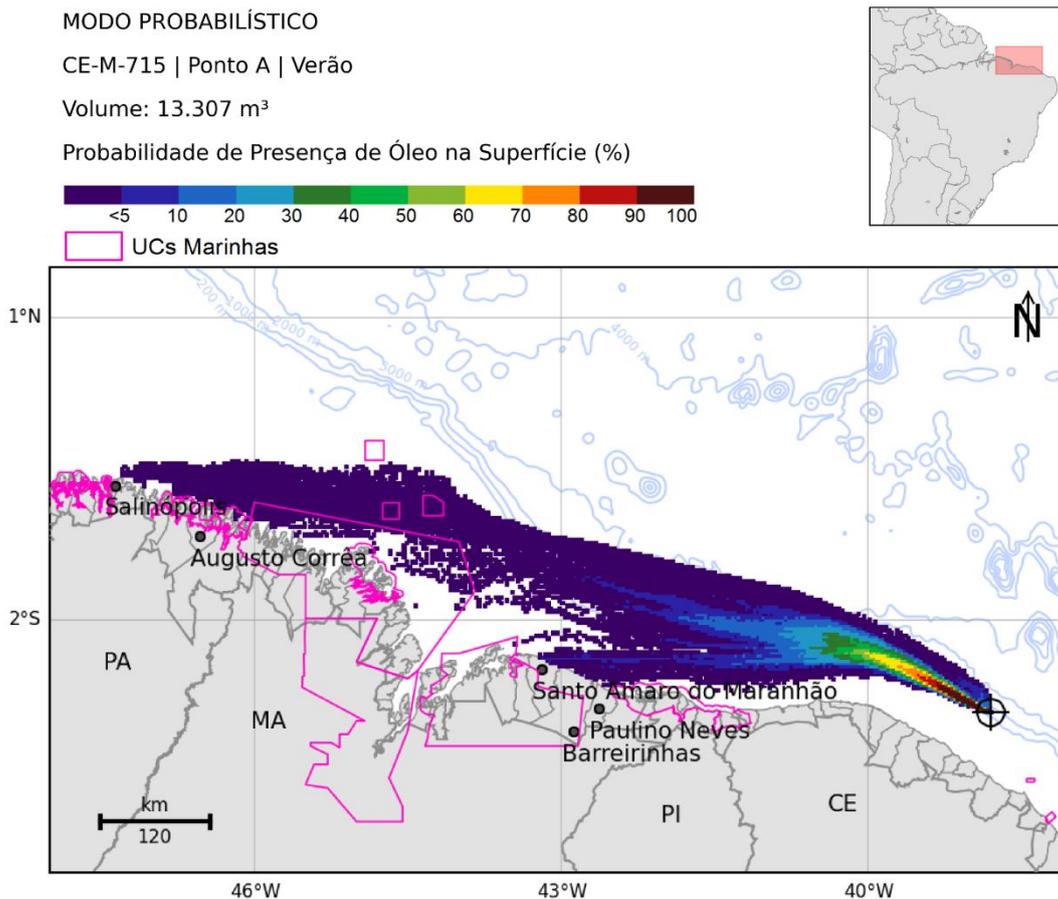


Figura 124: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.

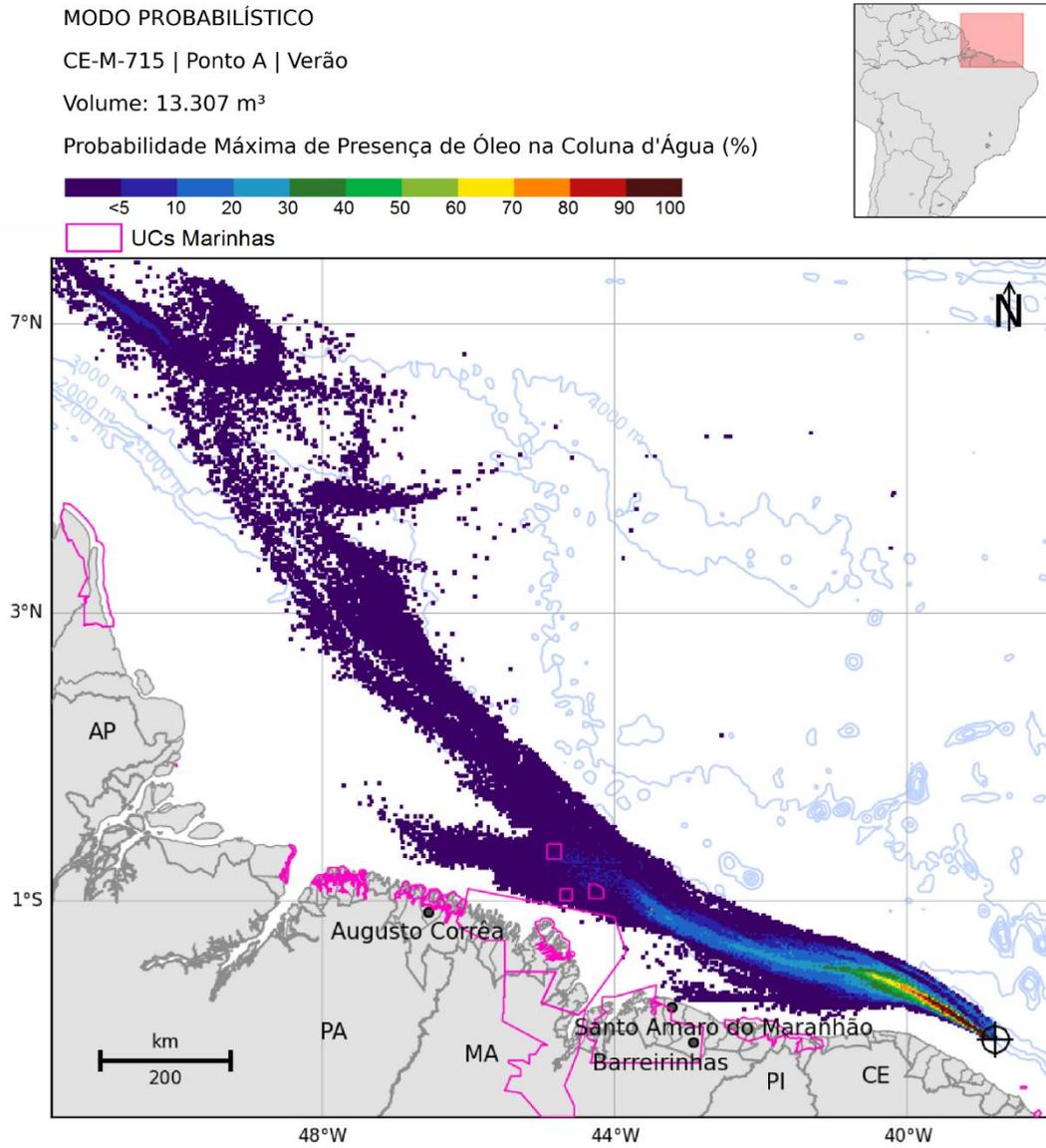


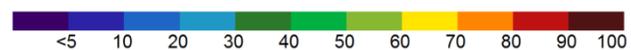
Figura 125: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto A | Verão

Volume: 13.307 m³

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



2 - 40 metros UCs Marinhas

40 - 80 metros

1040 - 1080 metros

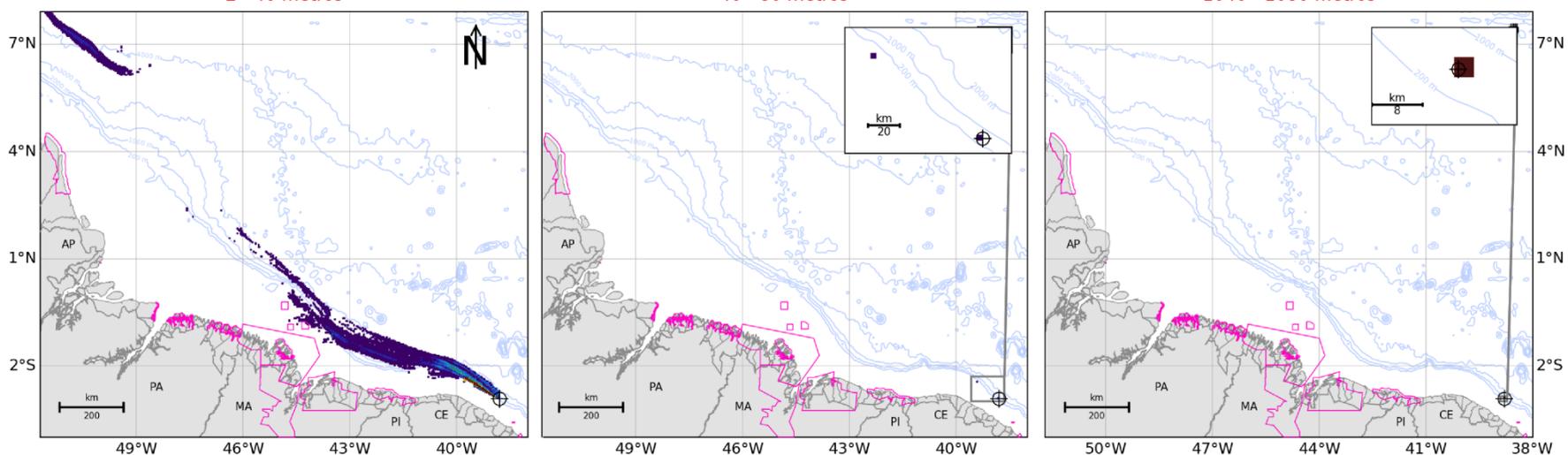


Figura 126: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três camadas (2-40 m, 40-80 m e 1040-1080 m), para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.

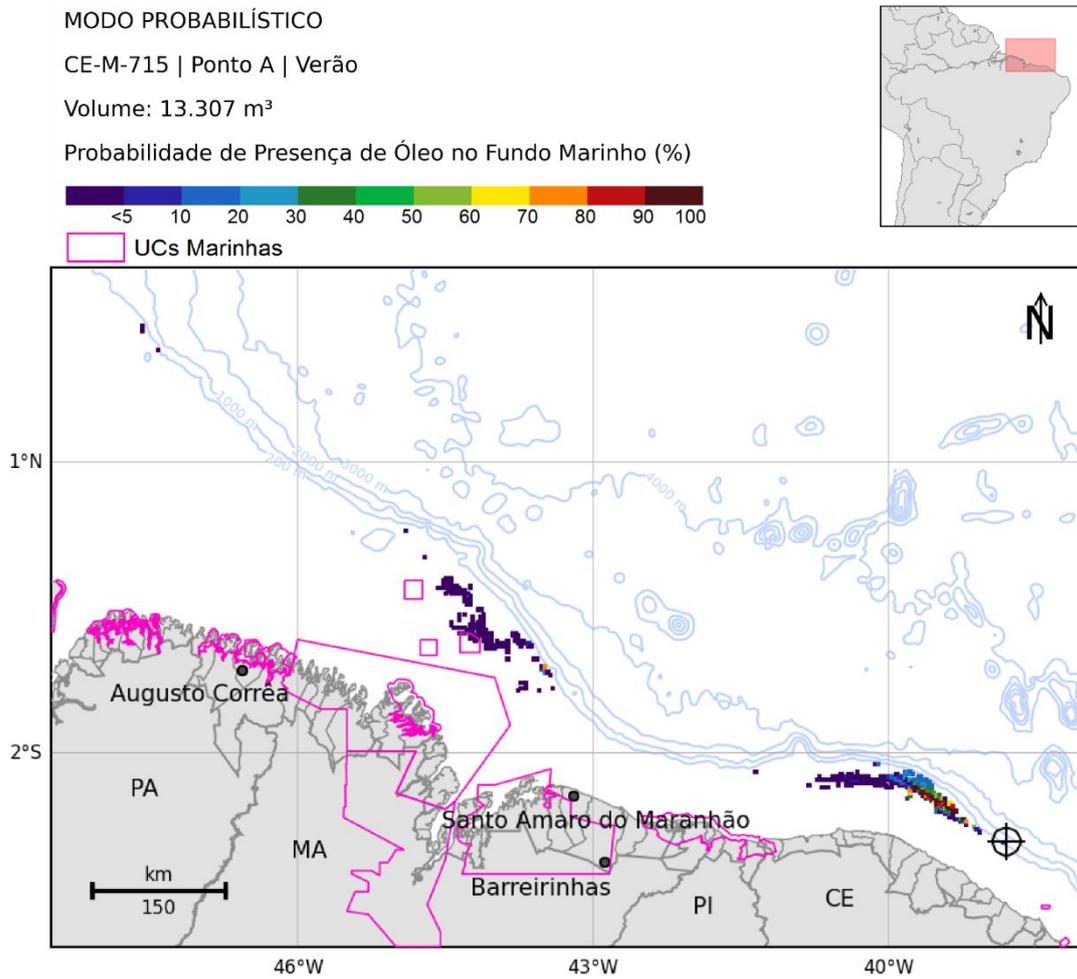


Figura 127: Mapa de probabilidade de presença de óleo no fundo marinho, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto A | Verão

Volume: 13.307 m³

Probabilidade de Presença de Óleo na Costa (%)

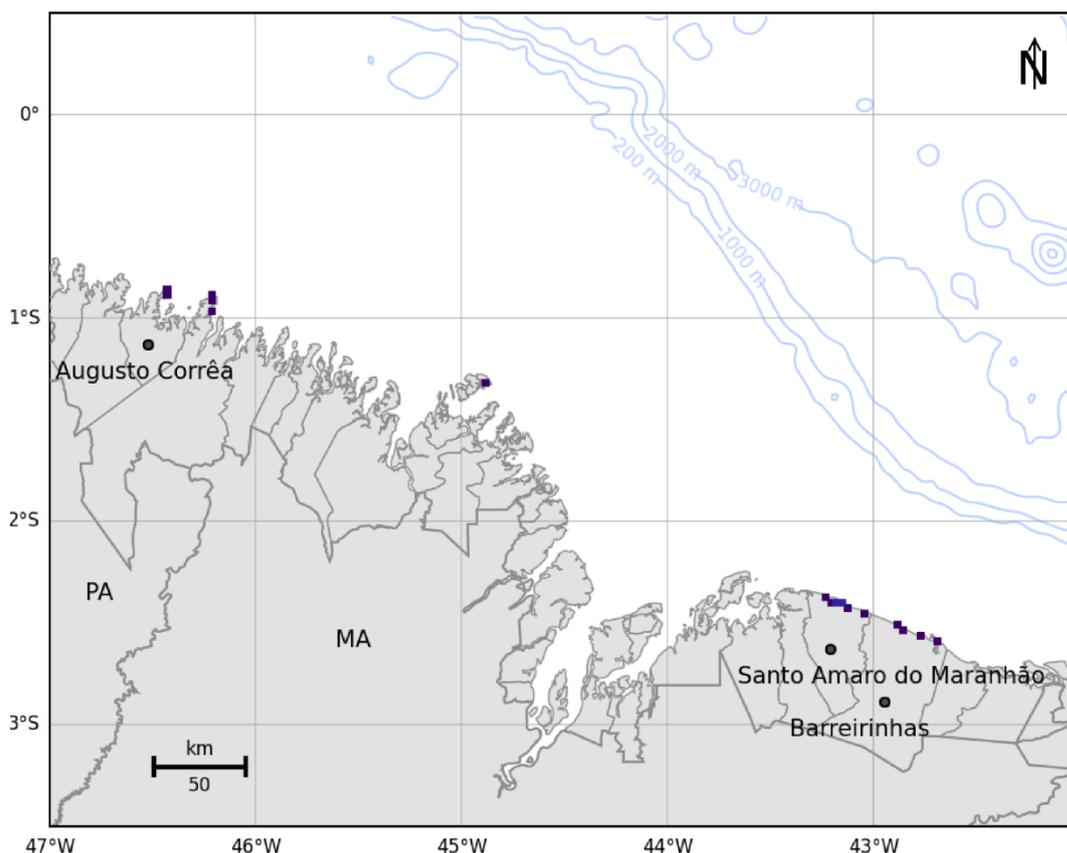


Figura 128: Mapa de probabilidade de presença de óleo na costa, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.

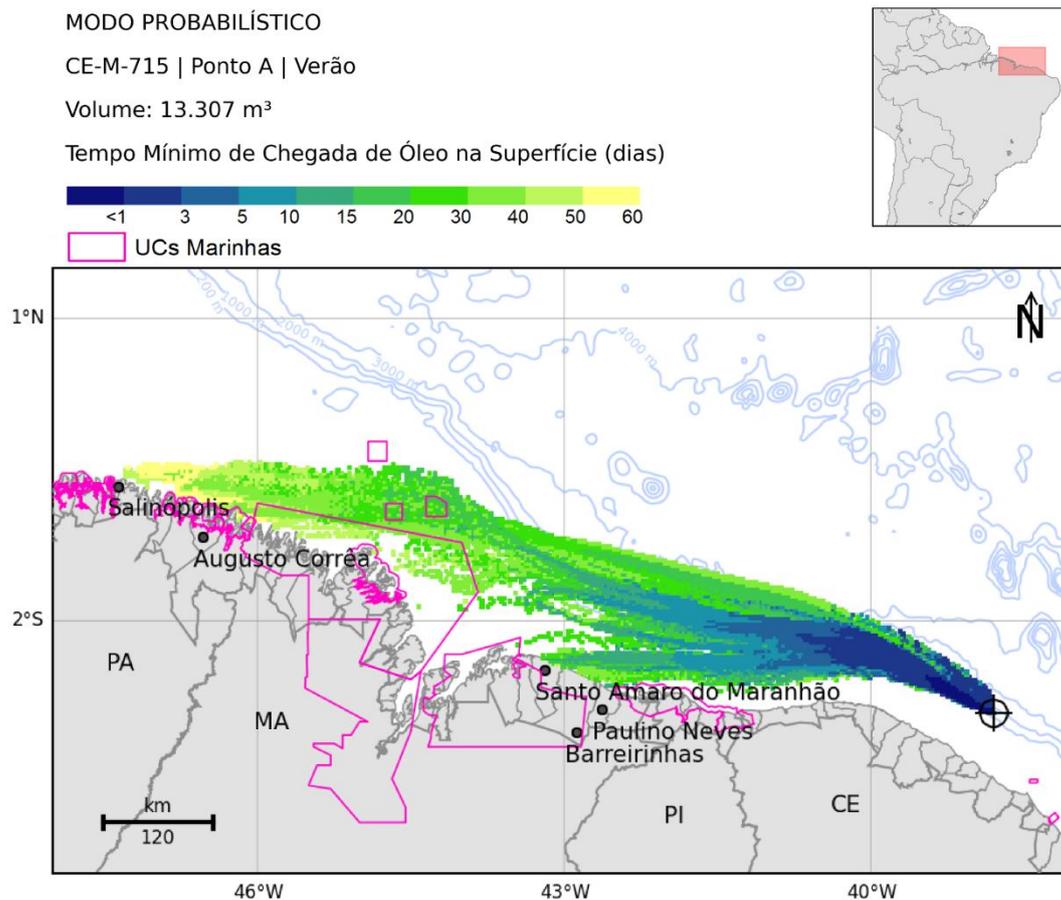


Figura 129: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para um vazamento de *blowout* contínuo de 30 dias no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto A | Verão

Volume: 13.307 m³

Tempo Mínimo de Chegada de Óleo na Costa (dias)

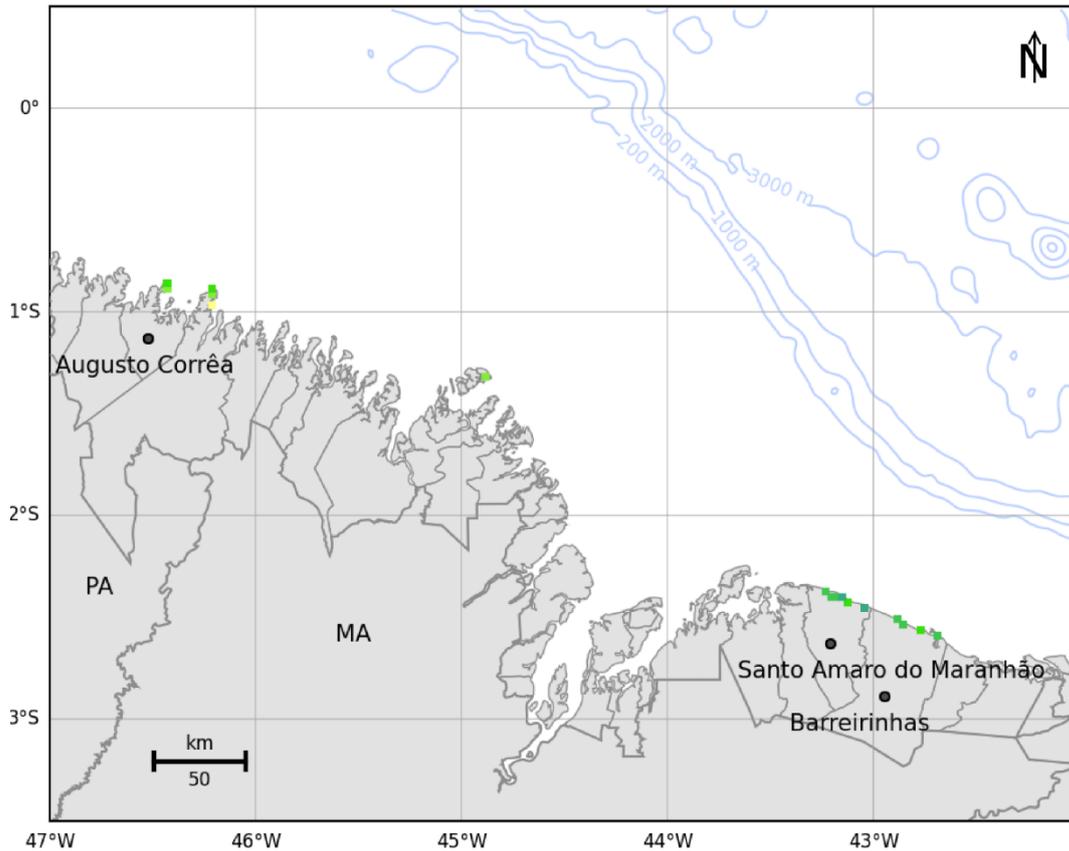
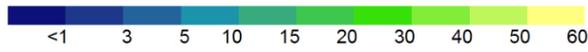


Figura 130: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo na costa para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.

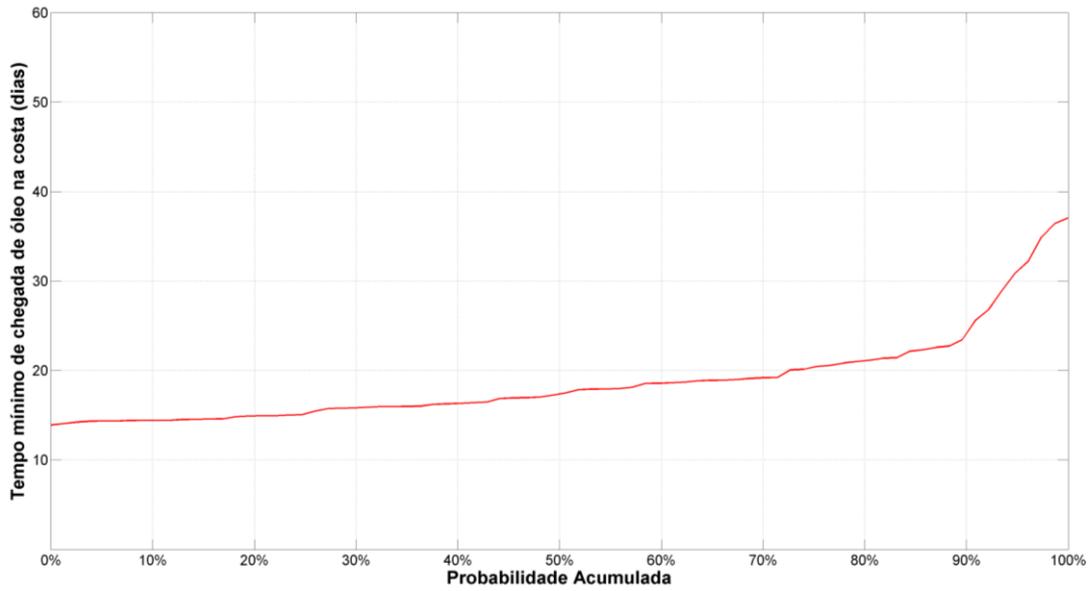


Figura 131: Gráfico de tempo mínimo de chegada de óleo na costa nas simulações em que houve probabilidade de presença de óleo na costa a partir do poço Pinguim (Ponto A).

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto A | Verão

Volume: 13.307 m³

Massa Máxima de Óleo na Costa (t/km)

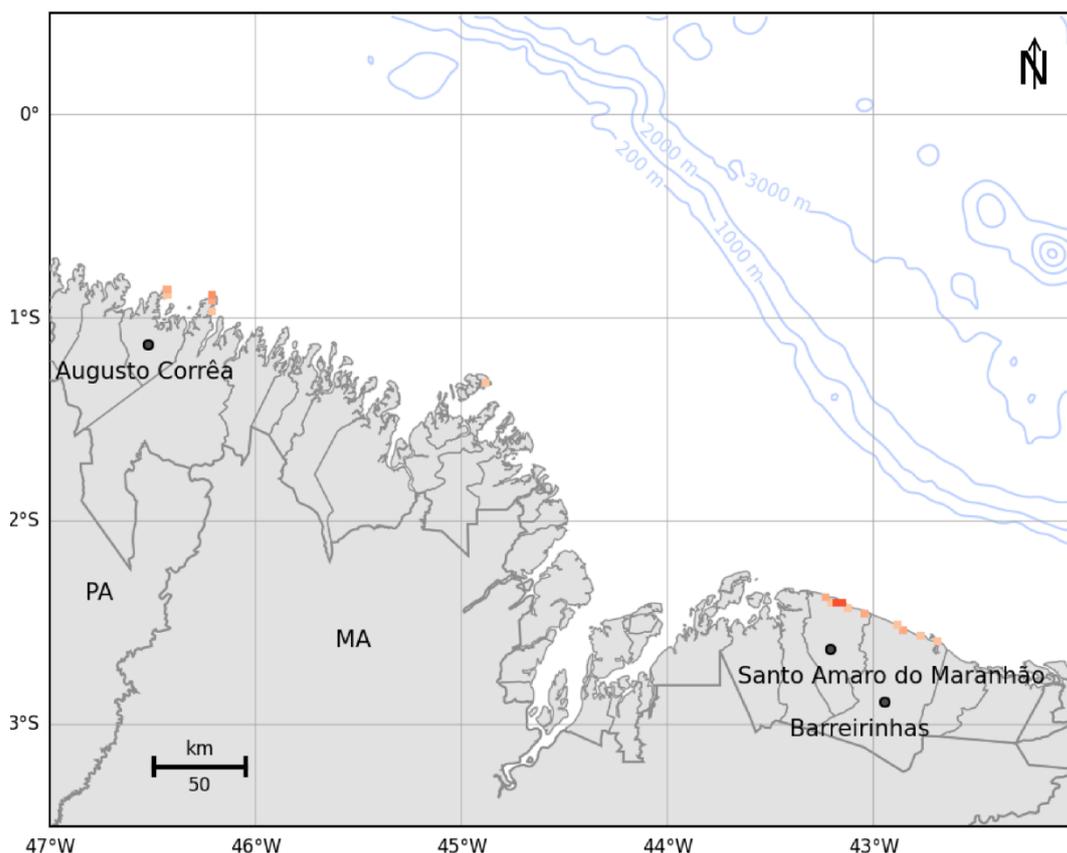


Figura 132: Massa máxima de óleo por célula de costa para o vazamento de pior caso no cenário de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A).

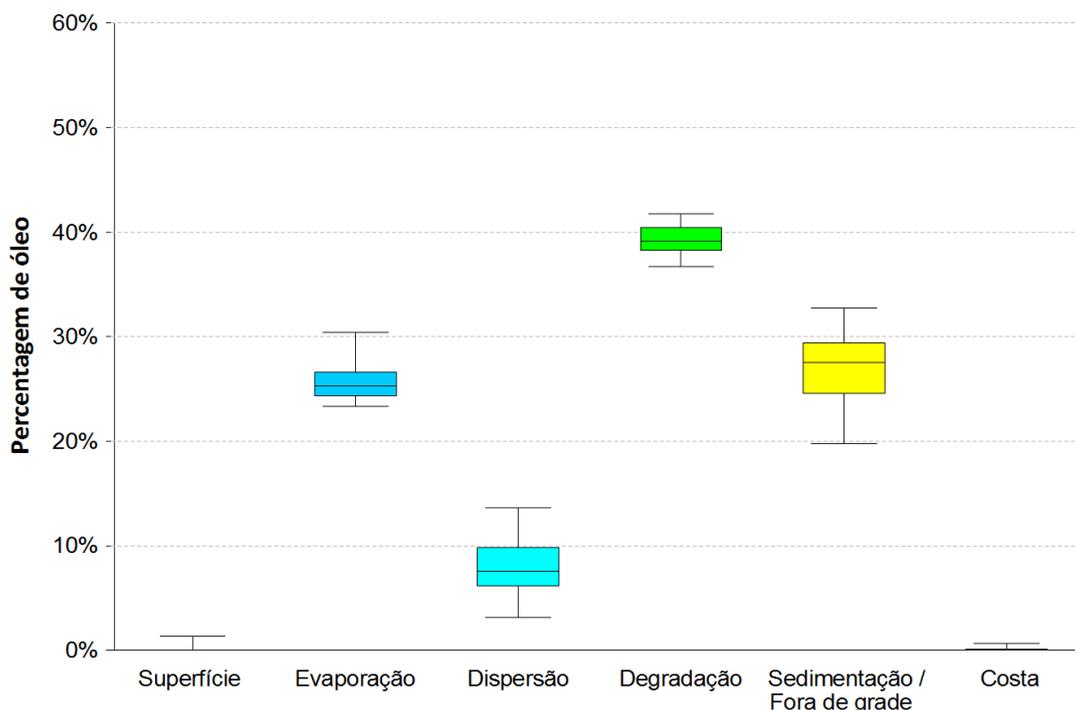


Figura 133: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de pior caso no cenário de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A).

O óleo derivou preferencialmente para noroeste do ponto de vazamento, novamente influenciado principalmente pela CNB, que flui nessa direção. Porém, após a longitude de 40°W, parte do óleo deriva sobre a plataforma continental após passar a influência da CNB, e com a influência dos ventos de leste-nordeste e leste, alcança a costa do estado do Maranhão. Outra parte mantém deriva para noroeste e alcança a costa do estado do Pará. A distância máxima em relação ao ponto de vazamento é de aproximadamente 990 km.

Na coluna d'água, o óleo se desloca para noroeste do ponto seguindo a CNB até o limite do domínio do modelo, a 1.860 km de distância do ponto de vazamento. As probabilidades máximas chegam até 100% na região próxima do ponto de vazamento. Probabilidades maiores que 40% são observadas até uma distância de 295 km da fonte. Em camadas mais profundas verifica-se que o óleo permanece em uma área mais restrita, próximo ao ponto de vazamento.

No fundo marinho, há duas regiões principais de presença de óleo: uma que se estende das proximidades do ponto de vazamento até cerca de 250 km a noroeste, onde são observadas probabilidades de até 100%; e outra região próxima aos PEM's do Recife Manuel Luís e dos Bancos do Álvaro e Tarol.

Das 300 simulações, 78 resultaram em toque na costa (26%), atingindo desde o município de Augusto Corrêa (PA) a Barreirinhas (MA). O município de Santo Amaro do Maranhão (MA) apresentou a maior probabilidade de toque (9%), o menor tempo de chegada de óleo (13,9 dias

ou 333 horas), e a maior massa de óleo (4 t/km) (Tabela 23). As demais localidades com probabilidade de toque apresentaram valores inferiores a 2%.

Além disso, destaca-se que em até 3 dias o óleo pode atingir uma distância de até 230 km e, em 5 dias, de 330 km. Na Figura 131, nota-se que das 78 simulações em que houve toque na costa, 72% apresentaram tempo de toque abaixo de 20 dias.

No que tange as unidades de conservação costeiras, o PARNA dos Lençóis Maranhenses apresentou o maior valor de probabilidade (9%), o menor tempo de chegada de óleo (13,9 dias (333 horas)) e a maior massa acumulada (~4 t/km) (Tabela 25). Em relação aos resultados das modelagens probabilísticas nas unidades de conservação marinhas, é importante novamente destacar que estes devem ser vistos de maneira diferenciada em relação aos resultados na costa. Isto porque, em áreas marinhas, os resultados da modelagem representam a passagem da mancha de óleo, não representando um acúmulo e sim, um possível contato com óleo de caráter transitório. Os resultados probabilísticos críticos nas unidades de conservação marinhas são apresentados na (Tabela 24).

Dos processos de retirada de óleo da superfície, a degradação apresentou o maior valor mediano (~39%), divergindo dos resultados para os vazamentos instantâneos (8 e 200 m³). Apesar da evaporação não ser mais o principal processo, este apresenta grande percentagem do total de óleo vazado, variando entre 24 e 31%. Já os resultados de dispersão revelam que este processo diminuiu a importância no valor final, com valores inferiores a 14%. Tendo em vista todos esses processos, o óleo remanescente em superfície foi menor que 3% em todas as simulações ao final de 60 dias.

Como dito anteriormente, a alta porcentagem de óleo no fundo marinho ocorre devido à associação de regiões rasas e a presença de vento forte na região. Porém ao se observar o mapa de probabilidade no fundo (Figura 127) não se verifica uma grande extensão com possibilidade de presença. Com isso, infere-se que a região em que o óleo toca ao fundo deva abarcar uma grande extensão, mas com valor muito baixo de concentração, apresentando probabilidade somente em alguns pontos. Porém, como o mapa de probabilidade de óleo no fundo é feito a partir do cruzamento entre os resultados de coluna d'água e os dados batimétricos (considerando a concentração de 20 ppb o limiar de existência de óleo na coluna d'água) e é uma limitação do modelo probabilístico a geração de probabilidade no fundo, essa afirmação somente pode ser verificada na modelagem determinística (item 3.2.2).

3.2.1.1.3.2 Inverno

A seguir são apresentados os resultados de probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada, massa máxima na costa e o balanço de massa ao final das simulações para o

vazamento de pior caso (13.307 m³) no período de inverno. Ao final são apresentadas tabelas com estes resultados para os municípios, as unidades de conservação marinhas e costeiras para os dois períodos sazonais.

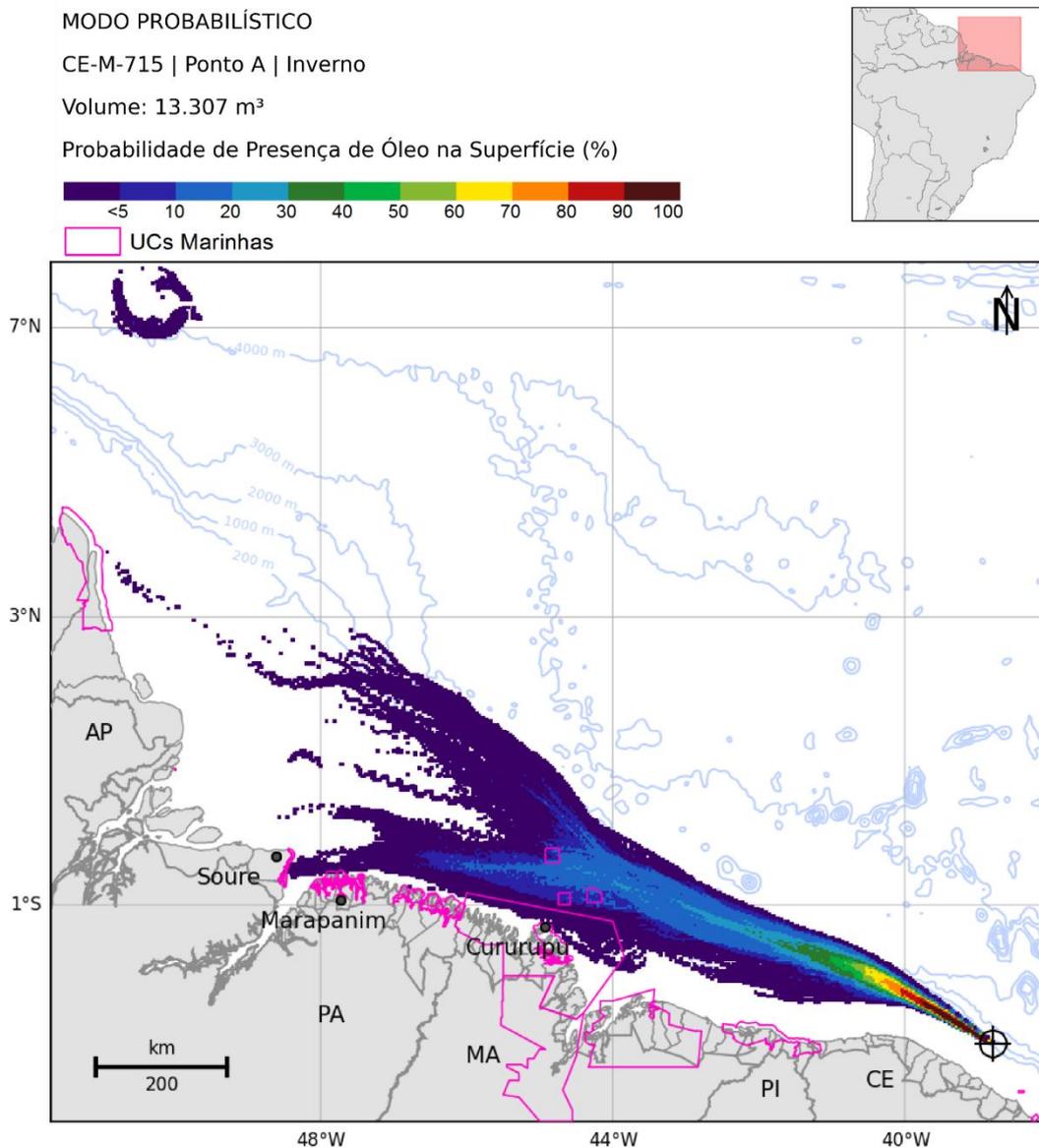


Figura 134: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de blowout de 30 dias no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.

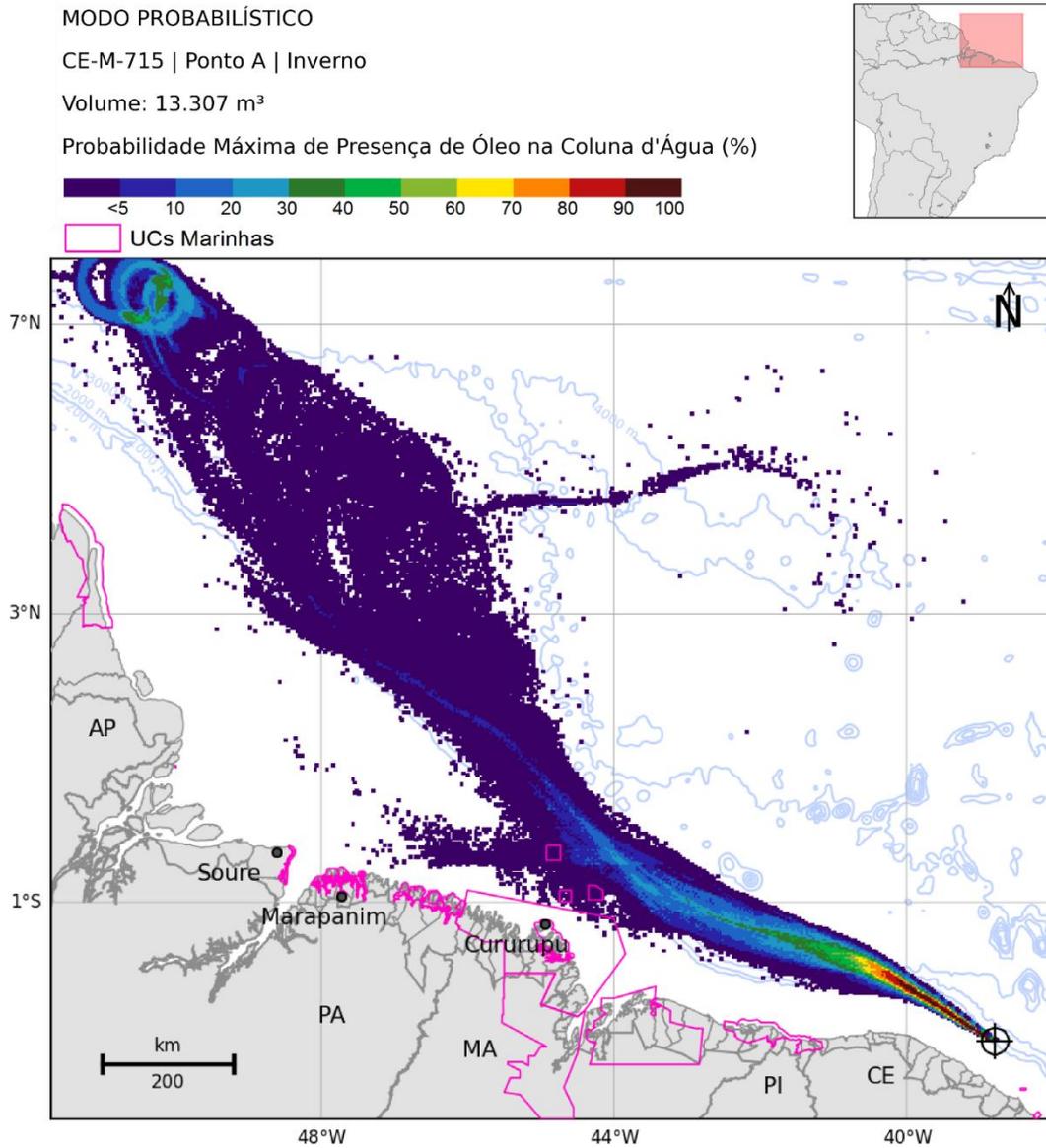


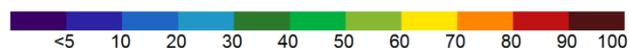
Figura 135: Mapa de probabilidade de presença de óleo na coluna d'água, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto A | Inverno

Volume: 13.307 m³

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



2 - 40 metros UCs Marinhas

40 - 80 metros

1040 - 1080 metros

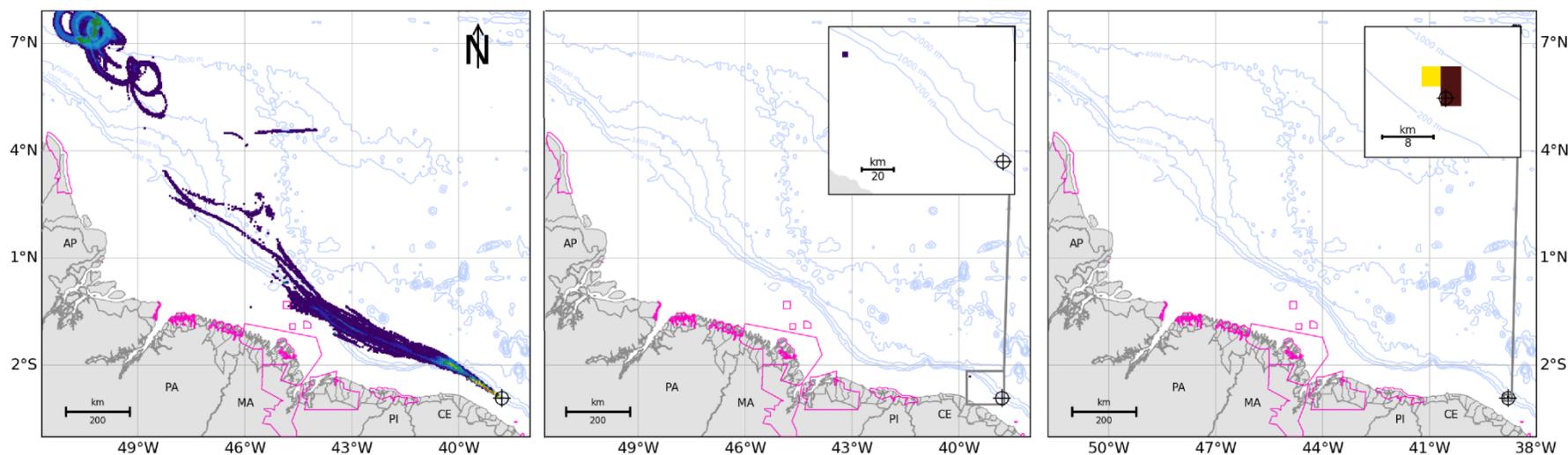


Figura 136: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três camadas (2-40 m, 40-80 m e 1040-1080 m), para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.

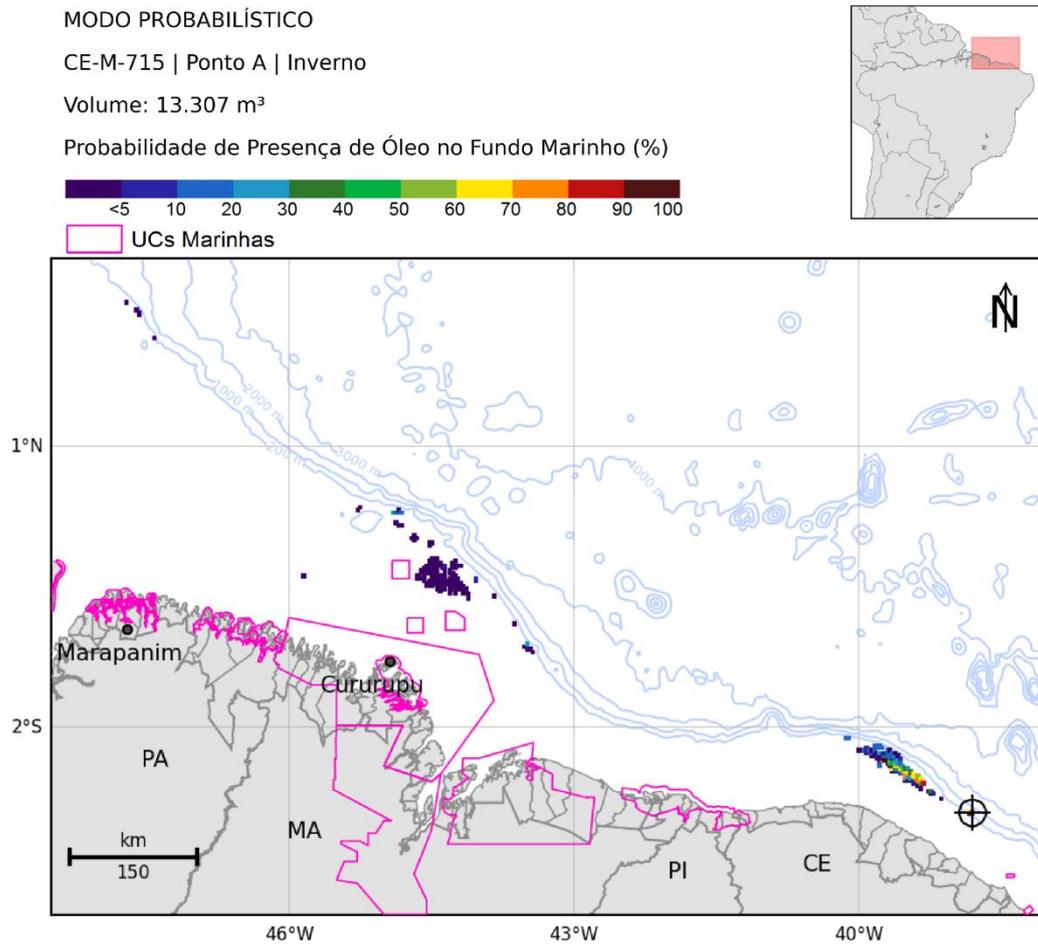


Figura 137: Mapa de probabilidade de presença de óleo no fundo marinho, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto A | Inverno

Volume: 13.307 m³

Probabilidade de Presença de Óleo na Costa (%)

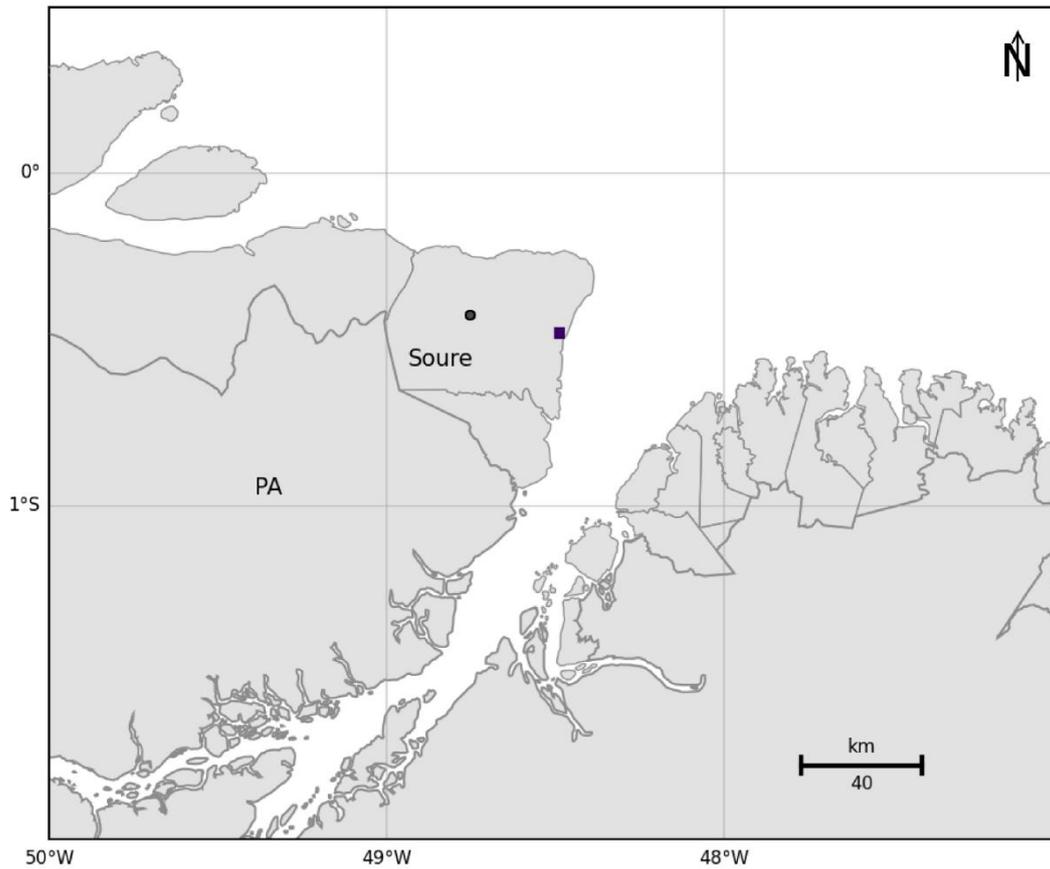
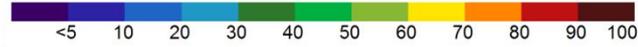


Figura 138: Mapa de probabilidade de presença de óleo na costa, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.

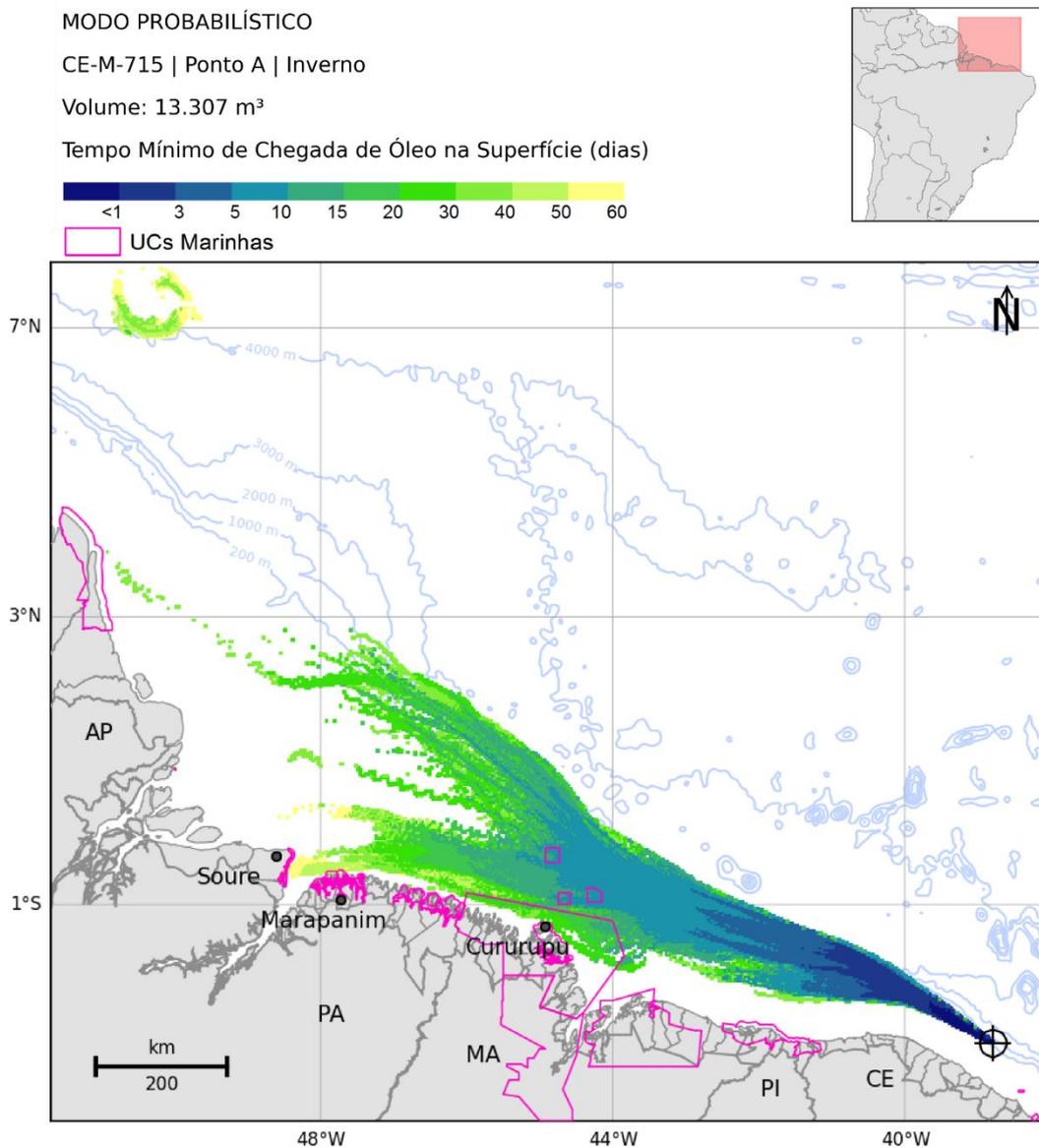


Figura 139: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto A | Inverno

Volume: 13.307 m³

Tempo Mínimo de Chegada de Óleo na Costa (dias)

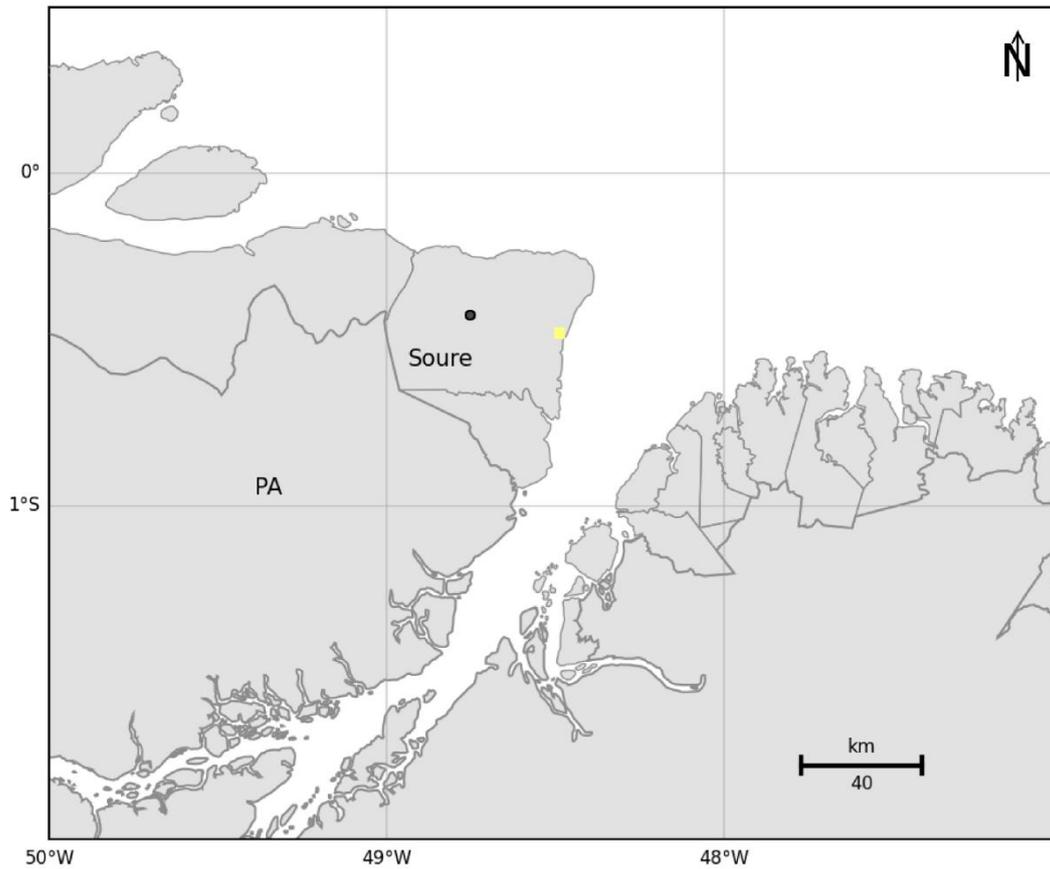
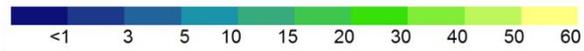


Figura 140: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo na costa, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A). Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto A | Inverno

Volume: 13.307 m³

Massa Máxima de Óleo na Costa (t/km)

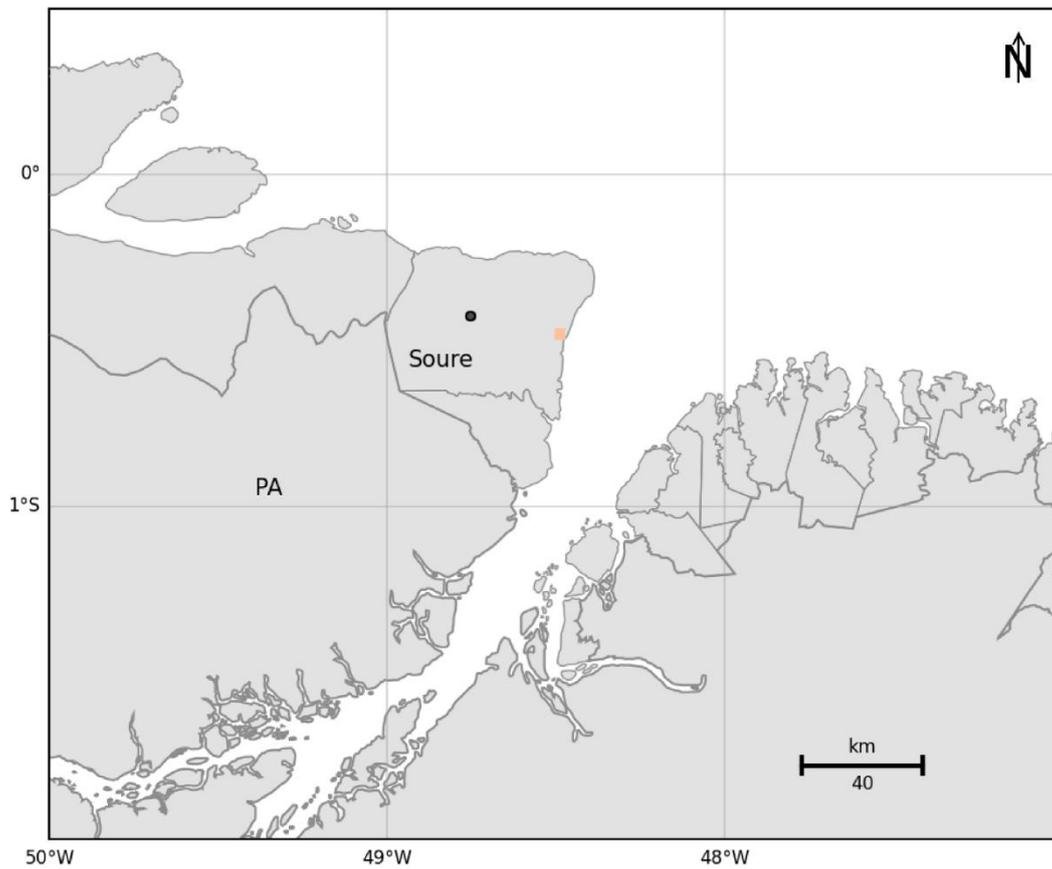


Figura 141: Massa máxima de óleo por célula de costa para o vazamento de pior caso no cenário de verão a partir do poço Pinguim (Ponto A).

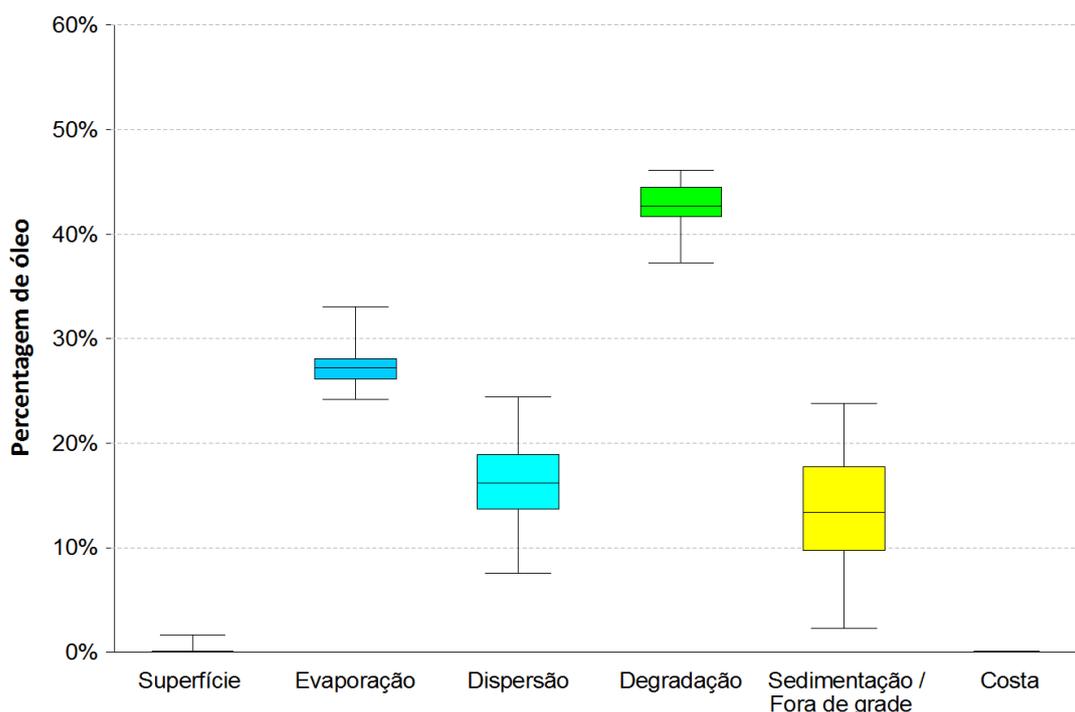


Figura 142: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de pior caso no cenário de inverno a partir do poço Pinguim (Ponto A).

Devido a intensificação da CNB neste cenário e a ação de ventos de segundo quadrante, a área com probabilidade de óleo em superfície se estende mais a noroeste do que o observado no cenário de verão. Acima de 7° N, observa-se uma área isolada de probabilidade de presença de óleo. Isto ocorre porque o óleo chega até esta região em espessuras abaixo do limiar de detecção (0,3 µm), não sendo observado nas figuras, e se acumula até chegar a espessuras acima deste limiar. Esta região de acúmulo pode ser explicada pelos mapas de correntes do modelo hidrodinâmico. Na Figura 143, observa-se um vórtice anticiclônico na mesma região, responsável pelo acúmulo de óleo. Esta figura representa um mapa instantâneo incluído no cenário sazonal de inverno das simulações de óleo (de abril a setembro).

A intensificação da CNB, que desloca o óleo mais para noroeste, resulta em valores menores de chegada de óleo à costa em comparação com o cenário de verão, havendo probabilidade de toque apenas em uma simulação no município de Soure (PA) e apenas após 58° dia. No entanto, o óleo se aproxima também de outros municípios, indicados na Tabela 23.

Na coluna d'água, as probabilidades máximas chegam até 100% próximo ao ponto de vazamento e a área de probabilidade apresenta um padrão de dinâmica semelhante ao observado em superfície. No entanto, também se observa a deriva do óleo mais contínua em subsuperfície até a posição do vórtice anticiclônico. Entre 2 e 40 metros, a área de probabilidade de presença de óleo maior que 30% alcança uma distância de 205 km. Em

camadas mais profundas verifica-se que o óleo permanece em uma área mais restrita, próximo ao ponto de vazamento.

Assim como no verão, há duas regiões com presença de óleo no fundo marinho: uma que se estende das proximidades do vazamento até cerca de 170 km a noroeste, onde são observadas probabilidades de até 100%; e outra região próxima aos PEM's do Recife Manuel Luís e dos Bancos do Álvaro e Tarol.

Observa-se que até 3 dias após iniciado o vazamento, o óleo pode alcançar 330 km de distância em superfície. Já para região do meandro ao norte do domínio do modelo, o óleo chega após 30 dias após o vazamento.

No que tange às unidades de conservação costeiras, somente a APA do Arquipélago de Marajó apresentou probabilidade (Tabela 25). Em relação aos resultados das modelagens probabilísticas nas unidades de conservação marinhas, como dito anteriormente, estes devem ser vistos de maneira diferenciada em relação aos resultados na costa. Isto porque, em áreas marinhas, os resultados da modelagem representam a passagem da mancha de óleo, não representando um acúmulo e sim, um possível contato com óleo de caráter transitório. Os resultados probabilísticos críticos nas unidades de conservação marinhas são apresentados na (Tabela 24).

Neste cenário a degradação e a evaporação foram os processos que mais retiraram óleo da superfície, com as maiores medianas dentre todos os processos, 43% e 27%, respectivamente. Assim como nos outros volumes de vazamento, os valores da dispersão e da sedimentação apresentaram grande variação. O óleo remanescente em superfície foi menor que 3% em todas as simulações e o óleo na costa não ultrapassou 1% do total.

Como dito anteriormente, a alta porcentagem de óleo no fundo marinho ocorre devido à associação de regiões rasas e a presença de vento forte na região. Porém, nesta condição sazonal de inverno as porcentagens de óleo no fundo são menores que no verão. Este comportamento se justifica pela deriva principal do óleo ser sobre a quebra da plataforma da continental sob a influência da CNB, deslocando-se em regiões mais profundas, enquanto no verão o óleo prontamente atinge a plataforma e desloca-se em regiões rasas.

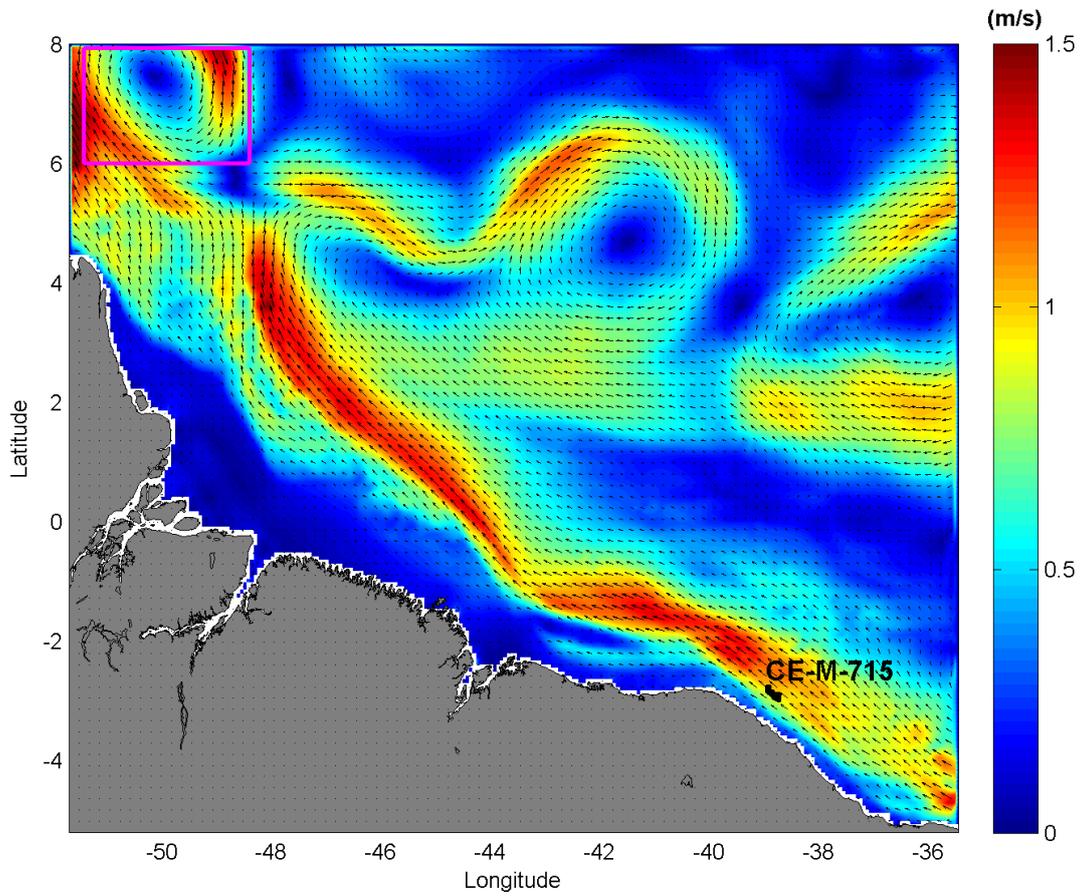


Figura 143: Mapa de correntes do modelo hidrodinâmico para o dia 1^o de setembro de 2013, incluído no cenário sazonal de inverno (abril a setembro) com a formação de um vórtice anticiclônico na área destacada em rosa.

Tabela 23: Extensão de toque, massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um derrame de grande volume (13.307 m³) a partir do poço Pinguim (Ponto A), nos cenários de verão e inverno.

UF	MUNICÍPIOS	Extensão (km)		Massa Máxima (t/km)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo (horas)	
		VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
PA	Soure	-	4.2	-	0,8	-	0,3	-	1403
	São Caetano de Odivelas	-	**	-	**	-	0,7	-	1171
	Curuçá	-	**	-	**	-	1,0	-	1117
	Marapanim	-	**	-	**	-	1,0	-	1056
	Salinópolis	**	-	**	-	0,3	-	1180	-
	São João de Pirabas	**	-	**	-	0,3	-	1131	-
	Bragança	**	-	**	-	0,7	-	1379	-
	Augusto Corrêa	8.5	-	1,2	-	0,7	-	697	-
	Viseu	12.7	-	1,6	-	0,7	-	658	-
MA	Carutapera	**	-	**	-	0,7	-	1095	-
	Godofredo Viana	**	-	**	-	0,3	-	1068	-
	Cândido Mendes	**	-	**	-	0,3	-	1068	-
	Cururupu	4.2	**	0,7	**	0,3	0,3	927	580
	Santo Amaro do Maranhão	25.5	-	4,0	-	9,0	-	333	-
	Barreirinhas	17.0	-	1,2	-	1,3	-	376	-
	Paulino Neves	**	-	**	-	0,3	-	320	-

* Valores em negrito são os resultados da grade de costa. Os valores que não estão em negrito são retirados dos resultados em superfície para localidades que não apresentaram massa acumulada na costa acima do limiar monitorado, mas estão a uma distância de menos de 3 km (um ponto de grade) da costa. Este procedimento é uma solicitação do IBAMA.

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

Tabela 24: 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 derrame de grande volume (13.307 m³) a partir do poço Pinguim (Ponto A), nos cenários de verão e inverno.

Unidade de Conservação	Massa Máxima (t/km ²)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo (horas)	
	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
RESEX Marinha Caeté-Taperaçu	0,19	-	0,3	-	1401	-
RESEX Mãe Grande de Curuçá	-	0,20	-	1,0	-	1117
RESEX Marinha de Gurupi-Piriá	0,19	-	1,0	-	920	-
APA de Upaon-Açu/Miritiba/Alto-Preguiças	0,18	-	0,3	-	655	-
APA Delta do Parnaíba	0,14	-	0,3	-	316	-
APA das Reentrâncias Maranhenses	0,30	0,37	2,3	4,0	507	285
RESEX Marinha de Soure	-	0,19	-	0,3	-	1365
RESEX de Cururupu	0,15	0,17	0,3	0,3	1176	580
PEM do Parcel de Manuel Luís	1,37	1,13	3,7	13,7	372	175
PEM do Banco do Álvaro	-	0,69	-	16,7	-	192
PEM do Banco do Tarol	0,98	0,67	2,7	10,3	413	212
APA da Costa de Urumajó	0,16	-	0,3	-	1042	-
APA Jabotitiua-Jatium	0,15	-	0,3	-	1287	-
RESEX Marinha Arai-Peroba	0,14	-	0,3	-	1081	-
APA da Ilha do Canela	0,19	-	0,3	-	1412	-
RESEX Marinha Mestre Lucindo	-	0,23	-	1,0	-	1069

* Esses valores representam a passagem do óleo na superfície por essas regiões, não representando um acúmulo.

Tabela 25: Extensão de toque, massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas unidades de conservação costeiras com possibilidade de serem atingidas em um derrame de grande volume (13.307 m³) a partir do poço Pinguim (Ponto A), nos cenários de verão e inverno.

Unidade de Conservação	Massa Máxima (t/km)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo (horas)	
	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
PARNA dos Lençóis Maranhenses	3,95	-	9,0	-	333	-
APA do Arquipélago de Marajó	-	0,79	-	0,3	-	1403
APA da Foz do Rio Preguiças - Pequenos Lençóis - Região Lagunar Adjacente	0,58	-	0,7	-	430	-

3.2.1.2 Poço Gaivota (Ponto B)

3.2.1.2.1 Vazamento de 8 m³

3.2.1.2.1.1 Verão

A seguir são apresentados os resultados de probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada e o balanço de massa ao final das simulações para o vazamento de 8 m³ no período de verão.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto B | Verão

Volume: 8 m³

Probabilidade de Presença de Óleo na Superfície (%)

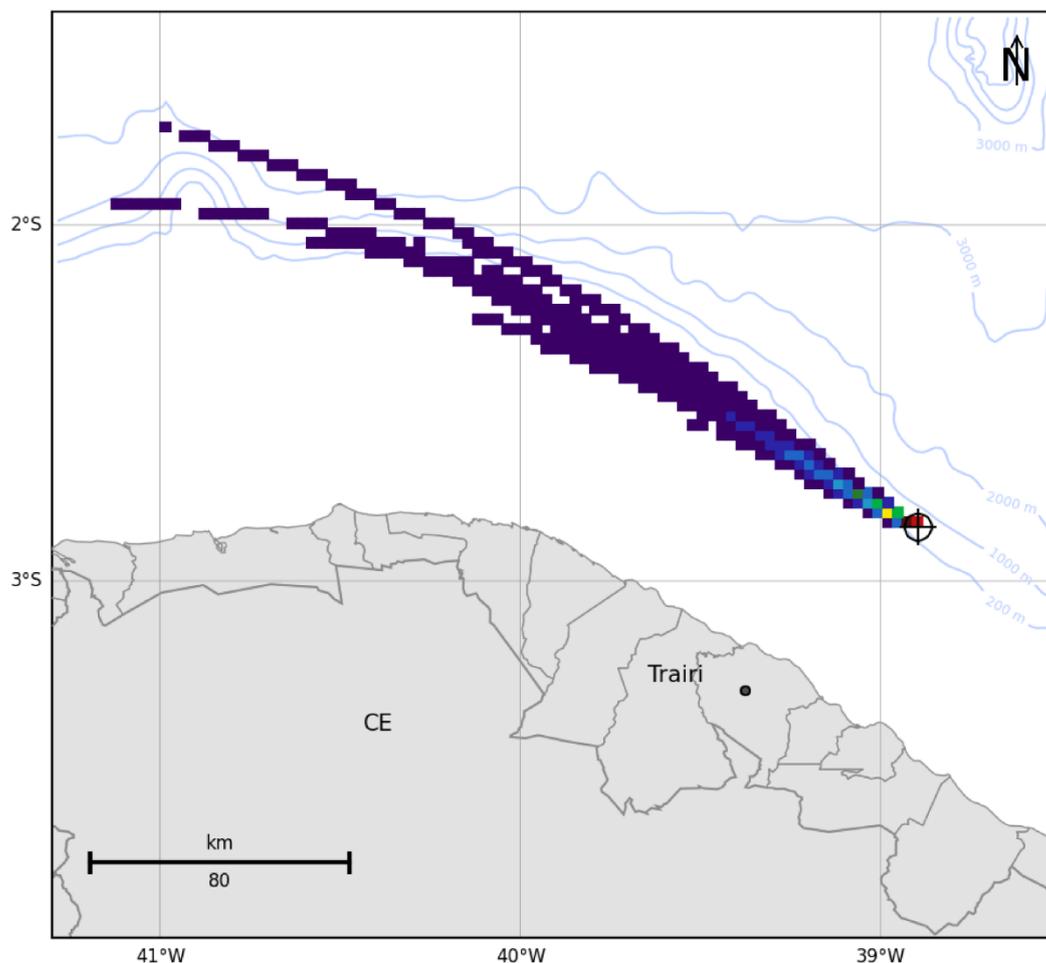


Figura 144: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m³ no período de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto B | Verão

Volume: 8 m³

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

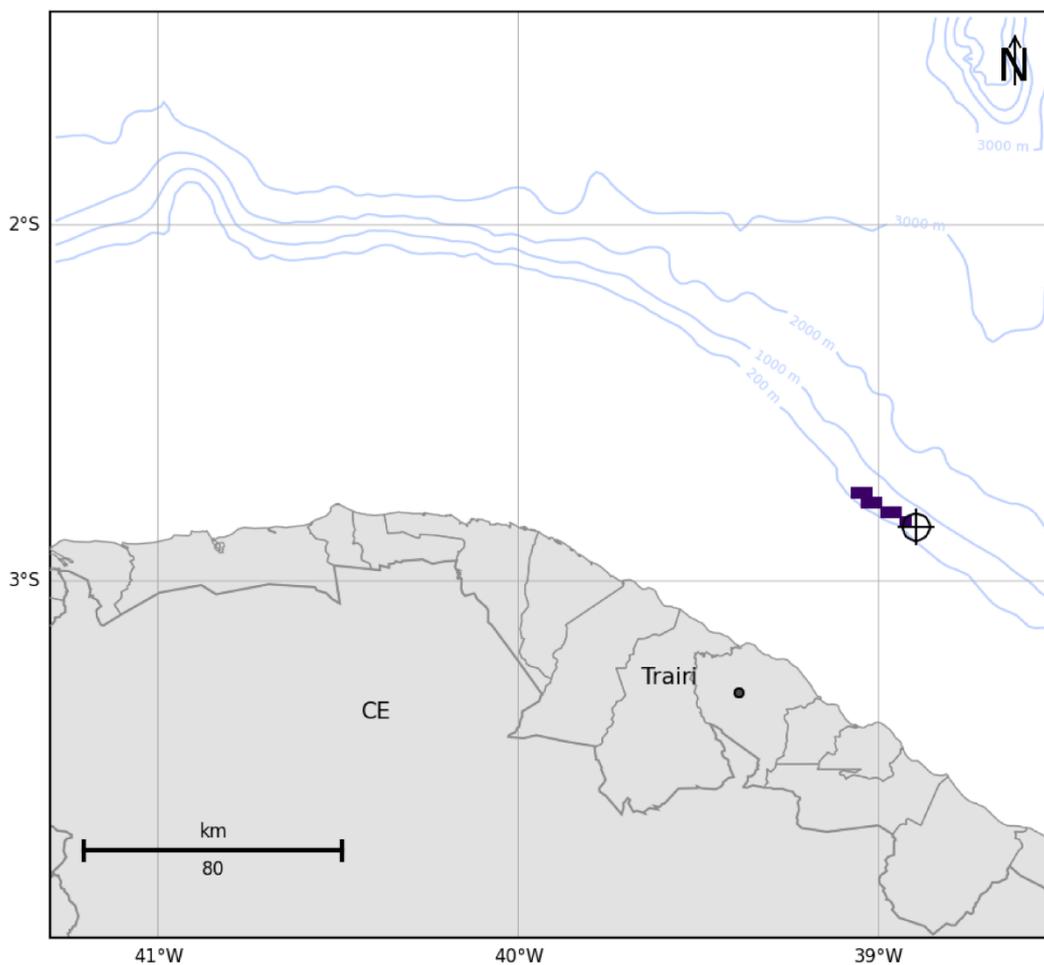
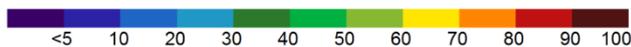


Figura 145: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 8 m³ no período de verão a partir do poço Gaiivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto B | Verão

Volume: 8 m³

Tempo Mínimo de Chegada de Óleo na Superfície (dias)

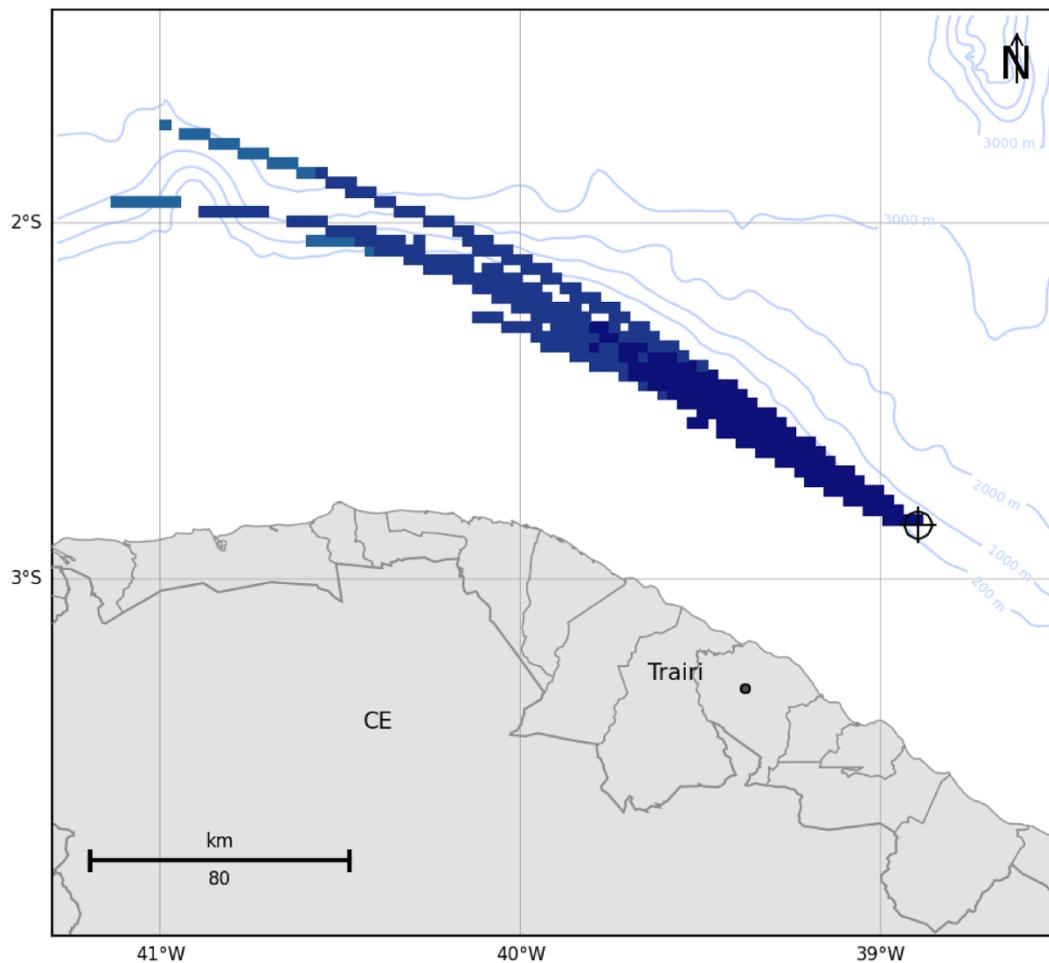


Figura 146: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m³ no período de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).

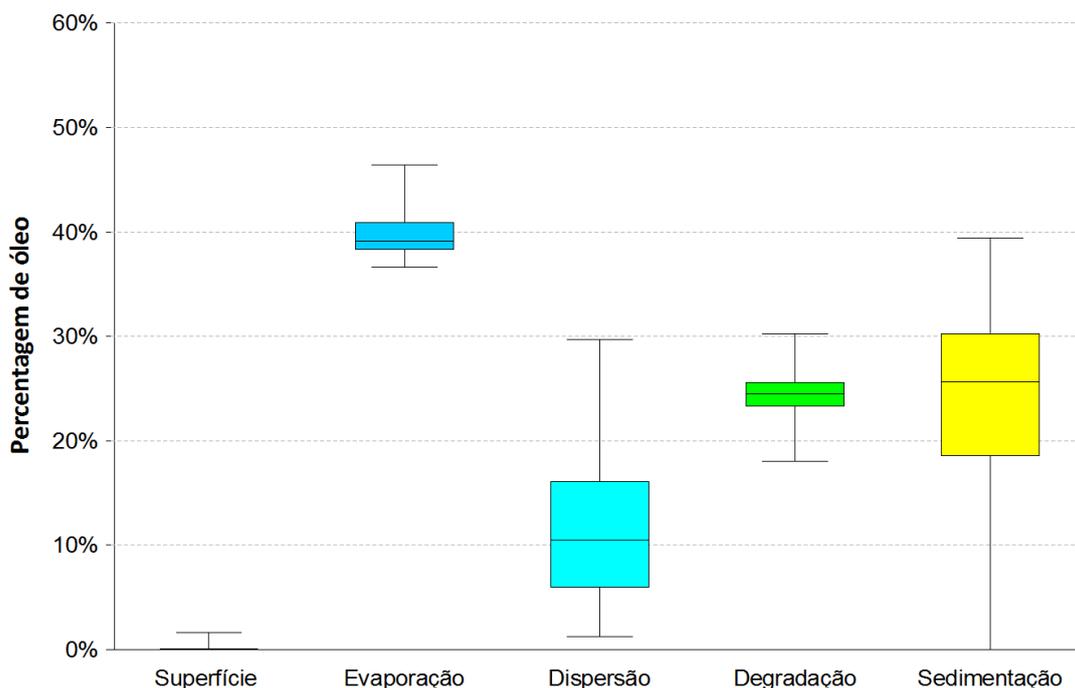


Figura 147: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 8 m³ no cenário de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B).

Nesse cenário, o óleo foi transportado para noroeste do ponto de vazamento, seguindo o fluxo da CNB. Nesse volume de vazamento, não houve toque de óleo na costa e o óleo em superfície se restringiu entre as longitudes de 38,5° W e 41,5° W, alcançando uma distância de 305 km. Como a área de probabilidade seguiu sua deriva principal paralela à costa, a menor distância apresentada em relação a esta foi de aproximadamente de 49 km, no município de Trairi (CE). Neste cenário nenhuma unidade de conservação da região apresentou probabilidade de presença de óleo.

Observa-se que em até 1 dia após o início do vazamento, o óleo pode percorrer uma extensão de 120 km. As regiões mais afastadas com probabilidade apresentam tempo mínimo de chegada de até 5 dias.

Na coluna d'água observa-se que o óleo tem baixa probabilidade de presença (inferior a 5%) e está restrito às imediações do ponto de vazamento.

Ao se observar os valores medianos dos processos do óleo, pode-se afirmar que a retirada de óleo da superfície ocorreu principalmente através da evaporação (mediana de 39%), seguido pela sedimentação. Apesar do valor máximo de dispersão ser próximo do máximo de degradação, o primeiro varia mais de 25% entre os valores extremos. O óleo na superfície ao fim de 30 dias foi inferior a 3% em todas as simulações.

3.2.1.2.1.2 Inverno

A seguir são apresentados os resultados de probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada e o balanço de massa ao final das simulações para o vazamento de 8 m³ no período de inverno.

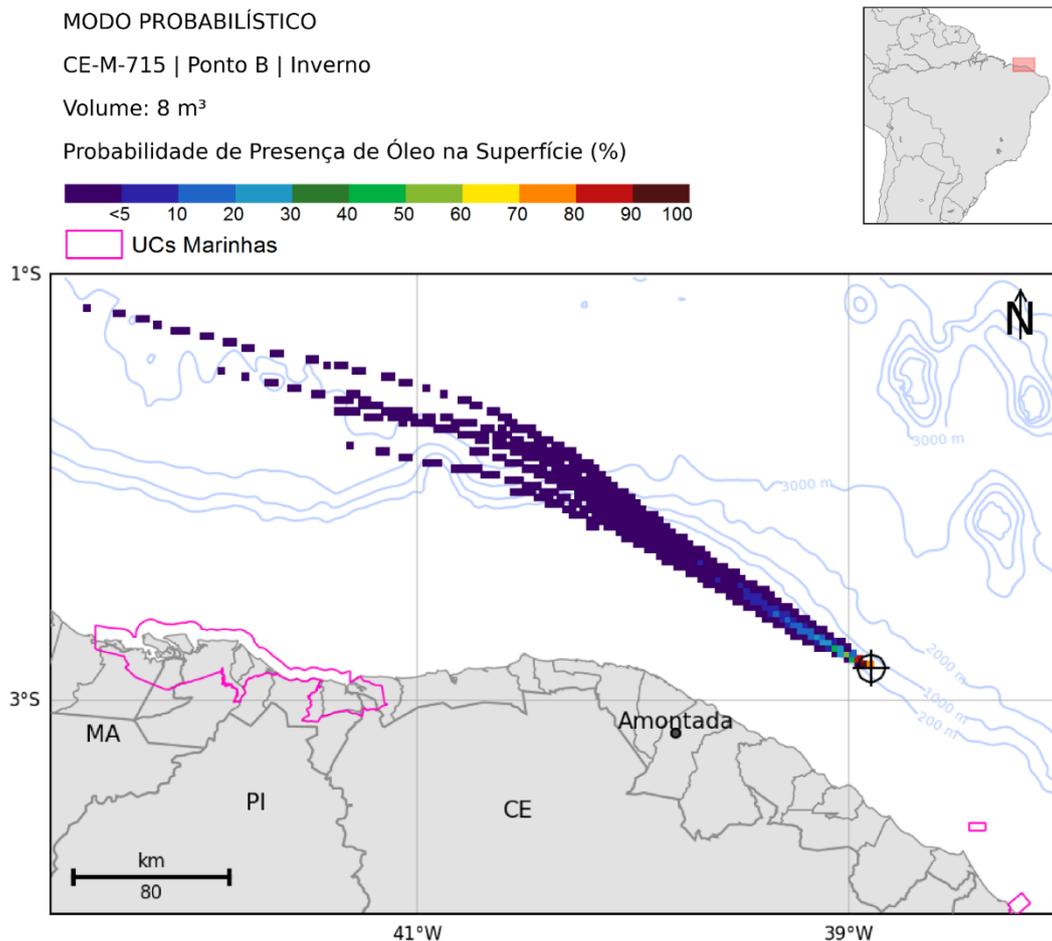


Figura 148: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m³ no período de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).

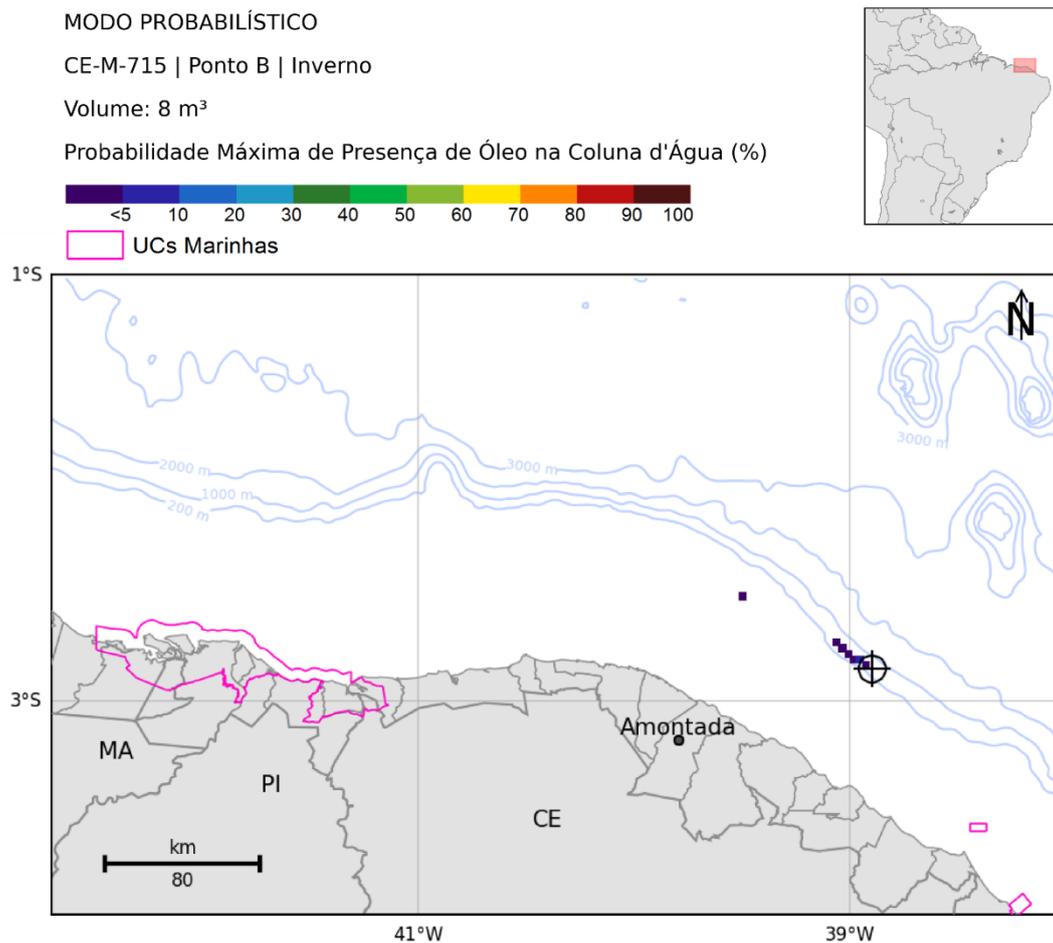


Figura 149: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 8 m³ no período de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).

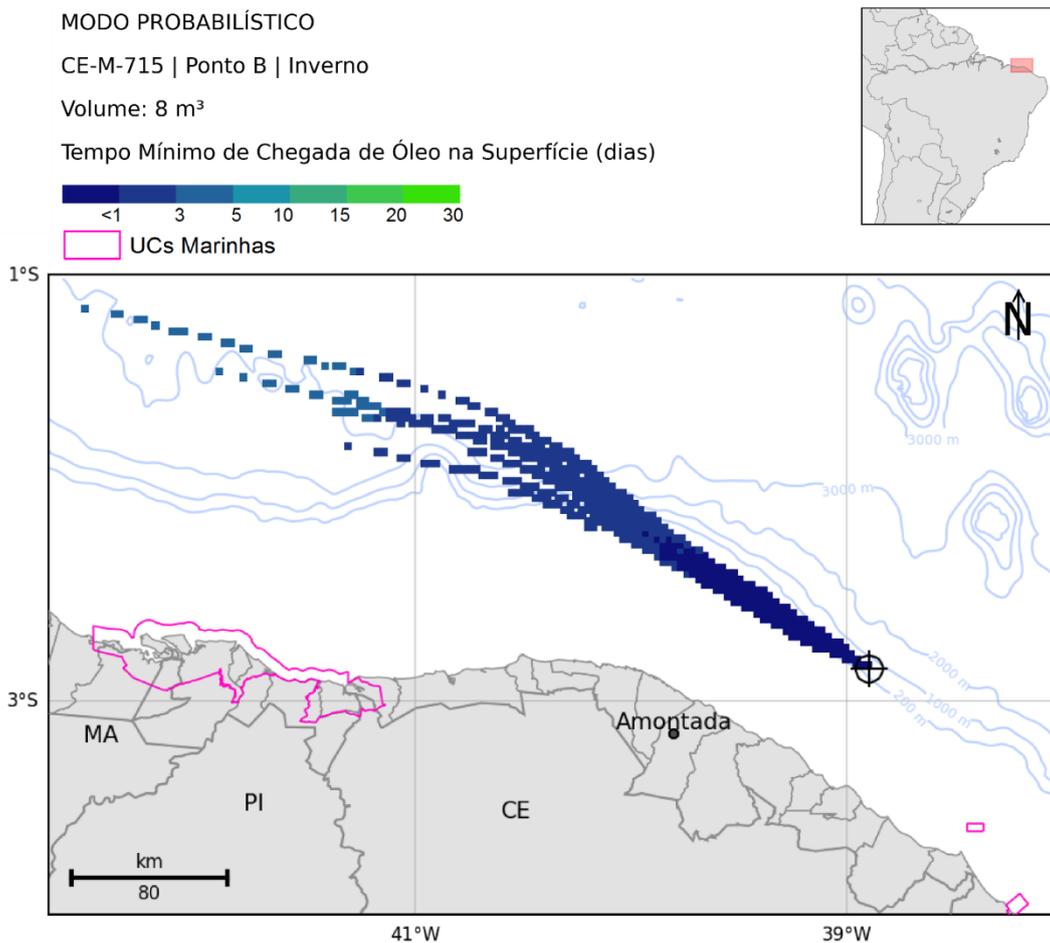


Figura 150: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m³ no período de inverno a partir do poço Gaiivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).

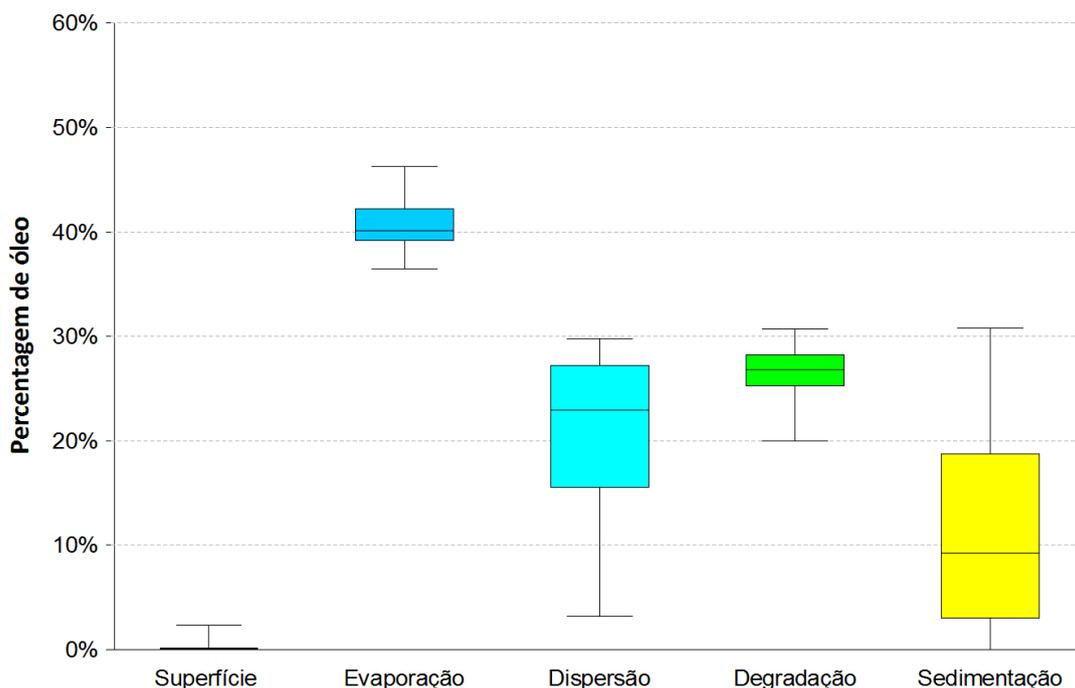


Figura 151: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 8 m³ no cenário de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B).

Assim como verificado no cenário de verão, a tendência do óleo é deslocar-se para noroeste, seguindo a CNB, porém atingindo uma distância maior, de até 450 km do ponto de vazamento. Neste cenário não houve probabilidade de óleo na costa e nem em unidades de conservação, sendo que a menor distância da costa foi de 49 km, em Amontada (CE).

A deriva do óleo pode se estender em até 135 km após o primeiro dia do início do vazamento. O ponto mais próximo da costa apresenta um tempo mínimo também de 1 dia e observa-se que os tempos mínimos das regiões mais afastadas estão na classe de 3-5 dias.

Na coluna d'água observa-se que o óleo tem baixa probabilidade de presença (inferior a 5%) e chega a até 76 km do ponto de vazamento.

Assim como no cenário de verão, a evaporação foi o principal processo de retirada de óleo da superfície, variando de 47% a 56% do total. A dispersão e a degradação apresentaram valores máximos próximos (30% e 31%, respectivamente), porém a dispersão tem maior variabilidade de seus valores. A sedimentação apresentou máximo de 31%, porém em 75% das simulações (3º quartil) sua importância foi inferior a 19% do total de óleo. Com esses altos valores para os diferentes processos, o óleo na superfície registrou valor máximo de 4%.

3.2.1.2.2 Vazamento de 200 m³

3.2.1.2.2.1 Verão

A seguir são apresentados os resultados de probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada e o balanço de massa ao final das simulações para o vazamento de médio porte (200 m³) no período de verão.

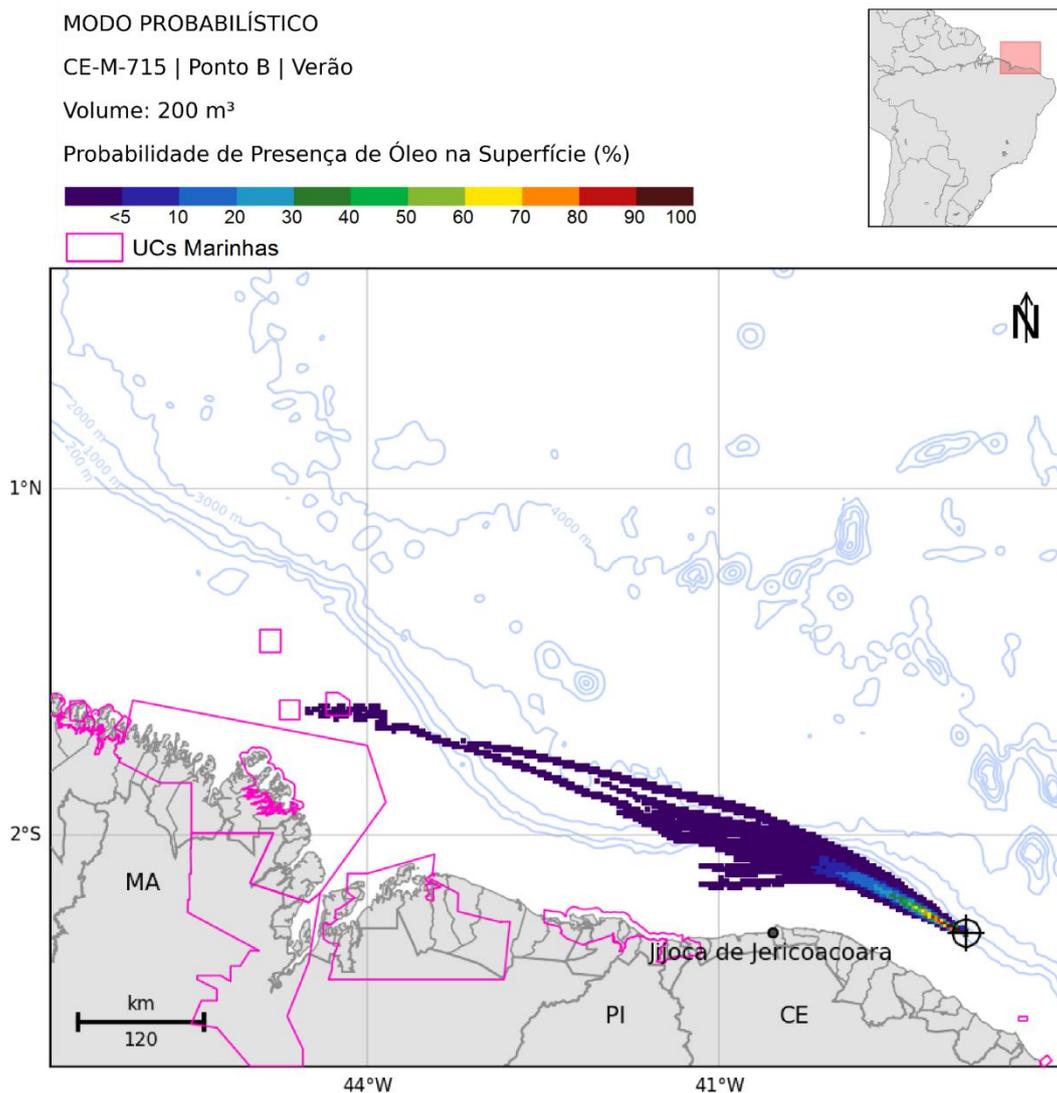


Figura 152: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m³ no período de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).

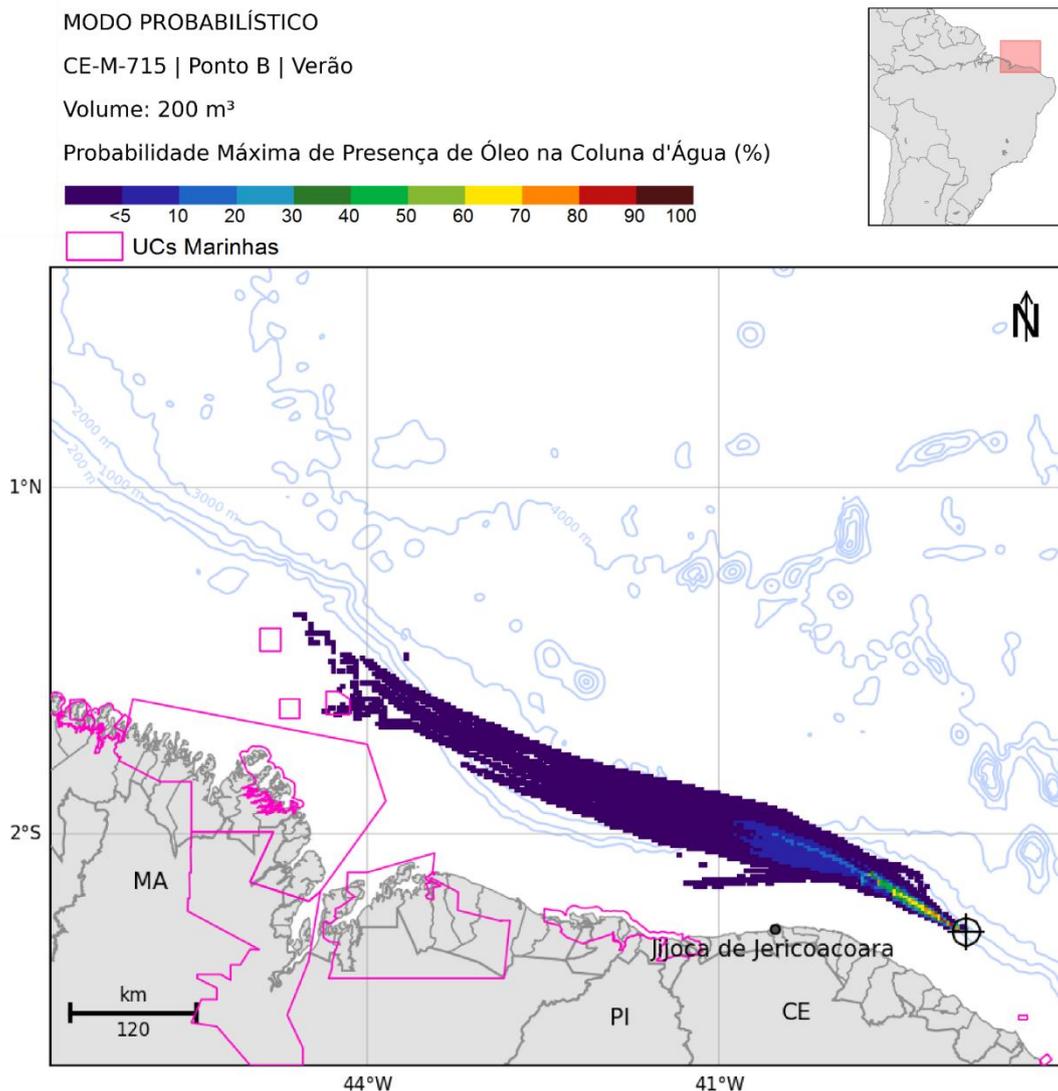


Figura 153: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 200 m³ no período de verão a partir do poço Gaiivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).

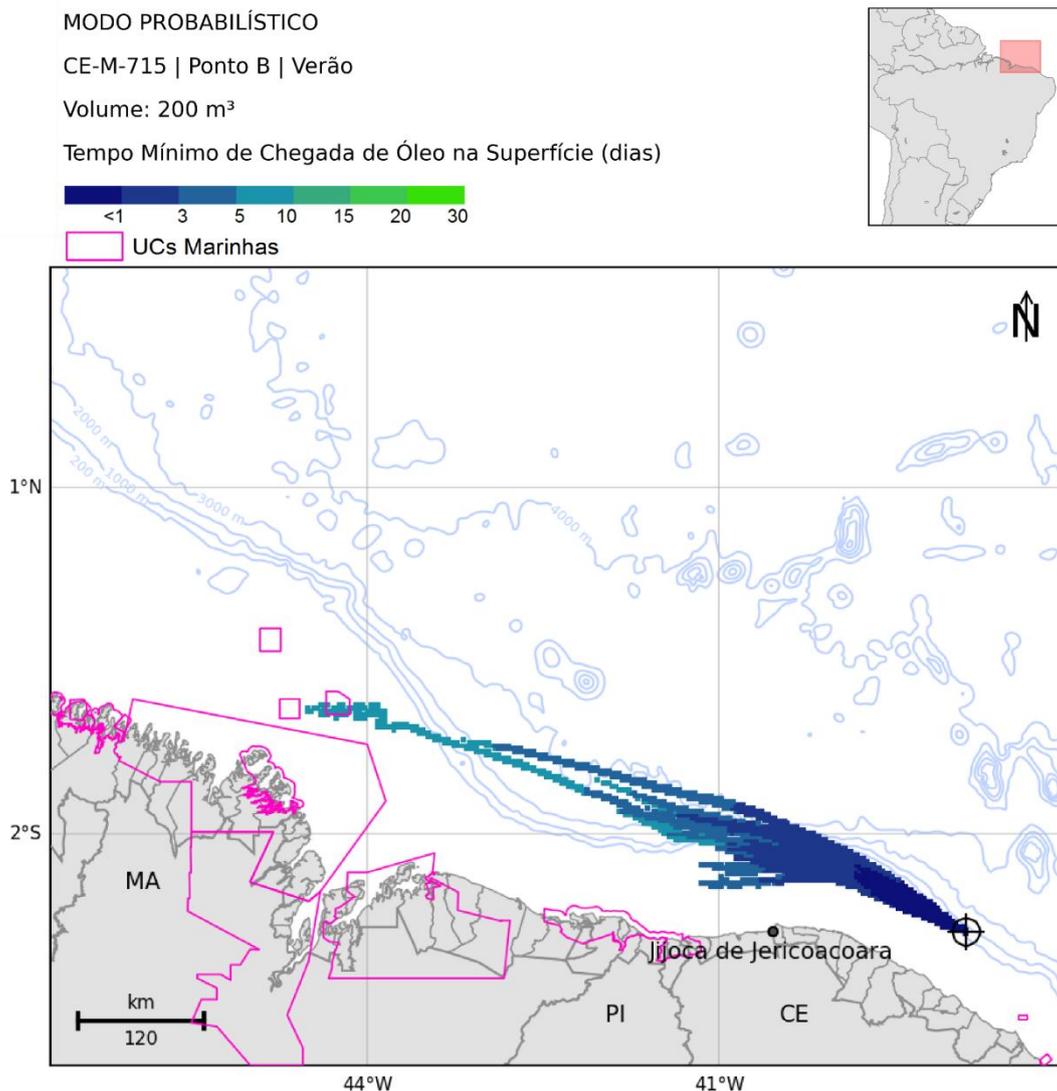


Figura 154: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 200 m³ no período de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).

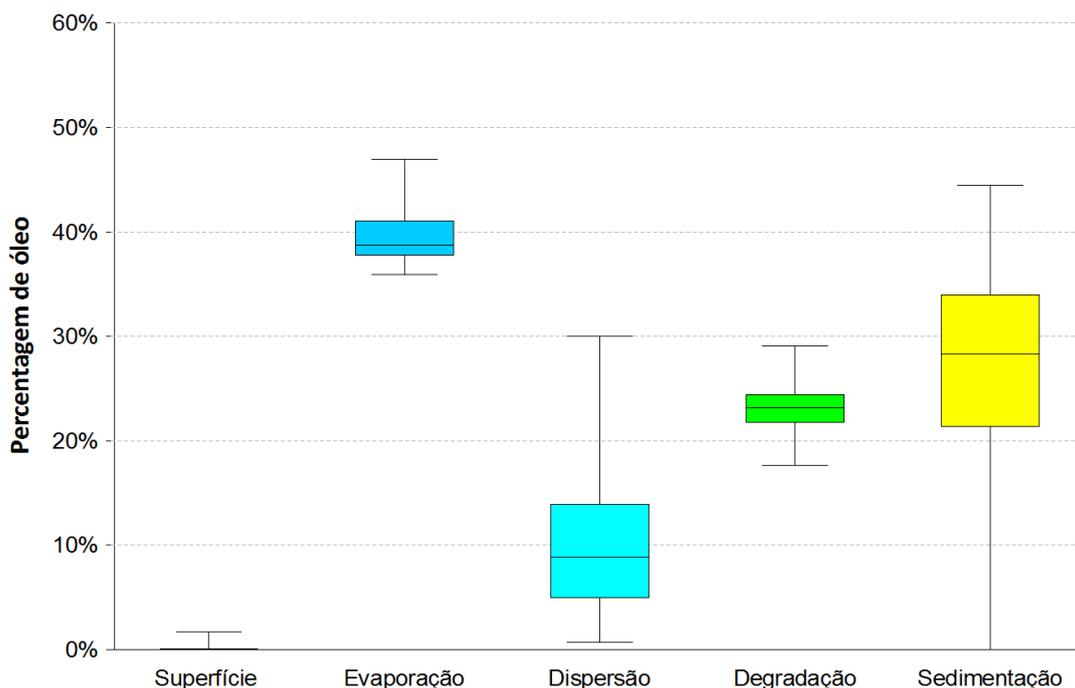


Figura 155: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 200 m³ no cenário de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B).

Neste cenário de verão, apesar de ser um vazamento maior, o padrão da deriva do óleo é similar ao de 8 m³, no qual a área de probabilidade de presença de óleo é em direção a noroeste, seguindo o fluxo da CNB. Esta área se estende até 665 km em relação ao ponto de vazamento, devido ao maior volume de óleo vazado que permite que haja óleo com espessura acima de 0,3 µm por mais tempo. Neste cenário não se registrou acúmulo de óleo na costa e a menor distância foi de 50 km em relação ao município de Jijoca de Jericoacoara (CE).

Em relação aos resultados das modelagens probabilísticas nas unidades de conservação marinhas, é importante destacar que estes devem ser vistos de maneira diferenciada em relação aos resultados na costa. Isto porque, em áreas marinhas, os resultados da modelagem representam a passagem da mancha de óleo, não representando um acúmulo e sim, um possível contato com óleo de caráter transitório. Os resultados probabilísticos críticos nas unidades de conservação marinhas são apresentados na Tabela 26.

Observa-se que, considerando até 1 dia de tempo mínimo, o óleo pode alcançar até 127 km de extensão. Já as regiões mais distantes podem ser atingidas em até 10 dias.

Em relação à coluna d'água, observa-se que a extensão atingida foi similar a da área em superfície e as probabilidades chegam a 100%. No entanto, estes valores se restringiram aos primeiros metros da coluna d'água.

Os valores medianos dos processos do óleo mostram que a retirada de óleo da superfície ocorreu principalmente através da evaporação (mediana de 38%), seguido pela sedimentação (mediana de 28%). Apesar do valor máximo de dispersão ser superiores ao máximo de degradação, o primeiro varia 29% entre os valores extremos. O óleo na superfície ao fim de 60 dias foi inferior a 2% em todas as simulações.

3.2.1.2.2.2 Inverno

A seguir são apresentados os resultados de probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada e o balanço de massa ao final das simulações para o vazamento de médio porte (200 m³) no período de inverno. Ao final é apresentada tabela com estes resultados para as unidades de conservação marinhas para os dois períodos sazonais.

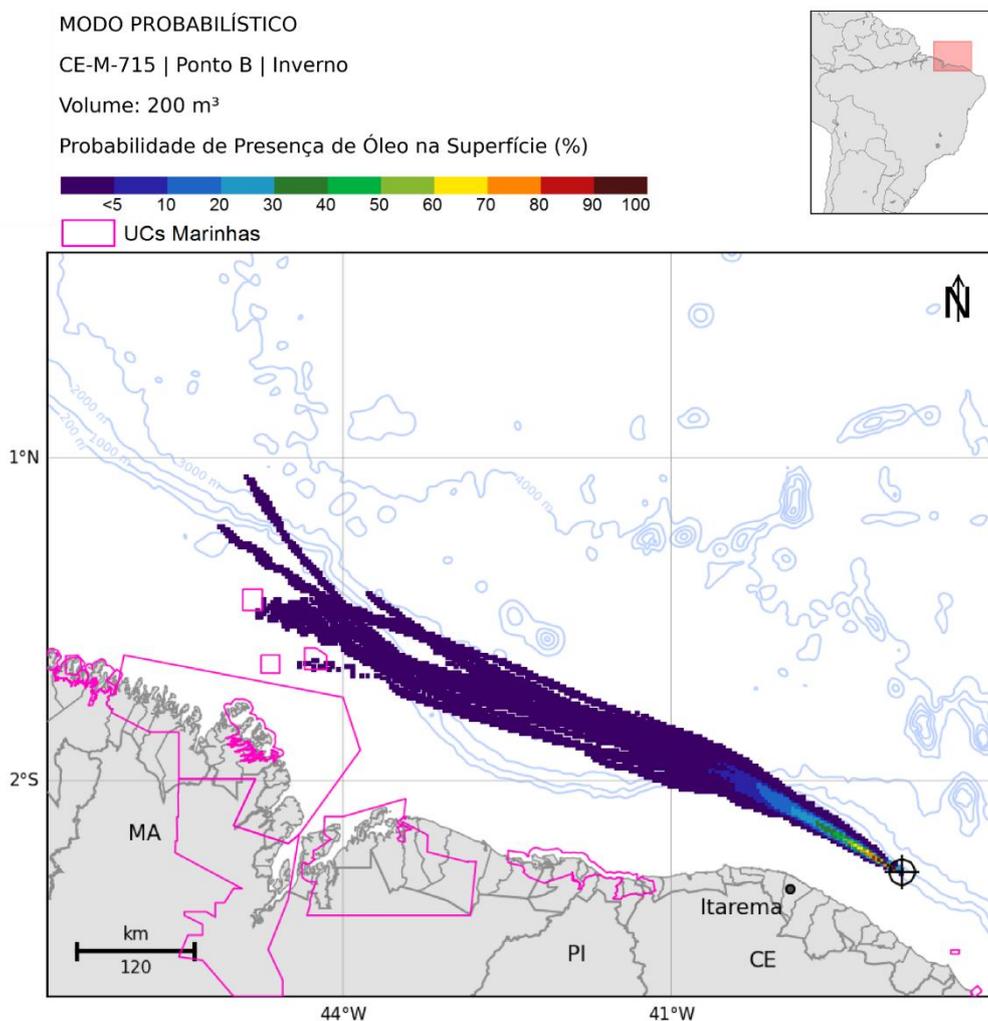


Figura 156: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m³ no período de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).

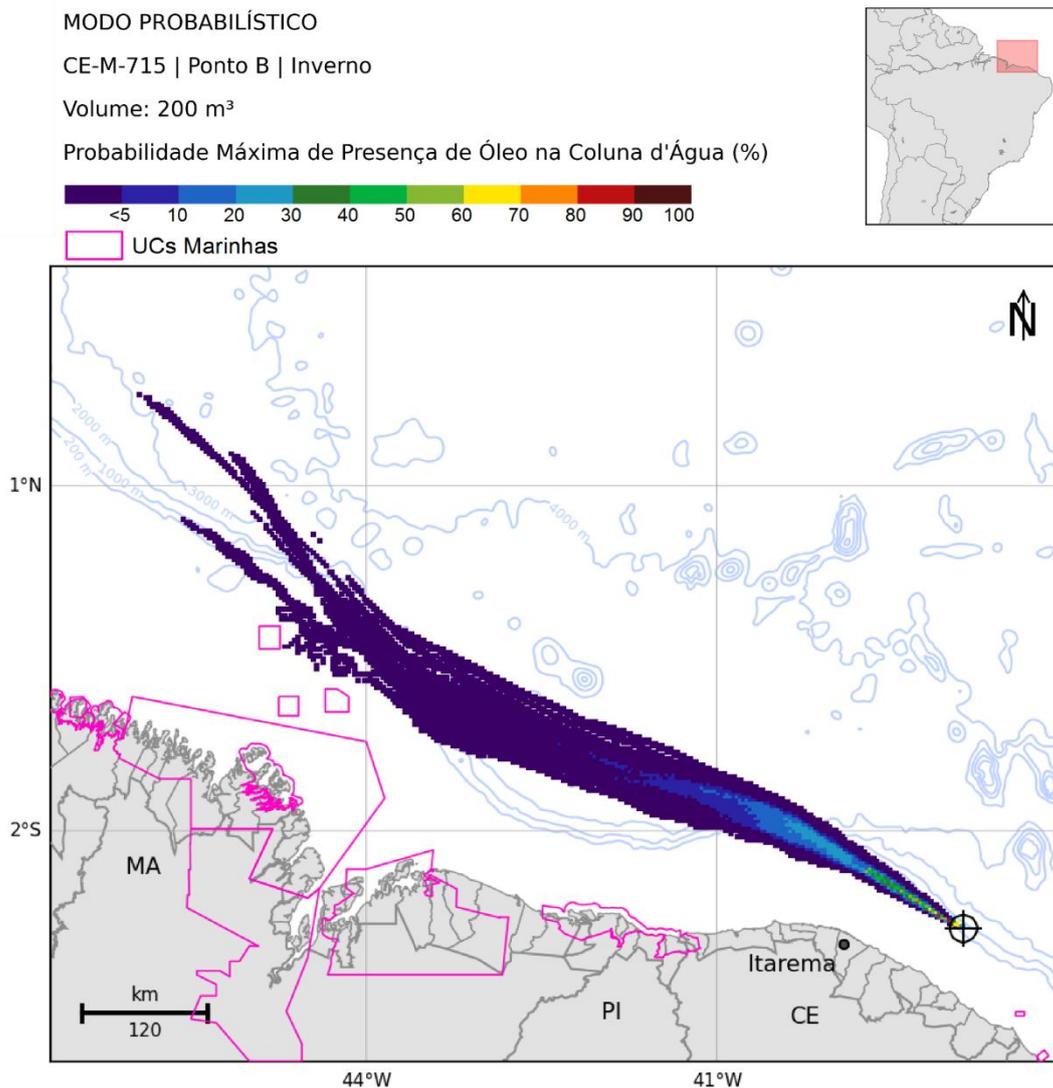


Figura 157: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 200 m³ no período de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).

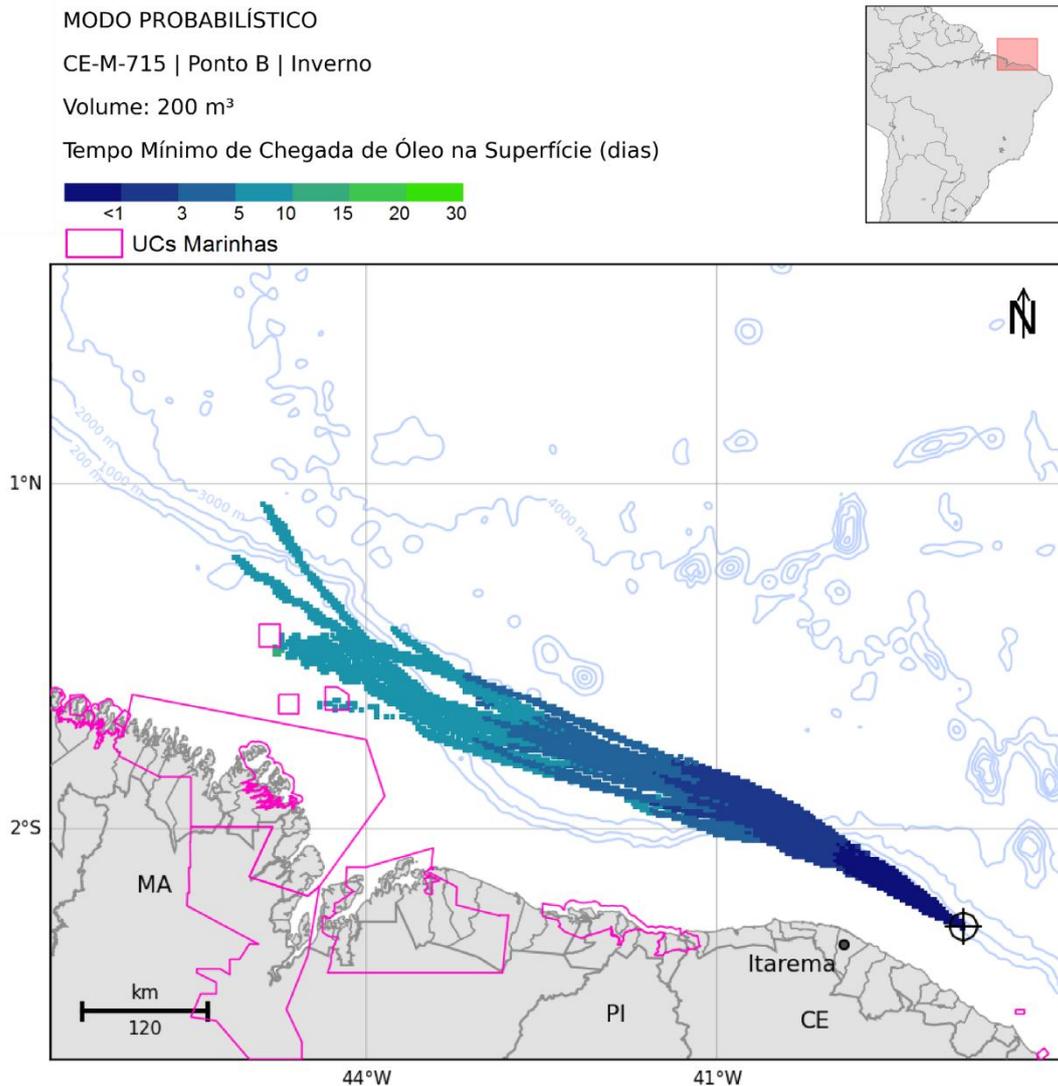


Figura 158: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para vazamento de 200 m³, no período de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 720 horas (30 dias).

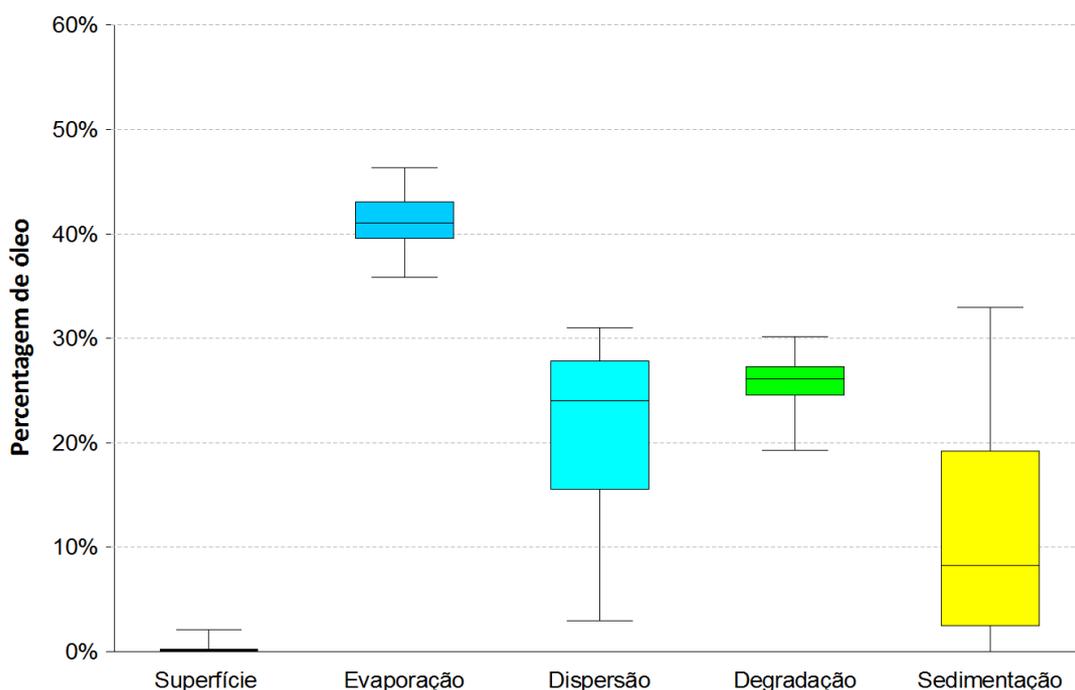


Figura 159: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de 200 m³ no cenário de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B).

O padrão de deriva foi similar ao apresentado no cenário de verão, com o óleo seguindo o fluxo da CNB para noroeste. A deriva se estendeu mais neste cenário, alcançando até 785 km do ponto de vazamento em superfície e 940 km na coluna d'água, e não houve toque de óleo na costa. A distância mínima da área de probabilidade para a costa é de ~48 km da cidade de Itarema, no estado do Ceará.

Em até 1 dia após o vazamento, o óleo pode alcançar a distância de até 148 km. Os locais mais distantes do ponto de vazamento podem ser alcançados em até 15 dias, enquanto o mais próximo da costa em até 1 dia.

Em relação aos resultados das modelagens probabilísticas nas unidades de conservação marinhas, é importante destacar que estes devem ser vistos de maneira diferenciada em relação aos resultados na costa. Isto porque, em áreas marinhas, os resultados da modelagem representam a passagem da mancha de óleo, não representando um acúmulo e sim, um possível contato com óleo de caráter transitório. Os resultados probabilísticos críticos nas unidades de conservação marinhas são apresentados na Tabela 26.

Assim como no cenário de verão, a evaporação foi o principal processo de retirada de óleo da superfície, variando de 36% a 46% do total. A dispersão e a degradação apresentaram medianas próximas (24% e 26%, respectivamente), porém a dispersão tem maior variabilidade de seus valores. A sedimentação apresentou máximo de 33%, porém em 75% das simulações

(3º quartil) sua importância foi inferior a 19% do total de óleo. Com esses altos valores para os diferentes processos, o óleo na superfície registrou valor máximo de 3%.

Tabela 26: 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 poço Gaiivota (Ponto B), nos cenários de verão e inverno.

Unidade de Conservação	Massa Máxima (t/km ²)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo (horas)	
	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
PEM do Parcel de Manuel Luís	0,60*	0,18*	0,3	0,3	194	167
PEM do Banco do Álvaro	-	0,24*	-	0,7	-	197

* Esses valores representam a passagem do óleo na superfície por essas regiões, não representando um acúmulo.

3.2.1.2.3 Vazamento de Pior Caso

3.2.1.2.3.1 Verão

A seguir são apresentados os resultados de probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada, massa máxima na costa e o balanço de massa ao final das simulações para o vazamento de pior caso (13.307 m³) no período de verão.

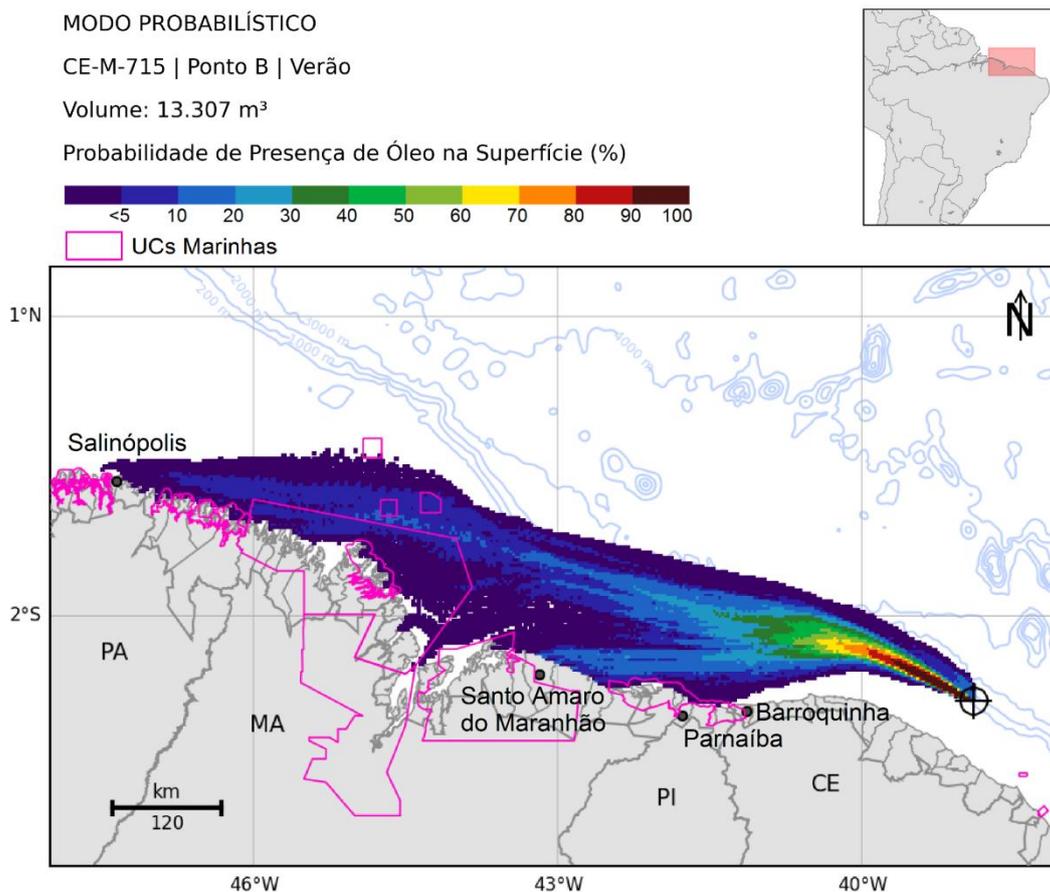


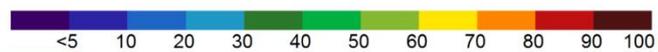
Figura 160: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão a partir do poço Gavota (Ponto B). Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto B | Verão

Volume: 13.307 m³

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



UCs Marinhas

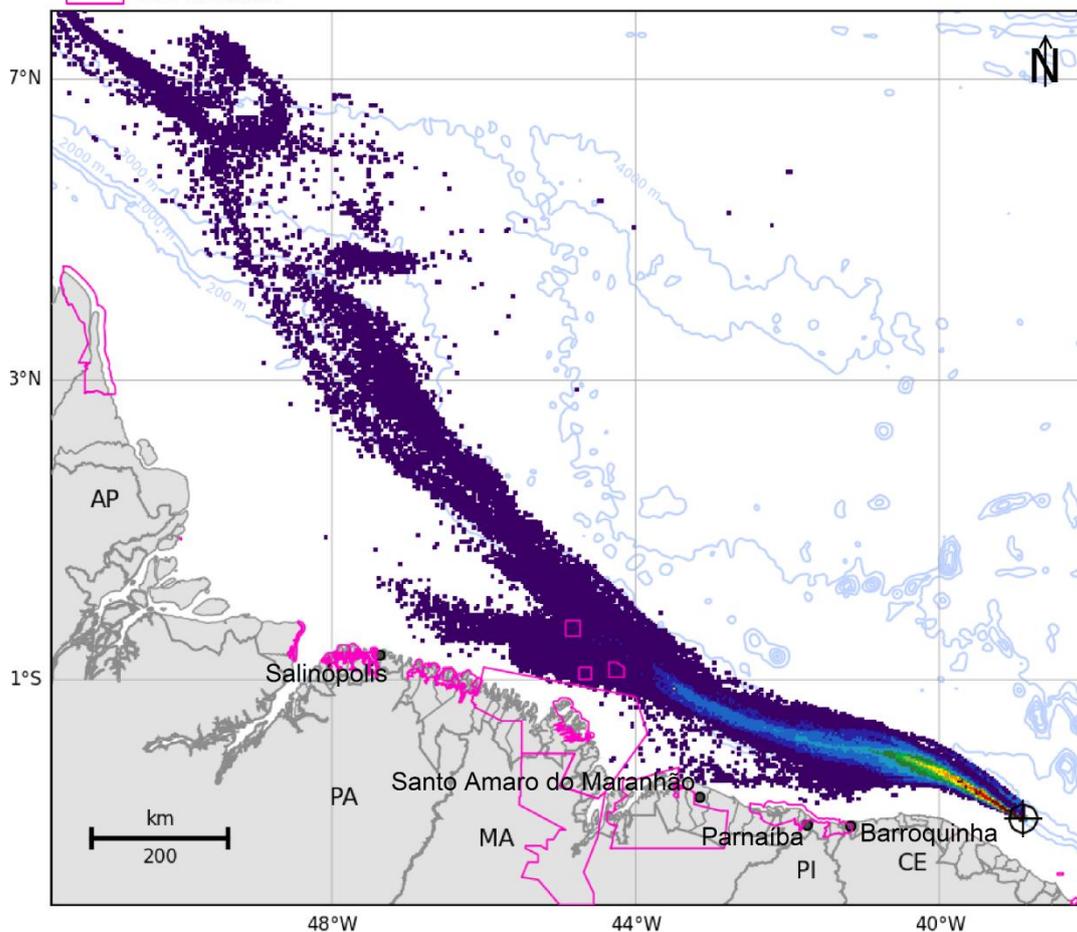


Figura 161: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão a partir do poço Gavivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto B | Verão

Volume: 13.307 m³

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

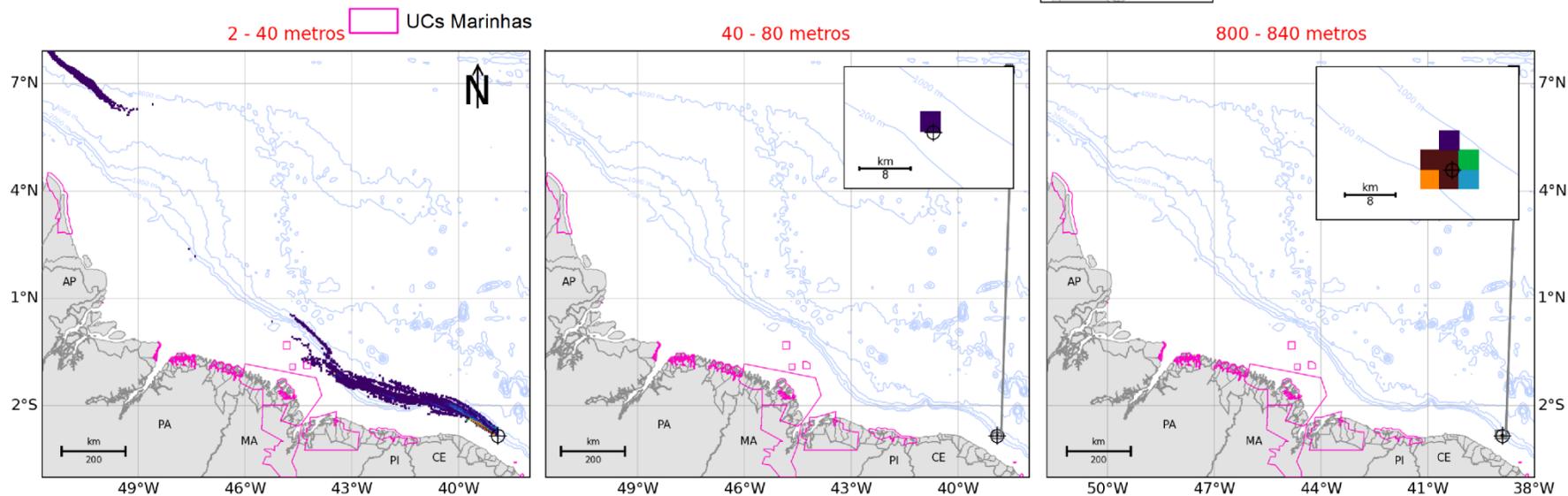
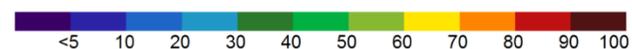


Figura 162: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três camadas (2-40 m, 40-80 m e 800-840 m), para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão a partir do poço Gaiavota (Ponto B). Simulação de 60 dias.

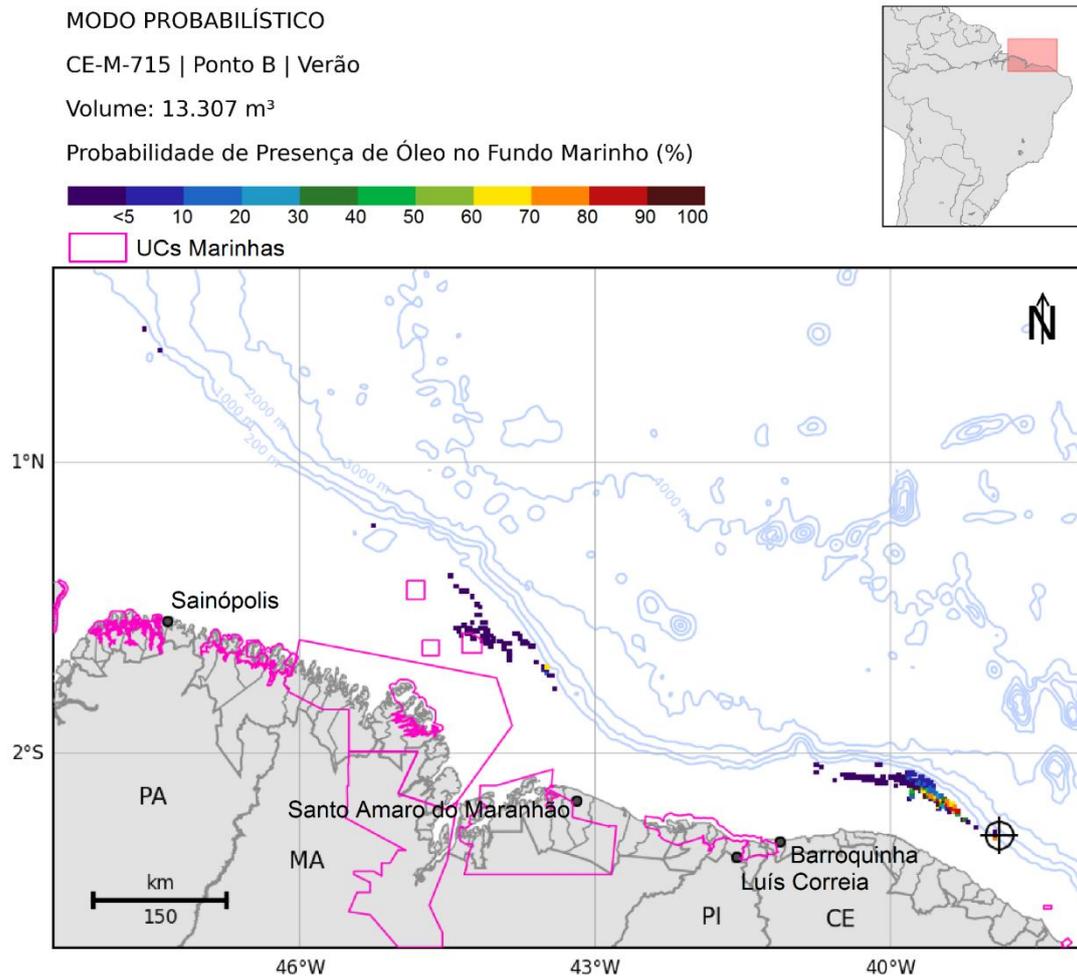


Figura 163: Mapa de probabilidade de presença de óleo no fundo marinho, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão a partir do poço Gavota (Ponto B). Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto B | Verão

Volume: 13.307 m³

Probabilidade de Presença de Óleo na Costa (%)

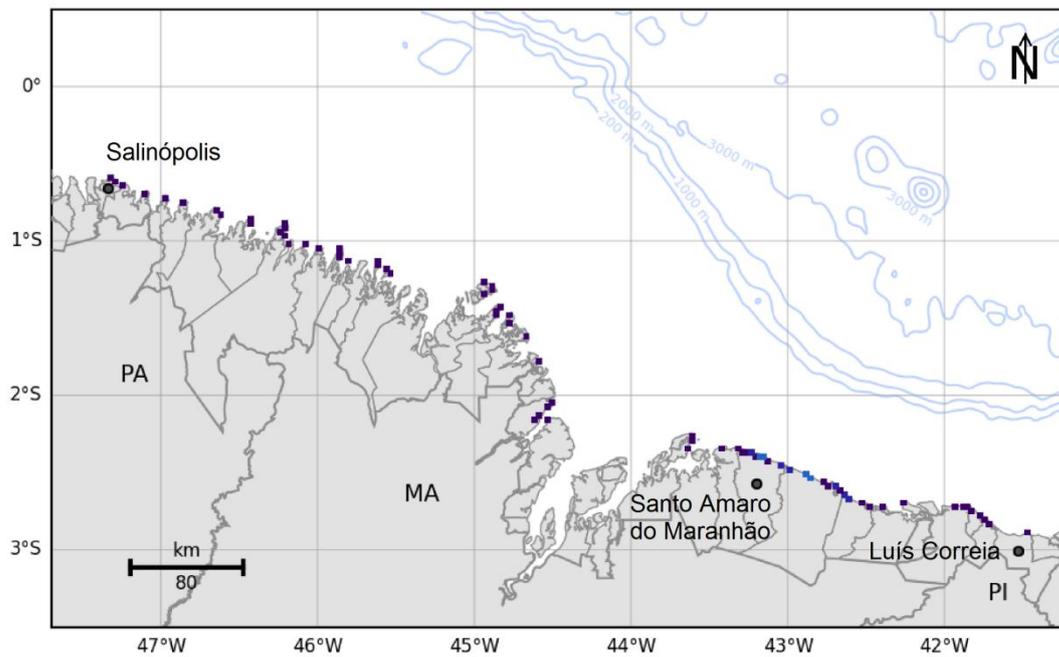
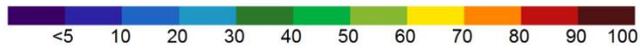


Figura 164: Mapa de probabilidade de presença de óleo na costa, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão a partir do poço Gavota (Ponto B). Simulação de 60 dias.

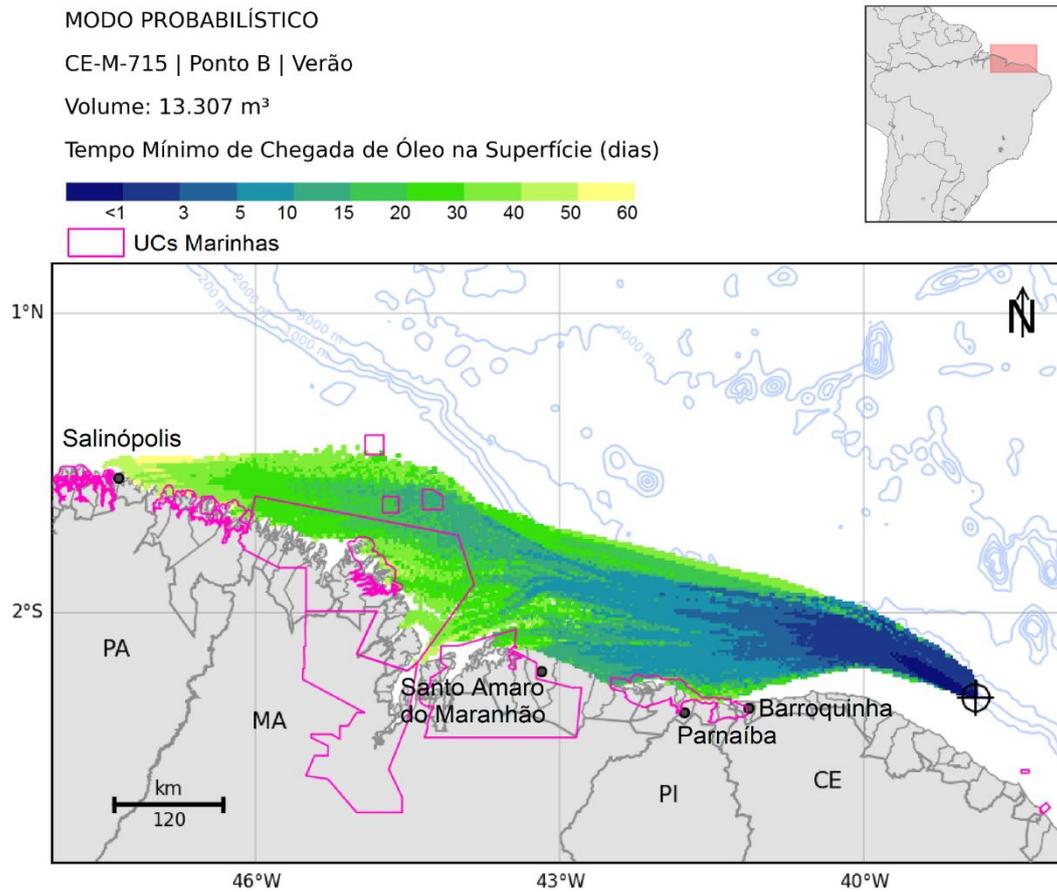


Figura 165: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para um vazamento de *blowout* contínuo de 30 dias no período de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto B | Verão

Volume: 13.307 m³

Tempo Mínimo de Chegada de Óleo na Costa (dias)

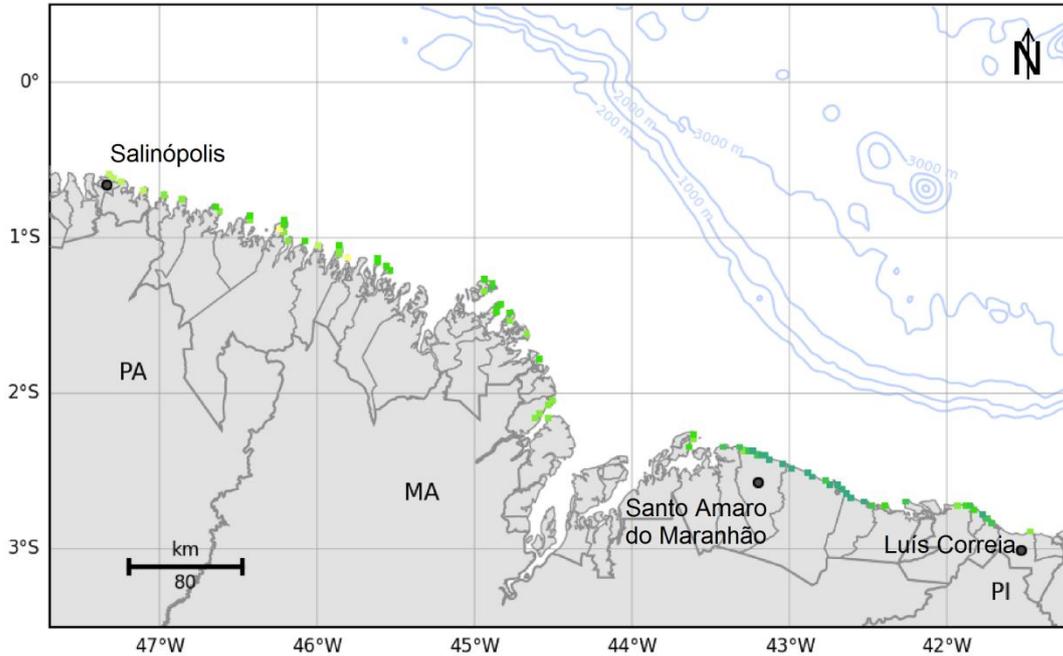


Figura 166: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo na costa para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.

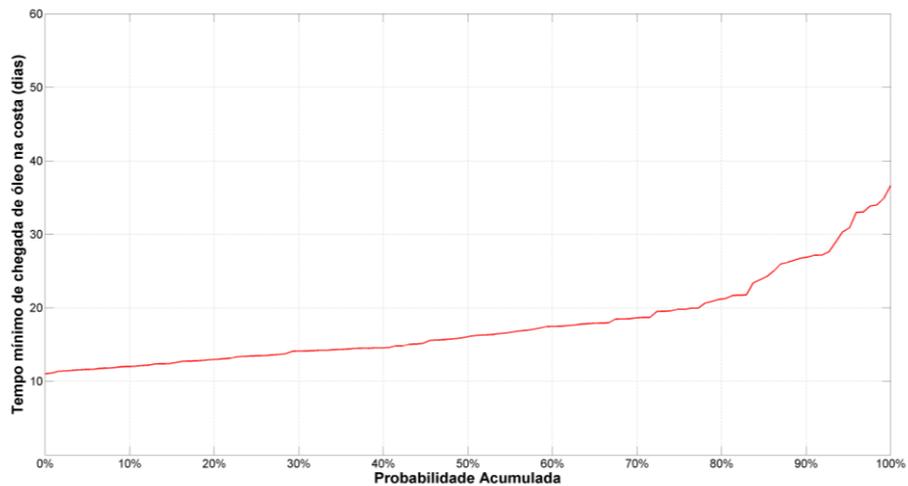


Figura 167: Gráfico de tempo mínimo de chegada de óleo na costa nas simulações em que houve probabilidade de presença de óleo na costa a partir do poço Gaivota (Ponto B).

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto B | Verão

Volume: 13.307 m³

Massa Máxima de Óleo na Costa (t/km)

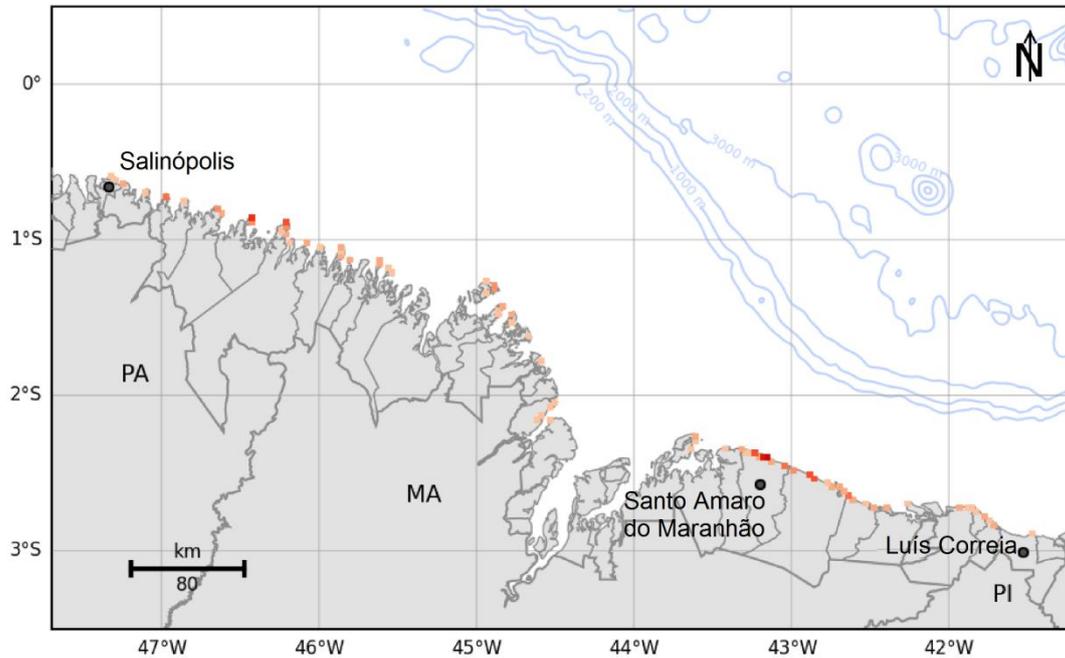


Figura 168: Massa máxima de óleo por célula de costa para o vazamento de pior caso no cenário de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B).

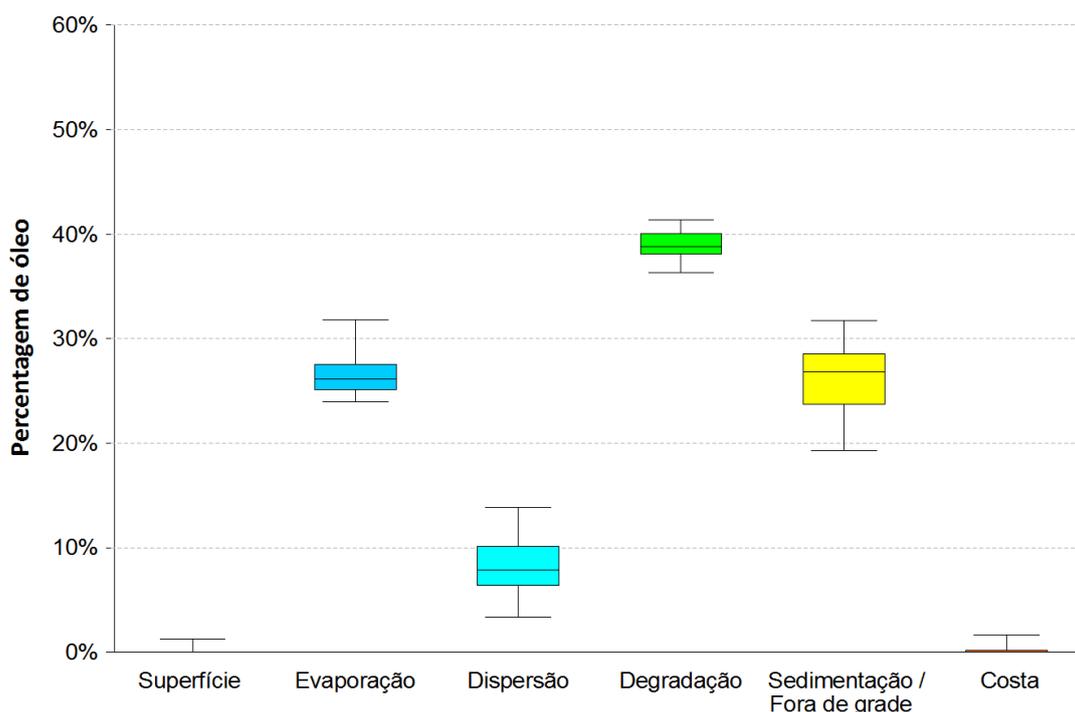


Figura 169: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de pior caso no cenário de verão a partir do poço Gaivota (Ponto B).

A deriva do óleo ocorre preferencialmente para oeste e noroeste do ponto de vazamento, pela influência da CNB e dos ventos de leste e nordeste. A distância máxima é de aproximadamente 990 km do ponto de vazamento.

Na coluna d'água, o óleo se desloca para noroeste do ponto seguindo a CNB até o limite do domínio do modelo, a 1.850 km de distância do ponto de vazamento. As probabilidades máximas chegam até 100% na região próxima do ponto de vazamento. Probabilidades maiores que 50% são observadas até uma distância de 250 km da fonte. Em camadas mais profundas verifica-se que o óleo permanece em uma área mais restrita, próximo ao ponto de vazamento.

No fundo marinho, há duas regiões principais de presença de óleo: uma que se estende até cerca de 220 km a noroeste do ponto de vazamento, onde são observadas probabilidades de até 100%; e outra região próxima aos PEM's do Recife Manuel Luís e dos Bancos do Álvaro e Tarol.

Das 300 simulações, 124 resultaram em toque na costa (41%), atingindo desde o município de Salinópolis (PA) a Luís Correia (PI), além da aproximação de menos de um ponto de grade (3 km) do óleo em superfície até Barroquinha (CE). O município de Santo Amaro do Maranhão (MA) apresentou a maior probabilidade de toque, 19,4%, o menor tempo de chegada de óleo, 11 dias (264 horas), e a maior massa de óleo, de 6,6 toneladas por km (Tabela 27).

Em até 3 dias após o início do vazamento, o óleo pode atingir uma distância de até 240 km e, em 5 dias, de 360 km. Na Figura 131, nota-se que das 124 simulações em que houve toque na costa, 77% apresentaram tempo de toque abaixo de 20 dias.

Em relação às unidades de conservação costeiras, o PARNA dos Lençóis Maranhenses foi o que teve a maior probabilidade (19,4%), menor tempo (11 dias (264 horas)) e maior massa (6,65 t/km) (Tabela 29). Em relação aos resultados das modelagens probabilísticas nas unidades de conservação marinhas, é importante novamente destacar que estes devem ser vistos de maneira diferenciada em relação aos resultados na costa. Em áreas marinhas, os resultados da modelagem representam a passagem da mancha de óleo, não representando um acúmulo e sim, um possível contato com óleo de caráter transitório. Os resultados são apresentados na Tabela 28.

Ao se observar os valores medianos dos processos do óleo, pode se afirmar que a retirada de óleo ocorreu principalmente através da degradação (mediana de 39%), seguido pela evaporação e sedimentação. A dispersão apresentou mediana de 8%, com variação de 11% entre os valores extremos. O óleo na superfície e na costa ao fim de 60 dias foram inferiores a 2% em todas as simulações.

3.2.1.2.3.2 Inverno

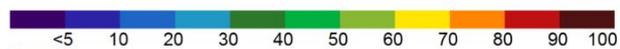
A seguir são apresentados os resultados de probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada, massa máxima na costa e o balanço de massa ao final das simulações para o vazamento de pior caso (13.307 m³) no período de inverno. Ao final são apresentadas tabelas com estes resultados para os municípios, as unidades de conservação marinhas e costeiras para os dois períodos sazonais.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto B | Inverno

Volume: 13.307 m³

Probabilidade de Presença de Óleo na Superfície (%)



UCs Marinhas

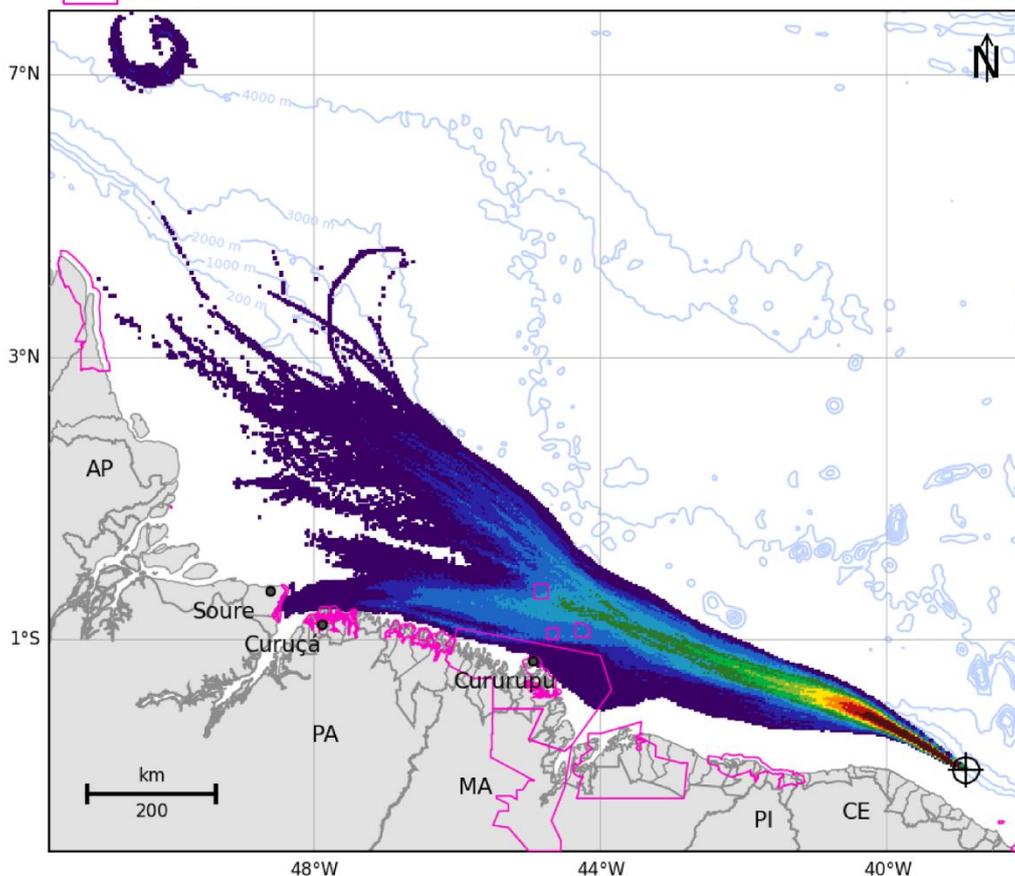


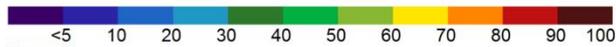
Figura 170: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto B | Inverno

Volume: 13.307 m³

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



UCs Marinhas

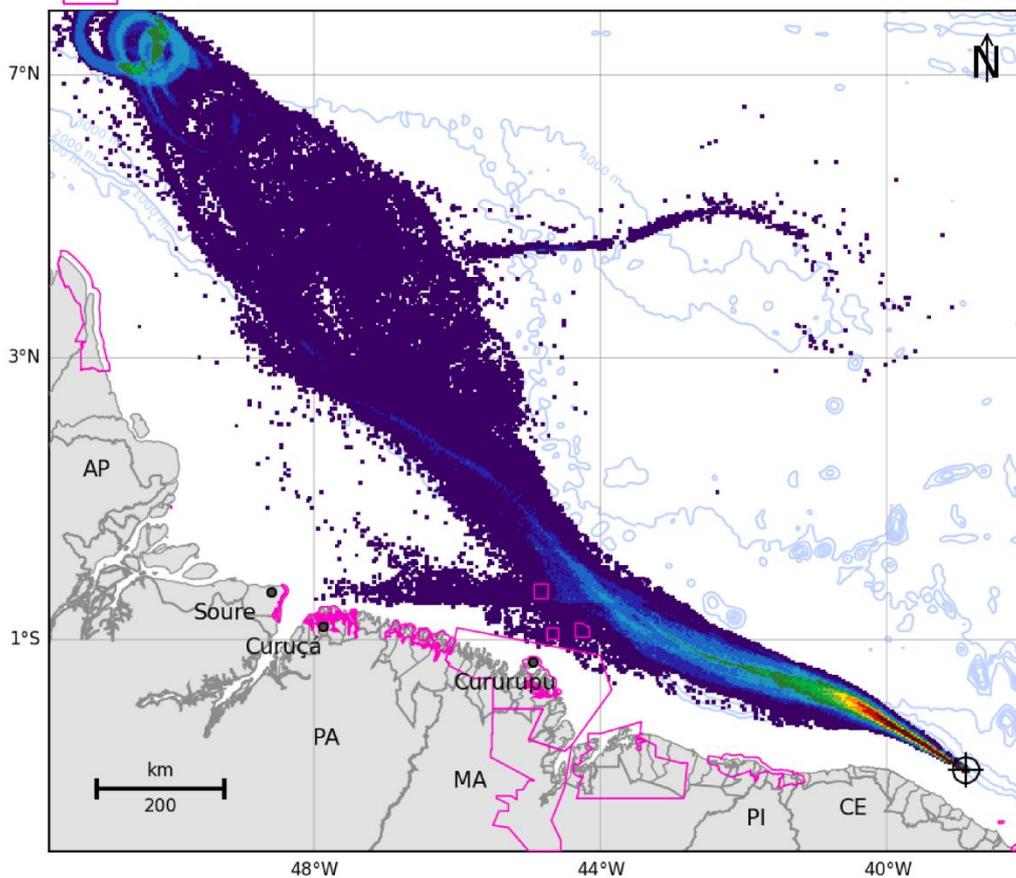


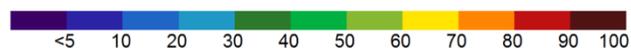
Figura 171: Mapa de probabilidade de presença de óleo na coluna d'água, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto B | Inverno

Volume: 13.307 m³

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



2 - 40 metros UCs Marinhas

40 - 80 metros

800 - 840 metros

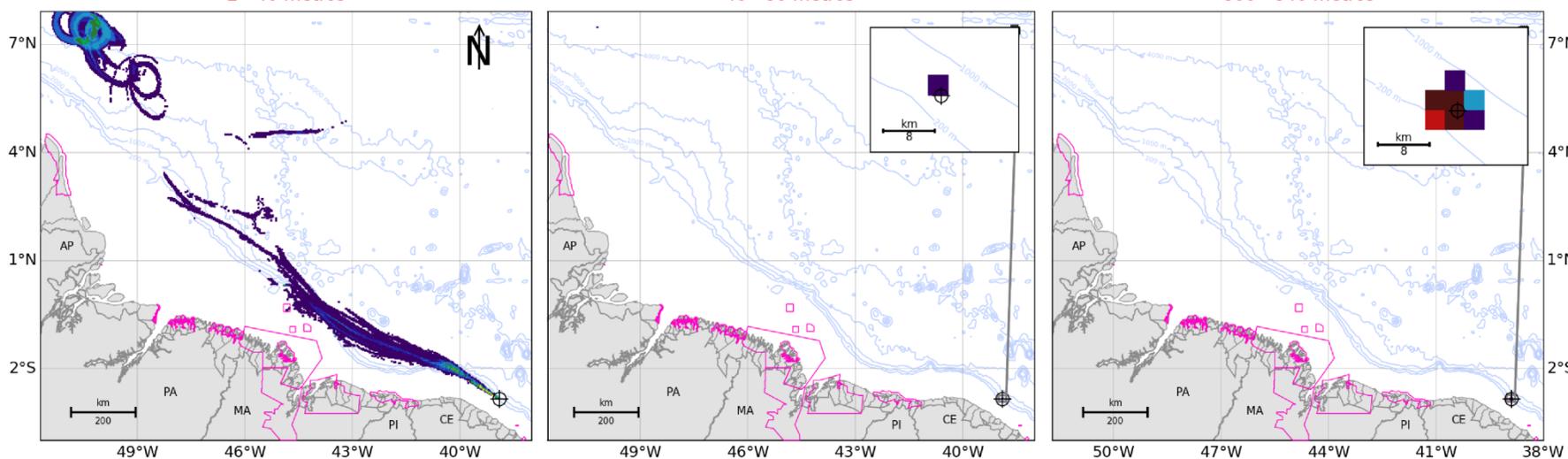


Figura 172: Mapa de probabilidade de presença de óleo em três camadas (2-40 m, 40-80 m e 800-840 m), para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno a partir do poço Gaiivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.

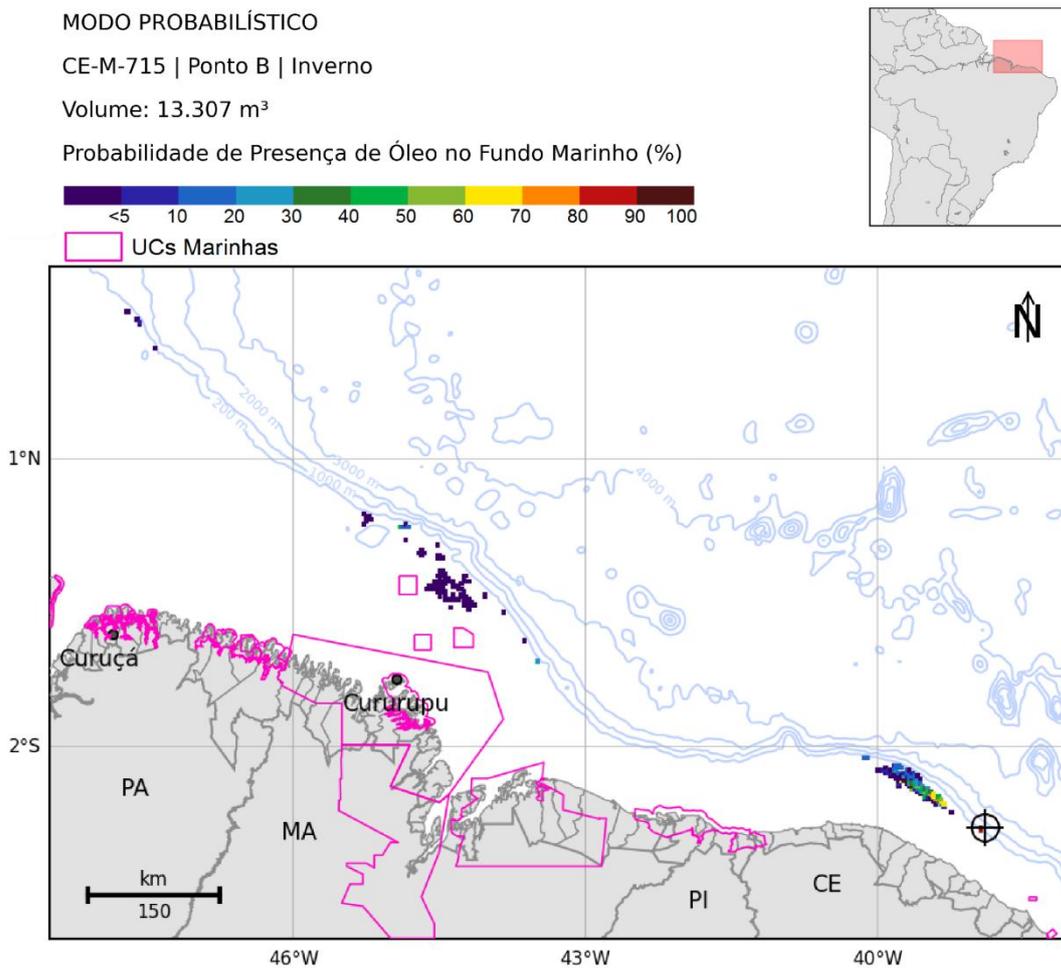


Figura 173: Mapa de probabilidade de presença de óleo no fundo marinho, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto B | Inverno

Volume: 13.307 m³

Probabilidade de Presença de Óleo na Costa (%)

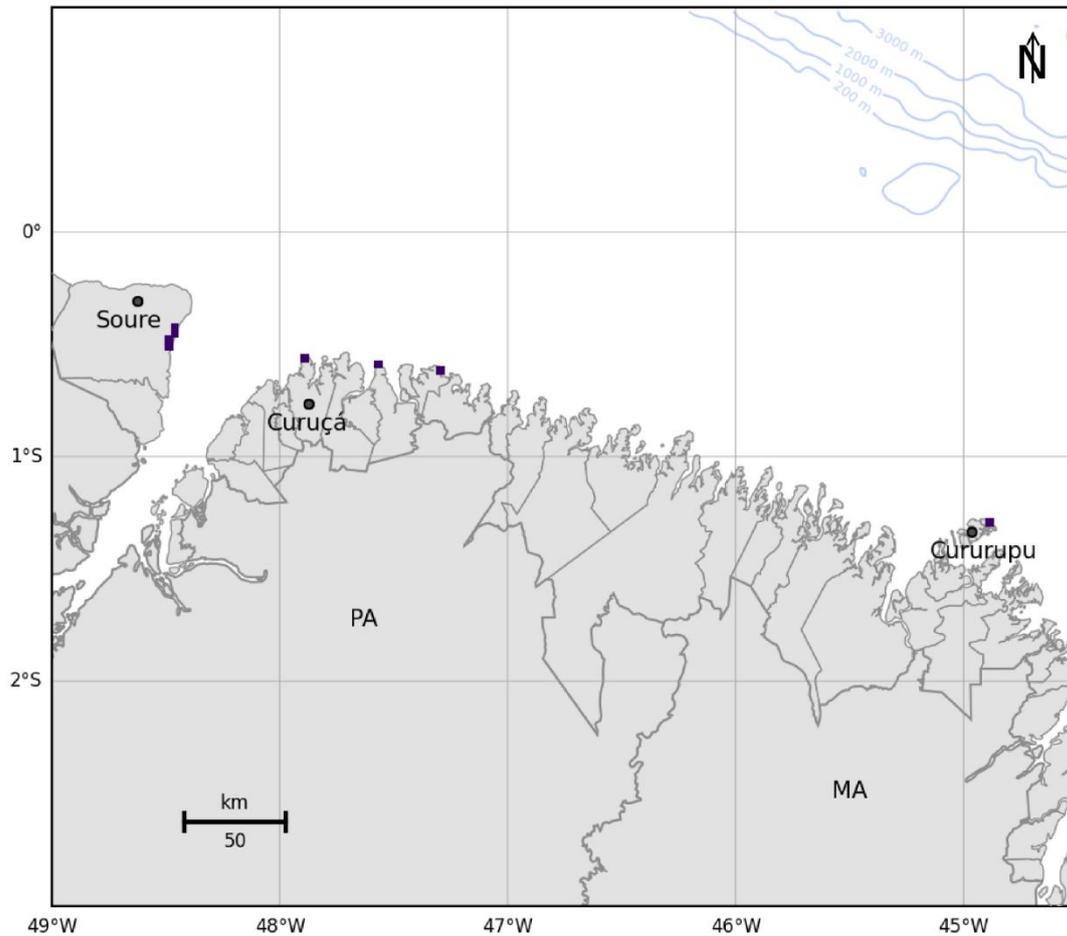
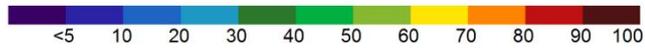


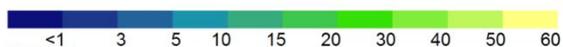
Figura 174: Mapa de probabilidade de presença de óleo na costa, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto B | Inverno

Volume: 13.307 m³

Tempo Mínimo de Chegada de Óleo na Superfície (dias)



UCs Marinhas

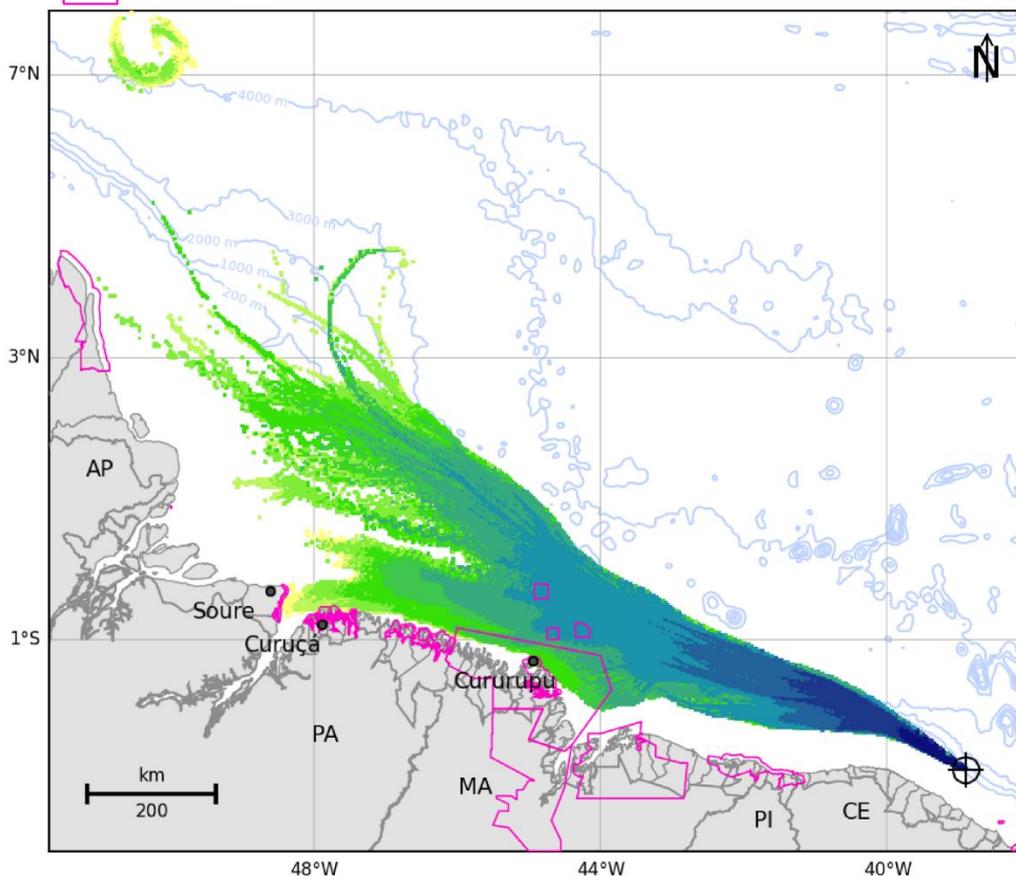


Figura 175: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto B | Inverno

Volume: 13.307 m³

Tempo Mínimo de Chegada de Óleo na Costa (dias)

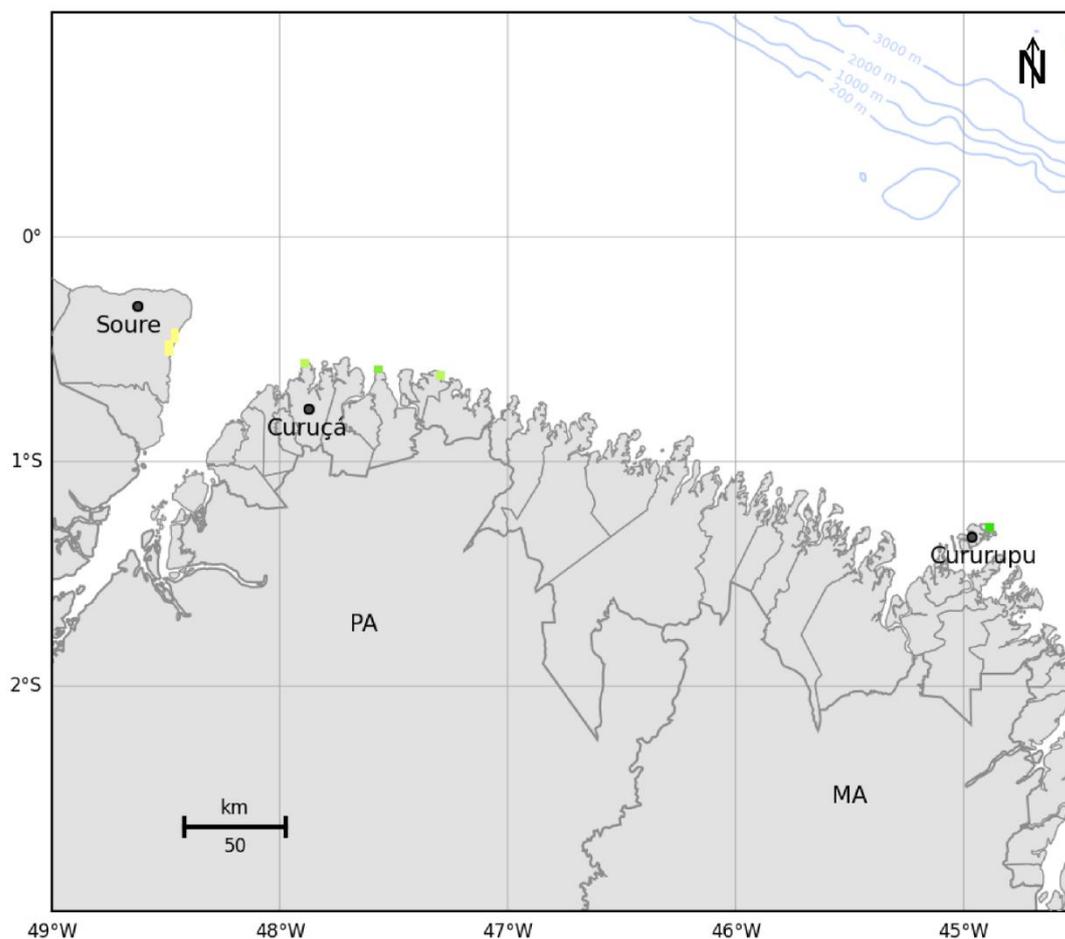


Figura 176: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo na costa, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B). Simulação de 60 dias.

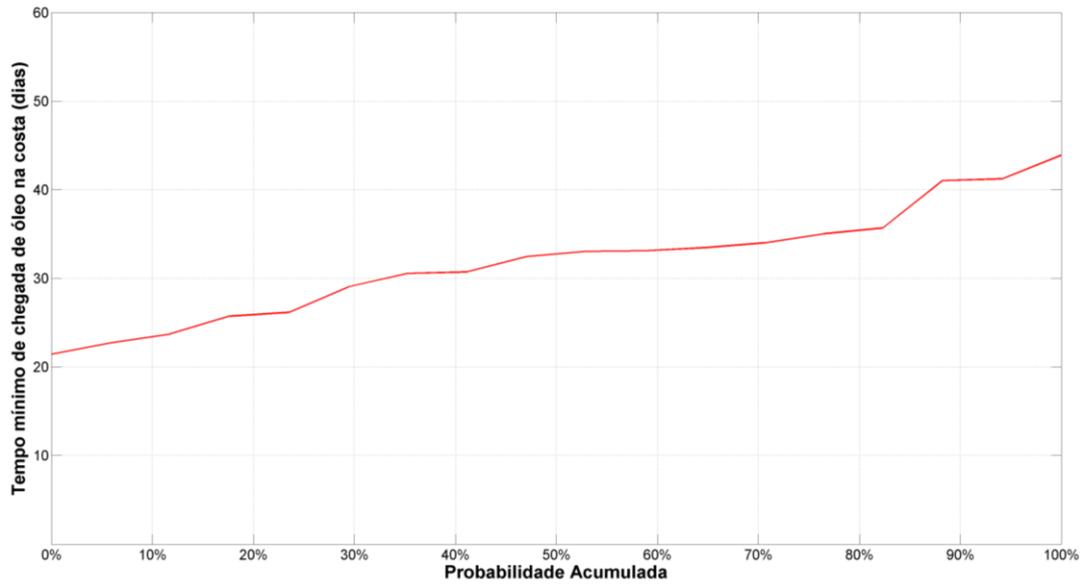


Figura 177: Gráfico de tempo mínimo de chegada de óleo na costa nas simulações em que houve probabilidade de presença de óleo na costa a partir do poço Gaivota (Ponto B).

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Ponto B | Inverno

Volume: 13.307 m³

Massa Máxima de Óleo na Costa (t/km)

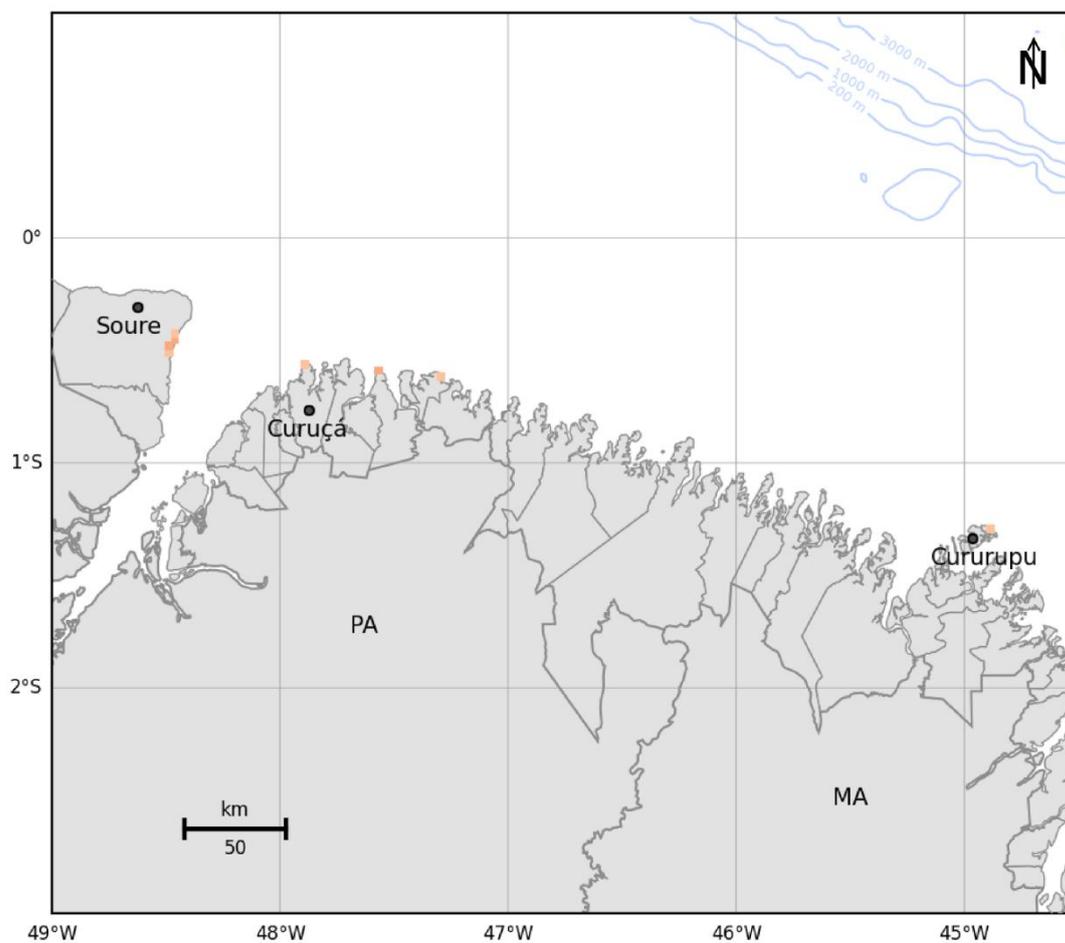


Figura 178: Massa máxima de óleo por célula de costa para o vazamento de pior caso no cenário de verão a partir do poço Gaiivota (Ponto B).

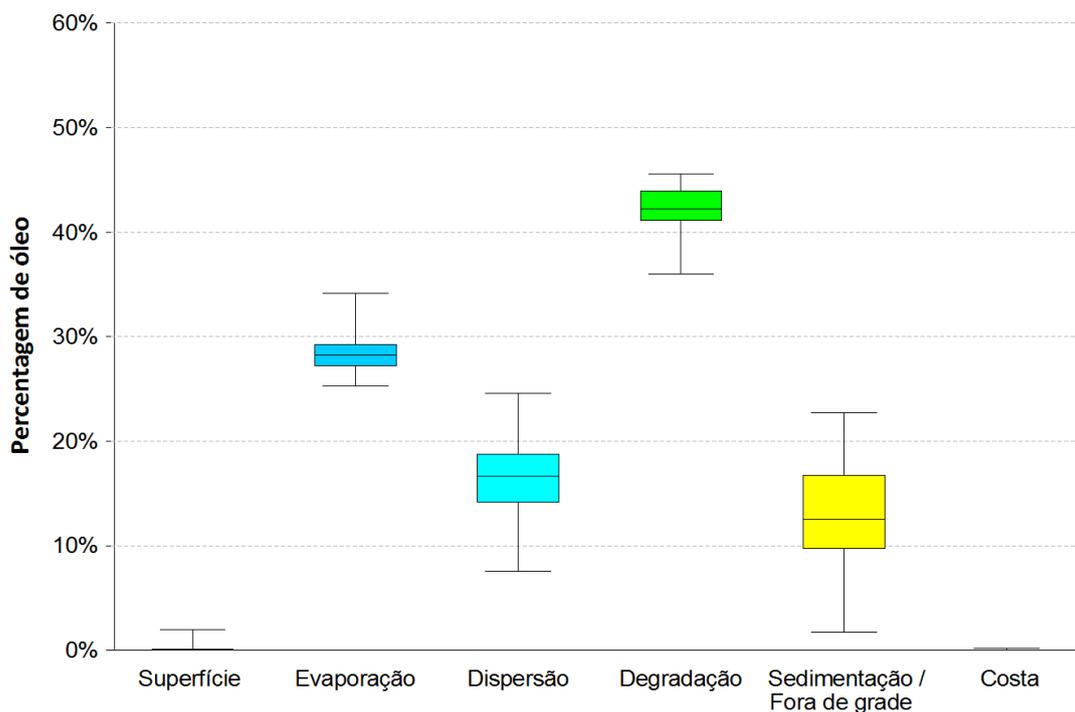


Figura 179: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de pior caso no cenário de inverno a partir do poço Gaivota (Ponto B).

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 intensificação da CNB, que desloca o óleo mais para noroeste, faz com que a quantidade de municípios com probabilidade de chegada de óleo à costa diminua quando comparado com o cenário de verão. A maior probabilidade de toque na costa foi de 0,7% em Soure e Curuçá (PA). O menor tempo de toque foi observado em Cururupu (MA), por ser mais próximo ao local de vazamento. A maior massa de óleo acumulada na costa foi de 1,2 t/km em Soure (Tabela 27).

Na coluna d'água, as probabilidades máximas chegam até 100% próximo ao ponto de vazamento e a área de probabilidade apresenta um padrão de dinâmica semelhante ao observado em superfície, no entanto também se observa a deriva do óleo mais contínua em subsuperfície até a posição do vórtice anticiclônico a norte de 6°N, como também uma deriva do óleo junto a retroflexão da CNB para leste. Entre 2 e 40 metros, a área de probabilidade de presença de óleo maior que 30% alcança uma distância de 215 km, além da região do vórtice. Em camadas mais profundas verifica-se que o óleo permanece em uma área mais restrita, próximo ao ponto de vazamento.

Nos sedimentos, as regiões com probabilidade de chegada de óleo se concentram em três áreas: no entorno do ponto de vazamento, em uma região a aproximadamente 110 km do ponto e outra mais a oeste, em torno de 44,5°W. Estes locais estão principalmente em profundidades menores que 50 metros.

Observa-se que até 360 km do ponto de vazamento o óleo pode chegar em com o tempo mínimo de 3 dias. Já para região do vórtice ao norte do domínio do modelo, o óleo pode chegar com o tempo mínimo de 30 dias.

No que tange as unidades de conservação costeiras, a maior probabilidade (0,7%) e a maior massa (1,17 t/km) ocorreram na APA do Arquipélago de Marajó, enquanto o menor tempo (39,17 dias (940 horas)) foi observado na APA de Algodoal-Maiandeuá (Tabela 29). Em relação aos resultados das modelagens probabilísticas nas unidades de conservação marinhas (Tabela 28) ressalta-se que estes devem ser vistos de maneira diferenciada em relação aos resultados na costa. Isto porque, em áreas marinhas, os resultados da modelagem representam a passagem da mancha de óleo, não representando um acúmulo e sim, um possível contato com óleo de caráter transitório.

Semelhante ao verão, os maiores valores medianos dos processos do óleo foram nessa ordem: degradação (43%), evaporação (28%), dispersão (17%) e sedimentação (13%). Enquanto a degradação e a evaporação apresentaram variação de seus extremos de até 9%, a dispersão e sedimentação apresentaram variação de até 20%. O óleo na superfície ao fim de 60 dias foi inferior a 2% e na costa inferior a 1% em todas as simulações.

Tabela 27: Extensão de toque, massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um derrame de grande volume (13.307 m³) a partir do poço Gaivota (Ponto B), nos cenários de verão e inverno.

UF	MUNICÍPIOS	Extensão (km)		Massa Máxima (t/km)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo (horas)	
		VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
PA	Soure	-	17,0	-	1,2	-	0,7	-	1231
	São Caetano de Odivelas	-	**	-	**	-	1,3	-	1107
	Curuçá	-	4,2	-	0,7	-	0,7	-	1181
	Marapanim	-	**	-	**	-	4,3	-	880
	Maracanã	-	4,2	-	1,1	-	0,3	-	940
	Salinópolis	8,5	4,2	0,7	0,6	0,3	0,3	1115	1043
	São João de Pirabas	8,5	-	1,1	-	1,3	-	1033	-
	Quatipuru	4,2	-	2,5	-	1,3	-	779	-
	Tracuateua	4,2	-	0,6	-	0,3	-	845	-
	Bragança	8,5	-	1,9	-	2,7	-	719	-
	Augusto Corrêa	8,5	-	4,2	-	4,7	-	705	-
Viseu	25,5	-	3,8	-	3,7	-	583	-	
MA	Carutapera	17,0	-	1,4	-	2,7	-	518	-
	Luís Domingues	4,2	-	1,0	-	0,3	-	1239	-
	Godofredo Viana	8,5	-	1,3	-	3,7	-	589	-
	Cândido Mendes	8,5	-	0,9	-	2,7	-	646	-
	Cururupu	38,2	4,2	1,9	0,6	2,3	0,3	446	580
	Porto Rico do Maranhão	4,2	-	0,6	-	0,3	-	700	-
	Cedral	**	-	**	-	0,7	-	765	-
	Guimarães	21,2	-	0,8	-	1,0	-	725	-
	Alcântara	4,2	-	0,8	-	0,3	-	930	-
	São Luís	**	-	**	-	0,7	-	978	-
	Humberto de Campos	12,7	-	1,4	-	2,3	-	508	-
	Primeira Cruz	4,2	-	0,9	-	0,7	-	475	-
	Santo Amaro do Maranhão	38,2	-	6,6	-	19,4	-	264	-
	Barreirinhas	33,9	-	3,2	-	12,4	-	290	-
	Paulino Neves	17,0	-	2,6	-	8,7	-	305	-
	Tutóia	12,7	-	1,1	-	0,7	-	404	-
Araioses	17,0	-	1,2	-	1,3	-	374	-	
PI	Ilha Grande	8,5	-	1,3	-	2,3	-	287	-
	Parnaíba	12,7	-	1,3	-	2,3	-	287	-
	Luís Correia	4,2	-	2,4	-	0,3	-	738	-
	Cajueiro da Praia	**	-	**	-	0,3	-	737	-
CE	Barroquinha	**	-	**	-	0,3	-	732	-

* Valores em negrito são os resultados da grade de costa. Os valores que não estão em negrito são retirados dos resultados em superfície para localidades que não apresentaram massa acumulada na costa acima do limiar monitorado, mas estão a uma distância de menos de 3 km (um ponto de grade) da costa. Este procedimento é uma solicitação do IBAMA.

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

Tabela 28: Massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas Unidades de Conservação marinhas com possibilidade de serem atingidas em um derrame de grande volume (13.307 m³) a partir do poço Gaivota (Ponto B), nos cenários de verão e inverno.

Unidade de Conservação	Massa Máxima (t/km ²)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo (horas)	
	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
RESEX Marinha Caeté-taperaçu	0,25	-	3,0	-	964	-
RESEX Marinha Tracuateua	0,22	-	2,7	-	942	-
RESEX Mãe Grande de Curuçá	-	0,25	-	3,0	-	929
RESEX Maracanã	-	0,21	-	2,0	-	1027
RESEX Marinha de Gurupi-Piriá	0,30	-	5,4	-	585	-
APA de Upaon-Açu/Miritiba/Alto-Preguiças	0,25	-	3,3	-	405	-
APA Delta do Parnaíba	0,29	-	9,0	-	232	-
APA das Reentrâncias Maranhenses	0,59	0,58	10,4	12,0	283	233
RESEX Marinha de Soure	-	0,28	-	1,0	-	1311
RESEX de Cururupu	0,23	0,27	2,0	0,3	456	556
APA da Baixada Maranhense	0,13	-	0,3	-	994	-
PEM do Parcel de Manuel Luís	0,95	1,21	8,4	20,7	268	164
PEM do Banco do Álvaro	0,14	0,87	0,3	28,7	711	186
PEM do Banco do Tarol	0,82	0,67	11,4	21,0	308	210
APA da Costa de Urumajó	0,28	-	3,0	-	868	-
APA Jabotitua-Jatium	0,26	-	5,7	-	573	-
RESEX Marinha Arai-Peroba	0,28	-	2,7	-	1069	-
APA da Ilha do Canela	0,19	-	1,0	-	983	-
RESEX Marinha Mestre Lucindo	-	0,29	-	4,3	-	880

* Esses valores representam a passagem do óleo na superfície por essas regiões, não representando um acúmulo.

Tabela 29: Massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas Unidades de Conservação costeiras com possibilidade de serem atingidas em um derrame de grande volume (13.307 m³) a partir do poço Gaivota (Ponto B), nos cenários de verão e inverno.

Unidade de Conservação	Massa Máxima (t/km)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo (horas)	
	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
PARNA dos Lençóis Maranhenses	6,65	-	19,4	-	264	-
APA do Arquipélago de Marajó	-	1,17	-	0,7	-	1231
APA de Algodual-Maiandeuá	-	1,13	-	0,3	-	940
APA da Foz do Rio Preguiças - Pequenos Lençóis - Região Lagunar Adjacente	2,58	-	8,7	-	290	-
RESEX Marinha do Delta do Parnaíba	1,19	-	0,3	-	502	-

3.2.1.3 Integração dos resultados

3.2.1.3.1 Vazamento de 8 m³

3.2.1.3.1.1 Verão

A seguir são apresentados os resultados integrados dos poços Pinguim e Gaivota para probabilidade de presença de óleo e tempo mínimo de chegada ao final das simulações para o vazamento de 8 m³ no período de verão.

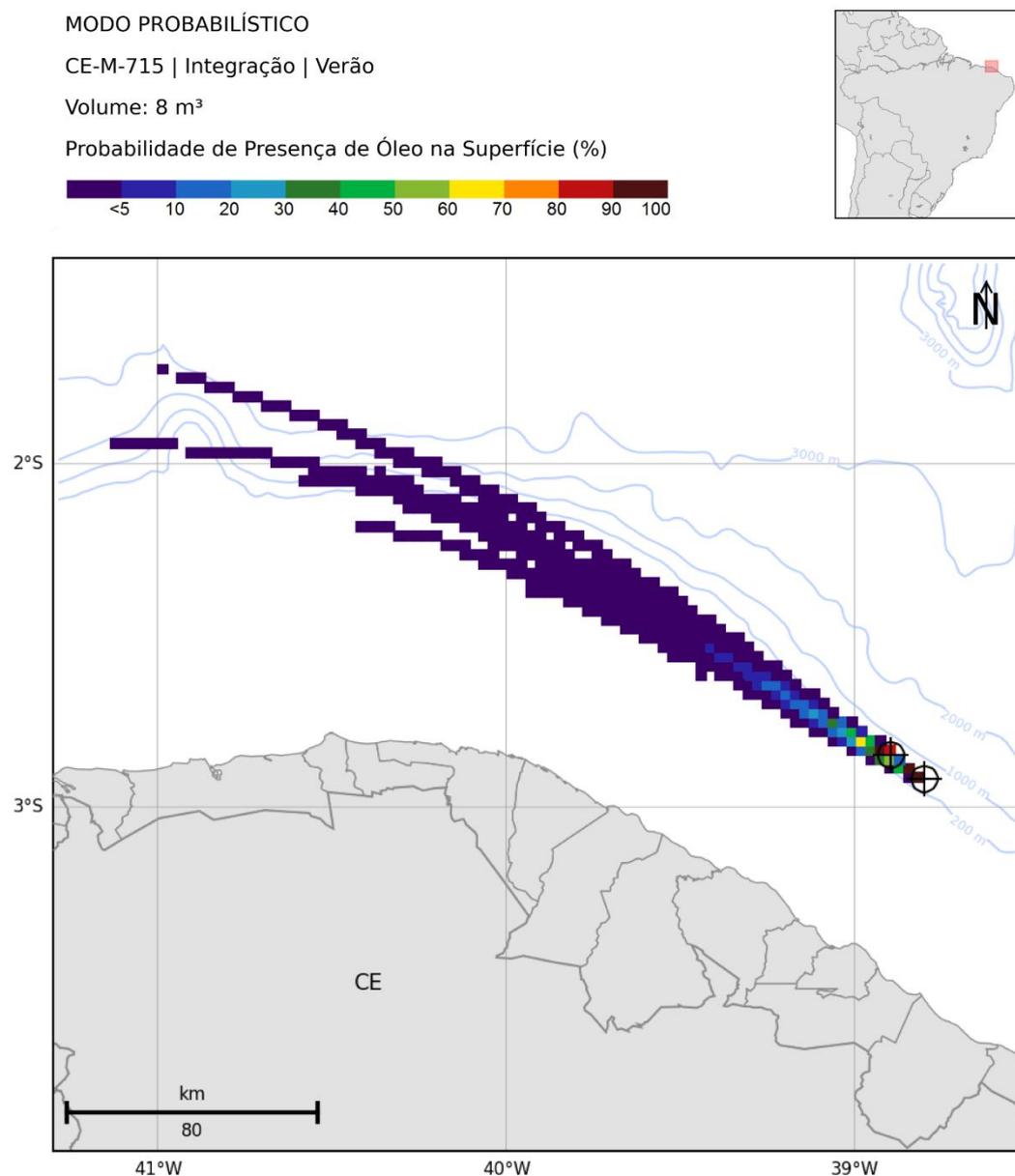


Figura 180: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m³ no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).

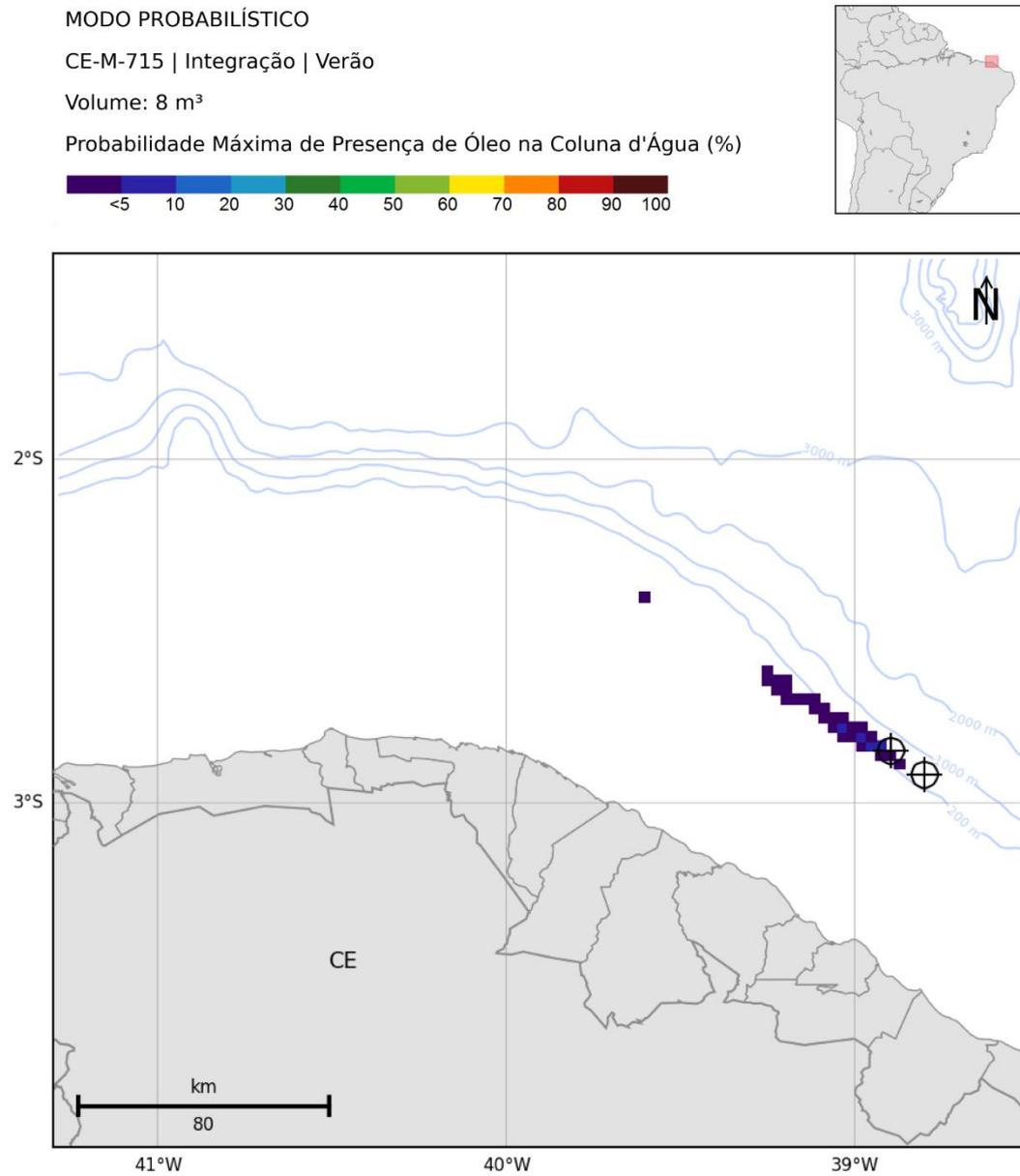


Figura 181: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 8 m³ no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaiivota. Simulação de 720 horas (30 dias).

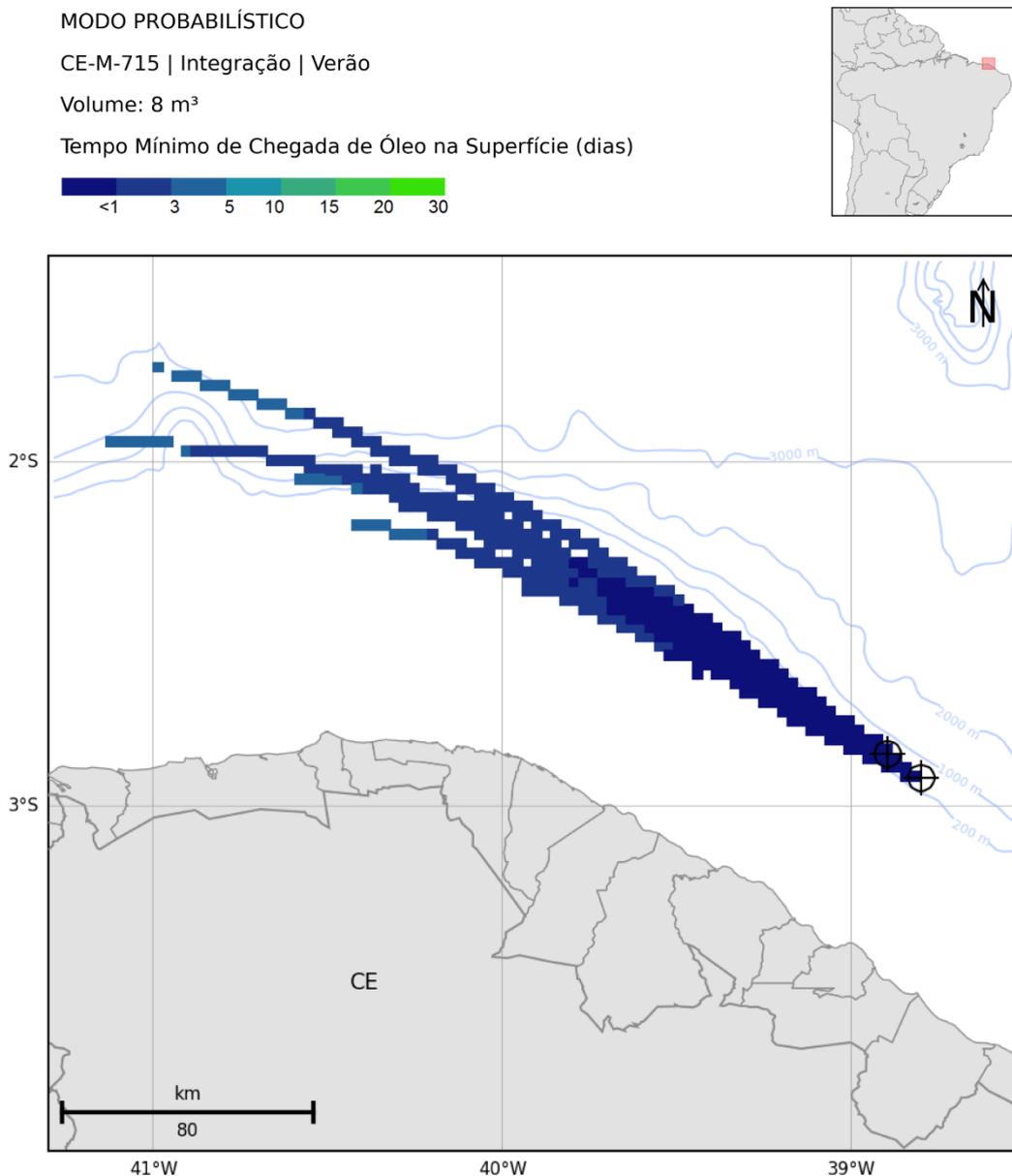


Figura 182: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m³ no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).

3.2.1.3.1.2 Inverno

A seguir são apresentados os resultados integrados dos poços Pinguim e Gaivota para probabilidade de presença de óleo e tempo mínimo de chegada ao final das simulações para o vazamento de 8 m³ no período de inverno.

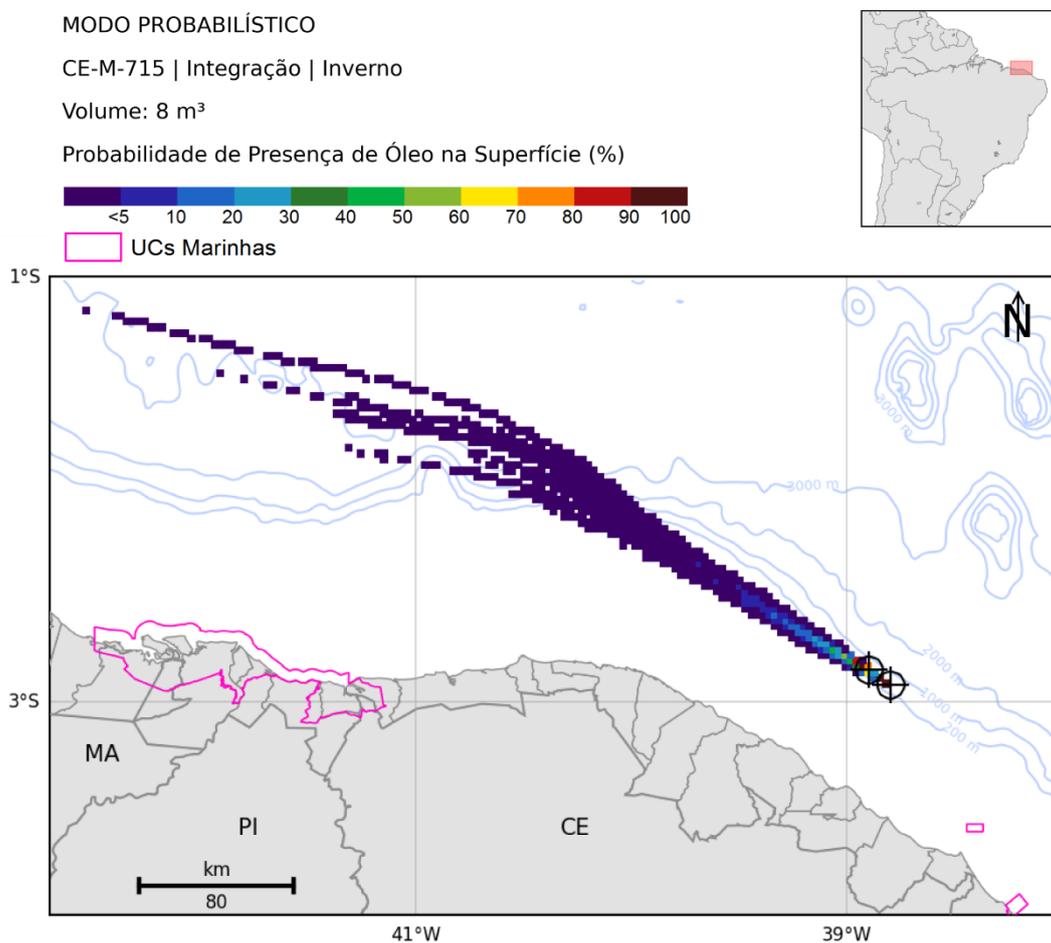


Figura 183: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para vazamento de 8 m³ no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).

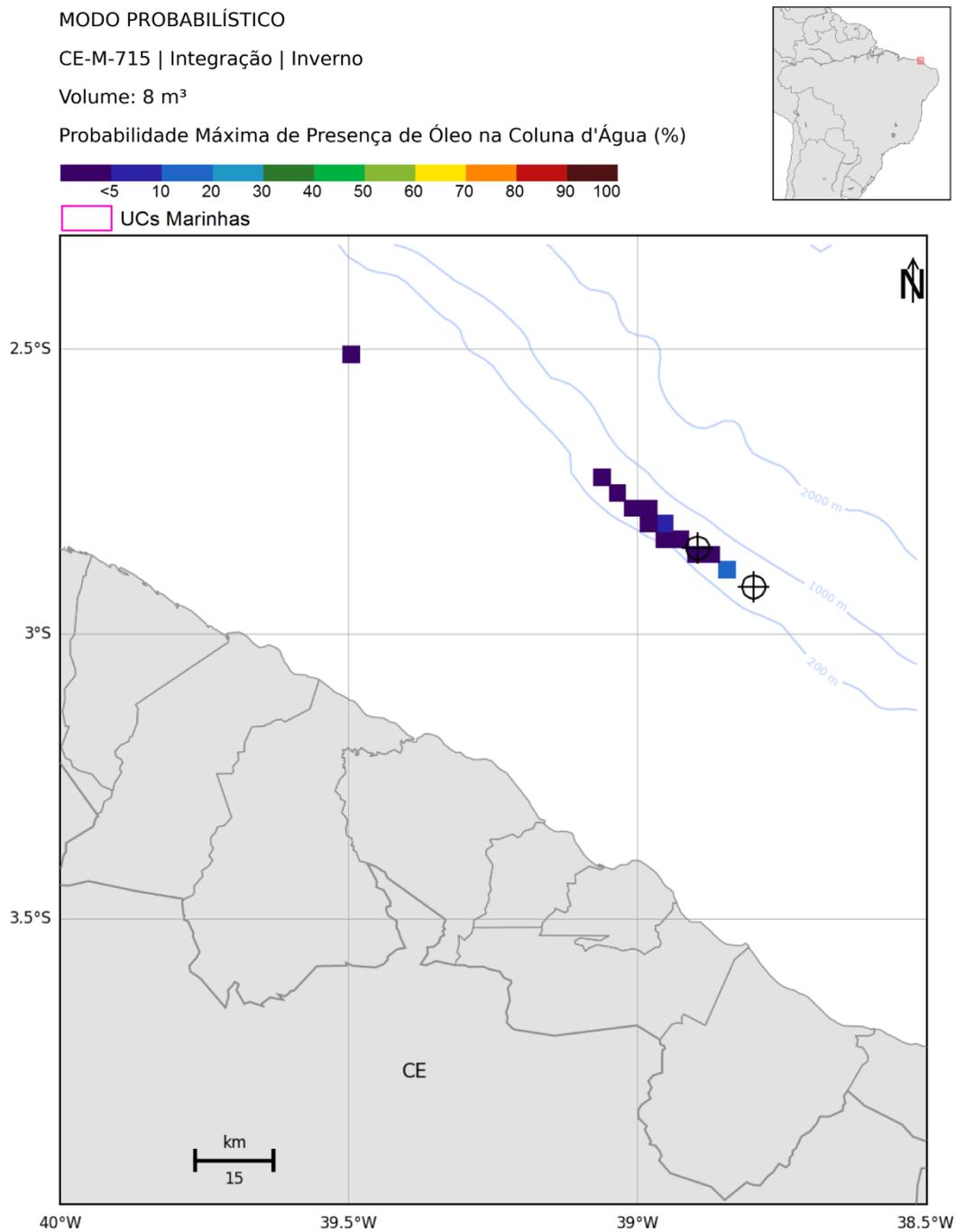


Figura 184: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 8 m³ no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).

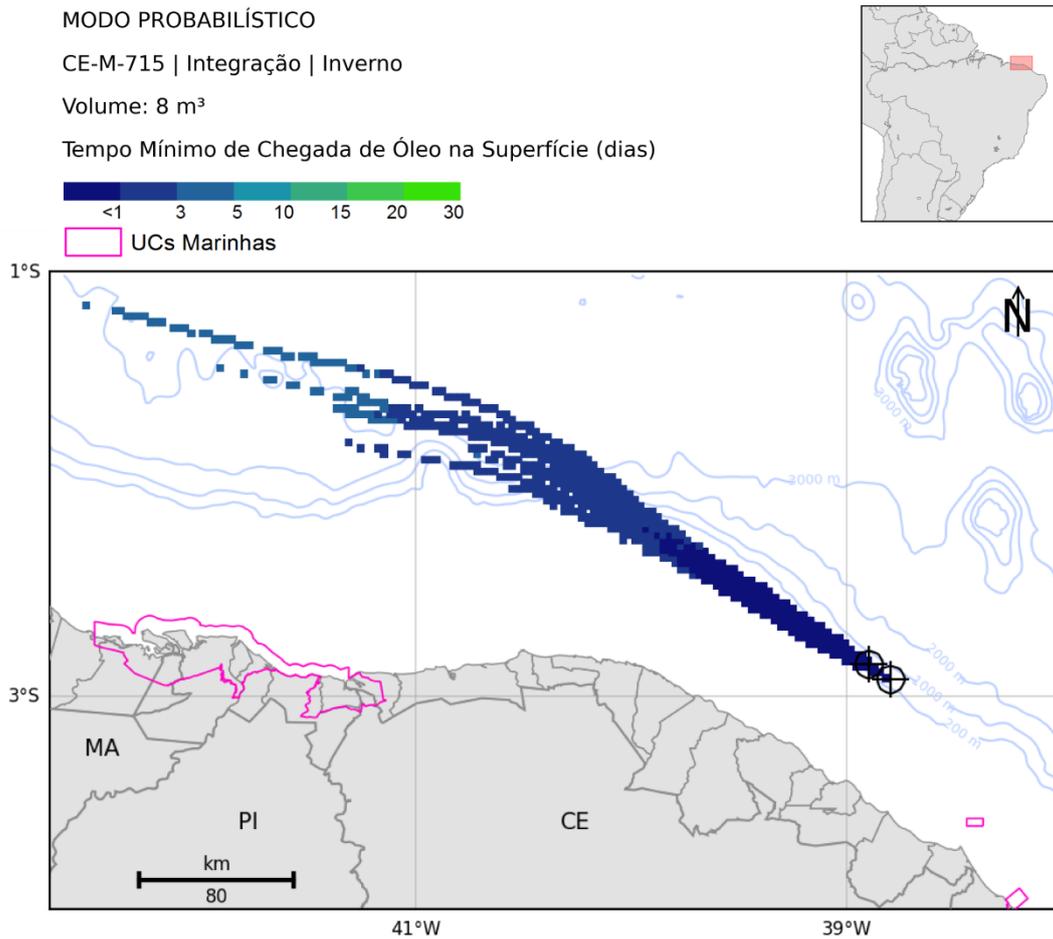


Figura 185: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 8 m³ no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).

3.2.1.3.2 Vazamento de 200 m³

3.2.1.3.2.1 Verão

A seguir são apresentados os resultados integrados dos poços Pinguim e Gaivota para probabilidade de presença de óleo e tempo mínimo de chegada ao final das simulações para o vazamento de médio porte (200 m³) no período de verão.

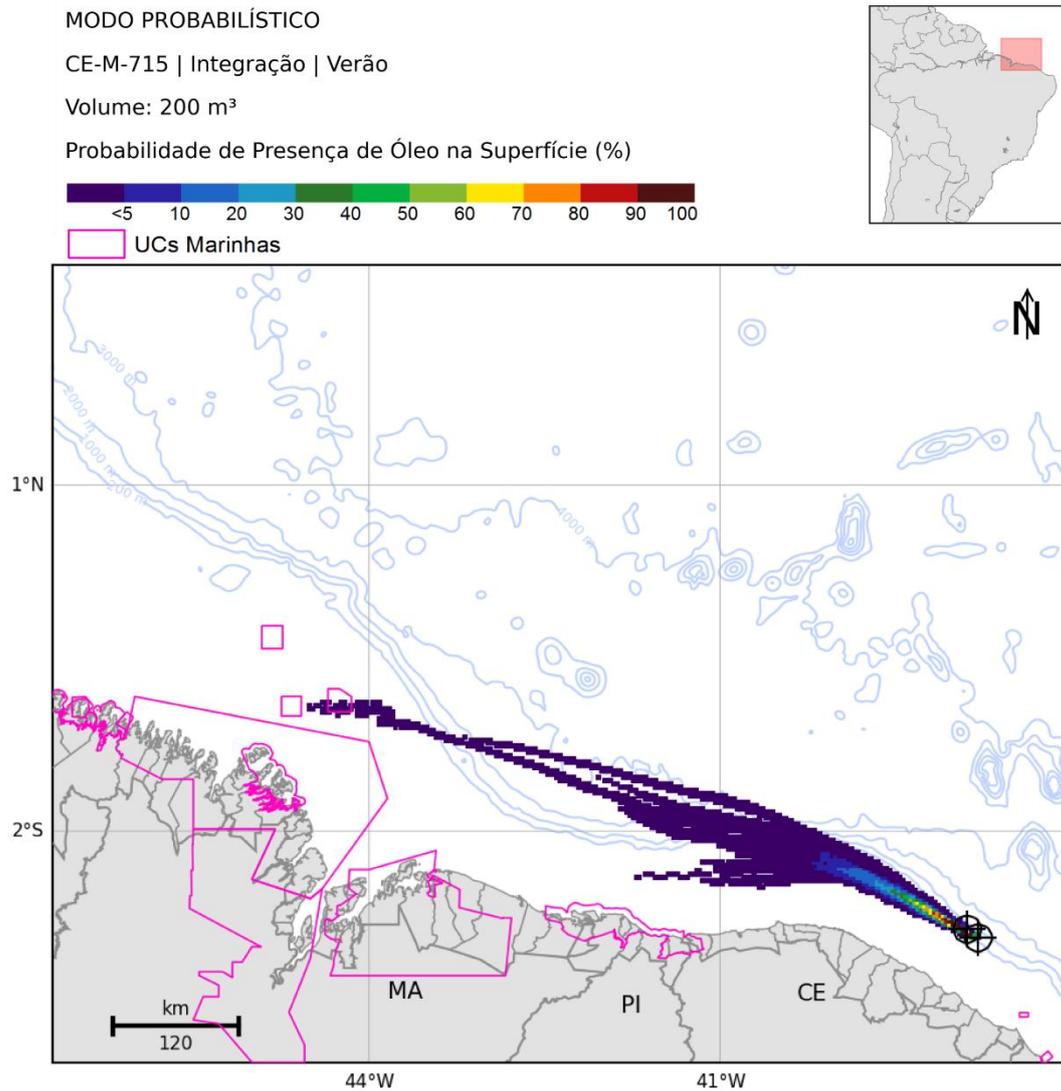


Figura 186: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m³ no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaiivota. Simulação de 720 horas (30 dias).

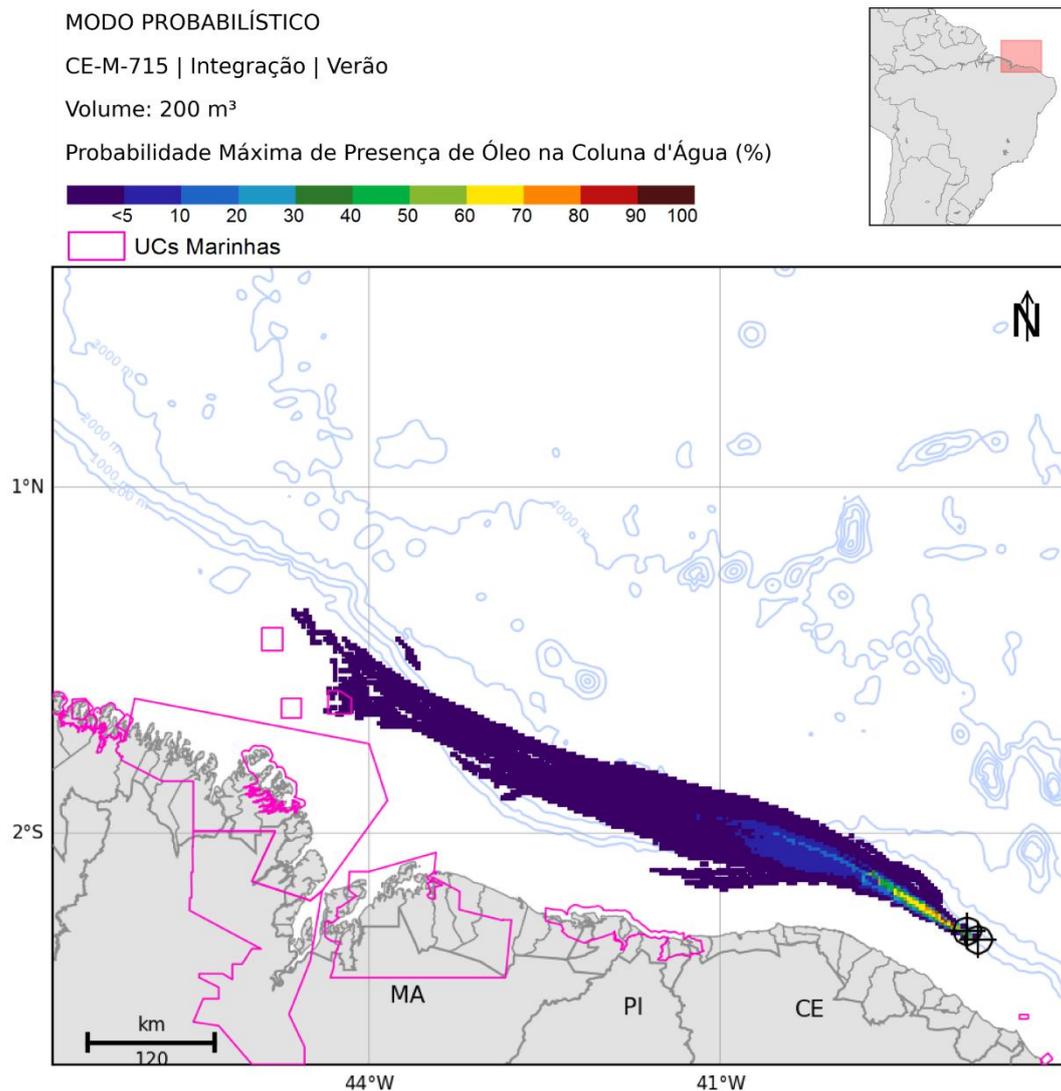


Figura 187: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 200 m³ no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).

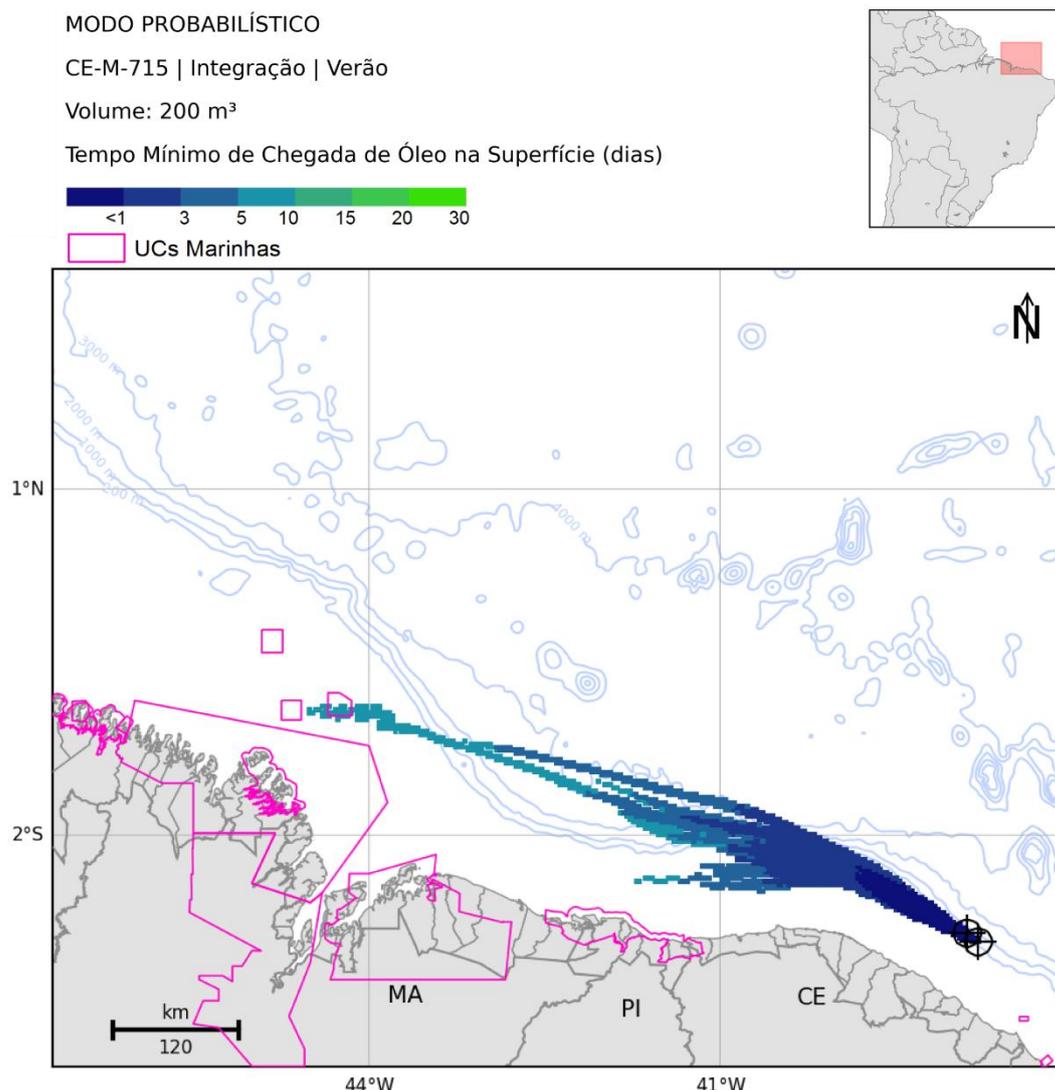


Figura 188: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para vazamento de 200 m³ no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaiivota. Simulação de 720 horas (30 dias).

3.2.1.3.2.2 Inverno

A seguir são apresentados os resultados integrados dos poços Pinguim e Gaiivota para probabilidade de presença de óleo e tempo mínimo de chegada ao final das simulações para o vazamento de médio porte (200 m³) no período de inverno. Ao final é apresentada tabela com estes resultados para as unidades de conservação marinhas para os dois períodos sazonais.

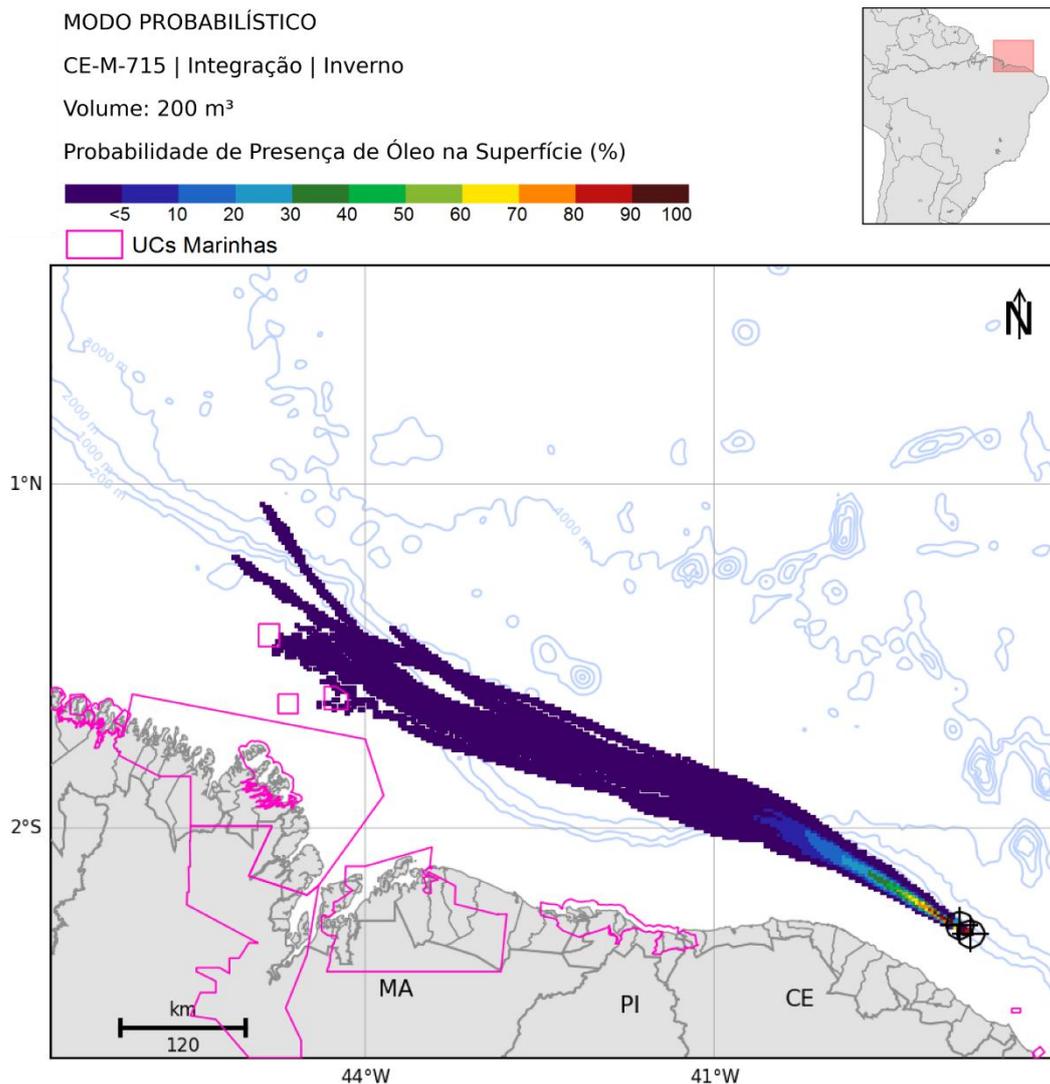


Figura 189: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para vazamento de 200 m³ no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).

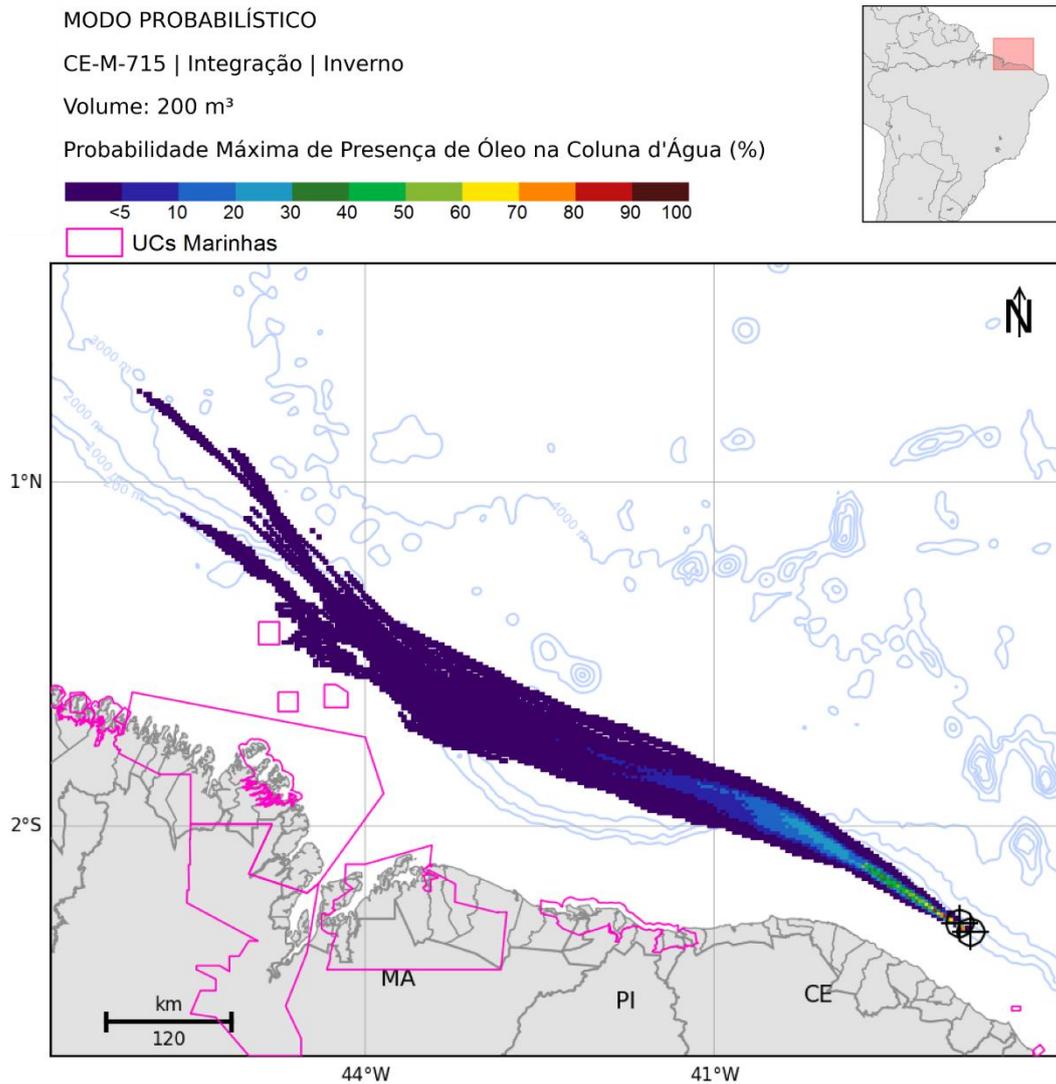


Figura 190: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para vazamento de 200 m³ no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Integração | Inverno

Volume: 200 m³

Tempo Mínimo de Chegada de Óleo na Superfície (dias)



UCs Marinhas

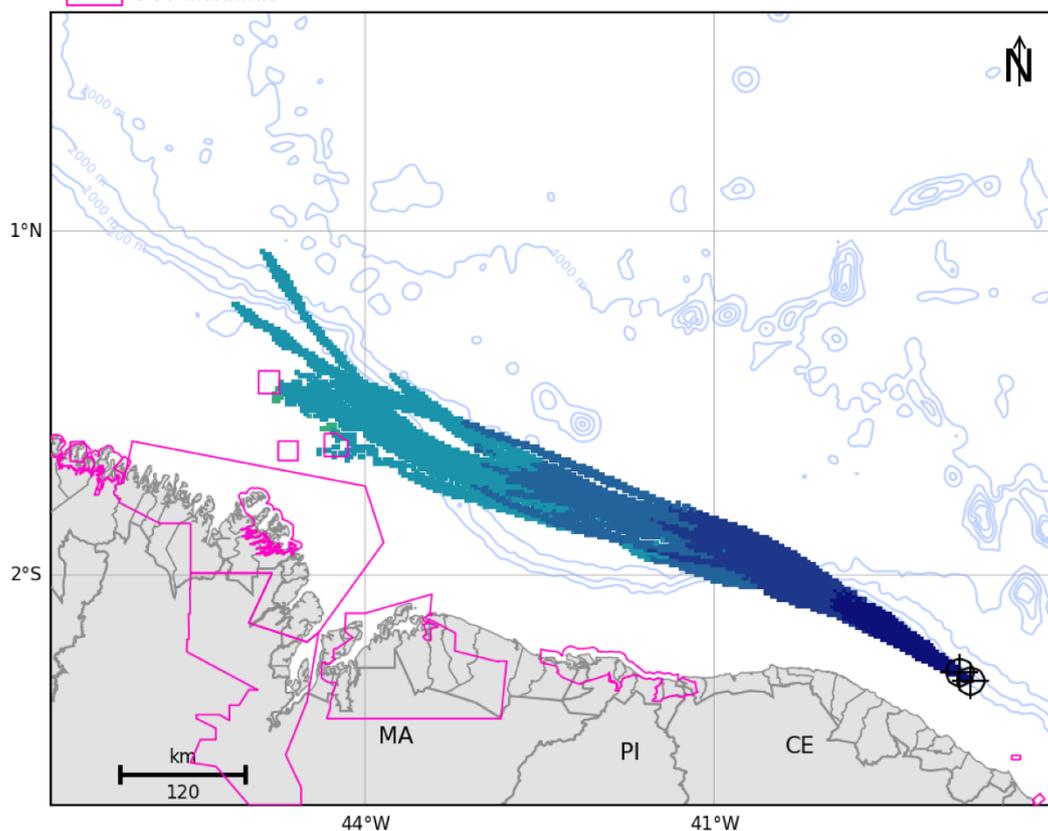


Figura 191: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para vazamento de 200 m³, no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 720 horas (30 dias).

Tabela 30: 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 dos poços Pinguim e Gaivota, nos cenários de verão e inverno.

Unidade de Conservação	Massa Máxima (t/km ²)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo (horas)	
	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
PEM do Parcel de Manuel Luís	0,60*	0,24*	0,3	0,3	194	167
PEM do Banco do Álvaro	-	0,24*	-	0,7	-	197

* Esses valores representam a passagem do óleo na superfície por essas regiões, não representando um acúmulo.

3.2.1.3.3 Vazamento de Pior Caso

3.2.1.3.3.1 Verão

A seguir são apresentados os resultados integrados dos poços Pinguim e Gaivota para probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada e massa máxima na costa ao final das simulações para o vazamento de pior caso (13.307 m³) no período de verão.

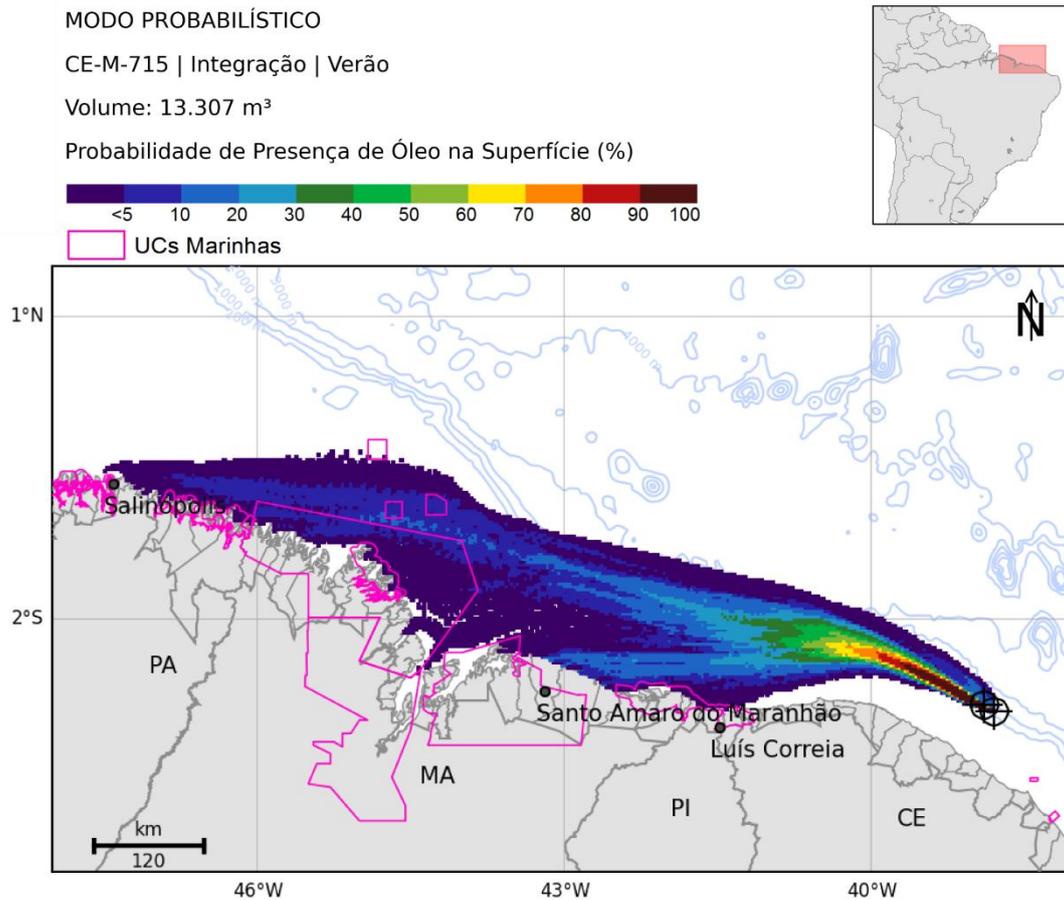


Figura 192: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.

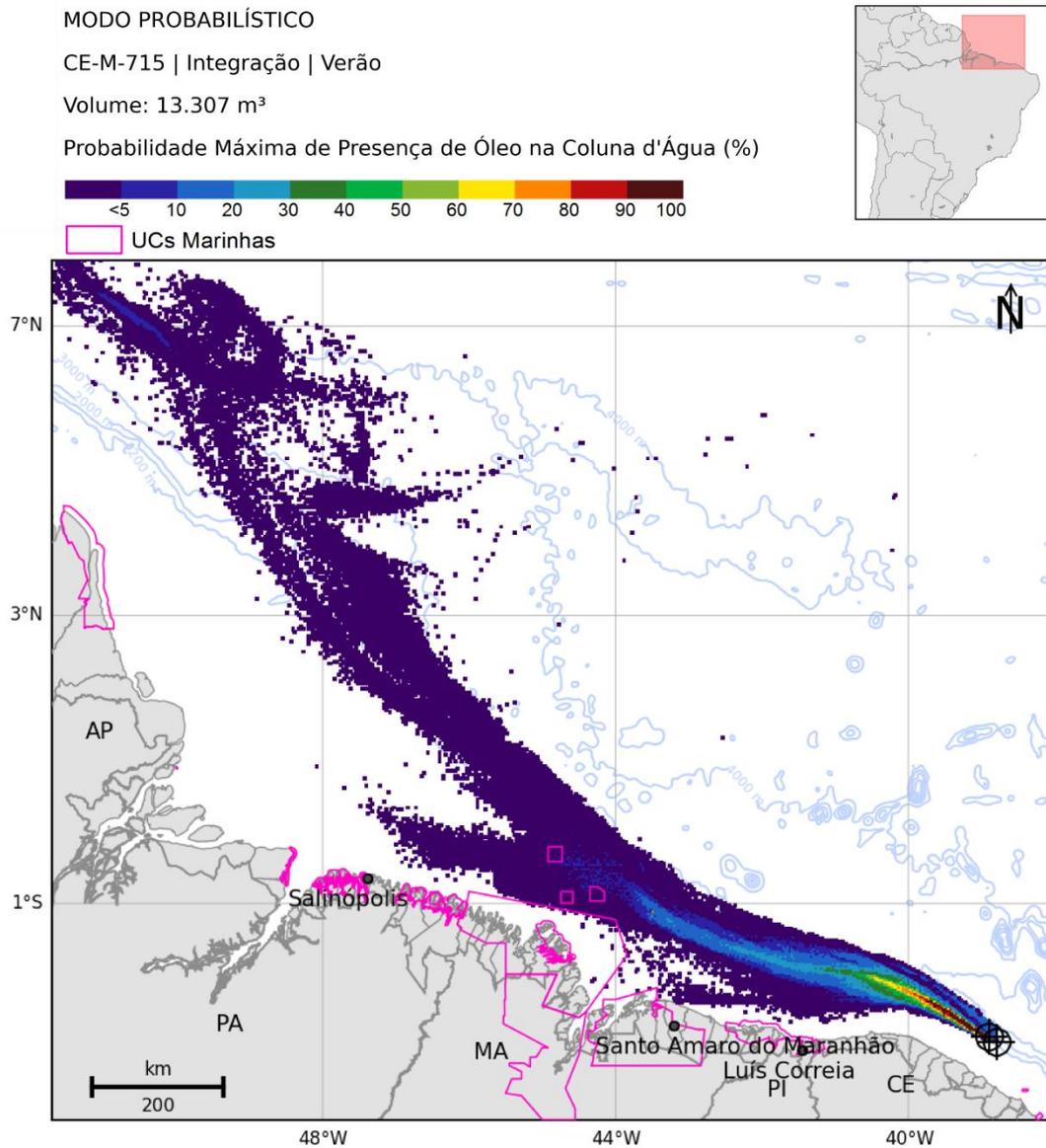


Figura 193: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Integração | Verão

Volume: 13.307 m³

Probabilidade de Presença de Óleo na Costa (%)

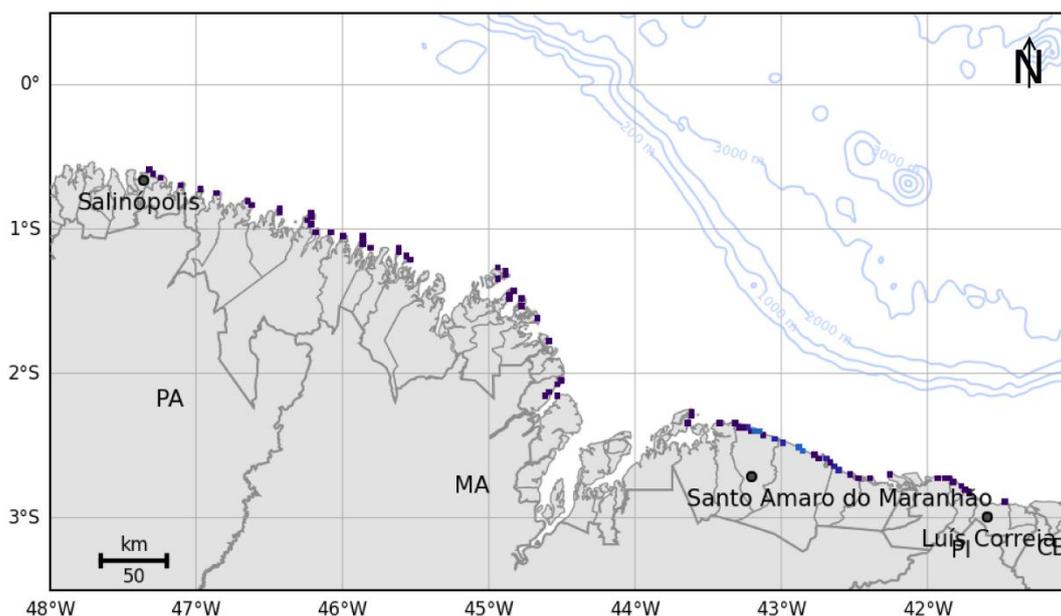
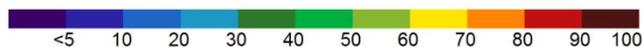


Figura 194: Mapa de probabilidade de presença de óleo na costa, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaiivota. Simulação de 60 dias.

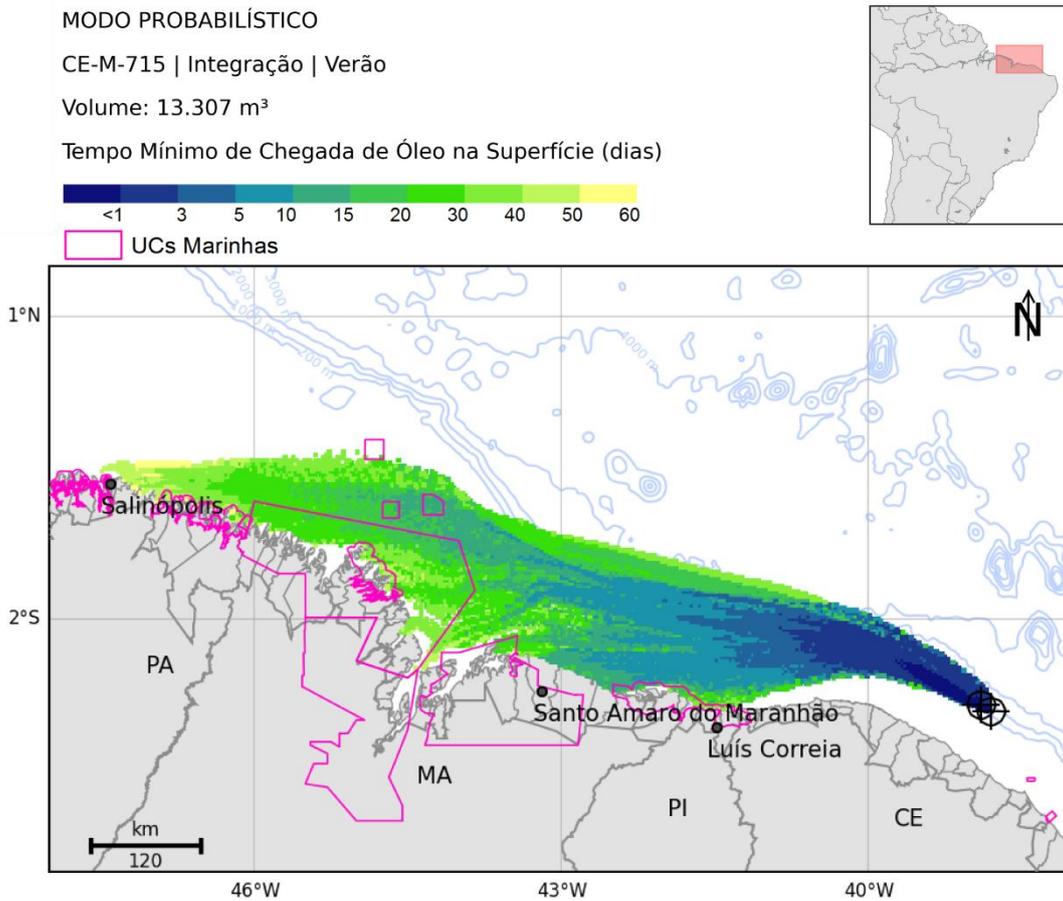


Figura 195: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para um vazamento de *blowout* contínuo de 30 dias no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Integração | Verão

Volume: 13.307 m³

Tempo Mínimo de Chegada de Óleo na Costa (dias)

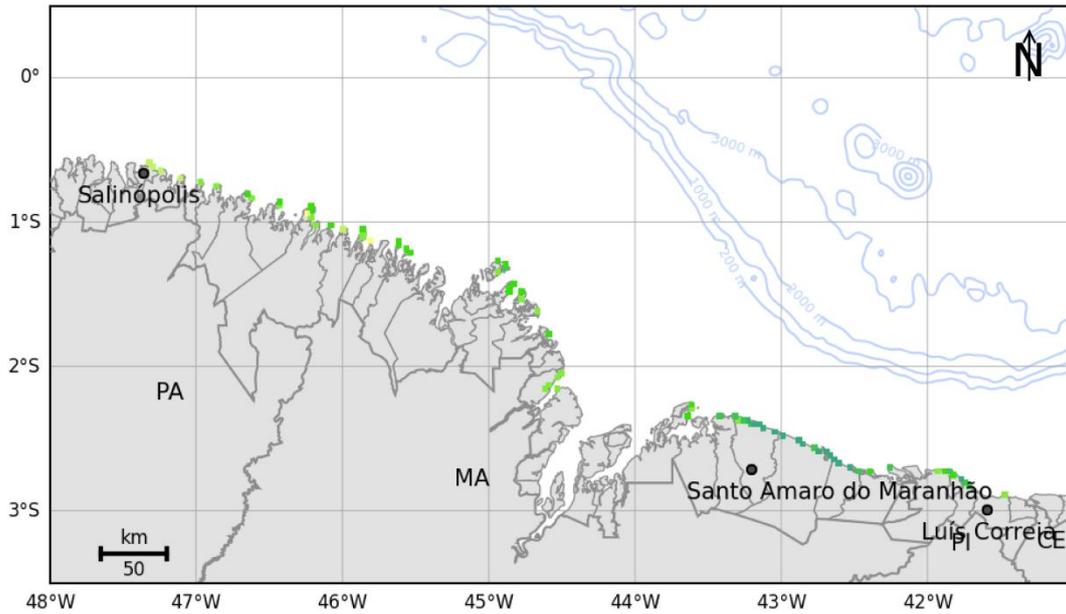
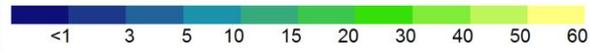


Figura 196: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo na costa para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Integração | Verão

Volume: 13.307 m³

Massa Máxima de Óleo na Costa (t/km)

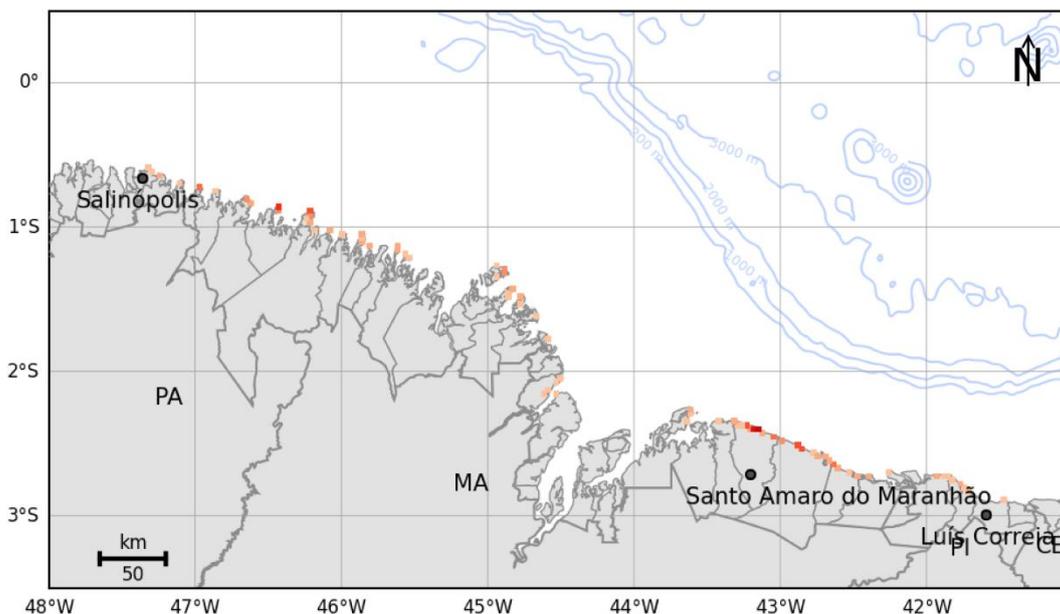


Figura 197: Massa máxima de óleo por célula de costa para o vazamento de pior caso no cenário de verão. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.

3.2.1.3.3.2 Inverno

A seguir são apresentados os resultados integrados dos poços Pinguim e Gaivota para probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada e massa máxima na costa ao final das simulações para o vazamento de pior caso (13.307 m³) no período de inverno. Ao final são apresentadas tabelas com estes resultados para os municípios, as unidades de conservação marinhas e costeiras para os dois períodos sazonais.

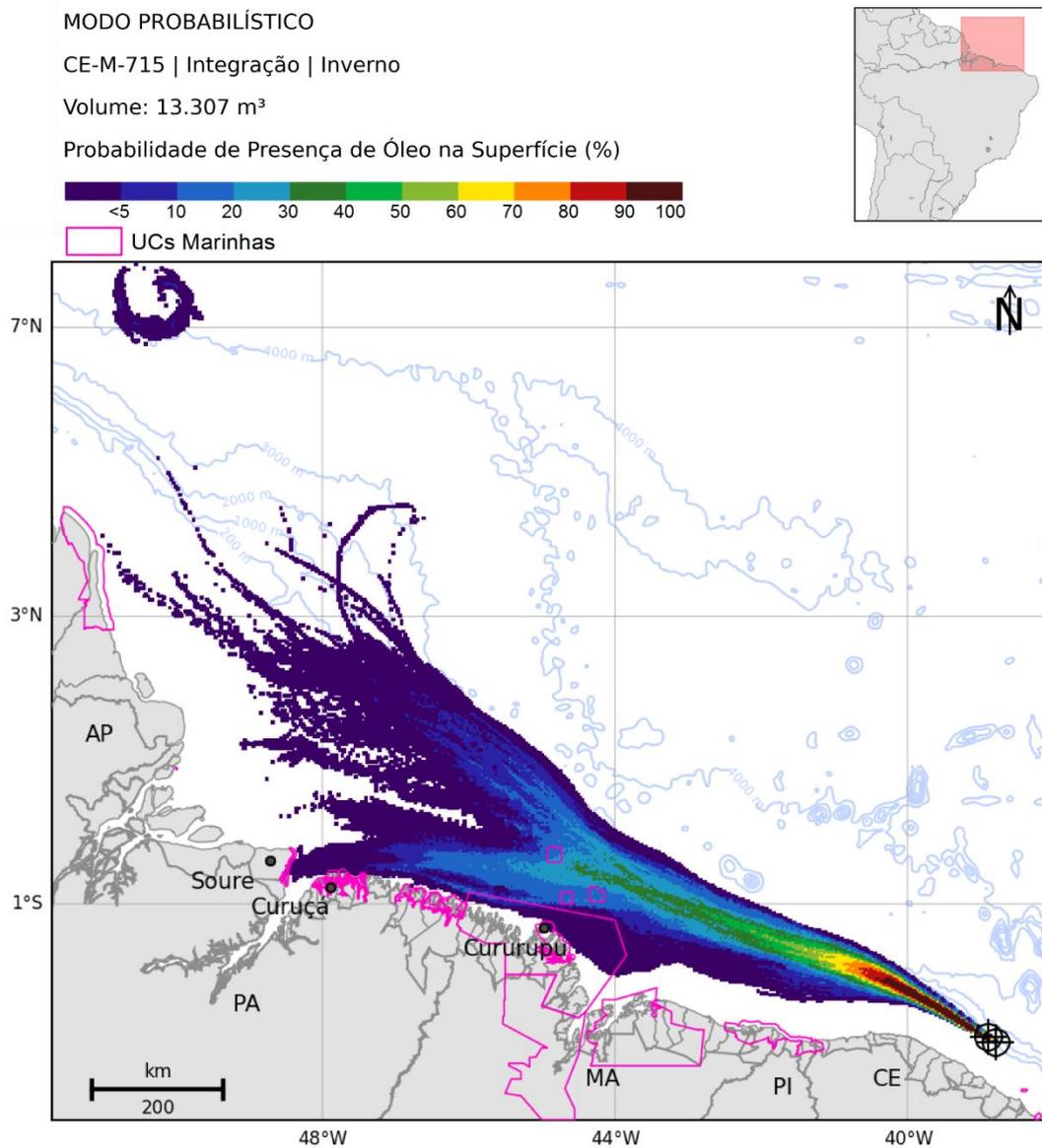


Figura 198: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.

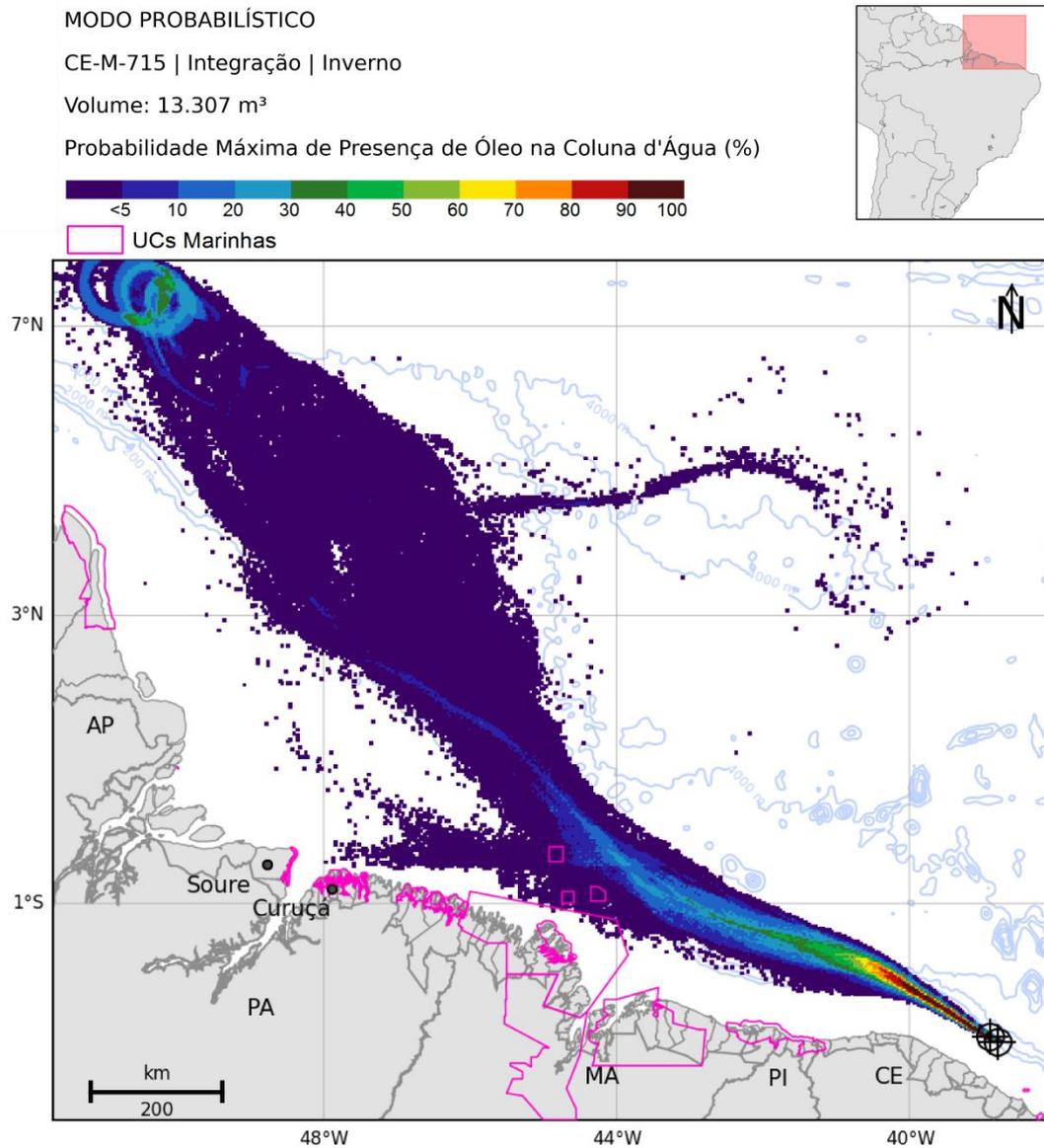


Figura 199: Mapa de probabilidade de presença de óleo na coluna d'água, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Integração | Inverno

Volume: 13.307 m³

Probabilidade de Presença de Óleo na Costa (%)

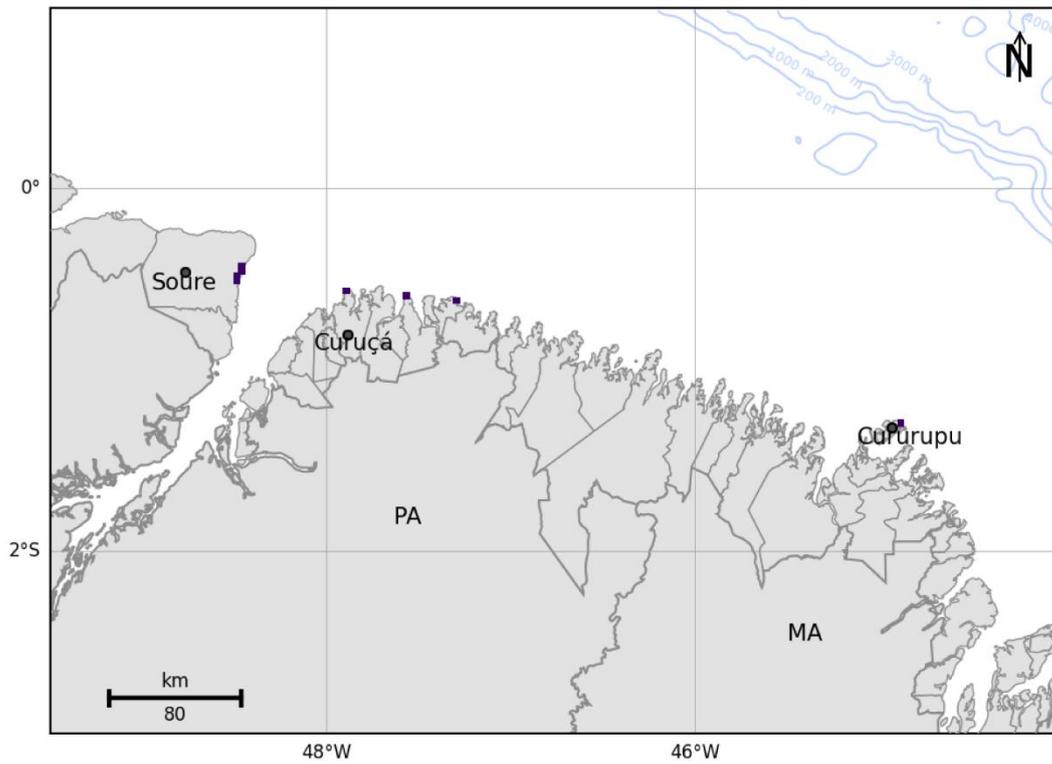
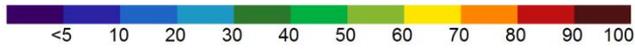


Figura 200: Mapa de probabilidade de presença de óleo na costa, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.

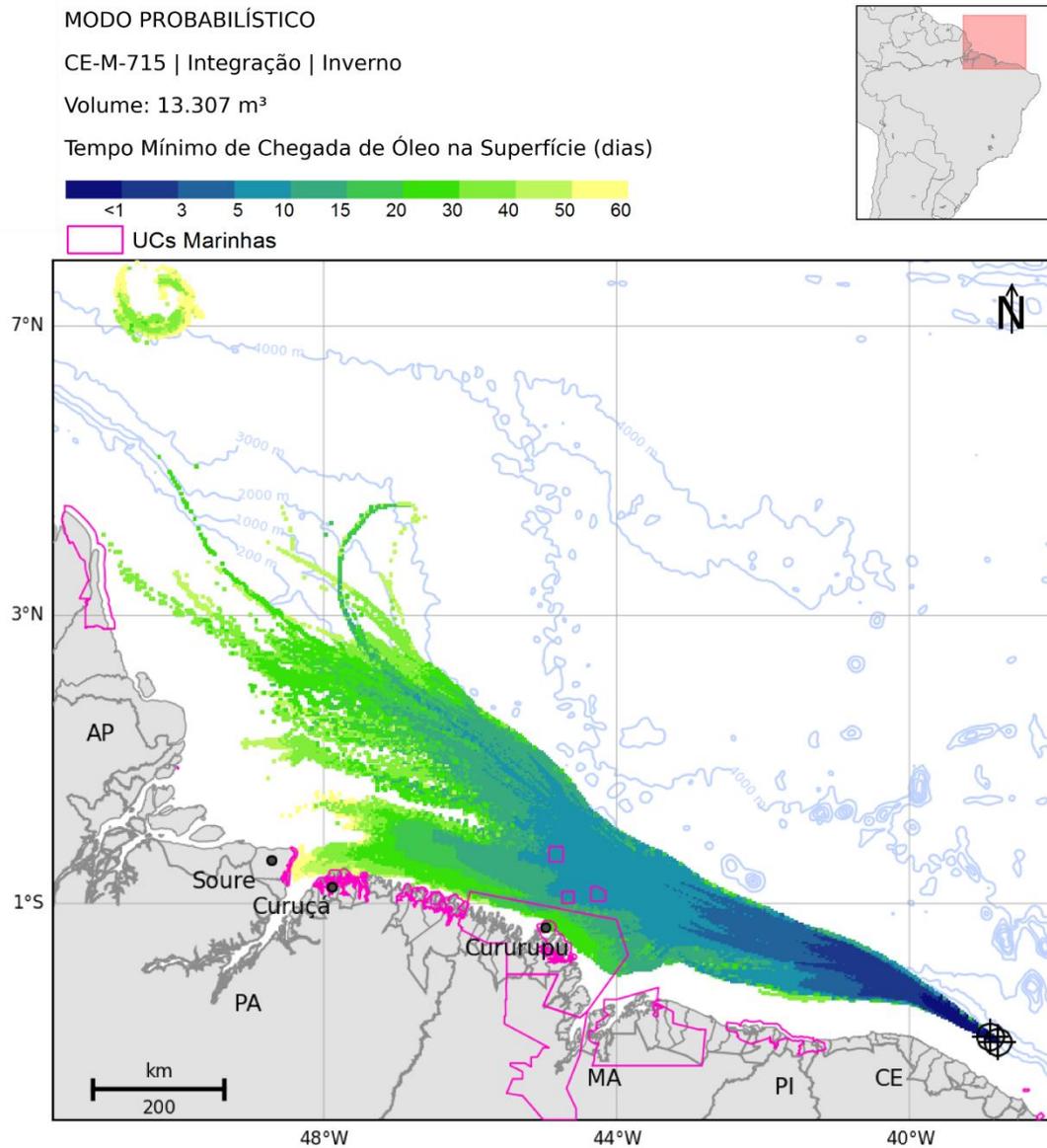


Figura 201: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo em superfície, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Integração | Inverno

Volume: 13.307 m³

Tempo Mínimo de Chegada de Óleo na Costa (dias)

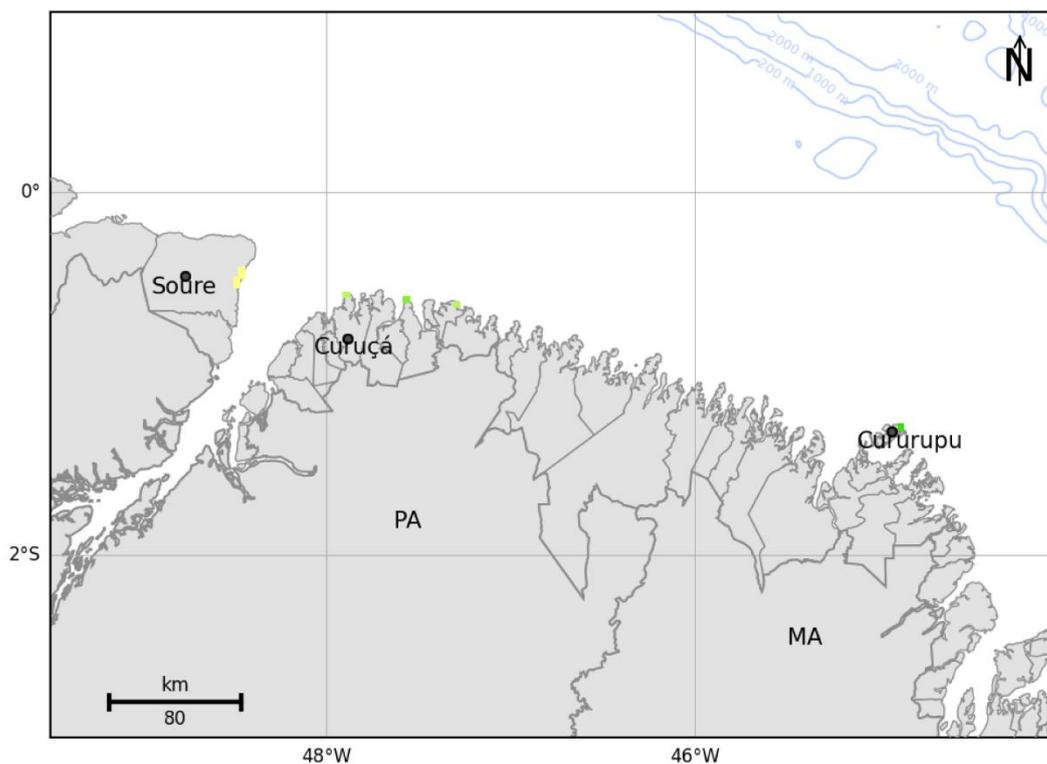
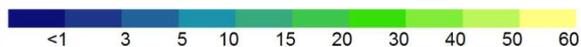


Figura 202: Mapa de tempo mínimo de chegada de óleo na costa, para um vazamento de *blowout* de 30 dias no período de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

CE-M-715 | Integração | Inverno

Volume: 13.307 m³

Massa Máxima de Óleo na Costa (t/km)

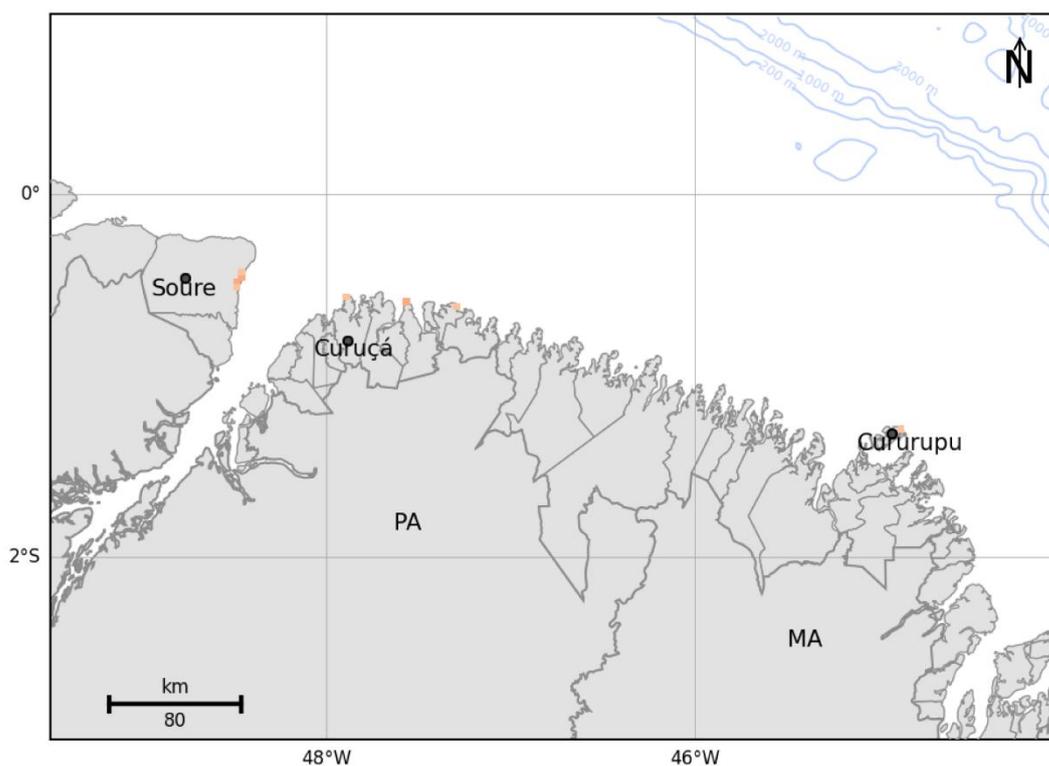


Figura 203: Massa máxima de óleo por célula de costa para o vazamento de pior caso no cenário de inverno. Integração dos resultados dos poços Pinguim e Gaivota. Simulação de 60 dias.

Tabela 31: Extensão de toque, massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um derrame de grande volume (13.307 m³) considerando os vazamentos a partir dos poços Pinguim e Gaiota, nos cenários de verão e inverno.

UF	MUNICÍPIOS	Extensão (km)		Massa Máxima (t/km)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo (horas)	
		VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
PA	Soure	-	17,0	-	1,2	-	0,7	-	1231
	São Caetano de Odivelas	-	**	-	**	-	1,3	-	1107
	Curuçá	-	4,2	-	0,7	-	1,0	-	1117
	Marapanim	-	**	-	**	-	4,3	-	880
	Maracanã	-	4,2	-	1,1	-	0,3	-	940
	Salinópolis	8,5	4,2	0,7	0,6	0,3	0,3	1115	1043
	São João de Pirabas	8,5	-	1,1	-	1,3	-	1033	-
	Quatipuru	4,2	-	2,5	-	1,3	-	779	-
	Tracuateua	4,2	-	0,6	-	0,3	-	845	-
	Bragança	8,5	-	1,9	-	2,7	-	719	-
	Augusto Corrêa	8,5	-	4,2	-	4,7	-	697	-
	Viseu	25,5	-	3,8	-	3,7	-	583	-
MA	Carutapera	17,0	-	1,4	-	2,7	-	518	-
	Luís Domingues	4,2	-	1,0	-	0,3	-	1239	-
	Godofredo Viana	8,5	-	1,3	-	3,7	-	589	-
	Cândido Mendes	8,5	-	0,9	-	2,7	-	646	-
	Cururupu	38,2	4,2	1,9	0,6	2,3	0,3	446	580
	Porto Rico do Maranhão	4,2	-	0,6	-	0,3	-	700	-
	Cedral	**	-	**	-	0,7	-	765	-
	Guimarães	21,2	-	0,8	-	1,0	-	725	-
	Alcântara	4,2	-	0,8	-	0,3	-	930	-
	São Luís	**	-	**	-	0,7	-	978	-
	Humberto de Campos	12,7	-	1,4	-	2,3	-	508	-
	Primeira Cruz	4,2	-	0,9	-	0,7	-	475	-
	Santo Amaro do Maranhão	38,2	-	6,6	-	19,4	-	264	-
	Barreirinhas	33,9	-	3,2	-	12,4	-	290	-
	Paulino Neves	17,0	-	2,6	-	8,7	-	305	-
	Tutóia	12,7	-	1,1	-	0,7	-	404	-
Araioses	17,0	-	1,2	-	1,3	-	374	-	
PI	Ilha Grande	8,5	-	1,3	-	2,3	-	287	-
	Parnaíba	12,7	-	1,3	-	2,3	-	287	-
	Luís Correia	4,2	-	2,4	-	0,3	-	738	-
	Cajueiro da Praia	**	-	**	-	0,3	-	737	-

CE	Barroquinha	**	-	**	-	0,3	-	732	-
-----------	-------------	-----------	---	-----------	---	-----	---	-----	---

* Valores em negrito são os resultados da grade de costa. Os valores que não estão em negrito são retirados dos resultados em superfície para localidades que não apresentaram massa acumulada na costa acima do limiar monitorado, mas estão a uma distância de menos de 3 km (um ponto de grade) da costa. Este procedimento é uma solicitação do IBAMA.

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

Tabela 32: Massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas Unidades de Conservação marinhas com possibilidade de serem atingidas em um derrame de grande volume (13.307 m³) considerando os vazamentos a partir dos poços Pinguim e Gaiota, nos cenários de verão e inverno.

Unidade de Conservação	Massa Máxima (t/km ²)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo (horas)	
	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
RESEX Marinha Caeté-taperaçu	0,2	-	3,0	-	964	-
RESEX Marinha Tracuateua	0,2	-	2,7	-	942	-
RESEX Mãe Grande de Curuçá	-	0,2	-	3,0	-	929
RESEX Maracanã	-	0,2	-	2,0	-	1027
RESEX Marinha de Gurupi-Piriá	0,3	-	5,4	-	585	-
APA de Upaon-Açu/Miritiba/Alto-Preguiças	0,2	-	3,3	-	405	-
APA Delta do Parnaíba	0,3	-	9,0	-	232	-
APA das Reentrâncias Maranhenses	0,6	0,6	10,4	12,0	283	233
RESEX Marinha de Soure	-	0,3	-	1,0	-	1311
RESEX de Cururupu	0,2	0,3	2,0	0,3	456	556
APA da Baixada Maranhense	0,1	-	0,3	-	994	-
PEM do Parcel de Manuel Luís	1,4	1,2	8,4	20,7	268	164
PEM do Banco do Álvaro	0,1	0,9	0,3	28,7	711	186
PEM do Banco do Tarol	1,0	0,7	11,4	21,0	308	210
APA da Costa de Urumajó	0,3	-	3,0	-	868	-
APA Jabotitua-Jatium	0,3	-	5,7	-	573	-
RESEX Marinha Arai-Peroba	0,3	-	2,7	-	1069	-
APA da Ilha do Canela	0,2	-	1,0	-	983	-
RESEX Marinha Mestre Lucindo	-	0,3	-	4,3	-	880

* Esses valores representam a passagem do óleo na superfície por essas regiões, não representando um acúmulo.

Tabela 33: Massa máxima, probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas unidades de conservação costeiras com possibilidade de serem atingidas em um derrame de grande

volume (13.307 m³) considerando os vazamentos a partir dos poços Pinguim e Gaiivota, nos cenários de verão e inverno.

Unidade de Conservação	Massa Máxima (t/km)		Probabilidade de Presença (%)		Tempo Mínimo (horas)	
	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO	VERÃO	INVERNO
PARNA dos Lençóis Maranhenses	6,65	-	19,4	-	264	-
APA do Arquipélago de Marajó	-	1,17	-	0,7	-	1231
APA de Algodual-Maiandeuá	-	1,13	-	0,3	-	940
APA da Foz do Rio Preguiças - Pequenos Lençóis - Região Lagunar Adjacente	2,58	-	8,7	-	290	-
RESEX Marinha do Delta do Parnaíba	1,19	-	0,33	-	502	-

3.2.2 Resultados Determinísticos

Com base nos resultados obtidos nas simulações probabilísticas de todos os pontos de vazamento, foram identificadas as condições críticas para ocorrência de um vazamento de 13.307 m³ para o bloco CE-M-715.

A situação de **menor tempo** de chegada de óleo na costa ocorreu no período de verão para o vazamento a partir do **poço Gaivota**, enquanto a situação de **maior massa** acumulada ocorreu também no período de verão, mas para o **poço Pinguim**. Na Tabela 34 é apresentada a informação dessas condições críticas selecionadas.

Tabela 34: Informações das simulações determinísticas críticas consideradas para um evento derrame de grande volume (13.307 m³).

Cenário	Ponto de vazamento	Data da simulação (GMT)	Tempo de toque na costa (dias)	Primeira localidade de toque	Massa final de óleo na costa (t)
Tempo mínimo de toque de óleo na costa	Poço Gaivota (Ponto B)	06/01/2009 2h	11,02	Santo Amaro do Maranhão (MA)	11,01
Maior massa de óleo acumulada na costa	Poço Pinguim (Ponto A)	28/12/2010 18h	15,38	Santo Amaro do Maranhão (MA)	580,52

Nos mapas de espessura de óleo na superfície da água, foi adotada uma classe inferior ao limiar, entre 0,04 e 0,3 µm, para que fossem observadas as trajetórias das manchas de óleo que chegam a costa, pois em alguns instantes a espessura não ultrapassa o limiar e, assim, dificultaria o entendimento dos resultados. Esta classe adicional representa a classificação *sheen* dentro do *Bonn Agreement Oil Appearance Code* (OSPAR Commission, 2010).

Da mesma forma, é adicionada uma classe inferior (2-20 ppb) ao limiar de concentração considerado no estudo para que fosse possível observar o deslocamento do óleo na coluna d'água.

3.2.2.1 Menor tempo de chegada de óleo à costa

A seguir são apresentadas informações relacionadas aos ventos e correntes do período simulado que se estendeu de 06/01/2009 às 2h até 07/03/2009 às 2h. Os valores estão relacionados ao ponto de grade mais próximo do local do vazamento.

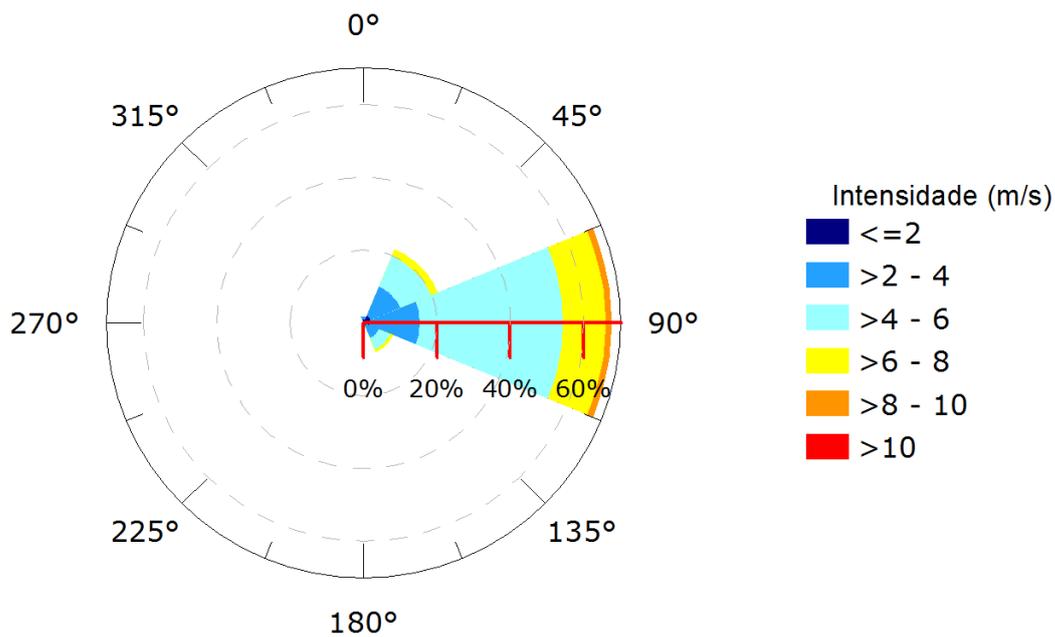


Figura 204: Rosa dos ventos para o período de simulação da situação de menor tempo de toque na costa.

Tabela 35: Ocorrência conjunta entre direção e intensidade dos ventos para o ponto mais próximo do local do vazamento para o período da condição de menor tempo de toque na costa.

Direção -> Intensidade (m/s)	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Freq. (%)
0-2	2	5	4	2	-	-	-	-	5,4
2-4	2	21	33	9	-	-	-	-	27,0
4-6	-	22	94	8	-	-	-	-	51,5
6-8	-	5	28	2	-	-	-	-	14,5
8-10	-	-	4	-	-	-	-	-	1,7
>10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Freq. (%)	1,7	22,0	67,6	8,7	-	-	-	-	

Tabela 36: Estatística do vento para o período da condição de menor tempo de toque na costa.

Direção média (°)	Direção de maiores intensidades (°)	Vel. Média (m/s)	Vel. Mín (m/s)	Vel máx. (m/s)	Desvio padrão (m/s)
83	91	4,62	0,81	9,20	1,44

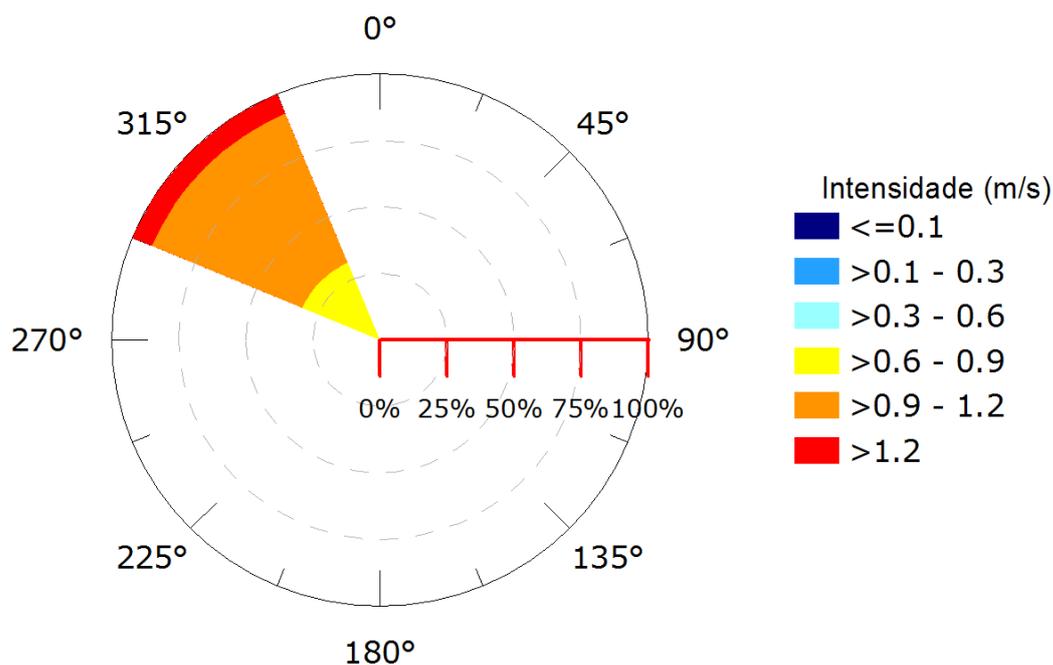


Figura 205: Rosa de corrente para o período de simulação da situação de menor tempo de toque na costa.

Tabela 37: Ocorrência conjunta entre direção e intensidade de corrente para o ponto mais próximo do local do vazamento para o período da condição de menor tempo de toque na costa. Ponto

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	-	-	-	-	-	-	-	226	31,3
0,9 - 1,2	-	-	-	-	-	-	-	438	60,7
>1,2	-	-	-	-	-	-	-	57	7,9
Freq. (%)	-	-	-	-	-	-	-	100,0	

Tabela 38: Estatística de corrente para o período da condição de menor tempo de toque na costa.

Direção média (°)	Direção de maiores intensidades (°)	Vel. Média (m/s)	Vel. Mín (m/s)	Vel máx. (m/s)	Desvio padrão (m/s)
304	305	0,99	0,71	1,32	0,15

Pelos dados de vento no período da simulação nota-se a predominância de ventos de leste (68%) e predominância de ventos com intensidades entre 4 e 6 m/s (51,5%). As informações de correntes mostram que a direção das correntes é para noroeste (100%) e que as velocidades se concentram entre 0,9 e 1,2 m/s (61%).

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

É também apresentado o mapa de concentração de óleo nos sedimentos ao final da simulação. Os mapas de concentração de óleo no fundo foram construídos considerando um valor limiar de 1g de óleo/m²¹.

¹ Valor baseado em LONG ET AL (1995) considerando uma espessura de contaminação de 10 cm, densidade de sedimentos de 2,6 g/cm³

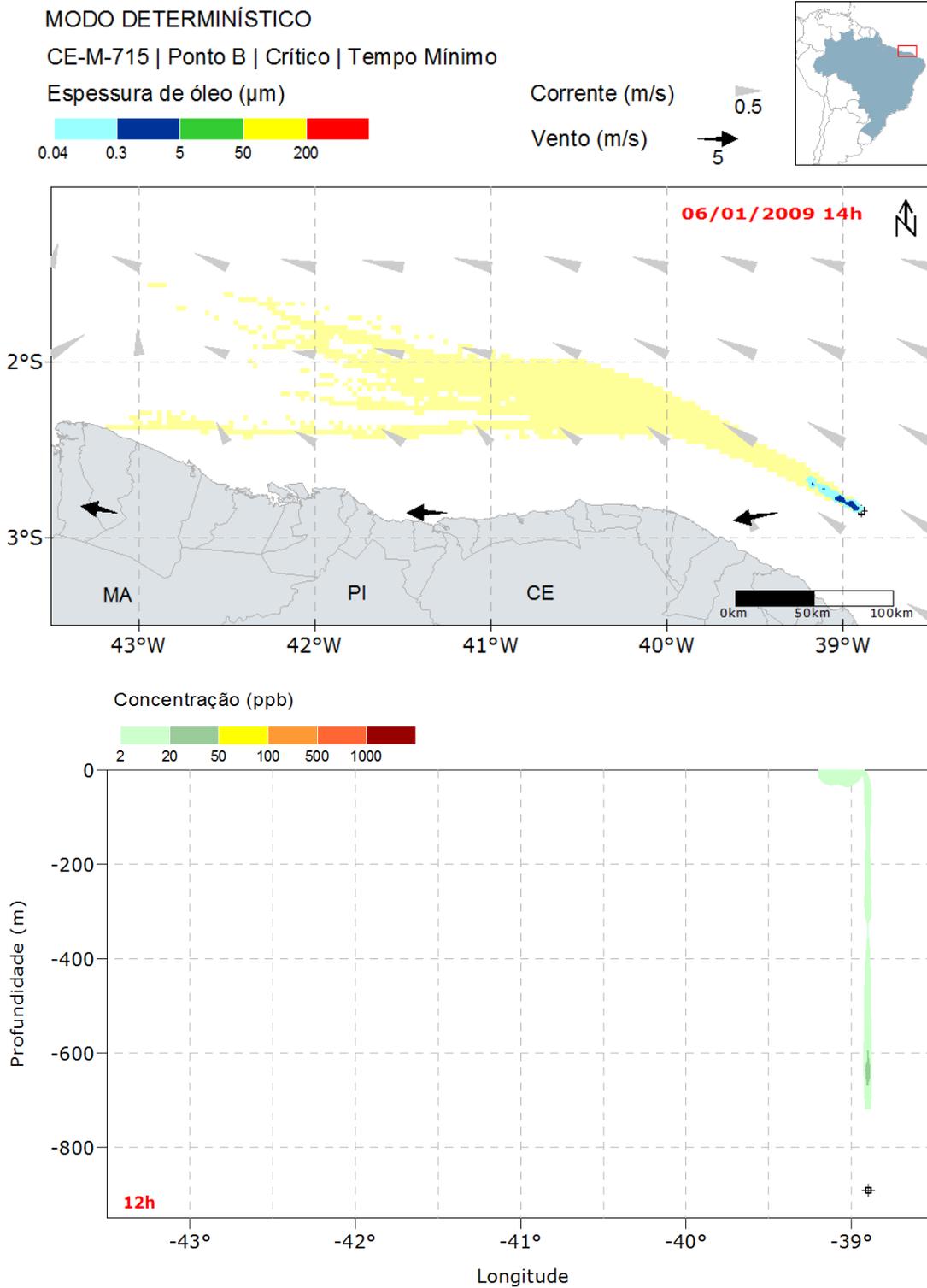


Figura 206: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 12 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Gavota (Ponto B).

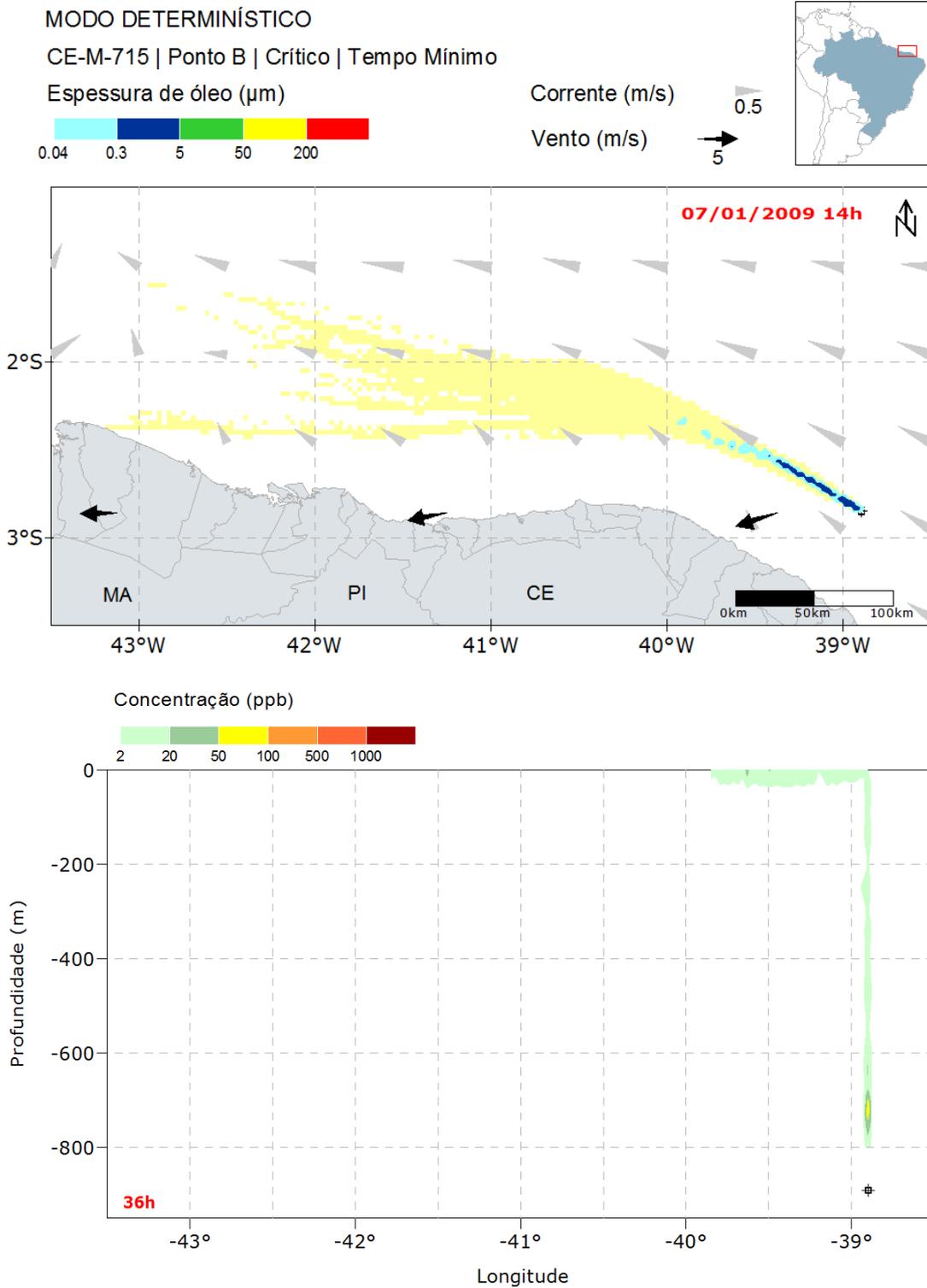


Figura 207: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 36 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Gavota (Ponto B).

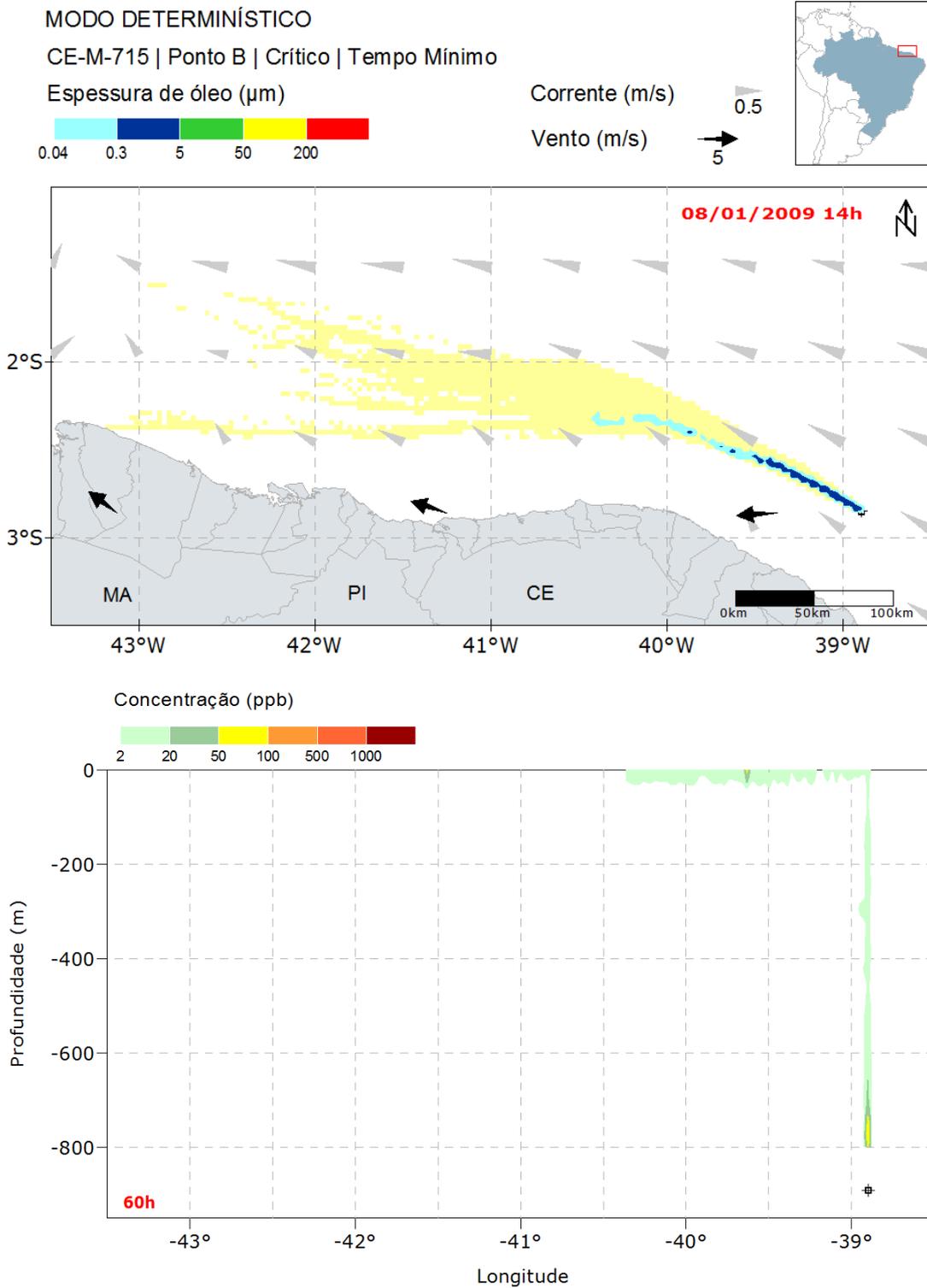


Figura 208: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 60 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Gavota (Ponto B).

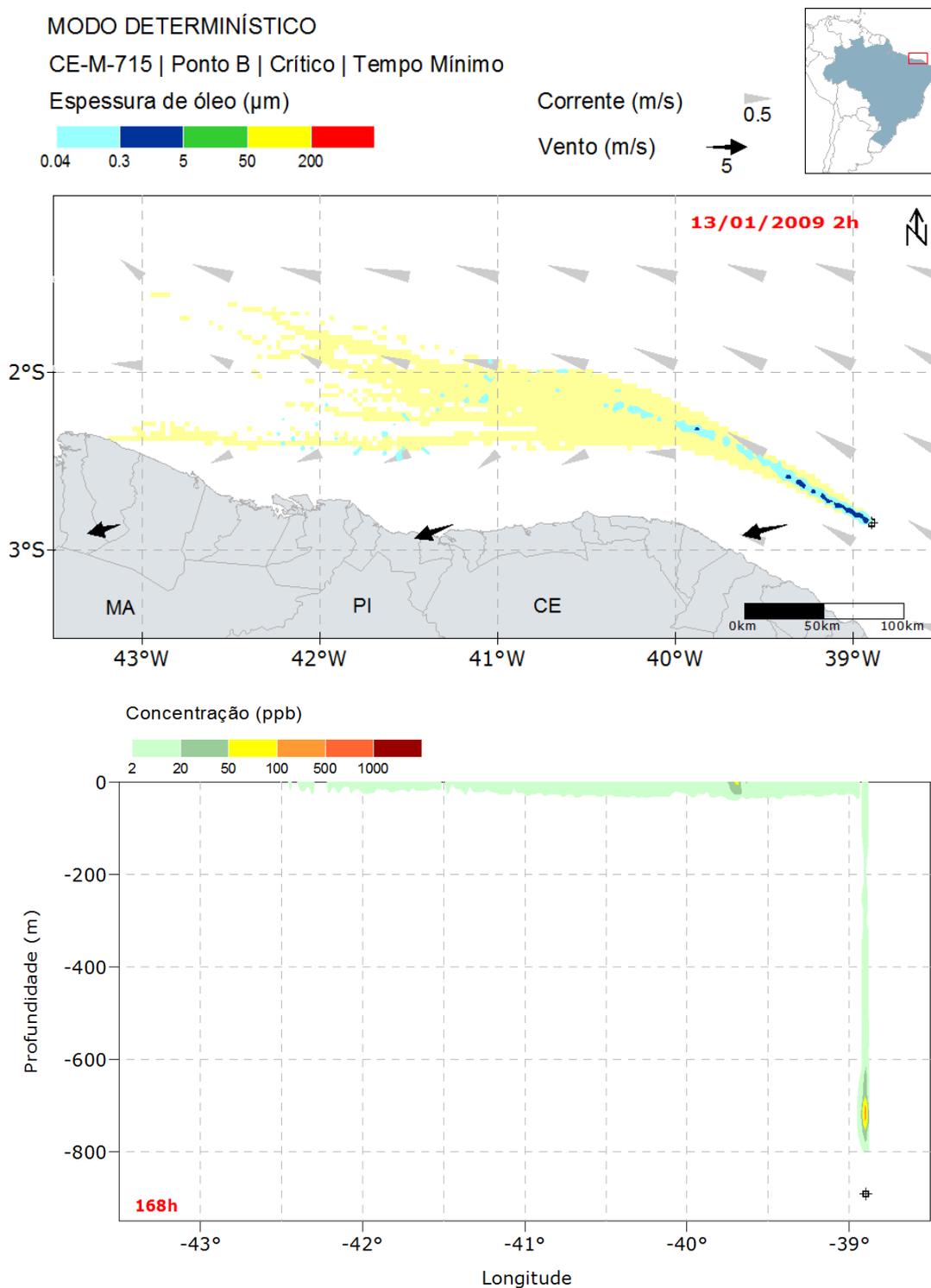


Figura 209: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Gavivota (Ponto B).

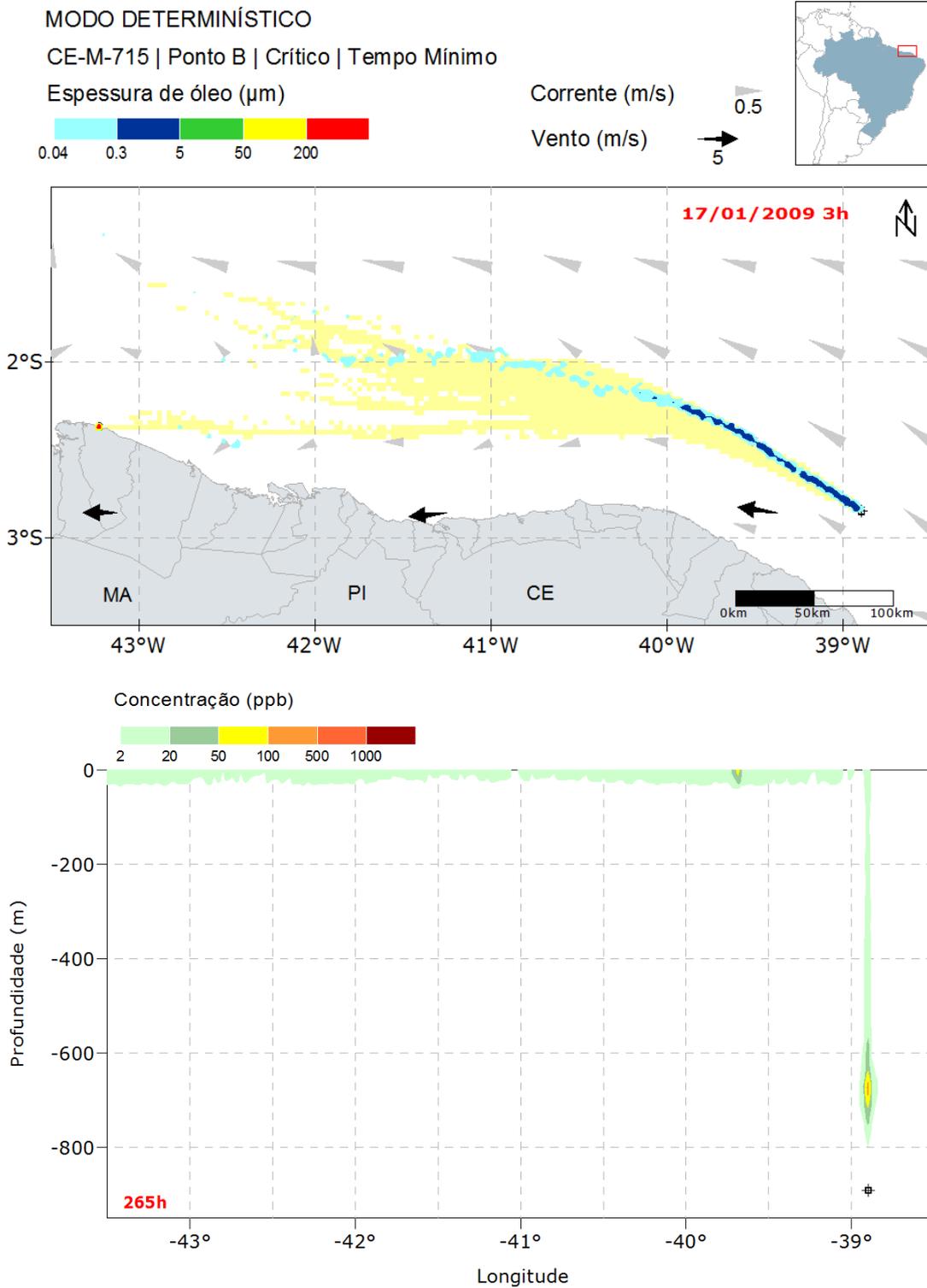


Figura 210: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 265 horas (primeiro toque) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Gaivota (Ponto B).

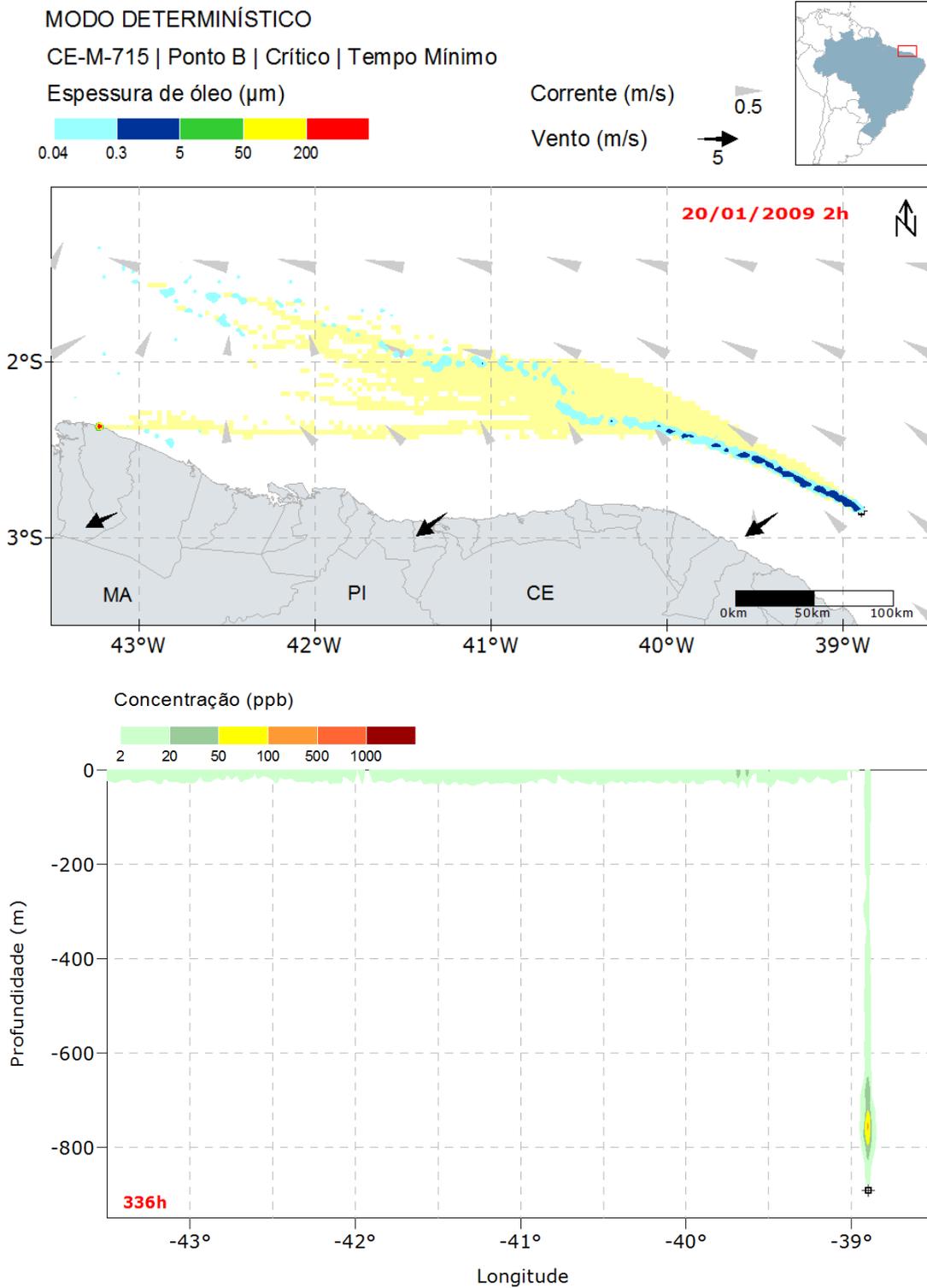


Figura 211: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Gaivota (Ponto B).

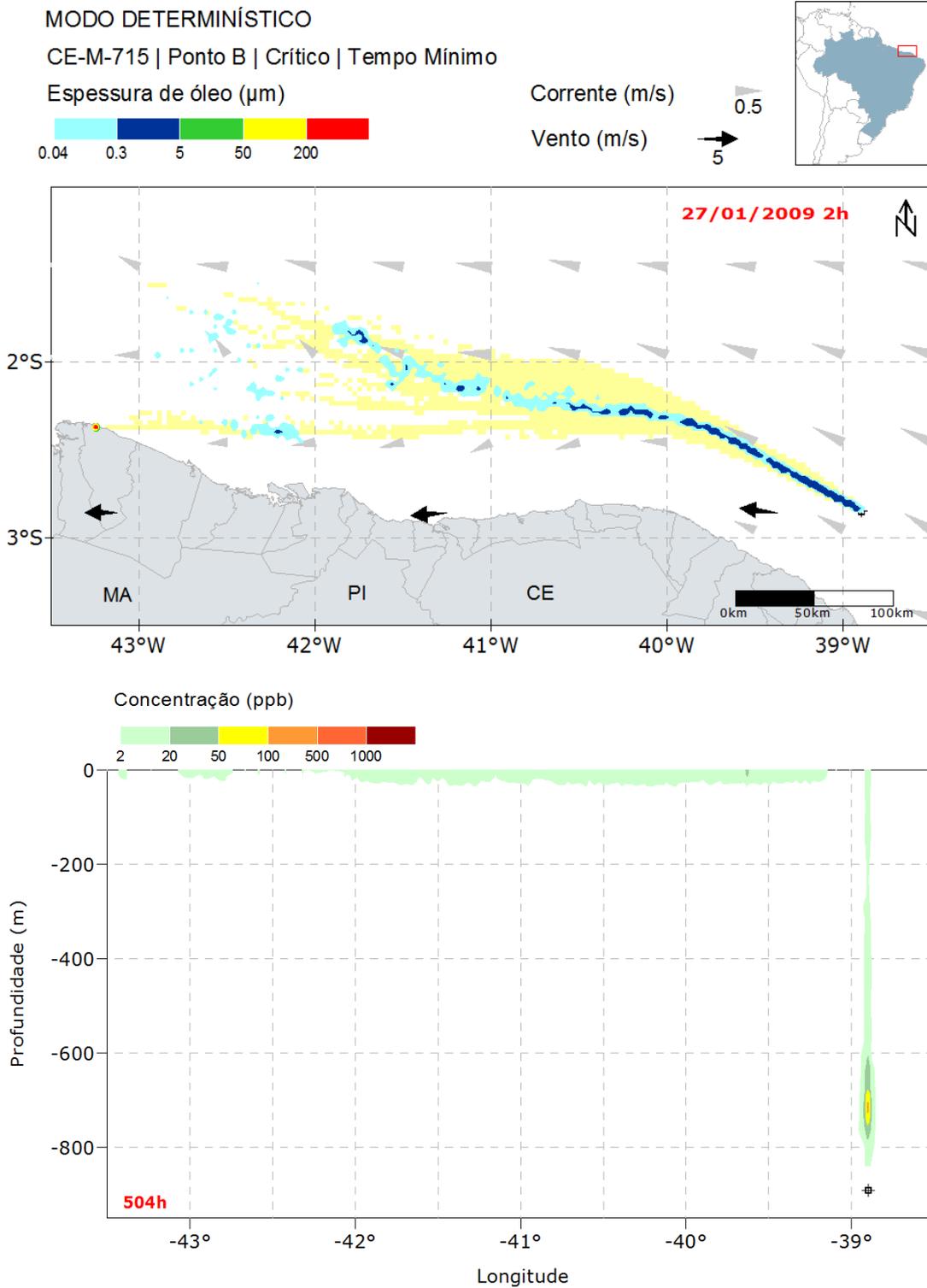


Figura 212: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Gaivota (Ponto B).

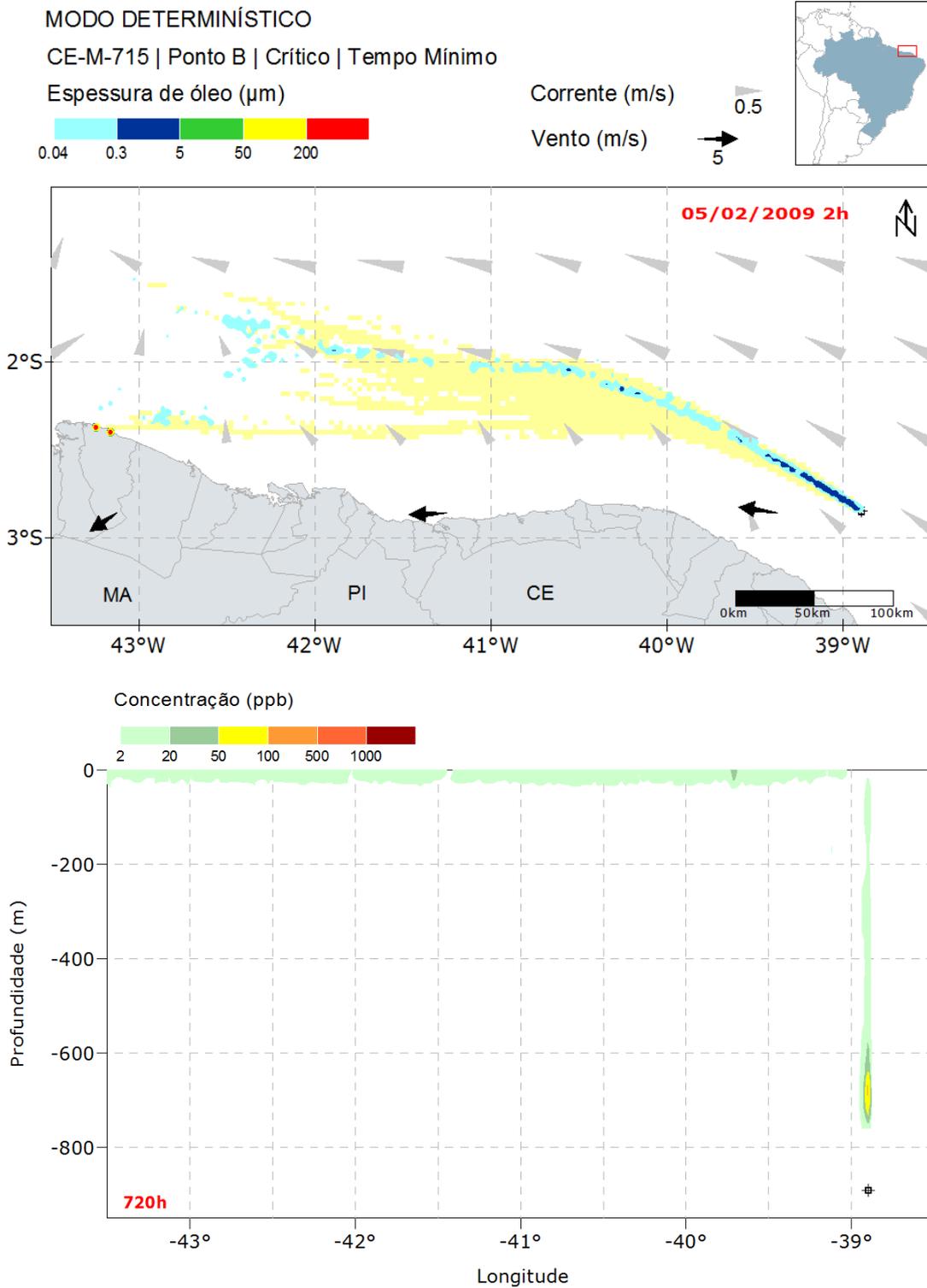


Figura 213: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Gaivotas (Ponto B).

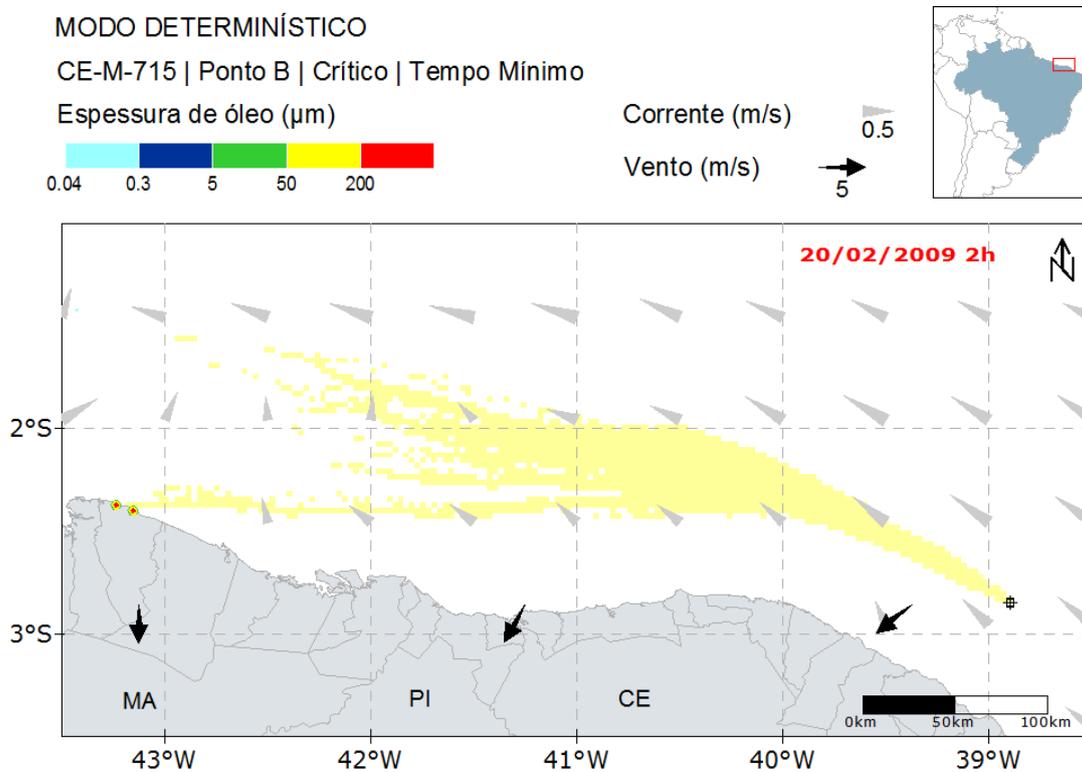


Figura 214: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Gaiivota (Ponto B).

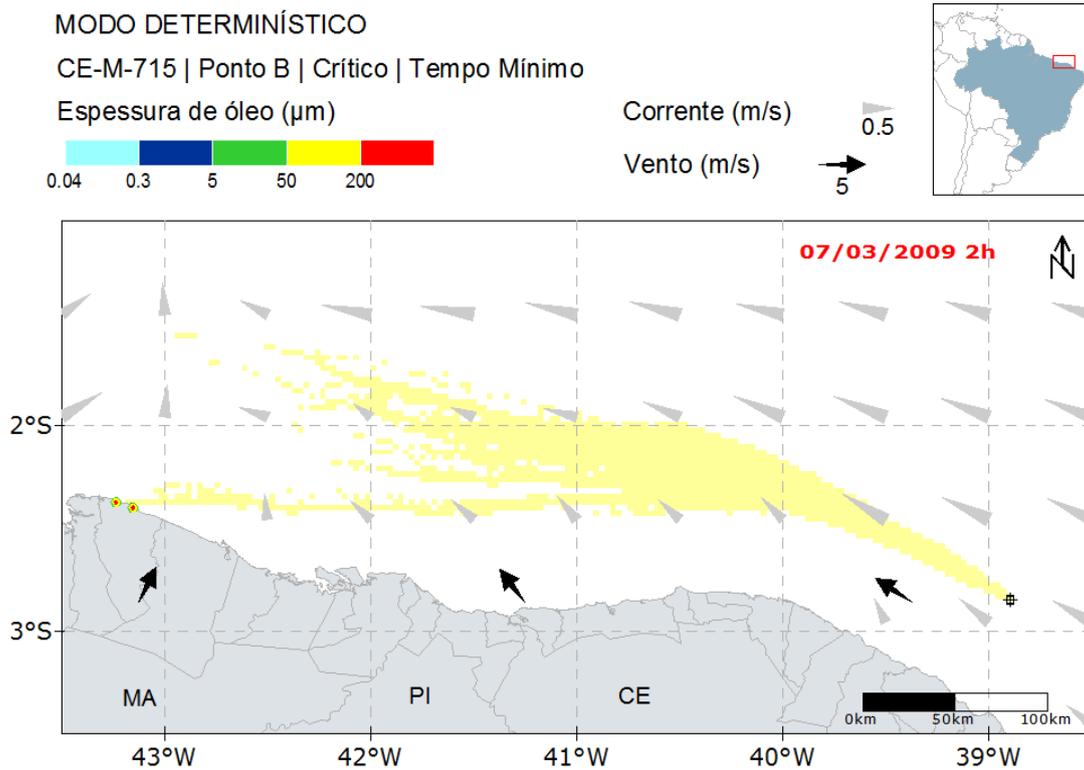


Figura 215: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Gaivota (Ponto B).

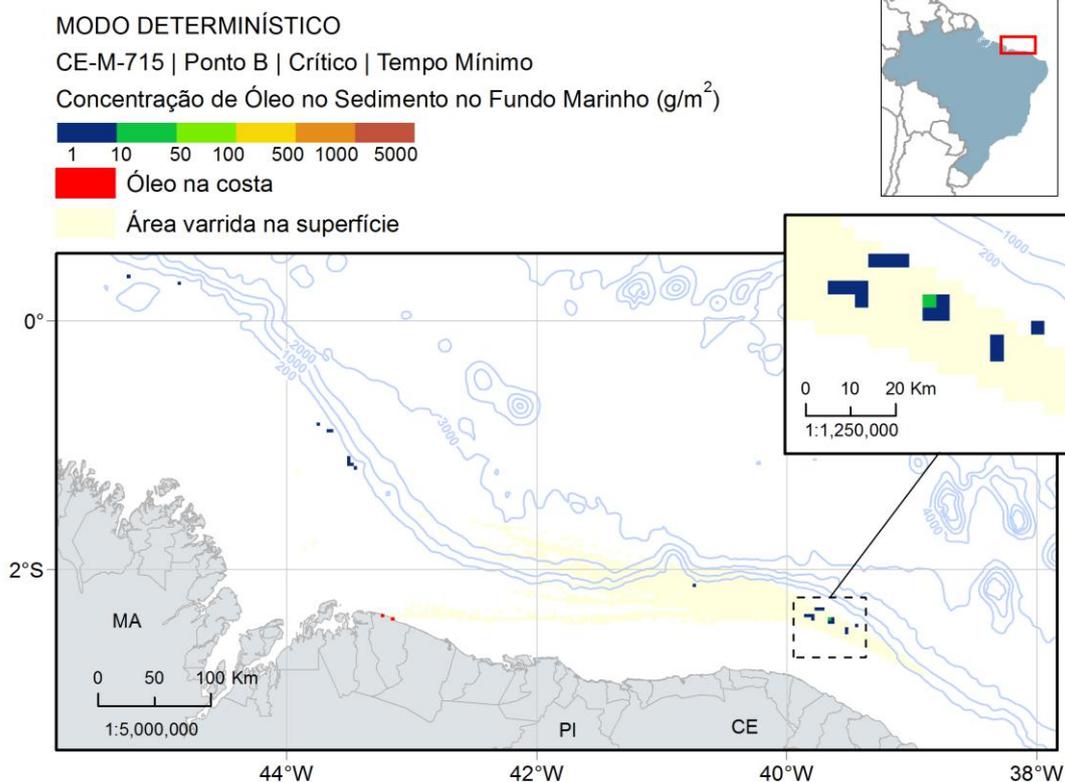


Figura 216: Mapa de concentração de óleo no sedimento no fundo marinho da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Vazamento de $13.307 m^3$ a partir do poço Gaivota (Ponto B).

A deriva do óleo ao longo da simulação ocorreu inicialmente rumo a noroeste do ponto de vazamento, influenciada predominantemente pela Corrente Norte do Brasil. Após atingir a latitude de $40^{\circ}W$, parte do óleo passa a derivar para oeste, sob influência dos ventos de leste e nordeste, chegando ao município de Santo Amaro do Maranhão (MA), após 11 dias, enquanto parte continua a derivar para noroeste. Observa-se que nos instantes iniciais de toque não houve a formação de uma extensa mancha de óleo na superfície, em especial próximo à costa. No entanto isso se explica pela existência de um filme de óleo na superfície com espessuras menores que $0,3 \mu m$ que ao se acumular na costa atinge espessuras superiores a esta.

Em relação à coluna d'água, as maiores concentrações foram verificadas entre 600 e 900 metros de profundidade, próximo ao ponto de vazamento, com valores máximos de 127 ppb, observados após 1 semana (168 horas). Nota-se concentrações acima de 20 ppb apenas próximo ao ponto de vazamento e na camada mais superficial da coluna d'água. Após o término do vazamento, em 1080 horas (45 dias), não são observados valores acima de 2 ppb ao longo da coluna d'água.

Já o óleo associado ao sedimento teve concentração máxima de $14,7 \text{ g/m}^2$ a cerca de 100 km de distância do ponto de vazamento, porém é observado óleo nos sedimentos até uma distância de 780 km.

A seguir, é apresentada a evolução temporal do balanço de massa do óleo e a evolução da área e a massa de óleo durante a simulação.

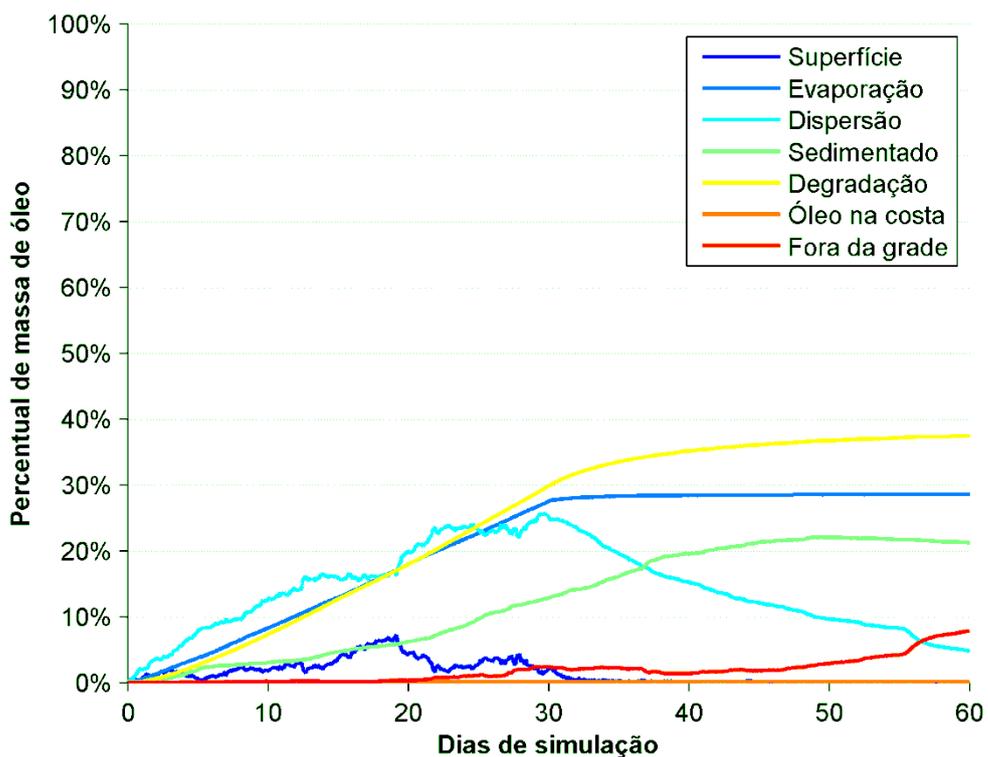


Figura 217: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condição crítica de menor tempo de chegada. Volume de 13.307 m^3 .

Tabela 39: 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 de grade (%)
12	0,36 (43 t)	0,19 (23 t)	1,07 (126 t)	-	0,05 (5 t)	-	-
36	0,97 (115 t)	0,91 (108 t)	2,70 (319 t)	0,06 (8 t)	0,37 (43 t)	-	-
60	1,52 (179 t)	1,70 (201 t)	3,79 (449 t)	0,43 (51 t)	0,89 (105 t)	-	-
168	0,98 (116 t)	5,49 (649 t)	9,73 (1151 t)	2,62 (310 t)	4,42 (523 t)	-	0,09 (11 t)
334	2,01 (237 t)	11,98 (1417 t)	16,59 (1961 t)	4,16 (492 t)	11,49 (1358 t)	0,01 (1 t)	0,15 (18 t)
336	2,30 (272 t)	12,06 (1426 t)	16,36 (1934 t)	4,22 (499 t)	11,58 (1369 t)	0,01 (1 t)	0,15 (18 t)
504	4,15 (490 t)	19,00 (2246 t)	20,75 (2453 t)	6,60 (780 t)	19,06 (2253 t)	0,02 (2 t)	0,45 (53 t)
720	2,17 (256 t)	27,49 (3250 t)	25,18 (2977 t)	12,81 (1515 t)	29,84 (3528 t)	0,09 (10 t)	2,43 (287 t)
1080	0,08 (9 t)	28,49 (3369 t)	12,12 (1433 t)	21,29 (2517 t)	36,11 (4270 t)	0,10 (12 t)	1,81 (214 t)
1440	0,02 (2 t)	28,53 (3373 t)	4,78 (565 t)	21,24 (2511 t)	37,44 (4427 t)	0,09 (11 t)	7,90 (934 t)

É observado que a maior parte do óleo ao final da simulação, 37%, foi degradada. Em seguida, a evaporação e a sedimentação foram os outros dois principais processos de intemperismo, foram responsáveis pela retirada de 29% e 21% do total, respectivamente. O óleo restante em superfície representa apenas 0,02% do total vazado, enquanto na coluna d'água uma porcentagem de ~5%, equivalente a 565 toneladas. A quantidade de óleo na costa foi de 11 toneladas (0,1 do total) ao de 60 dias.

Nesse cenário, apesar do alto valor de óleo associado ao fundo marinho (> 20%), não se observa (Figura 216) uma grande extensão com presença de óleo acima do limiar considerado (1g/m²). Desta forma, este resultado corrobora a inferência feita no item 3.2.1.1.3.1 de que o óleo alcança o fundo marinho em uma grande extensão sobre a plataforma continental, mas com baixas concentrações.

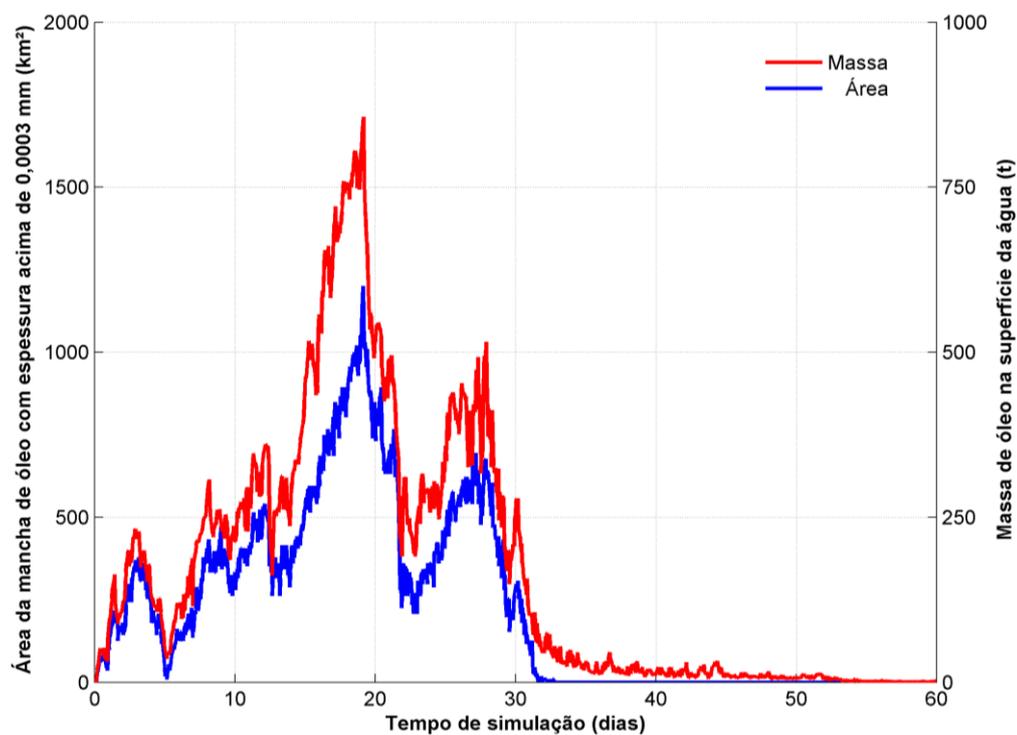


Figura 218: Área superficial da mancha de óleo e a massa de óleo na superfície do mar durante a simulação da trajetória em condição crítica de menor tempo de chegada.

Tabela 40: Área superficial, massa de óleo e a espessura máxima da mancha de óleo e a massa de óleo do óleo durante a simulação.

Tempo (h)	Área (km ²)	Massa (t)	Espessura máxima (µm)
12	63,20	42,90	0,90
36	189,00	114,90	1,00
60	289,00	179,40	0,90
168	135,00	115,80	0,80
334	289,00	237,10	428,40
336	352,00	272,00	416,40
504	695,00	490,10	388,20
720	280,00	256,00	453,40
1080	0,00	9,40	423,80
1440	0,00	2,00	375,10

O gráfico da área da mancha de óleo em superfície mostra um crescimento até 18 dias de simulação, a partir do qual se inicia um período de decaimento. Em 32 dias de simulação, já não se observa mancha de óleo com espessura acima de 0,3 μm .

Os maiores valores de espessura máxima 7745,7 μm , são observados em 30 dias (720 h) devido ao acúmulo de óleo na costa a partir de 334 horas. Depois de 30 dias esse valor diminui devido aos processos de retirada de óleo da costa.

3.2.2.2 Maior massa acumulada na costa

A seguir são apresentadas informações relacionadas aos ventos e correntes do período simulado que se estendeu de 28/12/2010 às 18h até 26/12/2011 às 18h. Os valores estão relacionados ao ponto de grade mais próximo do local do vazamento.

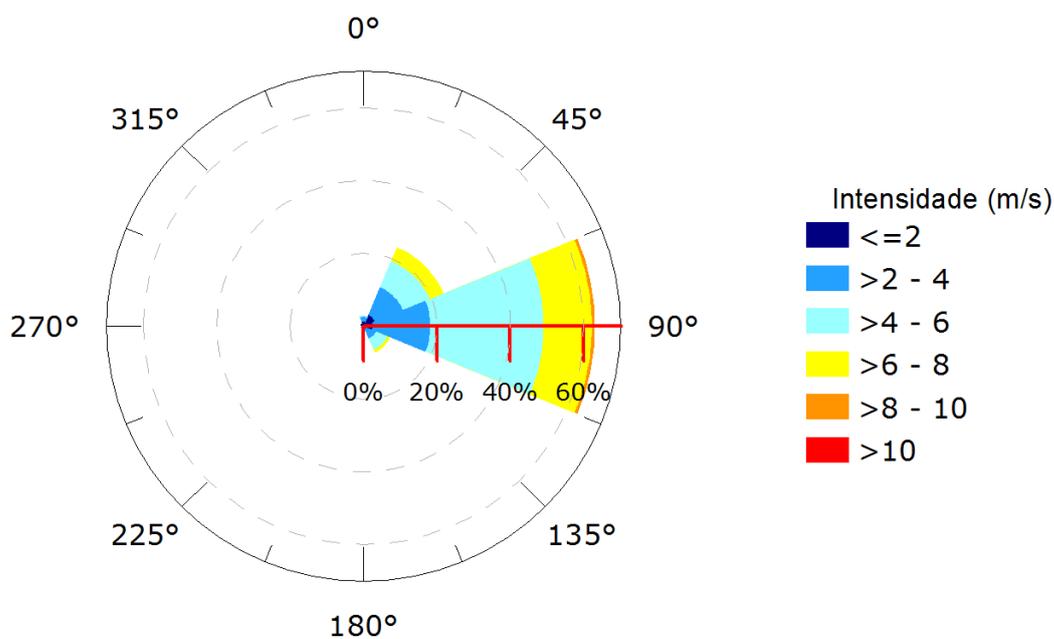


Figura 219: Rosa dos ventos para o período de simulação da situação de maior massa de óleo acumulada na costa.

Tabela 41: Ocorrência conjunta entre direção e intensidade dos ventos para o ponto mais próximo do local do vazamento para o período da condição de maior massa de óleo acumulada na costa.

Direção ->	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Freq. (%)
Intensidade (m/s)									
0-2	3	8	6	2	-	1	1	2	9,5
2-4	3	20	38	7	1	1	-	-	29,0
4-6	1	19	74	8	-	-	-	-	42,3
6-8	-	10	32	2	-	-	-	-	18,3
8-10	-	-	2	-	-	-	-	-	0,8
>10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Freq. (%)	2,9	23,7	63,1	7,9	0,4	0,8	0,4	0,8	

Tabela 42: Estatística do vento para o período da condição de maior massa de óleo acumulada na costa.

Direção média (°)	Direção de maiores intensidades (°)	Vel. Média (m/s)	Vel. Mín (m/s)	Vel máx. (m/s)	Desvio padrão (m/s)
82	83	4,45	0,28	9,67	1,72

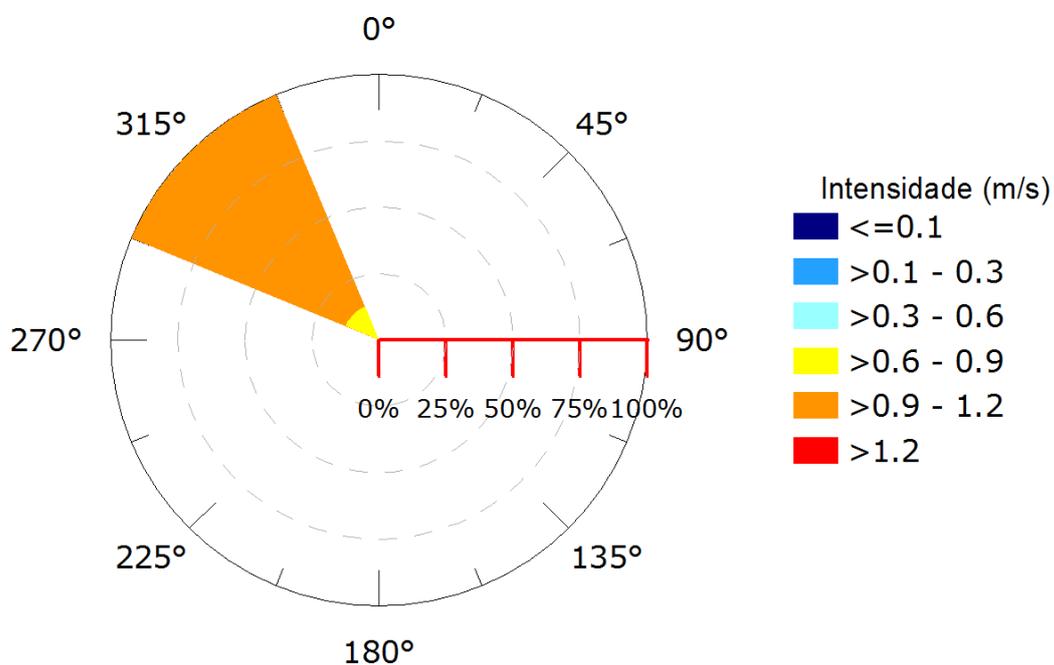


Figura 220: Rosa de corrente para o período de simulação da situação de maior massa de óleo acumulada na costa.

Tabela 43: Ocorrência conjunta entre direção e intensidade de corrente para o ponto mais próximo do local do vazamento para o período da condição de maior massa de óleo acumulada na costa.

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	-	-	-	-	-	-	-	67	13,5
0,9 - 1,2	-	-	-	-	-	-	-	429	86,5
>1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Freq. (%)	-	-	-	-	-	-	-	100,0	

Tabela 44: Estatística de corrente para o período da condição de menor tempo de toque na costa.

Direção média (°)	Direção de maiores intensidades (°)	Vel. Média (m/s)	Vel. Mín (m/s)	Vel máx. (m/s)	Desvio padrão (m/s)
304	301	0,98	0,80	1,15	0,07

No período da simulação ocorre a predominância de ventos de leste (63,1%) e predominância de ventos com intensidades entre 4 e 6 m/s (42,3%). As informações de correntes mostram que a direção das correntes é para noroeste (100%) e que as velocidades predominantes são de 0,9 a 1,2 m/s (86,5%).

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

É também apresentado o mapa de concentração de óleo nos sedimentos ao final da simulação. Os mapas de concentração de óleo no fundo foram construídos considerando um valor limiar de 1g de óleo/m².

MODO DETERMINÍSTICO

CE-M-715 | Ponto A | Crítico | Massa Máxima

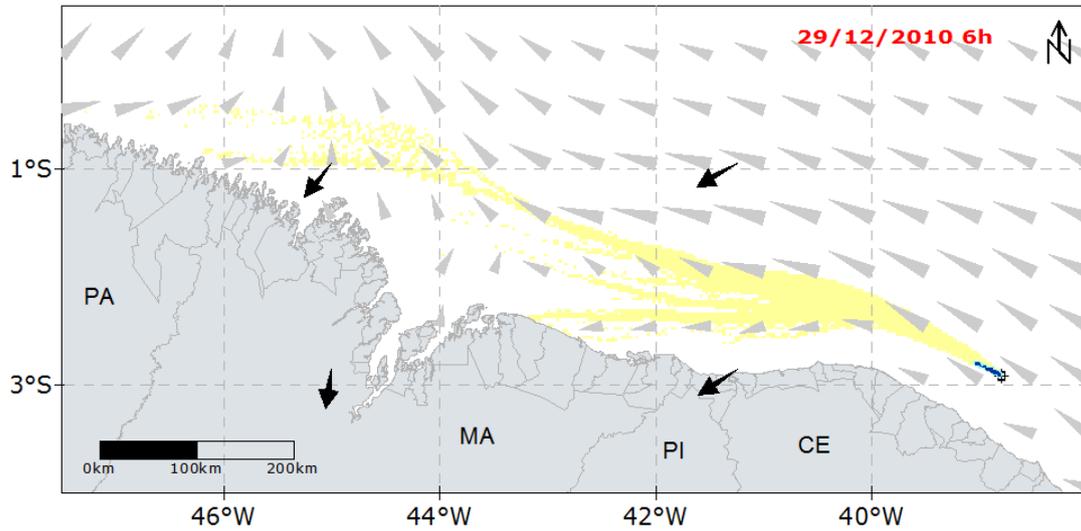
Espessura de óleo (μm)



Corrente (m/s)



Vento (m/s)



Concentração (ppb)

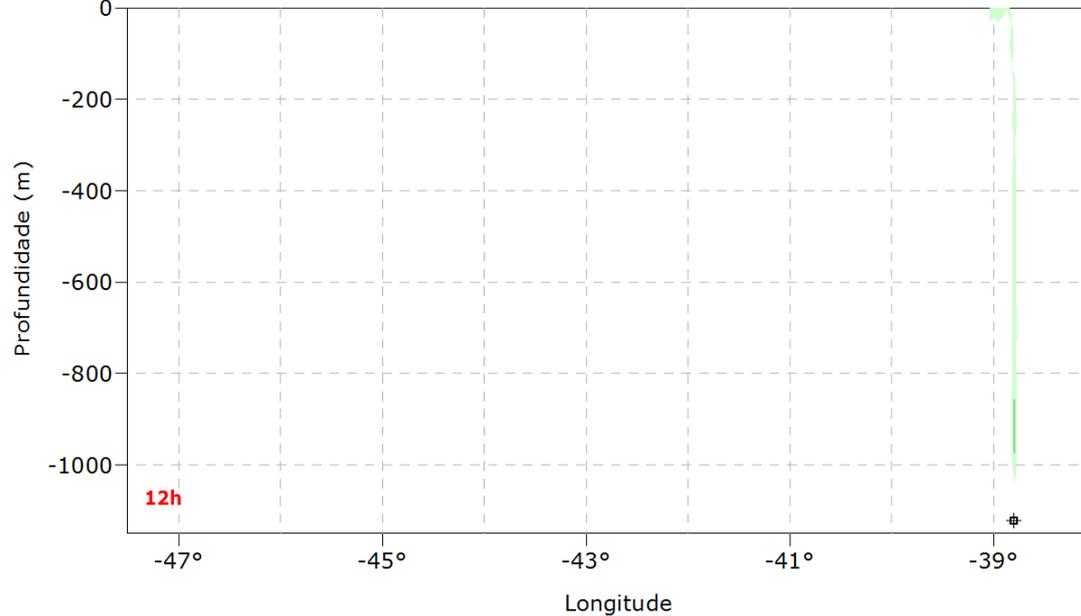
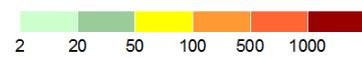


Figura 221: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 12 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Pinguim (Ponto A).

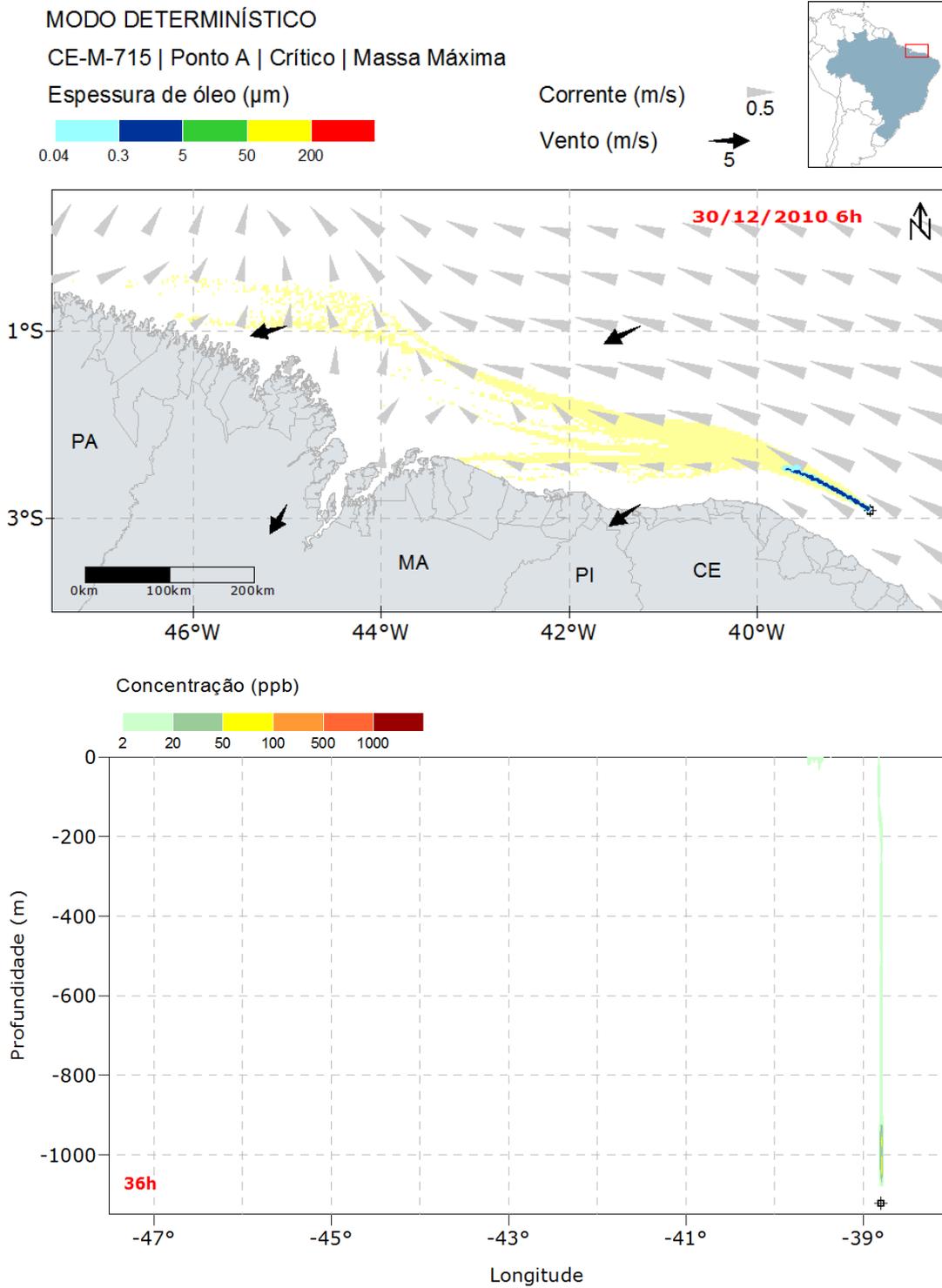


Figura 222: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 36 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Pinguim (Ponto A).

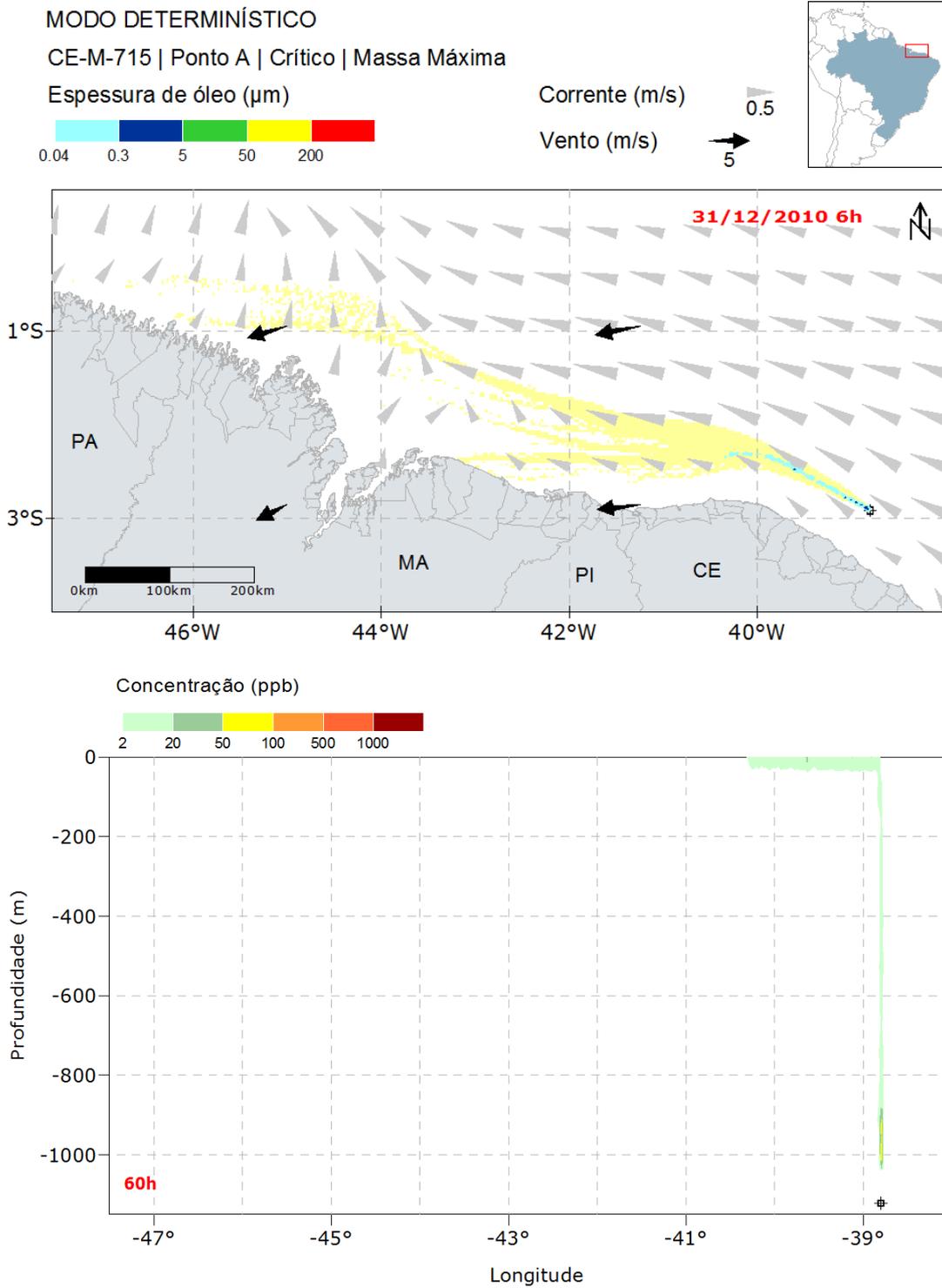


Figura 223: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 60 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Pinguim (Ponto A).

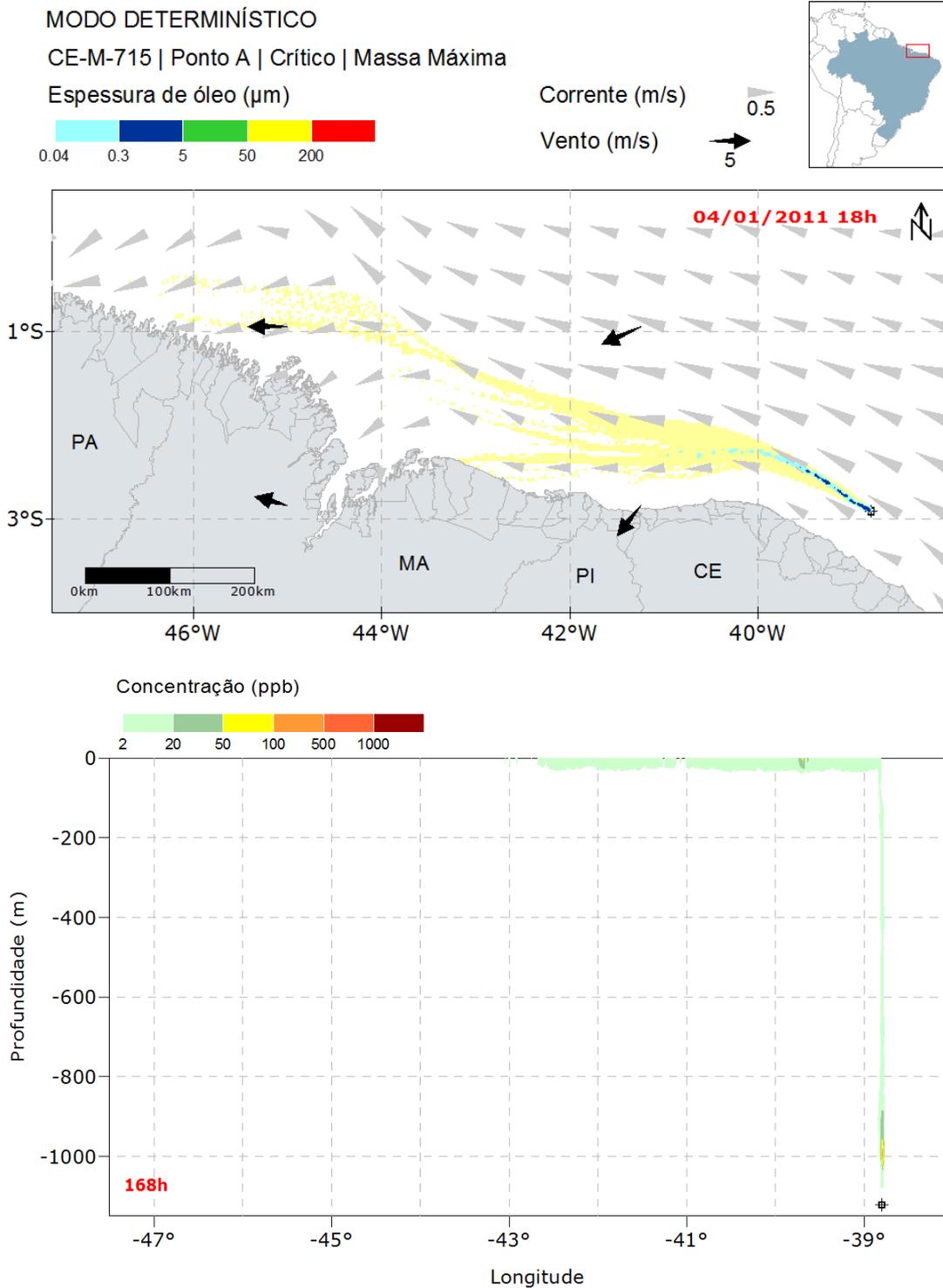


Figura 224: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Pinguim (Ponto A).

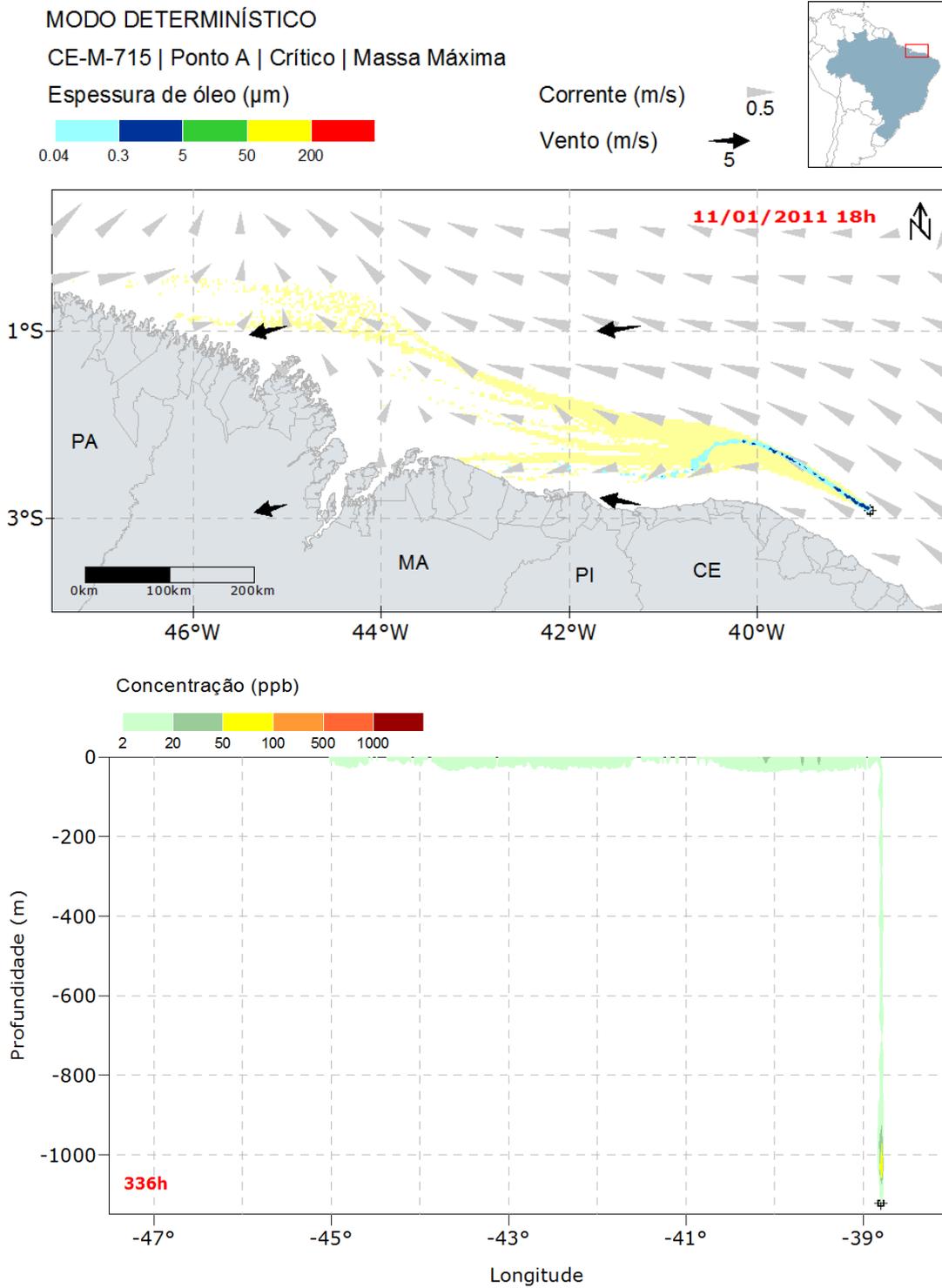


Figura 225: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Pinguim (Ponto A).

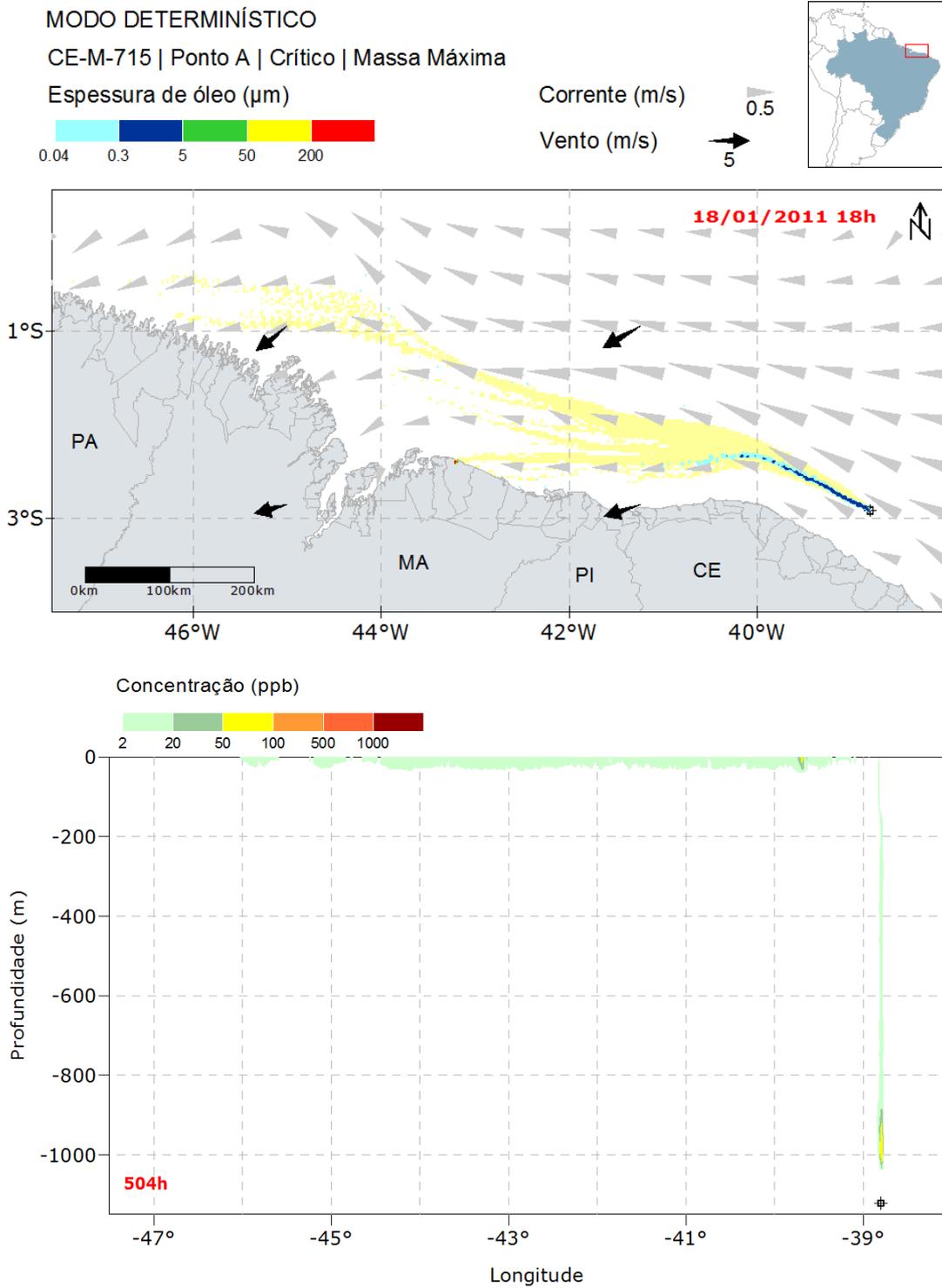


Figura 226: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Pinguim (Ponto A).

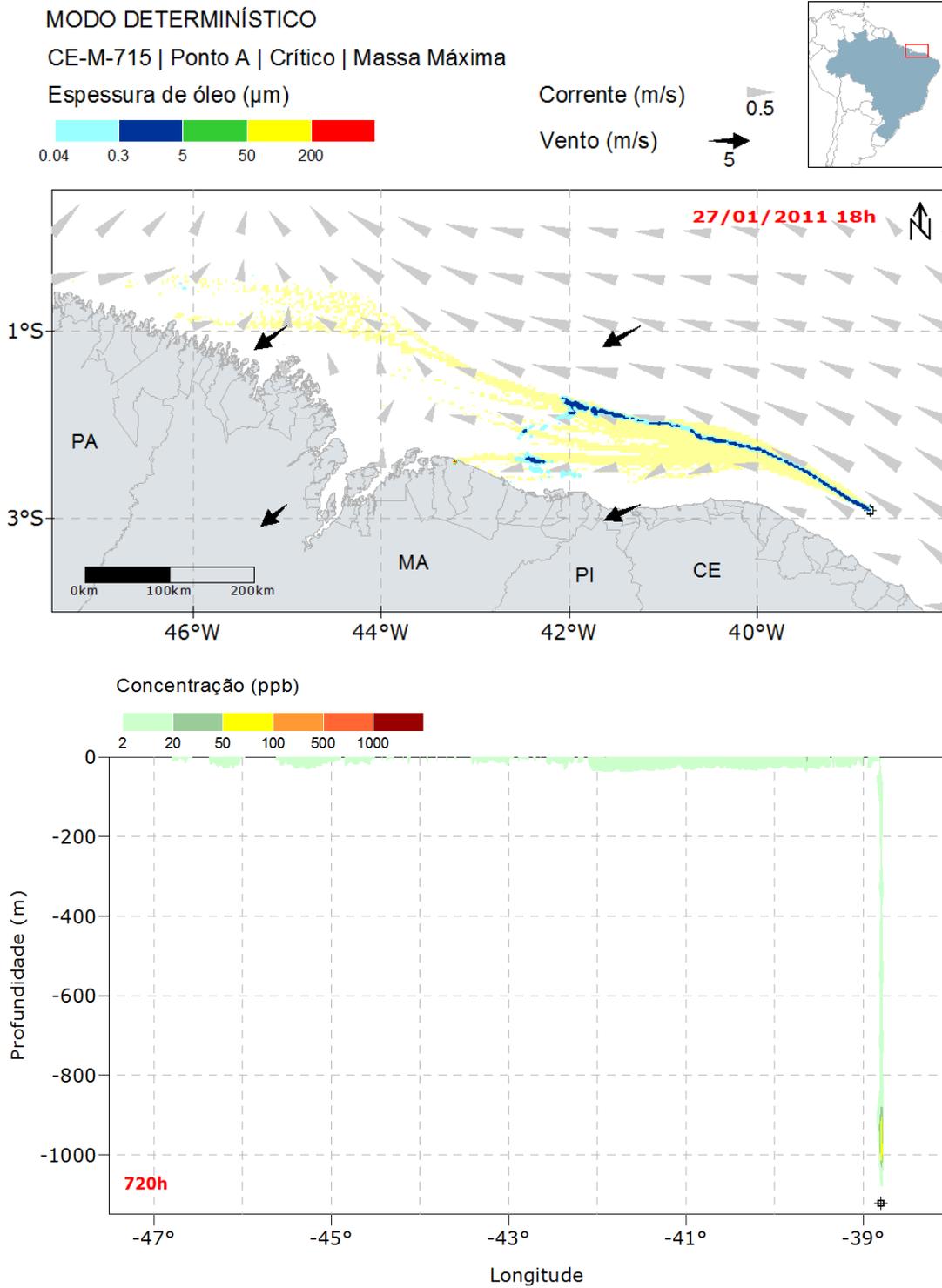


Figura 227: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Pinguim (Ponto A).

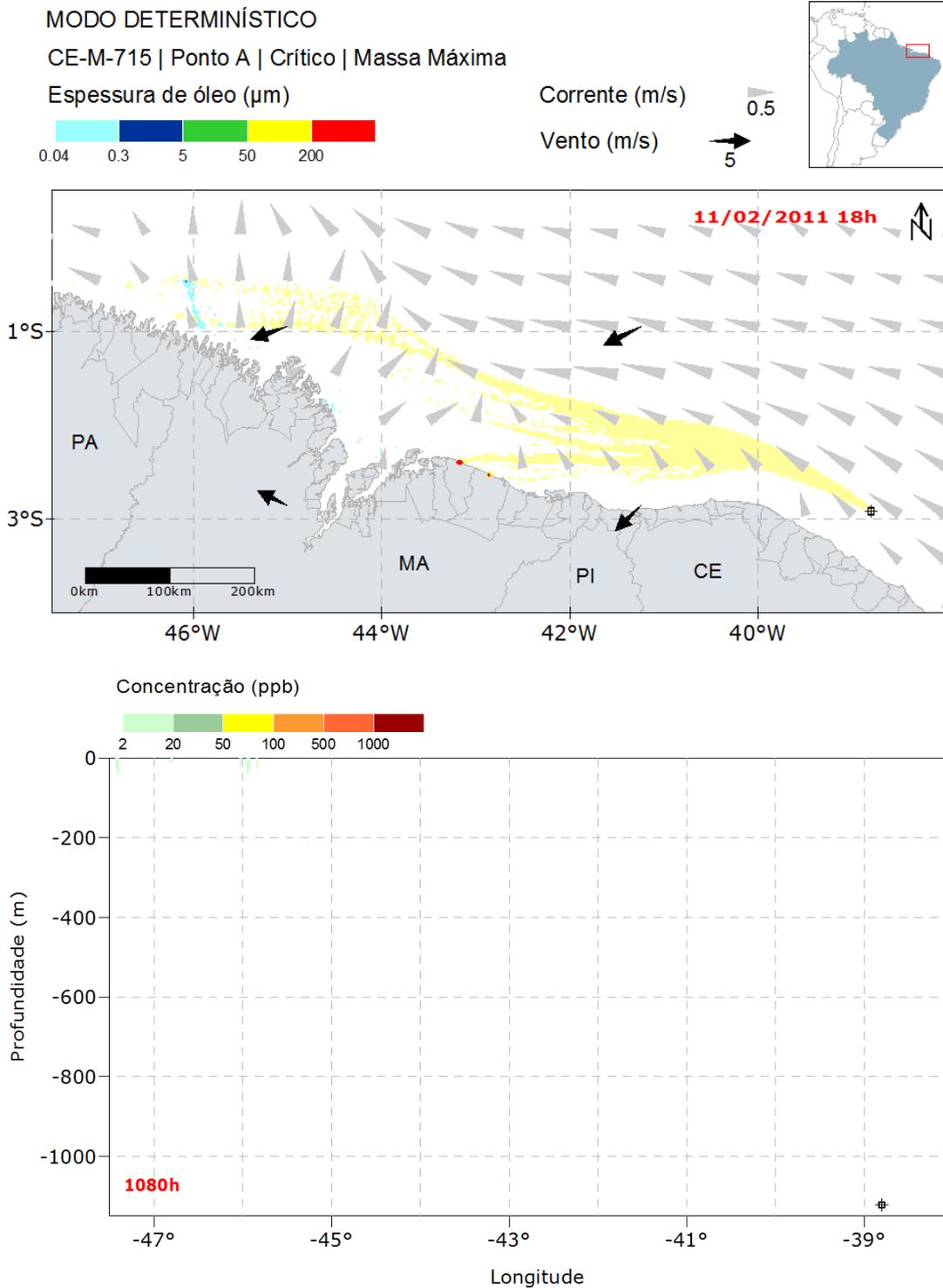


Figura 228: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Pinguim (Ponto A).

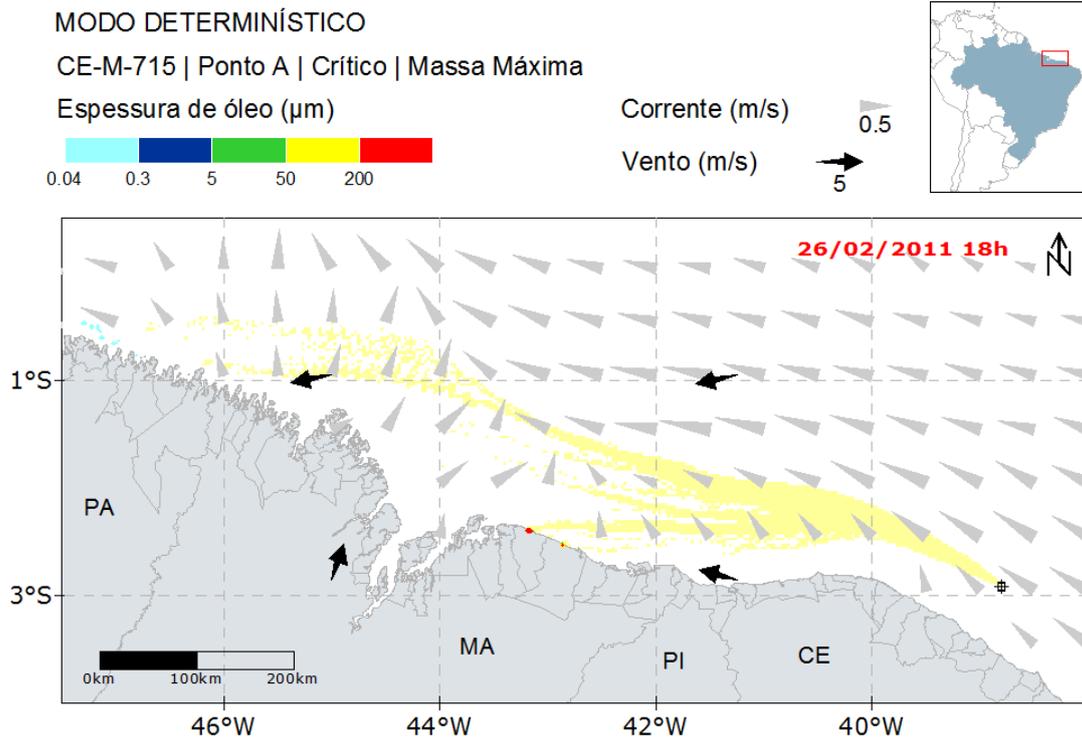


Figura 229: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície. Vazamento de 13.307 m³ a partir do poço Pinguim (Ponto A).

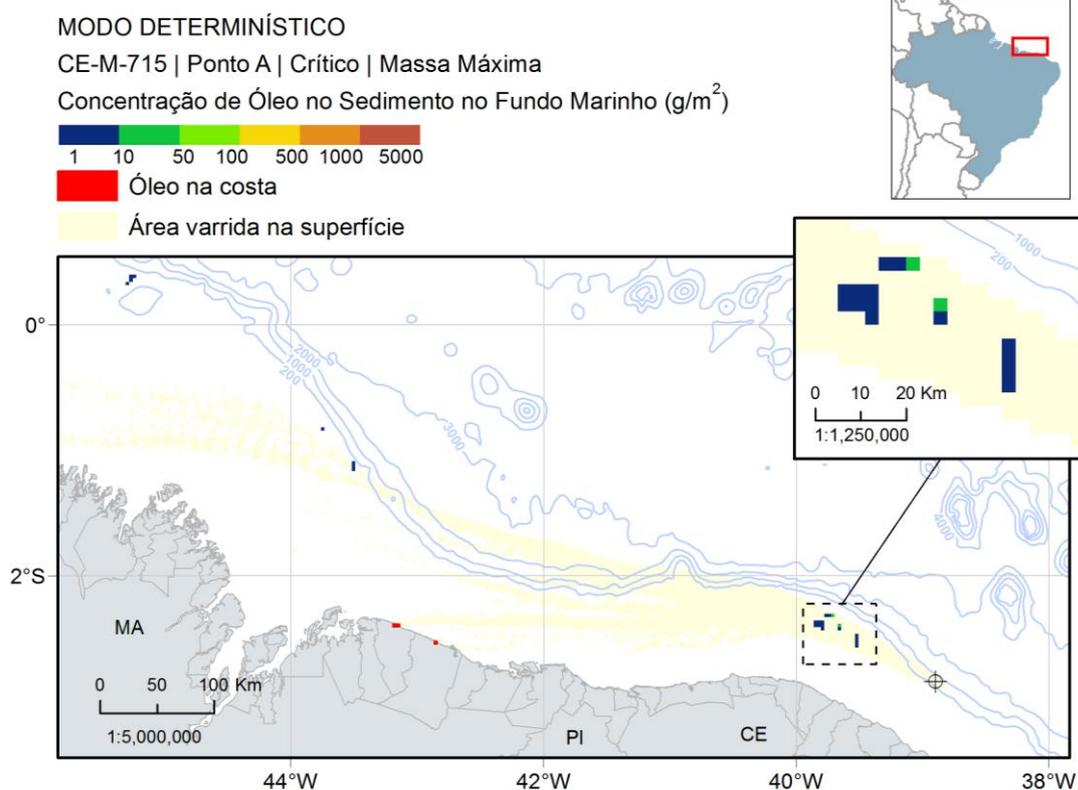


Figura 230: Mapa de concentração de óleo no sedimento no fundo marinho da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Vazamento de 13.307 m^3 a partir do poço Pinguim (Ponto A).

A deriva de óleo ocorre inicialmente para noroeste do ponto de vazamento e, após 40°W , parte da deriva ocorre para oeste pela ação dos ventos de leste e nordeste, e parte mantém deriva rumo a noroeste. Desta forma, o toque na costa é semelhante ao observado no cenário crítico de tempo mínimo, com chegada em Santo Amaro do Maranhão, porém em um tempo um pouco maior, de 15,38 dias. Ao final da simulação se observa uma pequena porção de óleo em superfície com espessuras acima de $0,3 \mu\text{m}$ próximo ao estado do Pará e acúmulo de óleo na costa nos municípios de Santo Amaro do Maranhão e Barreirinhas (MA).

Em relação à coluna d'água, as maiores concentrações foram verificadas entre 900 e 1.100 metros de profundidade, próximo ao ponto de vazamento, com valores máximos de 132,4 ppb, observados após 1 semana (168h). Nota-se concentrações acima de 20 ppb apenas próxima ao ponto de vazamento e na camada mais superficial da coluna d'água. Após o término do vazamento, em 1080 horas (45 dias), não são observados valores acima de 2 ppb ao longo da coluna d'água.

Já o óleo associado ao sedimento teve concentração máxima de $16,1 \text{ g/m}^2$ a cerca de 100 km de distância do ponto de vazamento, porém é observado óleo nos sedimentos até uma distância de 795 km.

A seguir, é apresentada a evolução temporal do balanço de massa do óleo e a evolução da área e a massa de óleo durante a simulação.

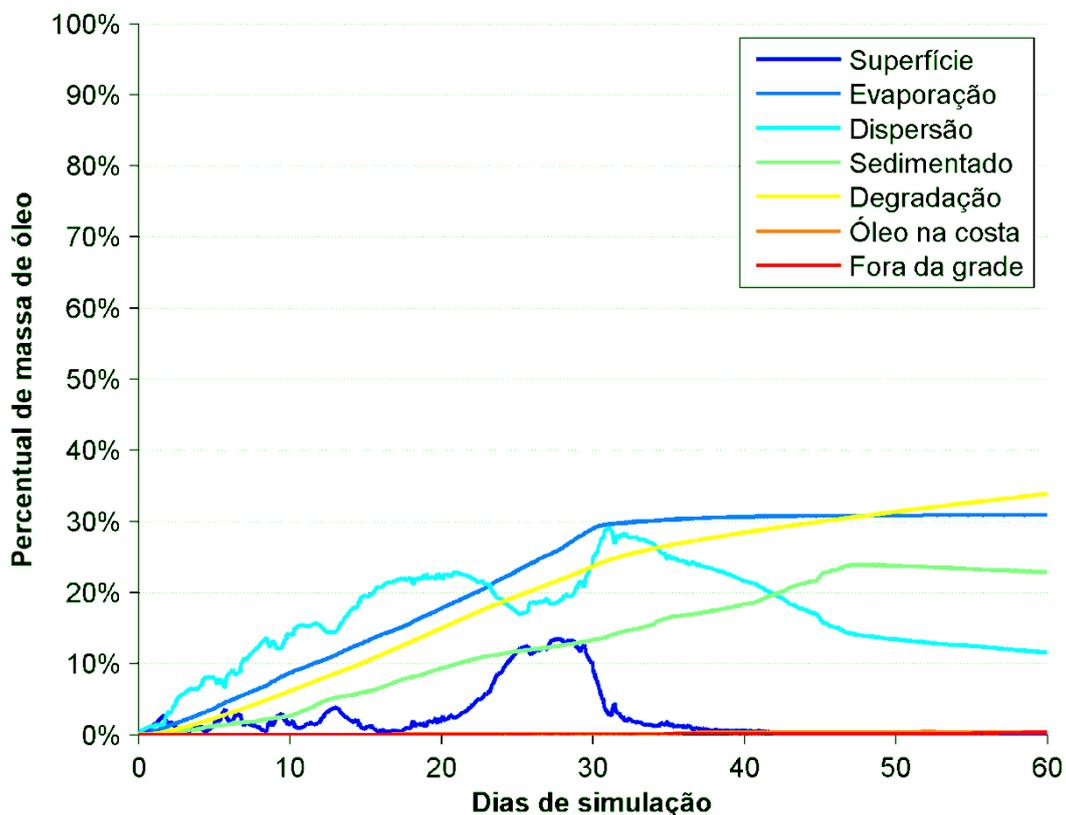


Figura 231: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condição crítica de maior massa acumulada na costa. Volume de 13.307 m³.

Tabela 45: 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 de grade (%)
12	0,56 (66 t)	0,17 (20 t)	0,90 (106 t)	-	0,04 (5 t)	-	-
36	2,39 (283 t)	0,87 (102 t)	1,41 (167 t)	0,00 (1 t)	0,32 (38 t)	-	-
60	0,72 (85 t)	1,67 (197 t)	4,85 (574 t)	0,32 (38 t)	0,78 (92 t)	-	-
168	1,52 (180 t)	5,65 (668 t)	10,60 (1253 t)	1,80 (212 t)	3,77 (446 t)	-	-
336	1,91 (225 t)	12,21 (1444 t)	17,55 (2075 t)	5,58 (659 t)	9,42 (1114 t)	-	-
504	2,54 (301 t)	18,77 (2220 t)	22,74 (2689 t)	9,97 (1179 t)	15,97 (1888 t)	0,01 (1 t)	-
720	9,17 (1084 t)	28,99 (3428 t)	24,73 (2924 t)	13,35 (1578 t)	23,70 (2803 t)	0,03 (4 t)	0,02 (3 t)
1080	0,20 (23 t)	30,79 (3641 t)	16,20 (1915 t)	22,39 (2648 t)	29,99 (3546 t)	0,36 (42 t)	0,07 (8 t)
1440	0,06 (7 t)	30,91 (3655 t)	11,58 (1369 t)	22,86 (2703 t)	33,90 (4009 t)	0,36 (42 t)	0,33 (39 t)

Os processos intempéricos mais importantes ao longo da simulação foram a evaporação e a degradação, retirando da superfície e da coluna d'água 31% e 34% do total vazado, respectivamente. O remanescente na superfície ao final da simulação foi inferior a 0,1% do total. Cerca de 23% ficou aderido aos sedimentos e 12% permaneceu na coluna d'água ao final de 60 dias. O óleo acumulado na costa foi em torno de 0,4% do total, equivalente a 42 toneladas.

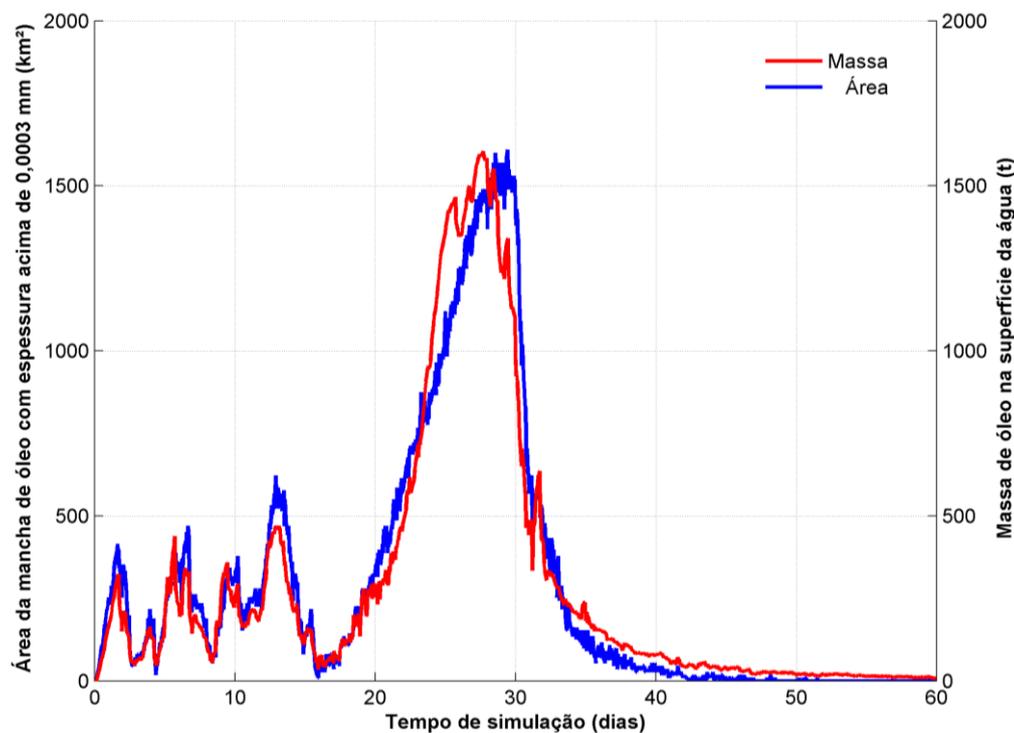


Figura 232: Área superficial da mancha de óleo e a massa de óleo na superfície do mar durante a simulação da trajetória em condição crítica de maior massa acumulada na costa.

Tabela 46: Área superficial, massa de óleo e a espessura máxima da mancha de óleo e a massa de óleo do óleo durante a simulação.

Tempo (h)	Área (km²)	Massa (t)	Espessura máxima (µm)
12	99,2	65,7	1,1
36	379,0	283,0	1,5
60	90,2	84,8	0,7
168	235,0	177,2	1,1
336	361,0	243,5	1,4
504	451,0	346,9	455,2
720	1420,0	989,8	388,9
1080	9,0	40,0	2106,5
1440	0,0	8,3	1856,6

O gráfico da área da mancha de óleo mostra um crescimento até aproximadamente 28 dias de simulação, iniciando em sequência um período de decaimento, com oscilações ao longo do tempo. Em 40 dias já não se observa manchas de óleo na superfície da água com espessuras acima de 0,3 µm.

A espessura máxima apresenta valores menores que 2 µm até o instante de 336 horas. Após esse instante, o óleo atinge a costa e aumenta a espessura máxima observada na área de estudo. O maior valor é observado em 45 dias de simulação. Após esse instante há um decaimento nos valores em função dos processos de retirada de óleo da costa.

3.3. Resumo dos resultados

De forma a auxiliar a análise dos resultados da modelagem de dispersão do óleo para todos os pontos de vazamento, a seguir são apresentados os principais resultados obtidos (Tabela 47).

Tabela 47: Resumo dos principais resultados obtidos na modelagem de dispersão de óleo no mar para os poços Gaivota e Pinguim.

Poço	Resultado	Verão		Inverno	
		Valor	Município	Valor	Município
Pinguim (Ponto A)	Maior Probabilidade de Presença de Óleo (%)	9,0	Santo Amaro do Maranhão (MA)	0,3	Soure (PA)
	Menor Tempo Mínimo de Chegada de Óleo (dias)	13,90	Santo Amaro do Maranhão (MA)	58,45	Soure (PA)
	Maior Massa Máxima de Óleo na costa (t/km)	4,0	Santo Amaro do Maranhão (MA)	0,8	Soure (PA)
Gaivota (Ponto B)	Maior Probabilidade de Presença de Óleo (%)	19,4	Santo Amaro do Maranhão (MA)	0,7	Soure e Curuçá (PA)
	Menor Tempo Mínimo de Chegada de Óleo (dias)	11,02	Santo Amaro do Maranhão (MA)	24,17	Cururupu (MA)
	Maior Massa Máxima de Óleo na costa (t/km)	6,6	Santo Amaro do Maranhão (MA)	1,2	Soure (PA)

4. Conclusão

O modelo numérico hidrodinâmico de coordenadas sigma ROMS foi implementado na região do Bloco CE-M-715, utilizando uma grade com resolução espacial de aproximadamente 6,5 km. As condições de contorno e iniciais implementadas no modelo numérico foram obtidas a partir dos resultados do MyOcean, com o modelo sendo forçado pelas variáveis atmosféricas da Reanálise I do NCEP e pelo modelo global de marés TPX07.

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

Após comparações com dados observados de várias fontes, relativos à temperatura de superfície do mar (TSM), 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-715. Neste pode-se obter as variações espaço-temporais da circulação, levando-se em conta mudanças sazonais, infra-sazonais e diurnas, o que garante aos resultados das simulações de transporte uma maior confiabilidade, pois estes irão contemplar uma ampla gama de situações ambientais ocorrentes na região de estudo.

Nas simulações probabilísticas, os períodos sazonais apresentaram comportamentos distintos. Enquanto no inverno a deriva em superfície é preferencialmente para noroeste junto à Corrente Norte do Brasil, no verão a menor intensidade desta corrente e os ventos de nordeste fazem com que a deriva também ocorra para oeste, em direção à costa, nos vazamentos de pior caso. Assim, no inverno são alcançados municípios mais distantes do ponto de vazamento, mas é no verão que são observadas as maiores probabilidades de presença de óleo, menores tempos de chegada e maiores massas de óleo. Nos vazamentos de 8 m³ e 200 m³ em ambos os cenários sazonais, não há toque de óleo na costa e a diferença na deriva em superfície, que é para noroeste, se dá numa extensão menor da área de probabilidade no verão.

Entre os dois pontos simulados, o vazamento a partir do poço Gaivota (Ponto B) apresentou maior número de municípios com probabilidade de toque, assim como o maior valor, de 19,4%, e o menor tempo de toque, de 11 dias (264 horas), em Santo Amaro do Maranhão (MA), no cenário de verão. No cenário de inverno, a maior probabilidade para o vazamento a partir do poço Gaivota (Ponto B) foi de 0,7% em Soure e Curuçá, no Pará, e o menor tempo foi de 24,17 dias (580 horas) em Cururupu, no Maranhão.

Na coluna d'água, as probabilidades máximas chegaram até 100% próximo ao ponto de vazamento e a área de probabilidade apresentou maior extensão do que a observada em superfície, chegando até a posição do vórtice anticiclônico a norte de 6°N mesmo no cenário de

verão. Em camadas mais profundas, para todos os pontos verifica-se que o óleo permanece em uma área mais restrita, próximo ao ponto de vazamento.

A área do fundo marinho com as maiores probabilidades de presença de óleo nos sedimentos ficou restrita a regiões do entorno do ponto de vazamento, mas há probabilidade de presença em outras regiões, chegando acima de 0,5° S.

Os resultados obtidos em relação ao intemperismo do óleo mostraram que nos vazamentos instantâneos ocorridos na superfície 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, mediana de 22% no geral. A sedimentação e a dispersão também são importantes processos, porém apresentam grande variabilidade dos valores. Nos vazamentos contínuos de fundo a degradação foi o processo mais relevante (mediana ~ 34%), seguido pela evaporação (mediana ~ 27%). A sedimentação e a dispersão também apresentaram grande variabilidade das porcentagens ao fim de 60 dias, entretanto com intensidade menor que a verificada nos vazamentos instantâneos.

Com base nos resultados do modo probabilístico, foram definidos dois cenários críticos para o vazamento de 13.307 m³ no bloco CE-M-715, um que representou o menor tempo de toque na costa e a outra a maior massa de óleo acumulada na costa. Ambos os cenários foram observados no período de verão, porém o de menor tempo foi para um vazamento a partir do ponto B e o de maior massa para um vazamento a partir do ponto A.

Nas duas simulações determinísticas, a deriva de óleo ocorre inicialmente para noroeste e depois parte do óleo deriva para oeste/sudoeste de encontro à costa, chegando primeiro no município de Santo Amaro do Maranhão (MA). Na coluna d'água, concentrações acima de 20 ppb foram observadas apenas próxima ao ponto de vazamento e na camada mais superficial da coluna d'água.

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.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. 2005. Resolução Conama nº 357. Disponível em:< www.mma.conama.gov.br/conama> Acesso em 01/04/2014.
- DA SILVA, A. P. F. ; CRUZ, L. M. ; FRAGOSO, M. ; DOS SANTOS, F. A. . Um Estudo Sobre o Número Ótimo de Simulações Numéricas para Elaboração dos Mapas de Probabilidade de Presença de Óleo no Mar Baseado na Variabilidade do Vento. In: III Congresso Brasileiro de Oceanografia, 2008, Fortaleza - CE. III Congresso Brasileiro de Oceanografia, 2008.
- DAI, A. AND TRENBERTH, K. E.: Estimates of freshwater discharge from continents: latitudinal and seasonal variations, J. Hydrometeorol., 3, 660–687, 2002.
- DALING, P. S. LEWIS, A. RAMSTAD, S. 1999. The Use of Colour as a Guide to Oil Film Thickness – Main Report. Report N° STF66 F99082. Trondheim, Norway. 48 pp.

- DELVIGNE G.A.L.; SWEENEY C.E.. Natural dispersion of Oil. Oil & Chemical Pollution 4 (1988) 281-310.
- EGBERT, G.D., EROFEEVA, S. Y, 2002: Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides, J. Atmos. Oceanic Technol., 19(2), 183-204.
- ELPN/IBAMA. Informação Técnica nº 023/2002. Modelagem de Derramamento de Óleo no Mar.
- ETKIN, D.S., FRENCH-MCCAY, D.; MICHEL, J. 2007. Review of the State-of-the-Art on Modeling Interactions between Spilled Oil and Shorelines for the Development of Algorithms for Oil Spill Risk Analysis Modeling. Available from BOEM Environmental Division, Branch of Environmental Sciences. OCS Study MMS 2007-063. 161 p.
- FAIRALL, C.W., E.F. BRADLEY, D.P. ROGERS, J.B. EDSON and G.S. YOUNG, 1996: Bulk parameterization of air-sea fluxes for tropical ocean-global atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment, J. Geophys. Res., 101, 3747-3764.
- FISCHER, H. B., E.J. LIST, H. C. Y. KOH, J. IMBERGER, AND N. A. BROOKS. 1979. Mixing in inland and coastal waters. Academic Press, New York.
- FLATHER, R.A., 1976. A tidal model of the North-West European continental shelf. Mém. Soc. R. Soc. Liège 9, 141–164.
- 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.
- 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.
- MARANHÃO (Estado). Lei nº 10.171, de 12 de dezembro de 2014. *Diário Oficial do Estado, São Luís, MA, ano CVIII, nº 244, 16 de dezembro de 2014. p.1.*
- MARANHÃO (Estado). Lei nº 10.172, de 12 de dezembro de 2014. *Diário Oficial do Estado, São Luís, MA, ano CVIII, nº 244, 16 de dezembro de 2014. p.2.*

- 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, 2013, Ocean Monitoring and Forecasting. http://www.myocean.eu/web/69-myocean-interactive-catalogue.php/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHYS_001_002
- OSPAR Commission. 2010. North Sea Manual on Maritime Oil Pollution Offences. ISBN 978-1-906840-45-7. Publication Number: 405/2009. 87 pp.
- PELIZ, A., J. DUBERTt, D. B. HAIDVOGEL, 2003: Subinertial Response of a Density-Driven Eastern Boundary Poleward Current to Wind Forcing, J. Phys. Oceanogr., 33, 1633-1650.
- REED, M. 2001. Technical Description and Verification Tests of OSCAR 2000, a Multi-Component 3-Dimensional Oil Spill Contingency And Response Model. SINTEF Report. 52p.
- REED, M., AAMO, O. M., DOWNING, K. (1996): Calibration and Testing of IKU's Oil Spill Contingency and Response (OSCAR) Model System. Proceedings of the 1996 Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, pp.689-726.
- REED, M.; DALING, P.; LEWIS, A.; DITLEVSEN, M. K.; BRØRS, B.; CLARK, J.; AURAND, D. 2004. Modelling of dispersant application to oil spills in shallow coastal waters. Environmental Modelling & Software, v. 19, p. 681-690.
- REED, M. 2000; SINGSAAS, I.; DALING, P.S; FAKNES, L; BRAKSTAD, O.G.; HETLAND, B. A.; HOKSTAD, J. 2000. Modeling the Water-Accommodated Fraction in OSCAR2000. In: 2001 International Oil Spill Conference. Computer Technology and Oil Spills. SINTEF Report. pp.1083-1091.
- REED, M.; JOHANSEN, Ø.; BRANDVIK, P. J.; DALING, P.; LEWIS, A.; FIOCCO, R.; MACKAY, D.; PRENTKI, R. 1999. Oil Spill Modelling towards the Close of the 20th Century: Overview of the State of the Art. Spill Science and Technology Bulletin, 5 (1): pp 3-16.

- SEBASTIÃO, P.; SOARES, C. G. 1995. Modeling the Fate of Oil Spills at Sea. *Spill Science and Technology Bulletin*, 2 (2): pp 121-131.
- SHCHEPETKIN, 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.
- 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 1: MAPA DE DETALHAMENTO DA LINHA DE COSTA