

II.6. MODELAGEM NUMÉRICA

II.6.1. Modelagem da Dispersão de Óleo e Dispersão de Poluentes

Esse item foi elaborado pela empresa PROOCEANO, de acordo com o Termo de Referência (TR) SEI Nº 7284259, específico para a Atividade de Perfuração Marítima de Poços no Bloco C-M-541, na Bacia de Campos, e encontra-se apresentado a seguir.



Relatório Técnico [rev.00]

Modelagem Hidrodinâmica e Dispersão de Óleo

Bloco C-M-541 | Bacia de Campos

Preparado para: TOTAL

Preparado por: Flávia Pozzi Pimentel

Ana Carolina Rochinha Boechat

Henery Ferreira Garção

Júlio Pellegrini

Lívia Sant'Angelo Mariano

Marcelo Montenegro Cabral

25 de agosto de 2020

Prooceano

Av. Rio Branco, 311/1205 – Centro

CEP 20.040-009 – Rio de Janeiro – RJ

Tel./Fax +55 21 2532.5666

www.prooceano.com.br

© PROOCEANO 2020

The copyright in this document is vested in Prooceano. This document may only be reproduced in whole or in part, or stored in a retrieval system, or transmitted in any form, or by any means electronic, mechanical, photocopying or otherwise, with the prior permission of PROOCEANO.

Os direitos autorais deste documento são propriedade da PROOCEANO. Este documento somente poderá ser reproduzido inteiro ou em partes, ou armazenado, ou transmitido em qualquer forma, ou por quaisquer meios: eletrônico, mecânico, fotocópia ou qualquer outro modo, com a permissão prévia da PROOCEANO.

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

Sumário Executivo.....	15
1. Introdução	18
2. Modelagem Hidrodinâmica	20
3. Modelagem de Dispersão de Óleo	35
3.1. Metodologia	36
3.2. Resultados	54
3.3. Conclusão	128
4. Bibliografia	130
Anexos	132

Índice das imagens

Figura 1: Isolinha de 30% de probabilidade dos resultados integrados do Período 1 e 2 das simulações com vazamento de <i>blowout</i> (651.248 m ³).....	16
Figura 2: Localização do poço exploratório considerado como ponto de risco e utilizado na modelagem (em vermelho) e o Bloco C-M-541 (em azul), na Bacia de Campos.....	18
Figura 3: Campo médio de circulação para o mês de janeiro. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.....	21
Figura 4: Campo médio de circulação para o mês de fevereiro. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.	22
Figura 5: Campo médio de circulação para o mês de março. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.....	23
Figura 6: Campo médio de circulação para o mês de abril. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.....	24
Figura 7: Campo médio de circulação para o mês de maio. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.....	25
Figura 8: Campo médio de circulação para o mês de junho. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.....	26
Figura 9: Campo médio de circulação para o mês de julho. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.....	27
Figura 10: Campo médio de circulação para o mês de agosto. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.....	28
Figura 11: Campo médio de circulação para o mês de setembro. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.	29
Figura 12: Campo médio de circulação para o mês de outubro. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.	30
Figura 13: Campo médio de circulação para o mês de novembro. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.	31
Figura 14: Campo médio de circulação para o mês de dezembro. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.	32
Figura 15: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o Bloco C-M-541.	33

Figura 16: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o Bloco C-M-541...	34
Figura 17: Representação do limite da grade de óleo (linha vermelha tracejada).	40
Figura 18: Grade de batimetria utilizada na simulação.	41
Figura 19: Localização dos pontos de grade do ERA5 (em vermelho) em relação ao ponto de vazamento. Ponto em azul é o mais próximo do ponto de vazamento.	44
Figura 20: Rosa dos ventos para os 12 meses do ano para o ponto mais próximo ao ponto de vazamento.	45
Figura 21: Rosa de correntes para os 12 meses do ano para o ponto mais próximo ao ponto de vazamento.	47
Figura 22: Perfis de salinidade e temperatura para o ponto de grade mais próximo ao ponto de vazamento.	50
Figura 23: Séries temporais das componentes “u” e “v” do vento para o ponto de vazamento e o número de zeros ascendentes presentes nas séries.	52
Figura 24: Exemplos de quatro trajetórias de derramamentos individuais para um cenário de vazamento genérico (à esquerda). Centenas de trajetórias individuais são sobrepostas umas sobre as outras, como mostrado à direita para calcular os resultados estocásticos (probabilidade, tempos mínimos de chegada, massa máxima de óleo encalhado na costa, etc.).	54
Figura 25: Mapa de probabilidade de presença de óleo e tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para o vazamento de 8 m ³ . Período 1 (setembro a fevereiro). Simulação de 720 horas (30 dias).	57
Figura 26: Mapa de probabilidade de presença de óleo na coluna d’água para vazamento de 8 m ³ . Período 1 (setembro a fevereiro). Simulação de 720 horas (30 dias).	58
Figura 27: Balanço de massa das simulações probabilísticas para vazamento de 8 m ³ . Período 1 (setembro a fevereiro). Simulação de 720 horas (30 dias).	58
Figura 28: Mapa de probabilidade de presença de óleo e tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para o vazamento de 8 m ³ . Período 2 (março a agosto). Simulação de 720 horas (30 dias).	59
Figura 29: Mapa de probabilidade de presença de óleo na coluna d’água para vazamento de 8 m ³ . Período 2 (março a agosto). Simulação de 720 horas (30 dias).	60
Figura 30: Balanço de massa das simulações probabilísticas para vazamento de 8 m ³ . Período 2 (março a agosto). Simulação de 720 horas (30 dias).	60

Figura 31: Mapa de probabilidade de presença de óleo e tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para o vazamento de 200 m ³ . Período 1 (setembro a fevereiro). Simulação de 720 horas (30 dias).	62
Figura 32: Mapa de probabilidade de presença de óleo na coluna d'água para vazamento de 200 m ³ . Período 1 (setembro a fevereiro). Simulação de 720 horas (30 dias).	63
Figura 33: Balanço de massa das simulações probabilísticas para vazamento de 200 m ³ . Período 1 (setembro a fevereiro). Simulação de 720 horas (30 dias).	63
Figura 34: Mapa de probabilidade de presença de óleo e tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para o vazamento de 200 m ³ . Período 2 (março a agosto). Simulação de 720 horas (30 dias).	64
Figura 35: Mapa de probabilidade de presença de óleo na coluna d'água para vazamento de 200 m ³ . Período 2 (março a agosto). Simulação de 720 horas (30 dias).	65
Figura 36: Balanço de massa das simulações probabilísticas para vazamento de 200 m ³ . Período 2 (março a agosto). Simulação de 720 horas (30 dias).	65
Figura 37: Mapas de probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para o vazamento de <i>blowout</i> . Período 1 (setembro a fevereiro). Simulação de 60 dias.	68
Figura 38: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água e perfil vertical, em latitude, para o vazamento de <i>blowout</i> . Período 1 (setembro a fevereiro). Simulação de 60 dias.	69
Figura 39: Mapa de concentração máxima de óleo na coluna d'água e perfil vertical, em latitude, para o vazamento de <i>blowout</i> . Período 1 (setembro a fevereiro). Simulação de 60 dias.	70
Figura 40: Mapa de probabilidade de presença de óleo no fundo marinho para o vazamento de <i>blowout</i> . Período 1 (setembro a fevereiro). Simulação de 60 dias.	71
Figura 41: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de <i>blowout</i> . Período 1 (setembro a fevereiro). Simulação de 60 dias.	72
Figura 42: Mapa de probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para o vazamento de <i>blowout</i> . Período 2 (março a agosto). Simulação de 60 dias.	73
Figura 43: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água e perfil vertical em latitude para o vazamento de <i>blowout</i> . Período 2 (março a agosto). Simulação de 60 dias.	74
Figura 44: Mapa de concentração máxima de óleo na coluna d'água e perfil vertical em latitude para o vazamento de <i>blowout</i> . Período 2 (março a agosto). Simulação de 60 dias.	75

Figura 45: Mapa de probabilidade de presença de óleo no fundo marinho e na costa para o vazamento de <i>blowout</i> . Período 2 (março a agosto). Simulação de 60 dias.....	76
Figura 46: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de <i>blowout</i> . Período 2 (março a agosto). Simulação de 60 dias.....	77
Figura 47: Rosa dos ventos para o período de simulação da situação de menor tempo de toque na costa.	80
Figura 48: Rosa de corrente para o período de simulação da situação de menor tempo de toque na costa.	81
Figura 49: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 12 horas do início do vazamento. Resultado de concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m ³	82
Figura 50: 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 651.248 m ³	83
Figura 51: 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 651.248 m ³	84
Figura 52: 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 651.248 m ³	85
Figura 53: 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 651.248 m ³	86
Figura 54: 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 651.248 m ³	87
Figura 55: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 612 horas (tempo do primeiro toque) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m ³	88

- Figura 56: 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 651.248 m³. ... 89
- Figura 57: 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 e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³. ... 90
- Figura 58: 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 e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³. ... 91
- Figura 59: Concentração de óleo no sedimento após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento na simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada de óleo na costa. Vazamento de 651.248 m³. 92
- Figura 60: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condição crítica de menor tempo de chegada. Vazamento de 651.248 m³. 93
- Figura 61: 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. 94
- Figura 62: Rosa dos ventos para o período de simulação da situação que resultou na maior massa de óleo acumulada na costa. 96
- Figura 63: Rosa de corrente para o período de simulação da situação que resultou em maior massa de óleo acumulada na costa. 97
- Figura 64: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 12 horas do início do vazamento. Resultado de concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³. 98
- Figura 65: 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 651.248 m³. ... 99
- Figura 66: 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 651.248 m³. . 100
- Figura 67: 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 651.248 m³. 101

Figura 68: 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 651.248 m ³	102
Figura 69: 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 651.248 m ³	103
Figura 70: 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 651.248 m ³	104
Figura 71: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 1049 horas (Primeiro toque de óleo na costa) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m ³	105
Figura 72: 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 651.248 m ³	106
Figura 73: 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 e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m ³	107
Figura 74: Concentração de óleo no sedimento após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento na simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa. Vazamento de 651.248 m ³	108
Figura 75: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condição crítica de maior massa acumulada na costa. Vazamento de 651.248 m ³	109
Figura 76: 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.	110
Figura 77: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 1. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.....	114

Figura 78: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 2. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.....	115
Figura 79: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 1. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.	116
Figura 80: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 2. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.	117
Figura 81: Isolinhas de 30% de probabilidade de presença de óleo para a simulação com biodegradação (em azul) e sem biodegradação (em vermelho) em superfície (à esquerda) e na coluna d'água (à direita). Período 1.....	118
Figura 82: Isolinhas de 30% de probabilidade de presença de óleo para a simulação com biodegradação (em azul) e sem biodegradação (em vermelho) em superfície (à esquerda) e na coluna d'água (à direita). Período 2.....	119
Figura 83: Perfil latitudinal de probabilidade de presença de óleo na coluna d'água para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 1. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.	120
Figura 84: Perfil latitudinal de probabilidade de presença de óleo na coluna d'água para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 2. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.	121
Figura 85: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo no fundo marinho para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 1. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.	122
Figura 86: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo no fundo marinho para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 2. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.	123
Figura 87: Balanço de massa para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 1. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.....	124
Figura 88: Balanço de massa para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 2. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.....	125

Índice das tabelas

Tabela 1: Características do ponto de vazamento considerado na modelagem no Bloco C-M-541, na Bacia de Campos (<i>Datum</i> SIRGAS 2000).	19
Tabela 2: Resumo dos cenários de vazamento simulados.	35
Tabela 3: Características do óleo utilizado nas simulações.	38
Tabela 4: Componentes do óleo do banco de dados do OSCAR.	39
Tabela 5: Ocorrência mensal (%) de direção dos ventos para o ponto mais próximo ao ponto de vazamento.	46
Tabela 6: Ocorrência mensal (%) de intensidade dos ventos para o ponto mais próximo ao ponto de vazamento.	46
Tabela 7: Ocorrência mensal (%) de direção das correntes para o ponto mais próximo ao ponto de vazamento.	48
Tabela 8: Ocorrência mensal (%) de intensidade das correntes para o ponto mais próximo ao ponto de vazamento.	48
Tabela 9: Parâmetros numéricos utilizados no modelo de dispersão de óleo.....	53
Tabela 10: Probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada, massa máxima e extensão de toque nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um vazamento de <i>blowout</i> , nos cenários de Período 1 e Período 2, com degradação.	78
Tabela 11: Probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas Unidades de Conservação com possibilidade de serem atingidas para o vazamento de <i>blowout</i> , nos cenários de Período 1 e Período 2, com degradação.	78
Tabela 12: Informações das simulações determinísticas críticas consideradas para um evento de vazamento de óleo de grande volume (651.248 m ³), com degradação.	79
Tabela 13: 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.	80
Tabela 14: Estatística do vento para o período da condição de menor tempo de toque na costa.	80
Tabela 15: 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.	81

Tabela 16: Estatística de corrente para o período da condição de menor tempo de toque na costa.	81
Tabela 17: Balanço de massa do óleo durante a simulação em valores percentuais e de massa de óleo em condição crítica de menor tempo de chegada.	93
Tabela 18: Área superficial, massa de óleo e a espessura máxima da mancha de óleo durante a simulação em condição crítica de menor tempo de chegada.	94
Tabela 19: Ocorrência conjunta entre direção e intensidade dos ventos para o ponto mais próximo do local do vazamento para o período que resultou na maior massa de óleo acumulada na costa.	96
Tabela 20: Estatística do vento para o período da condição de maior massa de óleo acumulada na costa.	96
Tabela 21: 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.	97
Tabela 22: Estatística de corrente para o período da condição de maior massa de óleo acumulada na costa.	97
Tabela 23: Balanço de massa do óleo durante a simulação em valores percentuais e de massa de óleo em condição crítica de maior massa acumulada na costa.	109
Tabela 24: Área superficial, massa de óleo e a espessura máxima da mancha de óleo e a massa de óleo do óleo durante a simulação em condição crítica de maior massa acumulada na costa.	110
Tabela 25: Probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada, massa máxima e extensão de toque nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um vazamento de <i>blowout</i> , nos cenários de Período 1 e Período 2, com degradação	126
Tabela 26: Probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada, massa máxima e extensão de toque nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um vazamento de <i>blowout</i> , nos cenários de Período 1 e Período 2, sem degradação	126
Tabela 27: Probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas Unidades de Conservação com possibilidade de serem atingidas para o vazamento de <i>blowout</i> , nos cenários de Período 1 e Período 2, com degradação	127
Tabela 28: Probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas Unidades de Conservação com possibilidade de serem atingidas para o vazamento de <i>blowout</i> , nos cenários de Período 1 e Período 2, sem degradação	127

Equipe técnica

Nome: Ana Carolina Rochinha Boechat

Registro no Conselho de Classe: -

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 4961307

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

Assinatura: Ana Carolina Rochinha Boechat

Nome: Júlio Augusto de Castro Pellegrini

Registro no Conselho de Classe: -

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 210325

Responsável pela(s) Seção(ões): Todas

Assinatura: Júlio Augusto de Castro Pellegrini

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: Henery Ferreira Garção

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: Lívia Sant'Angelo Mariano

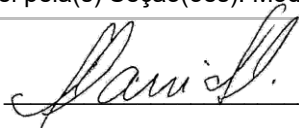
Nome: Flávia Pozzi Pimentel

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:



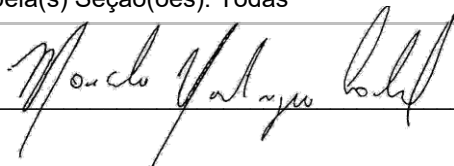
Nome: Marcelo Montenegro Cabral

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:



Sumário Executivo

O presente relatório descreve os resultados obtidos na modelagem numérica de transporte de óleo no mar para os cenários acidentais de vazamento a partir de um ponto de risco localizado no Bloco C-M-541, na Bacia de Campos.

O principal objetivo do presente estudo de modelagem foi dar subsídio para o processo de licenciamento ambiental no referido bloco e elaboração do plano de emergência do empreendimento. Para isso, foram avaliados o comportamento da deriva e o intemperismo do óleo, bem como suas variações ao longo do tempo e de forma tridimensional no ambiente marinho, avaliando os resultados de vazamentos de óleo a partir da superfície para os cenários de menores volumes (8 e 200 m³) e para vazamento de fundo nos cenários de pior caso (651.248 m³).

Para cumprir esse objetivo, o estudo foi dividido em duas etapas. A primeira consistiu na análise das características meteorológicas e simulações hidrodinâmicas da região, mais especificamente dos parâmetros capazes de afetar o comportamento do óleo derramado. Na segunda etapa foram realizadas simulações de dispersão de óleo, para dois períodos ao longo do ano, definidos a partir das condições meteoceanográficas características da região.

O bloco em estudo está localizado em uma região profunda, afastada da região principal do fluxo do sistema da Corrente do Brasil (CB); contudo, a região de estudo é dominada pela circulação associada ao sistema e pelos meandros e vórtices formados por esta corrente. Nas camadas mais superficiais predominam correntes para sul, ao longo do talude continental, enquanto em profundidades intermediárias encontra-se o fluxo para norte da Corrente de Contorno Intermediária (CCI). O padrão característico das condições meteorológicas na região é dominado pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), com predominância de ventos do primeiro quadrante, e pela passagem de sistemas frontais (frentes frias), quando há ocorrência de ventos do terceiro quadrante.

A divisão sazonal adotada neste estudo, em que o Período 1 compreende os meses de setembro a fevereiro e o Período 2 os meses de março a agosto, baseia-se, portanto, nas variações destes sistemas, meteorológico e oceanográfico, ao longo do ano. Em geral, em ambos os períodos se observa predominância de ventos de NNE e NE. No Período 2, porém, há uma variação maior das direções. Em relação às correntes na região do ponto de vazamento, é observada uma variação de suas direções, bem como intensidades fracas, menores que 0,2 m/s, em ambos os períodos.

As simulações de dispersão de óleo para o pior caso seguiram a solicitação de considerar o vazamento contínuo, com a vazão máxima por 30 dias, sem intervenção/contingência, e outros 30 dias adicionais após o término do vazamento, sem ações de resposta. Portanto, as

simulações não consideram atividades de mitigação para controle do vazamento através do fechamento do poço ou outras ações para interromper, combater ou restringir o vazamento.

A partir dos resultados das simulações de dispersão de óleo obtidos, tem-se que nos vazamentos de 8 m³ e 200 m³, as áreas de probabilidade de presença de óleo em superfície se mantiveram em regiões mais profundas que 1.000 m, enquanto que nos vazamentos de pior caso são observadas probabilidades sobre a plataforma continental de até 60-70%.

Nestes cenários de maior volume, as maiores probabilidades foram preferencialmente na direção sudoeste, influenciadas pelo fluxo principal da Corrente do Brasil (CB) e pelos ventos de nordeste. Apesar de o vazamento ocorrer em uma região profunda, a simulação indica que parte do óleo se espalha pela região do fluxo principal da CB, que transporta a mancha para sudoeste e para regiões mais rasas da plataforma continental.

As probabilidades acima de 30% em superfície, considerando ambos os períodos, se mantiveram a uma distância maior que 45 km da costa (Figura 1).

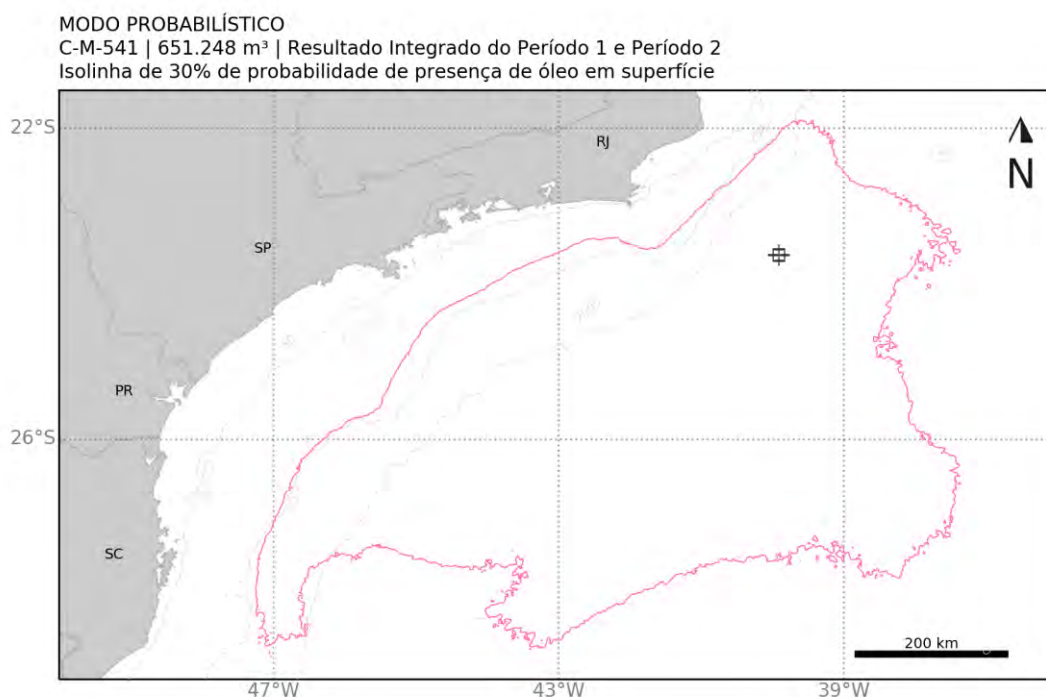


Figura 1: Isolinha de 30% de probabilidade dos resultados integrados do Período 1 e 2 das simulações com vazamento de *blowout* (651.248 m³).

Entre todas as simulações, somente o vazamento de pior caso do Período 2 apresentou probabilidade de chegada de óleo na costa, em sete municípios do Espírito Santo e dois municípios no Rio de Janeiro, com máximo de 4,7% e tempo mínimo de chegada de 25,5 dias, no município de Armação de Búzios-RJ.

Em relação às Unidades de Conservação, verificou-se que há probabilidade de chegada em apenas uma unidade no Período 1, enquanto há probabilidade de chegada de óleo em 13 unidades no Período 2 (maior probabilidade de toque de 4,7% e o menor tempo de chegada em 25,5 dias na PE da Costa do Sol).

Em todas as simulações probabilísticas a partir da superfície (de 8 m³ e 200 m³), a evaporação e a dispersão na coluna d'água se mostraram os principais processos de intemperismo responsáveis pela retirada do óleo da superfície do mar. Todavia, nos cenários de pior caso, por se tratar de um vazamento de fundo, a degradação e a dispersão do óleo na coluna d'água foram os processos de intemperismo mais significantes.

A modelagem incluiu a avaliação das concentrações de óleo para os piores cenários de descarga, onde os resultados indicam que as concentrações da coluna d'água de óleo disperso podem chegar acima de 20 partes por bilhão (ppb) nos dois períodos (1 e 2).

Ao longo da coluna d'água, o maior espalhamento horizontal do óleo ocorre próximo à superfície, no entanto probabilidades entre 90 e 100% são observadas na região do entorno do vazamento (30 km), da profundidade local, de 3.020 m, até a superfície. Valores de concentração acima de 500 ppb são observados, principalmente, próximos do ponto de vazamento, tanto nas camadas mais rasas (menos de 100 metros da superfície) quanto abaixo de 2.000 metros.

No fundo marinho são observadas probabilidades de 100% no local do vazamento e valores sobre a plataforma continental de até 50-60% no Período 1 e de 30-40% no Período 2.

Todos os resultados aqui apresentados consideraram o processo intempérico da biodegradação, porém, o desligamento do intemperismo foi também avaliado nas simulações e os resultados comparados. Visto a permanência dos padrões dos resultados das modelagens com e sem o processo de biodegradação, principalmente do que tange à curva de probabilidade acima de 30% em superfície, acredita-se na consistência dos resultados considerando a ocorrência de biodegradação.

1. Introdução

O presente relatório descreve os resultados obtidos na modelagem numérica de transporte de óleo no mar para os cenários acidentais de vazamento a partir de um ponto de risco localizado no Bloco C-M-541, na Bacia de Campos.

A localização do ponto de vazamento, assim como a localização do bloco, é apresentada na Figura 2 e na Tabela 1. A seleção do ponto de vazamento se baseou no maior potencial de volume de óleo vazado dentre os poços proposto para o licenciamento, de acordo com as análises geológicas feitas para o bloco C-M-541, uma vez que os poços se encontram quase que equidistantes da costa.

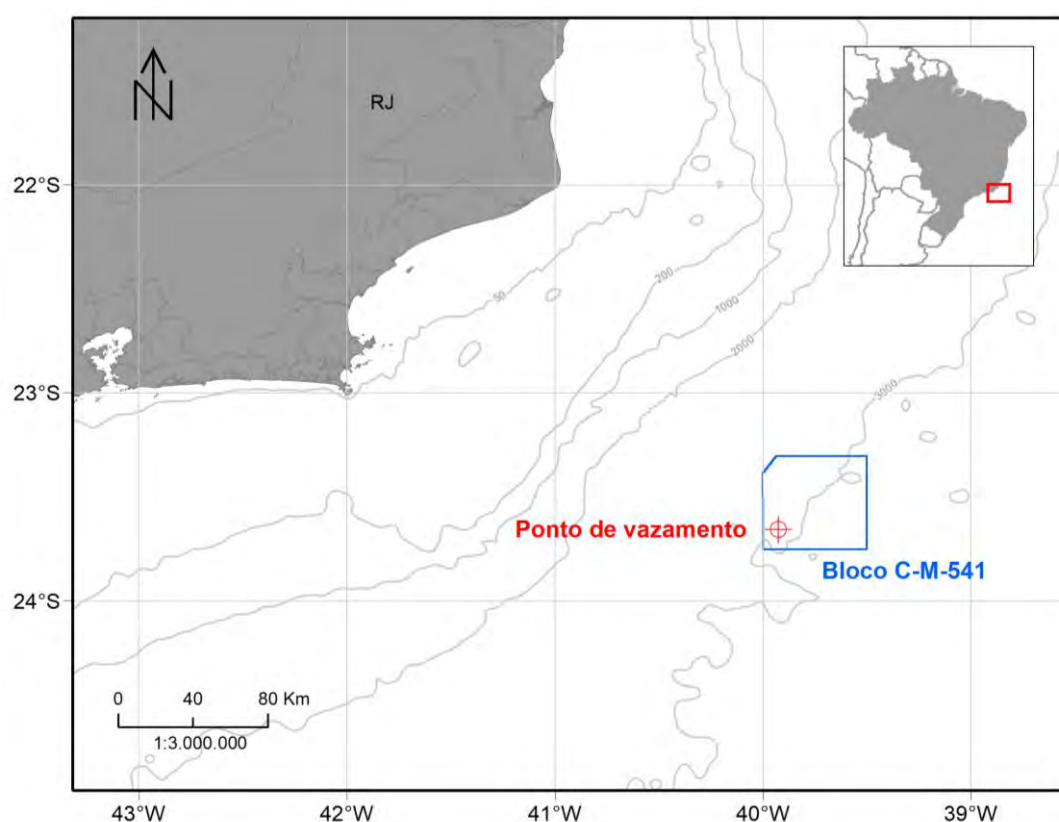


Figura 2: Localização do poço exploratório considerado como ponto de risco e utilizado na modelagem (em vermelho) e o Bloco C-M-541 (em azul), na Bacia de Campos.

Tabela 1: Características do ponto de vazamento considerado na modelagem no Bloco C-M-541, na Bacia de Campos (*Datum* SIRGAS 2000).

Latitude	Longitude	Profundidade (m)
23° 38' 52,07" S	39° 54' 34,84" W	3.020

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

Na segunda etapa foi realizada a simulação da dispersão do óleo para as condições meteorológicas e oceanográficas características da região, estimando o comportamento do óleo vazado em cada uma delas (item Modelagem de Dispersão de Óleo).

Os resultados principais da modelagem de dispersão de óleo apresentados consideraram todos os processos intempéricos do óleo, inclusive a biodegradação, seguindo o padrão usualmente adotado ao longo dos últimos anos. Entretanto, com o intuito de antecipar possíveis questionamentos, e visto recentes orientações do IBAMA solicitando o desligamento da biodegradação, no item 3.2.3 (Análise Comparativa dos Resultados com e sem Biodegradação) apresenta-se uma comparação dos resultados.

Ressalta-se que os sistemas de modelagem, as metodologias e as análises empregados neste documento estão alinhadas com os requisitos da norma internacional ASTM F2067-13 para desenvolvimento e uso de modelos de trajetórias de derramamentos de óleo (ASTM, 2013).

2. Modelagem Hidrodinâmica

A descrição da modelagem hidrodinâmica utilizada como forçante para a modelagem de transporte de óleo deste estudo, e seus resultados para todo o domínio do modelo, são apresentados no Anexo I.

A seguir são apresentados os campos médios mensais obtidos a partir dos resultados do modelo, com detalhe para a região do Bloco C-M-541, na Bacia de Campos.

Conforme descrito na caracterização meteorológica realizada por Carvalho (2003), o padrão característico das condições meteorológicas na plataforma continental sudeste brasileira é dominado pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e pela passagem de sistemas frontais (frentes frias). Devido ao caráter permanente do ASAS, ventos de NE são predominantes durante o ano, com intensidade média de 5,5 a 8 m/s. Durante a passagem de frentes frias, os ventos sobre a plataforma se invertem para o quadrante Sul (principalmente SW e W/SW), podendo atingir até 20 m/s. A passagem de frentes frias ocorre com uma média de 3 a 6 vezes por mês (intervalo entre frentes de 5 a 10 dias), com maior frequência durante os meses de inverno.

As correntes sobre a plataforma continental se encontram em um equilíbrio dinâmico com os ventos sobrejacentes e apresentam conhecida sazonalidade. Durante o predomínio do ASAS, os ventos paralelos à costa são responsáveis pelo transporte das correntes superficiais em direção ao mar aberto, resultando em um abaixamento do nível do mar junto à costa. Esse abaixamento do nível gera uma força de gradiente de pressão em direção à costa que, ao entrar em equilíbrio com a força de Coriolis, resulta em uma corrente paralela a esta e na mesma direção do vento, fluindo com sentido sul. Durante a passagem de frentes frias, esse equilíbrio se dá no sentido inverso e a corrente resultante também é no sentido do vento, fluindo paralela à costa, mas agora com sentido norte (CASTRO FILHO, 1990 *apud* CARVALHO, 2003). A maior frequência de passagem de frentes frias no período de inverno resulta em uma corrente costeira residual sobre a plataforma (a Corrente Costeira do Brasil, ou CCB), com direção nordeste, que transporta água mais fria e rica em nutrientes até a latitude 24°S (MENDONÇA *et al.*, 2016; SOUZA & ROBINSON, 2004). No verão, o predomínio da influência do ASAS resulta em uma corrente residual com direção sul.

Explorando a circulação ao largo (depois da quebra do talude), tem-se o domínio da Corrente do Brasil (CB). A CB é a corrente de contorno oeste que completa o giro do Atlântico Sul; é formada entre 10°S e 20°S pela bifurcação da porção sul da Corrente Sul Equatorial e flui em um padrão meandrante para sudoeste, na região do talude continental até a confluência Brasil-Malvinas (PETERSON & STRAMMA, 1991). Na região do litoral norte do Rio de Janeiro, a orientação da costa sofre uma brusca mudança e, com isso, o padrão meandrante da CB é acentuado, dando origem a vórtices ciclônicos e anticiclônicos.

A costa sul do Brasil é influenciada por variações sazonais nos padrões de ventos e correntes, destacando-se a circulação associada às correntes de contorno oeste, a posição da Convergência Subtropical e a descarga continental (SEELIGER & ODEBRECHT, 1998).

Os padrões descritos acima para a região oceânica e para a circulação sobre a plataforma podem ser bem observados nos campos médios mensais apresentados da Figura 3 à Figura 14, indicando que o modelo representou, de forma adequada, os padrões de circulação esperados para a área de estudo.

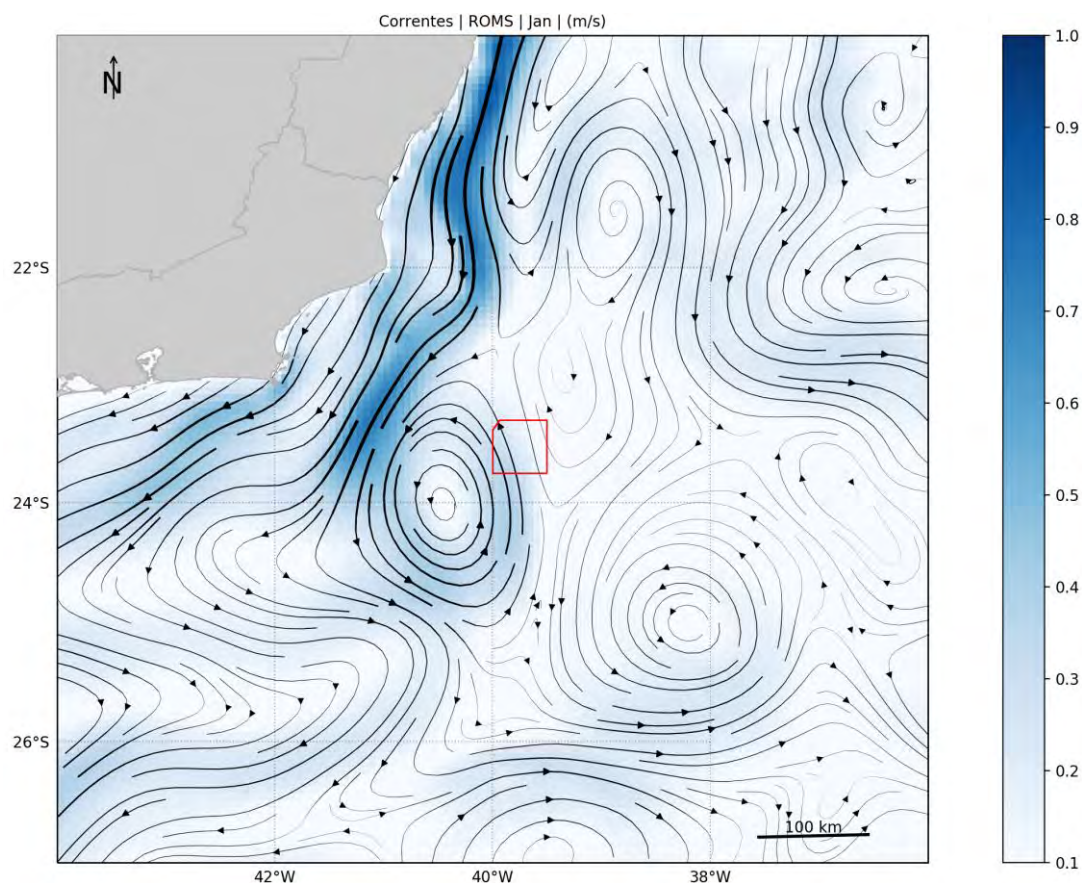


Figura 3: Campo médio de circulação para o mês de janeiro. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.

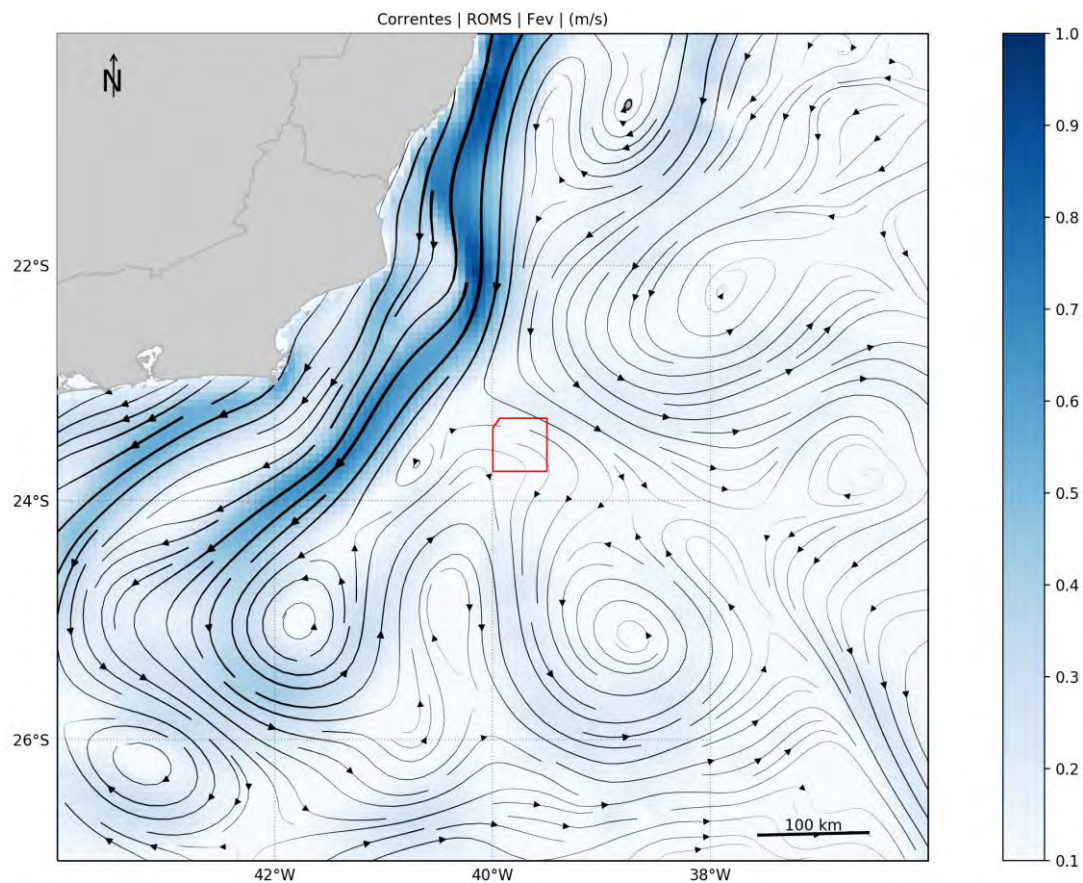


Figura 4: Campo médio de circulação para o mês de fevereiro. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.

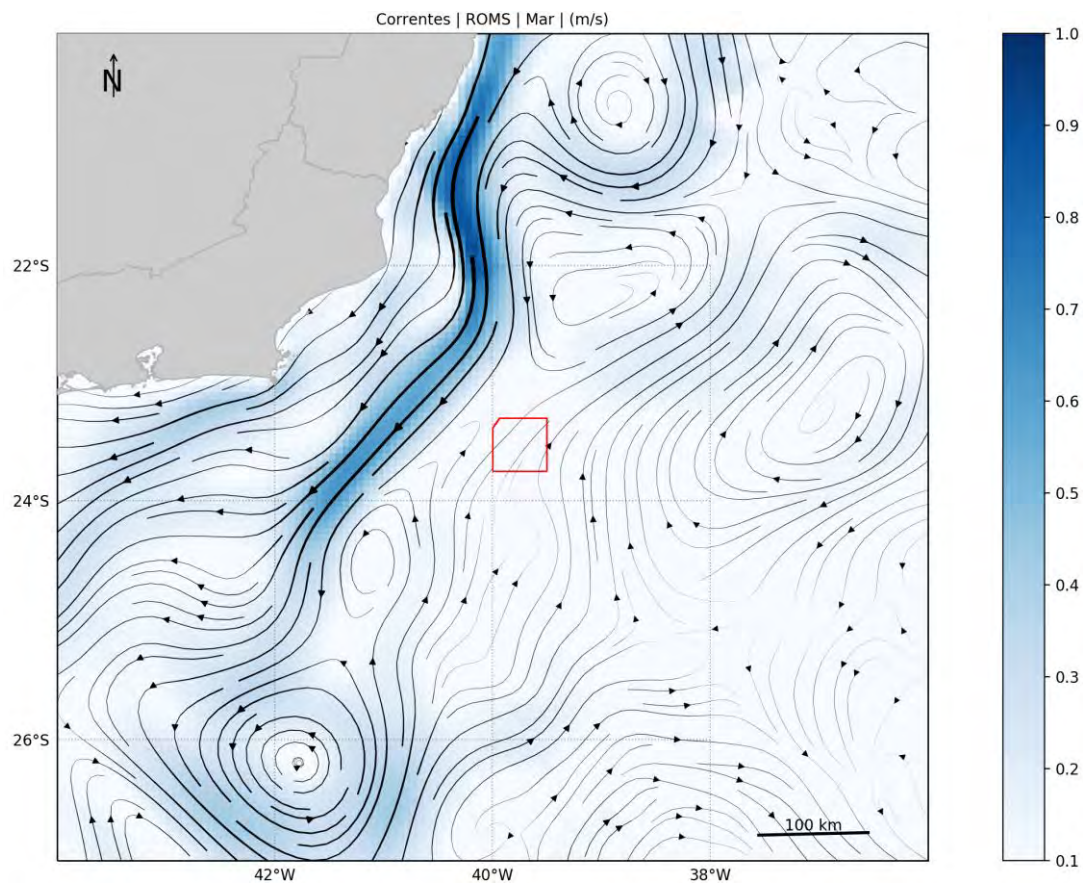


Figura 5: Campo médio de circulação para o mês de março. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.

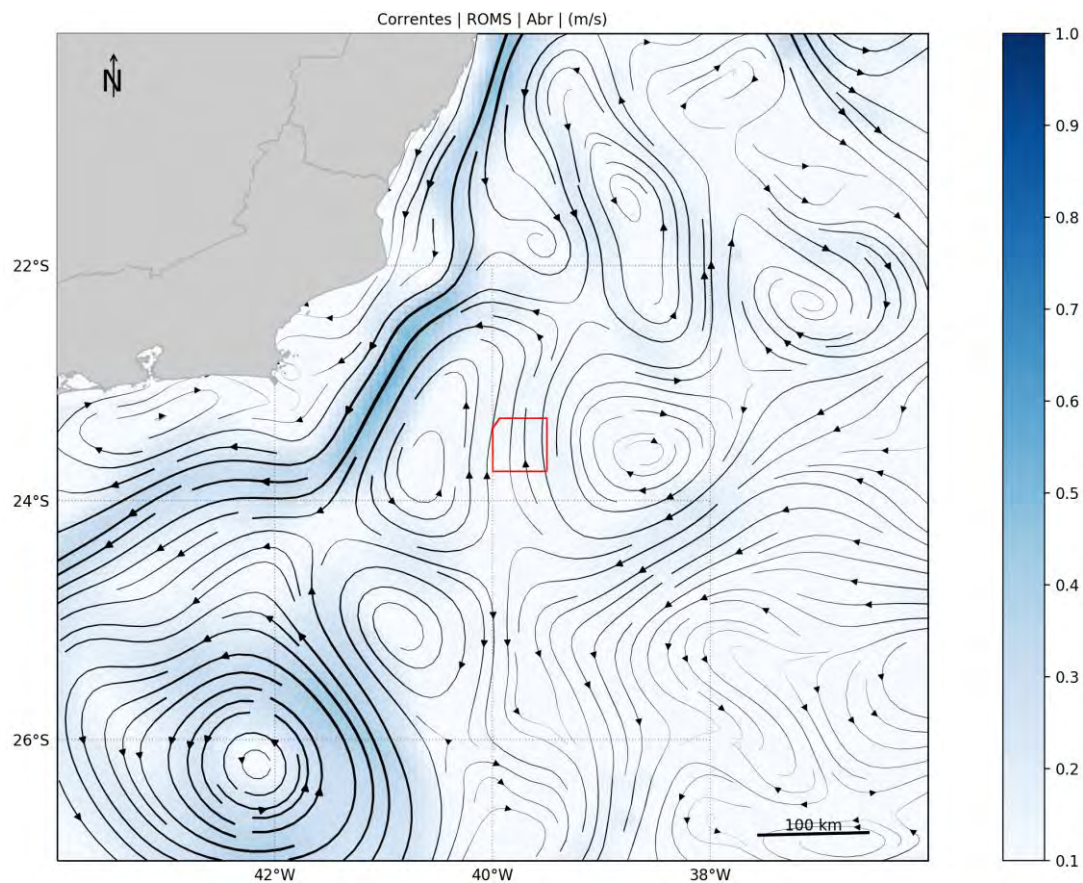


Figura 6: Campo médio de circulação para o mês de abril. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.

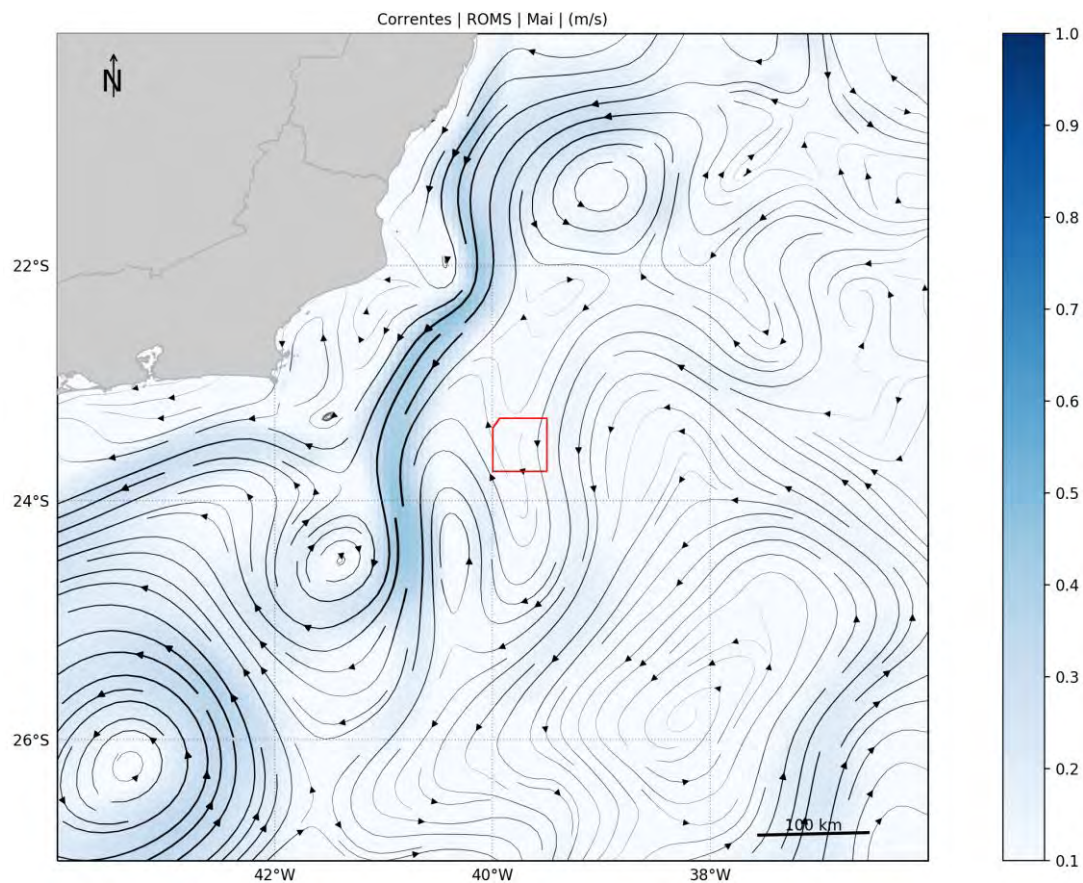


Figura 7: Campo médio de circulação para o mês de maio. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.

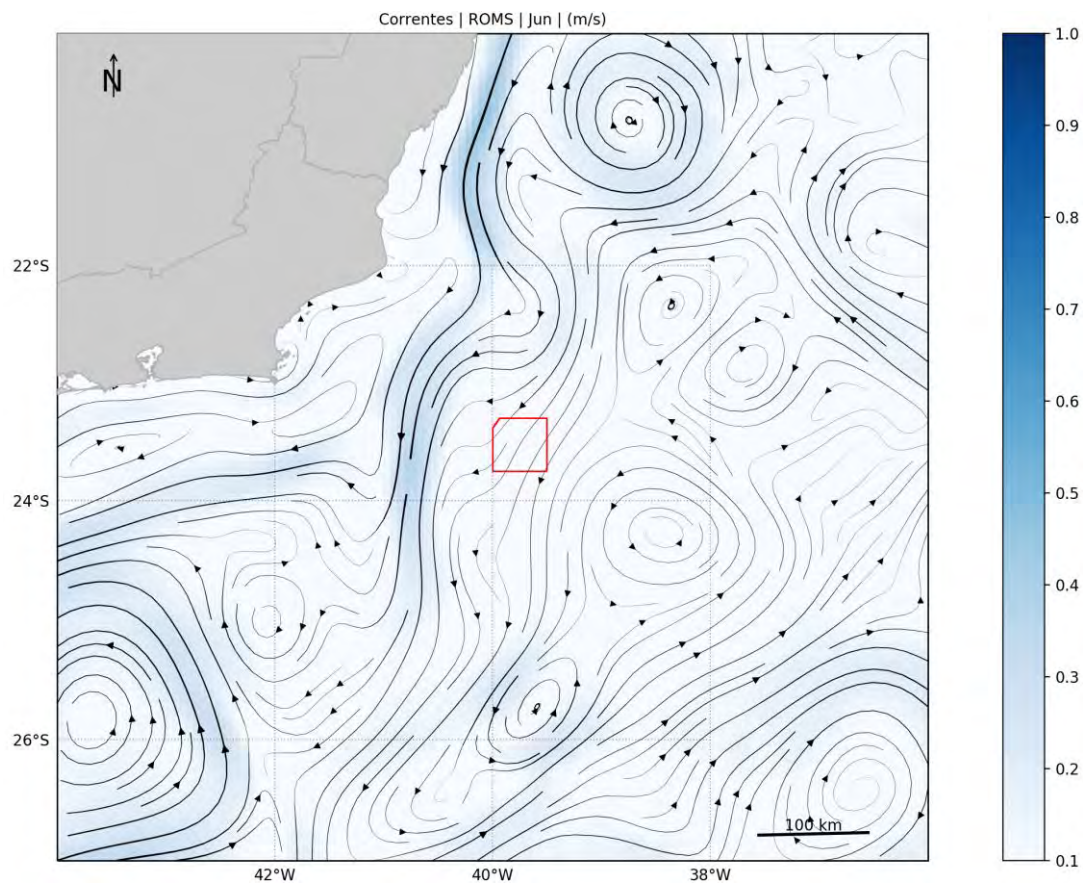


Figura 8: Campo médio de circulação para o mês de junho. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.

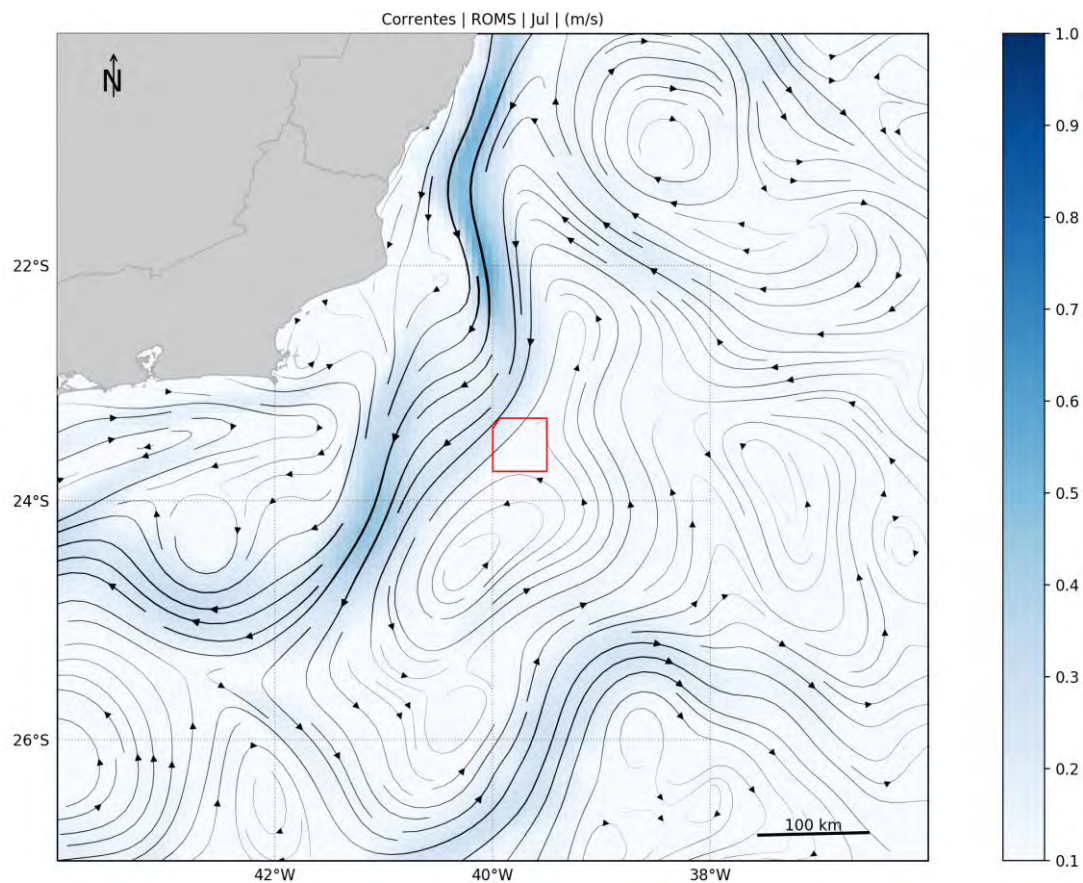


Figura 9: Campo médio de circulação para o mês de julho. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.

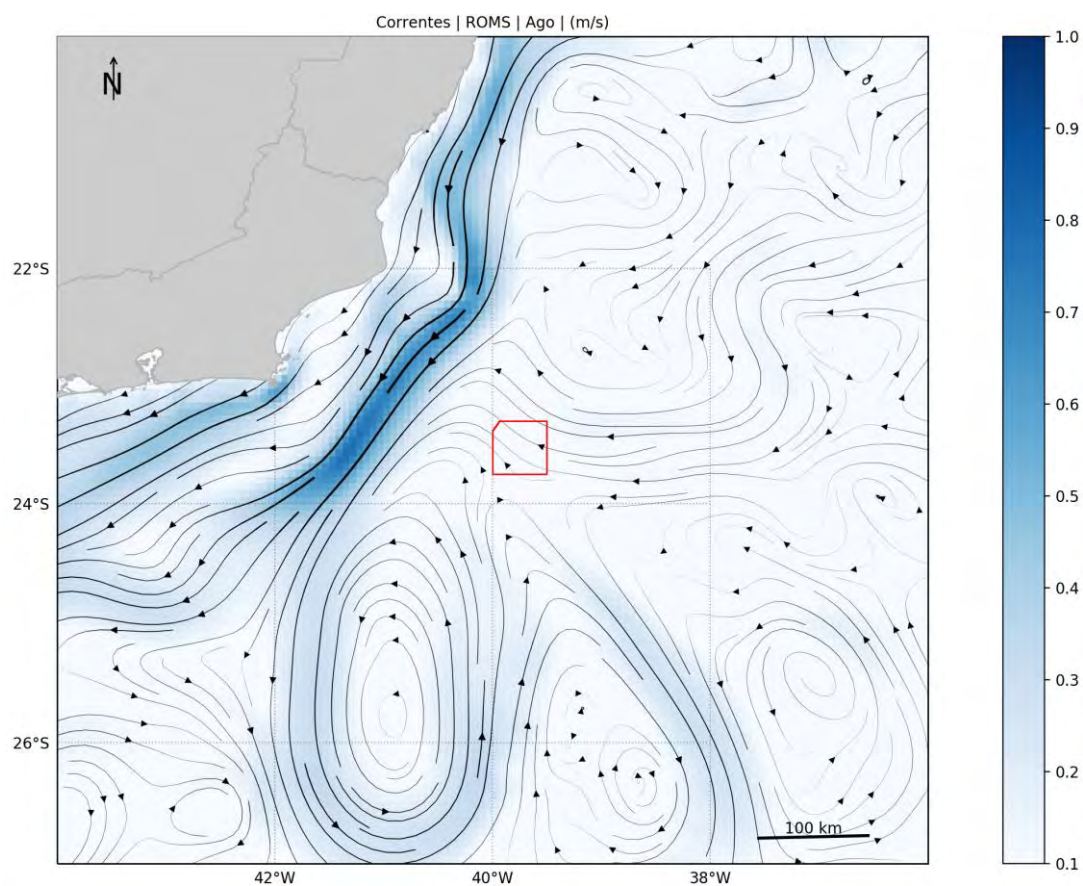


Figura 10: Campo médio de circulação para o mês de agosto. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.

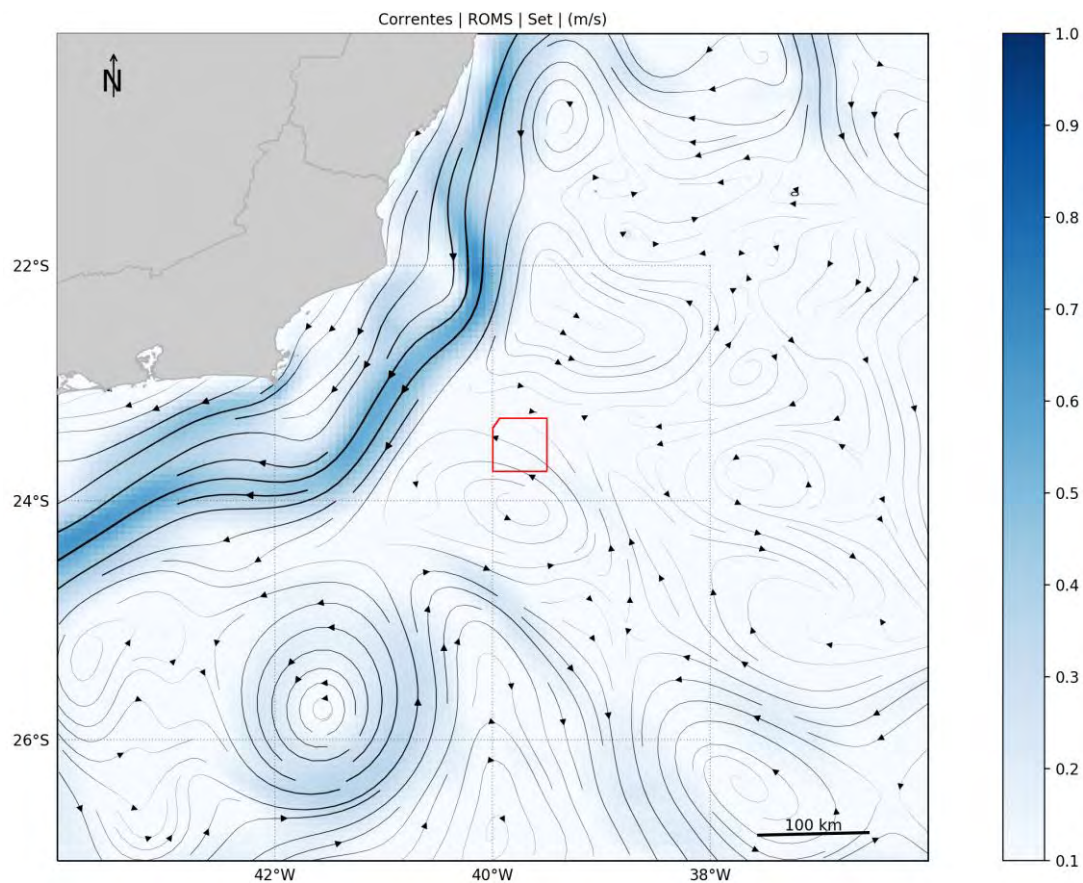


Figura 11: Campo médio de circulação para o mês de setembro. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.

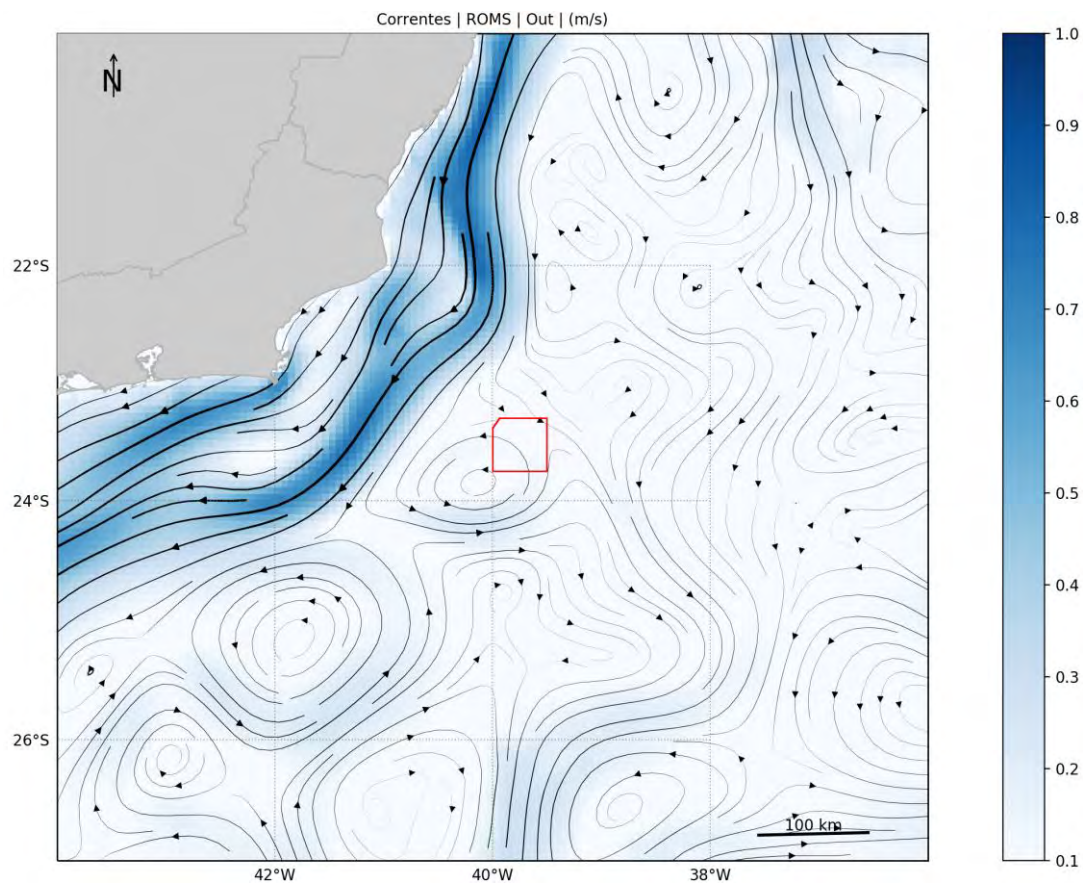


Figura 12: Campo médio de circulação para o mês de outubro. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.

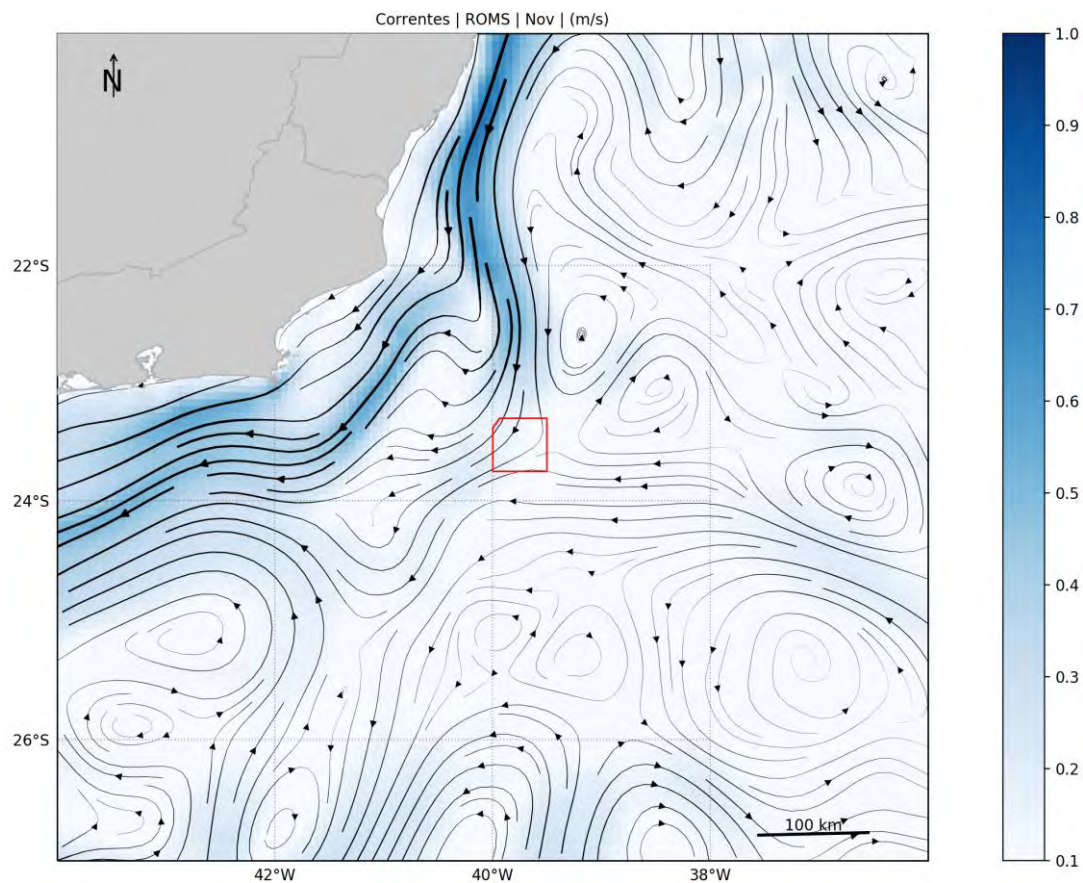


Figura 13: Campo médio de circulação para o mês de novembro. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.

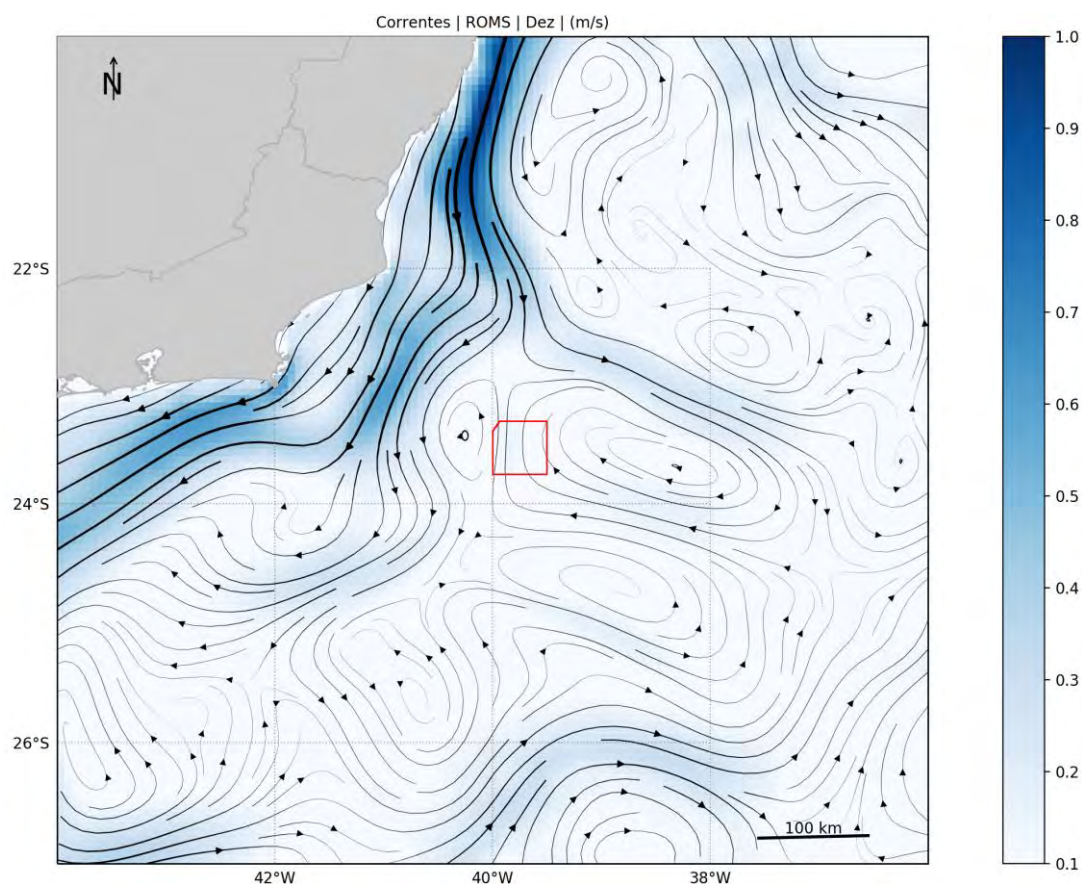


Figura 14: Campo médio de circulação para o mês de dezembro. O Bloco C-M-541 é representado pelo polígono vermelho.

Para uma avaliação da representação da estrutura vertical de temperatura e salinidade na área de estudo foram utilizados os dados da climatologia WOA13 V2 (*World Ocean Atlas 13 version 2*) do *National Oceanographic Data Center* (NODC).

Na Figura 15 e na Figura 16, apresenta-se, respectivamente, o número de observações do ponto de grade do WOA13 V2 mais próximo ao ponto de vazamento ao longo da coluna d'água, e as faixas de ocorrência¹ das observações de temperatura e salinidade obtidas no modelo (vermelho) e no WOA13-V2 (cinza). É possível observar que o modelo representou muito bem a estrutura vertical termohalina e sua variabilidade, pois ao longo de toda a coluna d'água, as faixas de ocorrência são muito similares. Além disso, essa compatibilidade dos valores é um indicativo de que houve uma boa representação da posição média das massas d'água no domínio de modelagem.

¹ Considerando que estas variáveis seguem uma distribuição normal, esta faixa é calculada para abranger 99,7% das ocorrências, e, portanto, seus limites representam 3 vezes o desvio padrão ao redor da média.

Vale ressaltar que as diferenças observadas são esperadas, uma vez que os dados do WOA representam uma climatologia obtida para áreas com 1° de resolução, sendo muito maior que a área representada pelos dados do ROMS, com resolução de 1/16°.

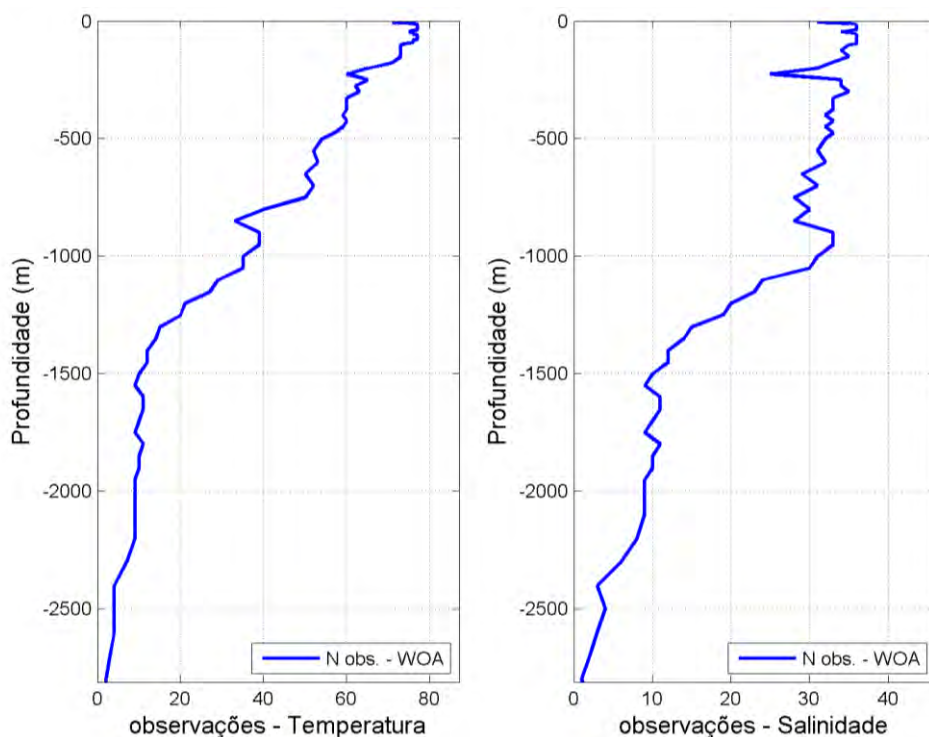


Figura 15: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o Bloco C-M-541.

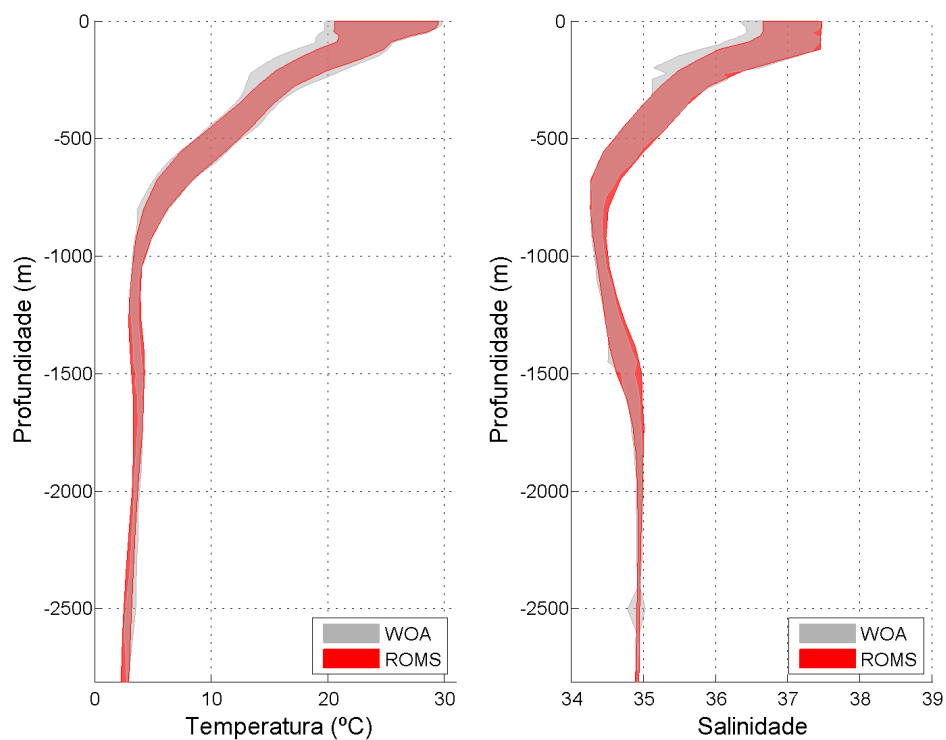


Figura 16: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 V2 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha), para o Bloco C-M-541.

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 vazamento a partir de um ponto localizado no Bloco C-M-541, na Bacia de Campos. A localização do ponto de vazamento foi apresentada na Figura 2 e na Tabela 1.

Foram considerados três possíveis casos de vazamento acidentais. O montante de óleo relacionado a cada caso é:

- Pequeno porte - 8 m³
- Médio Porte - 200 m³
- Pior caso (maior volume): 651.248 m³, devido a uma vazão diária de 21.708 m³ (136.541 barris) durante 30 dias.

A justificativa do volume de Pior Caso é apresentada no Anexo V. Os volumes simulados estão em concordância com a resolução CONAMA nº 398/2008, que dispõe sobre o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual - PEI, para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional.

No estudo de dispersão de óleo, dois tipos de simulações foram conduzidos: probabilísticas e determinísticas. Na Tabela 2 é apresentado o resumo dos cenários simulados.

Tabela 2: Resumo dos cenários de vazamento simulados.

Modelo	Tipo de óleo	Volume Total (m ³)	Vazamento	Tempo	Profundidade (m)
Probabilístico					
Pequeno Porte	Cru	8	instantâneo	30 dias	Superfície
Médio Porte	Cru	200	instantâneo	30 dias	Superfície
Pior caso – vazamento de fundo	Cru	651.248	contínuo (30 dias)	60 dias	3.020
Determinístico					
Tempo mínimo de toque de óleo na costa e Maior massa de óleo acumulada na costa	Cru	651.248	contínuo (30 dias)	60 dias	3.020

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. A descrição do modelo de dispersão de óleo é apresentada no Anexo II deste Relatório.

3.1.2 Estratégias de Modelagem

Para os volumes de 8 m³ e 200 m³ foram realizadas simulações de vazamentos instantâneos de óleo cru em superfície, enquanto que para as simulações de eventos de *blowout* foram considerados **vazamentos contínuos** de 30 dias, **no fundo marinho**, por um **orifício de 0,2159 m** (informação da contratante) em dois períodos sazonais, um de setembro a fevereiro (Período 1) e outro de março a agosto (Período 2). 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.

Em todas as simulações foi realizada uma modelagem tridimensional. Este tipo de modelagem permite o mapeamento das frações do óleo que ficam dissolvidas e dispersas na coluna d'água, além da parcela do óleo que fica na superfície.

Em todas as simulações considerou-se como critério de existência de óleo na superfície espessuras maiores ou iguais ao limiar de 3×10^{-7} metros. Ressalta-se que esse valor de espessura está em conformidade com o limite visual indicado na Informação Técnica nº 023/02 (ELPN/IBAMA), que “*corresponde ao filme de óleo denominado por arco-íris*”.

A resolução CONAMA nº357 de 2005, em seu texto, estabelece que o padrão para óleos em águas salinas nas classes 1 e 2 é “virtualmente ausente”, enquanto para a classe 3 o padrão é “toleram-se iridescência”. Dessa forma, entende-se que se não houver iridescências (arco-íris), pode-se considerar a superfície da água com teor de óleo virtualmente ausente.

Para mapeamento das concentrações de óleo disperso/dissolvido na coluna d'água foi utilizada a concentração de 20 ppb como limite para apresentação dos resultados. Este valor foi adotado por corresponder a 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 à 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. Com relação ao valor de 0,1%, este foi arbitrado levando em consideração que 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).

Mesmo que a concentração de óleo de 20 ppb seja um valor arbitrado em função do estudo de Gabardo (2007), ao compararmos os limiares ambientais a pares internacionais, verifica-se que o valor selecionado está na mesma ordem de grandeza. Por exemplo, no documento de *Ospar Commission* (2014) é recomendado o valor de PNEC (do inglês, *Predicted No Effect Concentration* ou Concentração Sem Efeito Previsível) de 70,5 ppb, que cita como referência o estudo de Smit *et al.* (2009). Esse valor equivale ao descritor HC5 (concentração de risco com efeito adverso para 5% das espécies), que protege 95% das espécies em uma curva de Distribuição de Sensibilidade das Espécies, baseada em 30 valores de CENO (Concentração de Efeito Não Observado) crônicos para 17 espécies marinhas.

Ainda citando exemplos, no documento de Rye *et al.* (2004), onde se discute a criação de um Fator de Impacto Ambiental (em inglês, *Environment Impact Factor* – EIF) em concordância entre operadores de óleo e gás na Noruega, o valor de PNEC adotado para o cálculo do EIF é de 40,4 ppb. Dessa forma, observa-se aderência do valor adotado para o presente estudo com publicações internacionais.

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

No que se refere à 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 no fundo marinho, pois enquanto a concentração de óleo no fundo marinho leva em consideração um efeito cumulativo de adsorção de óleo nos sedimentos, o critério utilizado no mapa de probabilidade leva em consideração, apenas, o fato do óleo tocar no fundo oceânico com concentrações superiores a 20 ppb.

Segundo a contratante, ainda não se conhecem as propriedades do óleo a ser explorado. No entanto, o óleo mais provável, de 28° API, foi considerado no estudo. A partir dessa informação foi escolhido, no banco de dados do modelo OSCAR, um óleo similar para ser utilizado nas simulações. As características deste óleo são apresentadas da Tabela 3 a Tabela 6.

Tabela 3: Classificação do óleo utilizado nas simulações de acordo com o Termo de Referência.

Classificação do óleo	Descrição
(X) pesados*	maior conteúdo de componentes pesados, evaporação inferior a 50% volume após 1 semana no mar, possibilidade de formação de emulsão.
() condensados	não contém componentes como asfalteno e parafinas pesadas, evaporação tipicamente superior a 70% volume, baixa possibilidade de formação de emulsão
() leves	maior conteúdo de componentes leves, evaporação entre 50 a 70% volume, formação de emulsões instáveis. *

* A evaporação apresentou medianas em torno de 21% a 56% do total do volume dos vazamentos.

Tabela 4: Características do óleo utilizado nas simulações.

Propriedade	Valor	Unidade
Densidade	0,890	g/cm ³
API	27,4	°
Viscosidade Dinâmica	61 (a 13°C)	cP
Ponto de Fluidez (<i>Pour Point</i>)	3	°C
<i>Flash Point</i>	-	-
Conteúdo máximo de água	-	%

Tabela 5: Componentes do óleo do banco de dados do OSCAR.

Componentes	Fração no óleo (%)
C1-C4 gases (dissolvido no óleo)	0,9580
C5-saturados (n-/iso-/ciclo)	1,5287
C6-saturados (n-/iso-/ciclo)	0,9247
Benzeno	0,2107
C7-saturados (n-/iso-/ciclo)	2,0383
C1-Benzeno (Tolueno) et, B	0,6821
C8-saturados (n-/iso-/ciclo)	2,6885
C2-Benzeno (xilenos; usando O-xileno)	0,7345
C9-saturados (n-/iso-/ciclo)	2,9931
C3-Benzeno	0,6963
C10-saturados (n-/iso-/ciclo)	1,8163
C4 e C4 Benzenos	0,0969
C11-C12 (total sat + aro)	5,2604
Fenóis (C0-C4 alquilado)	0,0084
Naftalenos 1 (C0-C1-alquilado)	0,2837
C13-C14 (total sat + aro)	5,6816
Naftalenos 2 (C2-C3-alquilado)	0,3721
C15-C16 (total sat + aro)	5,1810
HPA 1 (Hidrocarbonetos poliaromático médio solúvel - 3 anéis-não-alquilado; < 4 anéis)	0,2244
C17-C18 (total sat + aro)	5,1119
C19-C20 (total sat + aro)	3,9256
Mistura Complexa Não Resolvida (MCNR: C10 a C36)	0,0495
C21-C25 (total sat + aro)	4,1195
HPA 2 (Hidrocarbonetos poliaromático baixo solúvel - 3 anéis-alquilado; 4-5+ anéis))	0,1786
C25+ (total)	54,2352

Tabela 6: Curva de destilação do óleo utilizado nas simulações.

Temperatura (°C)	Volume (%)
75	4,5
185	17,9
265	30,0
345	45,6
460	64,7
565	78,9

3.1.3 Descrição das Grades

Neste estudo utilizou-se uma grade regular com resolução espacial de 2 km nas direções zonal e meridional. Os limites da grade são: ao sul, 34°02' S, ao norte, 16° 03' S, a oeste, 54° 01' W e a leste, 36° 01' W (Figura 17). Com isso, obteve-se uma matriz com 905 por 998 pontos de grade.

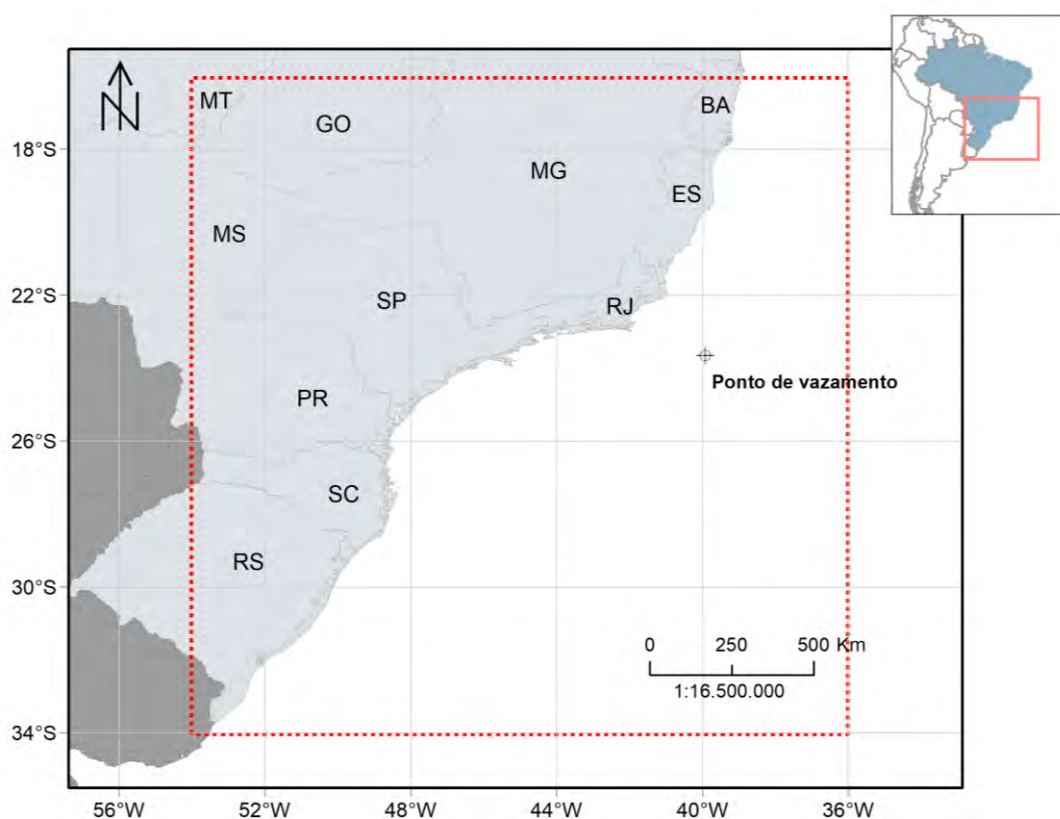


Figura 17: Representação do limite da grade de óleo (linha vermelha tracejada).

Nos cenários de vazamento de superfície (8 m^3 e 200 m^3), o número de camadas utilizadas na vertical foi 21, indo de 0 a 202 m de profundidade, totalizando 18.966.990 elementos. Já nos cenários de *blowout* de fundo, o número de camadas utilizadas na vertical foi 33, indo de 0 a 3.020 m de profundidade, totalizando 29.805.270 elementos.

A grade do modelo de óleo com a batimetria é apresentada na Figura 18. Para manter a concordância com a modelagem hidrodinâmica, os dados de batimetria utilizados são provenientes de cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e da base global ETOPO1 (AMANTE; EAKINS, 2009).

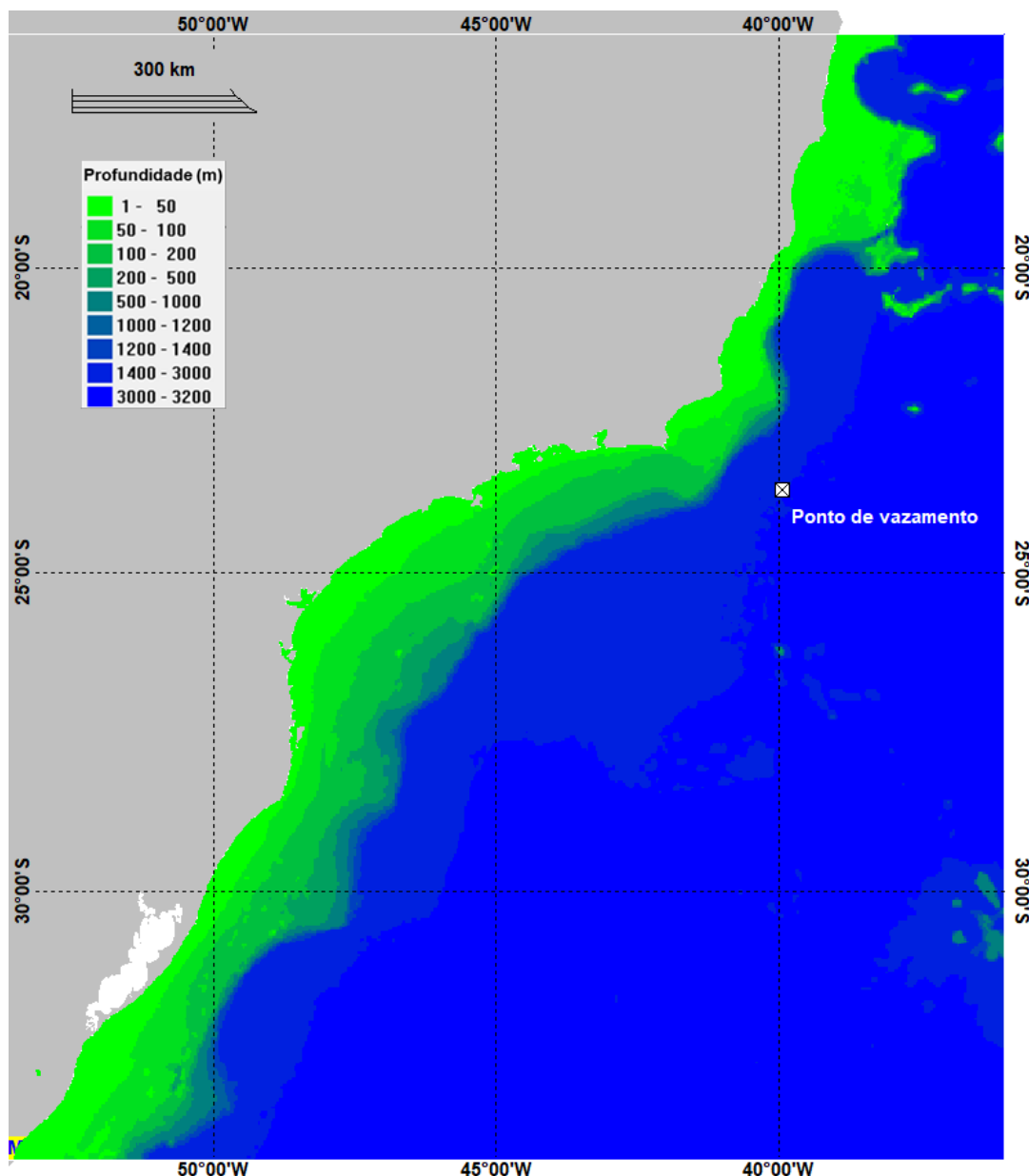


Figura 18: Grade de batimetria utilizada na simulação.

Como é discutido no Anexo II – Óleo na Costa, as interações óleo-linha de costa no modelo OSCAR são dependentes tanto do tipo de óleo considerado na modelagem quanto do tipo de linha de costa. O tipo da linha de costa considerado definirá a máxima capacidade de retenção do óleo nos pontos da grade do modelo que representam a costa.

A definição do tipo de costa para fins da presente modelagem de óleo utilizou como base as informações do banco de dados do Mapeamento Ambiental para Resposta à Emergência no Mar (MAREM), que é constituído de informações das Cartas de Sensibilidade ao Óleo (Cartas SAO) e do Projeto de Proteção e Limpeza de Costa (PPLC, 2018).

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 (MMA, 2018).

O Projeto de Proteção e Limpeza de Costa (PPLC), por sua vez, foi fruto de um Acordo de Cooperação Técnica entre o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e o Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP), cujo objetivo foi criar um banco de dados georreferenciados de todo o litoral brasileiro, para servir de suporte ao planejamento preliminar e emergencial e à gestão de uma operação de resposta a acidentes envolvendo derramamento de óleo no mar, em qualquer ponto da costa.

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

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

Para o domínio do estudo foram definidos, então, cinco tipos de costa predominantes:

- Costão rochoso
- Praia arenosa
- Estrutura artificial abrigada
- Planície de maré
- Manguezal / Marisma / Barra de rio vegetada.

O detalhamento da linha de costa utilizado na grade da modelagem de óleo é apresentado no Anexo IV deste Relatório.

3.1.4 Forçantes

3.1.4.1 Ventos

Os dados de vento utilizados como forçante no modelo são provenientes do ERA5, a última geração da Reanálise do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) e a primeira produzida como serviço operacional, com resolução temporal horária e espacial de 31 km em 137 níveis atmosféricos, desde a superfície até 0,01 hPa (HENNERMANN, 2017).

As Reanálises climáticas do ECMWF começaram com o FGGE (*First GARP Global Experiment*), produzida na década de 1980, seguida pelo ERA-15, ERA-40 e, mais recentemente, pelo ERA-Interim. O ERA5 é uma reanálise que cobre dados de 1950 até o presente e, atualmente, apresenta dados disponibilizados para uso público para o período de 2010 a 2016.

Em relação ao seu antecessor (ERA-Interim), as principais melhorias apresentadas no ERA-5 são (HENNERMANN, 2017):

- Resolução espacial e temporal muito maior
- Informações sobre a variação de qualidade em relação ao espaço e ao tempo
- Troposfera otimizada
- Melhor representação de ciclones tropicais
- Melhor equilíbrio global de precipitação e evaporação
- Maior precipitação sobre a terra nos trópicos profundos
- Melhor umidade do solo
- Temperatura mais consistente da superfície do mar e gelo marinho

O ERA5 combina grandes quantidades de observações históricas em estimativas globais utilizando sistemas avançados de modelagem e assimilação de dados. O ERA5 foi produzido usando a assimilação de dados 4DVar em CY41R2 do IFS (*Integrated Forecast System*) do ECMWF. As observações utilizadas na assimilação de dados do ERA-5 incluem dados de satélite e dados *in situ*. Entre os dados de satélite, estão dados de diferentes sensores de uma gama de satélites, que inclui AQUA, ERS-2, ENVISAT, JASON-1 e JASON-2, entre muitos outros. As observações *in situ* são provenientes do WMO *Information System* (WIS) e incluem dados de estações de terra, boias de deriva, dados de navios, radiossondas e radares, entre outros.

Para este estudo foram utilizados e tratados 5 anos de dados do ERA5 (2012 a 2016) com uma frequência temporal de 1 hora (Figura 19).

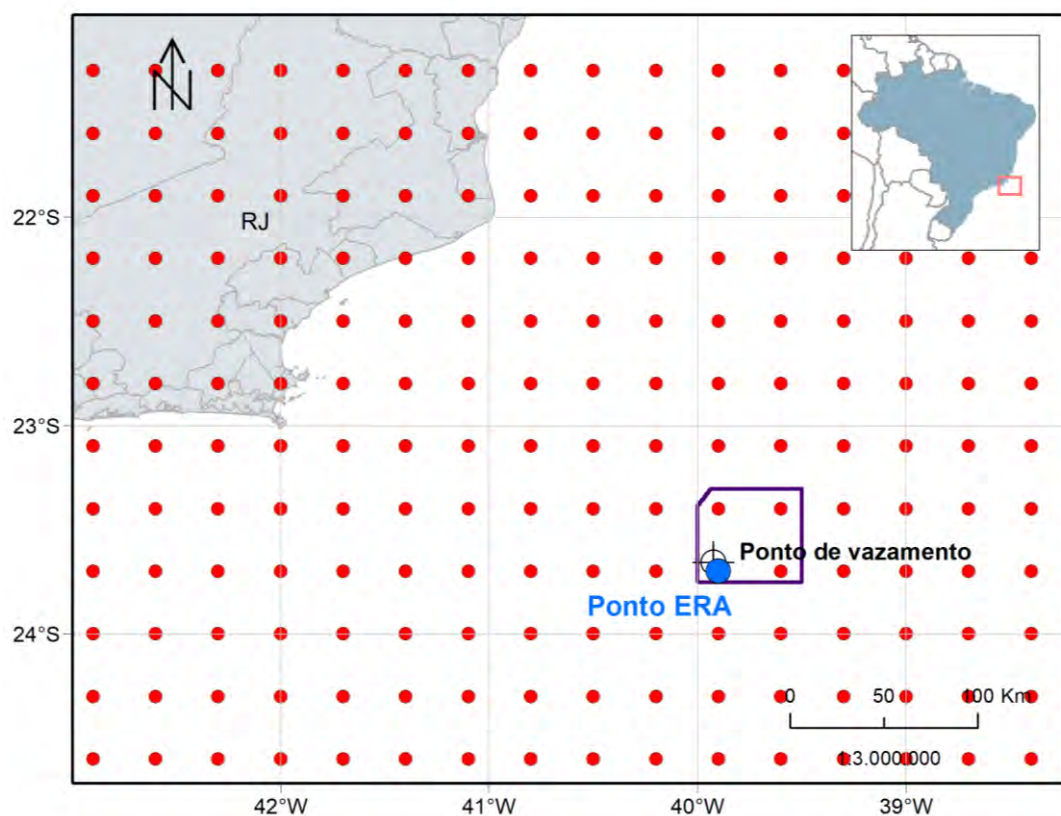


Figura 19: Localização dos pontos de grade do ERA5 (em vermelho) em relação ao ponto de vazamento. Ponto em azul é o mais próximo do ponto de vazamento.

A seguir, são apresentadas as rosas dos ventos mensais (Figura 20), elaboradas para o período analisado, além das tabelas de ocorrência de direção e intensidade (Tabela 7 e Tabela 8) para o ponto mais próximo ao local de vazamento.

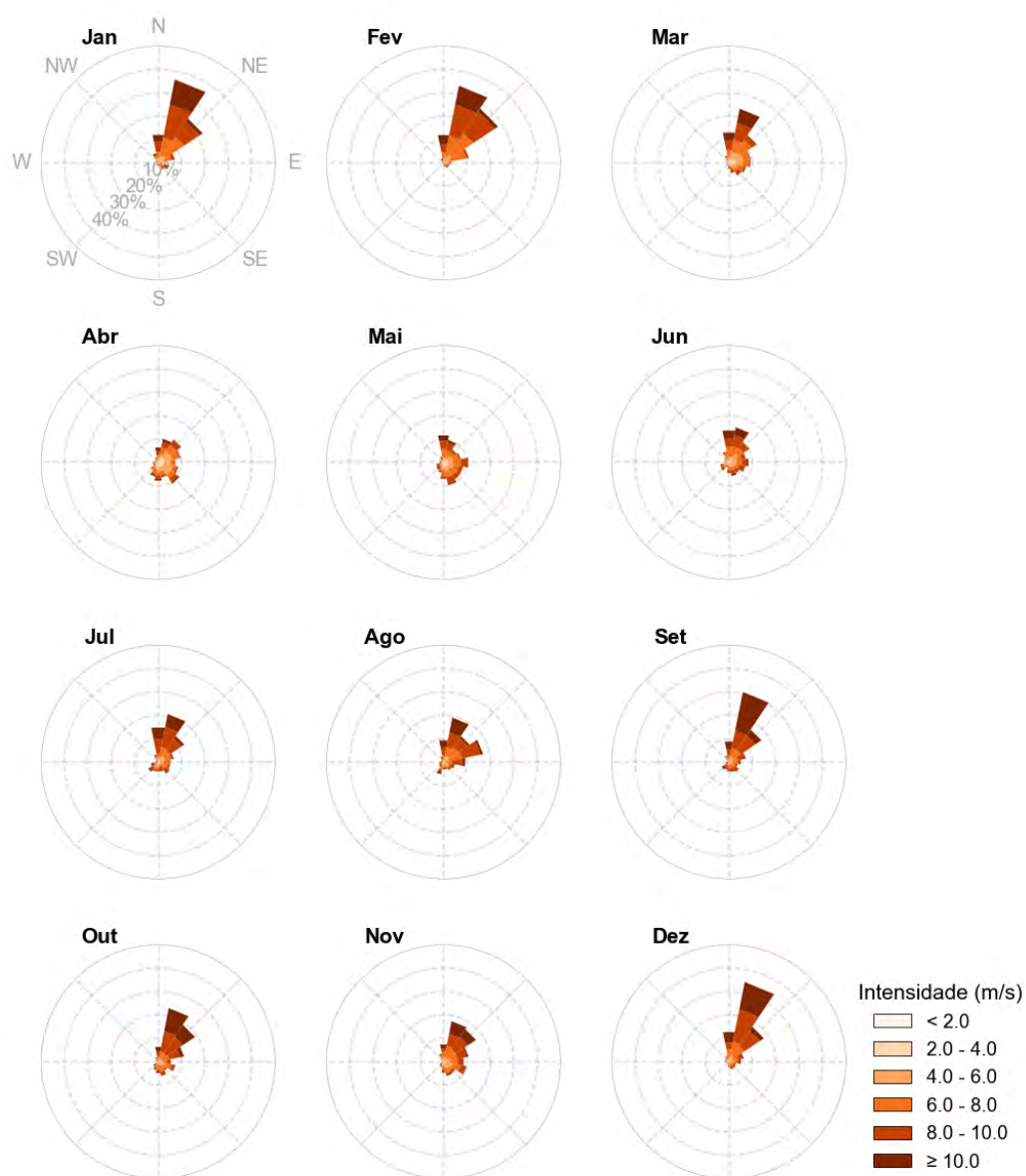


Figura 20: Rosa dos ventos para os 12 meses do ano para o ponto mais próximo ao ponto de vazamento.

Tabela 7: Ocorrência mensal (%) de direção dos ventos para o ponto mais próximo ao ponto de vazamento.

Direção	Meses do ano											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
N	12,2	12,2	13,2	6,5	11,8	13,9	15,0	9,4	8,9	6,4	7,5	12,9
NNE	36,4	33,7	23,7	10,4	9,8	15,4	20,9	19,4	30,6	23,3	17,6	34,7
NE	22,9	28,1	14,4	11,9	6,8	10,6	13,5	13,4	16,7	19,0	16,7	18,0
ENE	7,4	11,1	9,5	9,8	7,6	7,6	6,9	17,3	7,5	11,3	10,9	6,5
E	1,8	3,5	9,3	7,5	10,8	8,4	5,4	9,4	5,1	5,5	8,7	5,1
ESE	4,6	2,6	7,5	8,9	8,6	7,3	5,3	4,9	3,9	7,6	10,1	3,2
SE	3,3	2,5	6,6	11,0	8,8	5,4	6,1	4,2	5,1	4,7	6,1	3,5
SSE	1,2	1,6	4,5	6,7	9,9	6,0	4,2	3,3	4,4	6,4	6,3	3,4
S	1,2	0,5	2,6	7,9	7,1	4,5	4,0	3,1	4,1	5,0	4,8	2,4
SSW	0,5	0,3	1,3	6,1	4,4	2,2	4,2	5,4	3,3	3,7	2,7	0,9
SW	0,8	0,3	0,9	3,9	3,6	4,2	5,1	2,3	3,8	2,5	2,1	1,3
WSW	0,6	0,2	0,6	2,3	3,1	3,8	3,2	1,9	1,4	0,6	0,6	0,7
W	0,6	0,4	0,5	2,2	1,7	1,9	0,9	1,3	0,8	0,5	0,6	1,5
WNW	0,8	0,3	0,8	1,5	1,6	1,7	1,0	1,0	0,6	0,6	0,5	1,5
NW	1,4	0,7	1,3	1,3	1,7	2,2	1,0	1,2	0,9	1,1	1,4	1,9
NNW	4,3	2,1	3,4	2,3	2,8	4,9	3,4	2,5	2,9	1,9	3,6	2,7

Tabela 8: Ocorrência mensal (%) de intensidade dos ventos para o ponto mais próximo ao ponto de vazamento.

Mês	Intensidade (m/s)					
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	>10
Janeiro	1,7	5,8	13,8	29,5	32,3	16,8
Fevereiro	0,9	4,5	13,5	34,6	31,8	14,7
Março	3,7	13,5	22,9	28,3	20,0	11,6
Abril	5,6	19,2	29,8	24,9	14,0	6,6
Maio	4,5	14,9	21,4	30,4	21,9	6,9
Junho	3,7	10,6	22,9	27,8	24,4	10,5
Julho	2,5	7,6	17,1	25,2	31,4	16,1
Agosto	1,1	4,9	16,6	26,9	34,0	16,6
Setembro	1,4	3,9	14,3	23,3	28,9	28,3
Outubro	1,5	4,5	15,1	24,6	31,5	22,8
Novembro	2,1	8,3	20,1	29,8	24,3	15,5
Dezembro	2,0	7,4	12,8	25,2	31,5	21,2

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 21) para o ponto mais próximo do local de vazamento, além das tabelas de ocorrência de direção e intensidade (Tabela 9 a Tabela 10).

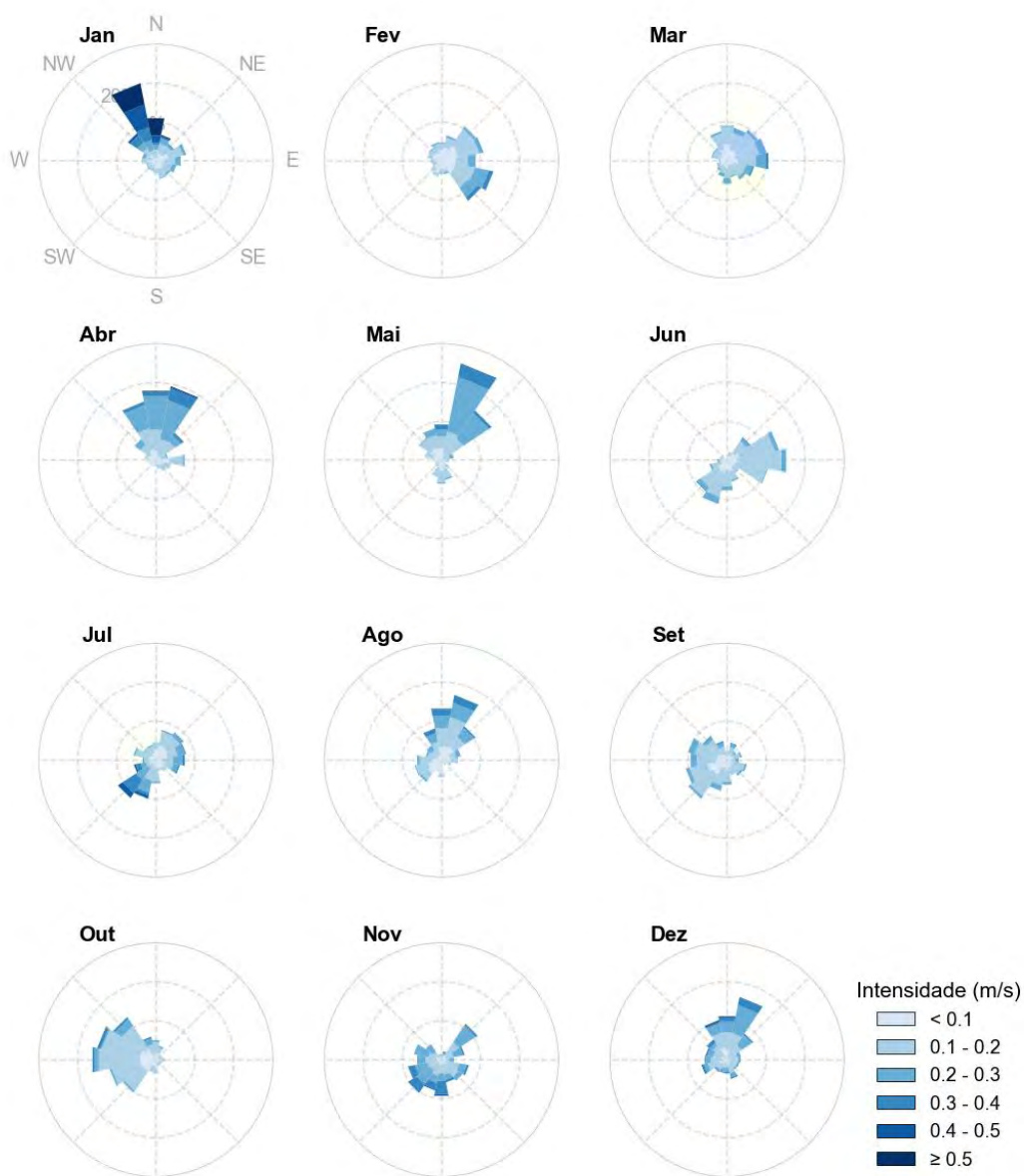


Figura 21: Rosa de correntes para os 12 meses do ano para o ponto mais próximo ao ponto de vazamento.

Tabela 9: Ocorrência mensal (%) de direção das correntes para o ponto mais próximo ao ponto de vazamento.

Direção	Meses do ano											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
N	11,2	4,8	9,3	18,2	9,4	1,1	4,6	13,4	2,2	5,1	1,3	11,3
NNE	6,9	6,7	8,7	19,4	25,4	2,4	7,9	17,1	4,6	3,6	2,2	16,4
NE	5,5	10,7	9,7	8,6	15,5	7,2	8,6	10,5	2,8	1,6	11,1	8,1
ENE	7,9	11,0	10,4	3,2	3,2	13,6	7,9	5,1	3,9	1,8	6,1	3,7
E	6,5	8,9	10,8	7,5	1,9	15,4	7,5	4,3	3,1	2,4	3,2	3,6
ESE	5,4	13,6	7,1	3,9	1,2	10,7	6,3	2,7	5,3	1,8	7,2	3,3
SE	4,6	12,3	5,8	3,2	2,4	3,8	3,4	1,5	4,9	1,8	6,5	3,1
SSE	4,7	3,5	4,3	2,2	5,1	5,6	2,8	0,7	4,0	1,8	6,0	5,1
S	3,2	3,4	5,9	1,4	6,1	7,8	6,1	4,4	6,4	3,5	9,4	3,6
SSO	2,7	4,1	4,2	1,5	4,3	11,4	10,1	3,1	8,1	3,4	8,1	3,6
SE	2,7	3,4	3,1	1,8	2,0	9,6	11,7	6,9	11,9	10,2	10,3	3,8
OSO	2,6	2,5	2,7	1,8	1,6	4,6	5,8	7,0	10,8	12,1	8,8	6,7
O	3,6	2,8	2,0	2,2	2,0	2,5	3,4	6,3	9,4	16,5	6,3	5,7
ONO	3,6	3,7	4,2	2,9	4,4	1,9	5,9	4,2	10,1	15,3	7,2	5,6
NO	8,6	4,0	4,2	6,7	7,0	1,9	4,0	4,6	7,5	13,2	4,9	6,3
NNO	20,3	4,8	7,8	15,4	8,5	0,6	4,0	8,3	5,0	6,1	1,5	10,4

Tabela 10: Ocorrência mensal (%) de intensidade das correntes para o ponto mais próximo ao ponto de vazamento.

Mês	Intensidade (m/s)					
	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,3	0,3 - 0,4	0,4 - 0,5	> 0,5
Janeiro	27,7	33,0	13,5	6,7	8,8	10,4
Fevereiro	46,1	39,2	12,0	2,8	-	-
Março	34,7	50,4	13,2	1,8	-	-
Abril	29,6	34,2	29,6	5,6	0,6	0,6
Maio	28,6	37,9	27,6	5,7	0,3	-
Junho	31,8	58,8	8,9	0,6	-	-
Julho	35,0	37,5	17,2	7,7	2,7	-
Agosto	38,7	38,8	16,9	5,1	0,4	-
Setembro	34,6	51,8	12,1	1,5	-	-
Outubro	33,9	56,6	7,0	2,6	-	-
Novembro	17,1	36,1	33,1	12,8	1,0	-
Dezembro	20,3	44,9	26,2	6,4	1,8	0,4

3.1.4.3 Separação Sazonal

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

A primeira, denominada **Período 1**, compreende os meses de **setembro a fevereiro** e a segunda, denominada **Período 2**, compreende os meses de **março a agosto**.

A partir da observação das rosas dos ventos do ponto do ERA5 próximo ao ponto de vazamento, que trazem informações sobre as frequências de ocorrência conjunta de direção e intensidade dos ventos na região, foi observado em ambos os períodos uma maior frequência de ventos do primeiro quadrante, com predominância de ventos de NNE e NE. No Período 2, porém, ocorre um aumento da frequência de ventos de outras direções, em especial do segundo e terceiro quadrantes (componente meridional sul).

Em relação às correntes, o ponto de vazamento se encontra em uma região profunda, afastada da região principal do fluxo da Corrente do Brasil. Observa-se predominância de correntes com intensidades mais fracas, menores que 0,2 m/s, e caracterizadas por grande variação de direção, podendo também ser influenciadas pelo fluxo da CB, quando esta se encontra mais afastada da costa em situações de meandramento, ou influenciadas por vórtices na região. Tais ocasiões estão associadas a correntes mais intensas, que também podem ser observadas nesta localidade.

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.

O perfil apresentado (Figura 22) representa a média dos dados para o ponto de grade mais próximo do ponto de vazamento e dentro dos períodos sazonais escolhidos (item 3.1.4.3).

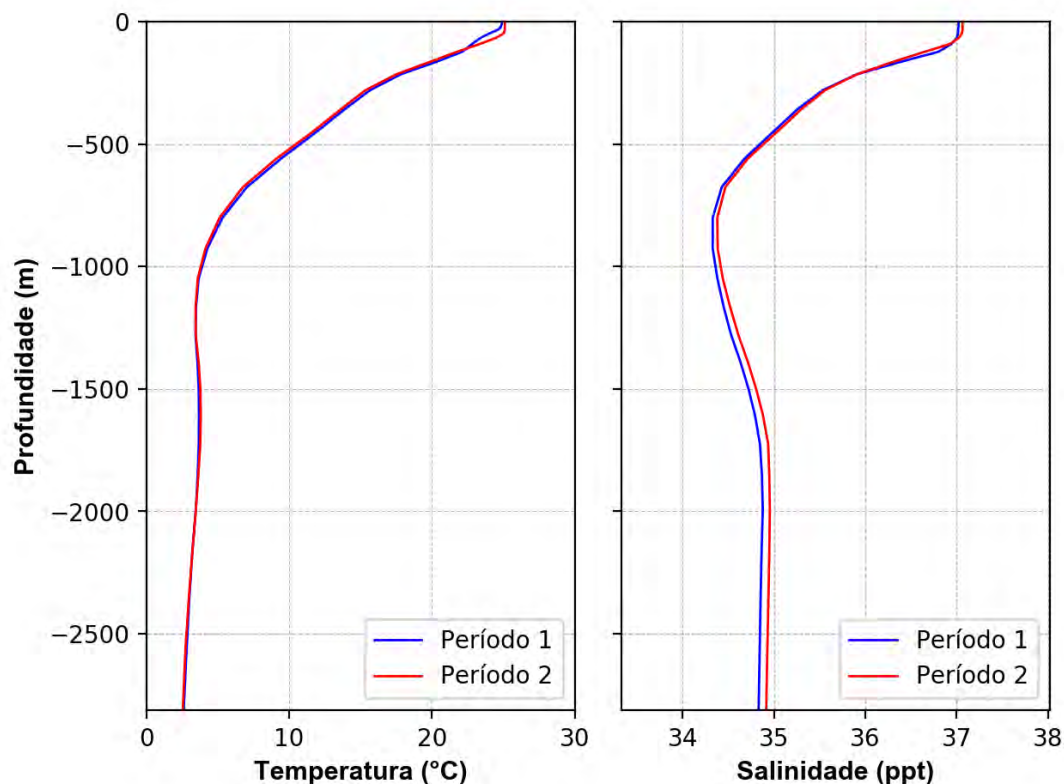


Figura 22: Perfis de salinidade e temperatura para o ponto de grade mais próximo ao ponto de vazamento.

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 referentes ao 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-se um mapa de probabilidade estatisticamente coerente.

A metodologia proposta por Elliot (2004) sugere o número adequado de simulações baseado na análise do número de zeros-ascendentes (*zero-up-crossing*) do vento, que consiste na identificação do número de vezes em que as componentes zonal (u) e meridional (v) do vento trocam de sinal. De forma prática, a alteração de sentido nas componentes está ligada a mudanças no padrão sinótico do vento, como por exemplo, no período de passagem de um sistema frontal pela região.

Dessa forma, com o objetivo de avaliar a variabilidade das escalas temporais transientes presentes nos dados de vento analisados e utilizados nesse relatório, foi realizada uma análise de zeros ascendentes (*zero-up-crossing*) do ponto do ERA5 mais próximo ao ponto de vazamento (Figura 19). Os resultados podem ser observados na Figura 23.

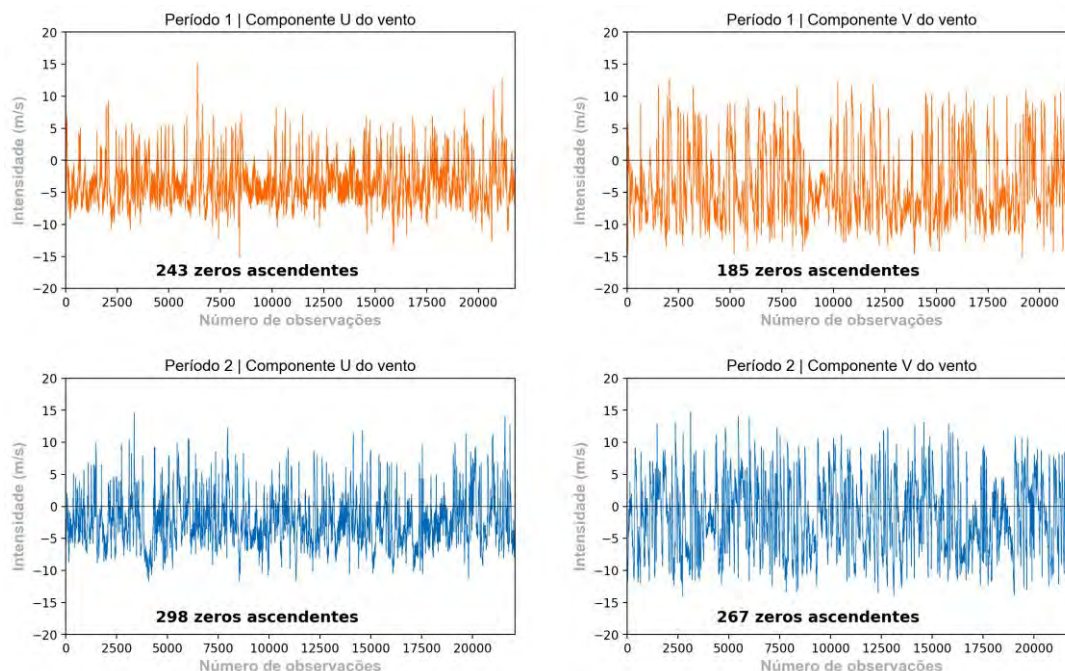


Figura 23: Séries temporais das componentes “u” e “v” do vento para o ponto de vazamento e o número de zeros ascendentes presentes nas séries.

Observa-se que o número de zeros ascendentes para a componente zonal (u) do vento foi de 243 para o Período 1 e de 298 para o Período 2. Já a componente meridional (v) apresentou 185 zeros ascendentes no Período 1 e 267 no Período 2.

Assim, com base na metodologia proposta por Elliot (2004), para uma correta representação dessa variabilidade na modelagem probabilística de óleo, os números mínimos de simulações aconselháveis seriam de 298 e 267 para os períodos 1 e 2, respectivamente. Desta forma, no estudo em questão, foram utilizadas 300 simulações para cada condição sazonal. Essas 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.

3.1.6 Resumo das características das simulações

Os parâmetros utilizados no presente estudo são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Parâmetros numéricos utilizados no modelo de dispersão de óleo.

Parâmetros do modelo			
Número de partículas	Gotículas (não dissolvidas)	20.000	
	Dissolvidas	20.000	
Dimensão da grade	Zonal	~2.000	km
	Meridional	~2.000	km
Resolução da grade	Direção X (longitude)	2	km
	Direção Y (latitude)	2	km
	Direção Z (profundidade) (vazamentos superfície / vazamento de fundo)	10 / 94	m
Profundidade para grade de concentração	Min:	0	m
	Max (vazamentos superfície / vazamento de fundo)	202 / 3.020	m
Limiar de concentração na coluna d'água		20	ppb
Passos de tempo	Passo de tempo de cálculo	15	min
	Passo de tempo de saída	1	hora
Duração da simulação (vazamentos superfície / vazamento de fundo)		30 / 60	dias
Número de simulações no modo probabilístico		300	Período 1
		300	Período 2

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

Foram utilizados os menores espaçamentos de grade permitidos pelo OSCAR para essa modelagem, considerando as dimensões do domínio de modelagem. Conforme exposto anteriormente, plumas ou manchas de óleo com dimensões menores do que as dimensões das células da grade estão sujeitas a uma "diluição numérica" artificial. Desta forma os resultados de concentração e espessuras devem ser vistos como valores médios no volume definido pelas dimensões das células da grade.

3.2. Resultados

A seguir, serão apresentados os resultados das simulações de deriva do óleo para todos os diferentes volumes de vazamento a partir do ponto de risco considerado no Bloco C-M-541.

3.2.1 Resultados Probabilísticos

Os resultados probabilísticos foram baseados em 300 simulações individuais em cada cenário, nos diferentes volumes de vazamento. Este número de simulações foi definido para representar a variabilidade ambiental da região.

Cada uma dessas trajetórias individuais considera diferentes condições ambientais (correntes e ventos) e todas as simulações do mesmo cenário são integradas para formar os mapas probabilísticos, conforme ilustrado na Figura 24.

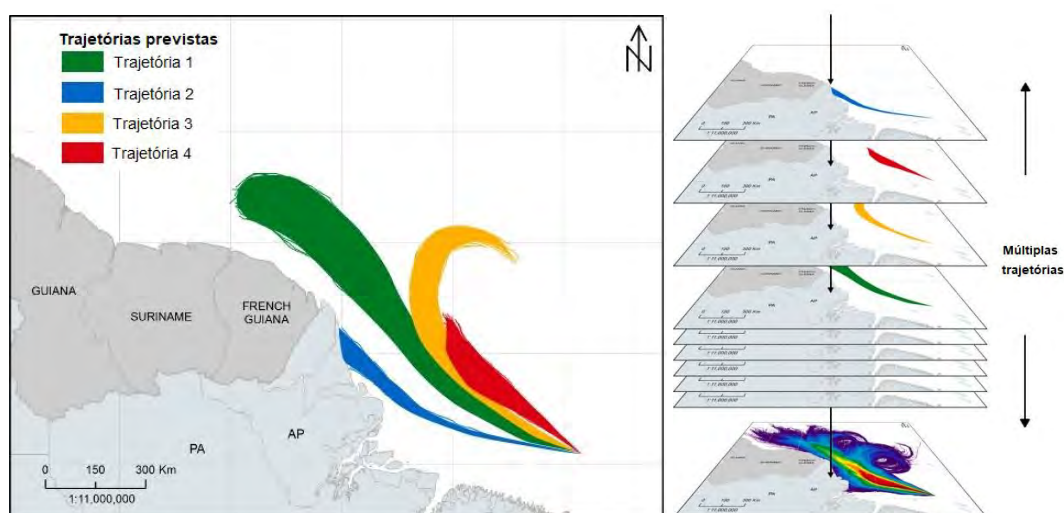


Figura 24: Exemplos de quatro trajetórias de derramamentos individuais para um cenário de vazamento genérico (à esquerda). Centenas de trajetórias individuais são sobrepostas umas sobre as outras, como mostrado à direita para calcular os resultados estocásticos (probabilidade, tempos mínimos de chegada, massa máxima de óleo encalhado na costa, etc.).

Para os resultados nas Unidades de Conservação (UCs), foram separadas todas as UCs - federais, estaduais e municipais - disponibilizadas no Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (MMA, 2019), nos instrumentos legais de criação e em ICMBIO (2018) e WWF (2016), da região em que se verifica probabilidade de óleo na costa ou na região costeiro-oceânica (Anexo III).

Os mapas probabilísticos apresentados a seguir são resultados de:

- » **Probabilidade de presença de óleo na superfície** – Este mapa define a área e a probabilidade associada em que se espera que a quantidade de óleo na superfície do mar exceda o limite de espessura que define a presença de uma mancha de óleo.
- » **Probabilidade de presença de óleo na coluna d'água** - Este é um mapa de probabilidade análogo ao mapa descrito anteriormente e considera a presença de óleo dentro da coluna de água com base em um limiar de concentração.
- » **Probabilidade de presença de óleo no fundo marinho** - Este é um mapa de probabilidade análogo ao mapa descrito anteriormente e considera a interseção dos resultados da coluna de água com informações de batimetria.
- » **Probabilidade de chegada de óleo na costa** – Este mapa define os locais na costa e a probabilidade associada em que se espera que a massa de óleo exceda o limiar que define a presença de uma mancha de óleo na linha de costa.
- » **Tempo mínimo de chegada de óleo na superfície** – Este mapa corresponde ao tempo associado ao mapa de probabilidade de presença de óleo. A ideia deste mapa é mostrar o menor tempo necessário para que o óleo exceda os limiares de espessura ou concentração definidos em cada ponto de grade se ocorrer um vazamento de óleo.
- » **Concentração máxima de óleo na coluna d'água** - Este mapa corresponde à concentração máxima de óleo associada ao mapa de probabilidade de presença de óleo na coluna d'água. A ideia deste mapa é mostrar a concentração máxima para os locais onde o óleo excede o limiar definido em cada ponto de grade.
- » **Balanço de massa do óleo** - Gráficos do tipo *box-plot* para o balanço de massa do óleo ao final das simulações, considerando todos os processos de intemperismo, onde é possível observar valores mínimo, máximo, mediana, primeiro e terceiro quartis.

3.2.1.1 Vazamento de 8 m³

Para os vazamentos de 8 m³ os resultados mostram que houve um espalhamento das trajetórias do óleo em diversas direções. No entanto, as maiores probabilidades, na proximidade do ponto de vazamento, apresentam direção preferencial para sudoeste, devido aos ventos de nordeste, mais frequentes na região.

Para esse volume de vazamento, o padrão da área com probabilidade de presença é muito similar entre os períodos sazonais, sendo observada em regiões afastadas, a mais de 165 km da costa, com profundidades acima de 2.000 m.

Valores de probabilidade acima de 30% são observados apenas no entorno do ponto de vazamento, a uma distância máxima de 2 km. Áreas com probabilidades menores, de até 5%, são observadas a uma distância máxima de 93 km e 58 km do ponto de vazamento nos Períodos 1 (setembro a fevereiro) e 2 (março a agosto), respectivamente. As regiões mais afastadas podem ser alcançadas em até 5 dias no Período 1 e em até 7 dias no Período 2. Nestes cenários não houve probabilidade de chegada de óleo na costa ou em alguma unidade de conservação.

Na coluna d'água, a área de probabilidade se restringe à região do entorno do ponto de vazamento e até 22 metros de profundidade, com valores abaixo de 10%.

Em relação aos processos intempéricos atuantes ao longo dos 30 dias de simulação, observa-se que a retirada de óleo da superfície ocorreu, principalmente, através da evaporação, mediana em torno de 46%, seguido pela dispersão do óleo na coluna d'água (mediana em torno de 37%). O valor mediano da degradação foi cerca de 16% do total de óleo, e após 30 dias, o óleo em superfície em ¾ das simulações se mostrou inferior a 1% do total.

Os mapas de probabilidade de presença de óleo em superfície e na coluna d'água, e de tempo mínimo de chegada, além do gráfico de balanço de massa para o vazamento de 8 m³ no Período 1 e no Período 2 são apresentados a seguir (Figura 25 a Figura 30).

3.2.1.1.1 Período 1

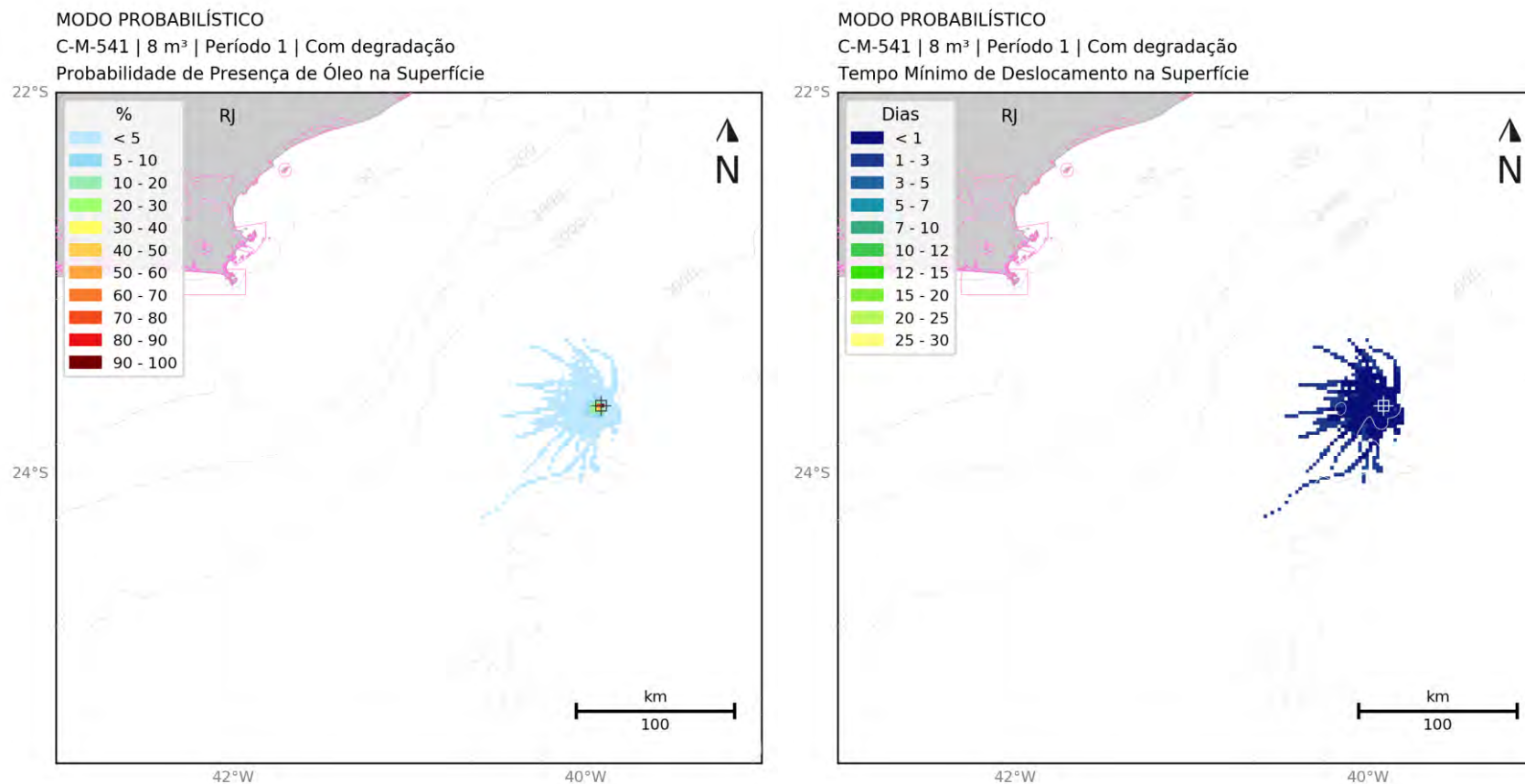


Figura 25: Mapa de probabilidade de presença de óleo e tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para o vazamento de 8 m³. Período 1 (setembro a fevereiro).
Simulação de 720 horas (30 dias).

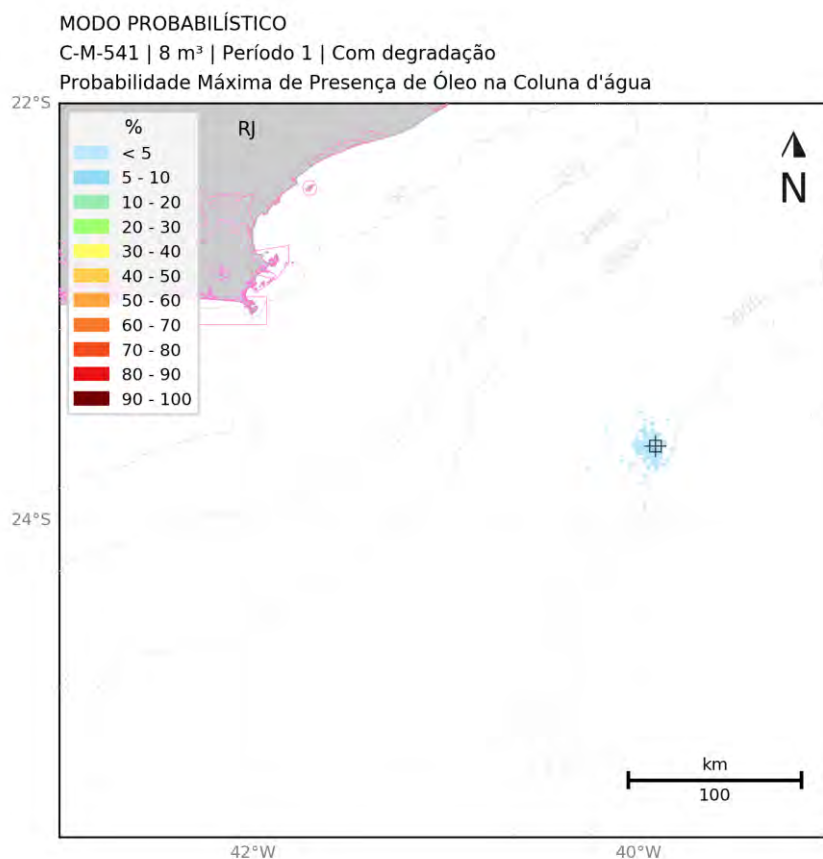


Figura 26: Mapa de probabilidade de presença de óleo na coluna d'água para vazamento de 8 m³.
Período 1 (setembro a fevereiro). Simulação de 720 horas (30 dias).

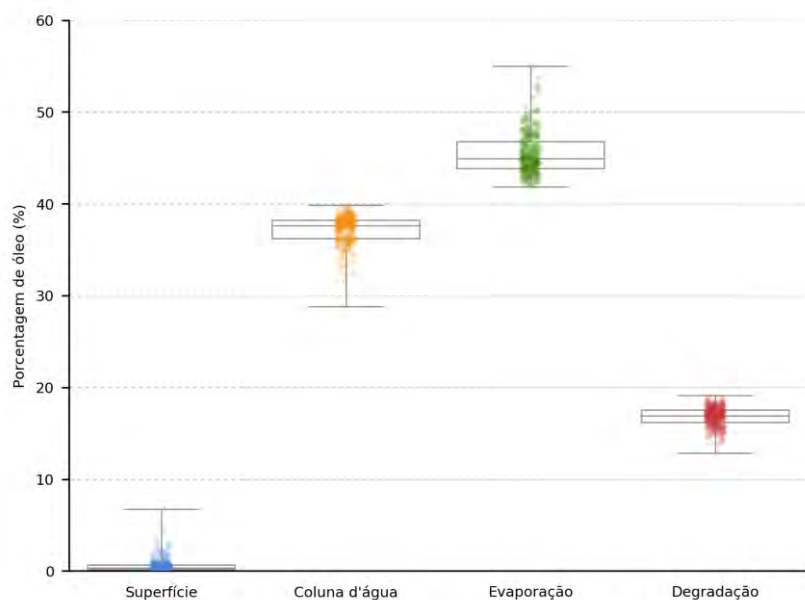


Figura 27: Balanço de massa das simulações probabilísticas para vazamento de 8 m³. Período 1
(setembro a fevereiro). Simulação de 720 horas (30 dias).

3.2.1.1.2 Período 2

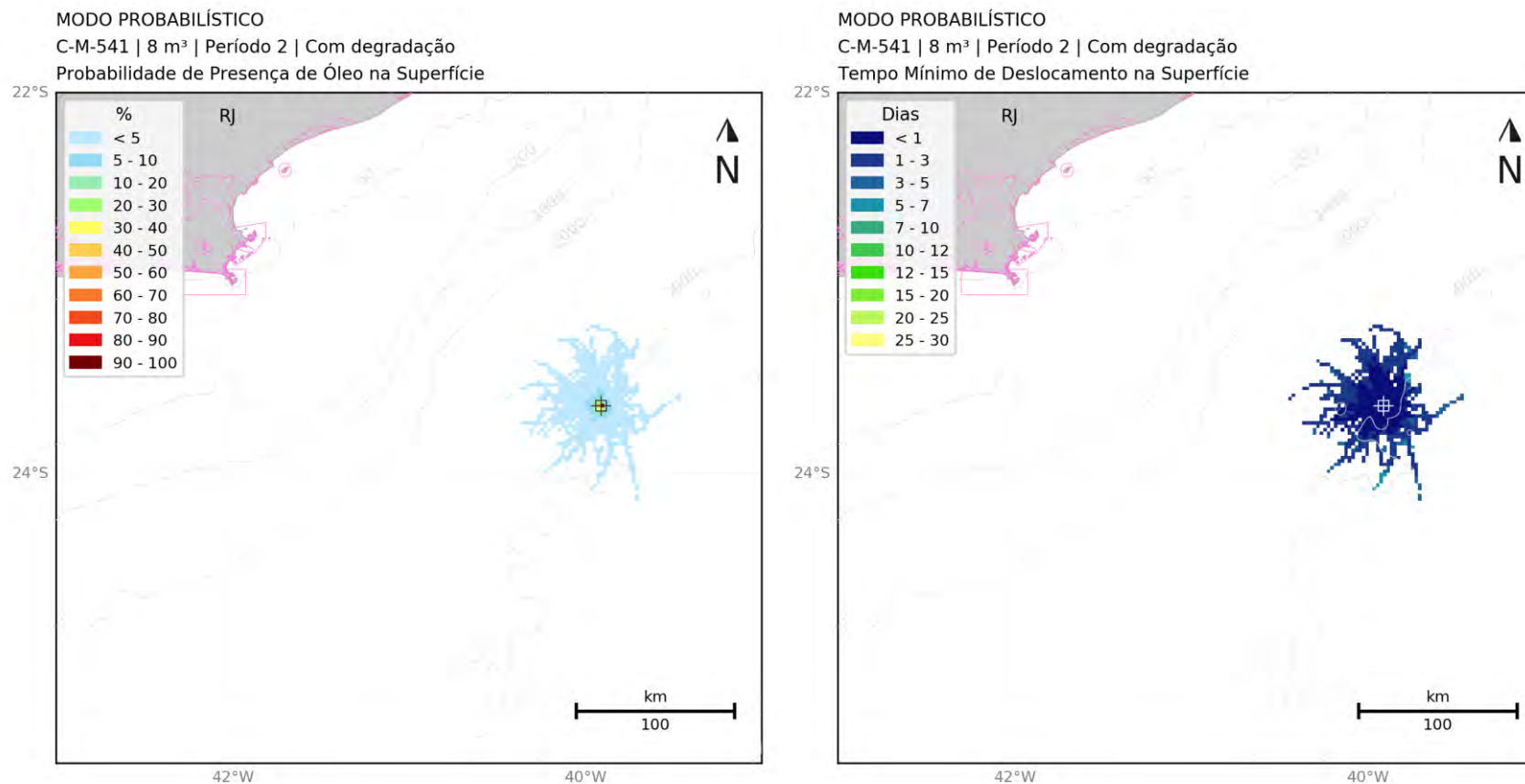


Figura 28: Mapa de probabilidade de presença de óleo e tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para o vazamento de 8 m³. Período 2 (março a agosto).
Simulação de 720 horas (30 dias).

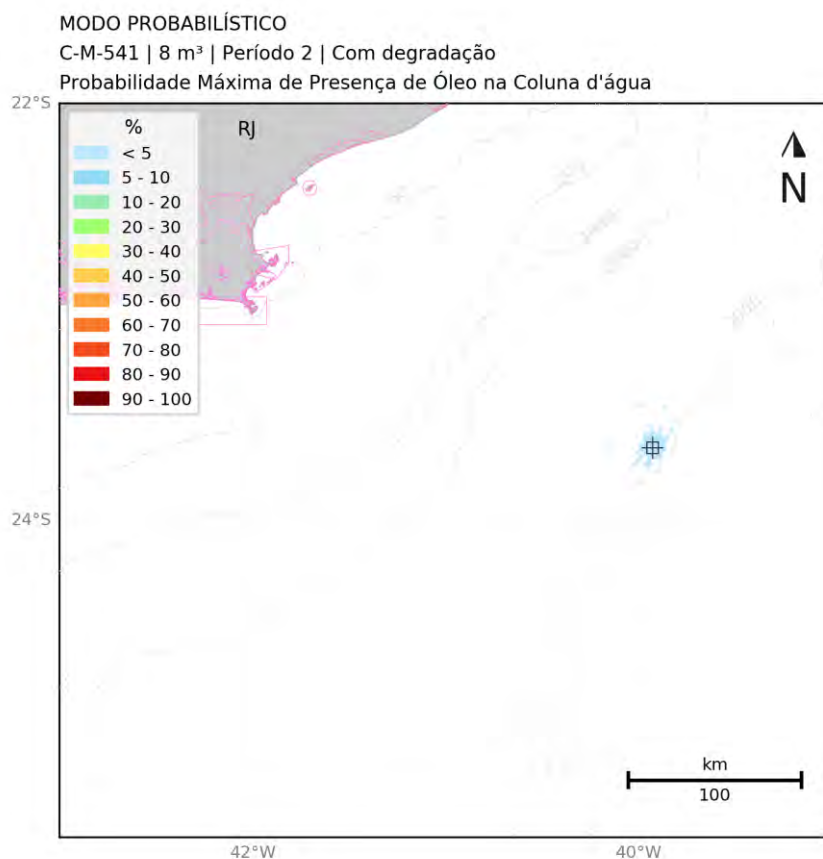


Figura 29: Mapa de probabilidade de presença de óleo na coluna d'água para vazamento de 8 m³. Período 2 (março a agosto). Simulação de 720 horas (30 dias).

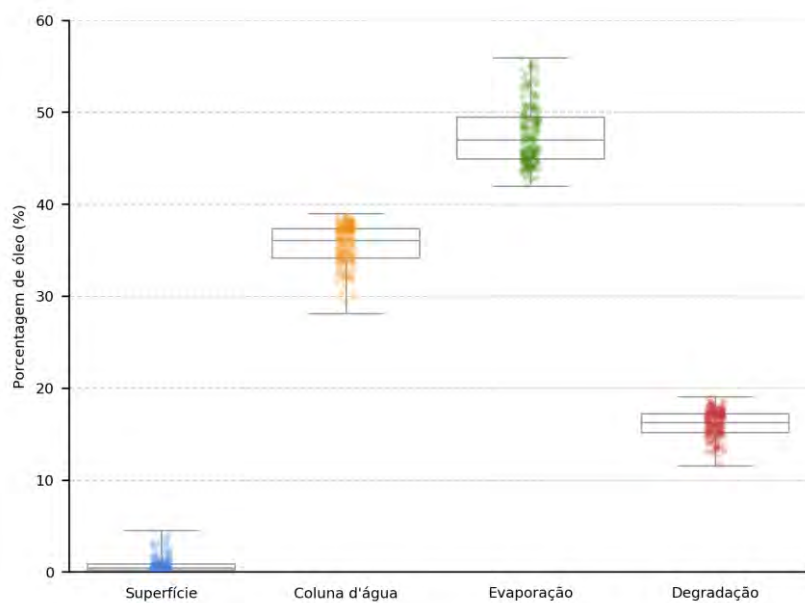


Figura 30: Balanço de massa das simulações probabilísticas para vazamento de 8 m³. Período 2 (março a agosto). Simulação de 720 horas (30 dias).

3.2.1.2 Vazamento de 200 m³

Para os vazamentos de 200 m³ é observado um espalhamento das trajetórias do óleo em diversas direções. No entanto, assim como nos cenários de 8 m³, as maiores probabilidades apresentam direção preferencial para sudoeste, devido aos ventos de nordeste, mais frequentes na região, e direção preferencial da Corrente do Brasil.

Para esse volume de vazamento, o padrão da área possível de ser impactada é similar tanto no Período 1 (setembro a fevereiro) quanto no Período 2 (março a agosto), sendo esta observada em regiões afastadas, a mais de 110 km da costa, com profundidades acima de 1.000 m, sem que haja probabilidade de presença de óleo sobre a plataforma continental, na costa ou em alguma unidade de conservação.

Valores de probabilidade acima de 30% são observados próximos ao ponto de vazamento, a uma distância máxima de 7 km no Período 1 e 4 km no Período 2. Já áreas com valores de probabilidades menores, de até 5%, são observadas a distâncias de até 180 km do ponto de vazamento no Período 1 e 170 km no Período 2. Neste último, observa-se uma área maior de probabilidade para nordeste do ponto de vazamento, associada a valores menores que 5%. Isso ocorre por ser este período caracterizado por maior variação das direções dos ventos, com maior frequência de ventos do terceiro quadrante, decorrentes de entradas de frentes frias. As regiões mais afastadas podem ser alcançadas em até 10 dias no Período 1, e em até 15 dias no Período 2.

A área com probabilidade de presença de óleo na coluna d'água, nas camadas mais superficiais, é similar à observada em superfície, com valor máximo de 47% no Período 1 e 41% no Período 2. O alcance máximo em profundidade no Período 1 é de 62 metros, mas abaixo de 40 metros de profundidade a probabilidade de presença de óleo é menor que 5%. No Período 2 o alcance máximo é de 52 metros e abaixo de 40 metros de profundidade a probabilidade de presença de óleo é menor que 5%.

Em relação aos processos intempéricos atuantes ao longo dos 30 dias de simulação, semelhante ao observado para os vazamentos de 8 m³, observa-se que a retirada de óleo da superfície ocorreu, principalmente, através do processo de evaporação, mediana em torno de 47%, seguido pela dispersão do óleo na coluna d'água (mediana em torno de 36%). O valor mediano da degradação foi cerca de 16% do total de óleo e, após 30 dias, o óleo em superfície em ¾ das simulações foi de até 1% do total.

Os mapas de probabilidade de presença de óleo em superfície e na coluna d'água, e de tempo mínimo de chegada, além do gráfico de balanço de massa para o vazamento de 200 m³ no Período 1 e no Período 2 são apresentados a seguir (Figura 31 a Figura 36).

3.2.1.2.1 Período 1

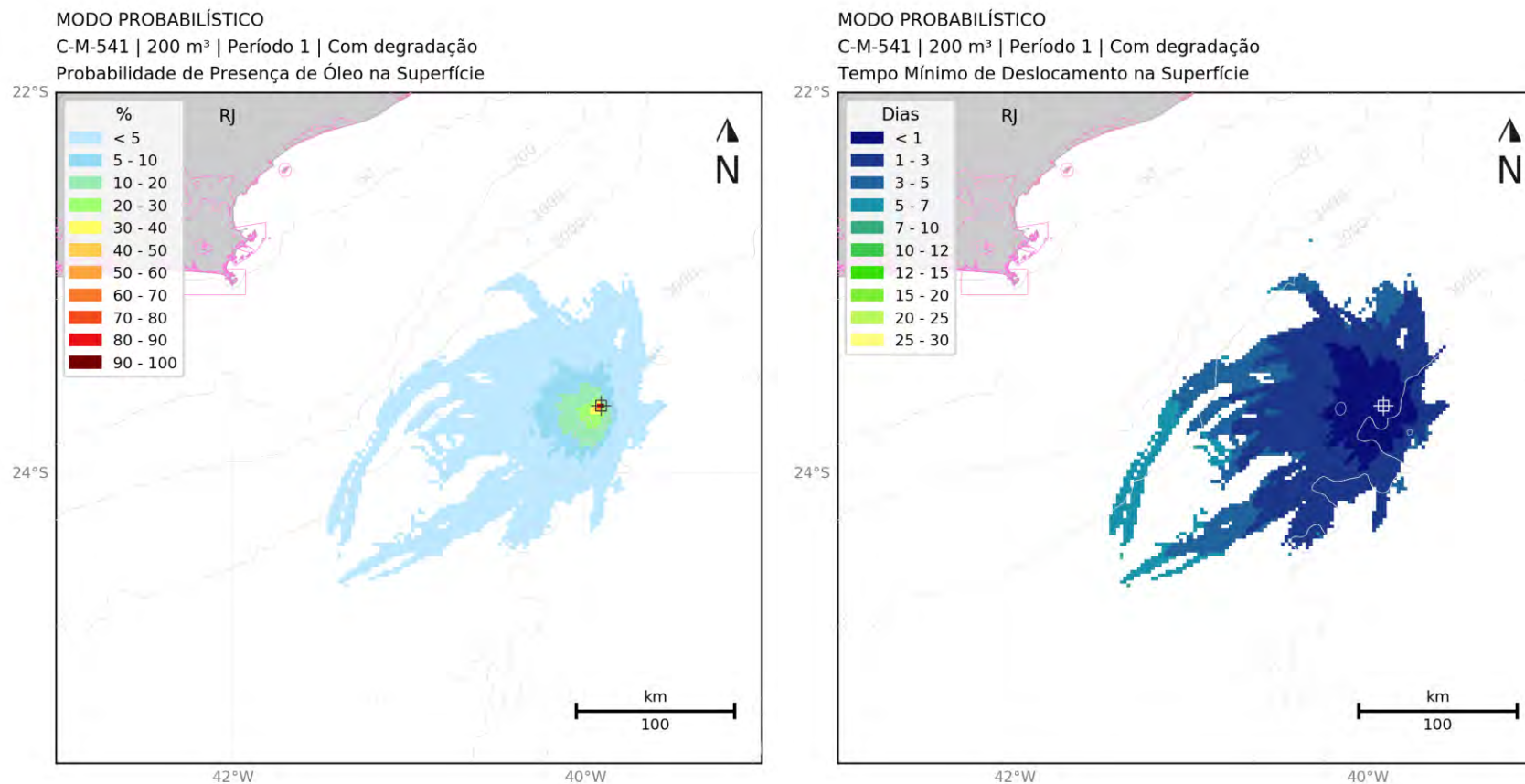


Figura 31: Mapa de probabilidade de presença de óleo e tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para o vazamento de 200 m³. Período 1 (setembro a fevereiro). Simulação de 720 horas (30 dias).

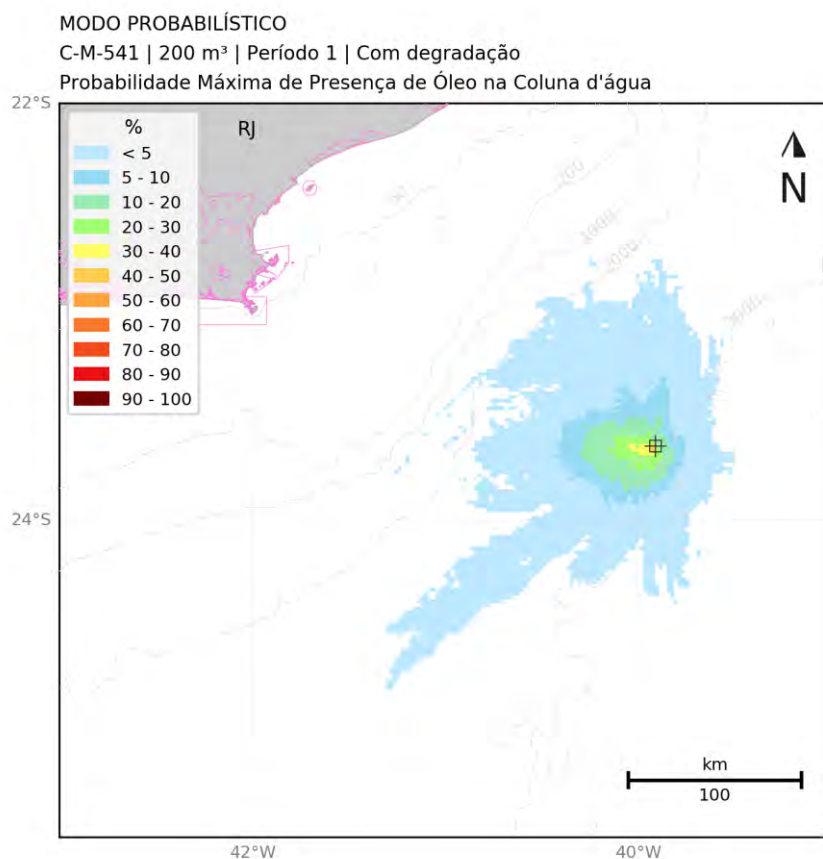


Figura 32: Mapa de probabilidade de presença de óleo na coluna d'água para vazamento de 200 m³.
Período 1 (setembro a fevereiro). Simulação de 720 horas (30 dias).

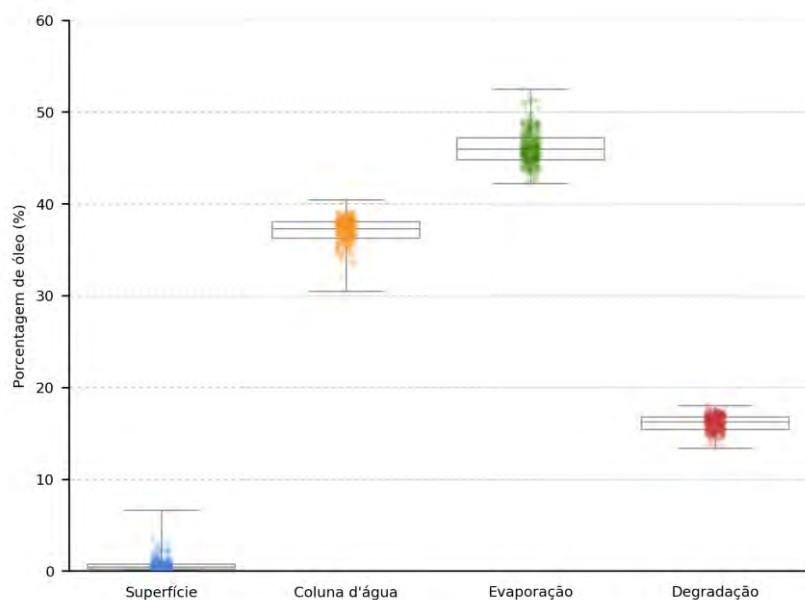


Figura 33: Balanço de massa das simulações probabilísticas para vazamento de 200 m³. Período 1
(setembro a fevereiro). Simulação de 720 horas (30 dias).

3.2.1.2.2 Período 2

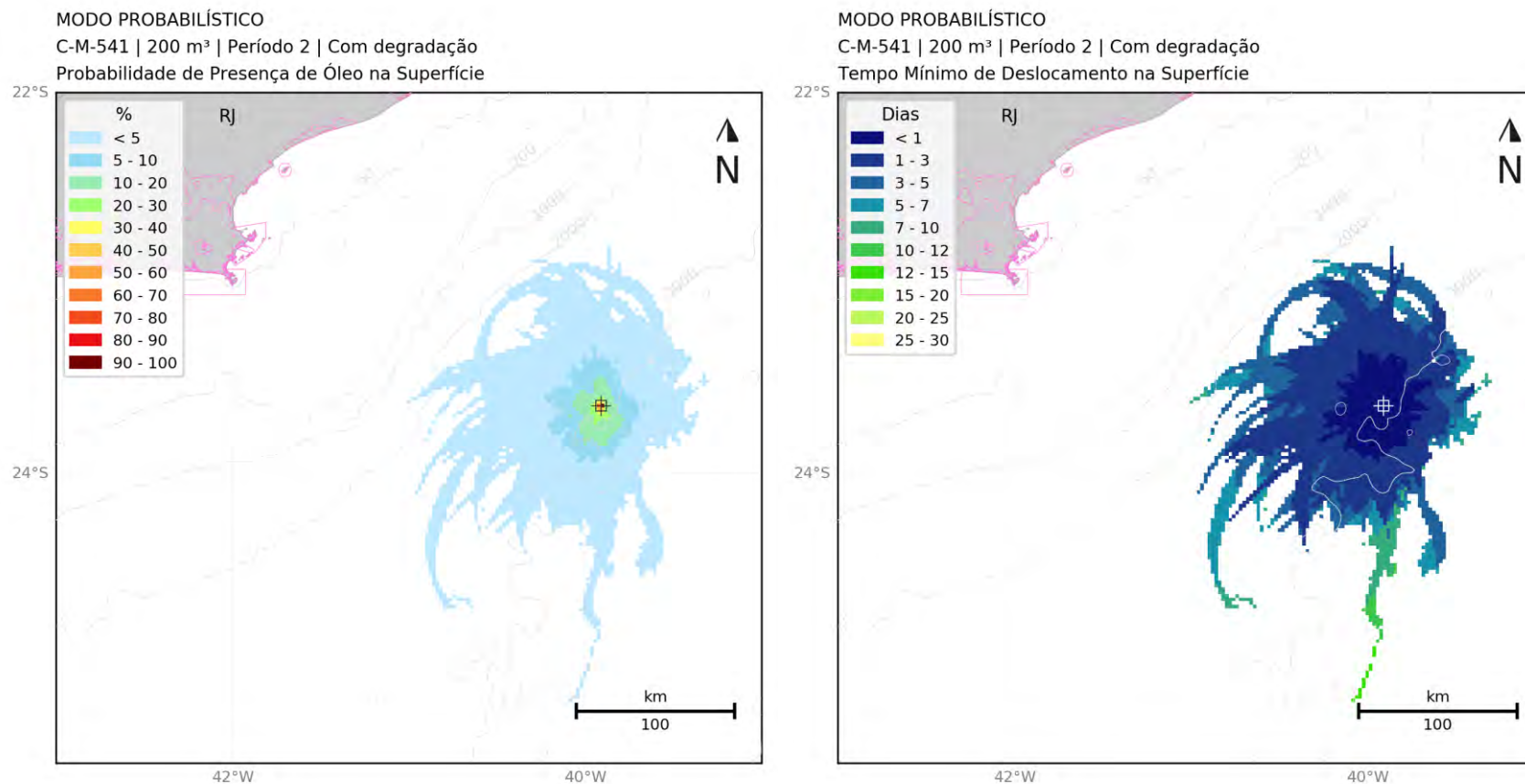


Figura 34: Mapa de probabilidade de presença de óleo e tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para o vazamento de 200 m³. Período 2 (março a agosto).
Simulação de 720 horas (30 dias).

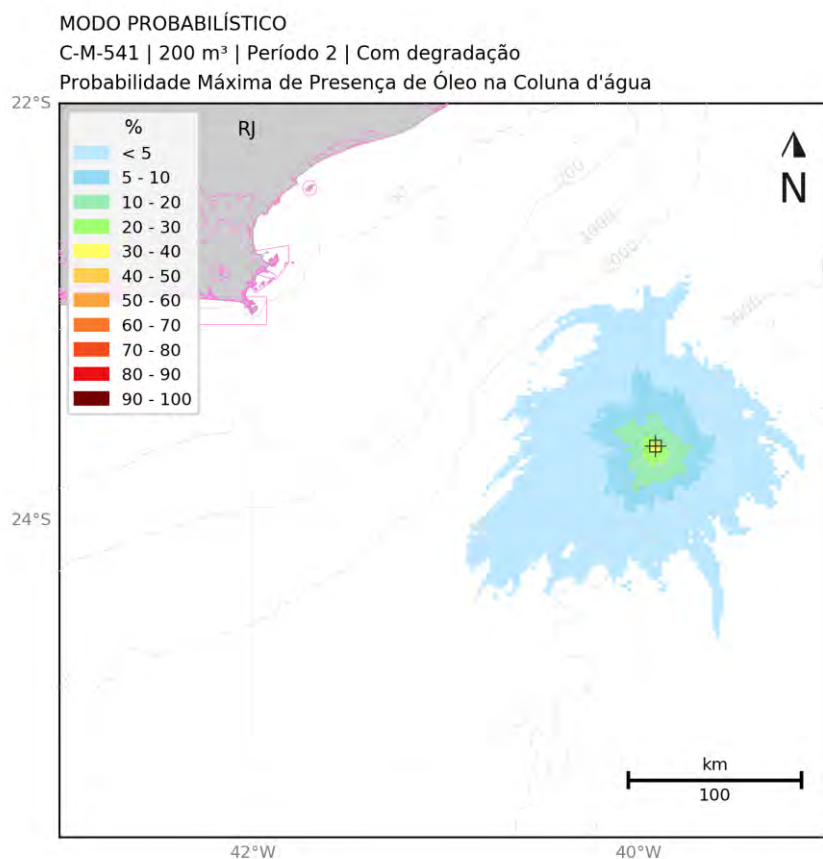


Figura 35: Mapa de probabilidade de presença de óleo na coluna d'água para vazamento de 200 m³. Período 2 (março a agosto). Simulação de 720 horas (30 dias).

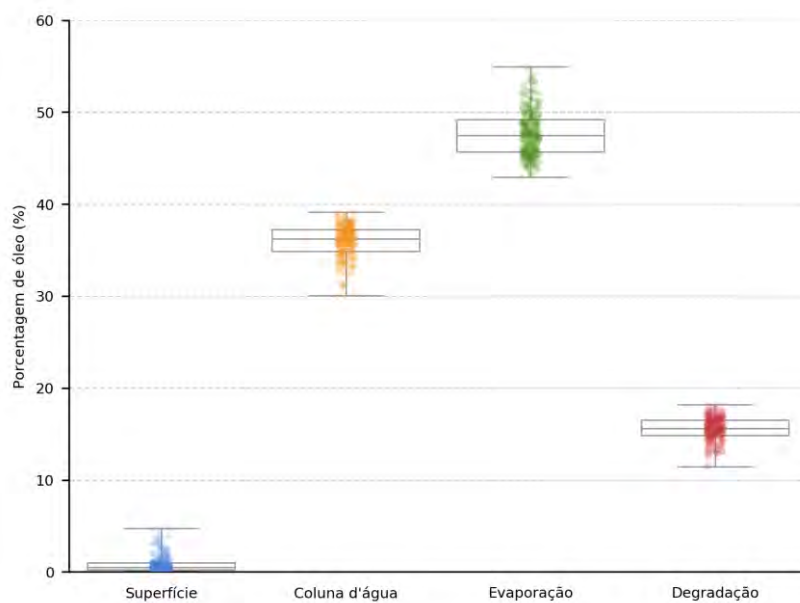


Figura 36: Balanço de massa das simulações probabilísticas para vazamento de 200 m³. Período 2 (março a agosto). Simulação de 720 horas (30 dias).

3.2.1.3 Vazamento de Pior Caso

Para os vazamentos de *blowout* a partir do fundo (651.248 m^3), após a ascensão do óleo à superfície, sua deriva é preferencialmente para sudoeste do ponto de vazamento, devido à predominância de ventos do primeiro quadrante e do fluxo principal da Corrente do Brasil para esta direção, em especial na região do talude continental. No entanto, observa-se também a deriva do óleo para sudeste devido à ocorrência de correntes nesta direção na região do ponto de vazamento, em função dos meandramentos da CB.

Para esse maior volume, decorrente de vazamento contínuo por 30 dias e monitoramento da dispersão do óleo por mais 30 dias, a área possível de ser impactada é maior do que a dos cenários de menor volume e seu padrão apresenta algumas diferenças quando comparados os cenários do Período 1 (setembro a fevereiro) e do Período 2 (março a agosto).

No Período 2, por apresentar uma maior variação da direção dos ventos e o enfraquecimento da Corrente do Brasil (CB), a extensão da área com probabilidades de chegada de óleo acima de 30% na direção sudoeste é menor. Além disso, são observadas probabilidades mais altas sobre a plataforma continental neste período do que no Período 1, decorrente da maior frequência de frentes frias e ventos do segundo e terceiro quadrante. Por sua vez, no Período 1, a área de probabilidade encontra-se mais afastada da costa e se estende mais a norte e mais a sul do que no Período 2.

No Período 1, não há probabilidade de chegada de óleo na costa, mas há probabilidade de chegada em 1 (uma) unidade de conservação (APA Costa das Algas), com valor de 0,3%. A menor distância da costa à área de probabilidade em superfície é de 10 km, relativa ao município de Armação dos Búzios, no estado do Rio de Janeiro.

Já no Período 2, há probabilidade de chegada de óleo em Cabo Frio e Armação dos Búzios, no Rio de Janeiro e em sete municípios no Espírito Santo (São Mateus, Linhares, Aracruz, Fundão, Serra, Vitória, Guarapari). A maior probabilidade, 4,7%, e o menor tempo de chegada de óleo, de 25,5 dias, são observados em Armação dos Búzios – RJ. Além destes municípios, 13 unidades de conservação apresentaram probabilidade de chegada de óleo, também com valor máximo de 4,7% e tempo mínimo de 25,5 dias, no PE da Costa do Sol, localizado bem na costa de Armação dos Búzios-RJ.

Em superfície, probabilidades de presença de óleo acima de 30% são observadas a uma distância máxima de 905 km do ponto de vazamento, no Período 1, e de 770 km no Período 2. Em relação ao tempo mínimo de deslocamento de óleo, tem-se que o óleo pode atingir distâncias de cerca de 16 km no primeiro dia após o vazamento. Em ambos os cenários o menor tempo de ascensão do óleo do fundo à superfície foi de 14 horas.

Na coluna d'água, uma vez que se trata de um vazamento de fundo, nos dois períodos as probabilidades máximas chegam a 100% e, nas camadas mais rasas, seguem o mesmo padrão

observado na superfície. Há probabilidades entre 90 e 100% no entorno das coordenadas do vazamento, desde a profundidade local, de 3.020 m, onde ocorre o vazamento, até a superfície. No entanto, são nas camadas mais superficiais que ocorre o maior espalhamento horizontal do óleo.

Em relação à concentração de óleo na coluna d'água, assim como o padrão de probabilidade, valores acima de 20 ppb podem ser observados desde as camadas mais profundas até as mais superficiais, com um aumento da área de dispersão com a diminuição da profundidade. Quando avaliados valores de concentração acima de 500 ppb nota-se que estes são mais concentrados na direção do ponto de vazamento, tanto nas camadas mais superficiais (menos de 100 metros) quanto abaixo de 2.000 metros de profundidade.

No fundo marinho, são observadas probabilidades de presença de óleo em regiões com mais de 2.000 metros de profundidade no entorno do ponto de vazamento e, também, em regiões da plataforma continental (menos de 200 metros de profundidade). O valor máximo de 100% é observado na região do ponto de vazamento, enquanto sobre a plataforma, os valores máximos estão entre 50-60%, no Período 1, e entre 30-40%, no Período 2.

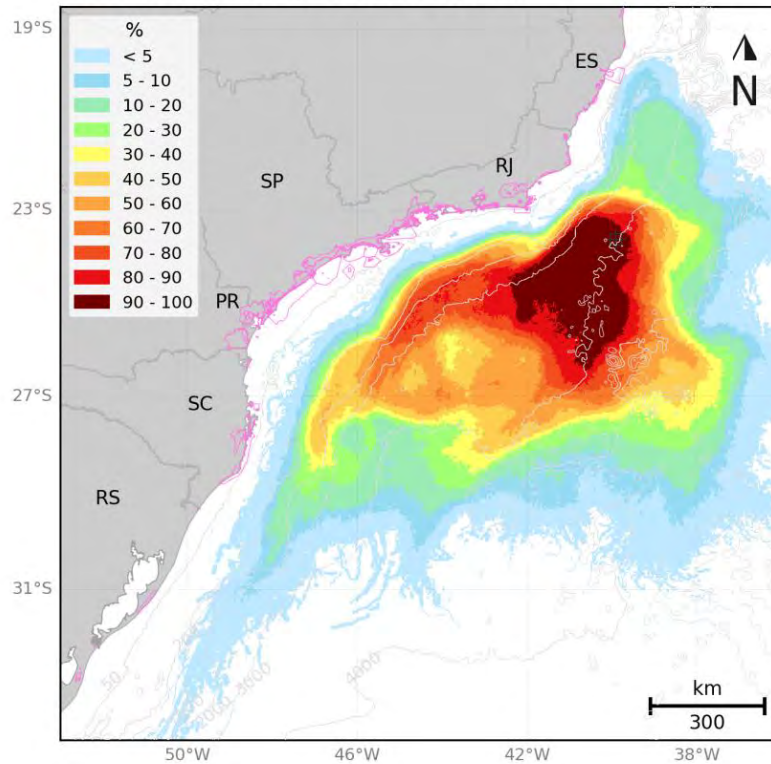
Em relação aos processos intempéricos atuantes ao longo dos 60 dias de simulação, por se tratar de um vazamento de fundo, a dispersão do óleo na coluna d'água foi o processo mais significativo, apresentando mediana em torno de 38%, seguido pelo processo de degradação com mediana de 37%. O processo de evaporação apresentou mediana em torno de 24%. Ao final da simulação, o óleo em superfície em $\frac{3}{4}$ das simulações se mostrou inferior a 2% do total vazado. No fundo marinho, este foi inferior a 0,1% em todas as simulações. No Período 2, em que foi observada probabilidade de toque, a porcentagem máxima de óleo na costa foi de 0,01%.

Os mapas de probabilidade de presença de óleo em superfície, na coluna d'água, no fundo marinho e na costa, de tempo mínimo de deslocamento em superfície, e de concentração de óleo na coluna d'água, além do gráfico de balanço de massa para o vazamento de *blowout* a partir do fundo, no Período 1 e no Período 2, são apresentados a seguir (Figuras 37 a 46).

3.2.1.3.1 Período 1

MODO PROBABILÍSTICO

C-M-541 | 651.248 m³ | Período 1 | Com degradação
Probabilidade de Presença de Óleo na Superfície



MODO PROBABILÍSTICO

C-M-541 | 651.248 m³ | Período 1 | Com degradação
Tempo Mínimo de Deslocamento na Superfície

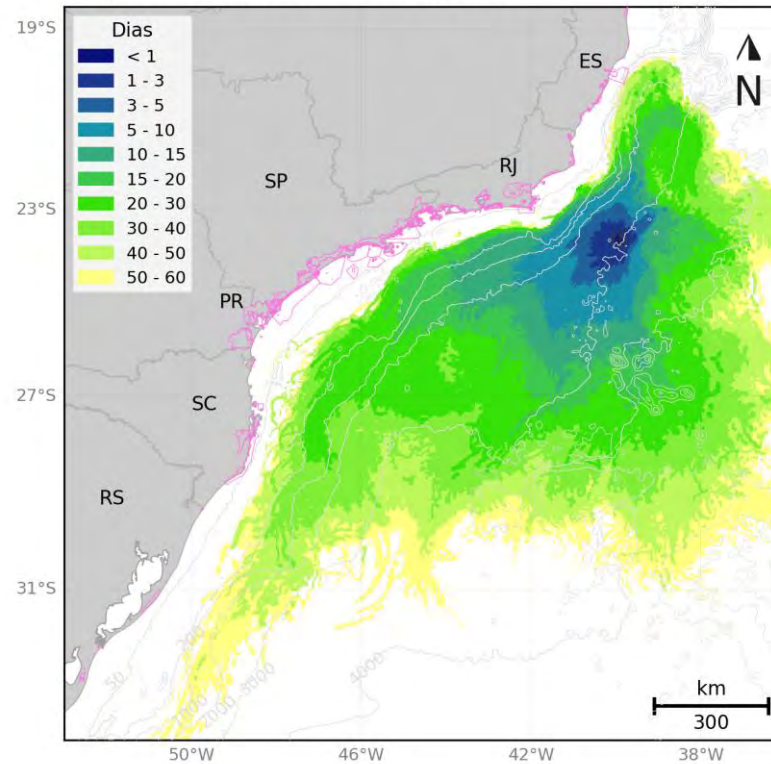


Figura 37: Mapas de probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para o vazamento de *blowout*. Período 1 (setembro a fevereiro).

Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

C-M-541 | 651.248 m³ | Período 1 | Com degradação

Probabilidade Máxima de Presença de Óleo na Coluna d'água

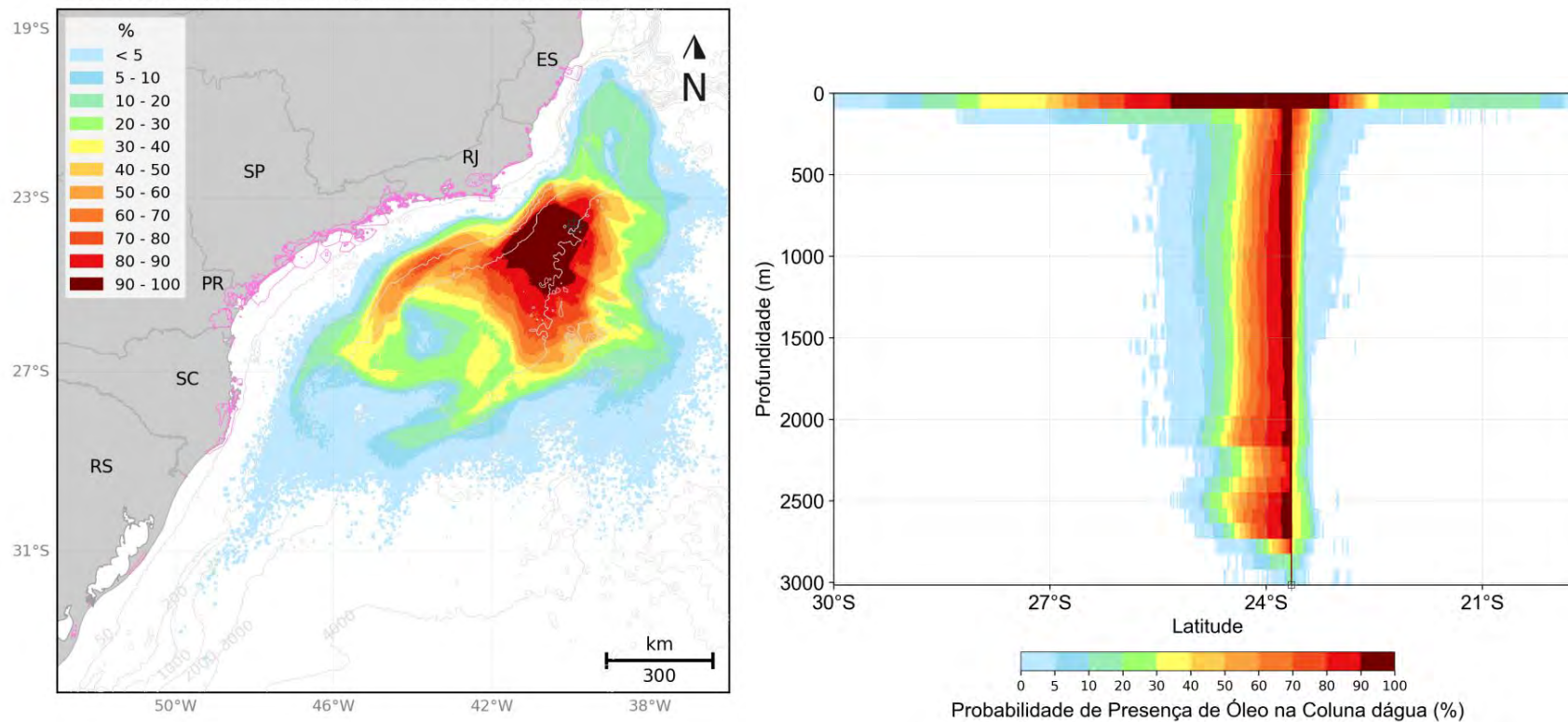


Figura 38: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água e perfil vertical, em latitude, para o vazamento de *blowout*. Período 1 (setembro a fevereiro). Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

C-M-541 | 651.248 m³ | Período 1 | Com degradação

Concentração Máxima de Óleo na Coluna d'água

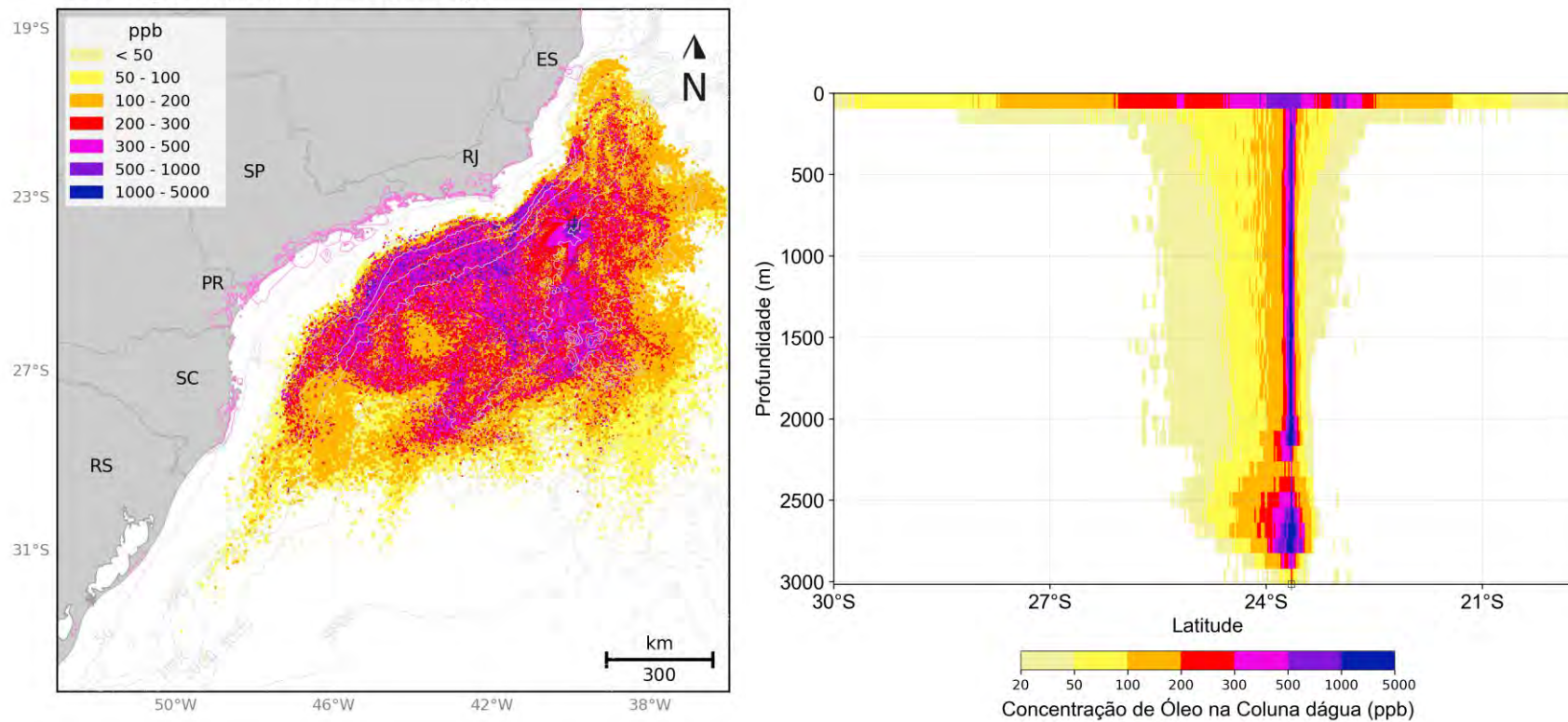


Figura 39: Mapa de concentração máxima de óleo na coluna d'água e perfil vertical, em latitude, para o vazamento de *blowout*. Período 1 (setembro a fevereiro).
Simulação de 60 dias.

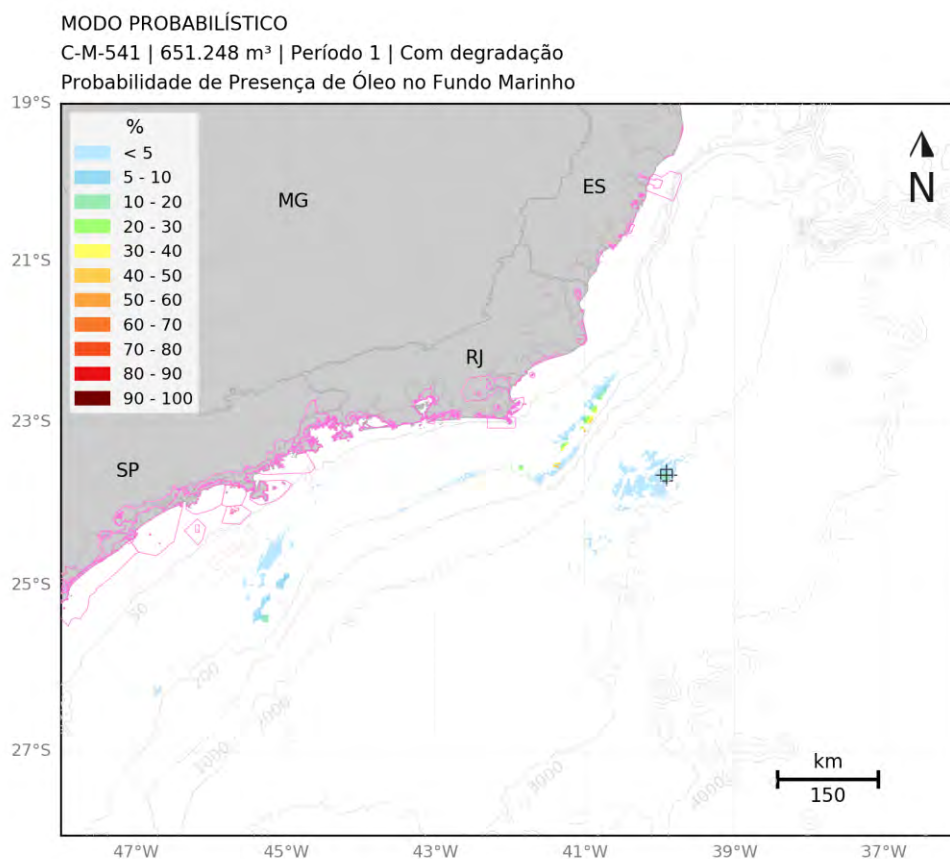


Figura 40: Mapa de probabilidade de presença de óleo no fundo marinho para o vazamento de *blowout*. Período 1 (setembro a fevereiro). Simulação de 60 dias.

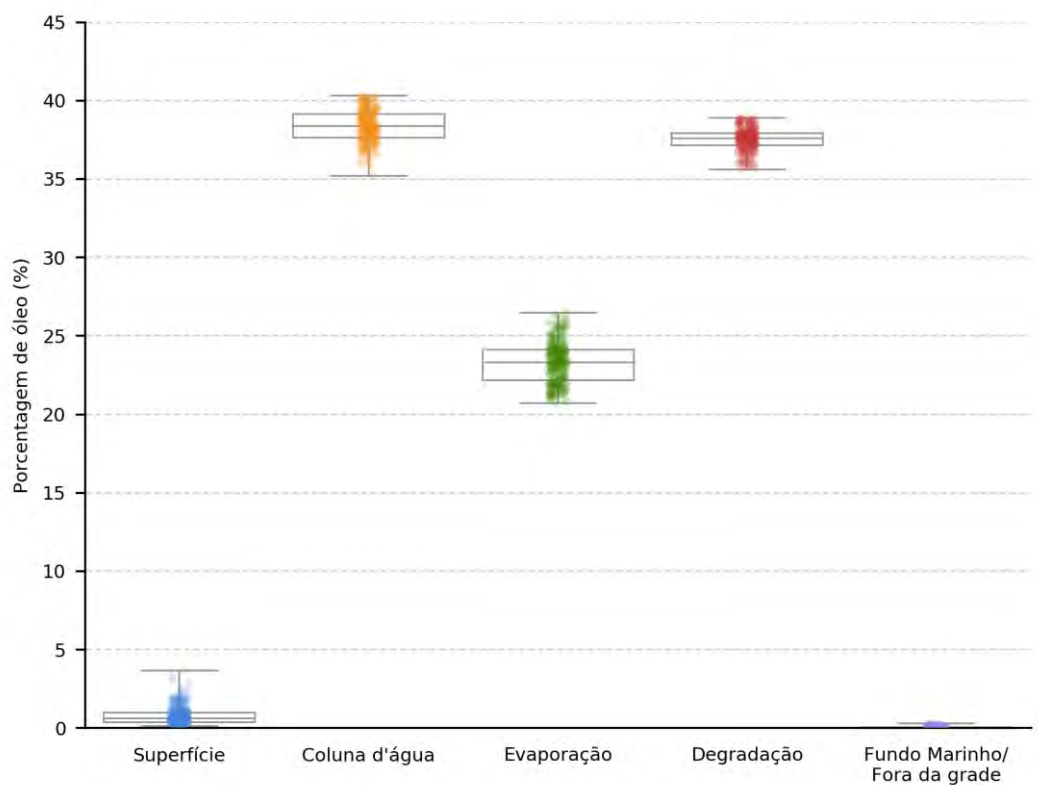


Figura 41: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de *blowout*.
Período 1 (setembro a fevereiro). Simulação de 60 dias.

3.2.1.3.2 Período 2

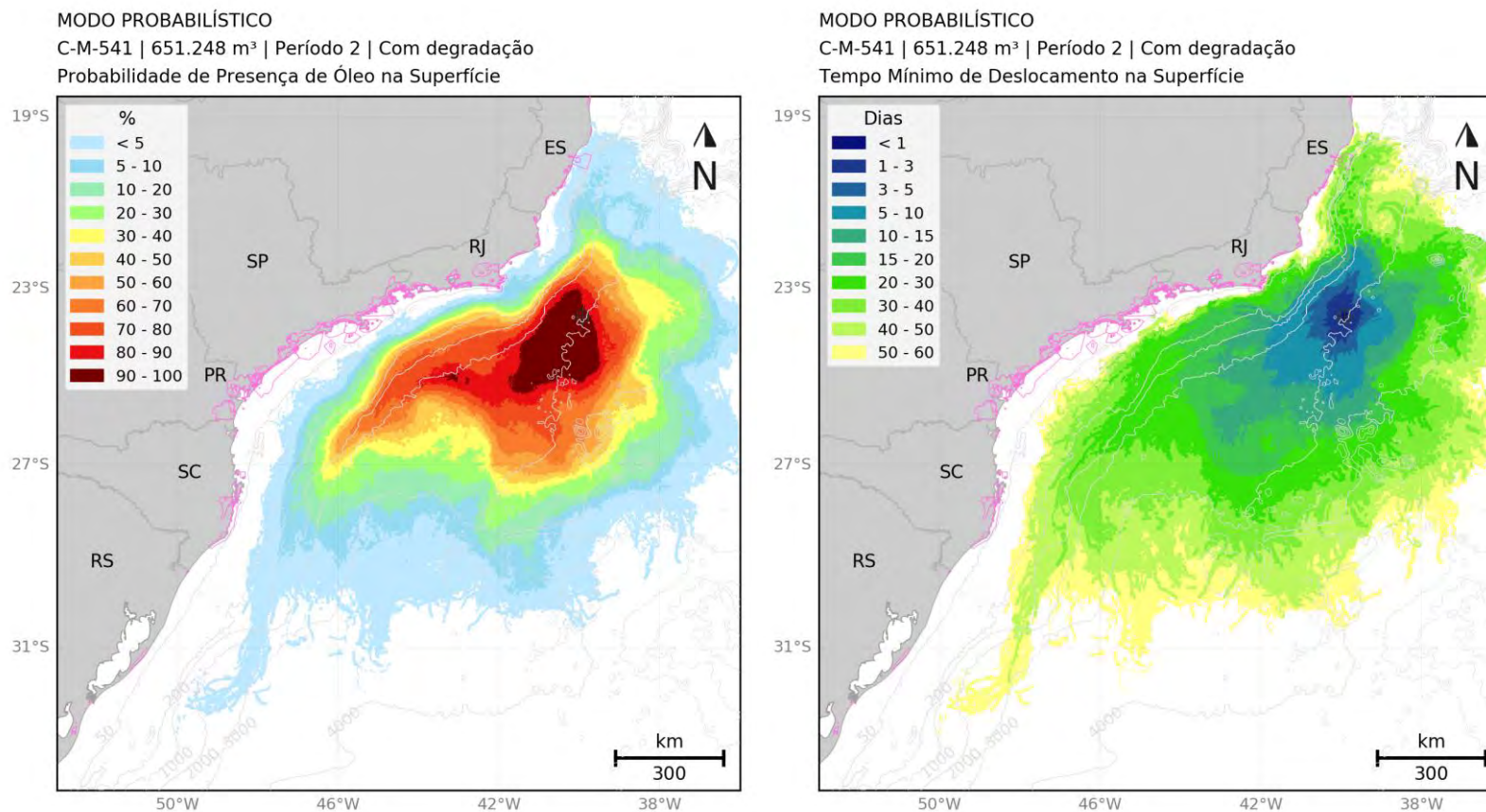


Figura 42: Mapa de probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo em superfície para o vazamento de *blowout*. Período 2 (março a agosto).
Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

C-M-541 | 651.248 m³ | Período 2 | Com degradação

Probabilidade Máxima de Presença de Óleo na Coluna d'água

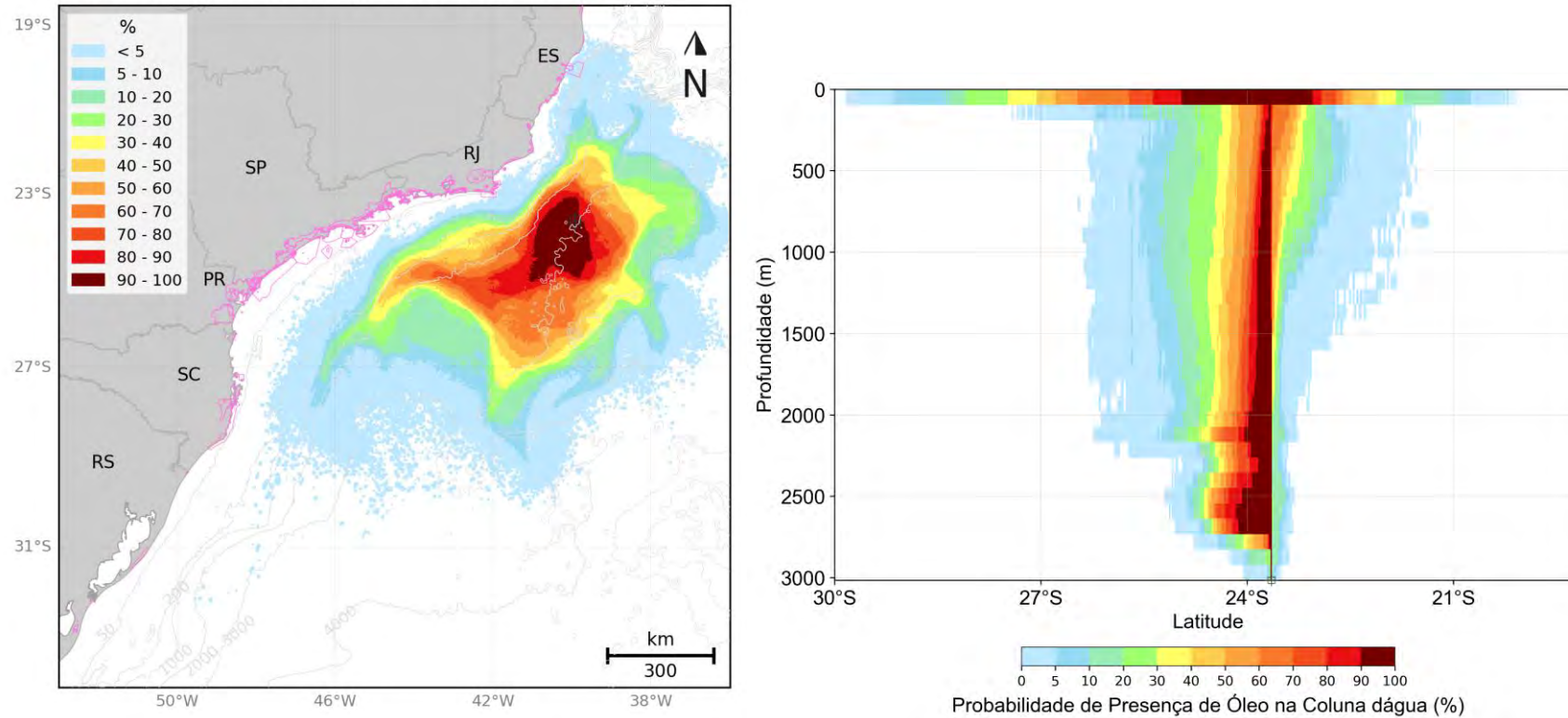


Figura 43: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água e perfil vertical em latitude para o vazamento de *blowout*. Período 2 (março a agosto).
Simulação de 60 dias.

MODO PROBABILÍSTICO

C-M-541 | 651.248 m³ | Período 2 | Com degradação

Concentração Máxima de Óleo na Coluna d'água

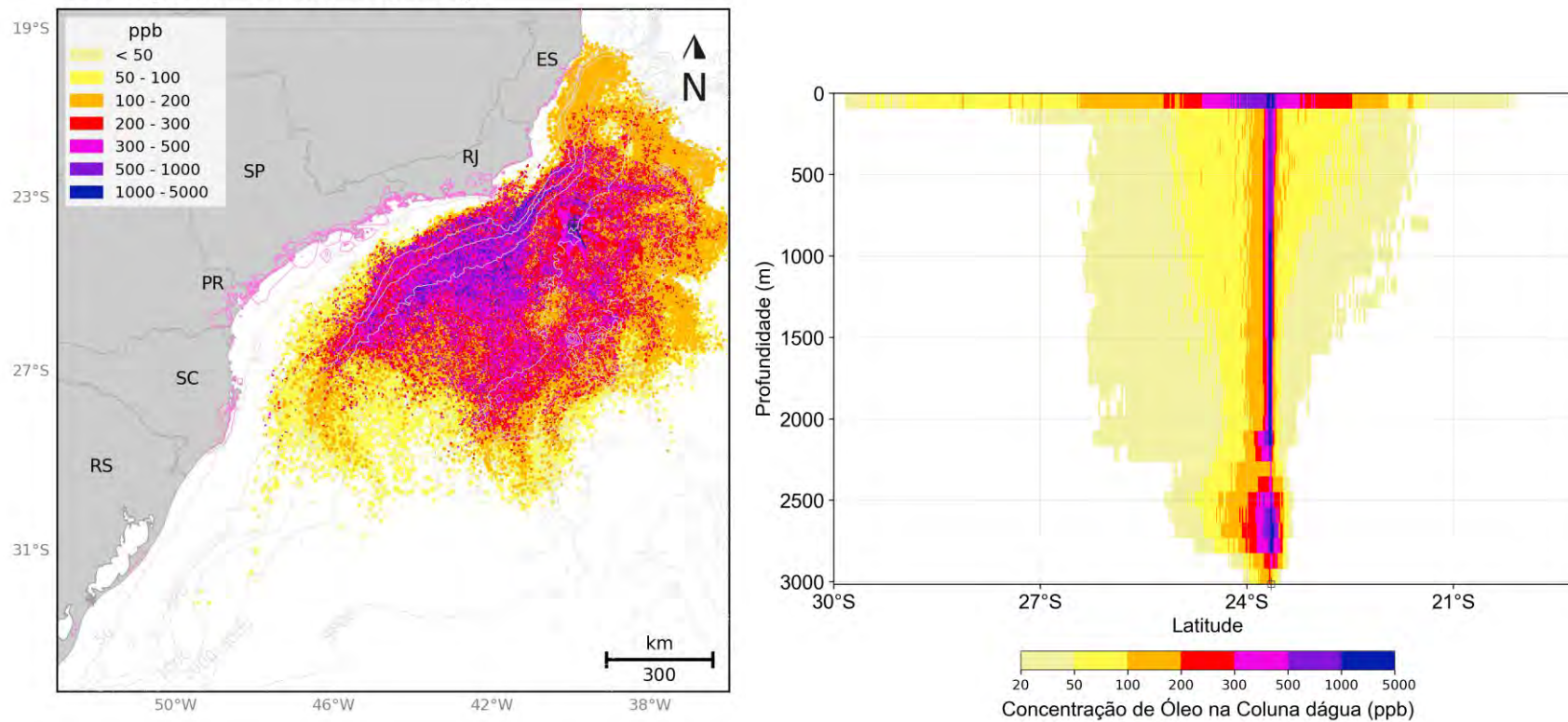


Figura 44: Mapa de concentração máxima de óleo na coluna d'água e perfil vertical em latitude para o vazamento de *blowout*. Período 2 (março a agosto). Simulação de 60 dias.

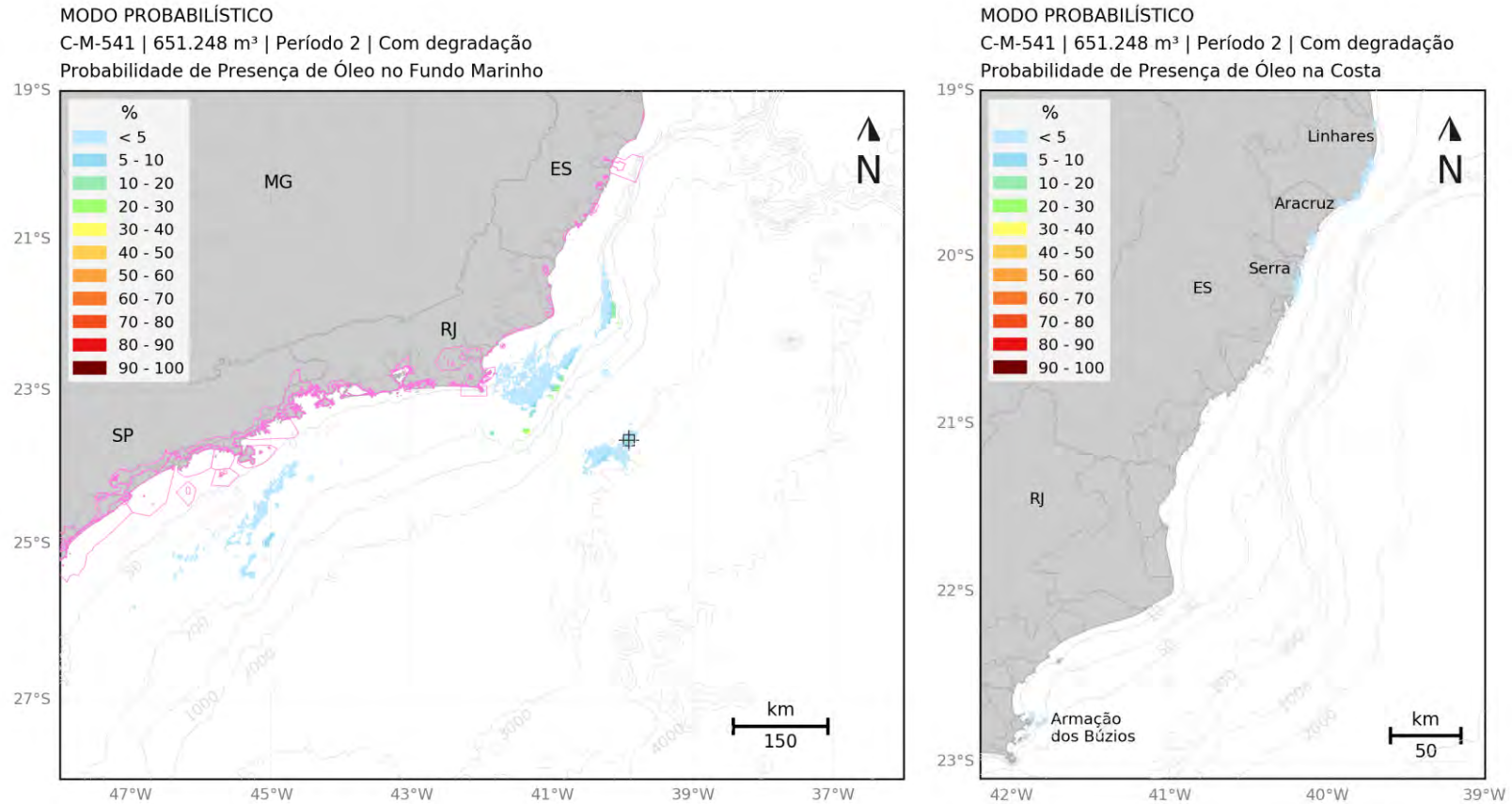


Figura 45: Mapa de probabilidade de presença de óleo no fundo marinho e na costa para o vazamento de *blowout*. Período 2 (março a agosto). Simulação de 60 dias.

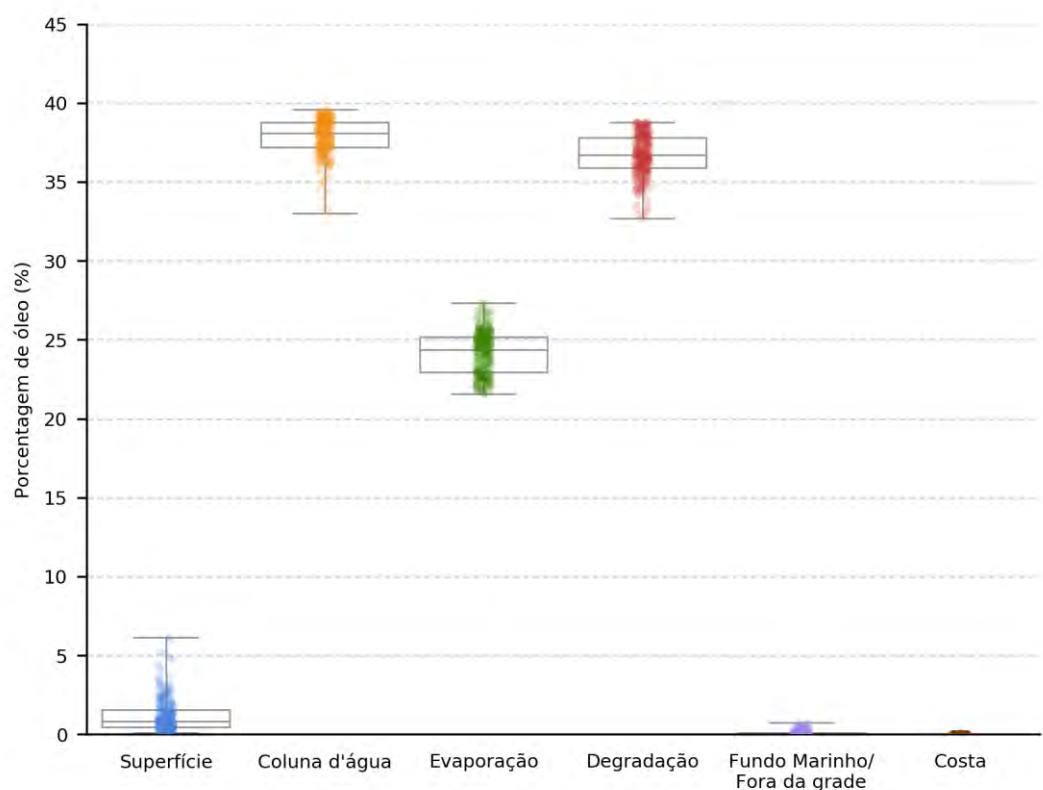


Figura 46: Balanço de massa das simulações probabilísticas para um vazamento de *blowout*.
Período 2 (março a agosto). Simulação de 60 dias.

A seguir, são apresentadas informações específicas para os municípios e Unidades de Conservação com possibilidade de serem atingidos por óleo em um vazamento de blowout durante a atividade de perfuração do Bloco C-M-541 (Tabela 12 e Tabela 13).

Tabela 12: Probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada, massa máxima e extensão de toque nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um vazamento de *blowout*, nos cenários de Período 1 e Período 2, com degradação.

UF	Município	Probabilidade (%)		Tempo Mínimo (dias)		Massa Máxima (t/km)		Extensão (Km)	
		Período 1	Período 2	Período 1	Período 2	Período 1	Período 2	Período 1	Período 2
		1	2	1	2	1	2	1	2
ES	São Mateus	-	0,3	-	51,3	-	-	-	-
	Linhares	-	1	-	47,3	-	2,8	-	39,6
	Aracruz	-	0,7	-	40,4	-	2,8	-	17
	Fundão	-	0,3	-	48,7	-	0,8	-	2,8
	Serra	-	1	-	50,2	-	4,2	-	14,1
	Vitória	-	0,3	-	52,1	-	-	-	-
	Guarapari	-	1	-	41,5	-	-	-	-
RJ	Armação dos Búzios	-	4,7	-	25,5	-	25,4	-	11,3
	Cabo Frio	-	0,7	-	50,7	-	0,6	-	2,8

* Em azul, valores retirados dos resultados em superfície para os municípios que não apresentaram massa acumulada na costa acima do limiar monitorado, no entanto apresentaram resultados em superfície a uma distância de menos de 2 km (um ponto de grade) da costa. Como os valores apresentados são da superfície, não são apresentados valores de massa acumulada na costa e extensão.

Tabela 13: Probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas Unidades de Conservação com possibilidade de serem atingidas para o vazamento de *blowout*, nos cenários de Período 1 e Período 2, com degradação.

Unidade de Conservação	Probabilidade (%)		Tempo Mínimo (dias)	
	Período 1	Período 2	Período 1	Período 2
ARIE do Degredo	-	0,3	-	51
REBIO de Comboios	-	0,7	-	47,3
APA Costa das Algas	0,3	4	52,8	28,2
RVS de Santa Cruz	-	2,7	-	36,2
APA da Lagoa Jacuném	-	0,7	-	51,6
APA de Praia Mole	-	0,3	-	51,9
APA Marinha da Armação de Búzios	-	1,3	-	38,1
PE da Costa do Sol	-	4,7	-	25,5
PNM dos Corais de Armação dos Búzios	-	0,7	-	45,4
APA da Praia da Azeda e Azedinha	-	0,7	-	45,4
APA do Pau Brasil	-	0,7	-	50,7
RESEX Marinha Arraial do Cabo	-	4,3	-	31,5
APA Marinha do Litoral Norte	-	0,3	-	47,8

3.2.1.4 Resumo dos resultados probabilísticos

Conforme solicitado no Termo de referência, é apresentado na Tabela 14 um resumo dos principais resultados obtidos nas simulações probabilísticas.

Tabela 14: Resumo dos cenários probabilísticos simulados.

Volume (m³)	Período Sazonal	Tempo Mínimo de Toque (dias)	Tempo Médio de Toque (dias)	Porcentagens de simulações que tocaram a costa (%)	Extensão de toque na costa (km)
8	Período 1	-	-	-	-
	Período 2	-	-	-	-
200	Período 1	-	-	-	-
	Período 2	-	-	-	-
651.248	Período 1	-	-	-	-
	Período 2	25,5	45,9	8,7	87,6

3.2.2 Resultados Determinísticos

Com base nos resultados obtidos nas simulações probabilísticas, foram identificadas as condições críticas para a ocorrência de um vazamento de óleo de grande volume (651.248 m³) na região do Bloco C-M-541, na Bacia de Campos.

Tanto a situação de **menor tempo** de chegada de óleo na costa quanto a situação de **maior massa** acumulada ocorreram no Período 2. Na Tabela 15 são apresentadas as informações dessas condições críticas selecionadas.

Tabela 15: Informações das simulações determinísticas críticas consideradas para um evento de vazamento de óleo de grande volume (651.248 m³), com degradação.

Cenário	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	31/03/2013 23h	25,5	Armação dos Búzios - RJ	32,2
Maior massa de óleo acumulada na costa	13/03/2013 09h	43,7	Armação dos Búzios - RJ	65,8

3.2.2.1 Menor tempo de chegada de óleo à costa

A seguir são apresentadas informações relacionadas aos ventos (Figura 47, Tabela 16 e Tabela 17) e correntes (Figura 48, Tabela 18 e Tabela 19) do período simulado, que se estendeu das 23h do dia 31/03/2013 às 23h do dia 30/05/2013. Os valores estão relacionados ao ponto de grade mais próximo do local do vazamento.

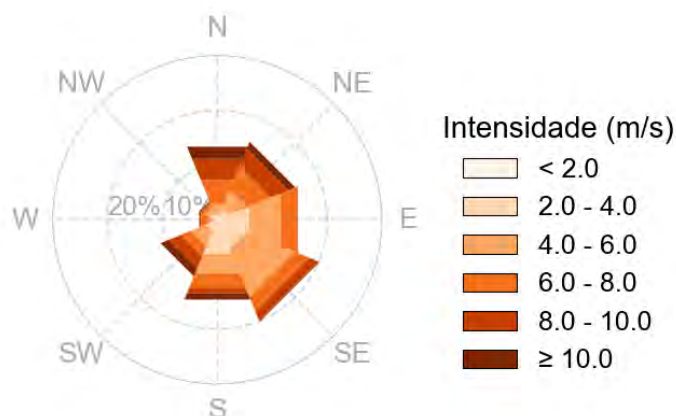


Figura 47: Rosa dos ventos para o período de simulação da situação de menor tempo de toque na costa.

Tabela 16: 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	11	9	7	7	10	6	1	7	4,0
2-4	2	23	84	75	87	27	8	15	22,3
4-6	31	53	89	138	56	43	17	13	30,5
6-8	69	68	47	41	40	28	20	13	22,6
8-10	60	50	2	27	16	34	4	2	13,5
>10	35	19	-	2	18	23	1	3	7,0
Freq. (%)	14,4	15,4	15,9	20,1	15,8	11,2	3,5	3,7	

Tabela 17: 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)
277	207	5,84	0,53	15,55	2,52

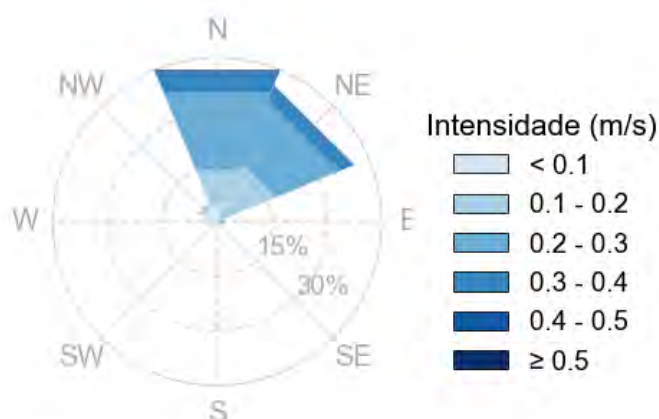


Figura 48: Rosa de corrente para o período de simulação da situação de menor tempo de toque na costa.

Tabela 18: Ocorrência conjunta entre direção e intensidade de corrente para o ponto mais próximo do local do vazamento, para o período da condição de menor tempo de toque na costa.

Direção -> Intensidade (m/s)	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Freq. (%)
<0,1	37	11	2	2	4	17	26	30	17,9
0,1 - 0,2	72	114	8	-	-	-	-	8	28,1
0,2 - 0,3	167	134	5	-	-	-	-	1	42,6
0,3 - 0,4	41	30	-	-	-	-	-	1	10,0
0,4 - 0,5	4	2	-	-	-	-	-	-	0,8
>0,5	3	1	-	-	-	-	-	-	0,6
Freq. (%)	45,0	40,6	2,1	0,3	0,6	2,4	3,6	5,6	

Tabela 19: 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)
23	11	0,20	0,01	0,59	0,09

Pelos dados de vento no ponto do vazamento no período da simulação, nota-se a predominância de ventos de sudeste (20,1%) e predominância de ventos com intensidades entre 4 e 6 m/s (30,5%). Já as informações de correntes mostram que a direção das correntes é preferencialmente para norte (45%) e que as velocidades se concentram entre 0,2 e 0,3 m/s (42,6%).

A seguir (da Figura 49 a Figura 58), é apresentada a deriva do óleo em superfície e na coluna d'água, além da área varrida (em amarelo claro nas figuras) pela mancha de óleo durante toda a simulação. O resultado na coluna d'água representa a integração dos valores de concentração de óleo ao longo da longitude, isto é, é apresentado o maior valor de concentração em cada ponto de grade relativo à longitude e à profundidade.

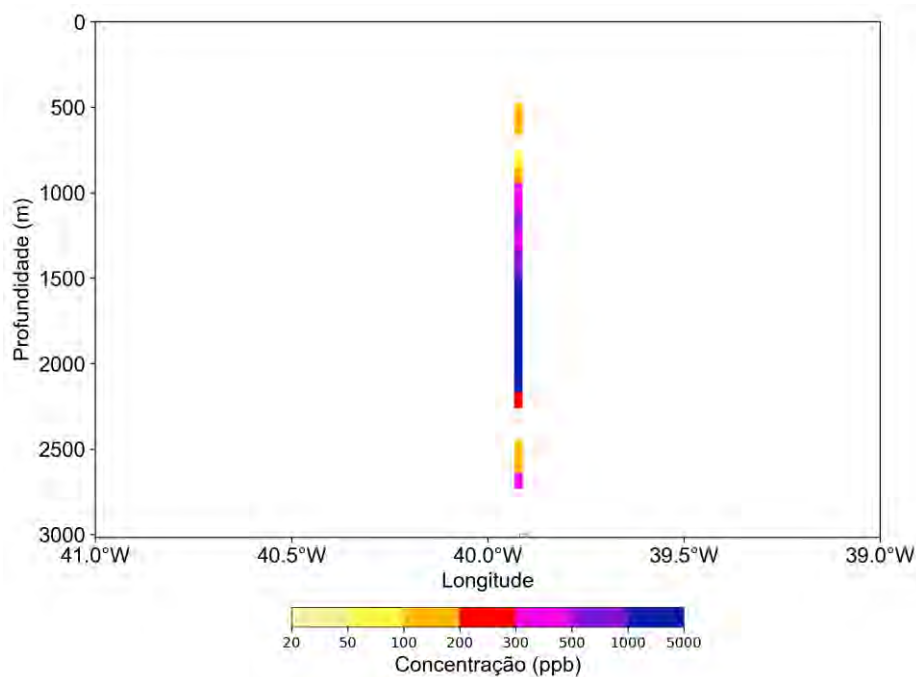


Figura 49: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 12 horas do início do vazamento. Resultado de concentração total de óleo na coluna d'água.

Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO

Menor tempo de chegada de óleo na costa

Data: 02-04-2013 11h

Vento 5.0 m/s: →

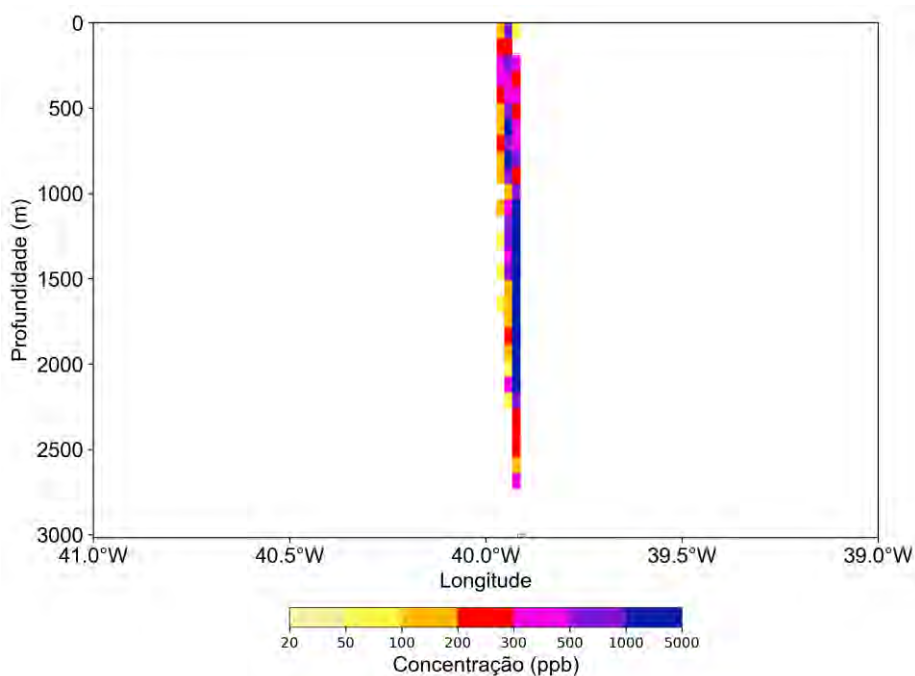
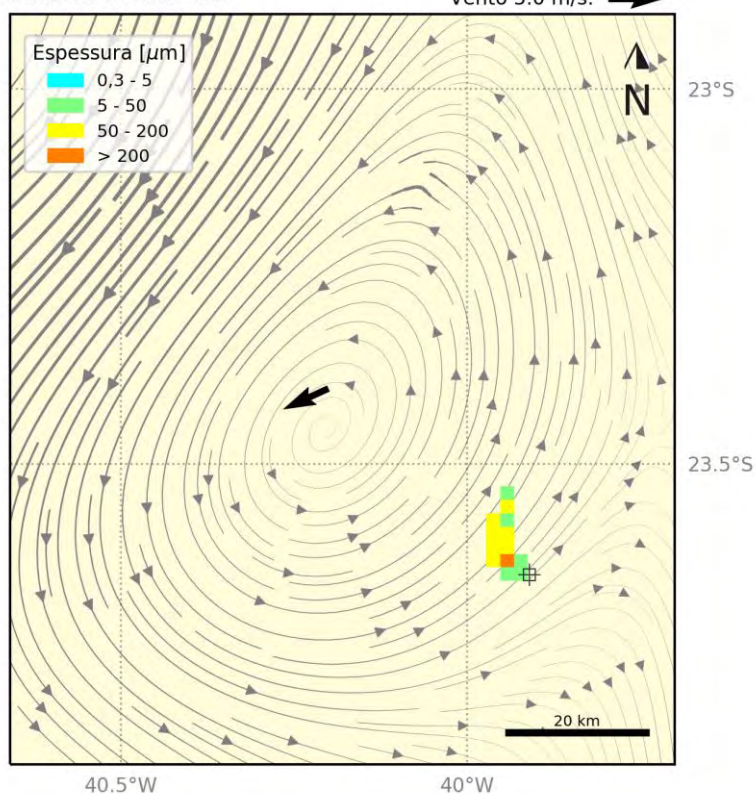


Figura 50: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 36 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO

Menor tempo de chegada de óleo na costa

Data: 03-04-2013 11h

Vento 5.0 m/s: →

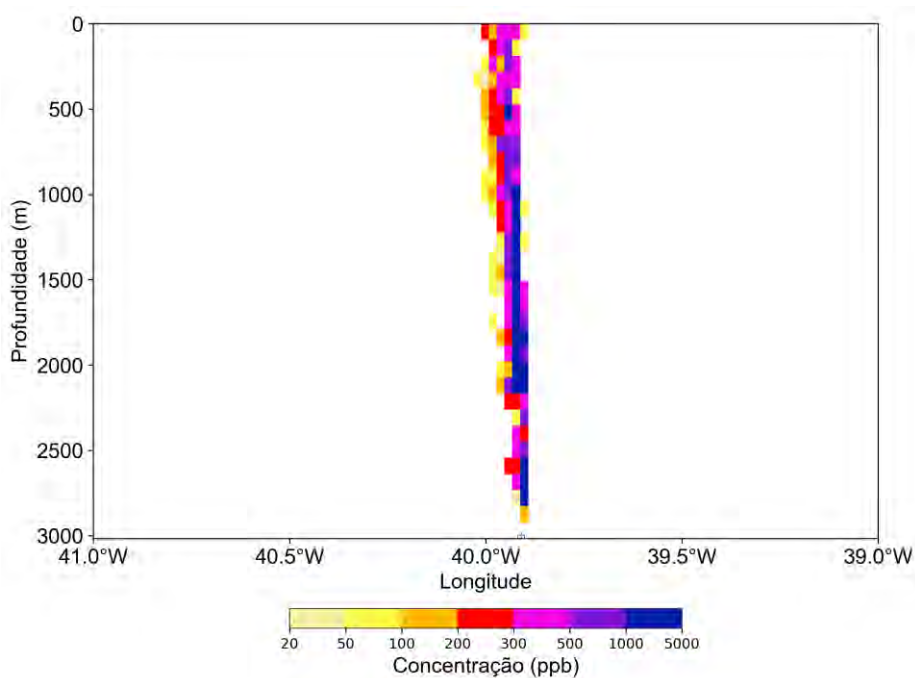
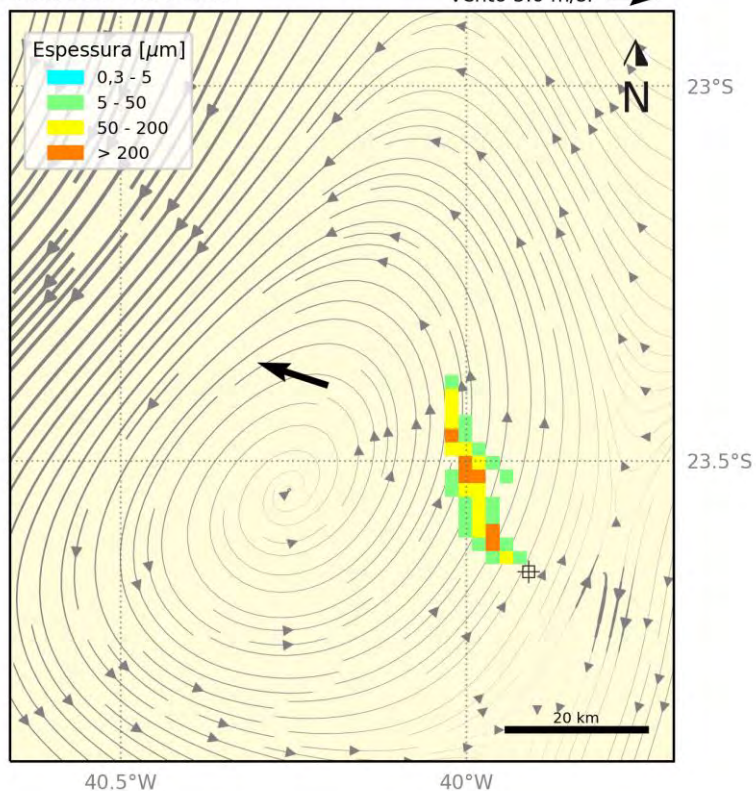


Figura 51: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 60 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO

Menor tempo de chegada de óleo na costa

Data: 07-04-2013 23h

Vento 5.0 m/s: →

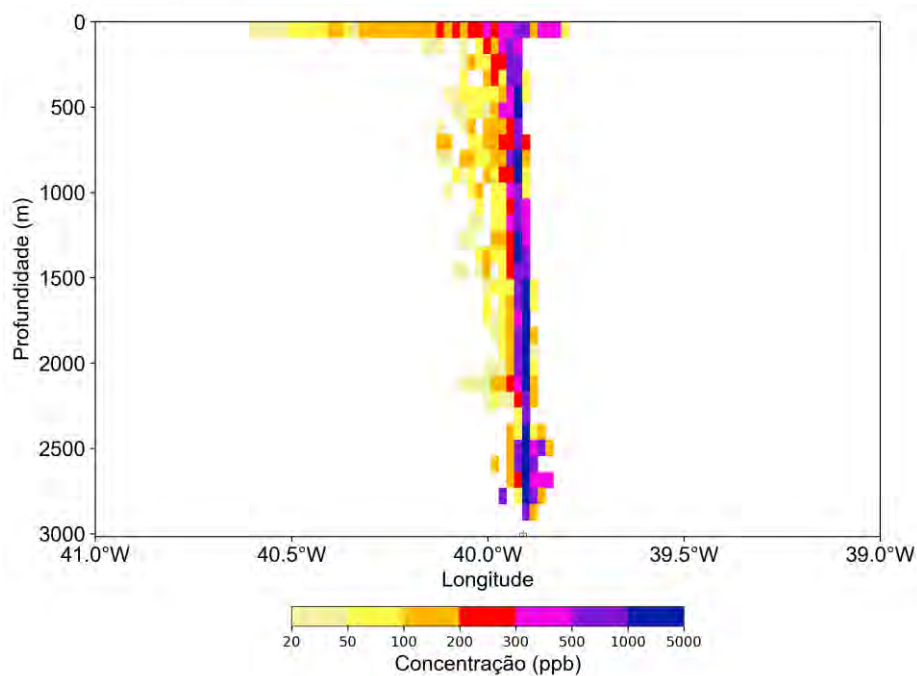
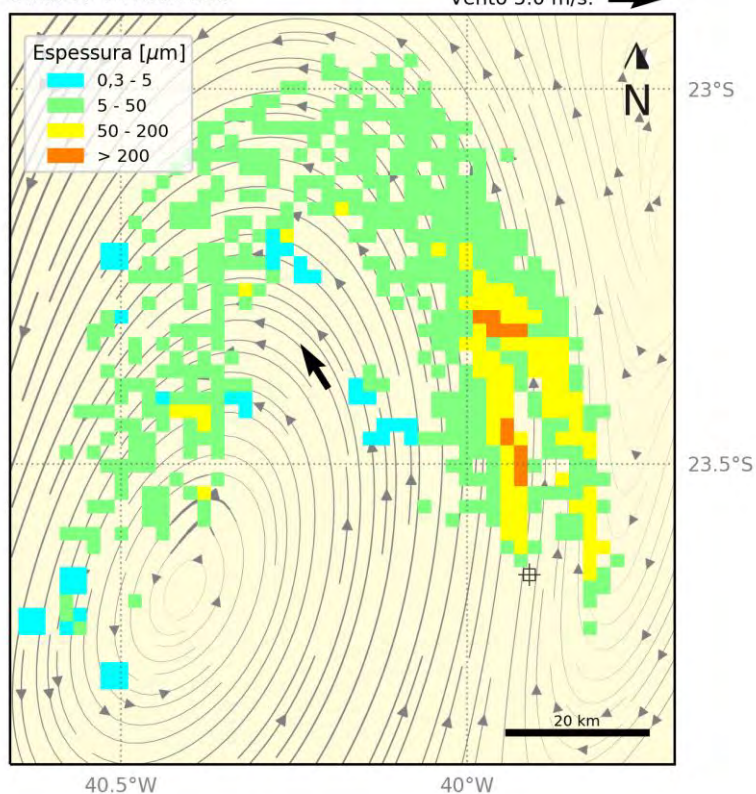


Figura 52: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO

Menor tempo de chegada de óleo na costa

Data: 14-04-2013 23h

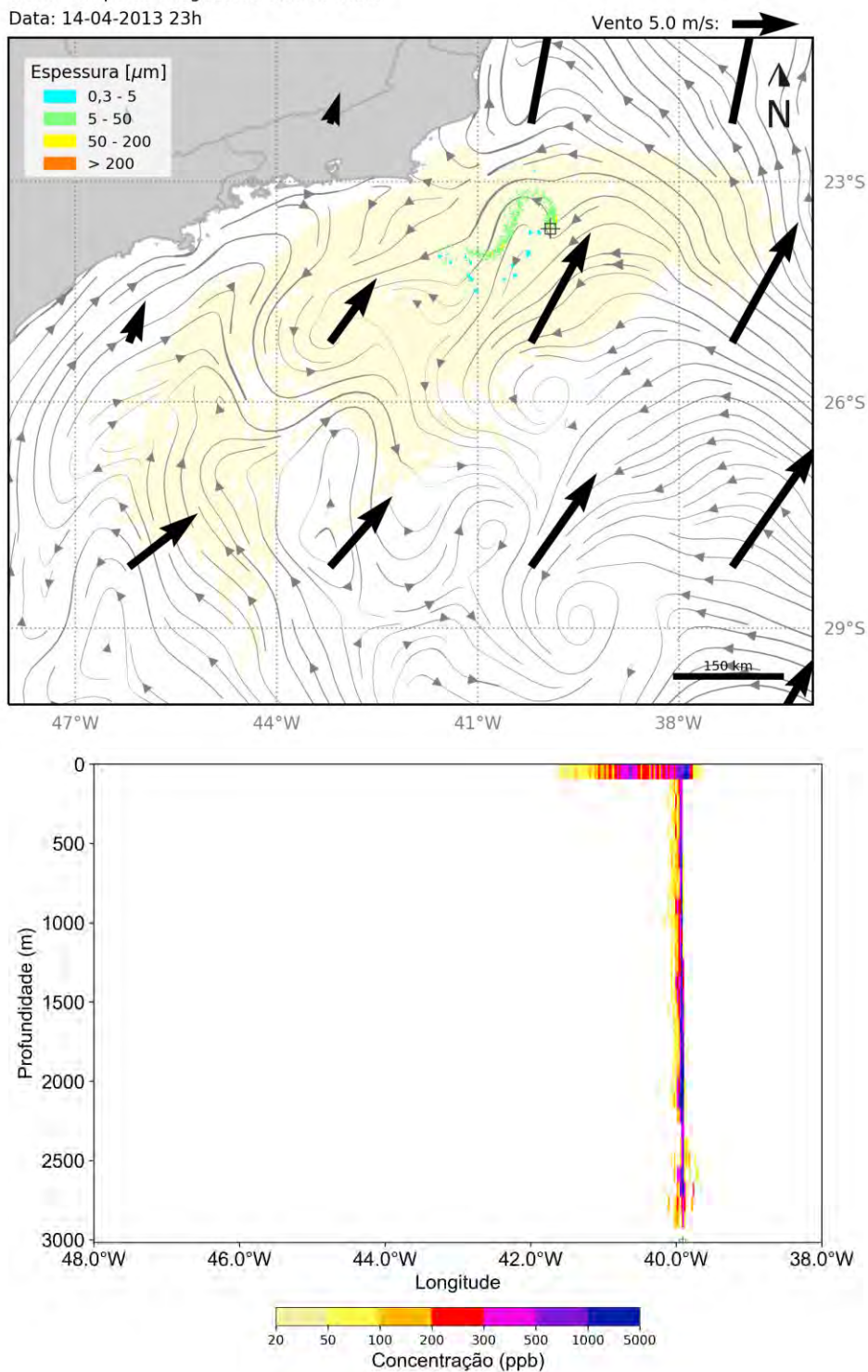


Figura 53: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO

Menor tempo de chegada de óleo na costa

Data: 21-04-2013 23h

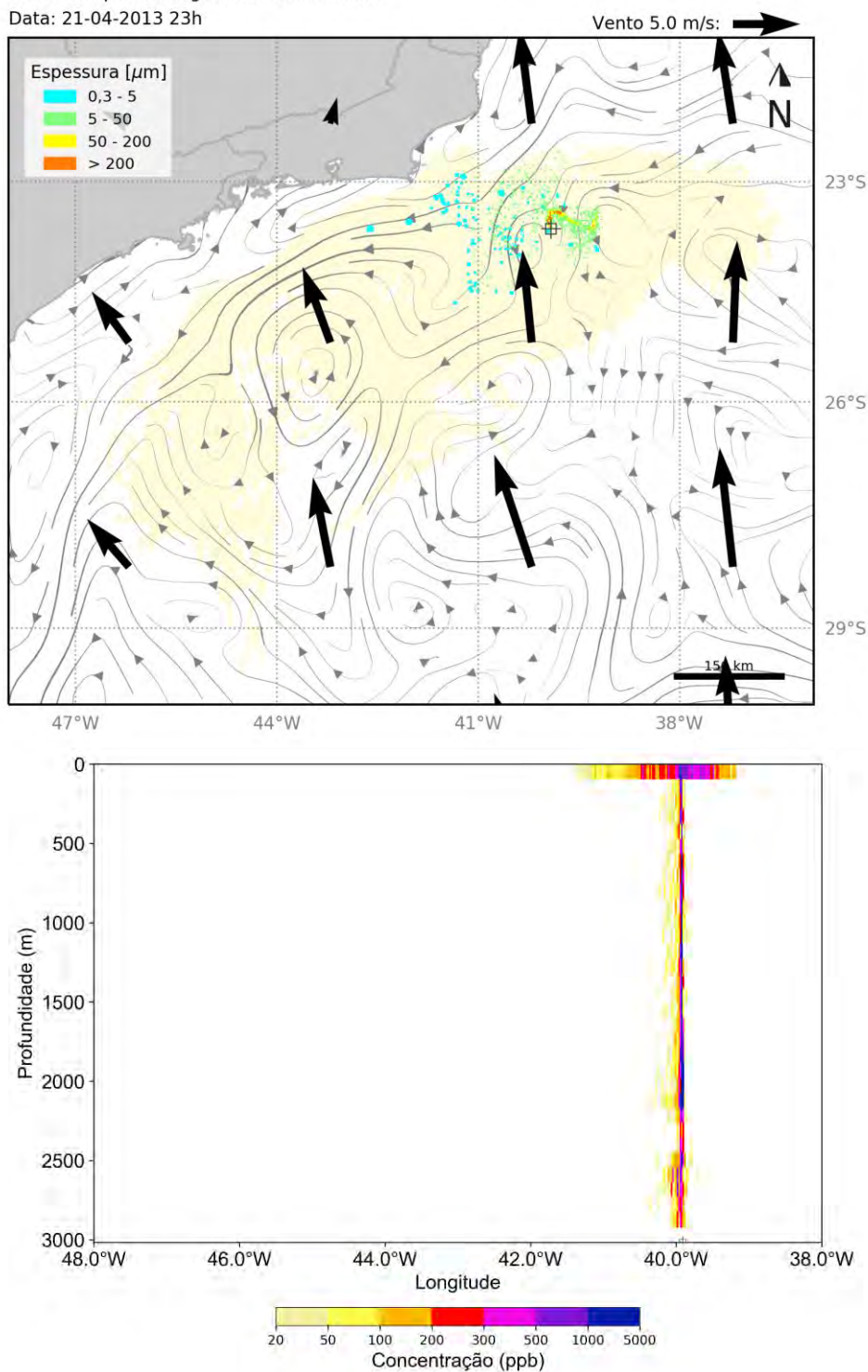


Figura 54: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO

Menor tempo de chegada de óleo na costa

Data: 26-04-2013 11h

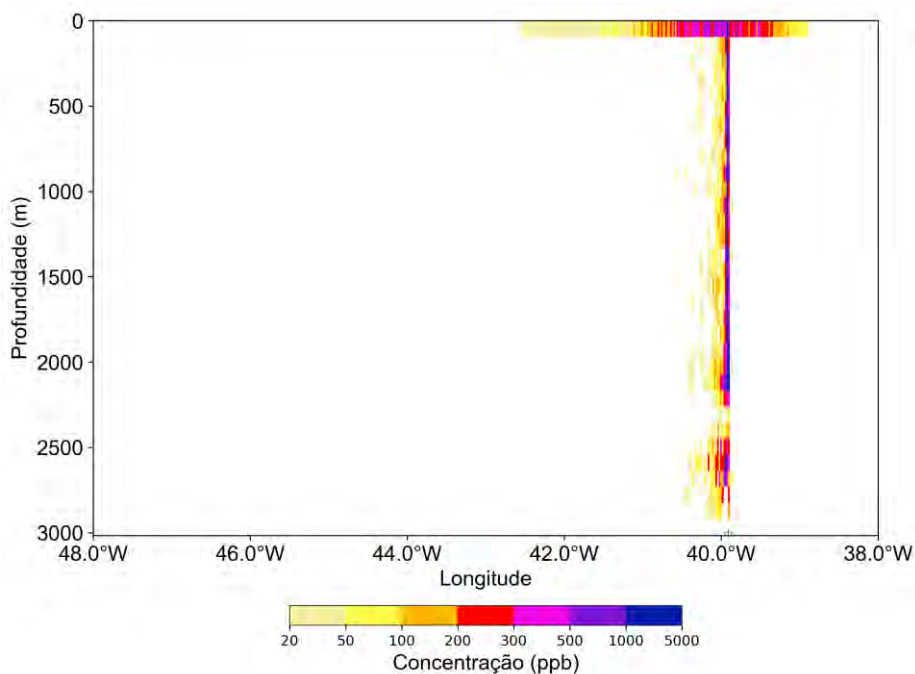
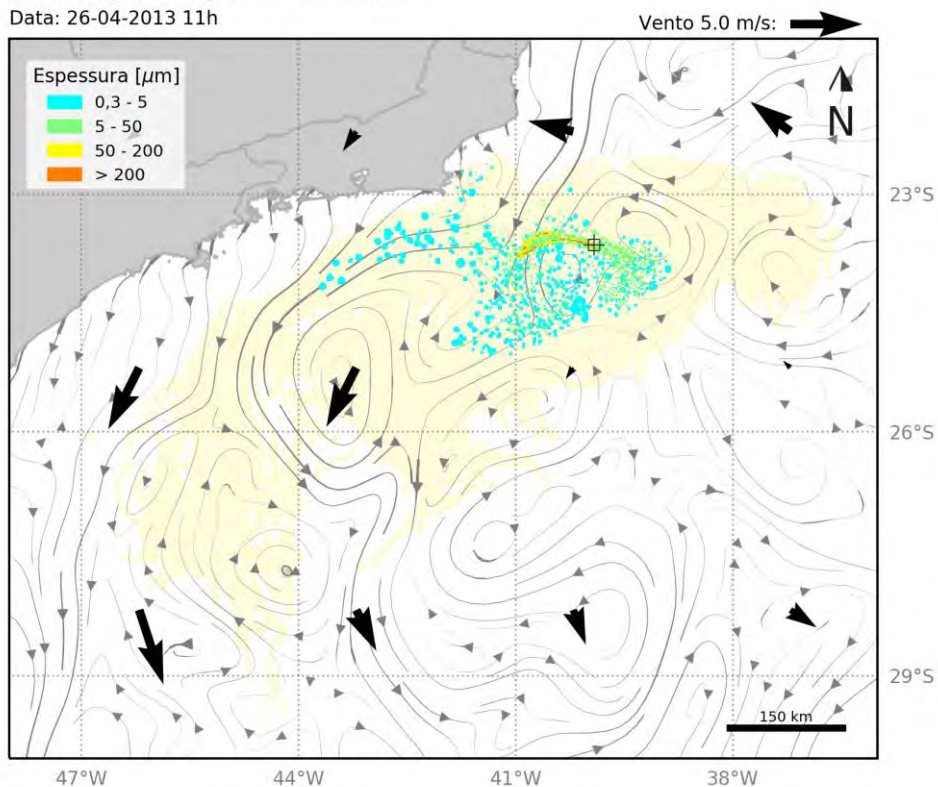


Figura 55: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 612 horas (tempo do primeiro toque) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO

Menor tempo de chegada de óleo na costa

Data: 30-04-2013 23h

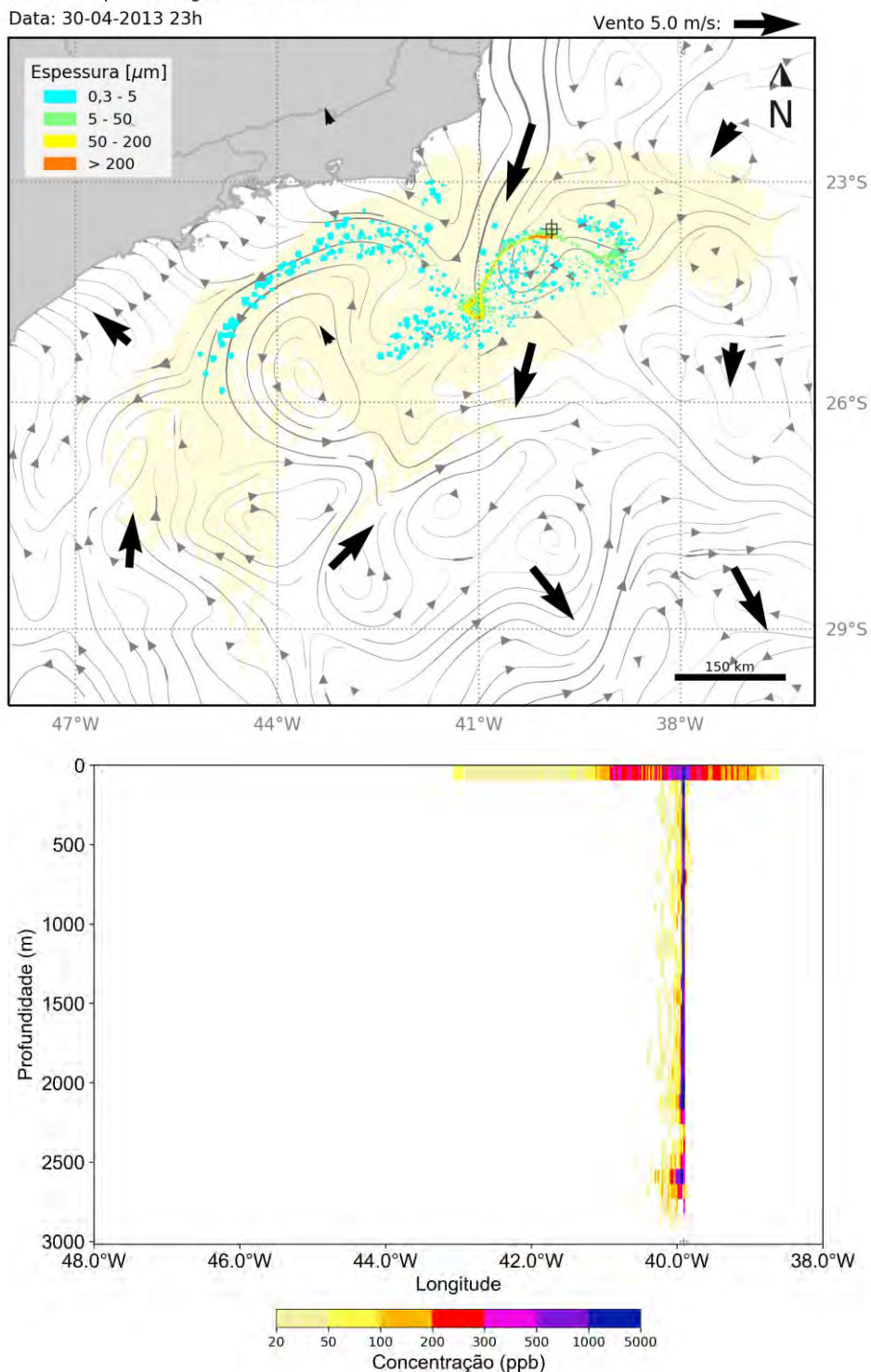


Figura 56: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO

Menor tempo de chegada de óleo na costa

Data: 15-05-2013 23h

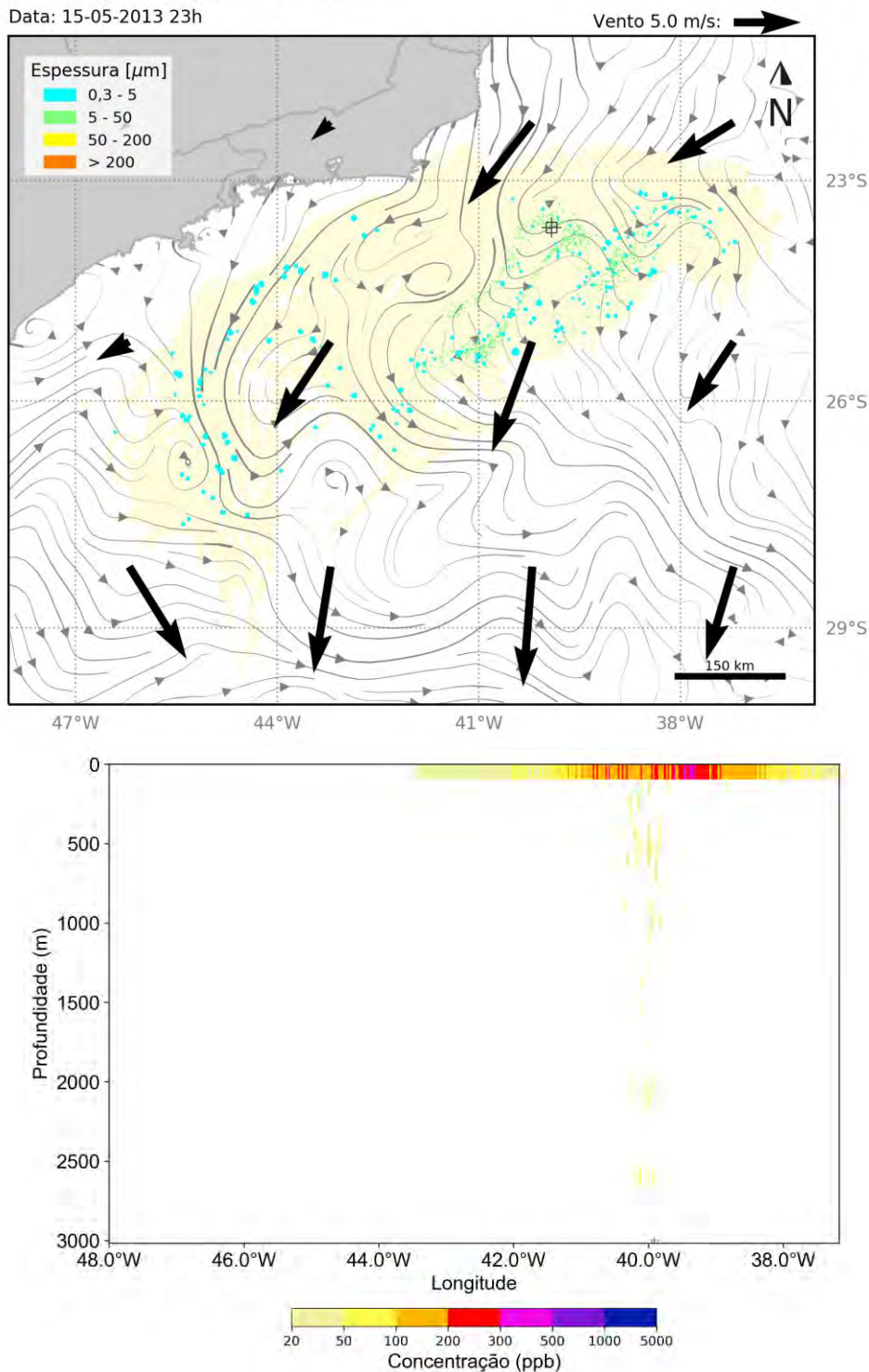


Figura 57: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO

Menor tempo de chegada de óleo na costa

Data: 30-05-2013 23h

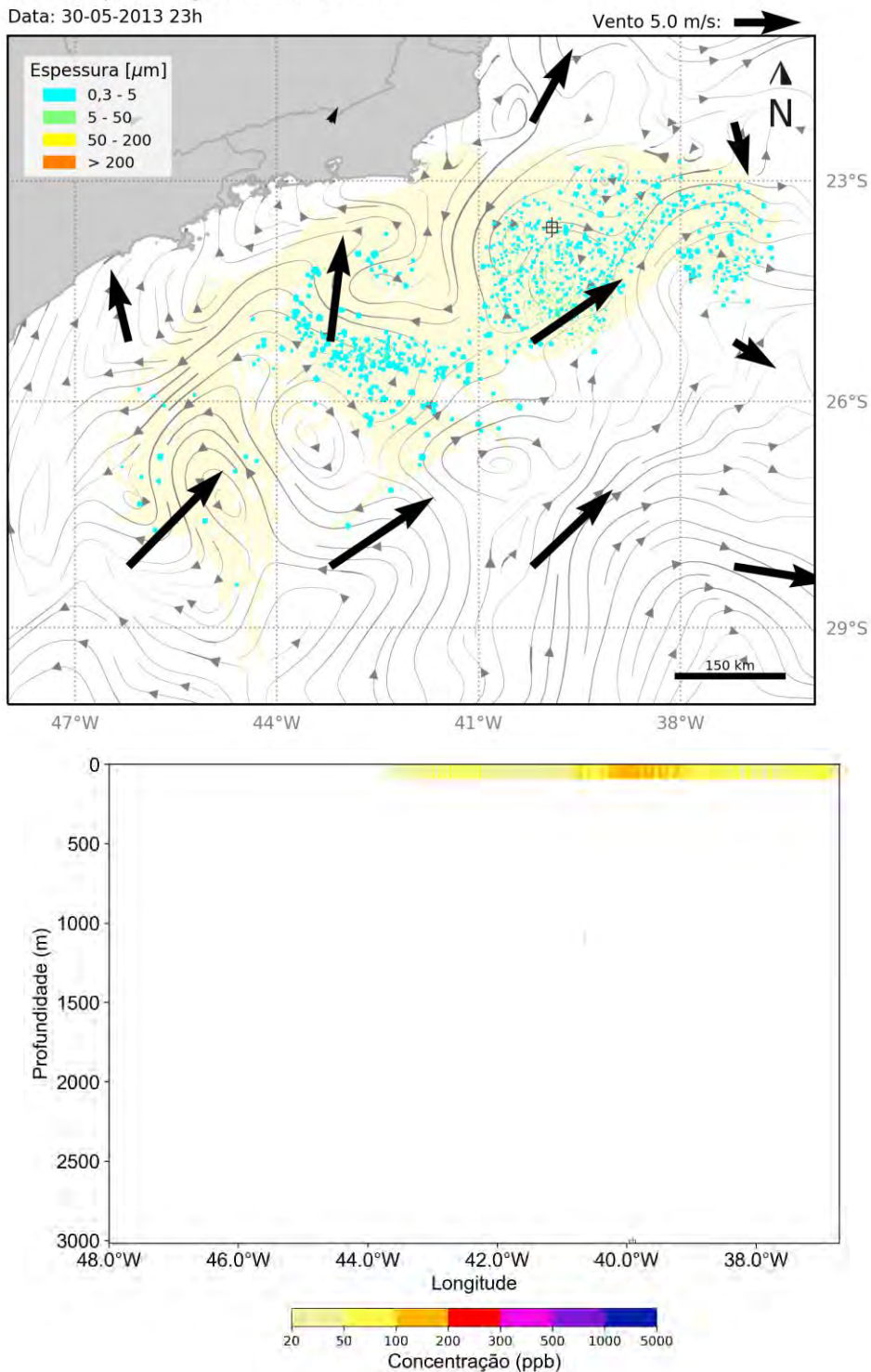


Figura 58: Resultado da simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO
Menor tempo de chegada de óleo na costa
Data: 30-05-2013 23h

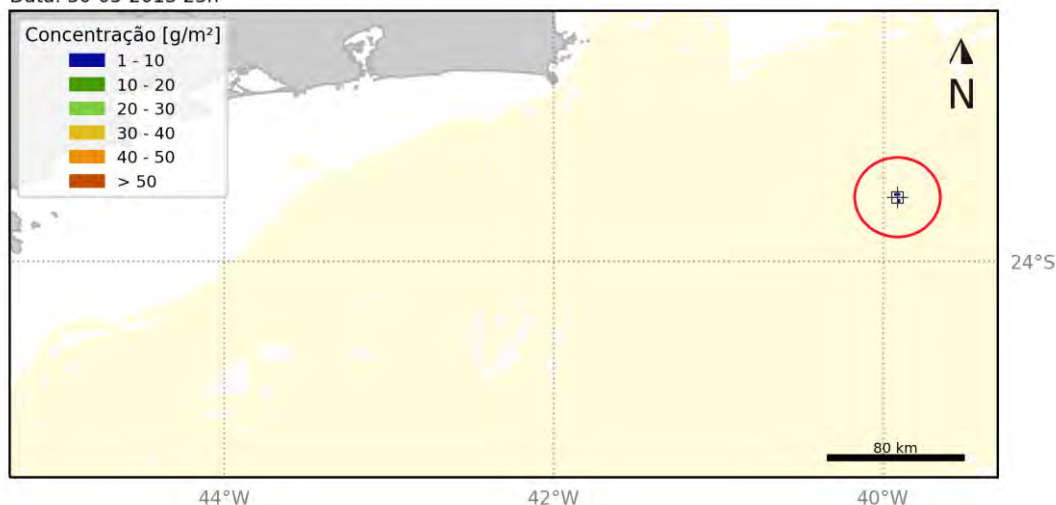


Figura 59: Concentração de óleo no sedimento após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento na simulação determinística em condição crítica de menor tempo de chegada de óleo na costa.

Vazamento de 651.248 m³.

Neste cenário, o óleo leva mais de 12 horas para ascender a partir do fundo à superfície, e no início da simulação, há presença de um vórtice anticiclônico a noroeste do ponto de vazamento, ocasionando correntes para norte/nordeste na região do ponto. Estas correntes, associadas a ventos de sudeste e leste, são responsáveis pela deriva inicial do óleo em superfície para noroeste do ponto de vazamento. Após uma semana (168 horas), o óleo passa a derivar para oeste junto com a alteração das correntes e ventos e segue para sudoeste ao atingir a região do fluxo principal da Corrente do Brasil. Em 3 semanas (504 horas), a entrada de uma frente fria com ventos de sul desloca a o óleo para norte, em direção à costa, e este atinge o município de Armação dos Búzios – RJ em 25,5 dias (612 horas). Ao final da simulação, após 60 dias, o óleo em superfície se encontra em regiões esparsas entre as longitudes de 36°W e 47°W e as latitudes de 22°S e 29°S, com espessuras menores que 50 µm.

Em relação à coluna d'água, concentrações acima do limiar de 20 ppb só são observadas abaixo de 300 metros nas primeiras 12 horas, enquanto o vazamento ocorre como uma coluna vertical a partir do ponto de vazamento. As maiores concentrações, acima de 500 ppb são observadas do fundo até a superfície nos primeiros 30 dias, período do vazamento. Depois, é possível observar concentrações entre 20-50 ppb ao longo da coluna d'água e concentrações maiores, até 300 ppb, são encontradas somente nas camadas mais superficiais.

No fundo do mar, a área com concentração de óleo no sedimento superior ao limiar de 1g de óleo/m², ficou restrita à região do ponto de vazamento (Figura 59).

A seguir, é apresentada a evolução temporal do balanço de massa do óleo (Figura 60 e Tabela 20) e a evolução da área e a massa de óleo (Figura 61 e Tabela 21) durante a simulação.

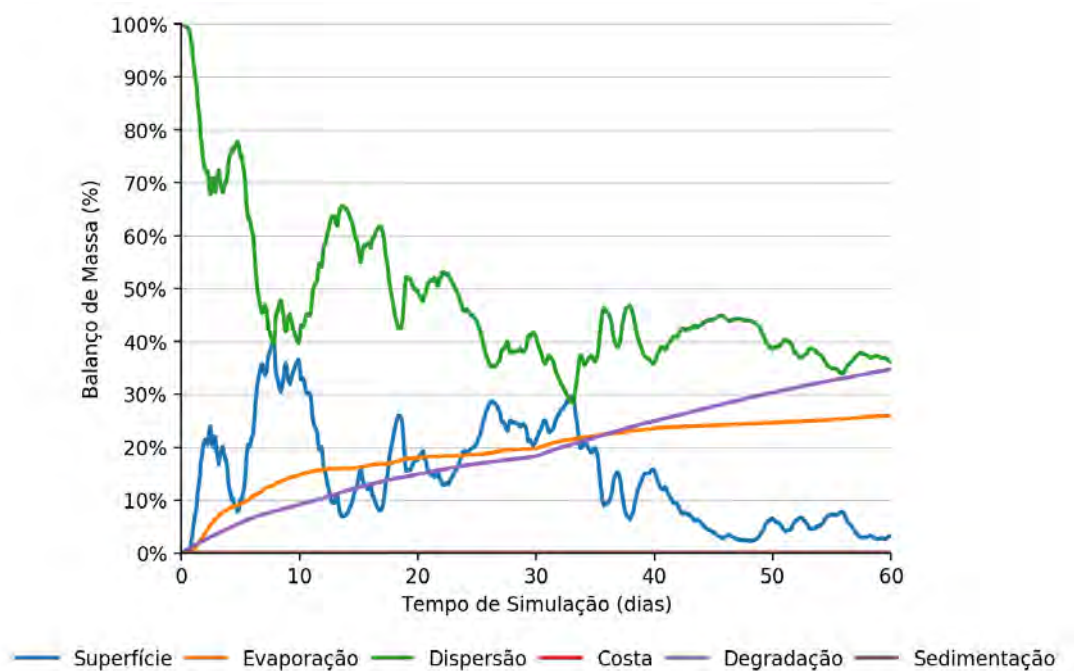


Figura 60: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condição crítica de menor tempo de chegada de óleo na costa. Vazamento de 651.248 m³.

Tabela 20: Balanço de massa do óleo durante a simulação em valores percentuais e de massa de óleo em condição crítica de menor tempo de chegada de óleo na costa.

Tempo (h)	Superfície (%)	Evaporado (%)	Coluna d'água (%)	Sedimento (%)	Degradado (%)	Costa (%)
12	-	-	99,35	-	0,65	-
36	13,00	1,94	83,15	-	1,92	-
60	23,18	5,36	68,42	-	3,04	-
168	33,88	12,08	46,70	-	7,34	-
336	7,51	16,00	64,72	-	11,78	-
504	15,13	18,23	51,33	-	15,31	-
612	24,67	18,68	39,60	-	17,05	<0,01
720	21,39	19,75	40,59	-	18,27	<0,01
1080	3,88	24,16	44,23	0,01	27,71	0,01
1440	3,19	25,92	36,10	0,02	34,76	0,01

É observado que ao final da simulação grande parte do óleo ficou na coluna d'água (36% do total vazado). Do total, 34,76% foi degradado e 25,92% sofreu evaporação. A sedimentação representou menos de 1% do total de óleo. Ao final de 60 dias, uma porcentagem referente a 0,01% ficou acumulada na costa e o óleo remanescente em superfície representou 3,19% do total vazado

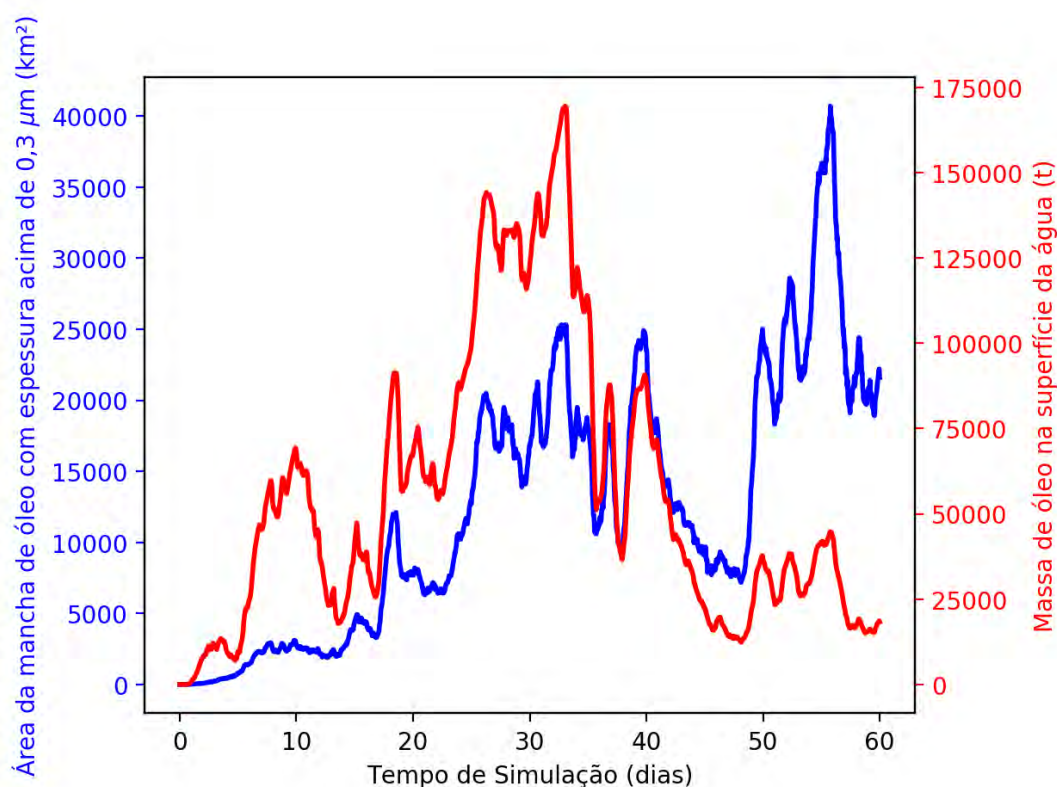


Figura 61: Área superficial da mancha de óleo e a massa de óleo na superfície do mar durante a simulação da trajetória em condição crítica de menor tempo de chegada de óleo na costa.

Tabela 21: Área superficial, massa de óleo e espessura máxima da mancha de óleo durante a simulação em condição crítica de menor tempo de chegada de óleo na costa.

Tempo (h)	Área (km^2)	Massa (t)	Espessura máxima (μm)
12	-	-	-
36	52	3732	292
60	140	11090	792
168	2210	45390	297
336	2560	20110	117
504	6300	60800	596
612	17100	120400	802
720	16900	122800	2685
1080	9360	22300	6943
1440	21600	18320	5831

A massa da mancha de óleo em superfície mostra um crescimento com oscilações até 30 dias (período do vazamento do óleo) e em seguida um decaimento até o final da simulação, em função do término do vazamento e dos processos intempéricos. Já a área de óleo em superfície

tem uma tendência de aumento ao longo de quase toda a simulação, com alguns declínios em função do intemperismo do óleo. Ao final da simulação ainda se observa 18.320 toneladas em superfície, ocupando uma área de 21.600 km².

A espessura do óleo oscila ao longo da simulação, chegando ao máximo de aproximadamente 6,9 mm em 45 dias (1080 horas) e terminando a simulação (1440 horas) com 5,8 mm.

3.2.2.2 Maior massa acumulada na costa

A seguir são apresentadas informações relacionadas aos ventos (Figura 62, Tabela 22 e Tabela 23) e correntes (Figura 63, Tabela 24 e Tabela 25) do período simulado que resultou na maior massa acumulada na costa e se estendeu das 9h de 13/03/2013 até às 9h de 12/05/2013. Os valores estão relacionados ao ponto de grade mais próximo do local do vazamento.

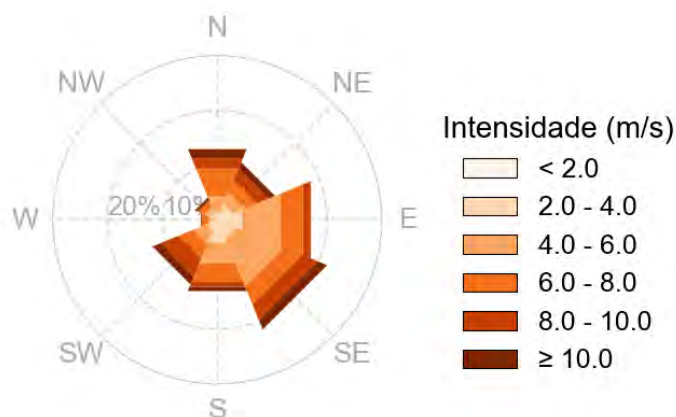


Figura 62: Rosa dos ventos para o período de simulação da situação que resultou na maior massa de óleo acumulada na costa.

Tabela 22: Ocorrência conjunta entre direção e intensidade dos ventos para o ponto mais próximo do local do vazamento para o período que resultou na maior massa de óleo acumulada na costa.

Direção -> Intensidade (m/s)	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Freq. (%)
0-2	9	8	6	5	3	6	5	2	3,1
2-4	11	36	63	49	60	24	7	21	18,8
4-6	47	34	110	136	61	39	12	15	31,5
6-8	79	34	64	51	53	41	18	16	24,7
8-10	29	34	22	46	14	51	4	4	14,2
>10	26	18	1	25	12	23	1	6	7,8
Freq. (%)	13,9	11,4	18,5	21,7	14,1	12,8	3,3	4,4	

Tabela 23: 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)
297	207	6,10	0,78	15,55	2,51

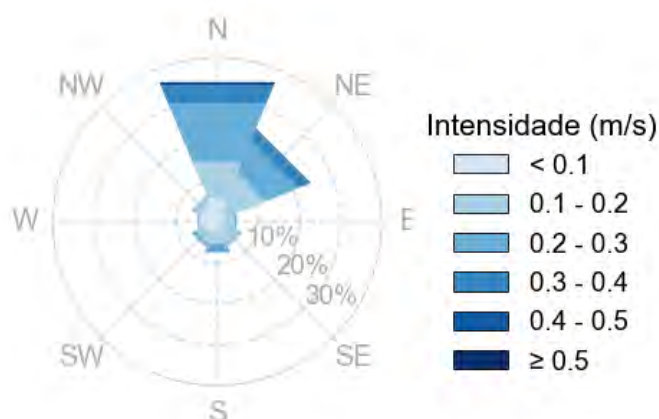


Figura 63: Rosa de corrente para o período de simulação da situação que resultou em maior massa de óleo acumulada na costa.

Tabela 24: 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 -> Intensidade (m/s)	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Freq. (%)
<0,1	44	15	10	12	15	25	32	32	25,7
0,1 - 0,2	69	77	22	31	28	17	3	14	36,3
0,2 - 0,3	111	62	5	3	16	6	1	2	28,6
0,3 - 0,4	34	20	-	1	-	1	1	1	8,1
0,4 - 0,5	4	2	-	-	-	-	-	-	0,8
>0,5	3	1	-	-	-	-	-	-	0,6
Freq. (%)	36,8	24,6	5,1	6,5	8,2	6,8	5,1	6,8	

Tabela 25: Estatística de corrente 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)
24	11	0,17	0,01	0,59	0,10

No período da simulação ocorre a predominância de ventos de sudeste (21,7%) e com intensidades entre 4 e 6 m/s (31,5%). Já as informações de correntes no ponto de vazamento mostram que a direção destas é principalmente para norte (36,8%) e que as velocidades predominantes são de 0,1 a 0,2 m/s (36,3%).

A seguir (da Figura 64 a Figura 73) é apresentada a deriva do óleo em superfície e na coluna d'água, além da área varrida (em amarelo claro nas figuras) pela mancha de óleo 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.

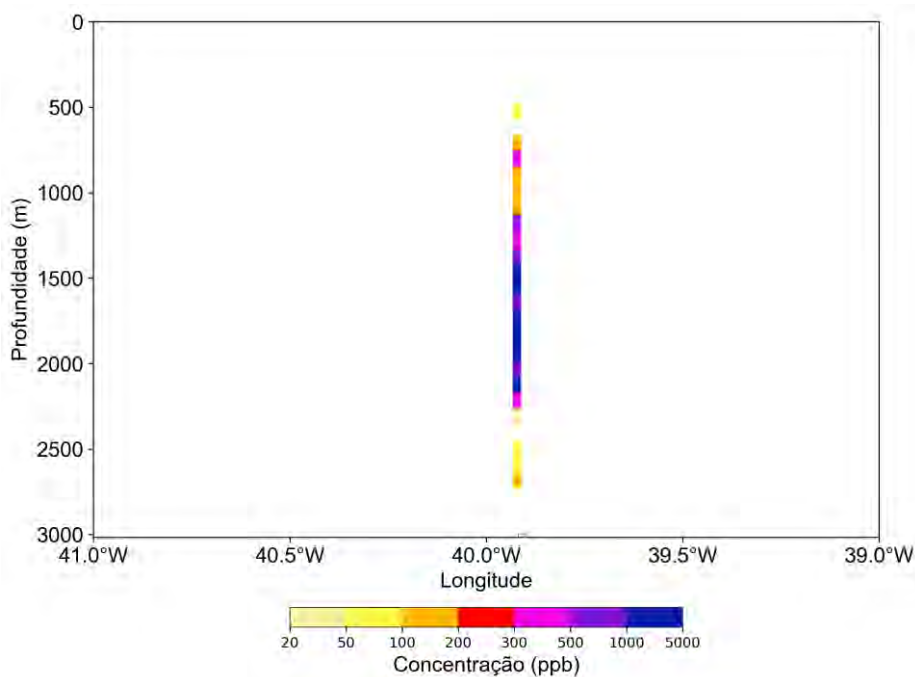


Figura 64: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 12 horas do início do vazamento. Resultado de concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO

Maior massa de óleo acumulada na costa

Data: 14-03-2013 21h

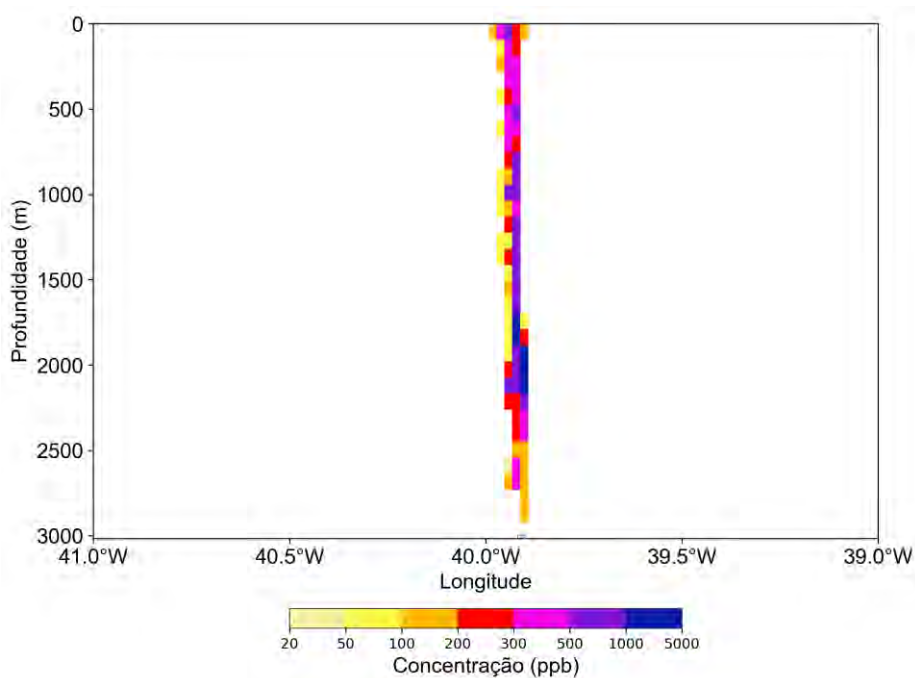
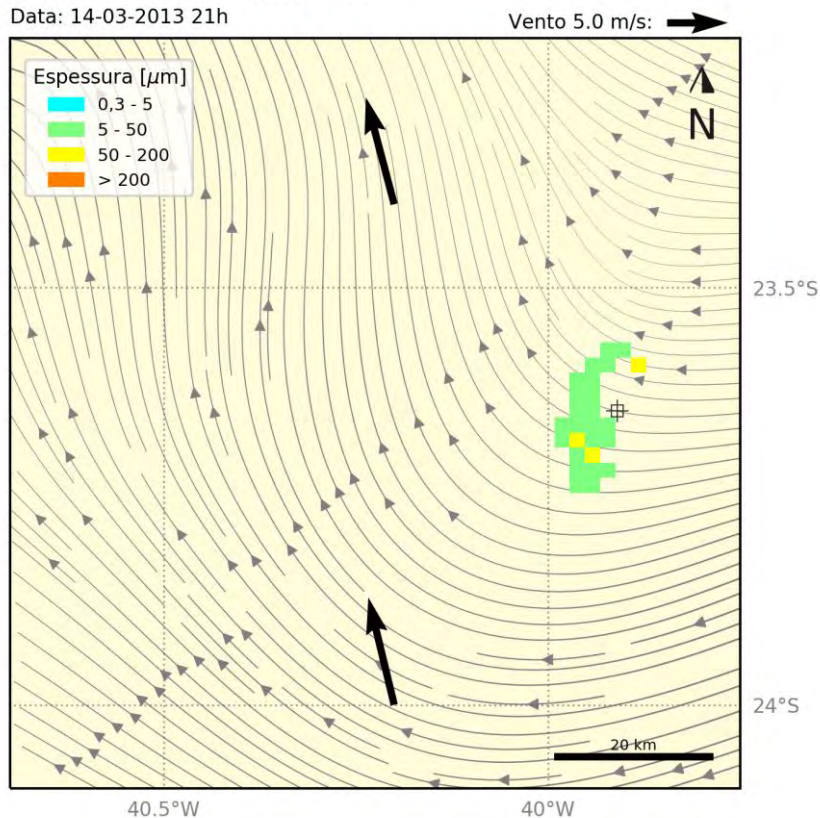


Figura 65: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 36 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO

Maior massa de óleo acumulada na costa

Data: 15-03-2013 21h

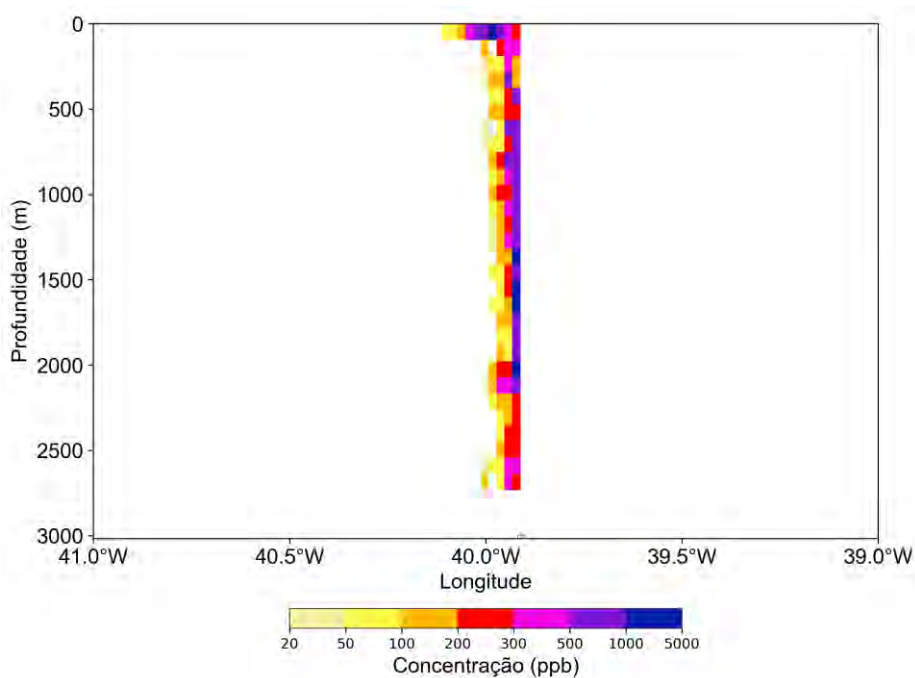
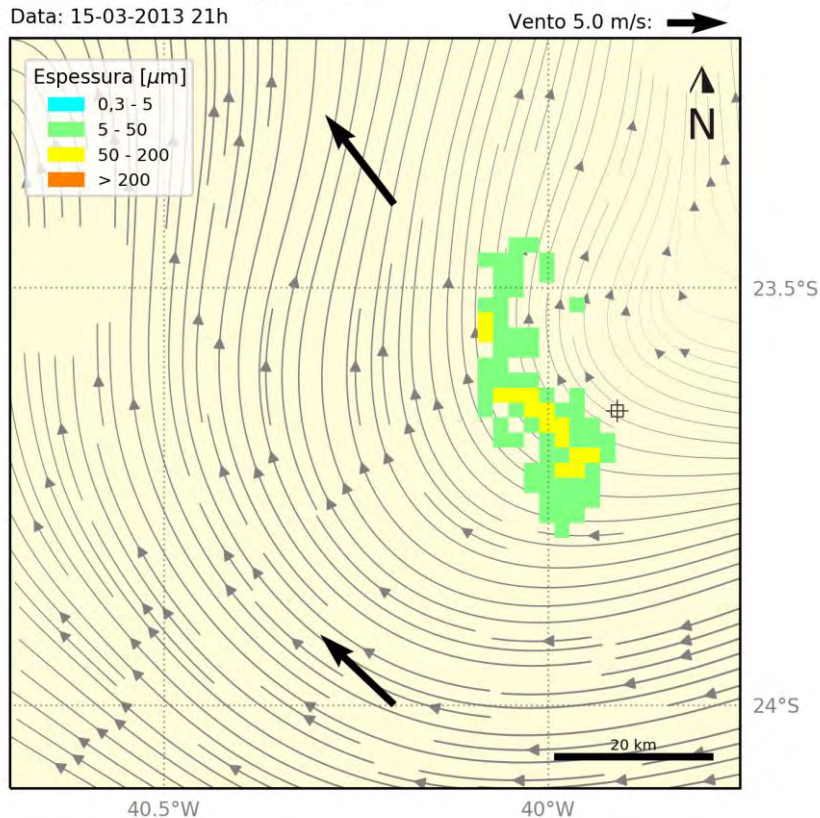


Figura 66: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 60 horas do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO

Maior massa de óleo acumulada na costa

Data: 20-03-2013 09h

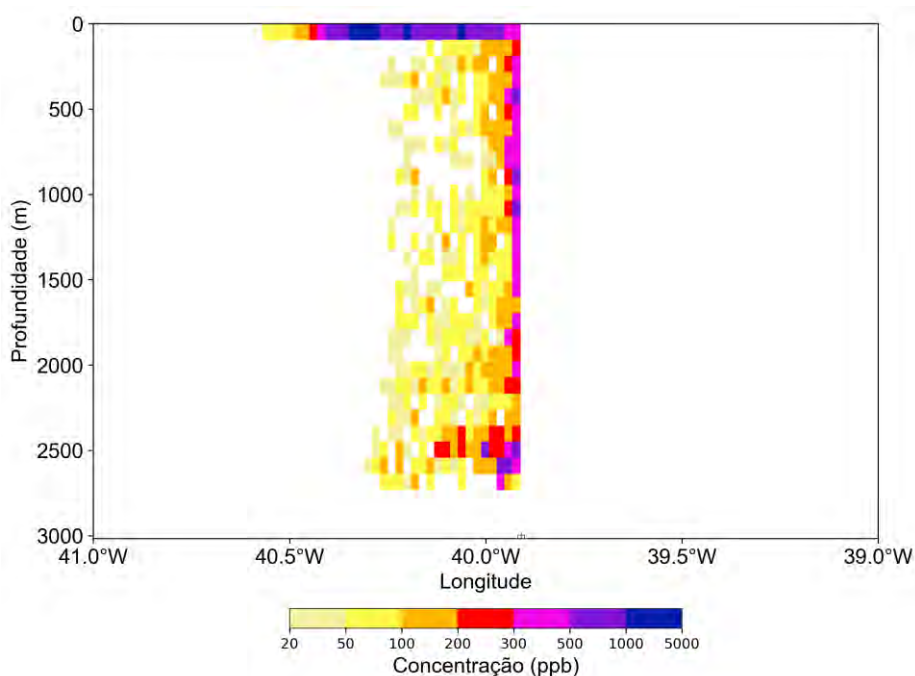
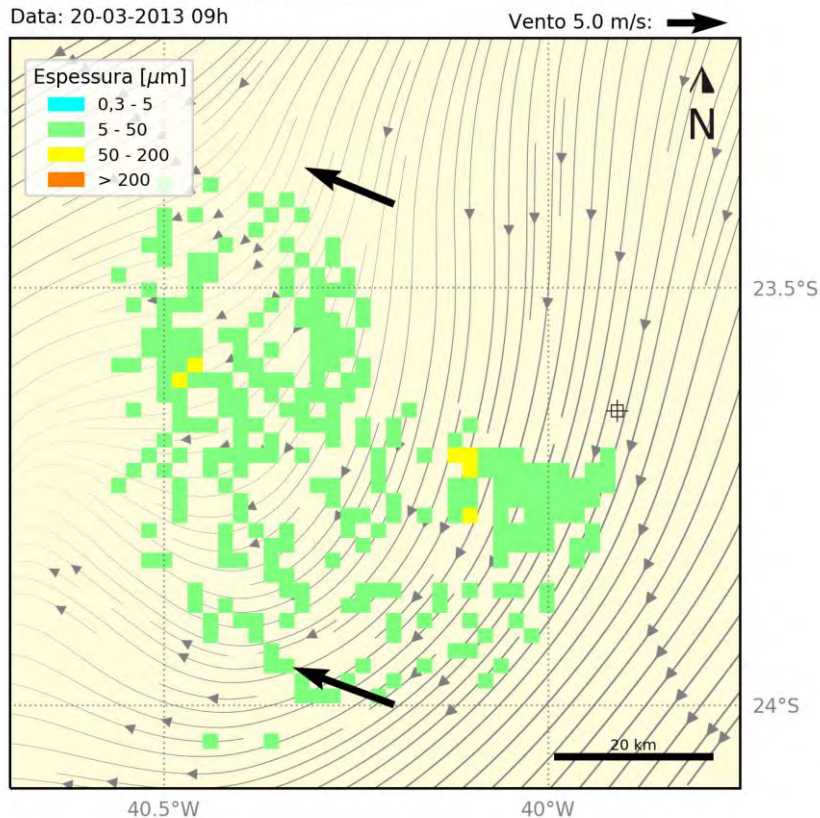


Figura 67: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 168 horas (1 semana) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO

Maior massa de óleo acumulada na costa

Data: 27-03-2013 09h

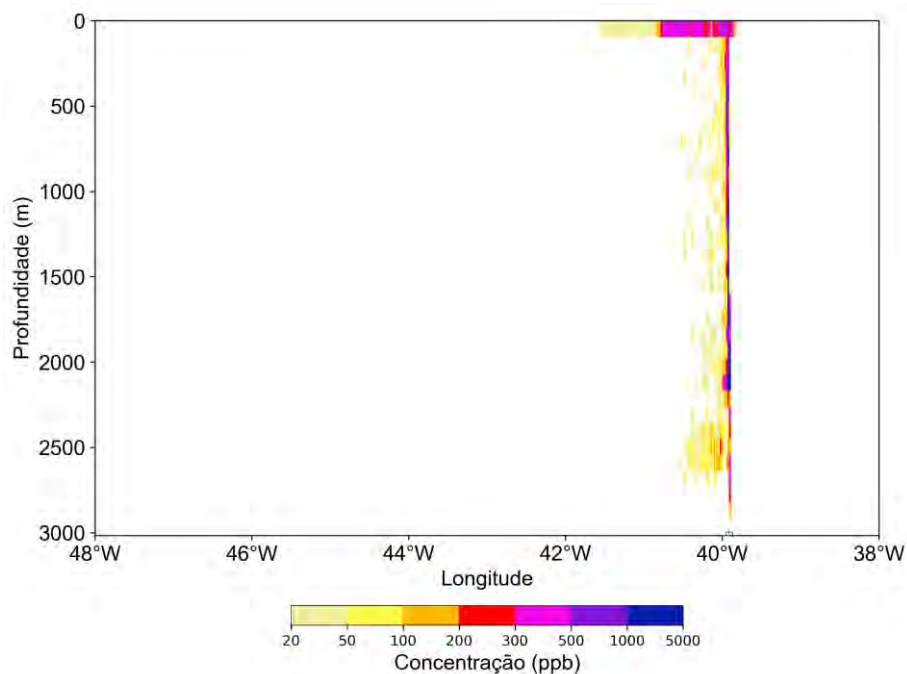
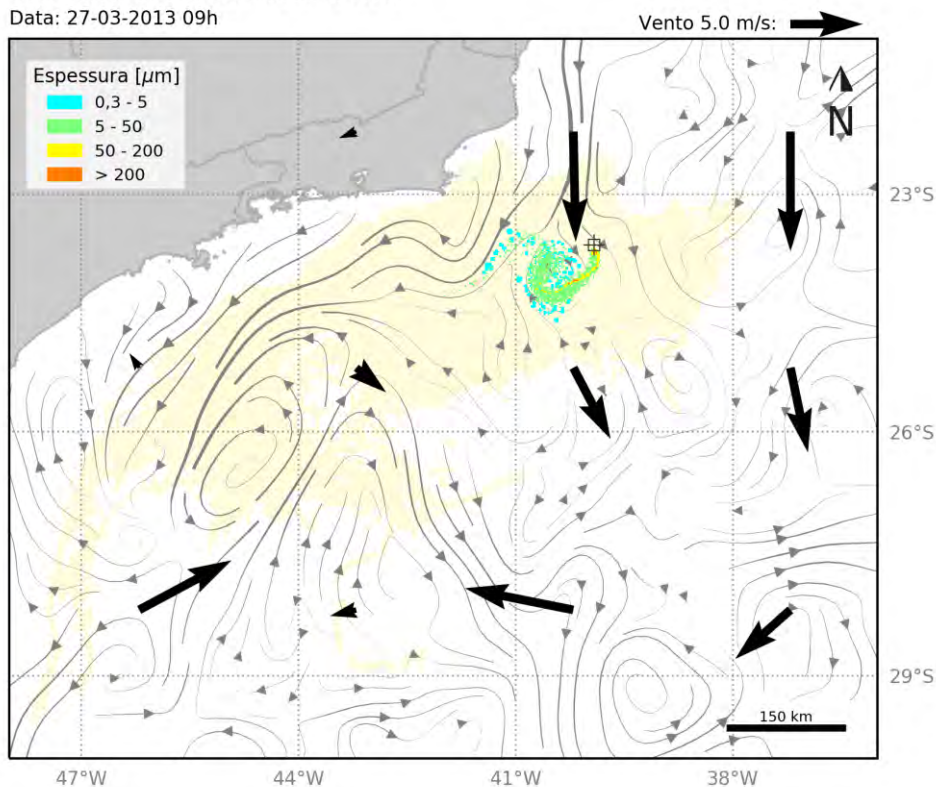


Figura 68: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 336 horas (2 semanas) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO

Maior massa de óleo acumulada na costa

Data: 03-04-2013 09h

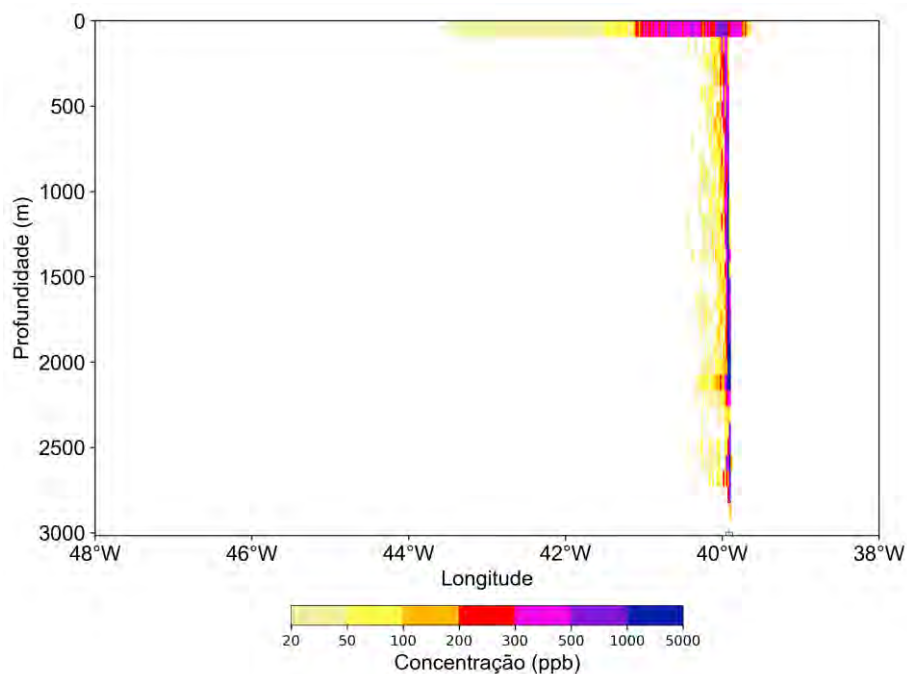
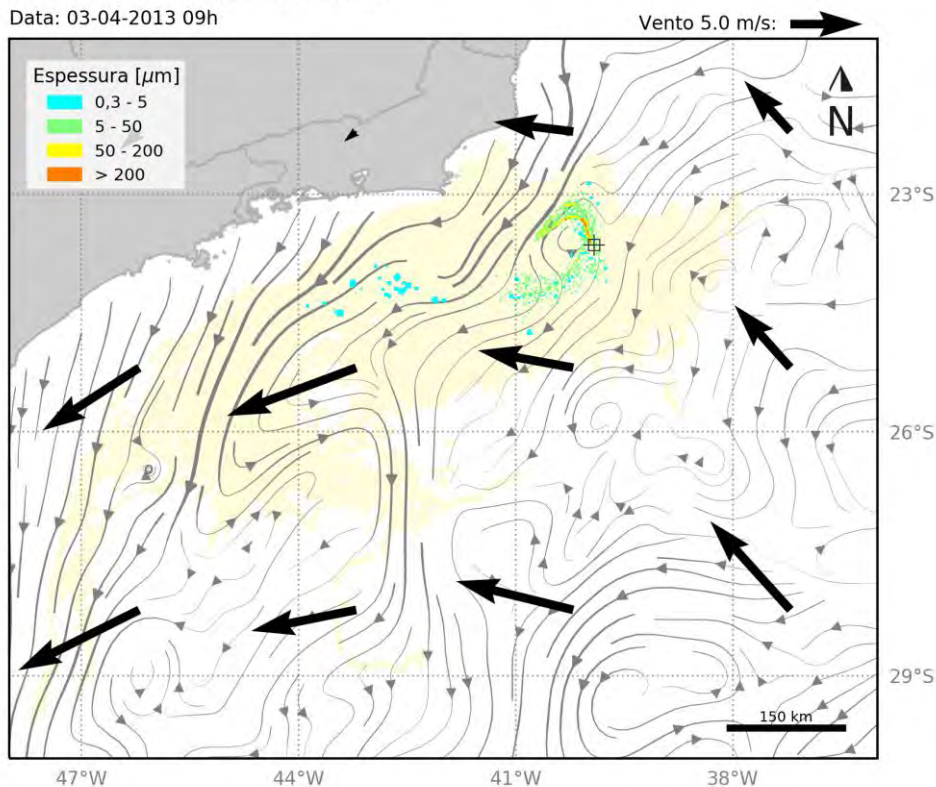


Figura 69: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 504 horas (3 semanas) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO

Maior massa de óleo acumulada na costa

Data: 12-04-2013 09h

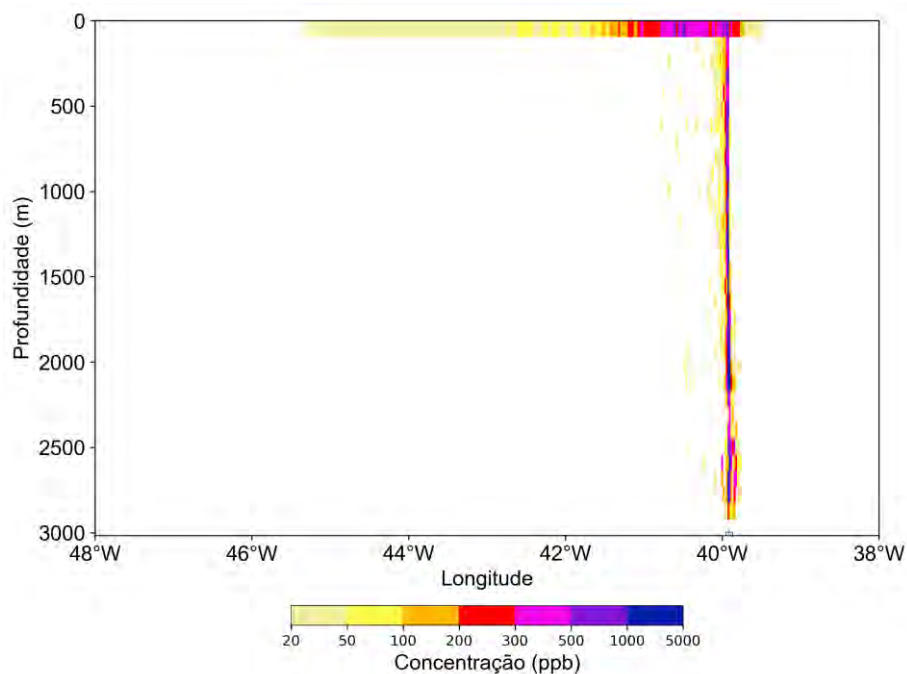
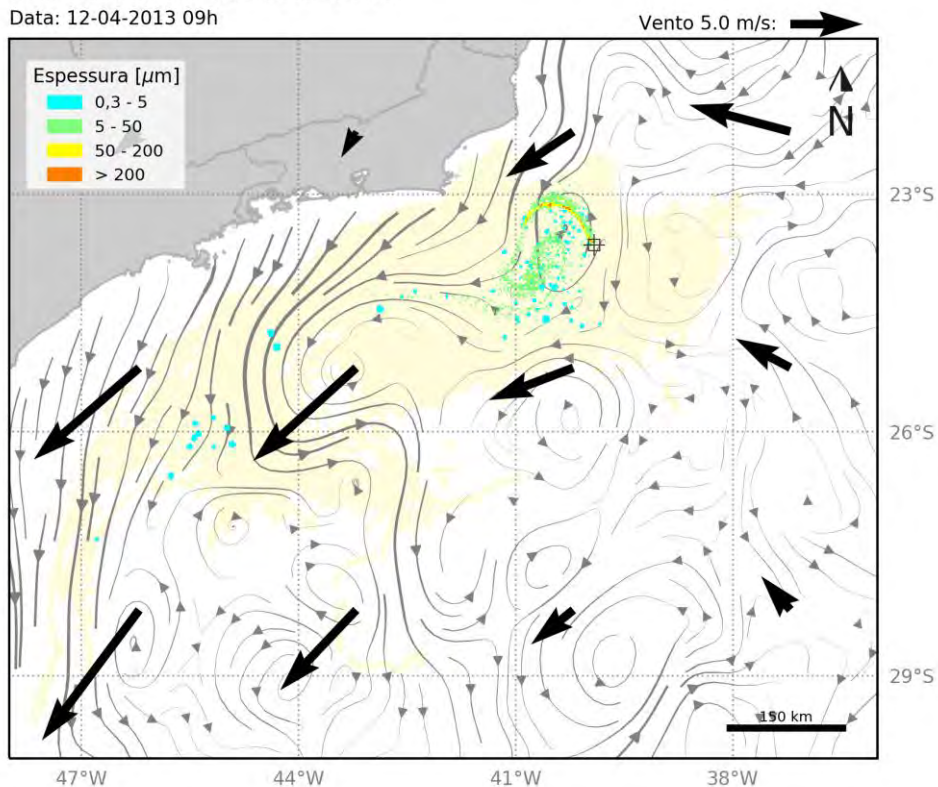


Figura 70: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 720 horas (30 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO

Maior massa de óleo acumulada na costa

Data: 26-04-2013 02h

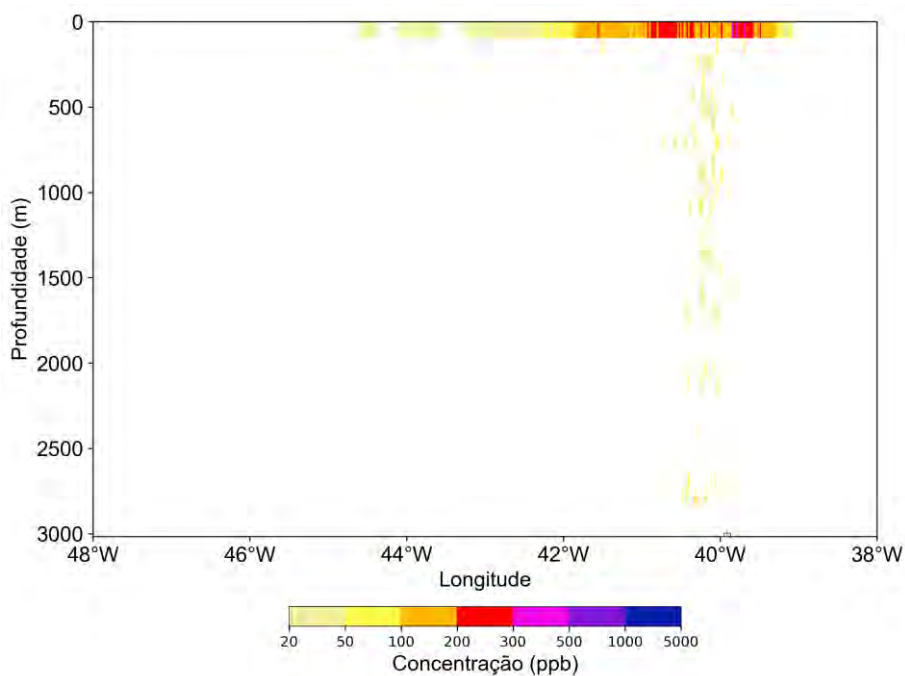
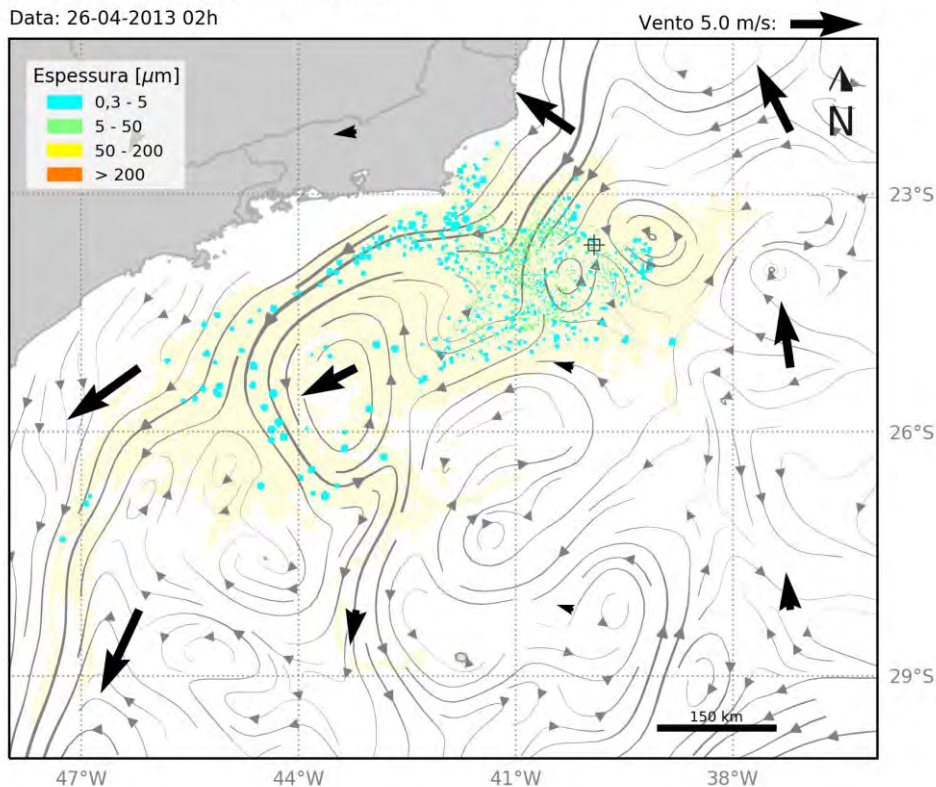


Figura 71: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 1049 horas (Primeiro toque de óleo na costa) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO

Maior massa de óleo acumulada na costa

Data: 27-04-2013 09h

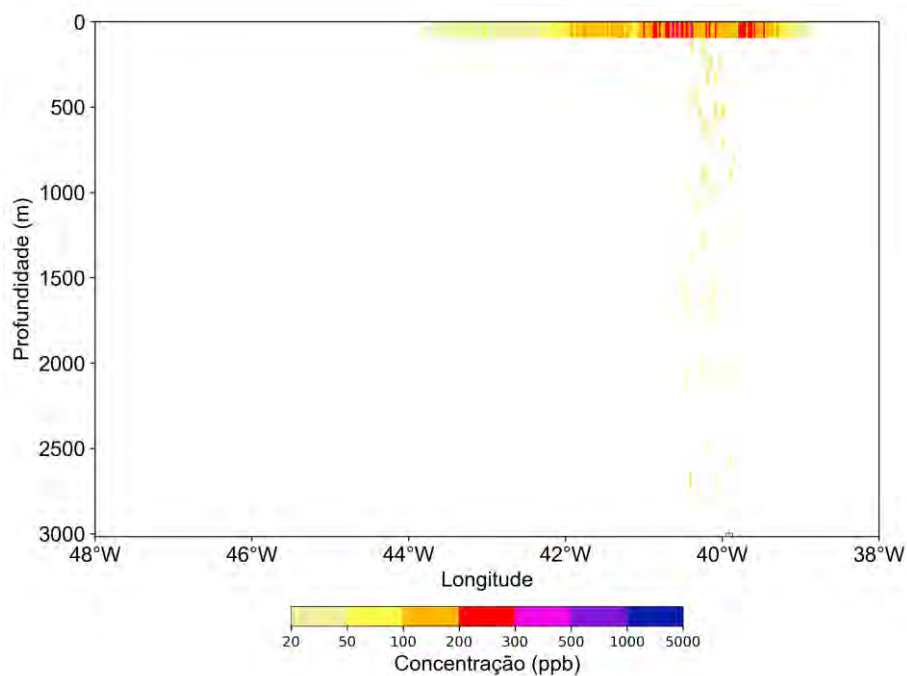
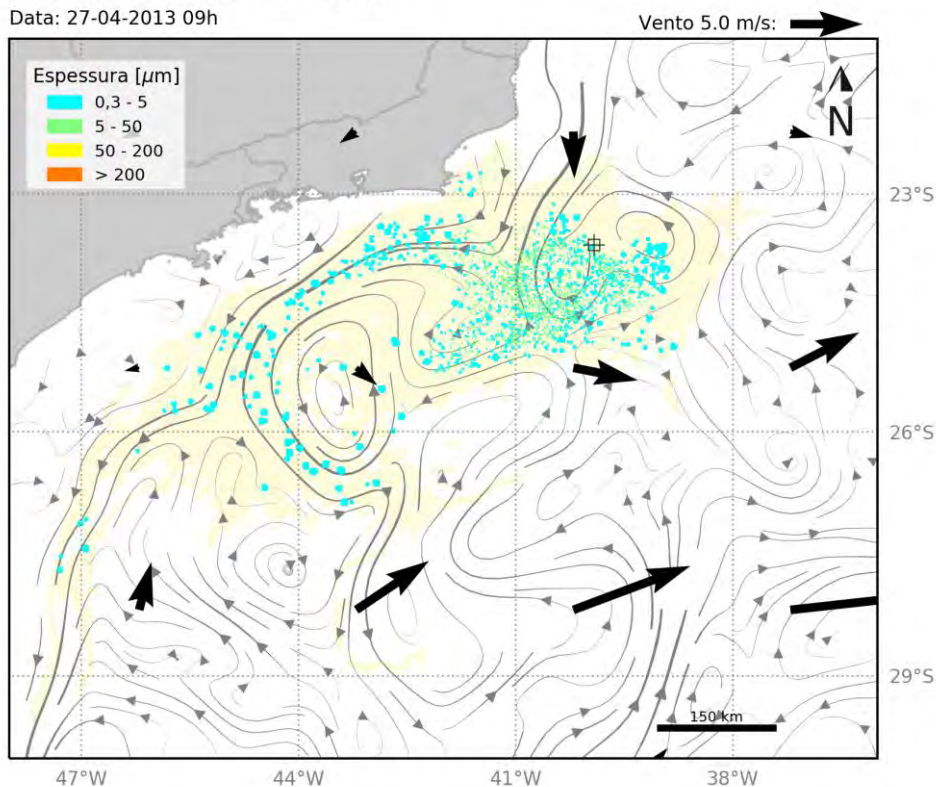


Figura 72: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 1080 horas (45 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO

Maior massa de óleo acumulada na costa

Data: 12-05-2013 09h

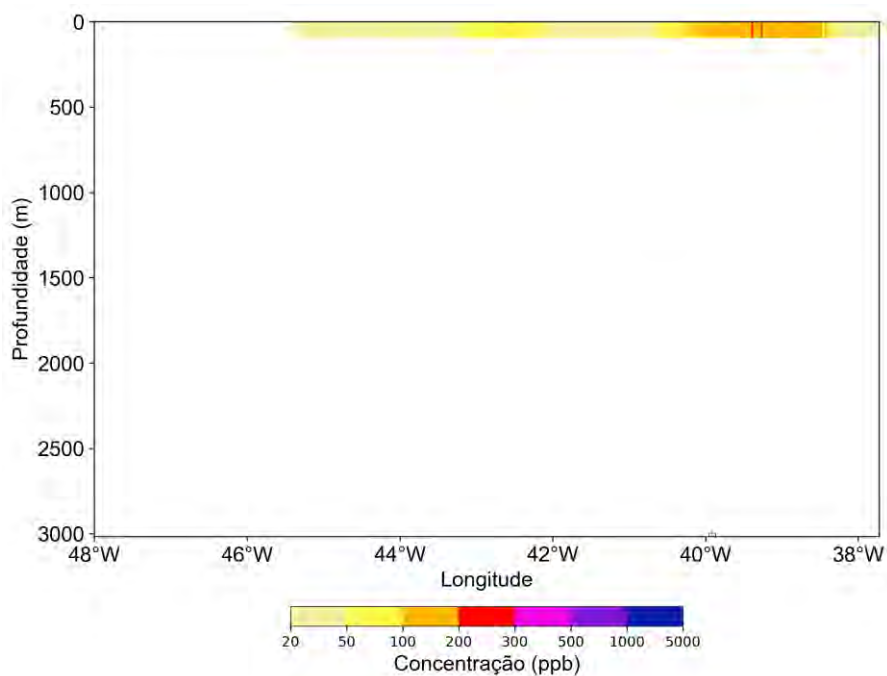
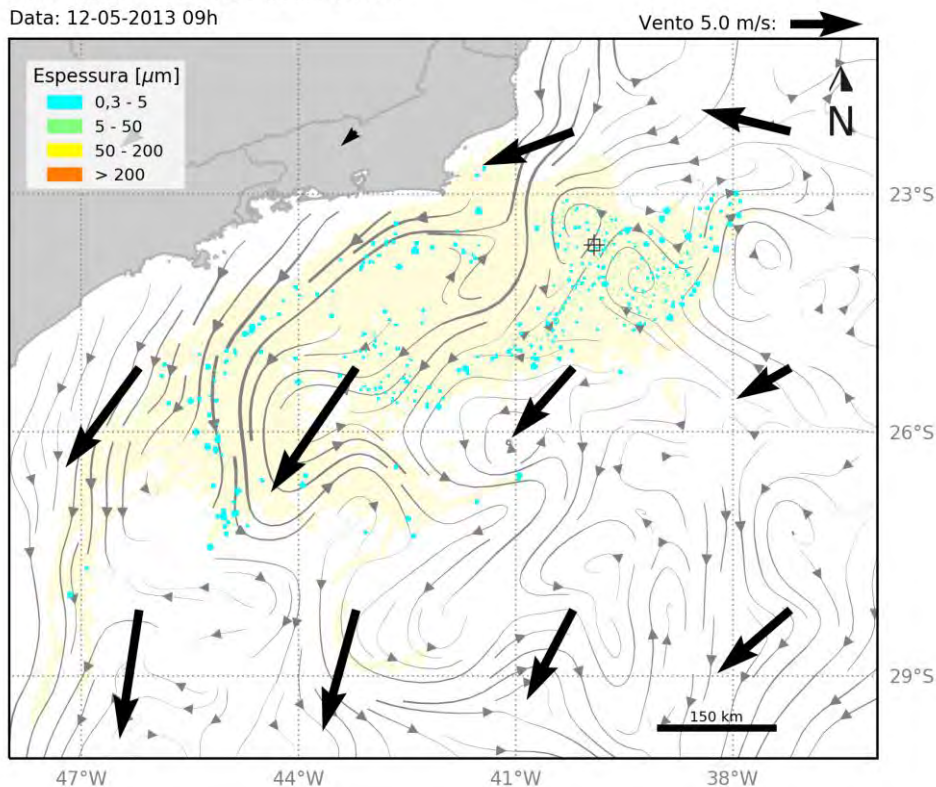


Figura 73: Resultado da simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa, após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento. Resultado de espessura em superfície e concentração total de óleo na coluna d'água. Vazamento de 651.248 m³.

MODO DETERMINÍSTICO
Menor tempo de chegada de óleo na costa
Data: 30-05-2013 23h

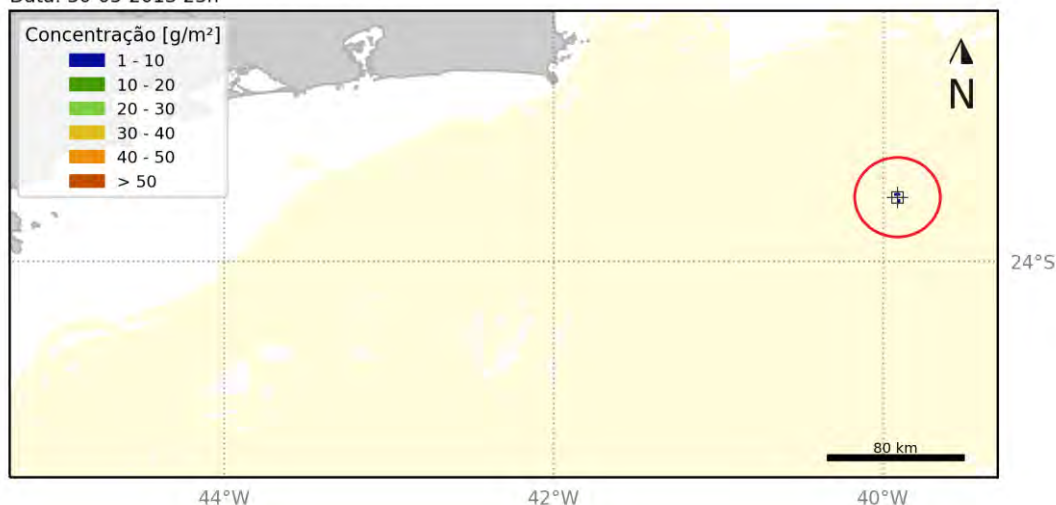


Figura 74: Concentração de óleo no sedimento após 1440 horas (60 dias) do início do vazamento na simulação determinística em condição crítica de maior massa acumulada na costa. Vazamento de 651.248 m³.

Nas primeiras 36 horas do vazamento, correntes para noroeste e ventos de sul e sudeste ocasionam a deriva do óleo para norte/noroeste do ponto de vazamento. Em uma semana (168 horas), o óleo passa a derivar para oeste e sudoeste em função da alteração das correntes e ventos. Após 2 semanas (336 horas), o óleo alcança regiões com meandros da CB e ocorre um espalhamento maior da mancha. Em 43,7 dias (1049 horas), observa-se óleo na costa em Armação de Búzios – RJ e em superfície as espessuras são de até 50 µm. Ao final da simulação, 60 dias após o início do vazamento, o óleo em superfície se encontra em regiões esparsas, entre as longitudes de 37°W e 48°W e latitudes de 22°S e 27°S.

Em relação à coluna d'água, concentrações acima do limiar de 20 ppb só são observadas abaixo de 300 metros nas primeiras 12 horas, enquanto o vazamento ocorre como uma coluna vertical a partir do ponto de vazamento. As maiores concentrações, acima de 500 ppb, são observadas do fundo até a superfície nos primeiros 30 dias, período do vazamento. Em seguida, ao longo da coluna d'água é possível observar concentrações entre 20-50 ppb, enquanto concentrações maiores, até 300 ppb, são encontradas somente nas camadas mais superficiais.

No fundo do mar, a área com concentração de óleo no sedimento superior ao limiar de 1g de óleo/m², ficou restrita a regiões pontuais próximas ao ponto de vazamento (Figura 74).

A seguir, é apresentada a evolução temporal do balanço de massa do óleo (Figura 75 e Tabela 26) e a evolução da área e a massa de óleo (Figura 76 e Tabela 27) durante a simulação.

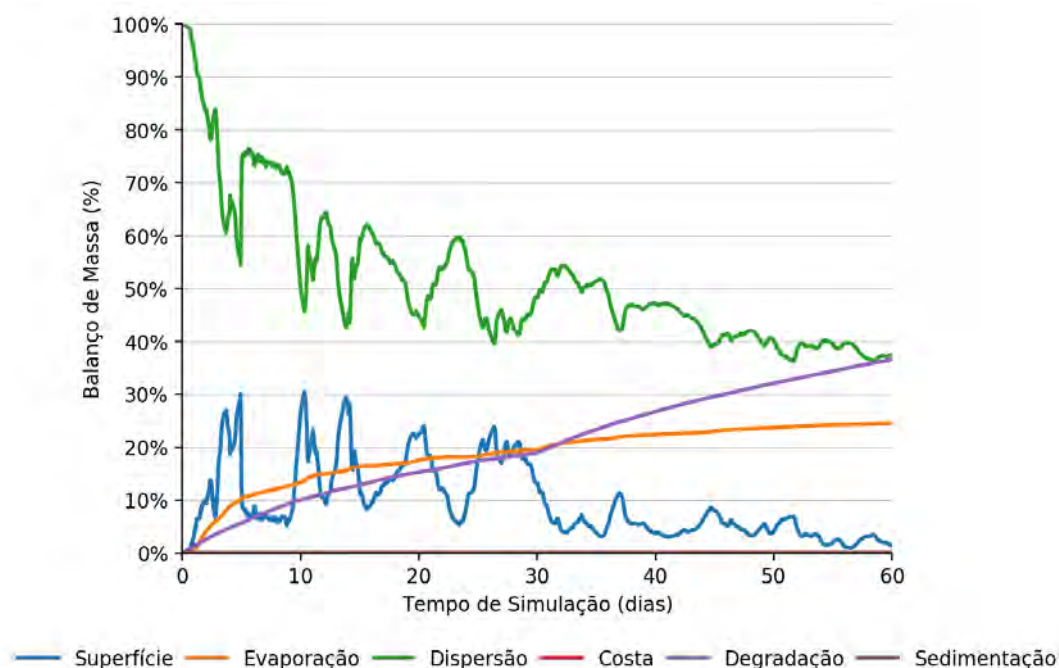


Figura 75: Balanço de massa do óleo durante a simulação da trajetória em condição crítica de maior massa acumulada na costa. Vazamento de 651.248 m³.

Tabela 26: Balanço de massa do óleo durante a simulação em valores percentuais e de massa de óleo em condição crítica de maior massa acumulada na costa.

Tempo (h)	Superfície (%)	Evaporado (%)	Coluna d'água (%)	Sedimento (%)	Degradado (%)	Costa (%)
12	-	-	99,35	-	0,65	-
36	6,96	2,19	88,91	-	1,94	-
60	12,57	5,43	78,86	-	3,14	-
168	6,75	11,58	74,06	-	7,61	-
336	27,23	15,84	44,60	-	12,33	-
504	18,27	17,91	48,17	-	15,65	-
720	13,21	19,56	48,32	-	18,91	-
1049	5,20	22,76	43,11	-	28,93	<0,01
1080	7,94	23,04	39,41	-	29,59	0,01
1440	1,37	24,49	37,51	0,02	36,59	0,01

É observado que ao final da simulação grande parte do óleo ficou disperso na coluna d'água (37,5% do total vazado). Do total, 36,6% foi degradado e 24,5% sofreu evaporação. A sedimentação representou menos de 1% do total de óleo. Ao final de 60 dias uma porcentagem de 0,01% ficou acumulada na costa e 1,37% do volume total de óleo vazado permaneceu em superfície.

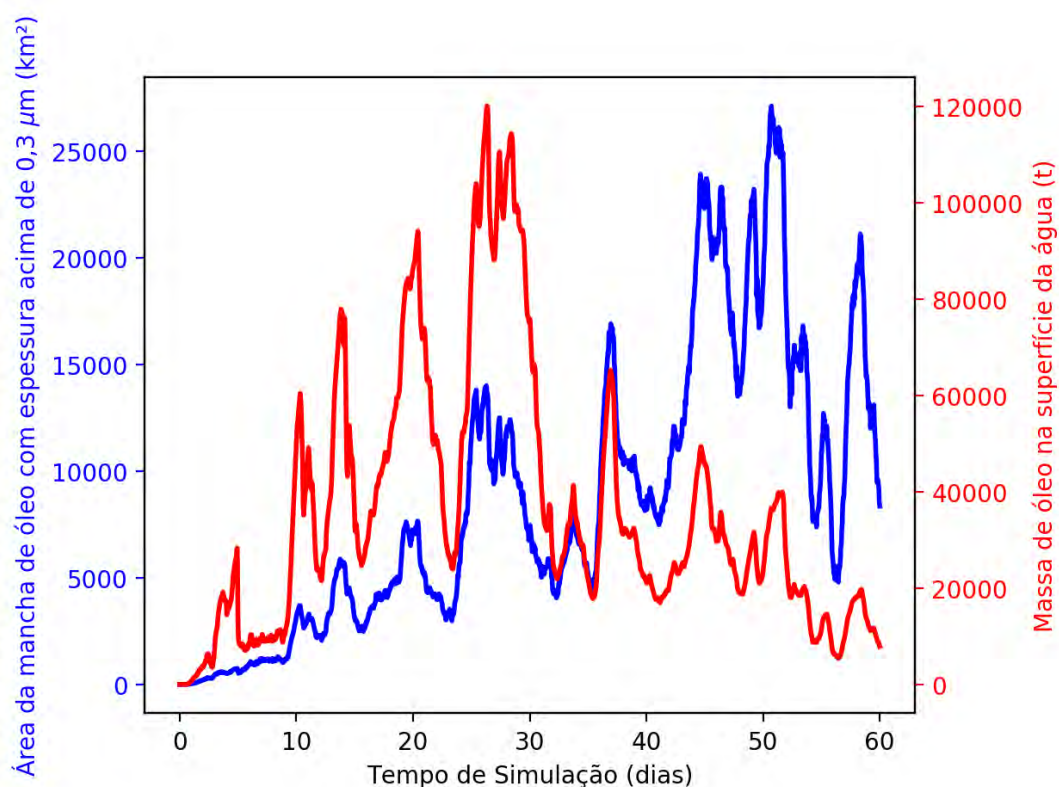


Figura 76: Área superficial da mancha de óleo e a massa de óleo na superfície do mar durante a simulação da trajetória em condição crítica de maior massa acumulada na costa.

Tabela 27: Área superficial, massa de óleo e a espessura máxima da mancha de óleo e a massa de óleo do óleo durante a simulação em condição crítica de maior massa acumulada na costa.

Tempo (h)	Área (km²)	Massa (t)	Espessura máxima (µm)
12	-	-	-
36	104	1999	77
60	308	6015	156
168	1090	9049	80
336	5700	72950	399
504	5060	73430	1527
720	7190	75860	600
1049	15100	29830	258
1080	22700	45610	8898
1440	8360	7881	12011

A massa da mancha de óleo em superfície mostra um crescimento com oscilações até 30 dias (período do vazamento do óleo) e em seguida um decaimento até o final da simulação, em função do término do vazamento e dos processos intempéricos. Já a área de óleo em superfície

tem uma tendência de aumento ao longo de quase toda a simulação, com declínio após 50 dias. Ao final da simulação ainda se observa 7.881 toneladas em superfície, ocupando uma área de 8.360 km².

A espessura do óleo em superfície aumenta até 3 semanas, em decorrência da continuidade do vazamento e depois decai com o maior espalhamento do óleo até o início do acúmulo de óleo na costa. A partir deste instante, os valores de espessura máxima aumentam e chegam ao máximo de aproximadamente 12 mm ao final da simulação (1440 horas), referente ao óleo acumulado na costa.

3.2.3 Análise Comparativa dos Resultados com e sem Biodegradação

Visto recentes orientações do IBAMA solicitando o desligamento dos processos de biodegradação nas modelagens de dispersão de óleo ao mar, este estudo visa antecipar possíveis questionamentos e comparar os resultados obtidos, considerando:

- » Todos os processos físico-químicos de intemperismo do óleo no mar;
- » Todos os processos físico-químicos de intemperismo do óleo no mar, **exceto a biodegradação.**

Ao comparar os resultados obtidos nessas duas condições, observa-se que o padrão de distribuição das classes de probabilidade em superfície foi mantido em ambos os períodos, sendo as diferenças muito sutis (Figura 77 e Figura 78). Maiores diferenças, no entanto, são observadas na coluna d'água (Figura 79 e Figura 80), pois como o óleo, principalmente a sua fase dissolvida, permanece mais na coluna d'água sem o processo da biodegradação, as áreas de todas as classes de probabilidade são estendidas. Para os resultados de 8 e 200 m³, as diferenças foram imperceptíveis.

Em planta, quando analisadas as probabilidades acima de 30% (Figura 81 e Figura 82), observa-se área muito similar em superfície, enquanto na coluna d'água a área de probabilidade máxima acima de 30% é maior na simulação sem biodegradação, principalmente no Período 1. As diferenças na coluna d'água, no entanto, são melhor observadas nos perfis latitudinais (Figura 83 e Figura 84), sendo acentuadas nas camadas mais profundas, abaixo de 1.500 metros de profundidade, onde há maior espalhamento e maiores probabilidades de presença de óleo nas simulações sem biodegradação. São também evidentes as diferenças no fundo marinho (Figura 85 e Figura 86), com maior área ocupada no leito nas simulações sem biodegradação.

No balanço de massa (Figura 87 e Figura 88), o principal incremento com a ausência da biodegradação foi no processo de dispersão, sendo pouco significativo nos outros processos/compartimentos.

Conforme apresentado na Tabela 28, no cenário com degradação, ocorre toque na costa em 9 localidades, 2 no estado do Rio de Janeiro e 7 no estado do Espírito Santo. Todos esses toques ocorrem durante o Período 2, com probabilidade máxima de 4,7%, tempo mínimo de 25,5 dias e massa máxima de 25,4 t/km, em Armação dos Búzios-RJ. As demais localidades apresentam baixas probabilidades, de até 1%. O cenário sem biodegradação (Tabela 29) apresenta toque na costa em 10 localidades, 6 no estado do Espírito Santo, 2 no estado do Rio de Janeiro e 2 no estado de São Paulo. Assim como no cenário com biodegradação, os valores mais críticos - probabilidade máxima de 5,3%, tempo mínimo de 31,2 dias e massa máxima de 13,9 t/km - foram observados em Armação dos Búzios-RJ.

Em relação às Unidades de Conservação (Tabela 30 e Tabela 31), no cenário com biodegradação 13 unidades foram atingidas enquanto que 14 unidades foram atingidas no cenário sem biodegradação, porém com algumas diferenças de localidade. No cenário com e sem degradação, ocorre chegada de óleo no Período 1 apenas na APA Costa das Algas. Para o Período 2, em ambos cenários, a Unidade de Conservação com maior probabilidade de toque é a PE da Costa do Sol, localizada na costa de Armação dos Búzios-RJ. O menor tempo de chegada para o cenário com biodegradação também foi para a PE da Costa do Sol, enquanto no cenário sem biodegradação foi na RESEX Marinha de Arraial do Cabo.

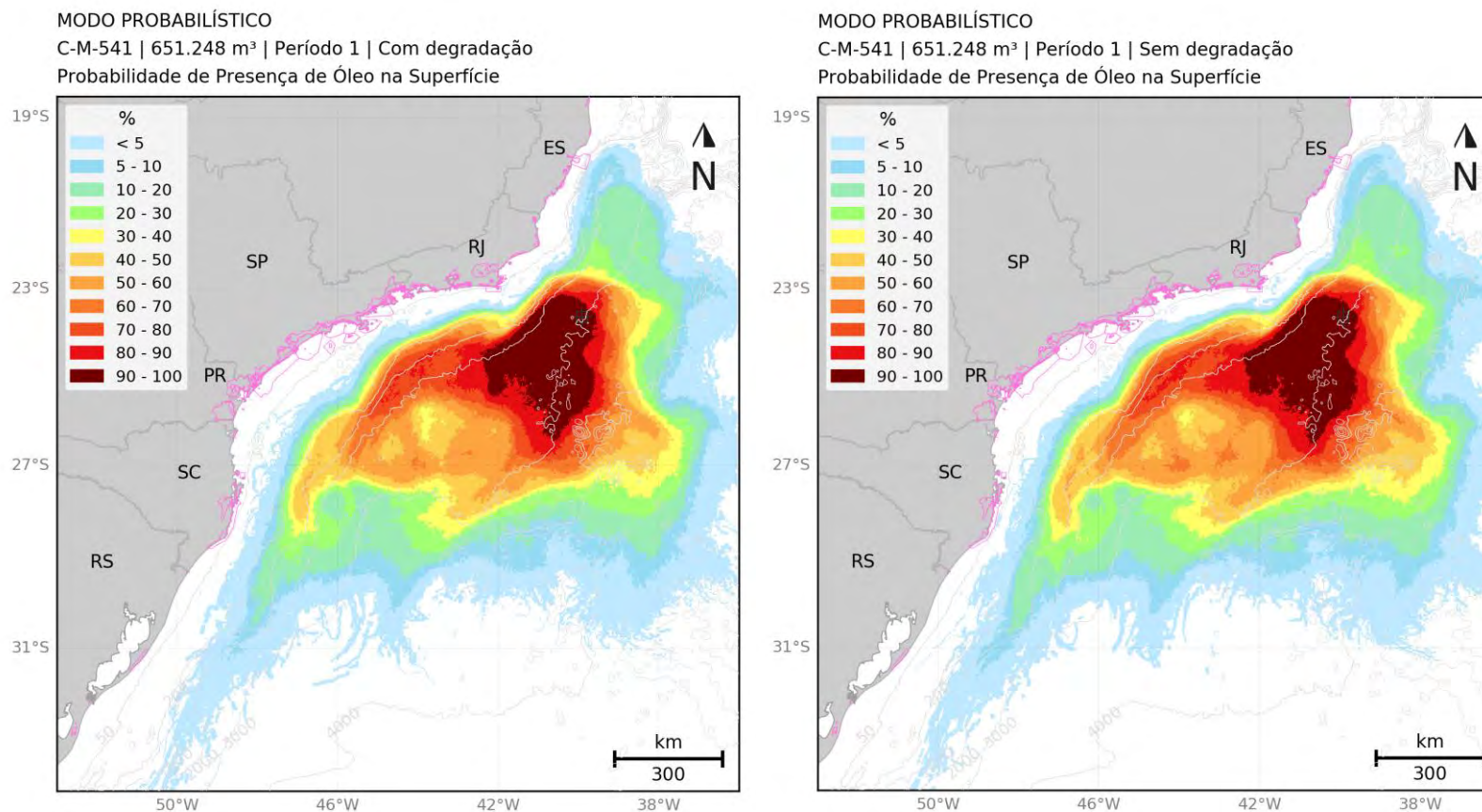
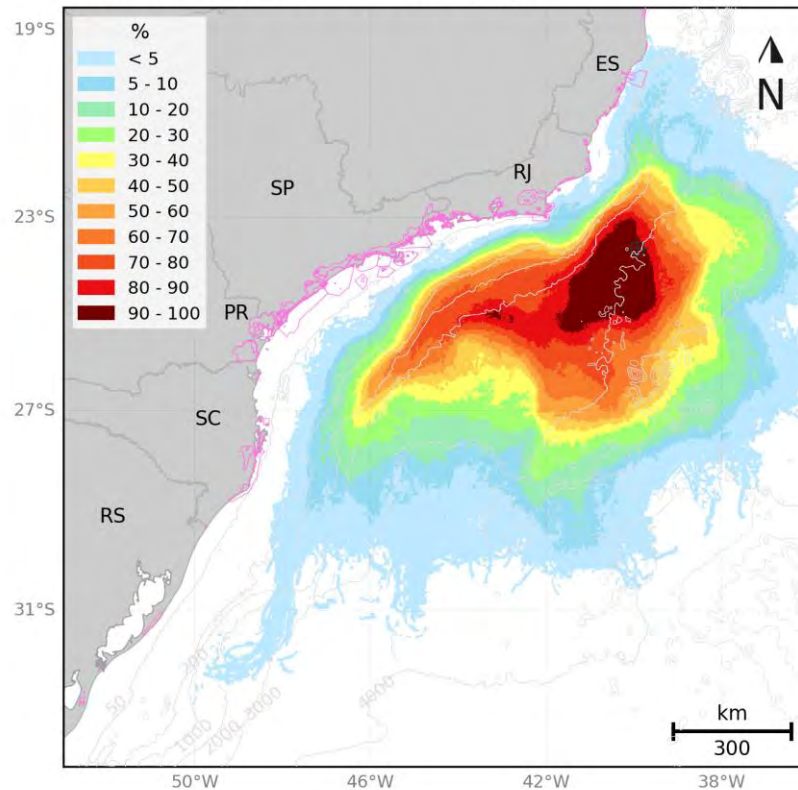


Figura 77: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 1. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.

MODO PROBABILÍSTICO

C-M-541 | 651.248 m³ | Período 2 | Com degradação

Probabilidade de Presença de Óleo na Superfície



MODO PROBABILÍSTICO

C-M-541 | 651.248 m³ | Período 2 | Sem degradação

Probabilidade de Presença de Óleo na Superfície

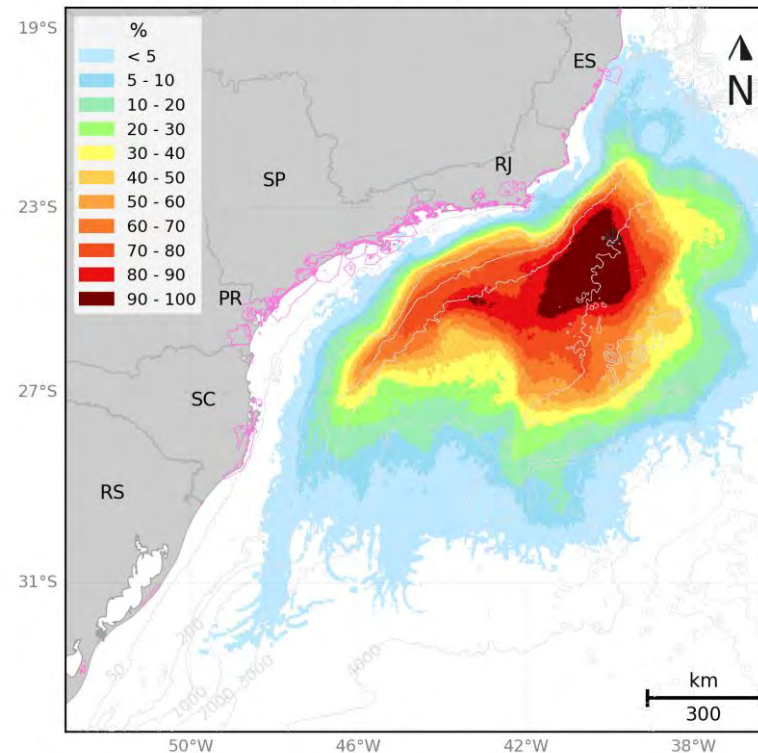
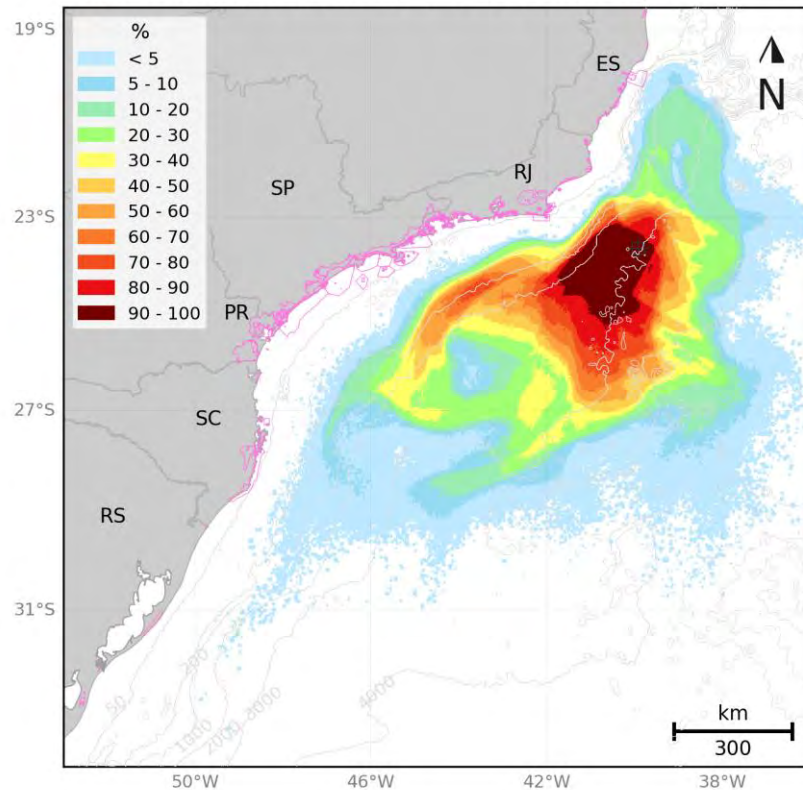


Figura 78: Mapa de probabilidade de presença de óleo em superfície para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 2. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.

MODO PROBABILÍSTICO

C-M-541 | 651.248 m³ | Período 1 | Com degradação

Probabilidade Máxima de Presença de Óleo na Coluna d'água



MODO PROBABILÍSTICO

C-M-541 | 651.248 m³ | Período 1 | Sem degradação

Probabilidade Máxima de Presença de Óleo na Coluna d'água

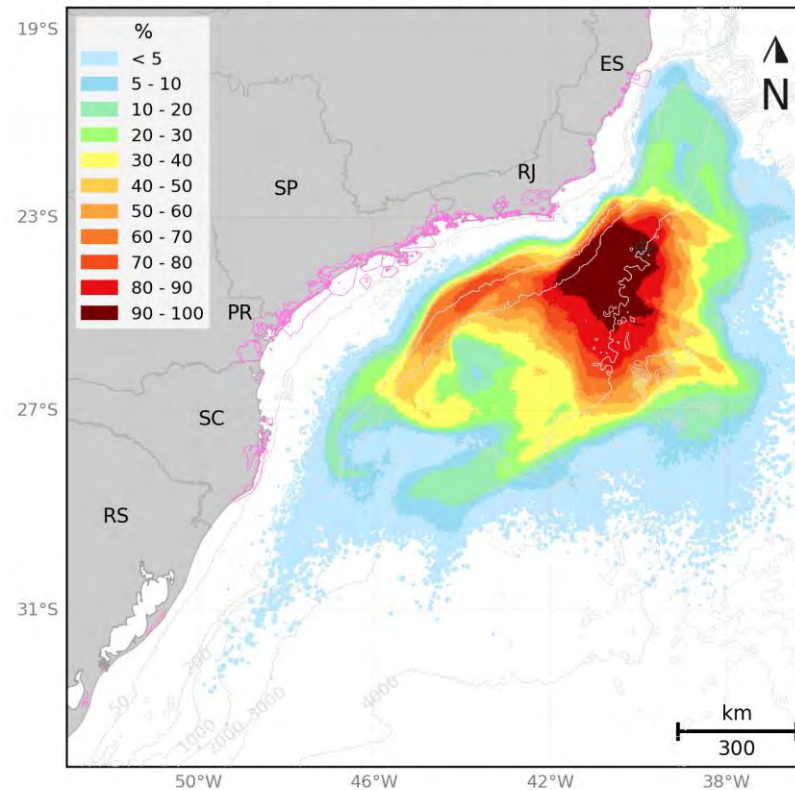
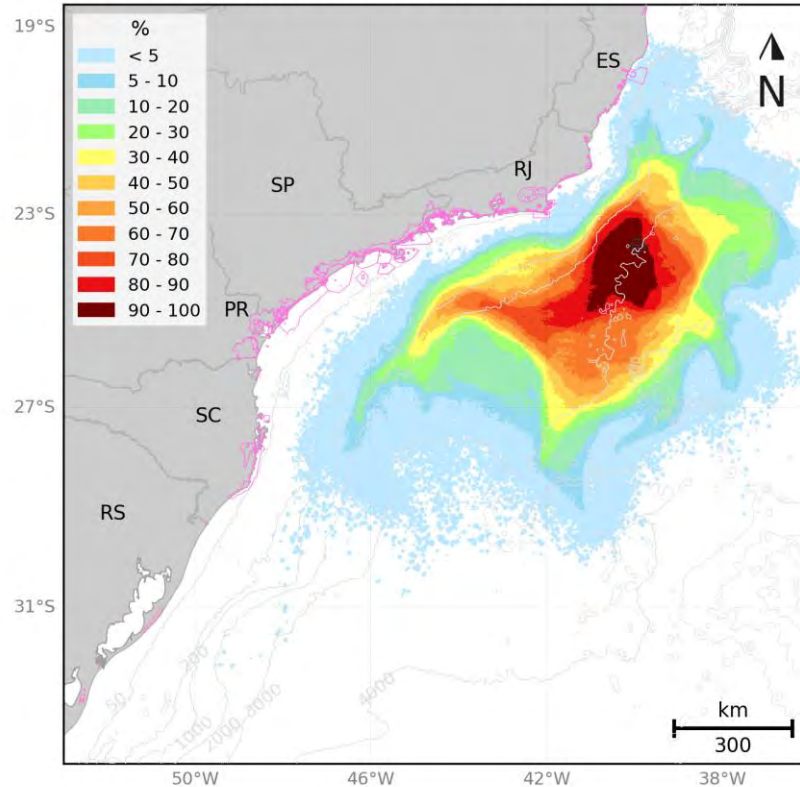


Figura 79: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 1. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.

MODO PROBABILÍSTICO

C-M-541 | 651.248 m³ | Período 2 | Com degradação

Probabilidade Máxima de Presença de Óleo na Coluna d'água



MODO PROBABILÍSTICO

C-M-541 | 651.248 m³ | Período 2 | Sem degradação

Probabilidade Máxima de Presença de Óleo na Coluna d'água

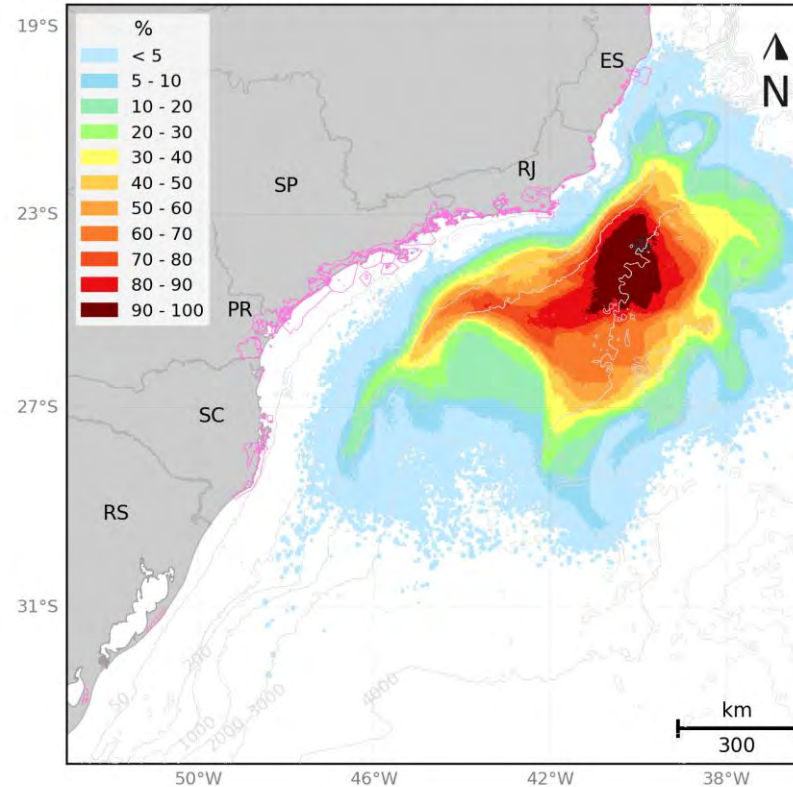


Figura 80: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo na coluna d'água para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 2. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.

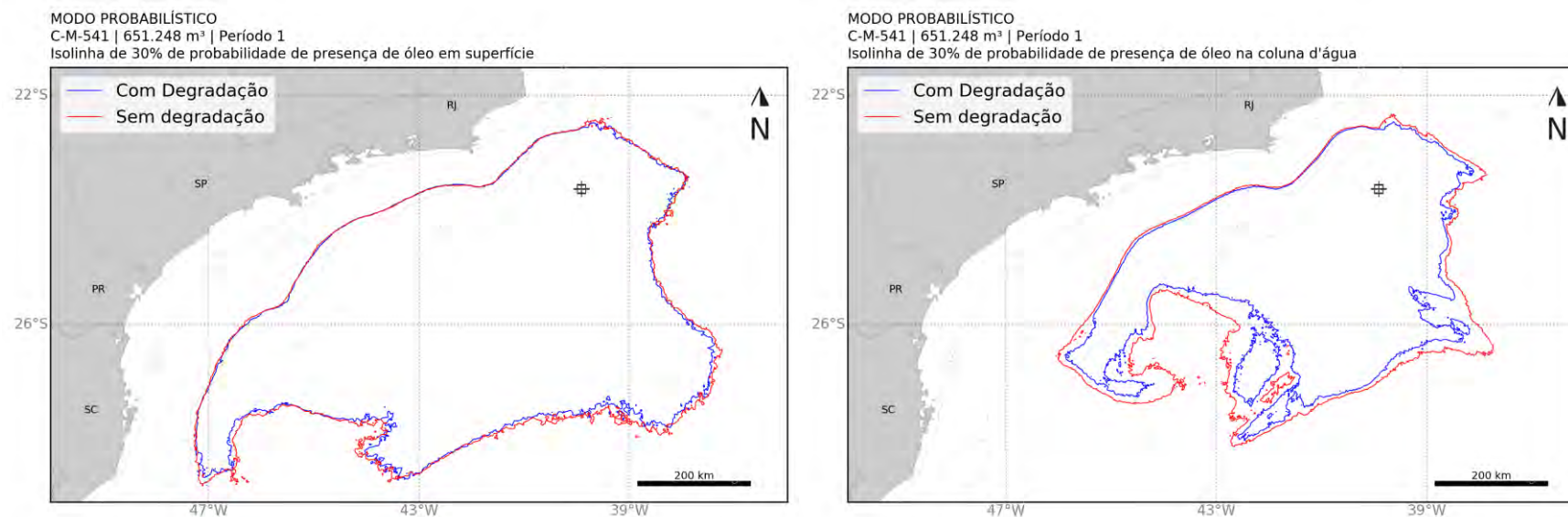


Figura 81: Isolinhas de 30% de probabilidade de presença de óleo para a simulação com biodegradação (em azul) e sem biodegradação (em vermelho) em superfície (à esquerda) e na coluna d'água (à direita). Período 1.

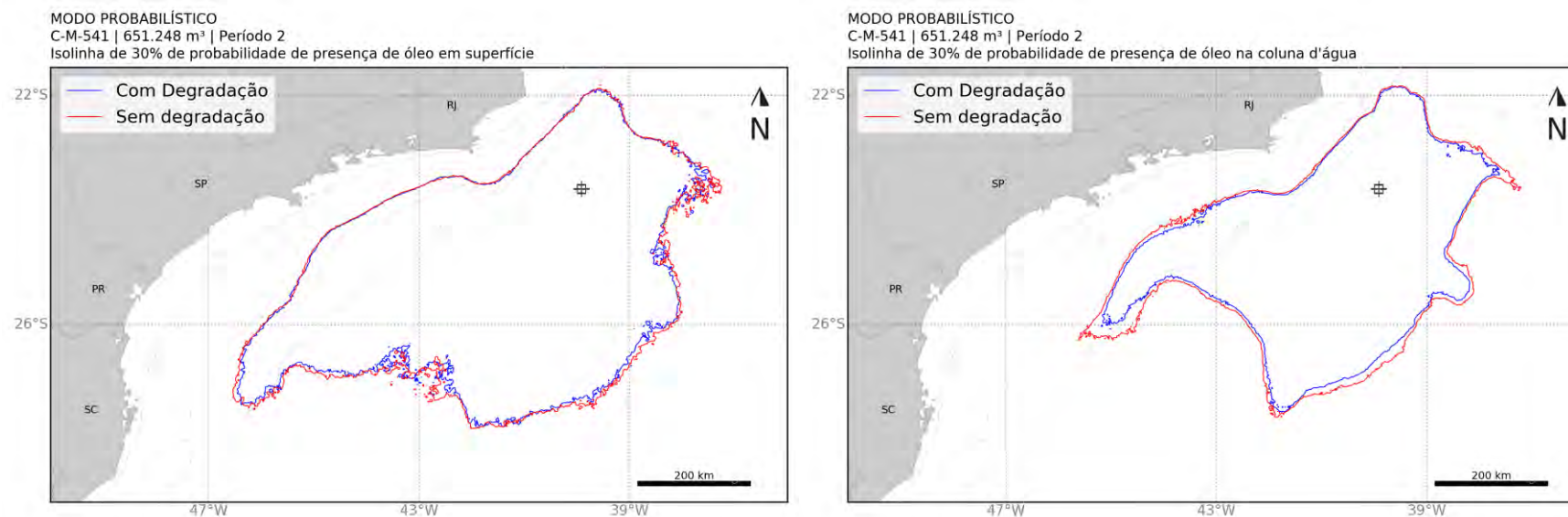


Figura 82: Isolinhas de 30% de probabilidade de presença de óleo para a simulação com biodegradação (em azul) e sem biodegradação (em vermelho) em superfície (à esquerda) e na coluna d'água (à direita). Período 2.

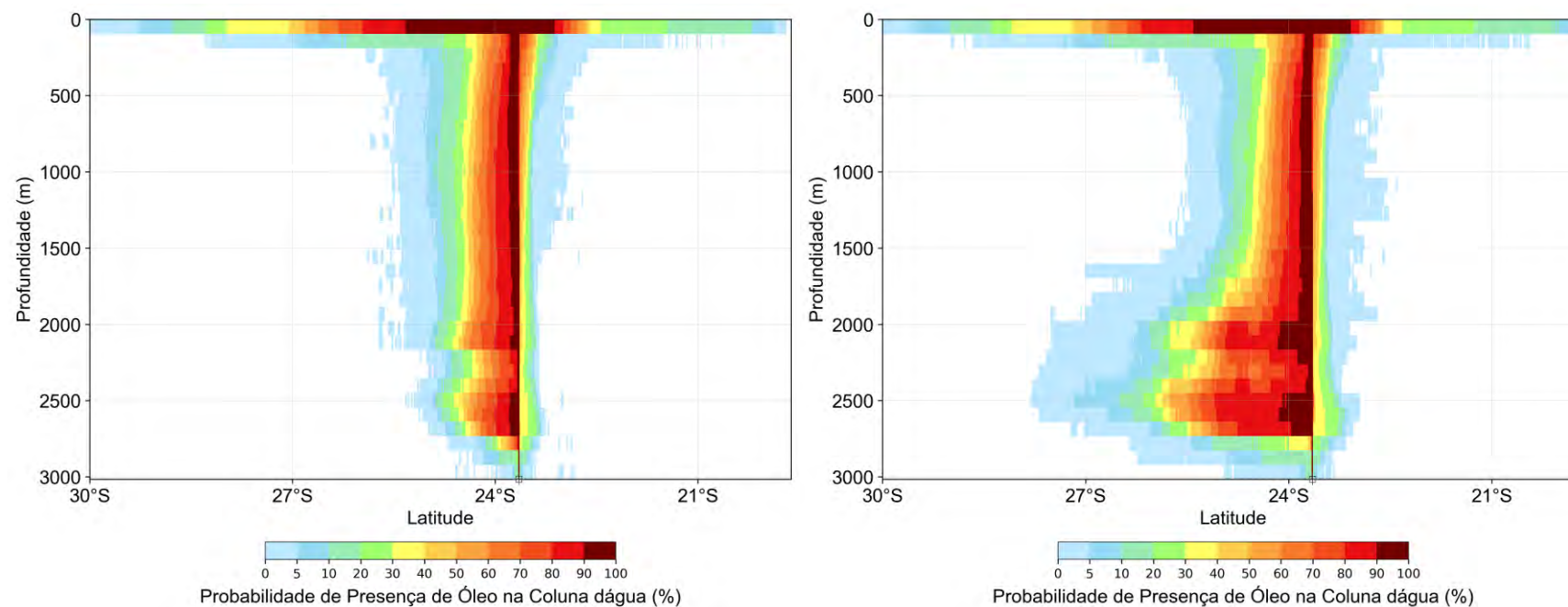


Figura 83: Perfil latitudinal de probabilidade de presença de óleo na coluna d'água para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 1. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.

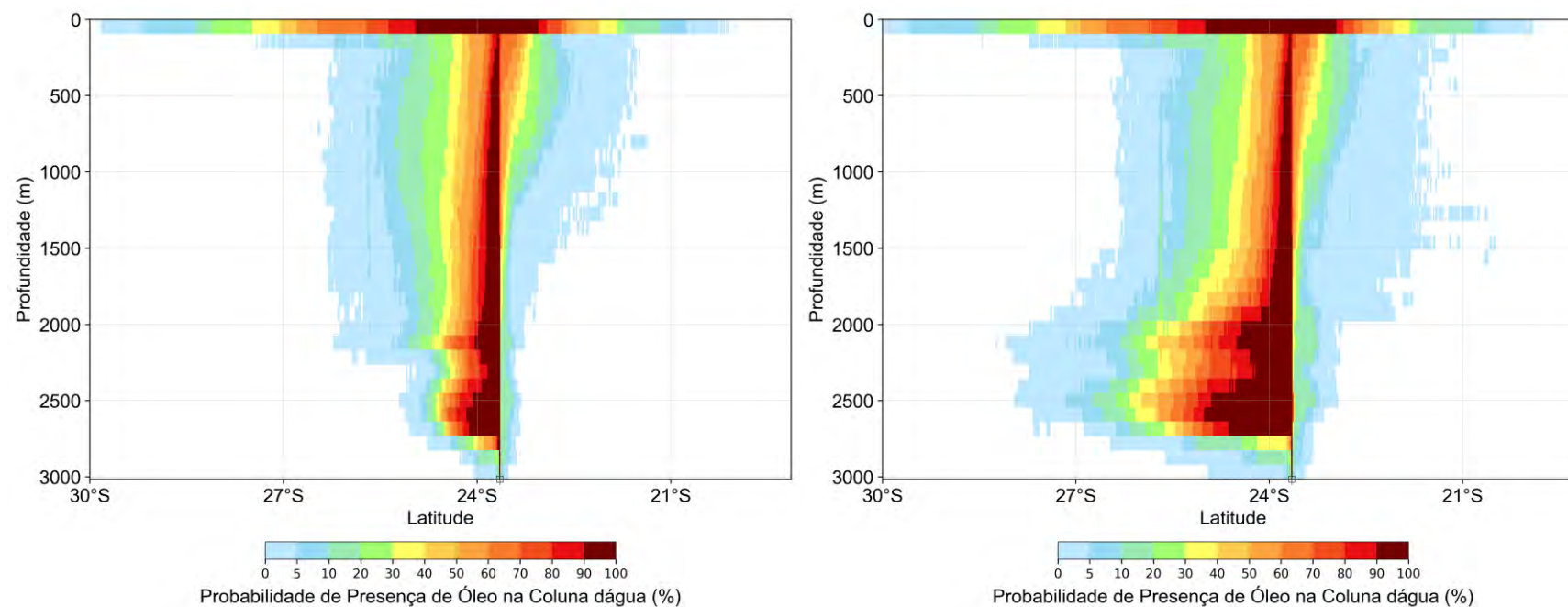


Figura 84: Perfil latitudinal de probabilidade de presença de óleo na coluna d'água para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 2. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.

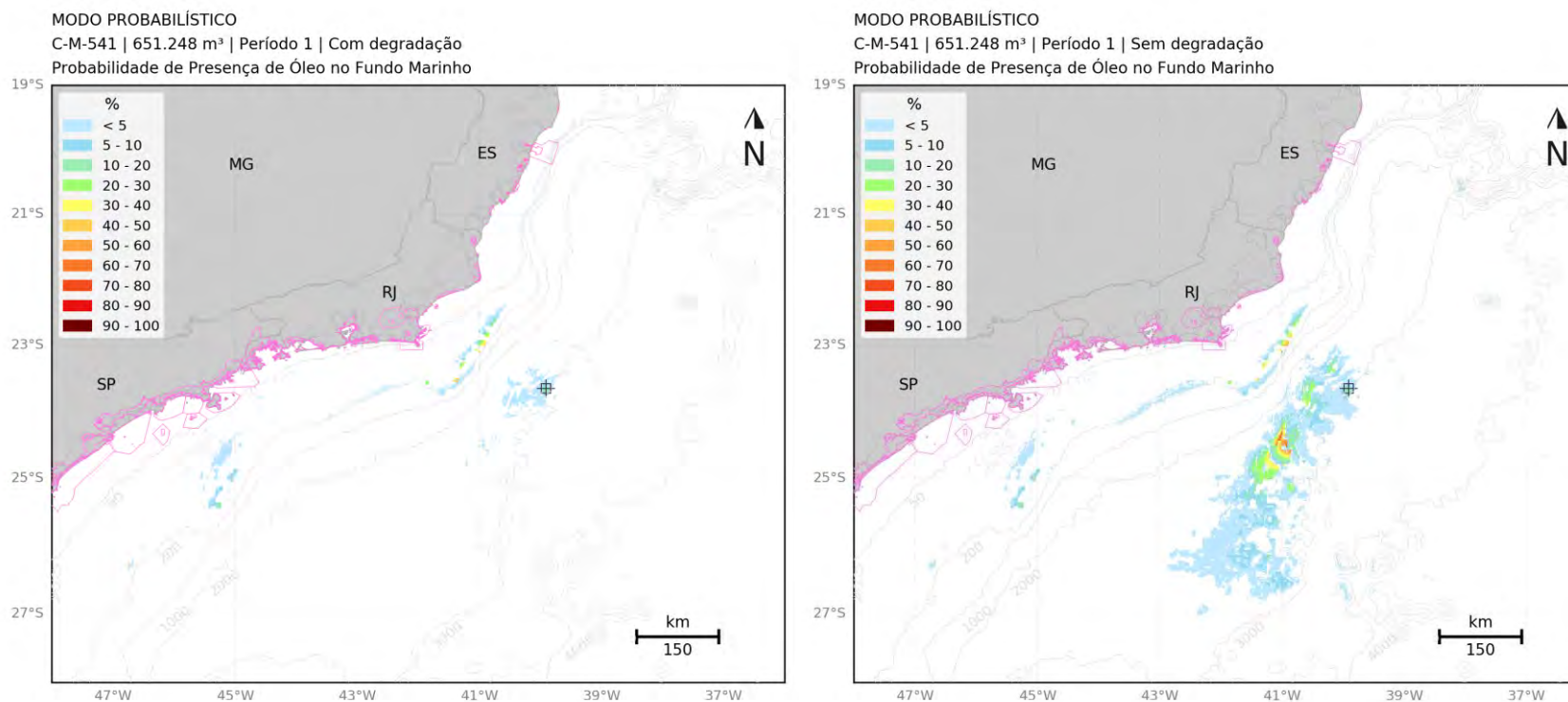


Figura 85: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo no fundo marinho para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 1. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.

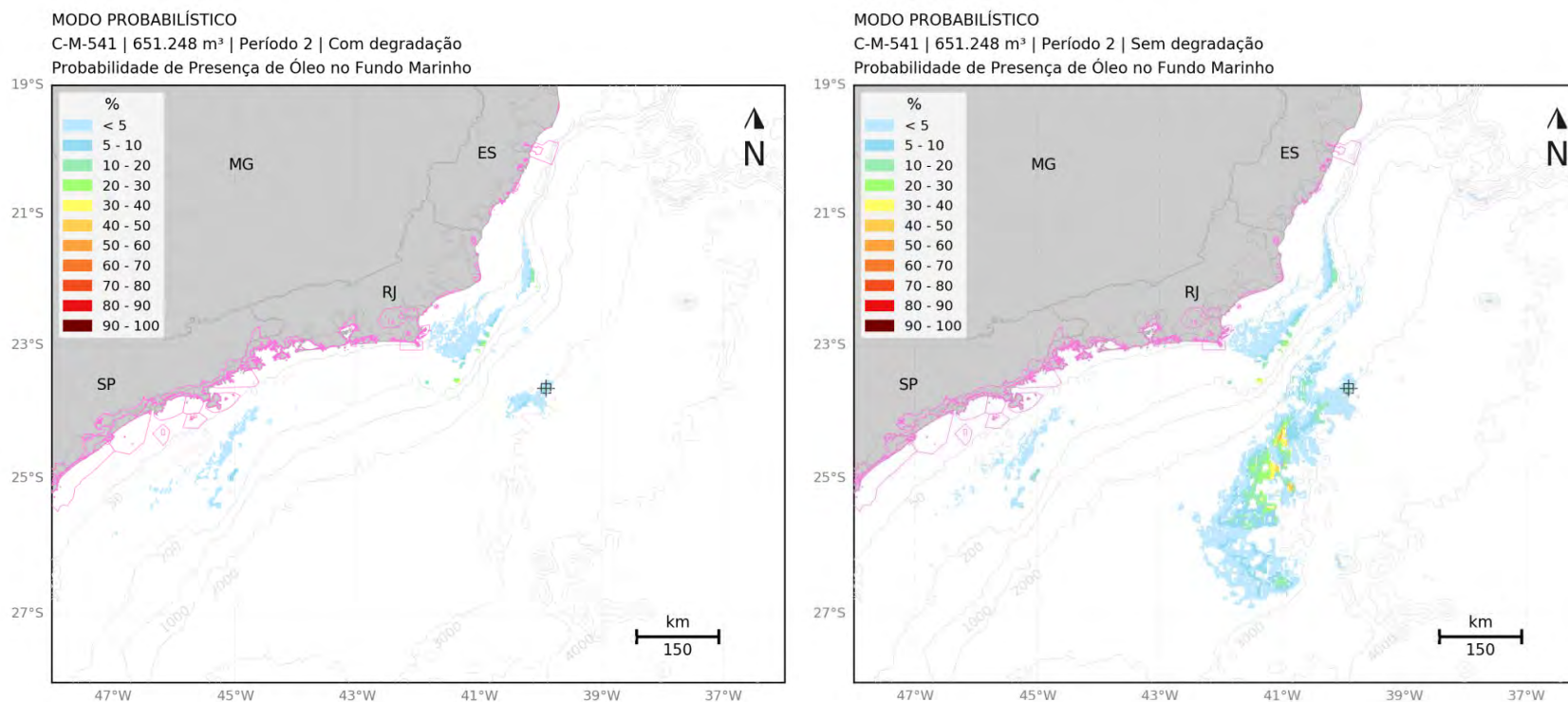


Figura 86: Mapa de probabilidade máxima de presença de óleo no fundo marinho para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 2. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.

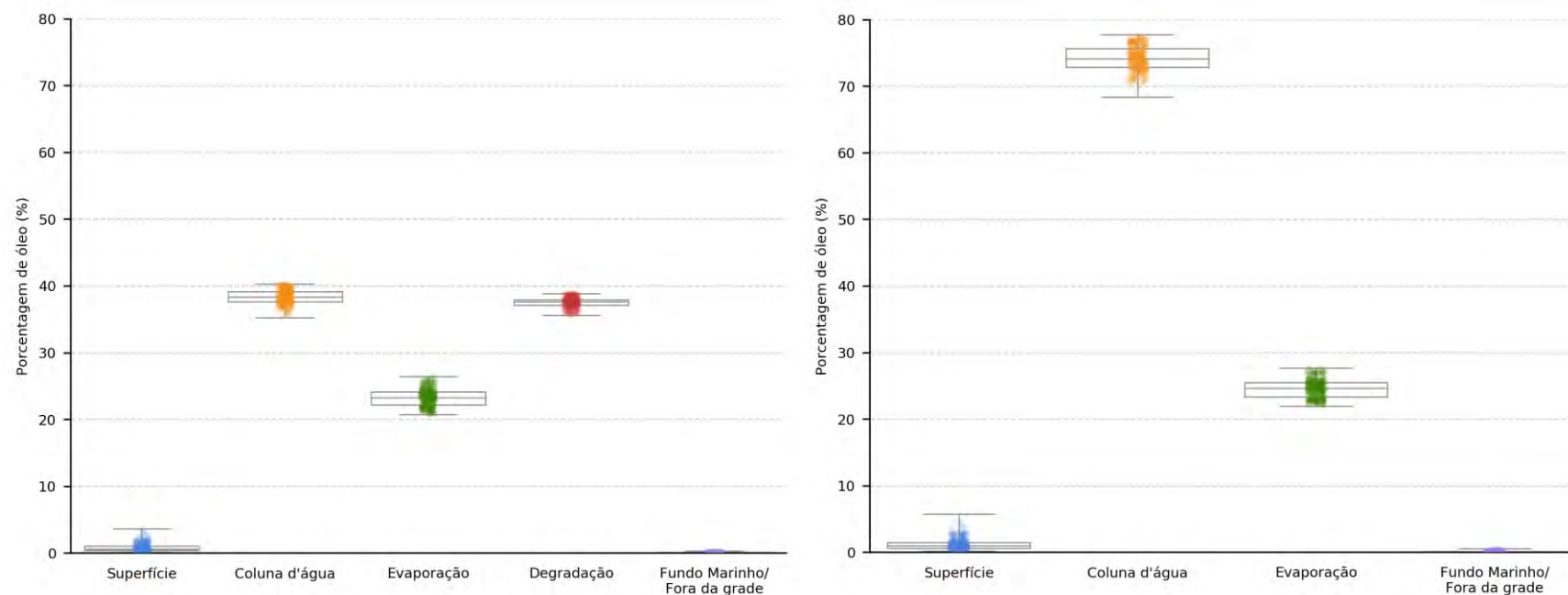


Figura 87: Balanço de massa para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 1. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.

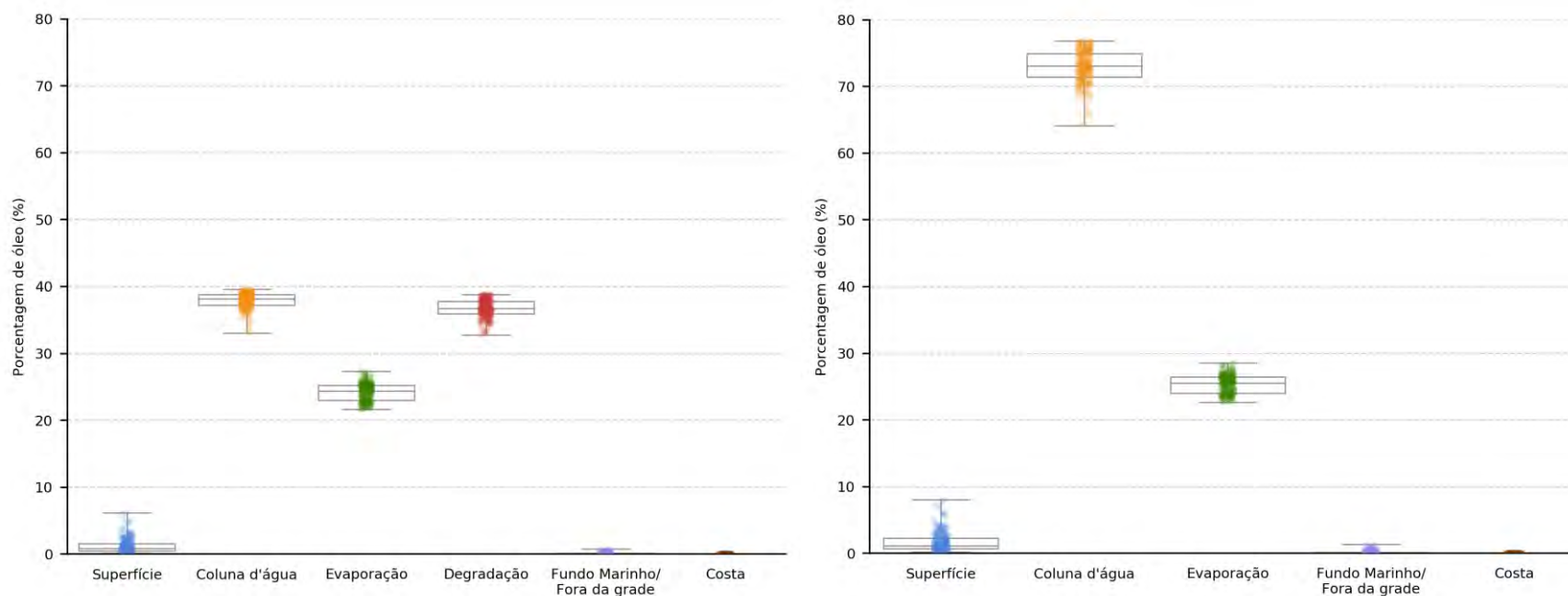


Figura 88: Balanço de massa para o ponto de risco no Bloco C-M-541 no Período 2. À esquerda simulação com biodegradação e à direita simulação com a biodegradação desligada.

Tabela 28: Probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada, massa máxima e extensão de toque nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um vazamento de *blowout*, nos cenários de Período 1 e Período 2, **com degradação**.

UF	Município	Probabilidade (%)		Tempo Mínimo (dias)		Massa Máxima (t/km)		Extensão (Km)	
		Período 1	Período 2	Período 1	Período 2	Período 1	Período 2	Período 1	Período 2
		1	2	1	2	1	2	1	2
ES	São Mateus		0,3		51,3		-		-
	Linhares		1		47,3		2,8		39,6
	Aracruz		0,7		40,4		2,8		17
	Fundão		0,3		48,7		0,8		2,8
	Serra		1		50,2		4,2		14,1
	Vitória		0,3		52,1		-		-
	Guarapari		1		41,5		-		-
	Armação dos Búzios		4,7		25,5		25,4		11,3
RJ	Cabo Frio		0,7		50,7		0,6		2,8

*Em azul, valores retirados dos resultados em superfície para os municípios que não apresentaram massa acumulada na costa acima do limiar monitorado, no entanto apresentaram resultados em superfície a uma distância de menos de 2 km (um ponto de grade) da costa. Como os valores apresentados são da superfície, não são apresentados valores de massa acumulada na costa e extensão.

Tabela 29: Probabilidade de presença de óleo, tempo mínimo de chegada, massa máxima e extensão de toque nos municípios com possibilidade de serem atingidos em um vazamento de *blowout*, nos cenários de Período 1 e Período 2, **sem degradação**.

UF	Município	Probabilidade (%)		Tempo Mínimo (dias)		Massa Máxima (t/km)		Extensão (Km)	
		Período 1	Período 2	Período 1	Período 2	Período 1	Período 2	Período 1	Período 2
		1	2	1	2	1	2	1	2
ES	Linhares	-	0,3	-	53,3	-	2,8	-	14,1
	Aracruz	-	0,7	-	37,1	-	4,7	-	25,5
	Serra	-	0,3	-	53,3	-	1,5	-	5,7
	Vila Velha	-	0,3	-	50,4	-	3,1	-	8,5
	Vitória	-	0,3	-	50,4	-	3,1	-	2,8
	Guarapari	-	1,3	-	43,6	-	-	-	-
	Armação dos Búzios	-	5,3	-	31,2	-	13,9	-	14,1
RJ	Arraial do Cabo	-	0,3	-	40,2	-	-	-	-
SP	Ubatuba	-	0,3	-	54,6	-	-	-	-
	Ilhabela	-	0,3	-	44,2	-	-	-	-

* Em azul, valores retirados dos resultados em superfície para os municípios que não apresentaram massa acumulada na costa acima do limiar monitorado, no entanto apresentaram resultados em superfície a uma distância de menos de 2 km (um ponto de grade) da costa. Como os valores apresentados são da superfície, não são apresentados valores de massa acumulada na costa e extensão.

Tabela 30: Probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas Unidades de Conservação com possibilidade de serem atingidas para o vazamento de *blowout*, nos cenários de Período 1 e Período 2, **com degradação**.

Unidade de Conservação	Probabilidade (%)		Tempo Mínimo (dias)	
	Período 1	Período 2	Período 1	Período 2
ARIE do Degredo	-	0,3	-	51
REBIO de Comboios	-	0,7	-	47,3
APA Costa das Algas	0,3	4	52,8	28,2
RVS de Santa Cruz	-	2,7	-	36,2
APA da Lagoa Jacumém	-	0,7	-	51,6
APA de Praia Mole	-	0,3	-	51,9
APA Marinha da Armação de Búzios	-	1,3	-	38,1
PE da Costa do Sol	-	4,7	-	25,5
PNM dos Corais de Armação dos Búzios	-	0,7	-	45,4
APA da Praia da Azeda e Azedinha	-	0,7	-	45,4
APA do Pau Brasil	-	0,7	-	50,7
RESEX Marinha de Arraial do Cabo	-	4,3	-	31,5
APA Marinha do Litoral Norte	-	0,3	-	47,8

Tabela 31: Probabilidade de presença e tempo mínimo de chegada de óleo nas Unidades de Conservação com possibilidade de serem atingidas para o vazamento de *blowout*, nos cenários de Período 1 e Período 2, **sem degradação**.

Unidade de Conservação	Probabilidade (%)		Tempo Mínimo (dias)	
	Período 1	Período 2	Período 1	Período 2
REBIO de Comboios		0,3		53,3
APA Costa das Algas	1	4	44,5	29,3
RVS de Santa Cruz		2,3		31,8
APA de Praia Mole		0,3		53,3
APP Morro do Moreno		0,3		50,4
APA da Lagoa Grande		0,3		51,4
APA Marinha da Armação de Búzios	1,7		36,9	
PE da Costa do Sol		5,3		31,2
PNM dos Corais de Armação dos Búzios	0,3		37,4	
APA da Praia da Azeda e Azedinha		0,3		37,4
PM da Lagoinha		0,3		37,4
RESEX Marinha de Arraial do Cabo		4,3		28,6
APA Marinha do Litoral Norte		0,3		43,6
ESEC Tupinambás		0,3		54,6

3.3. Conclusão

O ponto de vazamento se localiza em região além do talude continental, com mais de 3.000 metros de profundidade, onde a dinâmica é bastante variável. As simulações probabilísticas da modelagem de dispersão de óleo mostraram um espalhamento das direções de deriva nos vazamentos de 8 m³ e 200 m³, porém nos vazamentos de pior caso, em que o óleo atinge a região do fluxo principal da Corrente do Brasil (CB), a deriva se mostrou preferencialmente para sudoeste. No Período 1, devido aos ventos predominantes de nordeste, a área com maiores probabilidades de presença de óleo é deslocada mais para sul e, no Período 2, devido à maior variação da direção dos ventos e ao enfraquecimento da CB, o óleo alcança menor extensão nesta direção.

Dentre todos os cenários contemplados neste estudo, somente no de vazamento de *blowout* no Período 2 houve probabilidade de o óleo atingir a costa, considerando o limite de 0,3 µm e 30 dias de acompanhamento após o término do vazamento. Houve probabilidade de chegada de óleo em 7 (sete) municípios do Espírito Santo e 2 (dois) municípios do estado do Rio de Janeiro, com probabilidade máxima de 4,7% e tempo mínimo de 25,5 dias, em Armação dos Búzios – RJ. Nos vazamentos de 8 m³ e 200 m³, as áreas de probabilidade em superfície se mantiveram em regiões mais profundas que 1.000 m, enquanto nos vazamentos de pior caso são observadas probabilidades maiores que 60% sobre a plataforma continental. Para os cenários que não apresentaram probabilidade de chegada de óleo na costa, a distância desta para a área de probabilidade em superfície foi superior a 165 km para os vazamentos de 8 m³, mais de 110 km para os de 200 m³, e de 10 km para o vazamento de *blowout* no Período 1. Em relação às Unidades de Conservação, verificou-se probabilidade de chegada de óleo em 13 unidades, com valor máximo de 0,3% e tempo mínimo de 52,8 dias, na APA Costa das Algas no Período 1 e probabilidade máxima de 4,7% e tempo mínimo de 25,5 dias na PE da Costa do Sol, considerando os vazamentos de maior volume simulados.

Em todas as simulações probabilísticas a partir da superfície (de 8 m³ e 200 m³), a evaporação e a dispersão foram os principais processos de intemperismo responsáveis pela retirada do óleo da superfície do mar, apresentando medianas em torno de 46% e 37% do total do volume dos vazamentos, respectivamente. Nos cenários de pior caso, por se tratar de um vazamento de fundo, a dispersão do óleo na coluna d'água e a degradação foram os processos de intemperismo mais significantes, apresentando medianas em torno de 38% e 37%, respectivamente. O óleo em superfície ao final da simulação foi inferior a 7% em todas as simulações de pior caso, tanto para o Período 1 quanto para o Período 2.

Foram selecionadas as simulações determinísticas que apresentaram menor tempo de chegada de óleo na costa e maior massa acumulada de óleo na costa, ambas no vazamento de *blowout* no Período 2. Nas duas simulações há predomínio de correntes para norte no ponto de vazamento, associadas a ventos mais frequentes de sudeste, levando a deriva do óleo em

direção à costa na região do município de Armação dos Búzios – RJ. Na simulação de menor tempo, o toque na costa ocorre em 25,5 dias, enquanto na simulação de maior massa, o toque ocorre após 43,7 dias. Na coluna d'água, em ambos os cenários, a ascensão do óleo da profundidade de vazamento até a superfície se dá de forma direta, como uma coluna vertical em torno do ponto de vazamento. Após o término do vazamento (30 dias), o óleo se concentra nos primeiros 100 metros de profundidade, com concentrações abaixo de 500 ppb. Para ambos cenários, o total de óleo disperso na coluna d'água representou 37% do total de óleo vazado no final da simulação.

Quando retirado o efeito da biodegradação, de maneira geral, observou-se uma permanência dos padrões dos resultados das modelagens probabilísticas. A principal razão para que isso tenha acontecido está relacionada com o fato de que nas simulações com degradação, a quantidade de óleo remanescente já era suficiente para que os limiares utilizados para indicar a presença de óleo (0,3 μ m de espessuras da mancha superficial e 20 ppb de concentração de óleo disperso/dissolvido na coluna d'água) estivessem sendo superados ao longo de praticamente todas as trajetórias que foram simuladas. Portanto, nesse caso específico, o aumento da quantidade de óleo remanescente ao final dos 60 dias nas simulações sem biodegradação não resulta em alterações significativas nas áreas varridas pelo óleo em relação ao apresentado nas simulações com degradação. Esta conclusão também pode ser observada quando se observa as simulações determinísticas de pior caso com degradação do óleo (item 3.2.1.4). Estas simulações indicaram que ao final dos 60 dias, ainda existia óleo tanto em superfície quanto na coluna d'água em valores superiores aos limiares utilizados.

Visto que os padrões dos resultados das modelagens, com e sem o processo de biodegradação, apresentam resultados muito próximos, principalmente no que tange à curva de probabilidade acima de 30% em superfície, conclui-se que os resultados da modelagem considerando os efeitos da biodegradação são consistentes. O estudo incorpora um efeito que está presente no mundo real e é confiável como base de outras análises do Estudo Ambiental de Perfuração para a atividade a ser realizada no Bloco C-M-541, na Bacia de Campos.

4. 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.
- ASTM, 2013. Standard Practice for Development and Use of Oil-Spill Trajectory Models. Designation: F2067-13. American Society for Testing and Materials. DOI: 10.1520/F2067-13.
- CARVALHO, J.L.B. 2003. 190 p. Modelagem e Análise do Lançamento de Efluentes Através de Emissários Submarinos. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. 2005. Resolução Conama nº 357. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/> > Acesso em 13/03/2015.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. 2007. Resolução Conama nº 393. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/> > Acesso em 13/03/2015.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. 2008. Resolução Conama nº 398. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/> > Acesso em 13/03/2015.
- ELLIOT, A.J. A probabilistic description of the wind over Liverpool Bay with application to oil spill simulations Estuarine, Coastal and Shelf Science 61 (2004) 569–581.
- ELPN/IBAMA. Informação Técnica nº 023/2002. Modelagem de Derramamento de Óleo no Mar.
- GABARDO, I. T., 2007. Caracterização Química e Toxicológica da água Produzida descartada em plataformas de óleo e gás na costa brasileira e seu comportamento dispersivo no mar. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande Norte. UFRN.
- HENNERMANN, K. ERA5 Data Documentation. Disponível em: <https://software.ecmwf.int/wiki/display/CKB/ERA5+data+documentation> Acesso em 20/09/2017.
- ICMBIO, 2018. Sistema Informatizado de Monitoria de RPPN. Disponível em: <http://sistemas.icmbio.gov.br/simrppn/publico/>. Acesso em 18 de dezembro de 2018.
- LONG, E. R.; MACDONALD, D. D.; SMITH, S.L.; CALDER, F. D. (1995) Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. Environ. Manage. 19, 81-97.

- MENDONÇA, L.F., SOUZA, R.B., ASSEF, C.R.C., PEZZI, L.P., MÖLLER, O.O., ALVES, R.C.M. 2016. Regional modeling of the water masses and circulation annual variability at the Southern Brazilian Continental Shelf. Journal of Geophysical Research, doi: 10.1002/2016JC011780. MMA, 2016. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/seguranca-quimica/cartas-de-sensibilidade-ao-oleo>. Acesso em 06 de dezembro de 2016.
- MMA, 2018. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/seguranca-quimica/cartas-de-sensibilidade-ao-oleo>. Acesso em 06 de janeiro de 2018.
- MMA, 2019. Cadastro Nacional de Unidades de Conservação. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/areas-protegidas/cadastro-nacional-de-ucs/dados-georreferenciados>. Acesso em 04 de janeiro de 2019.
- OSPAR COMMISSION. 2014. Background document. Establishment of a list of Predicted No Effect Concentration (PNECs) for naturally occurring substances in produced water. OSPAR Agreement 2014-05.
- PETERSON, R. G.; STRAMMA, L., 1991: Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. Progress in Oceanography, v. 26, p. 1–73.
- PPLC, 2018. Disponível em :<http://www.pplc.com.br/webapp/index.html>. Acesso em 06 de janeiro de 2018.
- RYE, H.; REED, M.; DITLEVSEN, M.K.; BERNTSEN, S. The “Environment Impact Factor” (EIF) for produced water discharges – a tool for reducing environmental impacts. In: Development and Application of Computer Techniques to Environmental Studies. WIT Press, 2004.
- SEELIGER, U., C. ODEBRECHT, J.P. CASTELLO, 1998: Os ecossistemas costeiro e marinho do extremo sul do Brasil. Ecoscientia.
- SOUZA, R.B.de and ROBINSON, I.S. 2004. Lagrangian and satellite observations of the Brazilian Coastal Current. Continental Shelf Research, 24: 241-262
- WWF, 2016. Observatório de UCs. Disponível em: <http://observatorio.wwf.org.br/mapa/>. Acesso em 10 de dezembro de 2016.

Anexos

ANEXO I - Descrição do Modelo Hidrodinâmico

Relatório Técnico [rev.01]

Modelagem Hidrodinâmica

Bacias do Espírito Santo, Campos,
Santos e Pelotas

Preparado por: Prooceano

Prooceano

Av. Rio Branco, 311/1205 – Centro

CEP 20.040-009 – Rio de Janeiro – RJ

Tel./Fax + 55 21 2532.5666

www.prooceano.com.br

© PROOCEANO 2020

The copyright in this document is vested in Prooceano. This document may only be reproduced in whole or in part, or stored in a retrieval system, or transmitted in any form, or by any means electronic, mechanical, photocopying or otherwise, with the prior permission of PROOCEANO.

Os direitos autorais deste documento são propriedade da PROOCEANO. Este documento somente poderá ser reproduzido inteiro ou em partes, ou armazenado, ou transmitido em qualquer forma, ou por quaisquer meios: eletrônico, mecânico, fotocópia ou qualquer outro modo, com a permissão prévia da PROOCEANO.

Controle de revisão

Revisão nº 01

Data: 06 / 04 / 2020

Descrição: Atualização do relatório com base nos pareceres técnicos recentes

Responsável: Henery Garção

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	19
2. Modelo Numérico Utilizado.....	20
3. Domínio do Modelo	25
4. Condições Iniciais	27
5. Condições de Contorno	30
5.1. Condição de Contorno de Fundo	30
5.2. Condição de Contorno de Superfície.....	32
5.3. Condição de Contorno Laterais	41
5.4. Maré.....	41
6. Estabilização da Energia Cinética.....	51
7. Resultados	53
7.1. Campos de corrente	54
7.2. Seções verticais.....	86
7.3. Rosas mensais de corrente	90
7.4. Processos de mesoescala	109
7.5. Considerações.....	111
8. Avaliação do Modelo	112
8.1. Maré.....	112
8.2. Temperatura da Superfície do Mar	117
8.3. Estrutura Termohalina	132
8.4. Correntes	152
8.5. Transporte de volume	163
9. Considerações Finais.....	165
10. Bibliografia.....	165

Índice das imagens

Figura 1: Região de modelagem. Polígono vermelho pontilhado representa os limites da grade do modelo hidrodinâmico.	25
Figura 2: 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.	26
Figura 3: Campo de temperatura superficial do Mercator (°C) no dia 1º de janeiro de 2012 interpolado para a grade do ROMS.	28
Figura 4: Campo de salinidade superficial do Mercator (°C) no dia 1º de janeiro de 2012 interpolado para a grade do ROMS.	28
Figura 5: Campo de Elevação da Superfície Livre (m) do Mercator (°C) no dia 1º de janeiro de 2012 interpolado para a grade do ROMS.	29
Figura 6: Campo de Correntes superficiais (m/s) do Mercator (°C) no dia 1º de janeiro de 2012 interpolado para a grade do ROMS.	29
Figura 7: Representação esquemática das condições de contorno a serem definidas em um modelo de área limitada.	30
Figura 8: Batimetria da grade do modelo numérico ROMS.	31
Figura 9: Campo médio dos dados de temperatura do ar a 2 m do ERA5 utilizados como forçante para o período 1 (superior) e para o período 2 (inferior).	34
Figura 10: Campo médio dos dados de precipitação do ERA5 utilizados como forçante para o período 1 (superior) e para o período 2 (inferior).	35
Figura 11: Campo médio dos dados de umidade relativa do ar do ERA5 utilizados como forçante para o período 1 (superior) e para o período 2 (inferior).	36
Figura 12: Campo médio dos dados de pressão atmosférica do ERA5 utilizados como forçante para o período 1 (superior) e para o período 2 (inferior).	37
Figura 13: Campo médio dos dados de radiação de onda curta do ERA5 utilizados como forçante para o período 1 (superior) e para o período 2 (inferior).	38
Figura 14: Campo médio dos dados de radiação de onda longa do ERA5 utilizados como forçante para o período 1 (superior) e para o período 2 (inferior).	39
Figura 15: Campo médio dos dados de vento do ERA5 utilizados como forçante para o período 1 (superior) e para o período 2 (inferior).	40

Figura 16: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente M2. Fonte: TPX08.....	42
Figura 17: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente S2. Fonte: TPX08.	43
Figura 18: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente N2. Fonte: TPX08.	44
Figura 19: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente K2. Fonte: TPX08.	45
Figura 20: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente K1. Fonte: TPX08.	46
Figura 21: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente O1. Fonte: TPX08.....	47
Figura 22: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente P1. Fonte: TPX08.	48
Figura 23: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente Q1. Fonte: TPX08.....	49
Figura 24: Variação da energia cinética média em superfície ao longo da simulação.	52
Figura 25: Campo médio de circulação para o mês de janeiro.	55
Figura 26: Campo médio de circulação para o mês de fevereiro.	55
Figura 27: Campo médio de circulação para o mês de março.	56
Figura 28: Campo médio de circulação para o mês de abril.	56
Figura 29: Campo médio de circulação para o mês de maio.	57
Figura 30: Campo médio de circulação para o mês de junho.	57
Figura 31: Campo médio de circulação para o mês de julho.....	58
Figura 32: Campo médio de circulação para o mês de agosto.	58
Figura 33: Campo médio de circulação para o mês de setembro.	59
Figura 34: Campo médio de circulação para o mês de outubro.	59
Figura 35: Campo médio de circulação para o mês de novembro.	60
Figura 36: Campo médio de circulação para o mês de dezembro.	60
Figura 37: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de janeiro.	62
Figura 38: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de fevereiro.	62
Figura 39: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de março.	63

Figura 40: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de abril. .	63
Figura 41: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de maio.	64
Figura 42: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de junho.	64
Figura 43: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de julho..	65
Figura 44: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de agosto.	65
Figura 45: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de setembro.	66
Figura 46: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de outubro.	66
Figura 47: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de novembro.	67
Figura 48: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de dezembro.	67
Figura 49: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de janeiro.	68
Figura 50: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de fevereiro.	68
Figura 51: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de março.	69
Figura 52: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de abril. .	69
Figura 53: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de maio.	70
Figura 54: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de junho.	70
Figura 55: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de julho..	71
Figura 56: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de agosto.	71
Figura 57: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de setembro.	72
Figura 58: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de outubro.	72

Figura 59: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de novembro.	73
Figura 60: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de dezembro.	73
Figura 61: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de janeiro.	74
Figura 62: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de fevereiro.	74
Figura 63: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de março.	75
Figura 64: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de abril.	75
Figura 65: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de maio.	76
Figura 66: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de junho.	76
Figura 67: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de julho.	77
Figura 68: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de agosto.	77
Figura 69: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de setembro.	78
Figura 70: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de outubro.	78
Figura 71: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de novembro.	79
Figura 72: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de dezembro.	79
Figura 73: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de janeiro.	80
Figura 74: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de fevereiro.	80

Figura 75: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de março.	81
Figura 76: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de abril.	81
Figura 77: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de maio.	82
Figura 78: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de junho.	82
Figura 79: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de julho.	83
Figura 80: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de agosto.	83
Figura 81: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de setembro.	84
Figura 82: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de outubro.	84
Figura 83: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de novembro.	85
Figura 84: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de dezembro.	85
Figura 85: Seção vertical com velocidade zonal média para radial na Bacia de Santos para os meses de janeiro a abril.	86
Figura 86: Seção vertical com velocidade zonal média para radial na Bacia de Santos para os meses de maio a agosto.	87
Figura 87: Seção vertical com velocidade zonal média para radial na Bacia de Santos para os meses de setembro a dezembro.	87
Figura 88: Seção vertical com velocidade zonal média para radial na Bacia de Campos para os meses de janeiro a abril.	88
Figura 89: Seção vertical com velocidade zonal média para radial na Bacia de Campos para os meses de maio a agosto.	88
Figura 90: Seção vertical com velocidade zonal média para radial na Bacia de Campos para os meses de setembro a dezembro.	89

Figura 91: Pontos considerados para apresentação de análise de rosa de correntes e tabela conjunta de direção e intensidade.	90
Figura 92: Rosas mensais de correntes em superfície para o Ponto 1 na Bacia de Santos.	91
Figura 93: Rosas mensais de correntes em 200 metros de profundidade para o Ponto 1 na Bacia de Santos.	92
Figura 94: Rosas de correntes em 500 metros de profundidade para o Ponto 1 na Bacia de Santos.	93
Figura 95: Rosas mensais de correntes em 1.000 metros de profundidade para o Ponto 1 na Bacia de Santos.	94
Figura 96: Rosas mensais de correntes em 2.000 metros de profundidade para o Ponto 1 na Bacia de Santos.	95
Figura 97: Rosas mensais de correntes em superfície para o Ponto 2 na Bacia de Santos.	98
Figura 98: Rosas mensais de correntes em 200 metros de profundidade para o Ponto 2 na Bacia de Santos.	99
Figura 99: Rosas mensais de correntes em 500 metros de profundidade para Ponto 2 na Bacia de Santos.	100
Figura 100: Rosas mensais de correntes em superfície para o Ponto 3 na Bacia de Campos.	102
Figura 101: Rosas mensais de correntes em 200 metros de profundidade para o Ponto 3 na Bacia de Campos.	103
Figura 102: Rosa mensais de correntes em 500 metros de profundidade para o Ponto 3 na Bacia de Campos.	104
Figura 103: Rosa mensais de correntes em 1.000 metros de profundidade para o Ponto 3 na Bacia de Campos.	105
Figura 104: Rosa mensais de correntes em 2.000 metros de profundidade para o Ponto 3 na Bacia de Campos.	106
Figura 105: Campo de corrente do dia 15/05/2013.	109
Figura 106: Campo de corrente do dia 13/06/2013.	110
Figura 107: Campo de corrente do dia 01/12/2013.	110
Figura 108: Localização das estações maregráficas da FEMAR, utilizadas na avaliação da representação da maré no modelo.	113

Figura 109: Comparação para a estação de Vitória – ES. Séries reconstituídas da FEMAR (azul) e do modelo ROMS (vermelha), para todo o período (acima) e em zoom (abaixo).	114
Figura 110: Comparação para a estação de Fundeio 1 Norte – Oceânica . Séries reconstituídas da FEMAR (azul) e do modelo ROMS (vermelha), para todo o período (acima) e em zoom (abaixo).	114
Figura 111: Comparação para a estação de Ilha da Moela. Séries reconstituídas da FEMAR (azul) e do modelo ROMS (vermelha), para todo o período (acima) e em zoom (abaixo).	115
Figura 112: Comparação para a estação de Santa Marta. Séries reconstituídas da FEMAR (azul) e do modelo ROMS (vermelha), para todo o período (acima) e em zoom (abaixo).	115
Figura 113: Comparação para a estação de Torres. Séries reconstituídas da FEMAR (azul) e do modelo ROMS (vermelha), para todo o período (acima) e em zoom (abaixo).	116
Figura 114: TSM média de janeiro (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de <i>bias</i> (Dado – Modelo).	118
Figura 115: TSM média de fevereiro (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de <i>bias</i> (Dado – Modelo).	119
Figura 116: TSM média de março (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de <i>bias</i> (Dado – Modelo).	120
Figura 117: TSM média de abril (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de <i>bias</i> (Dado – Modelo).	121
Figura 118: TSM média de maio (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de <i>bias</i> (Dado – Modelo).	122
Figura 119: TSM média de junho (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de <i>bias</i> (Dado – Modelo).	123
Figura 120: TSM média de julho (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de <i>bias</i> (Dado – Modelo).	124
Figura 121: TSM média de agosto (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de <i>bias</i> (Dado – Modelo).	125
Figura 122: TSM média de setembro (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de <i>bias</i> (Dado – Modelo).	126

Figura 123: TSM média de outubro (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de <i>bias</i> (Dado – Modelo).	127
Figura 124: TSM média de novembro (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de <i>bias</i> (Dado – Modelo).	128
Figura 125: TSM média de dezembro (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de <i>bias</i> (Dado – Modelo).	129
Figura 126: Série de TSM do OSTIA e do ROMS e do <i>bias</i> (dado – modelo) no Ponto 1, na Bacia de Santos.	131
Figura 127: Série de TSM do OSTIA e do ROMS e do <i>bias</i> (dado – modelo) no Ponto 2, na Bacia de Santos.	131
Figura 128: Série de TSM do OSTIA e do ROMS e do <i>bias</i> (dado – modelo) no Ponto 3, na Bacia de Campos.	132
Figura 129: Localização dos pontos de grade do ROMS utilizados para as comparações com o WOA.	134
Figura 130: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 1.	135
Figura 131: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 1.	136
Figura 132: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 2.	136
Figura 133: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 2.	137
Figura 134: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 3.	137
Figura 135: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 3.	138
Figura 136: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 4.	138
Figura 137: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 4.	139
Figura 138: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 5.	139

Figura 139: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 5.	140
Figura 140: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 6.	140
Figura 141: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 6.	141
Figura 142: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 7.	141
Figura 143: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 7.	142
Figura 144: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 8.	142
Figura 145: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 8.	143
Figura 146: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 9.	143
Figura 147: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 9.	144
Figura 148: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 10.	144
Figura 149: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 10.	145
Figura 150: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 11.	145
Figura 151: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 11.	146
Figura 152: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 12.	146
Figura 153: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 12.	147
Figura 154: Representação esquemática dos mecanismos de controle de flutuabilidade, <i>pitch</i> e <i>roll</i> do Seaglider. Adaptada de IROBOT (2012) em Boechat (2015).	148

Figura 155: Localização dos perfis de temperatura e salinidade coletados por <i>glider</i> nas proximidades da radial Maricá (pontos em preto), e pontos de grade do ROMS (pontos em vermelho) de onde foram extraídos os dados para comparação.	149
Figura 156: Faixa de ocorrência de 95% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) – acima – e <i>bias</i> médio anual – abaixo.....	152
Figura 157: Trajetória descrita pelo derivador 01 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 01 e os resultados do ROMS (direita).	153
Figura 158: Trajetória descrita pelo derivador 02 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 02 e os resultados do ROMS (direita).	154
Figura 159: Trajetória descrita pelo derivador 03 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 03 e os resultados do ROMS (direita).	154
Figura 160: Trajetória descrita pelo derivador 04 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 04 e os resultados do ROMS (direita).	154
Figura 161: Trajetória descrita pelo dor 05 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 05 e os resultados do ROMS (direita).	155
Figura 162: Trajetória descrita pelo derivador 06 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 06 e os resultados do ROMS (direita).	155
Figura 163: Trajetória descrita pelo derivador 07 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 07 e os resultados do ROMS (direita).	155
Figura 164: Trajetória descrita pelo derivador 08 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 08 e os resultados do ROMS (direita).	156
Figura 165: Trajetória descrita pelo derivador 09 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 09 e os resultados do ROMS (direita).	156
Figura 166: Trajetória descrita pelo derivador 10 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 10 e os resultados do ROMS (direita).	156
Figura 167: Trajetória descrita pelo derivador 11 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 11 e os resultados do ROMS (direita).	157
Figura 168: Trajetória descrita pelo derivador 12 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 12 e os resultados do ROMS (direita).	157
Figura 169: Trajetória descrita pelo derivador 13 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 13 e os resultados do ROMS (direita).	157

Figura 170: Trajetória descrita pelo derivador 14 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 14 e os resultados do ROMS (direita).	158
Figura 171: Trajetória descrita pelo derivador 15 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 15 e os resultados do ROMS (direita).	158
Figura 172: Trajetória descrita pelo derivador 16 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 16 e os resultados do ROMS (direita).	158
Figura 173: Trajetória descrita pelo derivador 17 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 17 e os resultados do ROMS (direita).	159
Figura 174: Trajetória descrita pelo derivador 18 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 18 e os resultados do ROMS (direita).	159
Figura 175: Trajetória descrita pelo derivador 19 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 19 e os resultados do ROMS (direita).	159
Figura 176: Trajetória descrita pelo derivador 20 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 20 e os resultados do ROMS (direita).	160
Figura 177: Trajetória descrita pelo derivador 21 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 21 e os resultados do ROMS (direita).	160
Figura 178: Trajetória descrita pelo derivador 22 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 22 e os resultados do ROMS (direita).	160
Figura 179: Trajetória descrita pelo derivador 23 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 23 e os resultados do ROMS (direita).	161
Figura 180: Trajetória descrita pelo derivador 24 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 24 e os resultados do ROMS (direita).	161
Figura 181: Trajetória descrita pelo derivador 25 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 25 e os resultados do ROMS (direita).	161

Índice das tabelas

Tabela 1: Parâmetros e constantes utilizadas no modelo hidrodinâmico	24
Tabela 2: Lista das cartas náuticas digitalizadas.....	31
Tabela 3: Percentual de ocorrência sazonal de intensidade de correntes no Ponto 1 na Bacia de Santos.....	96
Tabela 4: Percentual (%) de ocorrência de intensidade de correntes no Ponto 2 na Bacia de Santos.....	101
Tabela 5: Percentual (%) de ocorrência de intensidade de correntes no Ponto 3 na Bacia de Campos.....	107
Tabela 6: Comparação estatística entre as séries maregráficas do modelo ROMS e da FEMAR. Apresentam-se os índices Erro Médio Absoluto (EMA) e coeficiente de correlação linear de Pearson (p).	117
Tabela 7: Valores de bias de TSM (°C) mínimo, médio e máximo.	132
Tabela 8: Valores de <i>bias</i> médio anual de temperatura e salinidade para os 12 pontos selecionados no domínio.	147
Tabela 9: Posição e datas iniciais e finais de cada derivador ao longo do período de comparação.	152
Tabela 10: Índice de Wilmot e bias da velocidade (m/s) das comparações modelo/derivadores.	163
Tabela 11: Estimativas para o transporte de volume e para a velocidade máxima da CB entre 21°S e 24°S. Sinais negativos representam a direção sul-sudoeste da corrente. Adaptada de Silveira (2007).	164

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

Assinatura: 

Nome: Felipe Lobo Mendes Soares

Registro no Conselho de Classe: -

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

Assinatura: 

Nome: Henery Ferreira Garção

Registro no Conselho de Classe: -

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

Assinatura: 

Nome: Gabriel Vieira de Carvalho

Registro no Conselho de Classe: -

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 5416625

Assinatura: 

Nome: Marcelo Montenegro Cabral

Registro no Conselho de Classe: 2010110225 - CREA/RJ

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

Assinatura: 

1. Introdução

O presente relatório descreve os resultados obtidos na modelagem numérica hidrodinâmica para a região das Bacias do Espírito Santo, Campos, Santos e Pelotas para subsidiar estudos de dispersão de poluentes (e.g. óleo, cascalho, fluidos de perfuração, água de produção) no mar para os cenários acidentais de vazamento. Este estudo consiste na análise das características meteorológicas e simulações hidrodinâmicas da região, mais especificamente dos parâmetros capazes de afetar o comportamento de poluentes lançados/derramados.

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

A capacidade de simular diferentes condições, aliada à obtenção de resultados sinóticos em quatro dimensões (as três do espaço e o tempo), faz da fluidodinâmica computacional uma opção interessante, e em determinados casos, como em regiões com pouca ou nenhuma medição, a única para obter os resultados necessários à modelagem de transporte de materiais no oceano. É imprescindível, no entanto, a realização de comparações dos resultados obtidos pelo modelo hidrodinâmico com dados observados na região, para se obter uma medida da representatividade do modelo em relação ao observado.

2. Modelo Numérico Utilizado

Para as simulações hidrodinâmicas na região 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.*, 2005) 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:

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

Equação da conservação da quantidade de movimento na direção zonal:

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

Equação da conservação da quantidade de movimento na direção meridional:

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

Equação da conservação de calor:

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

Equação da conservação de sal:

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

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 1.

Tabela 1: Parâmetros e constantes utilizadas no modelo hidrodinâmico.

Parâmetro	Valor	Descrição
TNU2 (m⁴/s)	0,0	Operador bi-harmônico de difusão horizontal de traçadores
VISC2 (m²/s)	5,0	Coefficiente de viscosidade horizontal
AKT_BAK (m²/s)	1,0x10 ⁻⁶	Coefficiente vertical de mistura para traçadores
AKV_BAK (m²/s)	1,0x10 ⁻⁵	Coefficiente vertical de mistura de momentum
AKK_BAK (m²/s)	5,0x10 ⁻⁶	Coefficiente vertical de mistura para energia cinética turbulenta
AKP_BAK (m²/s)	5,0x10 ⁻⁶	Coefficiente vertical de mistura para campos estatísticos genéricos turbulentos
RDRG2	3,0x10 ⁻³	Coefficiente quadrático de atrito com o fundo
ZOS (m)	2,0x10 ⁻²	Rugosidade da superfície
DT (s)	300	Passo de tempo baroclínico
NDTFAST (s)	8,57	Passo de tempo barotrópico
GAMMA2	1	Parâmetro de deslizamento

3. Domínio do Modelo

Para simular a hidrodinâmica da região foi projetada uma grade numérica (Figura 1), que se estende de 39,0° S a 14,0° S, e 60,0° W a 25,0° W. O domínio da grade abrange a costa leste brasileira desde a metade do estado da Bahia até o final do Rio Grande do Sul. Além disso, ela se prolonga ainda mais ao sul, terminando logo após a cidade de Mar del Plata, na Argentina. A grade engloba a plataforma continental, o talude e parte das bacias oceânicas adjacentes.

A resolução da grade é de $1/16^\circ$ (~ 6 km) e foi escolhida tanto para que as principais feições batimétricas e da linha de costa pudessem ser reproduzidas de forma satisfatória (Figura 2) como para permitir um desempenho computacional compatível. Essa escolha resultou em uma grade com 254.694 pontos em cada nível horizontal (camada sigma), com 30 níveis verticais (camadas sigma).

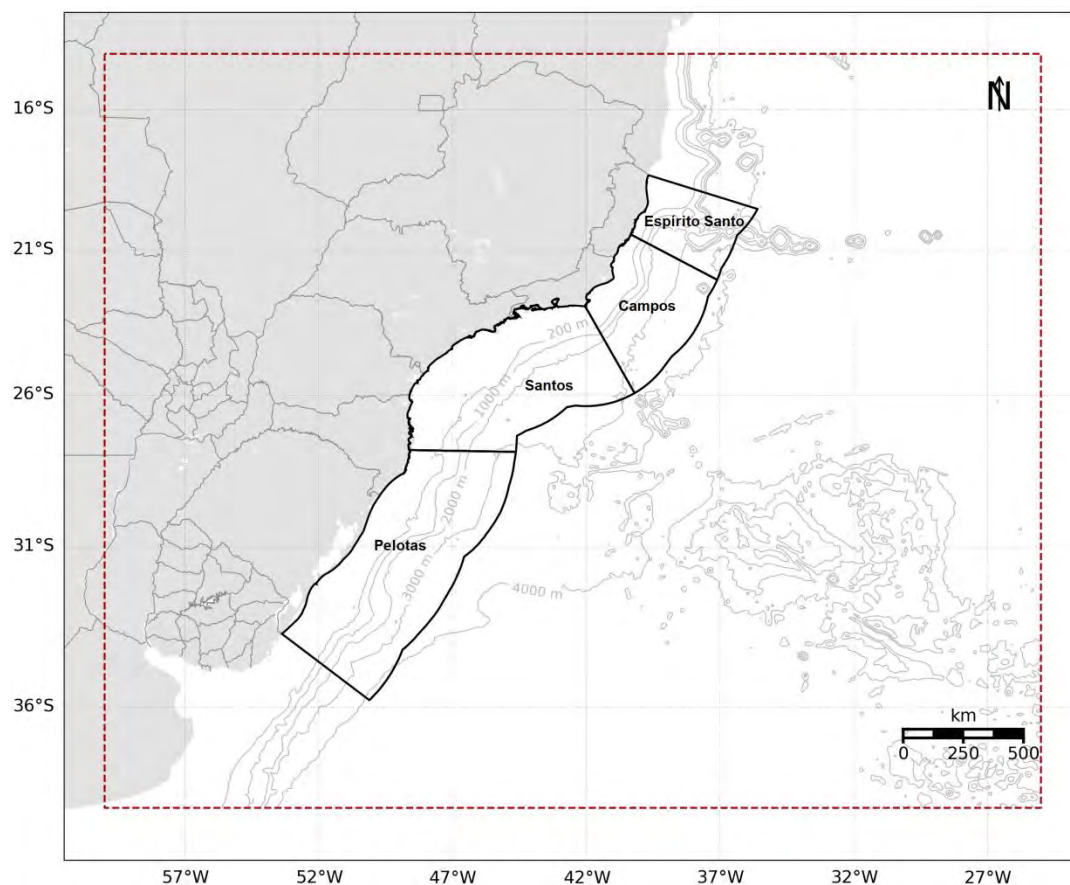


Figura 1: Região de modelagem. Polígono vermelho pontilhado representa os limites da grade do modelo hidrodinâmico.

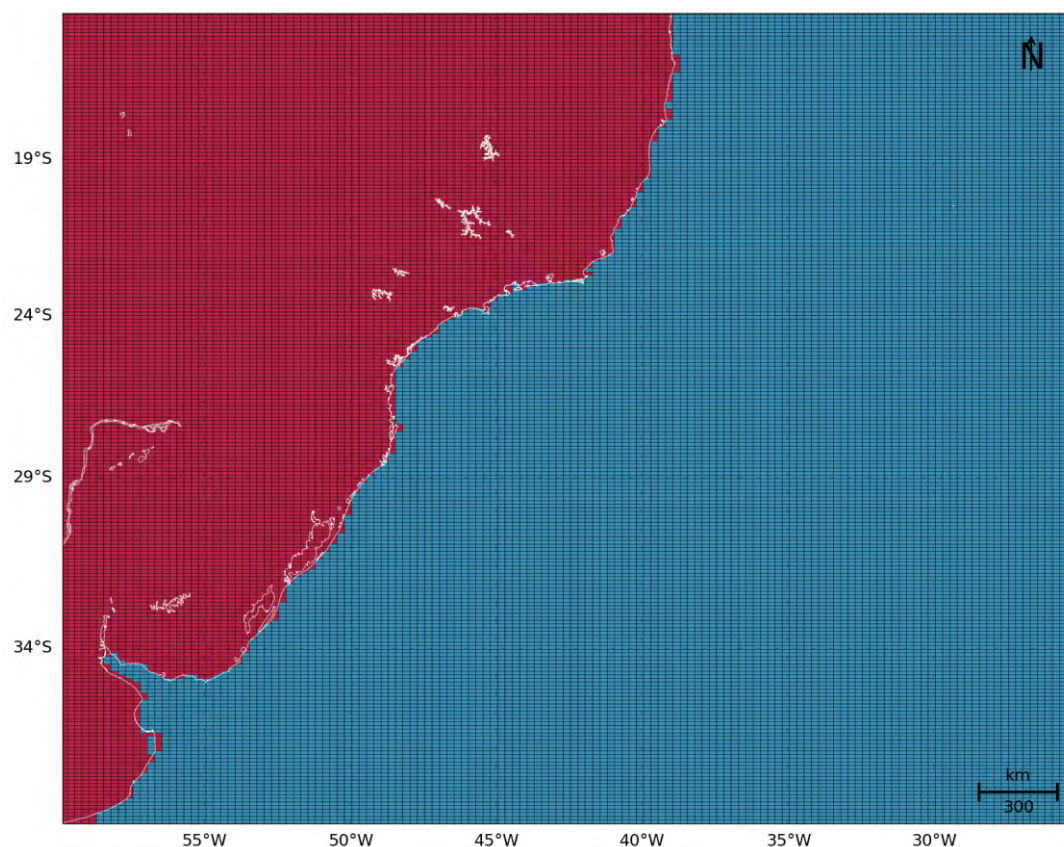


Figura 2: Detalhamento da representação da linha de costa pela grade do modelo hidrodinâmico. Os retângulos em vermelho representam as células consideradas como terra pelo modelo e a linha branca mostra a linha de costa da região.

4. Condições Iniciais

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

Como condição inicial e de contorno para o sistema de previsão oceânica referente a região de estudo foram utilizados os dados de temperatura, salinidade, altura da superfície do mar e de correntes da Análise Global do Mercator. Este projeto disponibiliza, semanalmente, os resultados da análise e previsão oceânica global por um período de 14 dias, com resolução espacial de $1/12^\circ$ e temporal de 24 h. O modelo oceânico global utilizado no Mercator 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 Mercator, 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 (Mercator) 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 Mercator fornecidos ao modelo são apresentados da Figura 3 à Figura 6.

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

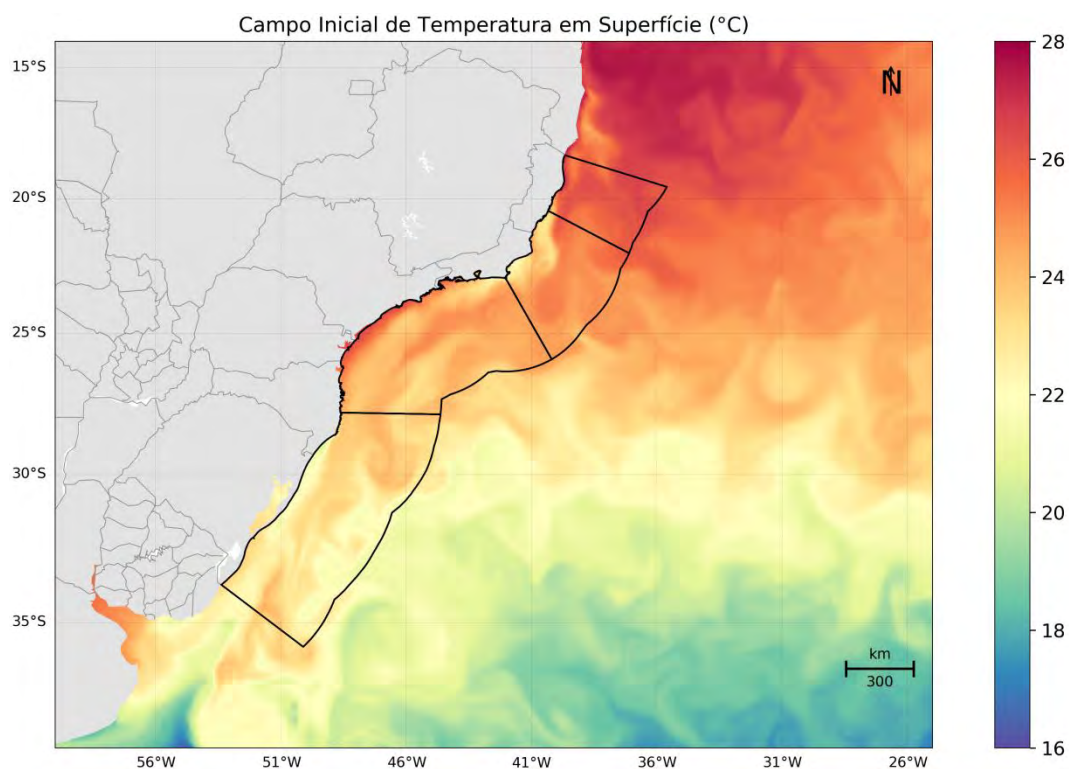


Figura 3: Campo de temperatura superficial do Mercator (°C) no dia 1º de janeiro de 2012 interpolado para a grade do ROMS.

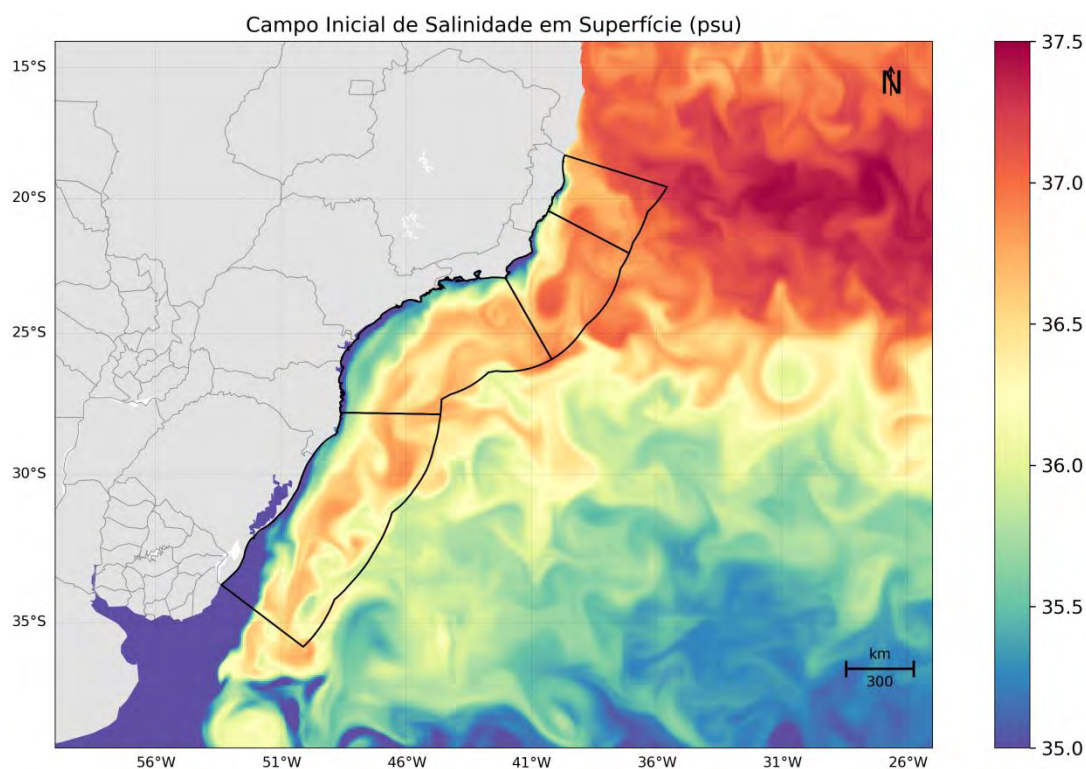


Figura 4: Campo de salinidade superficial do Mercator (°C) no dia 1º de janeiro de 2012 interpolado para a grade do ROMS.

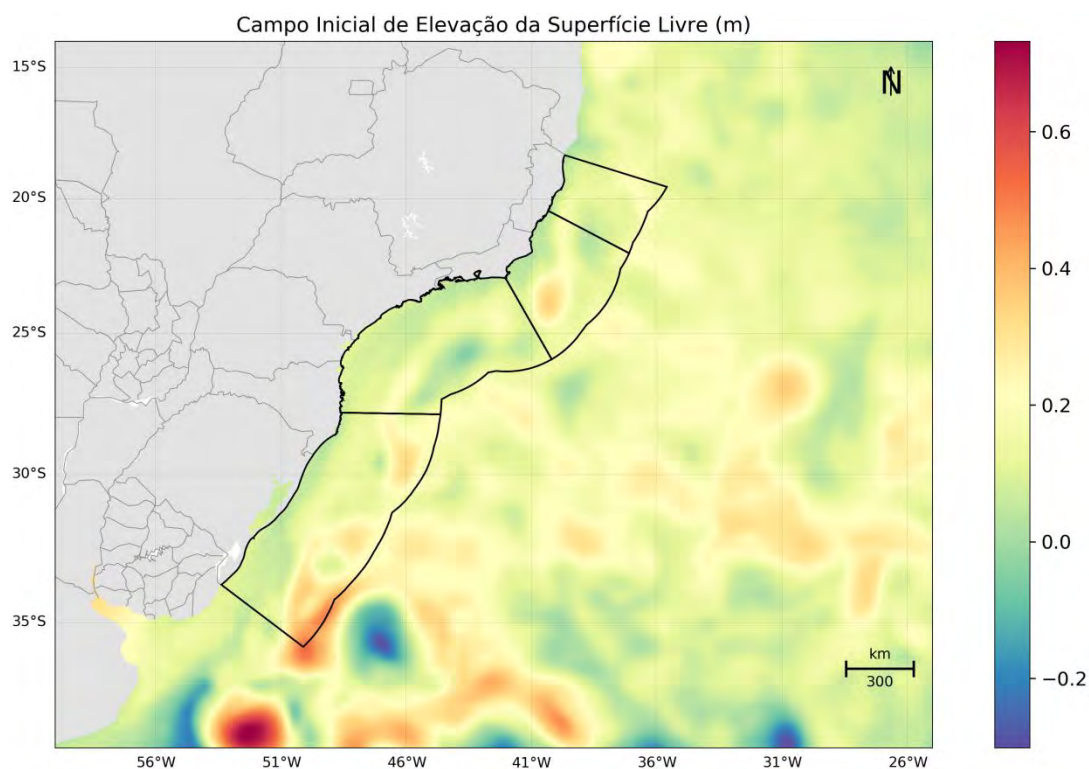


Figura 5: Campo de Elevação da Superfície Livre (m) do Mercator (°C) no dia 1º de janeiro de 2012 interpolado para a grade do ROMS.

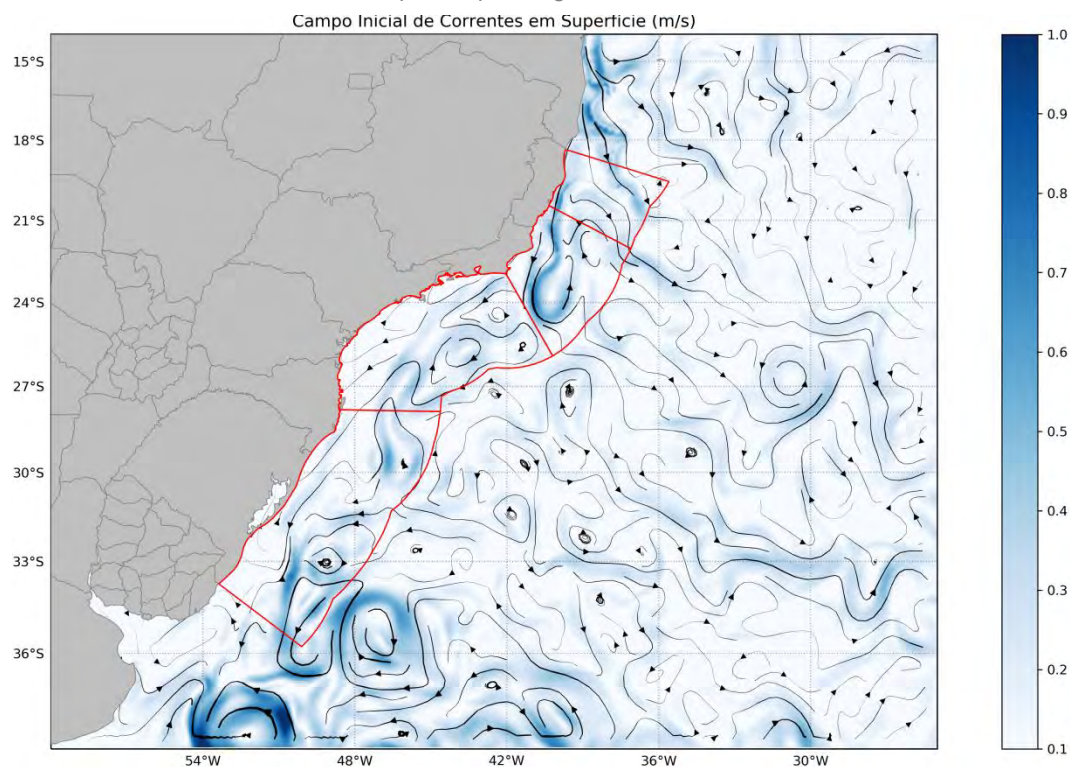


Figura 6: Campo de Correntes superficiais (m/s) do Mercator (°C) no dia 1º de janeiro de 2012 interpolado para a grade do ROMS.

5. Condições de Contorno

Quando se utiliza um modelo de área limitada, como é o caso do ROMS, um dos fatores primordiais é uma escolha adequada das condições de contorno do modelo (Figura 7). Tal escolha deve ser realizada com bastante critério, uma vez que os resultados serão consequência das condições escolhidas.

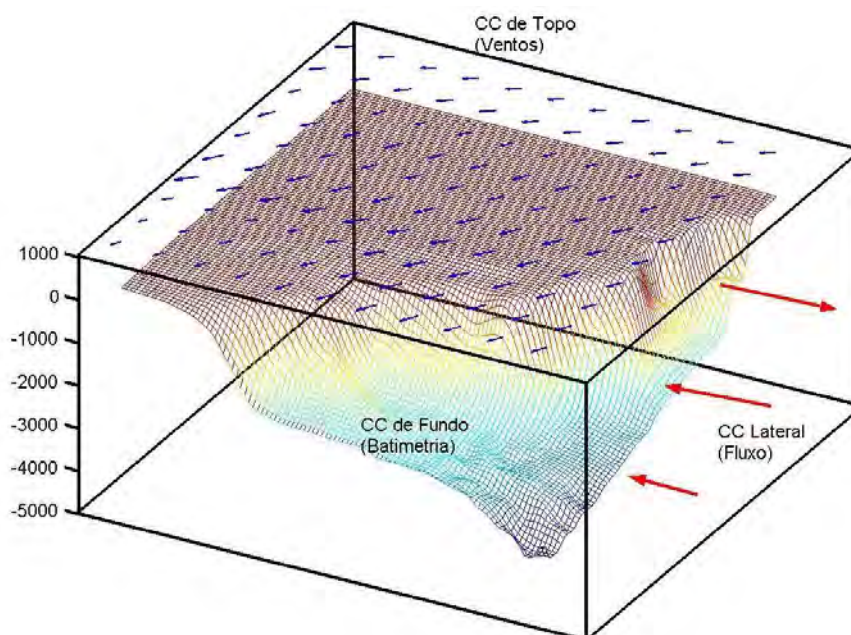


Figura 7: Representação esquemática das condições de contorno a serem definidas em um modelo de área limitada.

5.1. Condição de Contorno de Fundo

Para a confecção da matriz de batimetria da grade do modelo, foram utilizados dados obtidos através de digitalização de cartas náuticas e da base global ETOPO1 (AMANTE & EAKINS, 2009). O ETOPO1 é um modelo global do relevo da superfície terrestre, com resolução espacial de 1 minuto de arco, que integra topografia e batimetria do oceano. As cartas náuticas digitalizadas (Tabela 2) foram obtidas através do site da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Após interpolação cúbica, obteve-se a matriz de topografia do fundo para a grade utilizada no modelo hidrodinâmico (Figura 8).

Tabela 2: Lista das cartas náuticas digitalizadas.

Número	Região
B1300	Da Ponta de Cumuruxatiba ao Rio Doce
B1400	Do Rio Doce ao Cabo de São Tomé
B1401	Portos de Vitória e Tubarão
B1410	Área adjacente aos Portos de Vitória e Tubarão
B1500	Do Cabo de São Tomé ao Rio de Janeiro
B1508	Do Cabo Frio à Ponta Negra
B1506	Proximidades da Baía de Guanabara
B1600	Do Rio de Janeiro à Ilha de São Sebastião
B1700	Da Ilha de São Sebastião à Ilha do Bom Abrigo
B1800	Da Ilha do Bom Abrigo à Ilha do Arvoredo
B1900	Da Ilha do Arvoredo à Torres

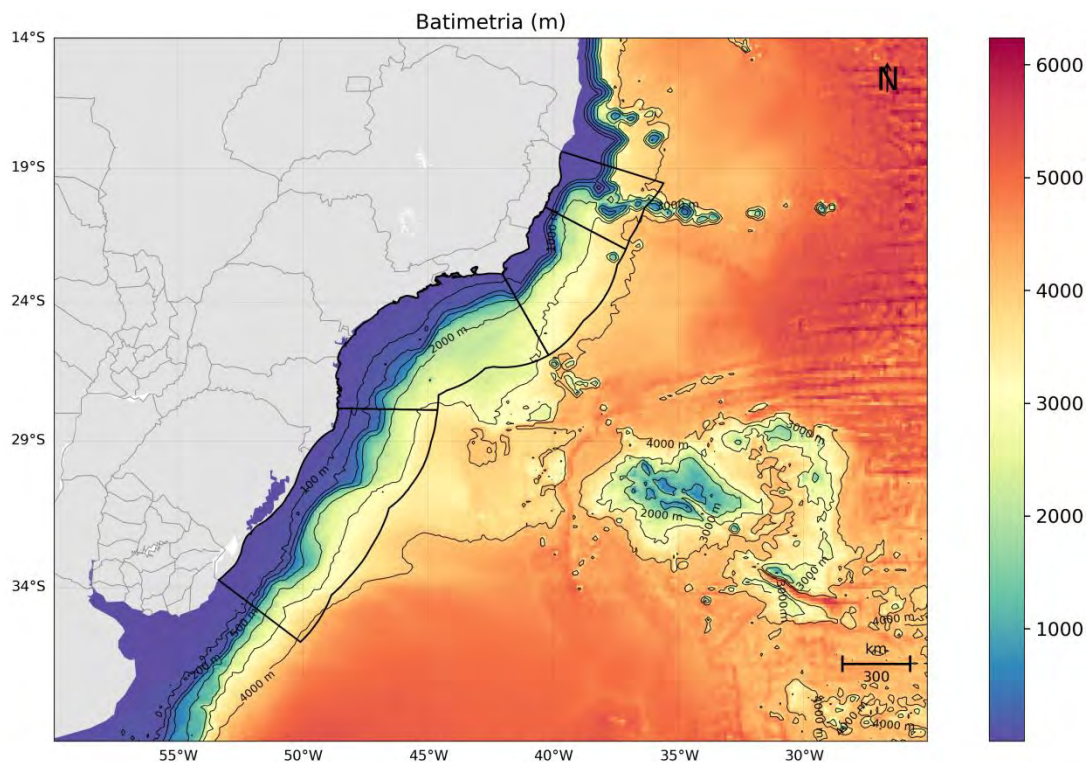


Figura 8: Batimetria da grade do modelo numérico ROMS.

5.2. Condição de Contorno de Superfície

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

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

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

Estes campos foram obtidos através do projeto ERA5, a última geração da Reanálise do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) e a primeira produzida como serviço operacional, com resolução temporal horária e espacial de 31 km em 137 níveis atmosféricos, desde a superfície a 0.01 hPa.

As Reanálises climáticas do ECMWF começaram com o FGGE na década de 1980, seguida pelo ERA-15, ERA-40 e mais recentemente pelo ERA-Interim. Atualmente, o ERA5 apresenta dados desde 2010 e planeja disponibilizar as reanálises a partir de 1950 no primeiro trimestre de 2019.

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 oito variáveis meteorológicas necessárias para forçar o ROMS.

Como exemplo dos campos atmosféricos utilizados como condição de contorno de topo do modelo, da Figura 9 à Figura 15, são apresentados os campos médios de cada variável, calculados para o período sazonais identificados para a região: Período 1, de setembro a fevereiro, e Período 2, março a agosto. Essa divisão em dois cenários foi feita a partir da observação das informações de ventos e correntes da região das bacias.

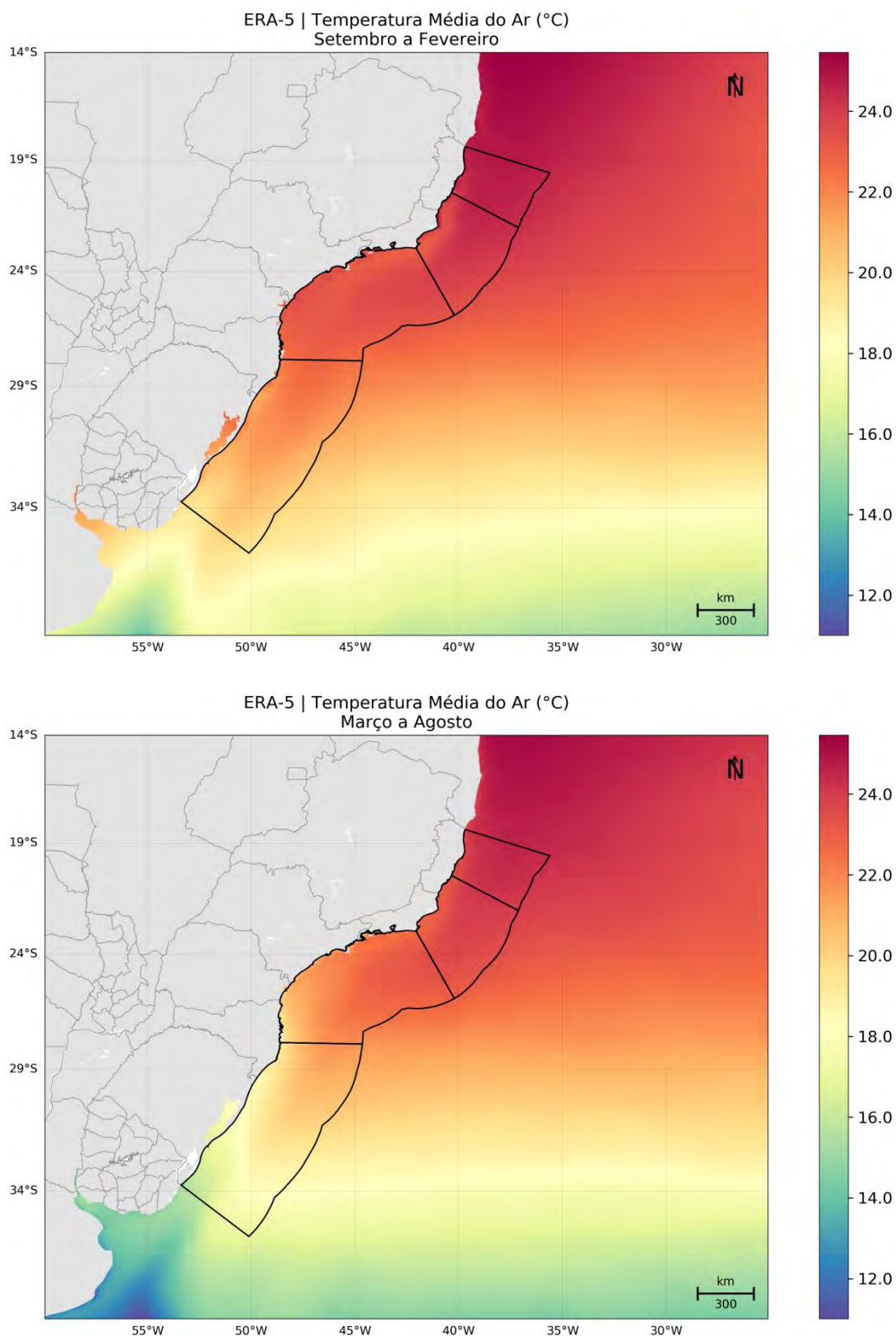


Figura 9: Campo médio dos dados de temperatura do ar a 2 m do ERA5 utilizados como forçante para o período 1 (superior) e para o período 2 (inferior).

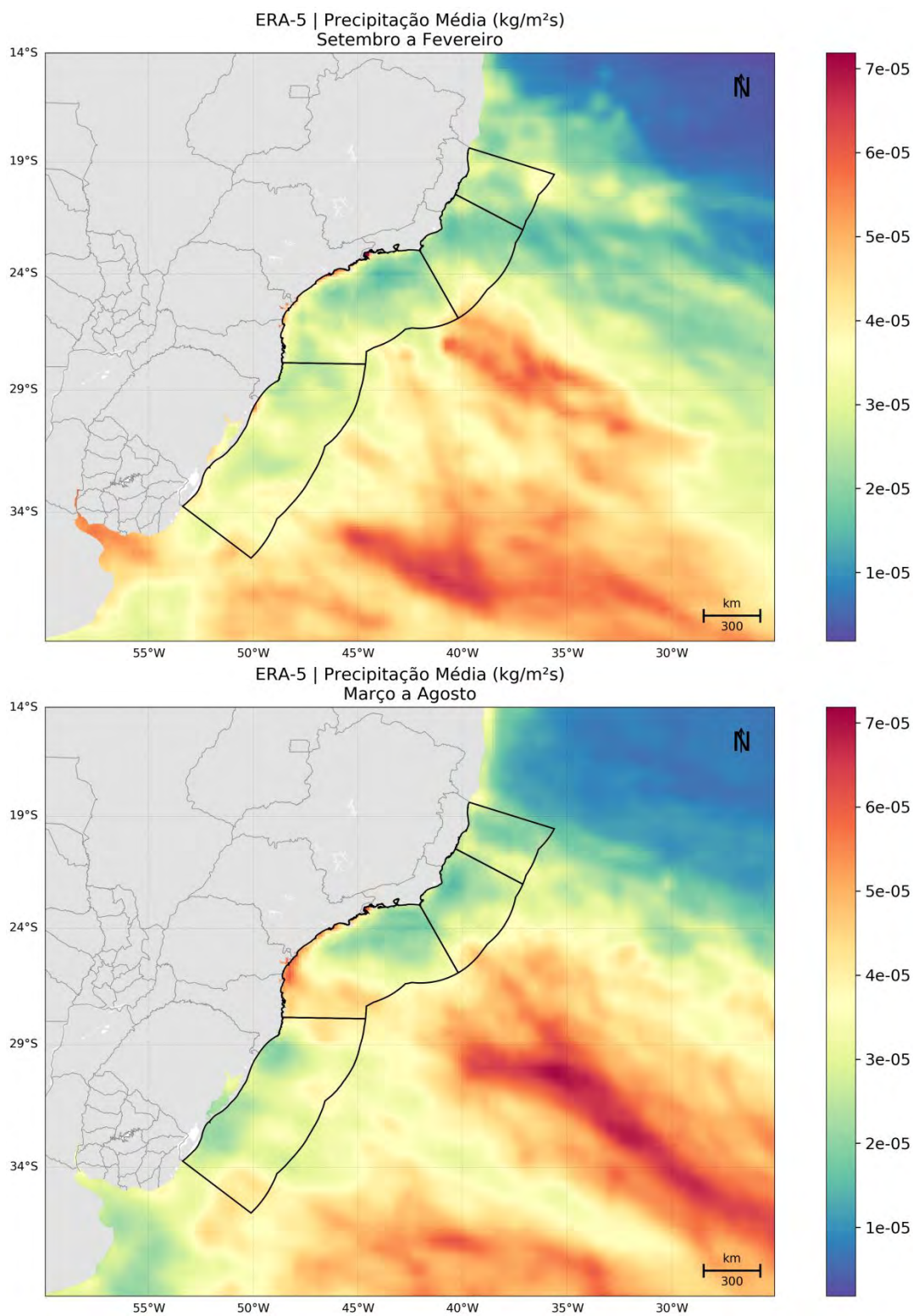


Figura 10: Campo médio dos dados de precipitação do ERA5 utilizados como forçante para o período 1 (superior) e para o período 2 (inferior).

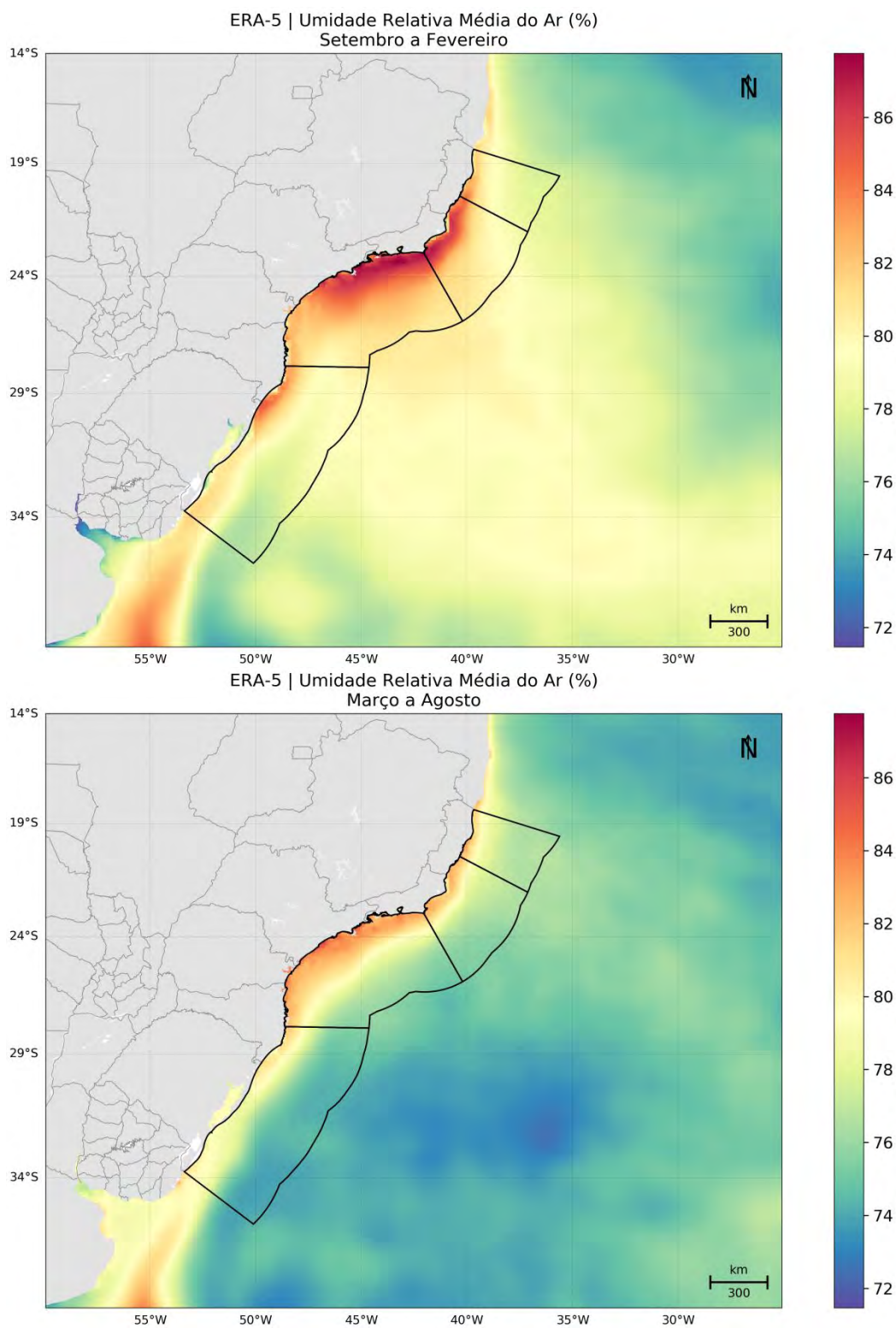


Figura 11: Campo médio dos dados de umidade relativa do ar do ERA5 utilizados como forçante para o período 1 (superior) e para o período 2 (inferior).

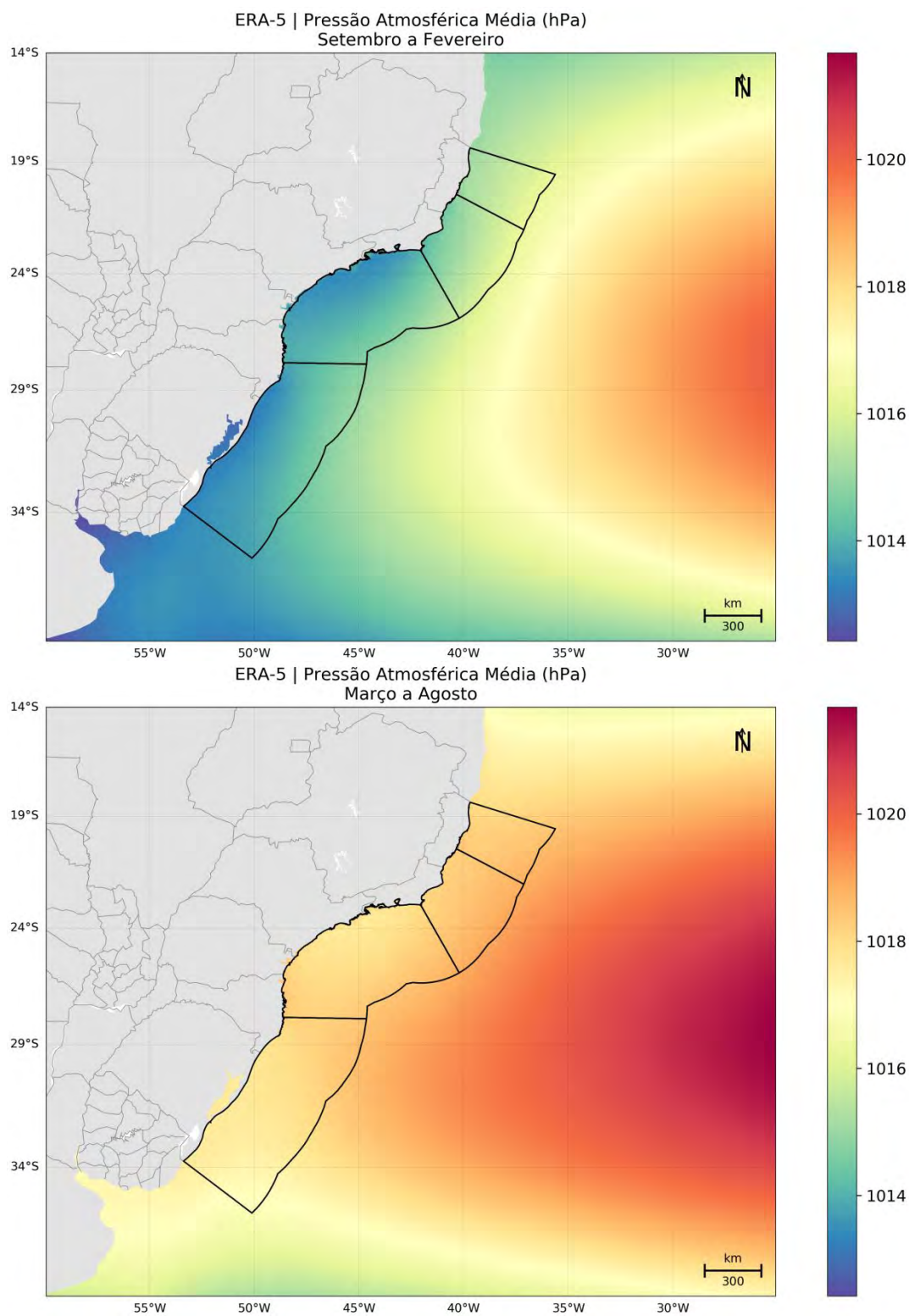


Figura 12: Campo médio dos dados de pressão atmosférica do ERA5 utilizados como forçante para o período 1 (superior) e para o período 2 (inferior).

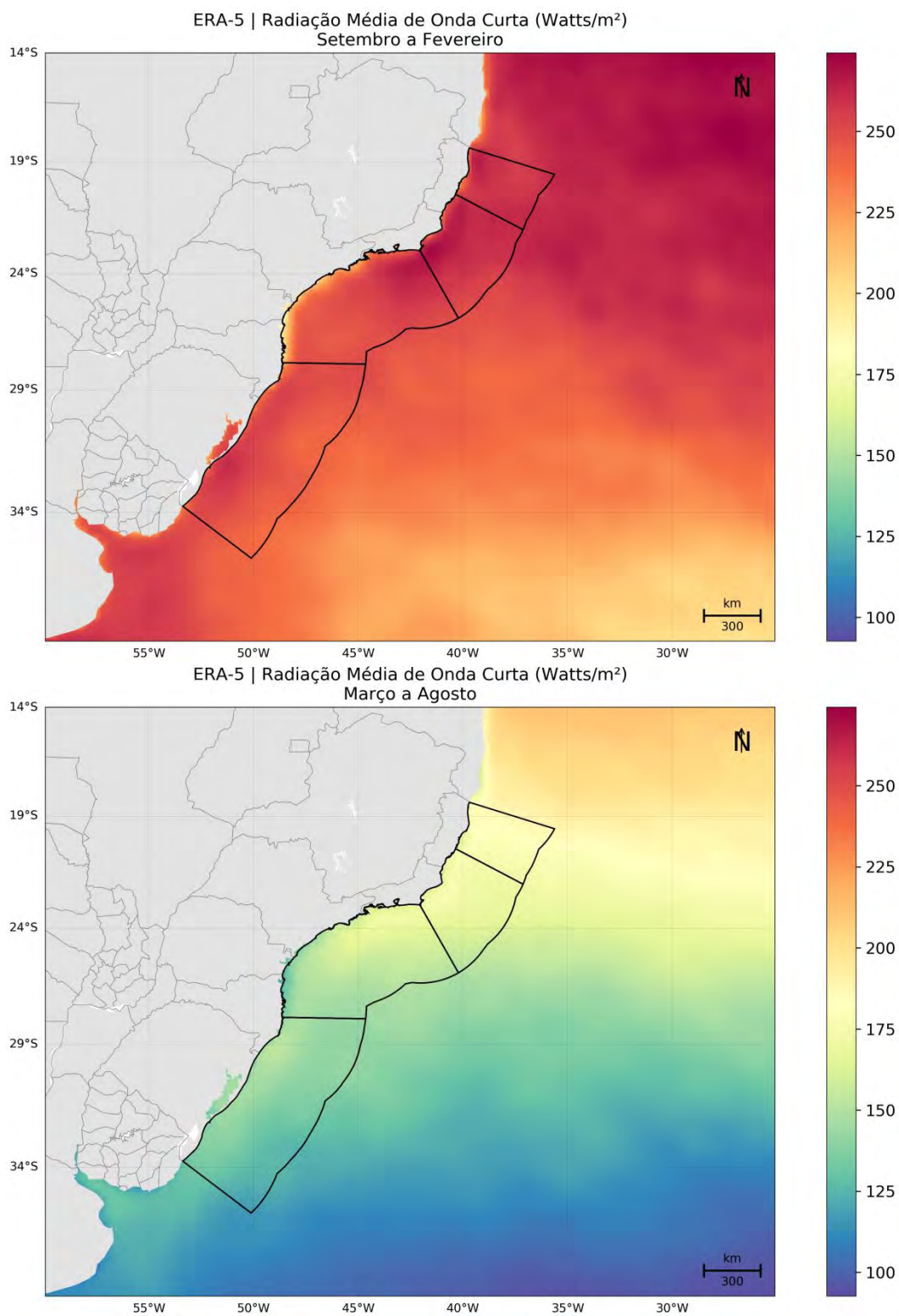


Figura 13: Campo médio dos dados de radiação de onda curta do ERA5 utilizados como forçante para o período 1 (superior) e para o período 2 (inferior).

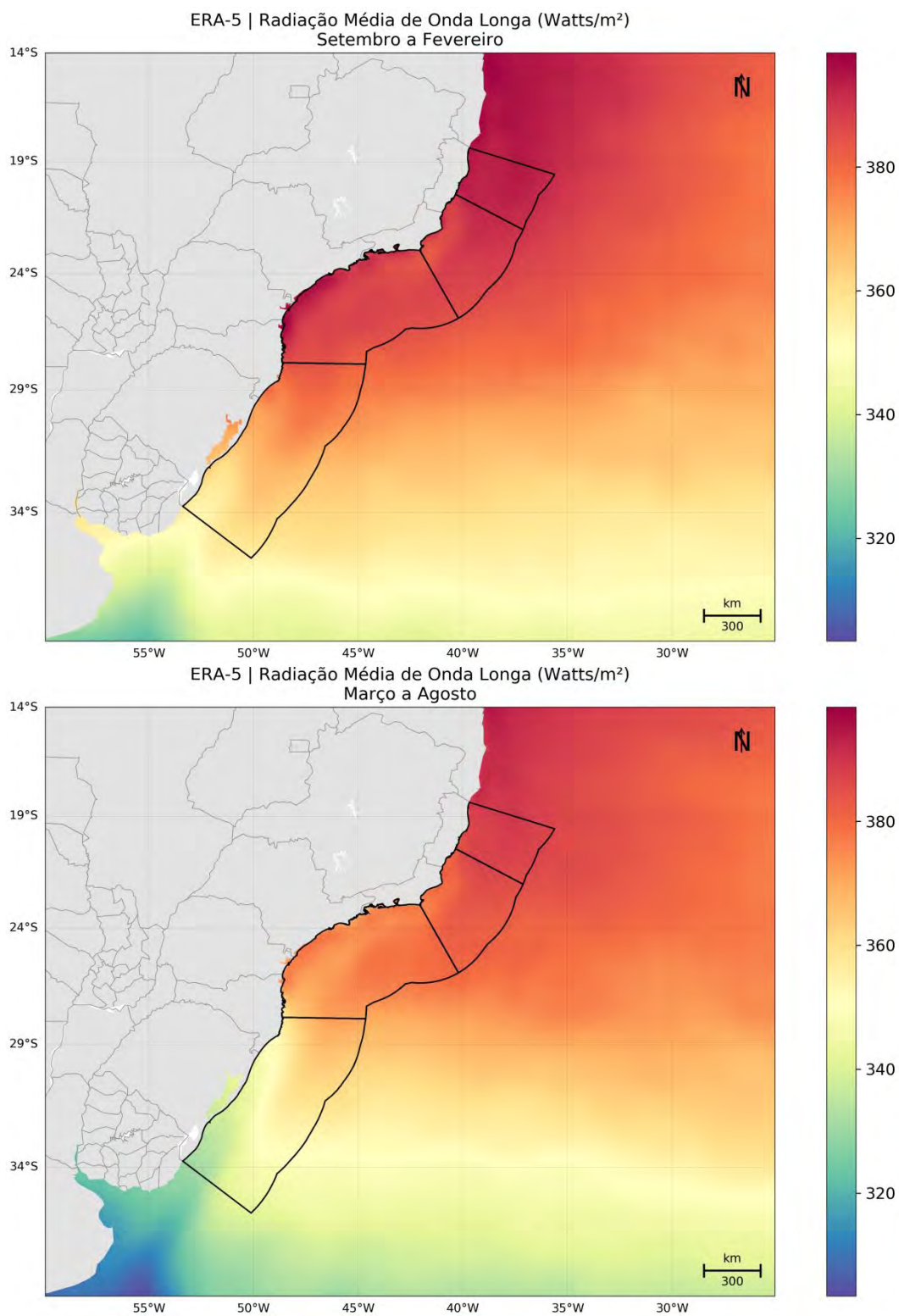


Figura 14: Campo médio dos dados de radiação de onda longa do ERA5 utilizados como forçante para o período 1 (superior) e para o período 2 (inferior).

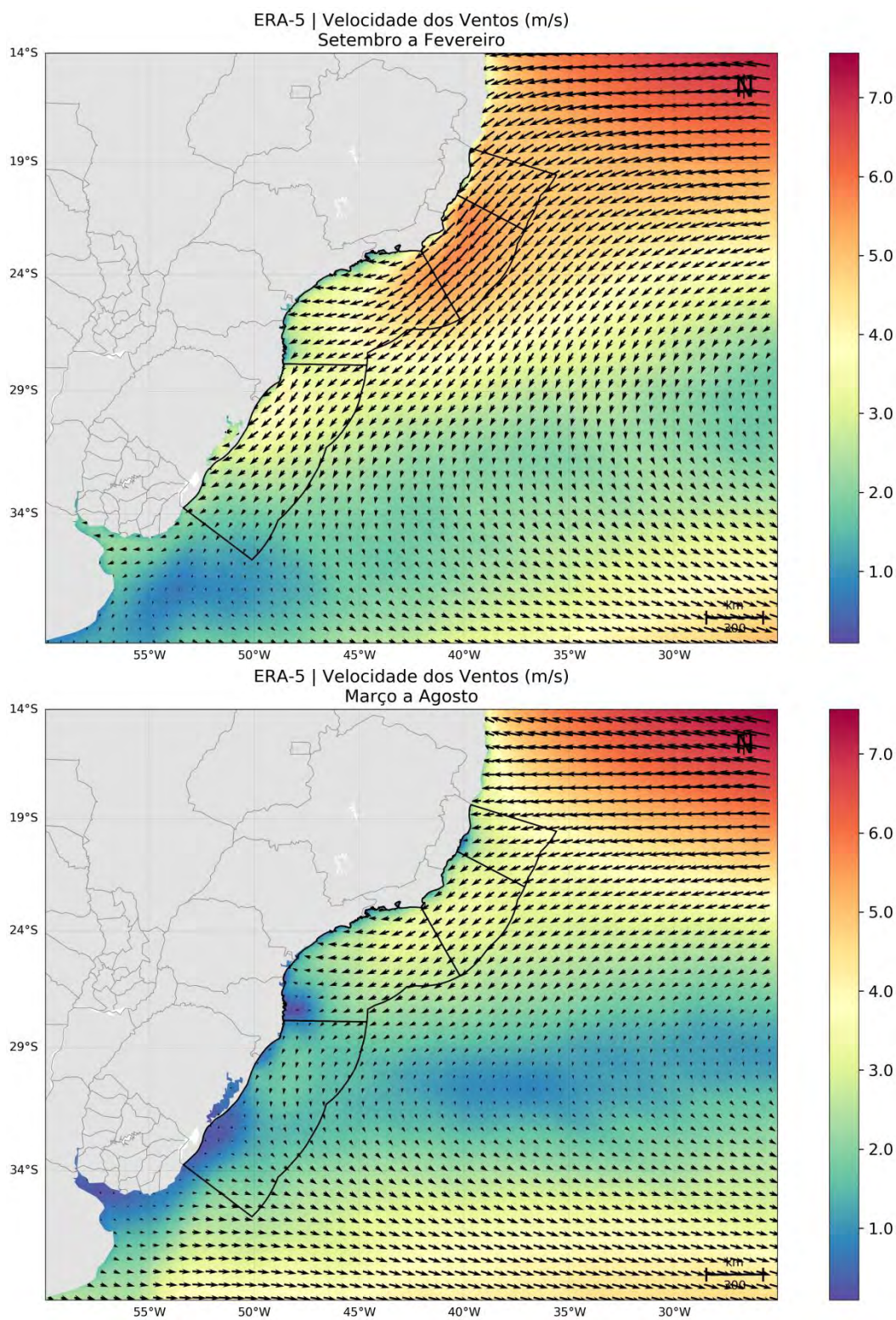


Figura 15: Campo médio dos dados de vento do ERA5 utilizados como forçante para o período 1 (superior) e para o período 2 (inferior).

5.3. Condição de Contorno Laterais

O modelo possui três fronteiras abertas (norte, leste e sul) e uma fechada (oeste). 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. Uma vez que é impossível que se tenha séries temporais coletadas *in situ* de todos os parâmetros oceanográficos necessários para a modelagem ao longo de todo o contorno, a opção mais viável é a utilização de resultados de modelos globais. Nesse caso, foram utilizados os resultados do Mercator (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 Mercator 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.

A escolha da utilização dos resultados do modelo global Mercator como condições de contorno é baseada na capacidade de representação dos processos de mesoescala. Em Lellouche *et al.* (2019) é discutido a qualidade do sistema global Mercator utilizando avaliação das variáveis físicas do oceano com base nos resultados gerados para o ano de 2015. De uma forma geral, no que tange temperatura e salinidade, os resultados mostraram boa capacidade de representação dos sistemas de massas de água e os desvios (ou viés, do inglês *bias*) em comparação com observações *in situ* raramente excederam 0,5 K e 0,1 psu. Já para as correntes superficiais, as subestimações que ocorrem principalmente nas regiões de latitudes médias, alcançando valores de 20% de subestimação em regiões de correntes intensas. Tais resultados comparativos demonstra aptidão do uso desses dados de modelagem como condição de contorno do modelo regional.

5.4. Maré

Para simular o efeito da elevação do nível do mar no domínio de modelagem, foram utilizadas as constantes harmônicas do modelo global de marés TPX08 V1 (EGBERT; EROFEEVA, 2002). Este modelo possui resolução de $1/30^\circ$ e utiliza dados do satélite altimétrico TOPEX/POSEIDON como fonte primária para assimilação.

A seguir, da Figura 16 à Figura 23, são apresentados os campos de amplitude e fase das oito primeiras constantes harmônicas do TPX08 fornecidas ao modelo para o cálculo da elevação de maré, ressaltando que o ROMS utiliza apenas os dados nos contornos como forçante.

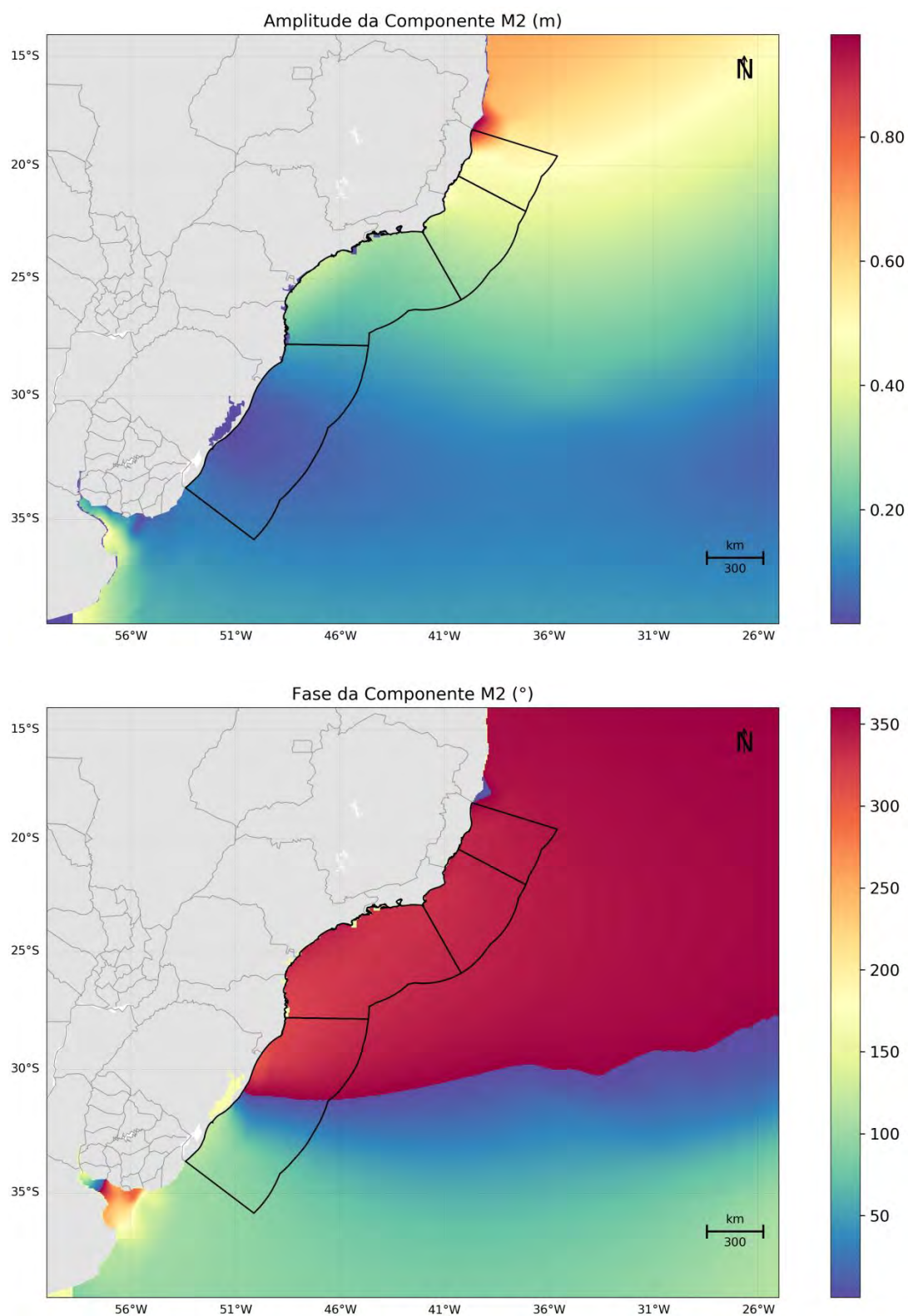


Figura 16: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente M2. Fonte: TPX08.

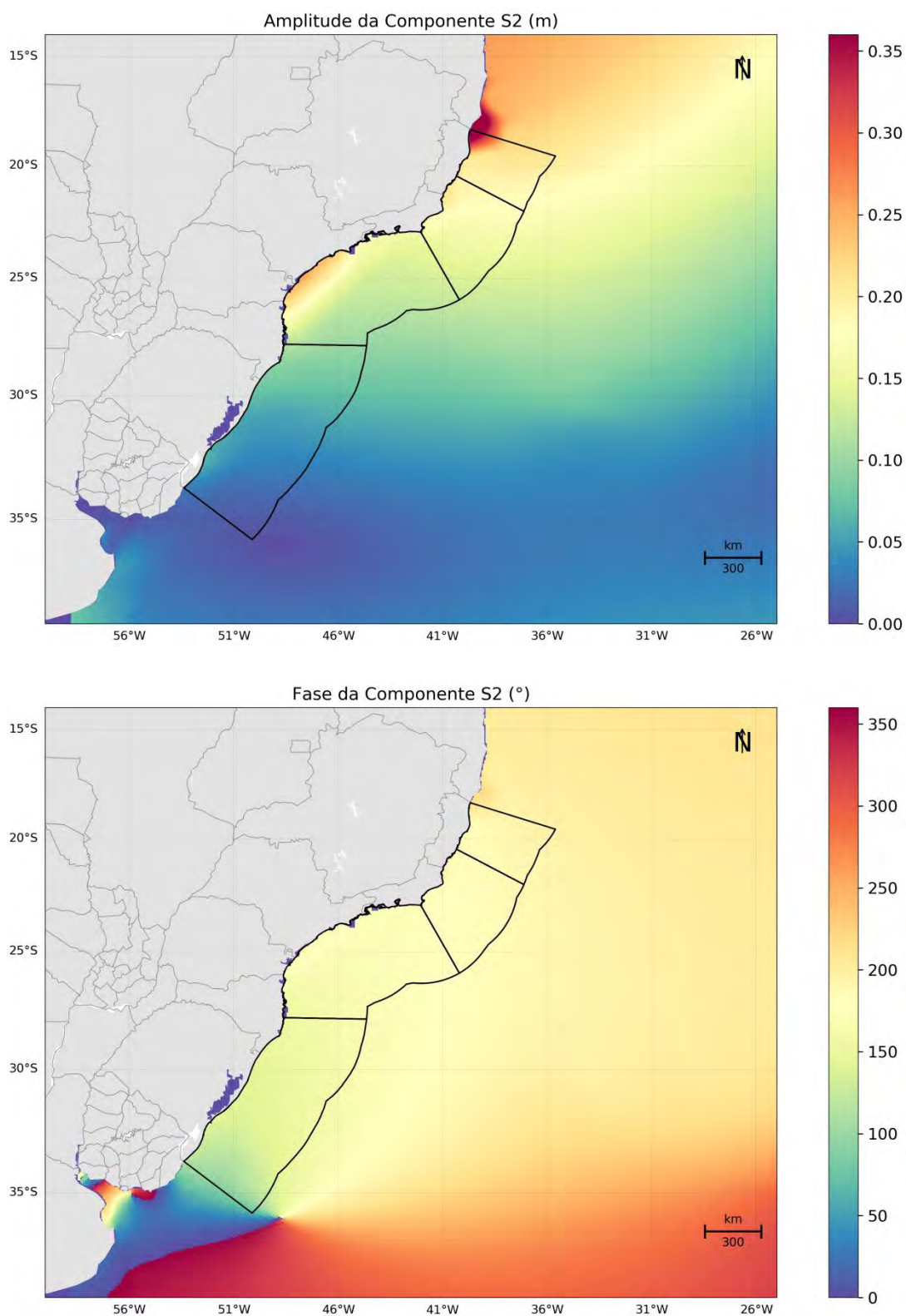


Figura 17: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente S2. Fonte: TPX08.

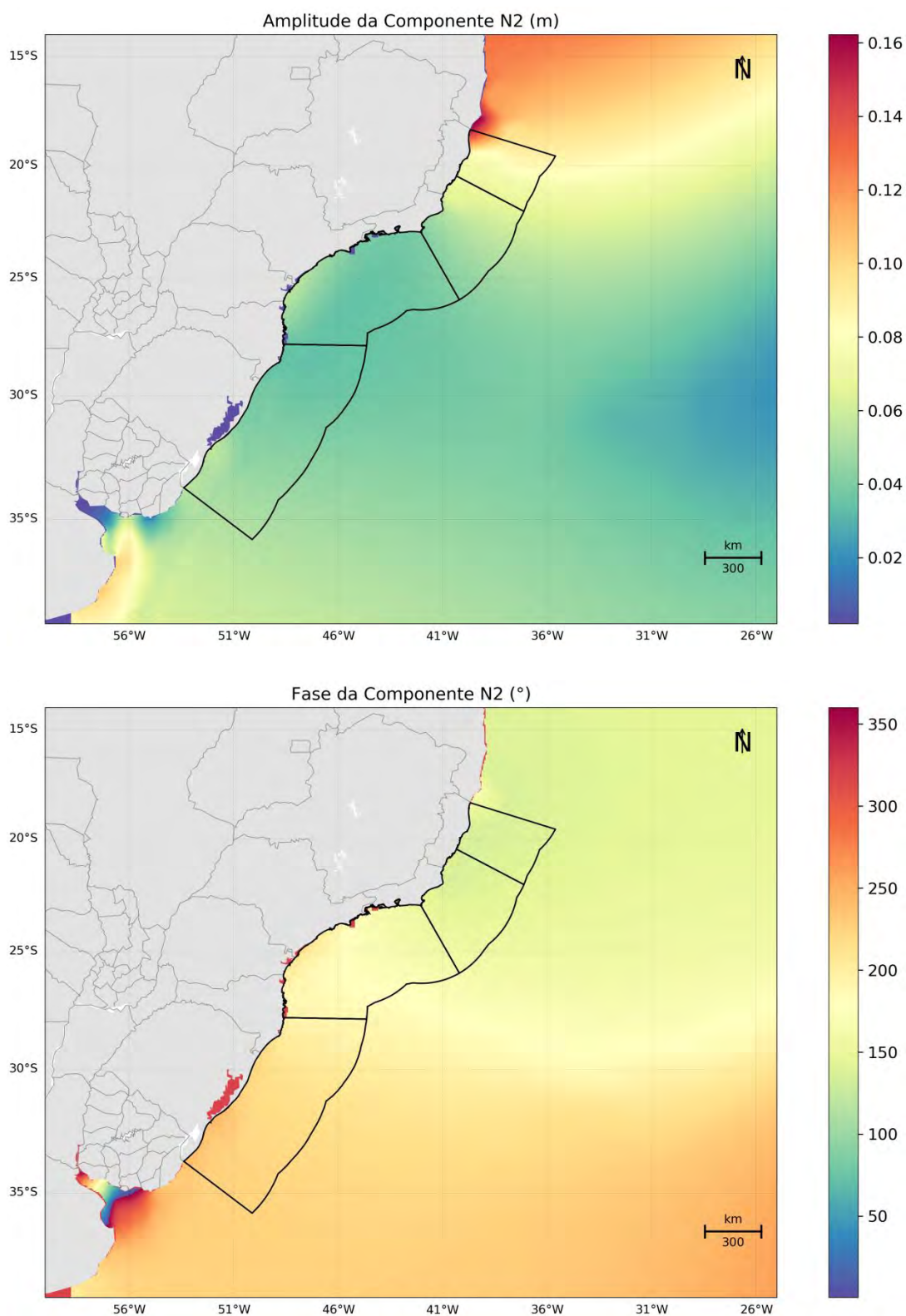


Figura 18: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente N2. Fonte: TPX08.

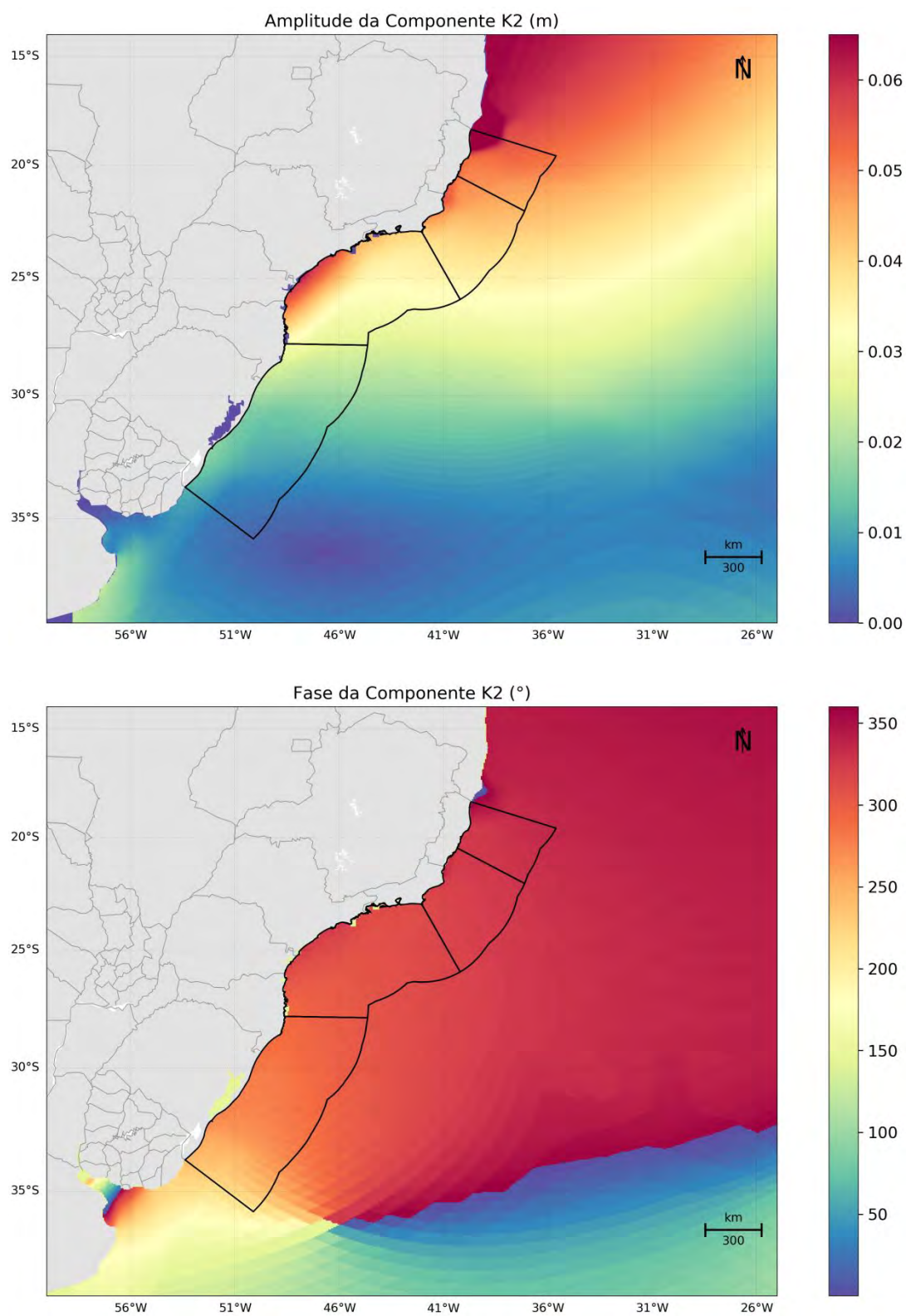


Figura 19: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente K2. Fonte: TPX08.

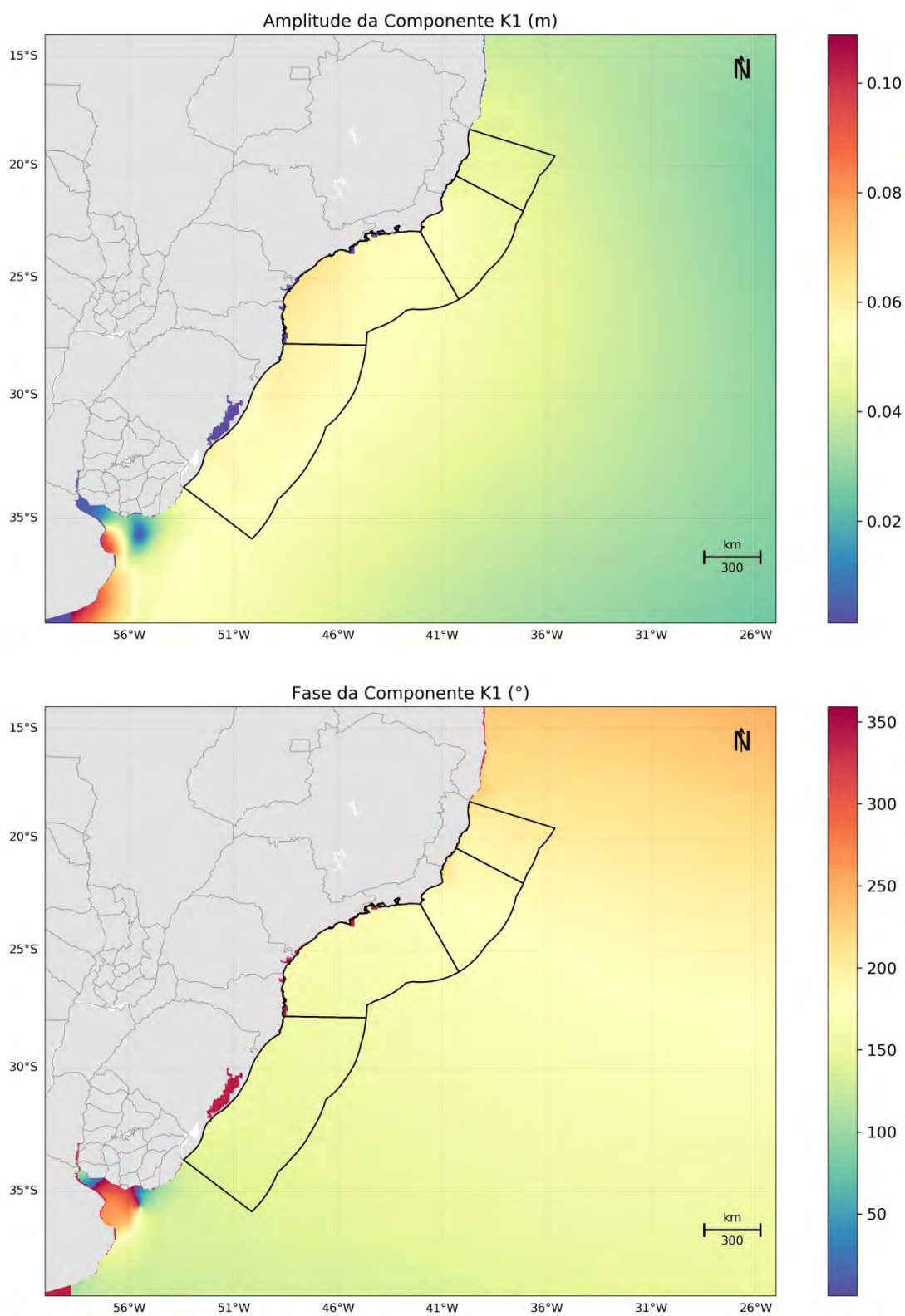


Figura 20: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente K1. Fonte: TPX08.

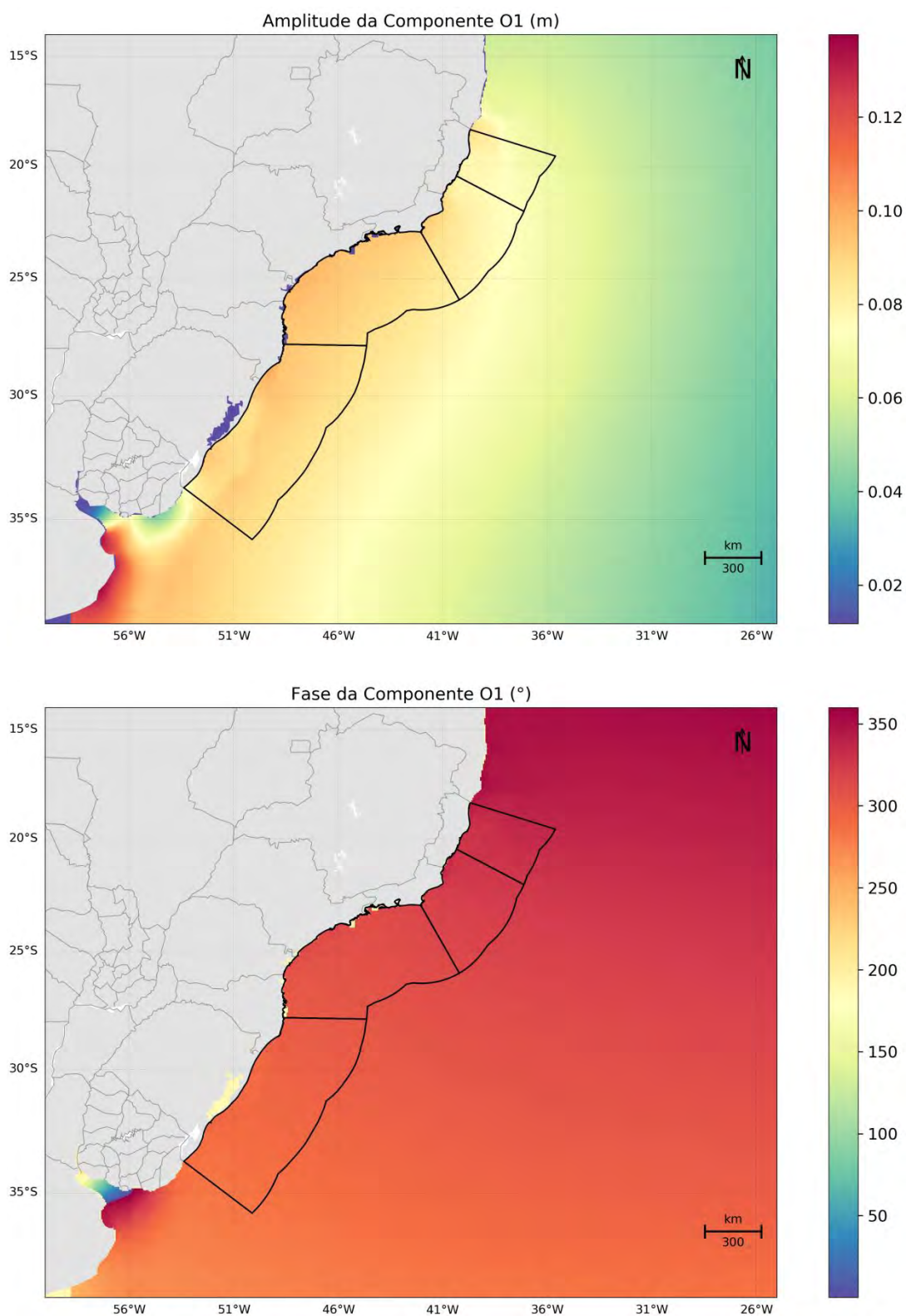


Figura 21: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente O1. Fonte: TPX08.

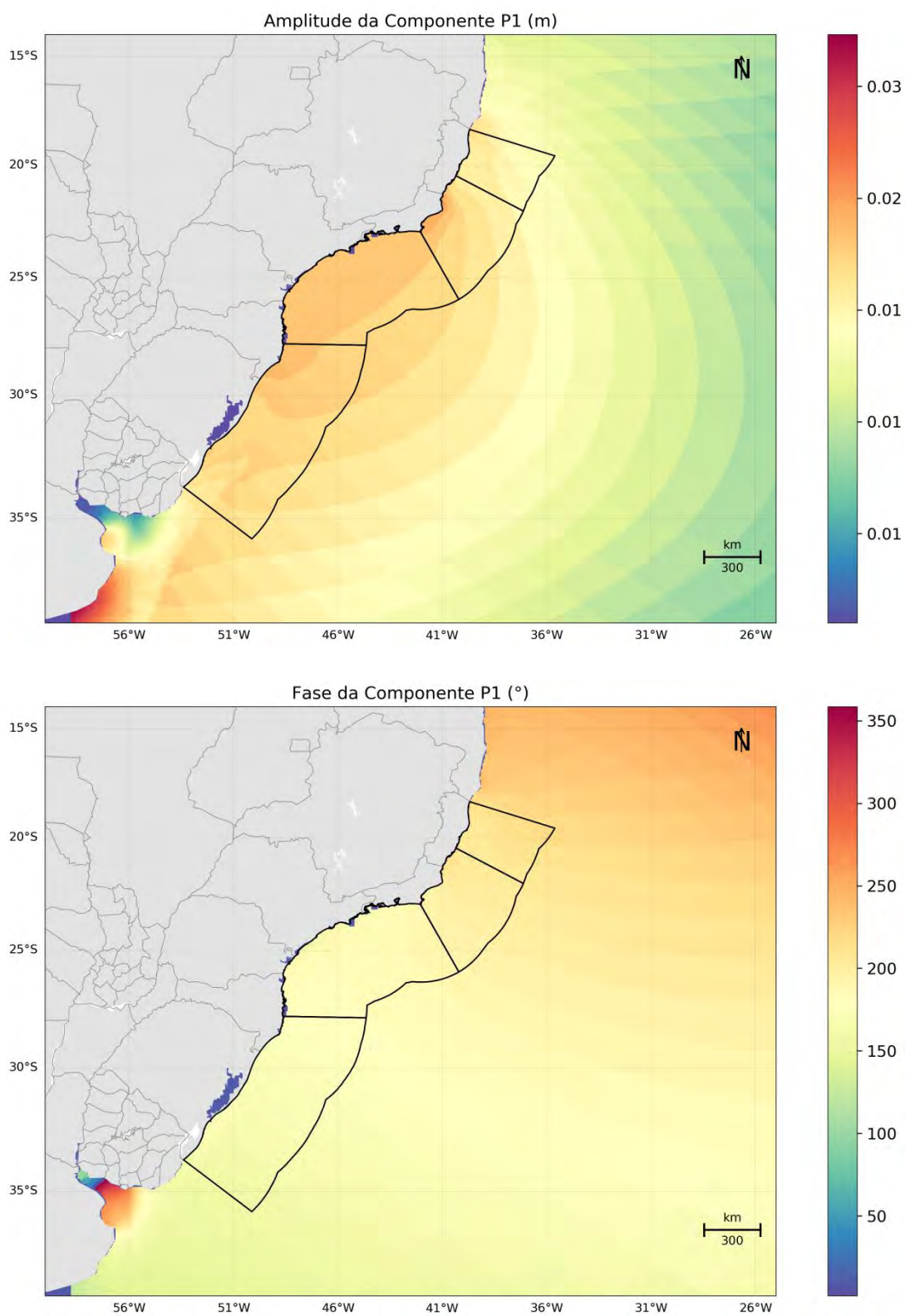


Figura 22: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente P1. Fonte: TPX08.

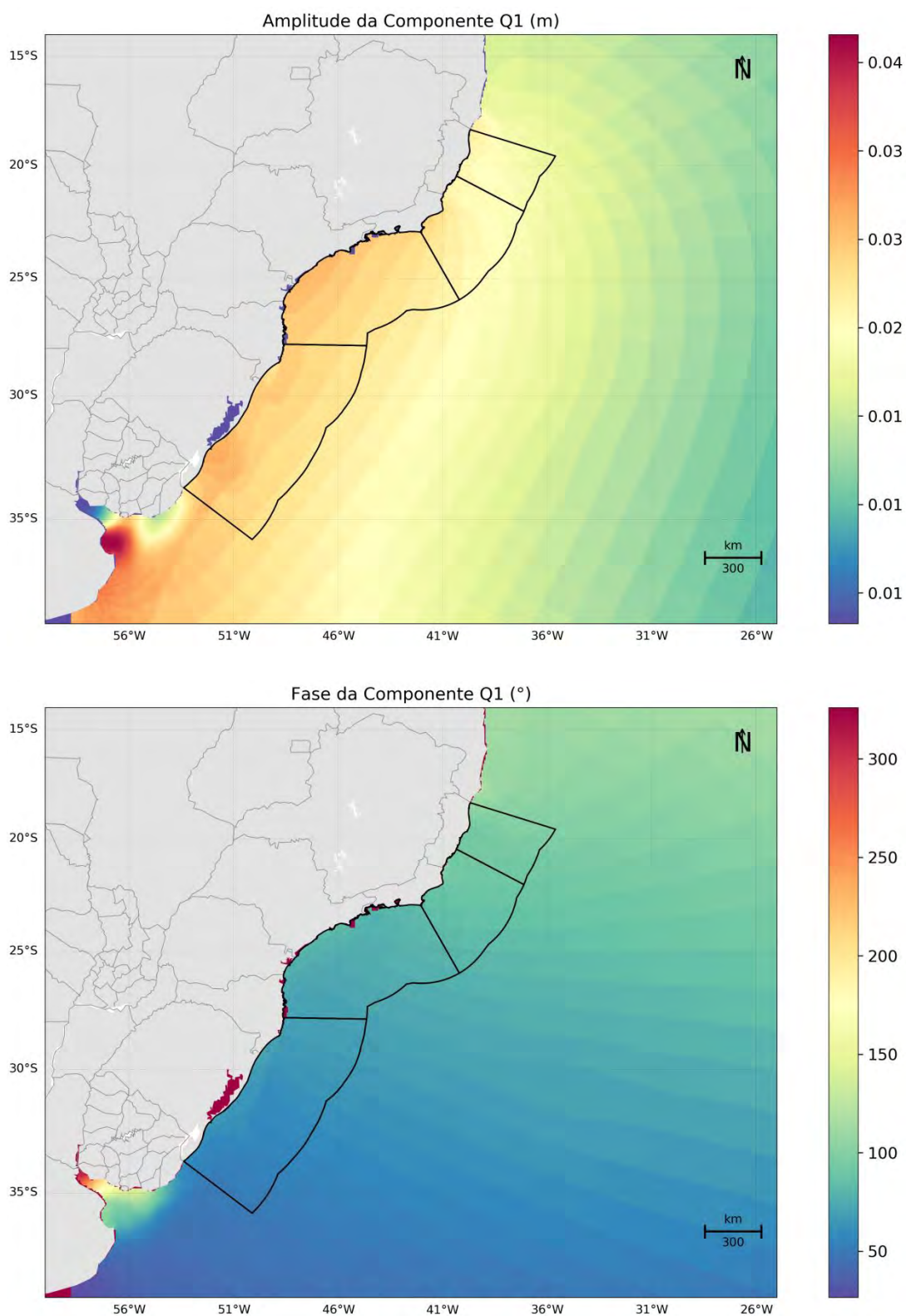


Figura 23: Mapa de amplitudes da elevação e fases da componente Q1. Fonte: TPX08.

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.

6. Estabilização da Energia Cinética

O modelo ROMS, além de usar os resultados do Mercator como condição inicial e de contorno, foi configurado para ler os resultados do Mercator 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 Mercator.

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 Mercator através da seguinte equação:

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

Onde ϕ representa uma variável do modelo (ROMS), ϕ^{ext} representa um dado externo (Mercator), 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 Mercator (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 Mercator, 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 24).

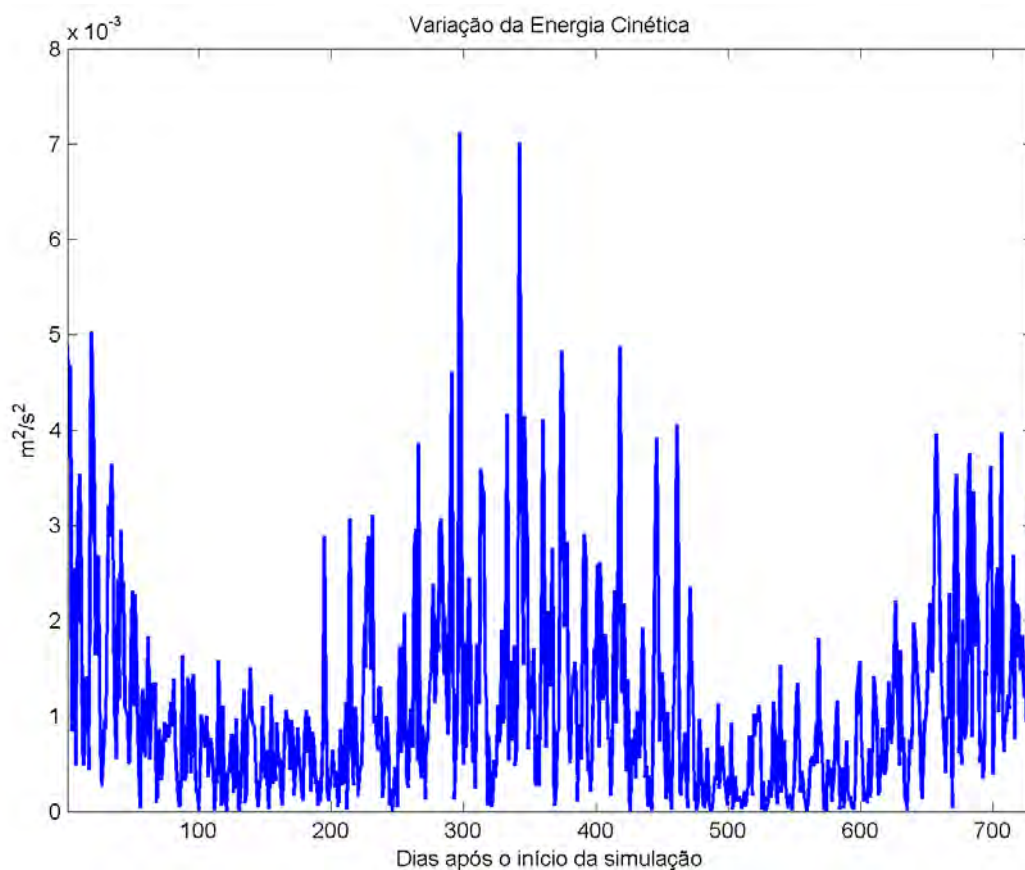


Figura 24: Variação da energia cinética média em superfície ao longo da simulação.

7. Resultados

Neste capítulo serão apresentados campos médios mensais, seções verticais e rosa de correntes obtidos a partir dos resultados do modelo. Objetiva-se apresentar os resultados da modelagem, assim como verificar se sua variabilidade sazonal está de acordo com o descrito na literatura especializada, constituindo assim mais uma forma de avaliação do modelo. Para além da análise sazonal, são apresentadas instantâneos do modelo no sentido de demonstrar a capacidade de representação da atividade de mesoescala e de reflexos no oceano de fenômenos meteorológicos como a passagem de sistemas frontais.

Conforme descrito na caracterização meteorológica realizada por Carvalho (2003), o padrão característico das condições meteorológicas na plataforma continental sudeste brasileira é dominado pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e pela passagem de sistemas frontais (frentes frias). Devido ao caráter permanente do ASAS, ventos de NE são predominantes durante o ano, com intensidade média de 5,5 a 8 m/s. Durante a passagem de frentes frias, os ventos sobre a plataforma se invertem para o quadrante Sul (principalmente SW e W/SW), podendo atingir até 20 m/s. A passagem de frentes frias ocorre com uma média de 3 a 6 vezes por mês (intervalo entre frentes de 5 a 10 dias), com maior frequência durante os meses de inverno.

As correntes sobre a plataforma continental se encontram em um equilíbrio dinâmico com os ventos sobrejacentes e apresentam conhecida sazonalidade. Durante o predomínio do ASAS, os ventos paralelos a costa são responsáveis pelo transporte das correntes superficiais em direção ao mar aberto, resultando em um abaixamento do nível do mar junto a costa. Esse abaixamento do nível gera uma força de gradiente de pressão em direção à costa que, entrando em equilíbrio com a força de Coriolis, resulta em uma corrente paralela à costa e na mesma direção do vento, fluindo com sentido sul. Durante a passagem de frentes frias, esse equilíbrio se dá no sentido inverso e a corrente resultante é no sentido do vento, fluindo paralela à costa com sentido norte (CASTRO FILHO, 1990 *apud* CARVALHO, 2003). A maior frequência de passagem de frentes frias no período de inverno resulta em uma corrente costeira residual sobre a plataforma (a Corrente Costeira do Brasil, ou CCB), com direção nordeste, que transporta água mais fria e rica em nutrientes até a latitude 24°S (MENDONÇA *et al.*, 2016; SOUZA & ROBINSON, 2004). No verão o predomínio da influência do ASAS resulta em uma corrente residual com direção sul.

Explorando a circulação ao largo (depois da quebra do talude), tem-se o domínio da Corrente do Brasil (CB). A CB é a corrente de contorno oeste que completa o giro do Atlântico Sul; é formada entre 10°S e 20°S pela bifurcação da porção sul da Corrente Sul Equatorial e flui em um padrão meandrante para sudoeste na região do talude continental até a confluência Brasil-Malvinas (PETERSON & STRAMMA, 1991). Na região do litoral norte do Rio de Janeiro, a orientação da costa sofre uma brusca mudança e, com isso, o padrão meandrante da CB é acentuado, dando origem a vórtices ciclônicos e anticiclônicos.

A costa sul do Brasil é influenciada por variações sazonais nos padrões de ventos e correntes, destacando-se a circulação associada às correntes de contorno oeste, a posição da Convergência Subtropical e a descarga continental (SEELIGER & ODEBRECHT, 1998).

7.1. Campos de corrente

Os padrões descritos em literatura para a região oceânica e para a circulação sobre a plataforma podem ser bem observados nos campos médios mensais apresentados da Figura 25 a Figura 36. Para além dos campos superficiais, serão apresentados nos subitens seguintes os campos mensais para as profundidades de 200 m, 500 m, 1.000 m e 2.000 m.

Sobre a plataforma continental, os campos mensais indicam correntes com fluxo sudoeste nos meses de setembro a fevereiro. No período compreendido entre março e agosto, estas são menos intensas e há inversão do fluxo nos meses de junho e julho, devido à presença da Corrente Costeira.

7.1.1 Superfície

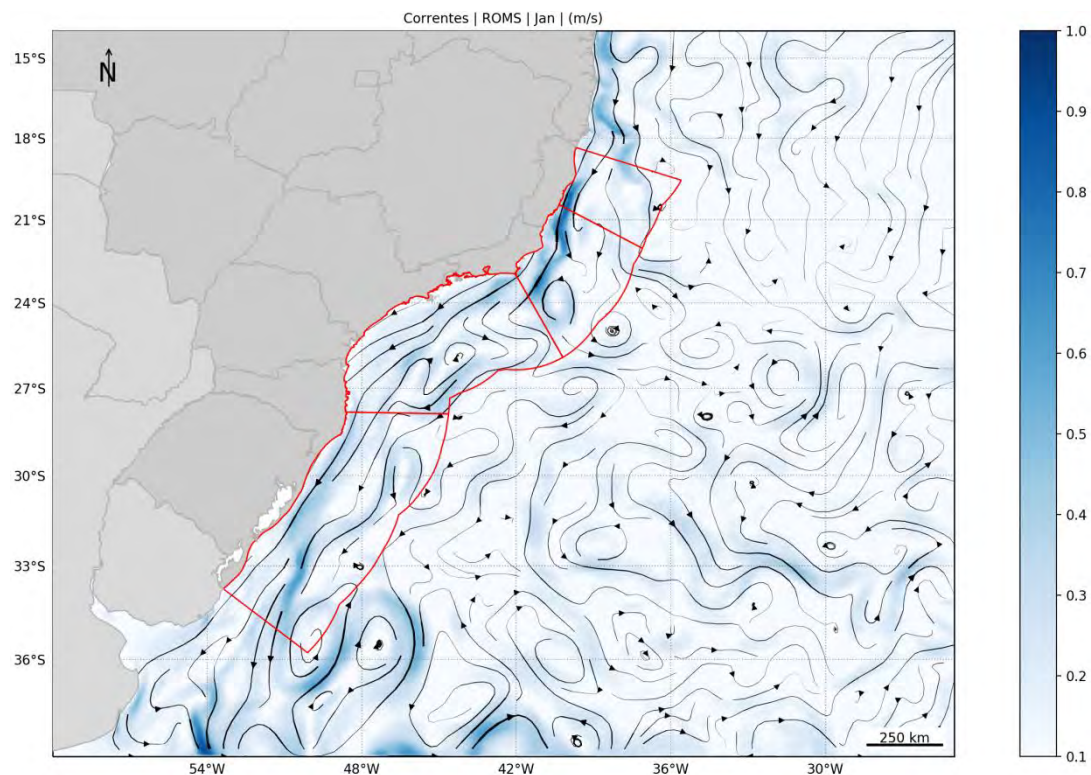


Figura 25: Campo médio de circulação para o mês de janeiro.

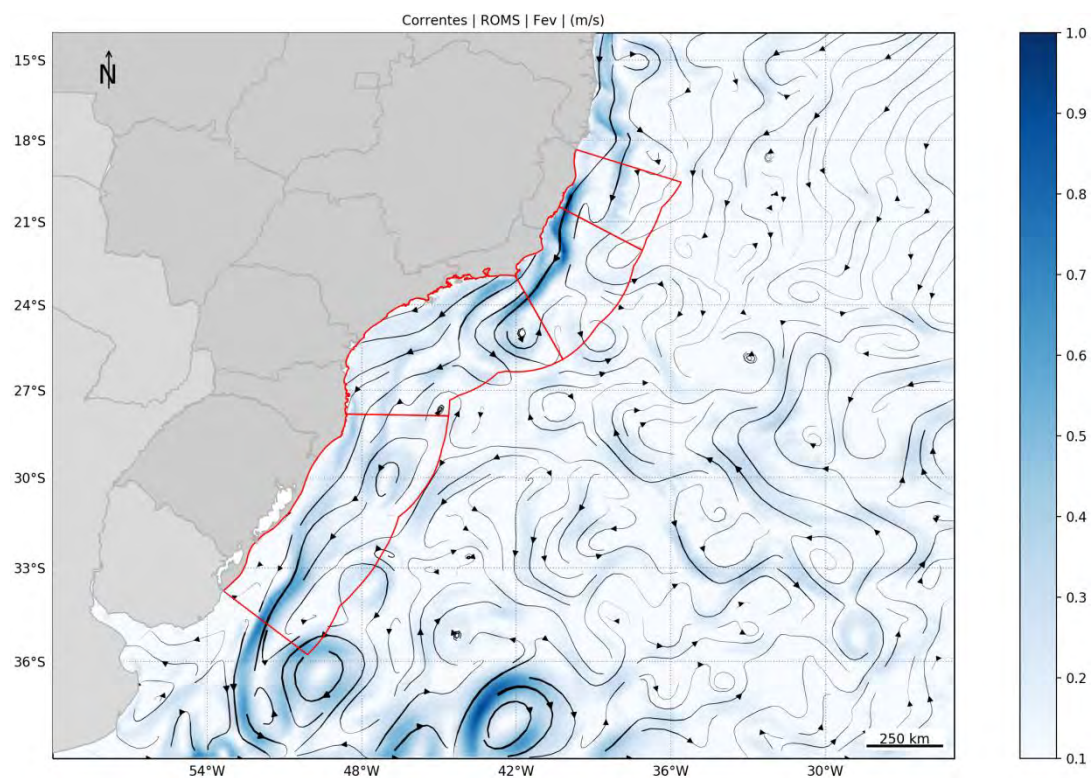


Figura 26: Campo médio de circulação para o mês de fevereiro.

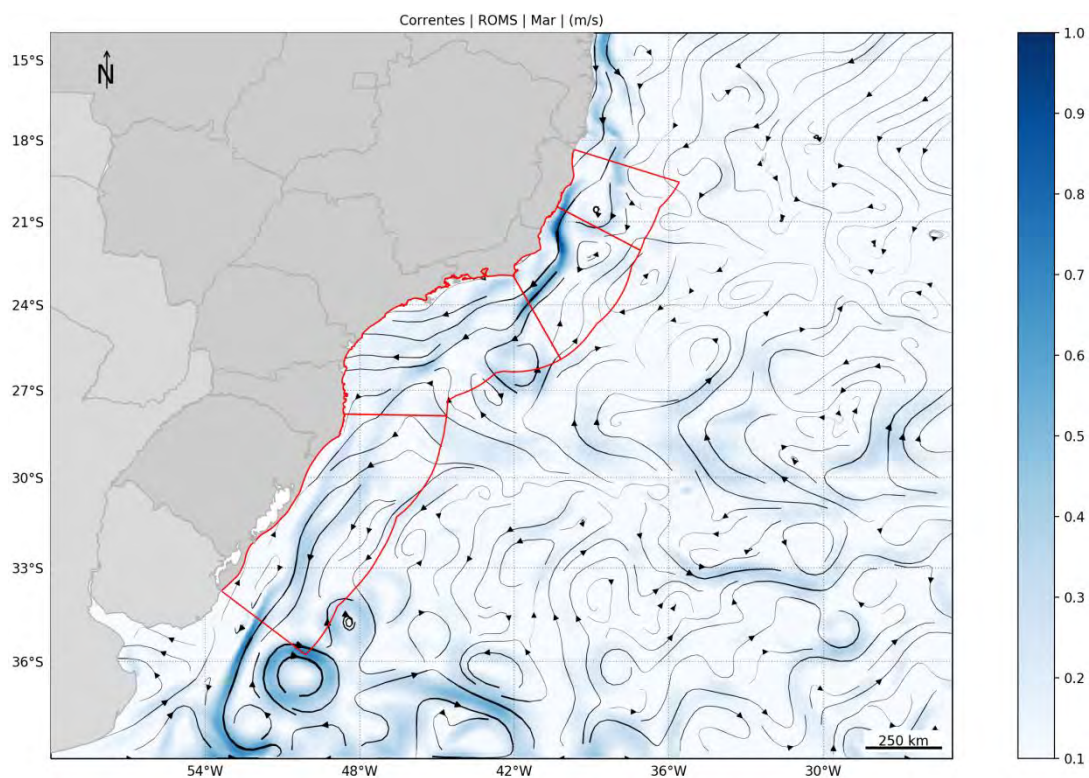


Figura 27: Campo médio de circulação para o mês de março.

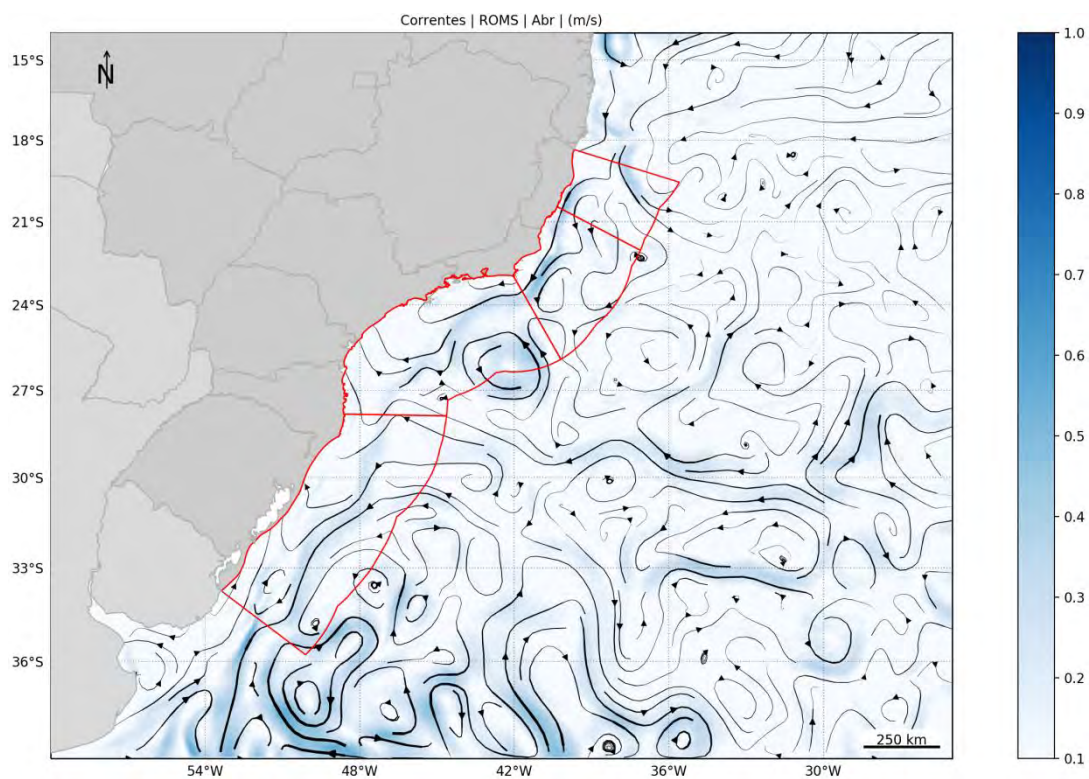


Figura 28: Campo médio de circulação para o mês de abril.

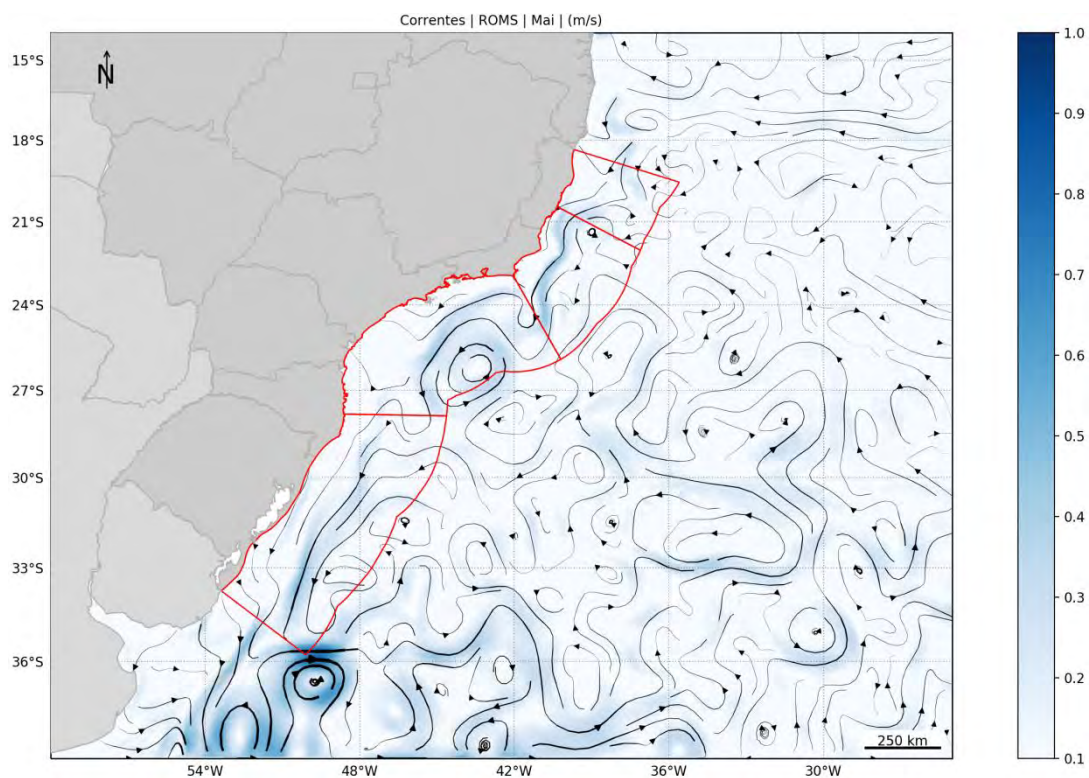


Figura 29: Campo médio de circulação para o mês de maio.

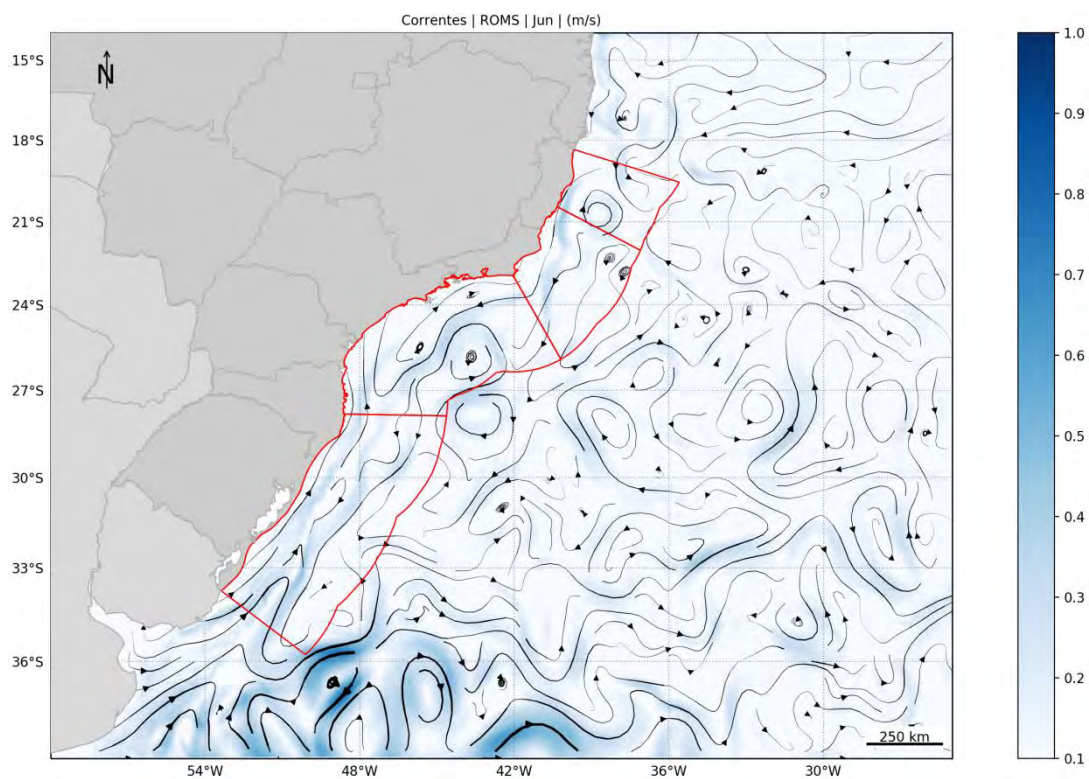


Figura 30: Campo médio de circulação para o mês de junho.

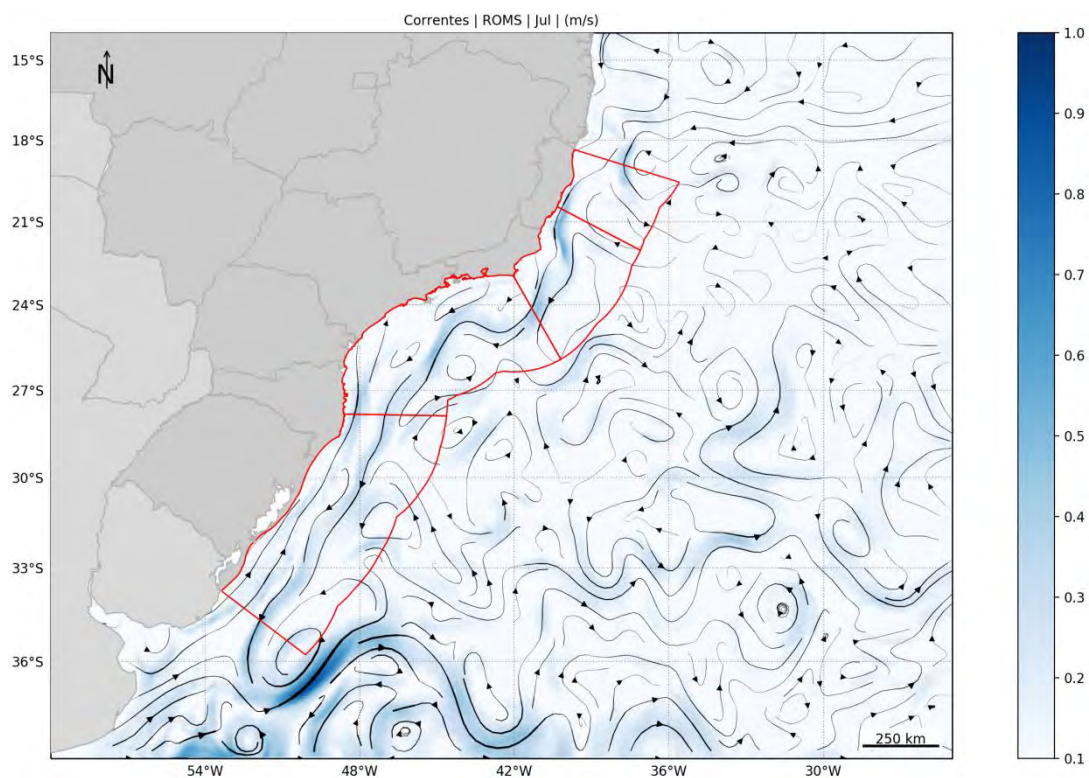


Figura 31: Campo médio de circulação para o mês de julho.

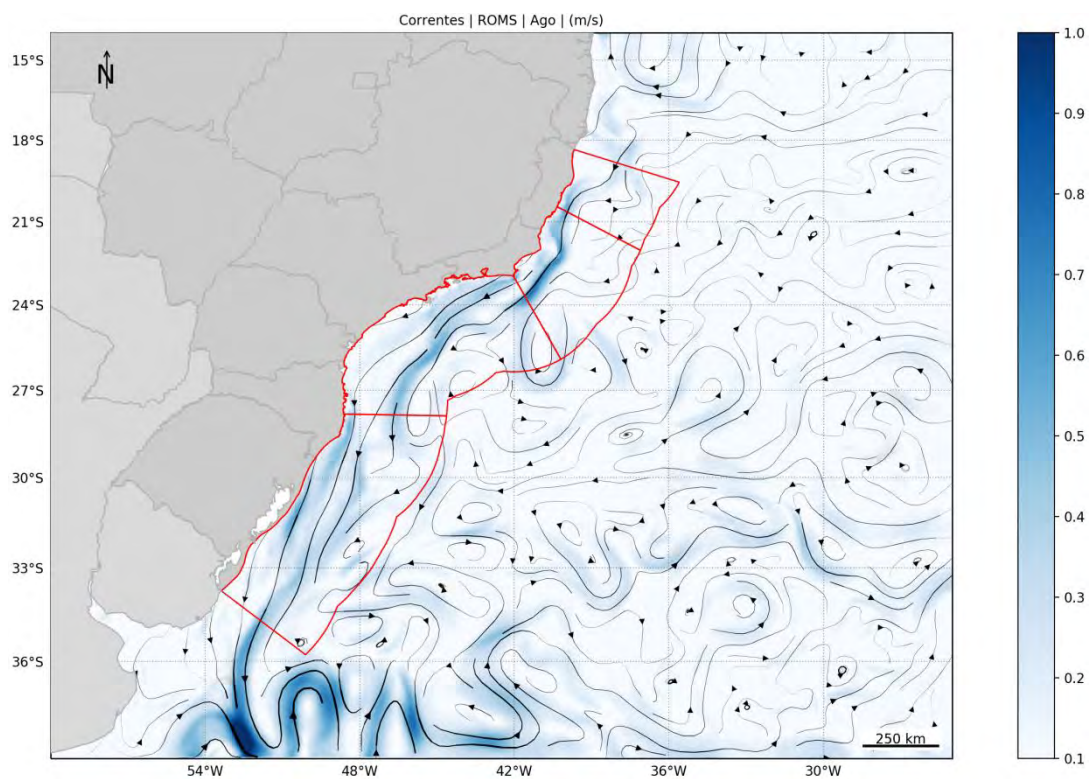


Figura 32: Campo médio de circulação para o mês de agosto.

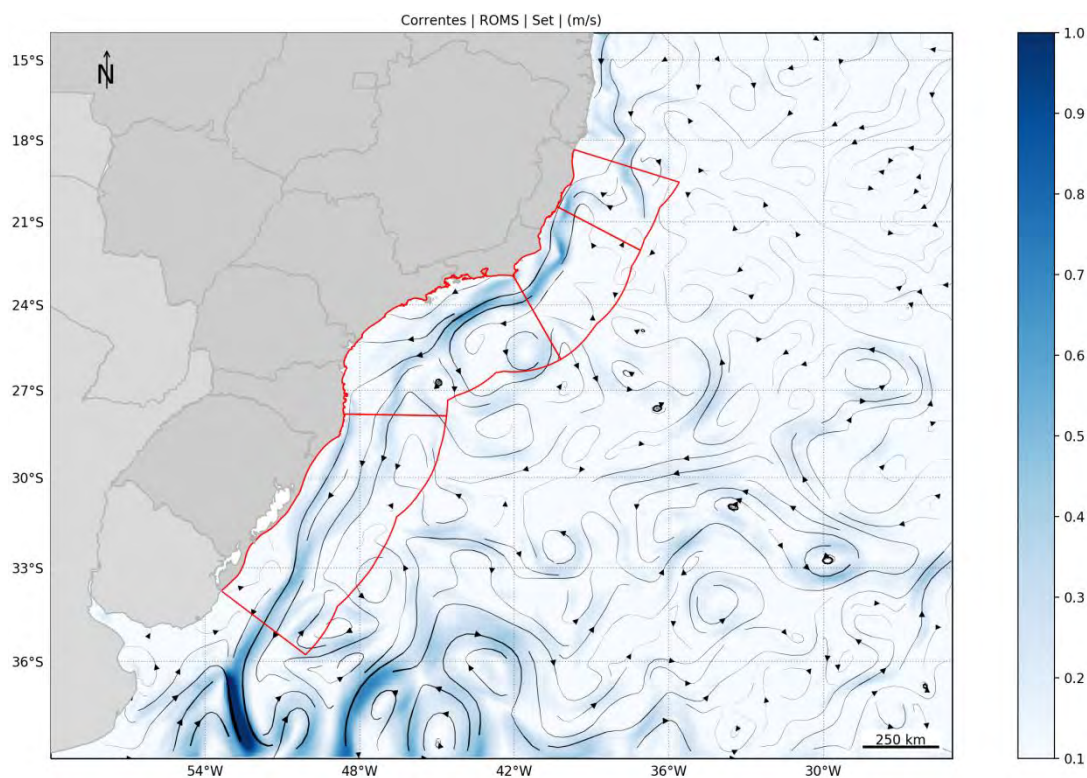


Figura 33: Campo médio de circulação para o mês de setembro.

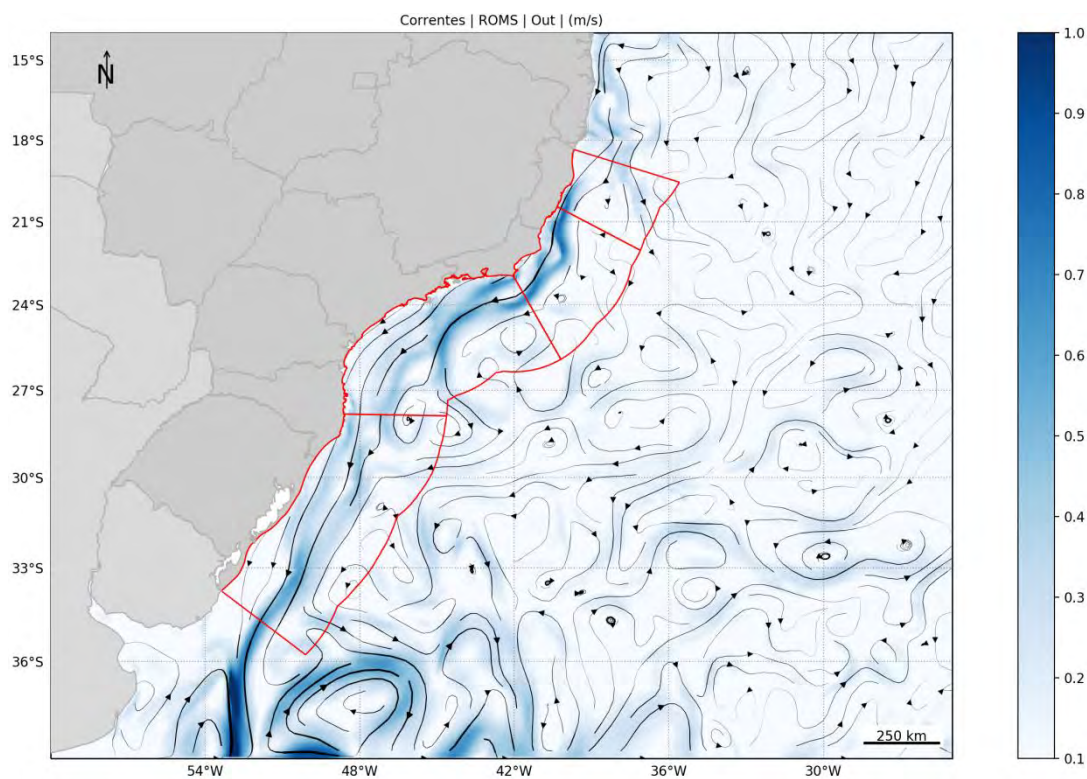


Figura 34: Campo médio de circulação para o mês de outubro.

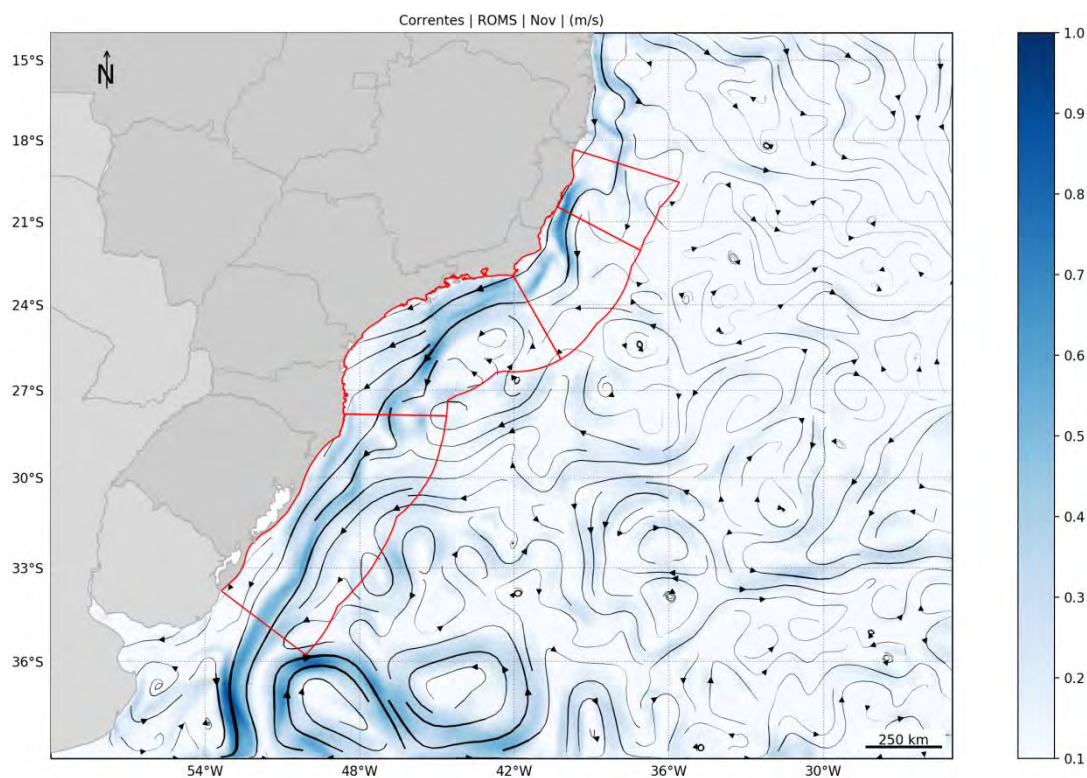


Figura 35: Campo médio de circulação para o mês de novembro.

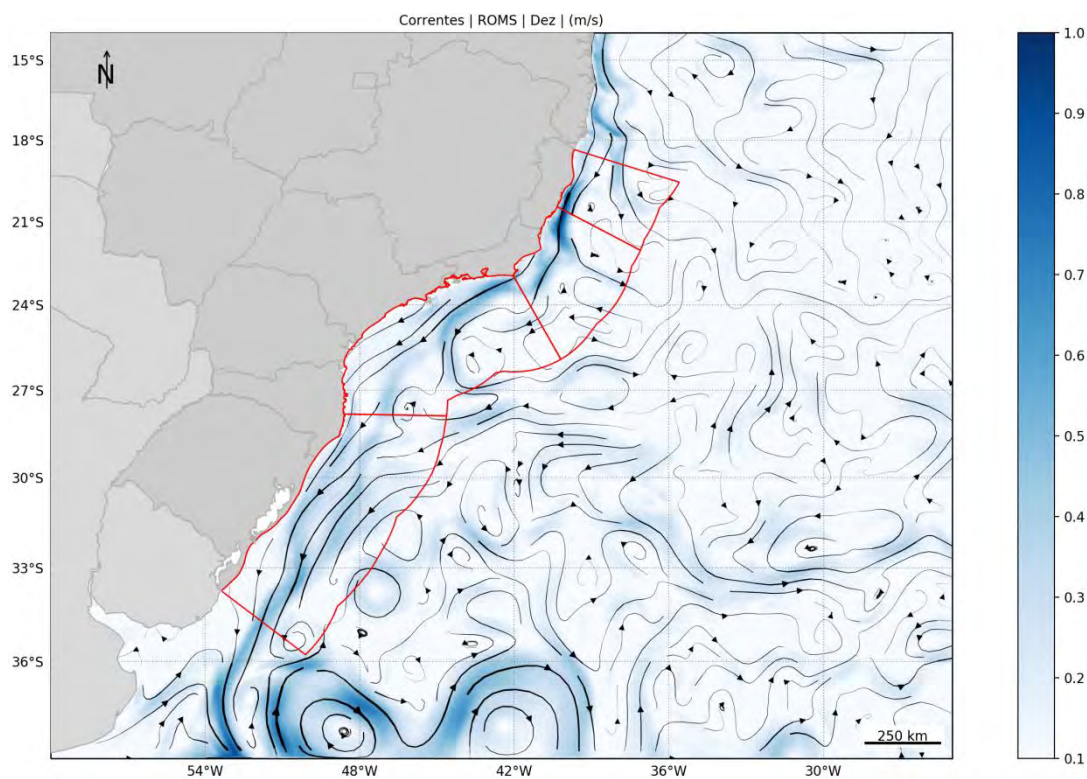


Figura 36: Campo médio de circulação para o mês de dezembro.

7.1.2 200 metros de profundidade

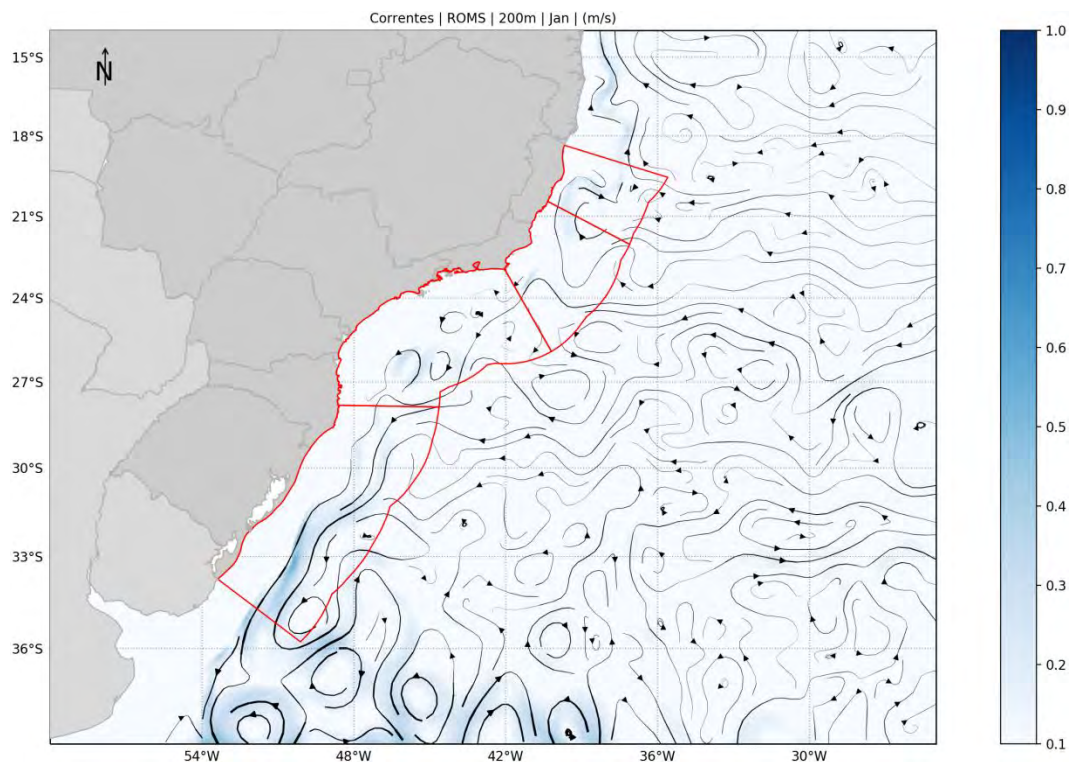


Figura 37: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de janeiro.

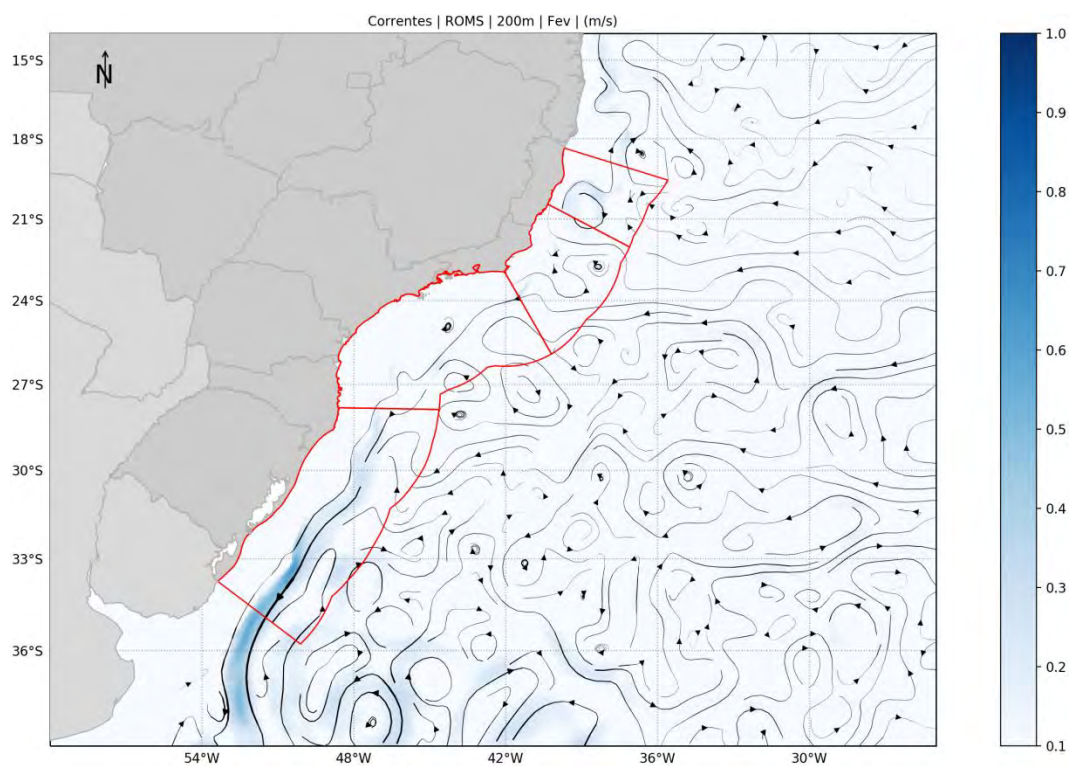


Figura 38: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de fevereiro.

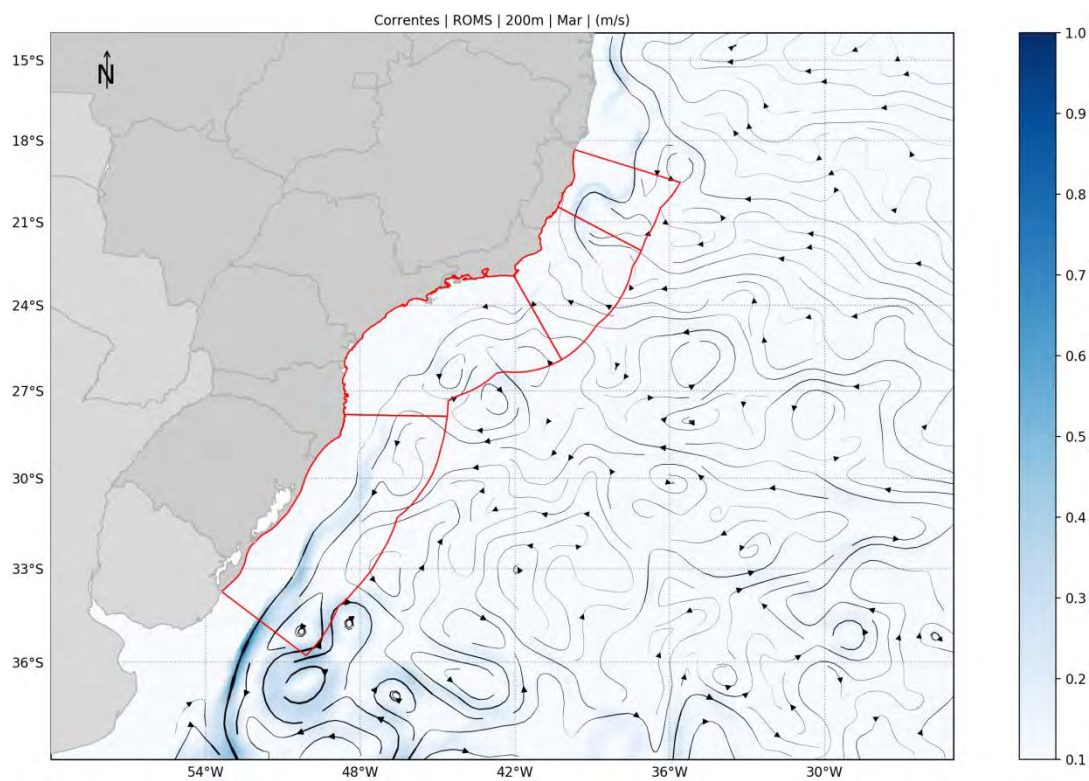


Figura 39: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de março.

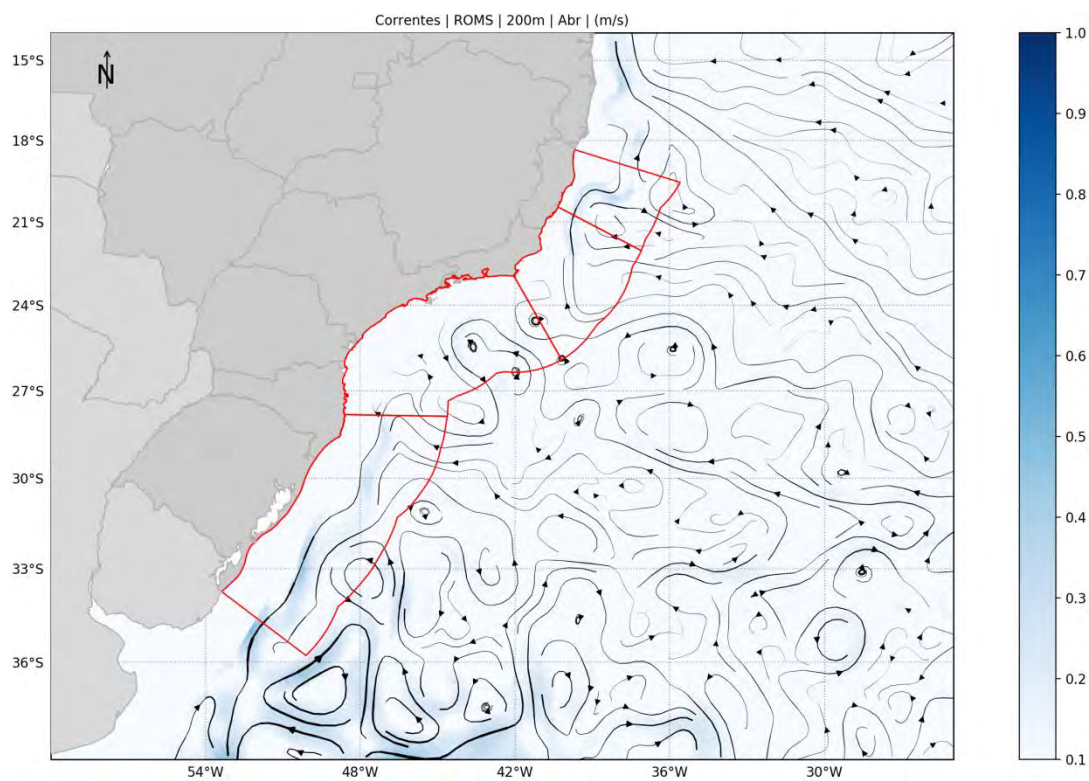


Figura 40: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de abril.

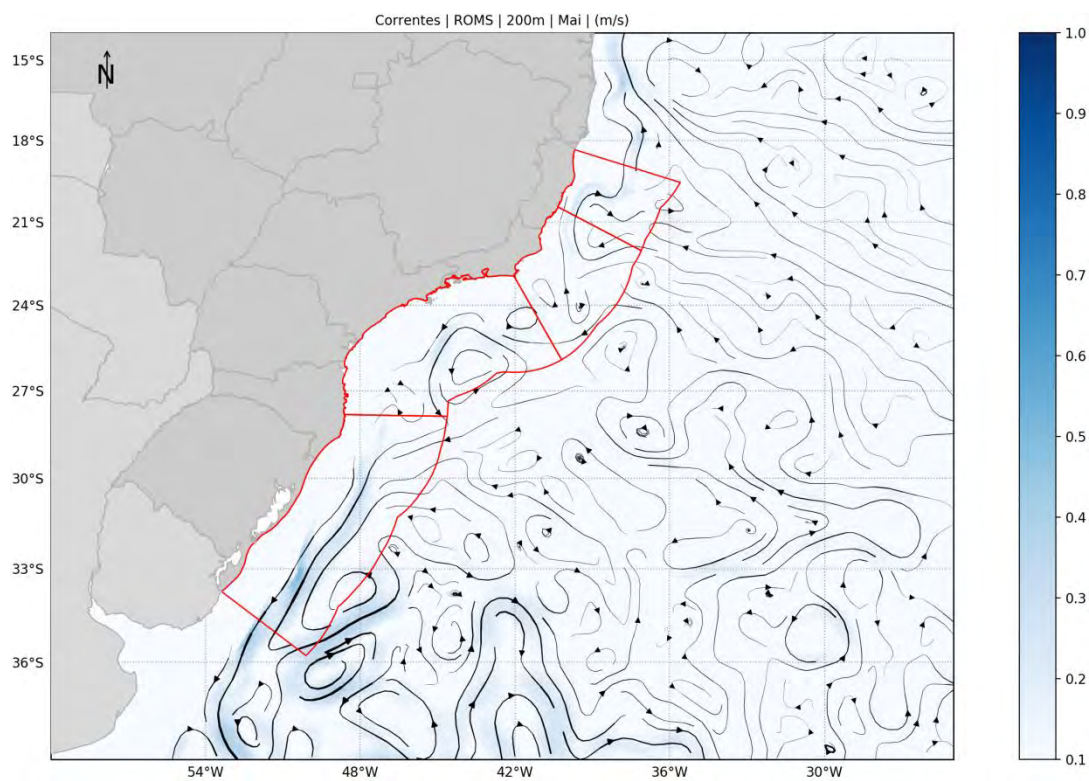


Figura 41: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de maio.

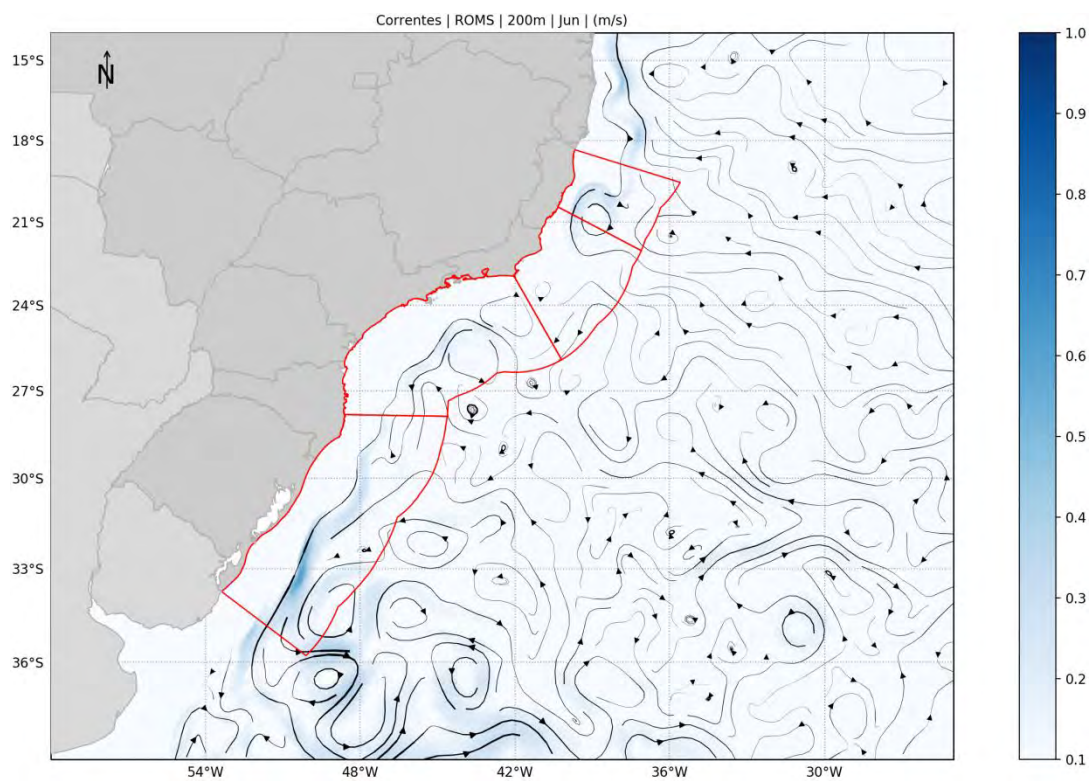


Figura 42: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de junho.

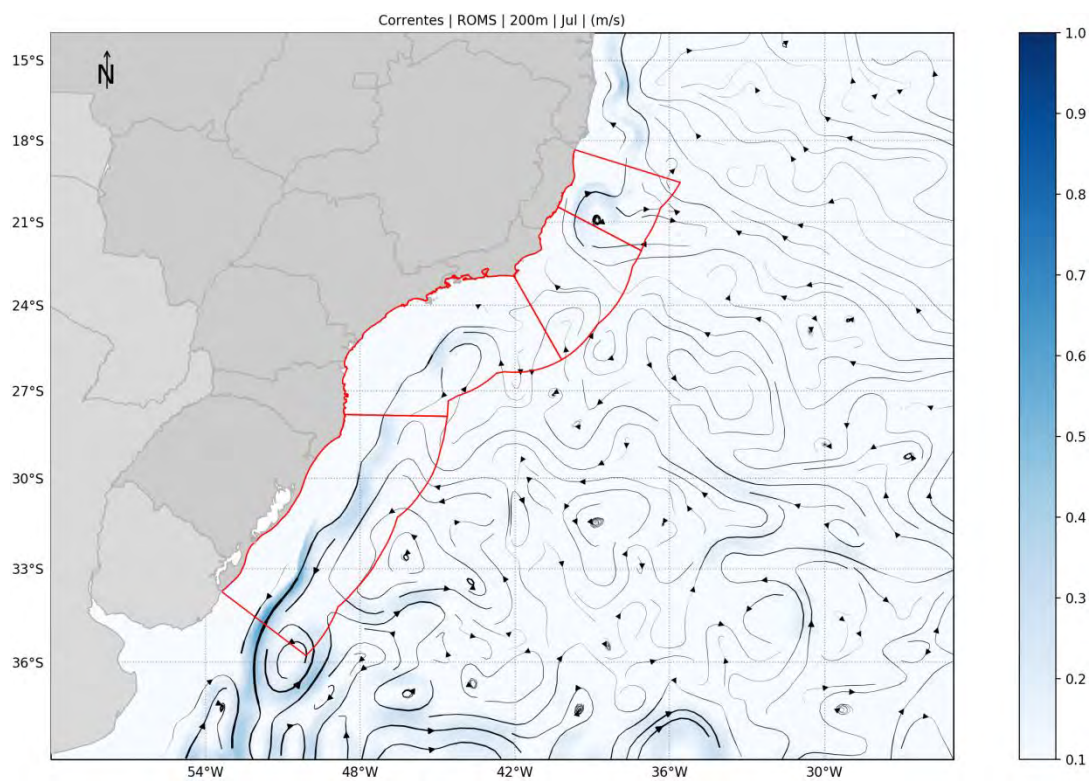


Figura 43: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de julho.

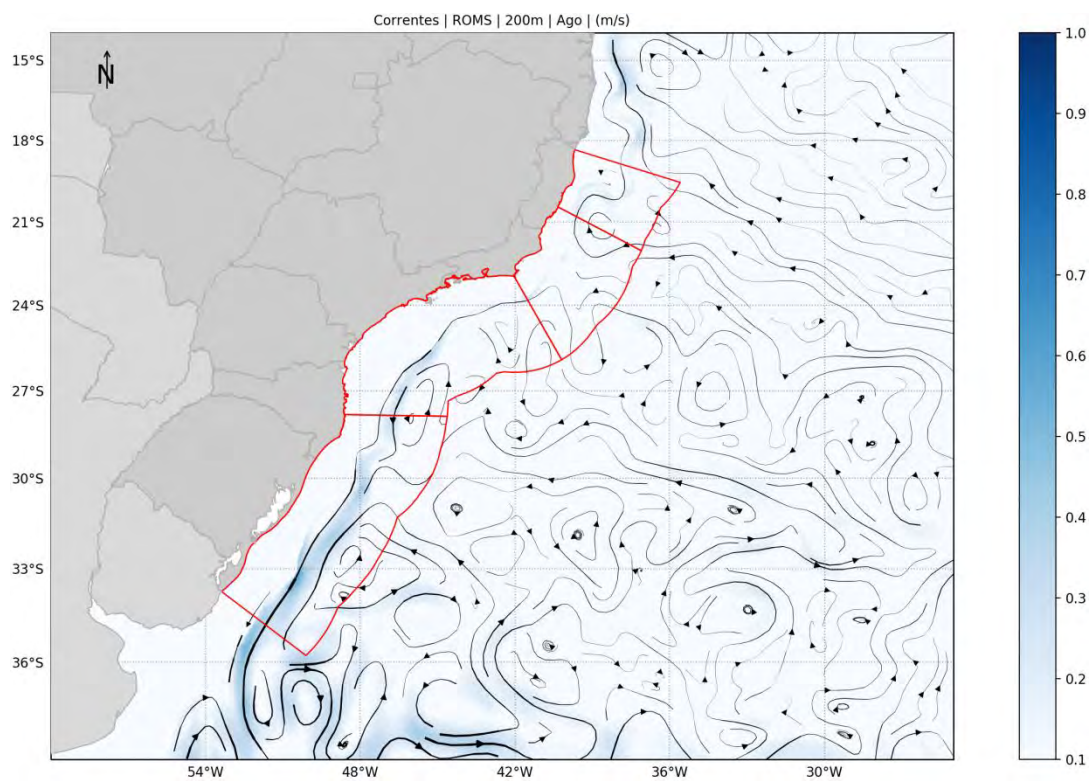


Figura 44: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de agosto.

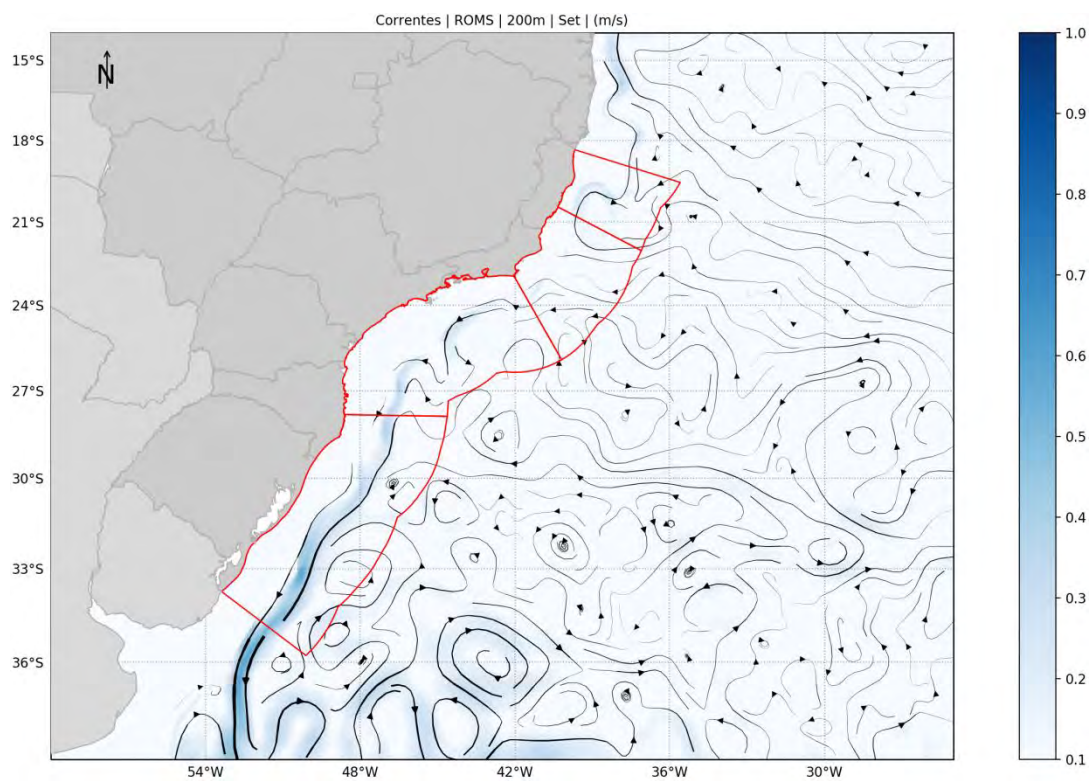


Figura 45: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de setembro.

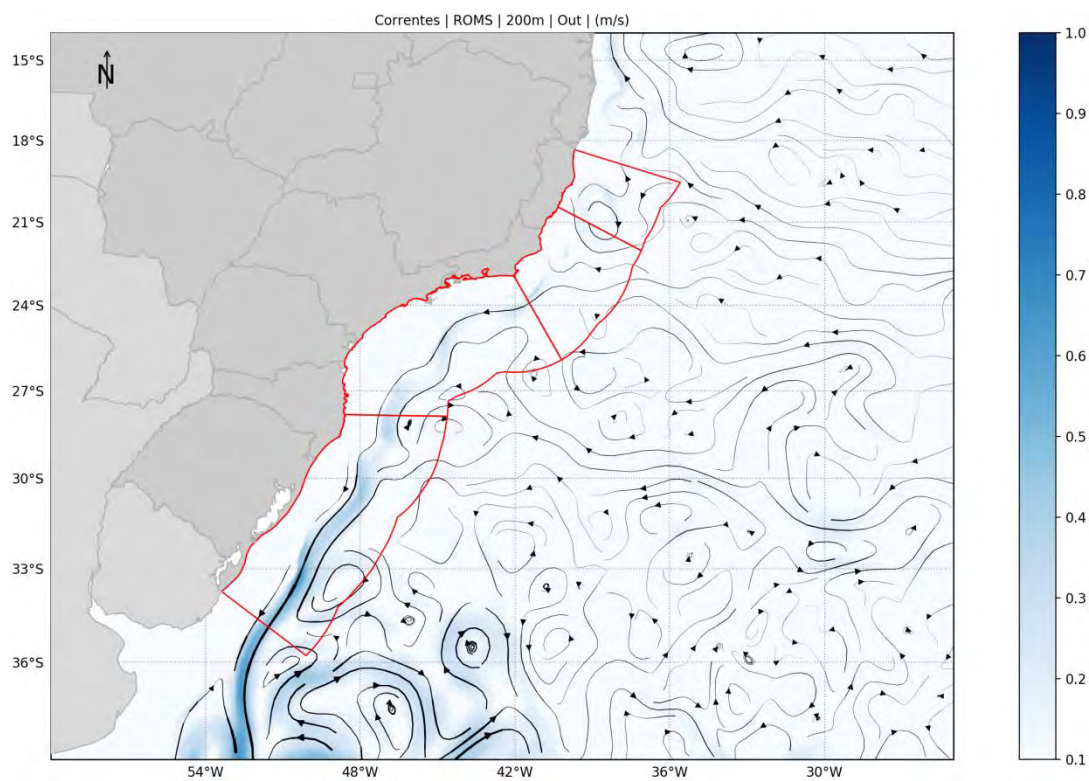


Figura 46: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de outubro.

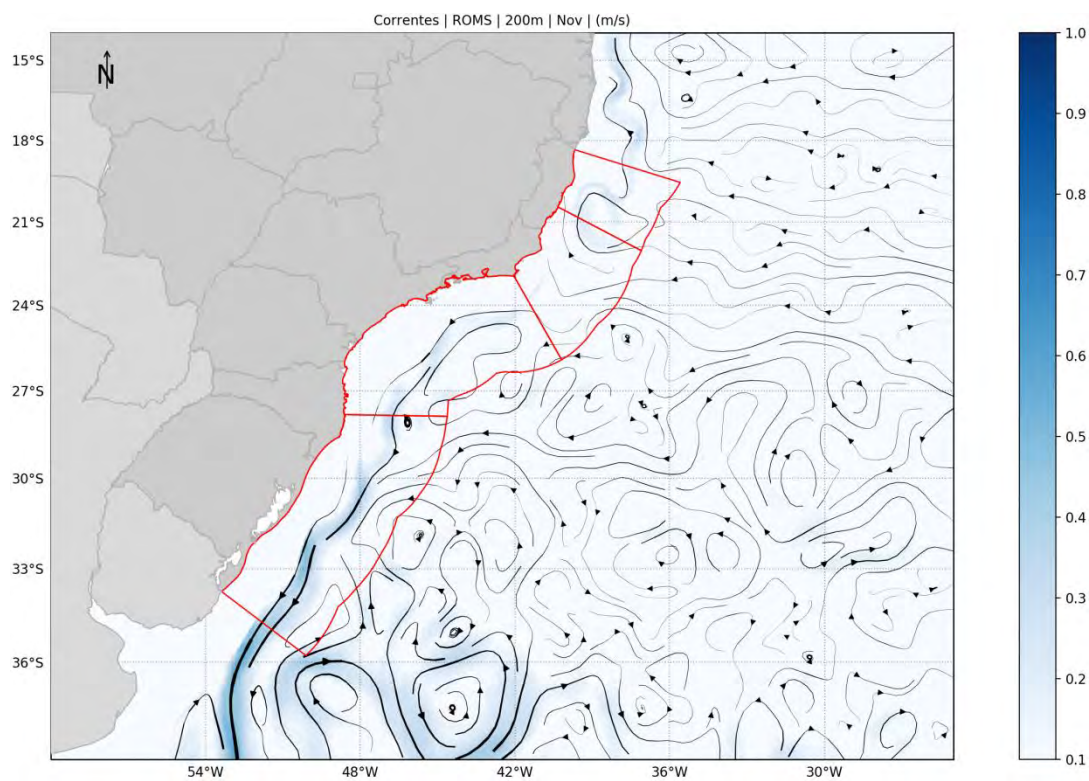


Figura 47: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de novembro.

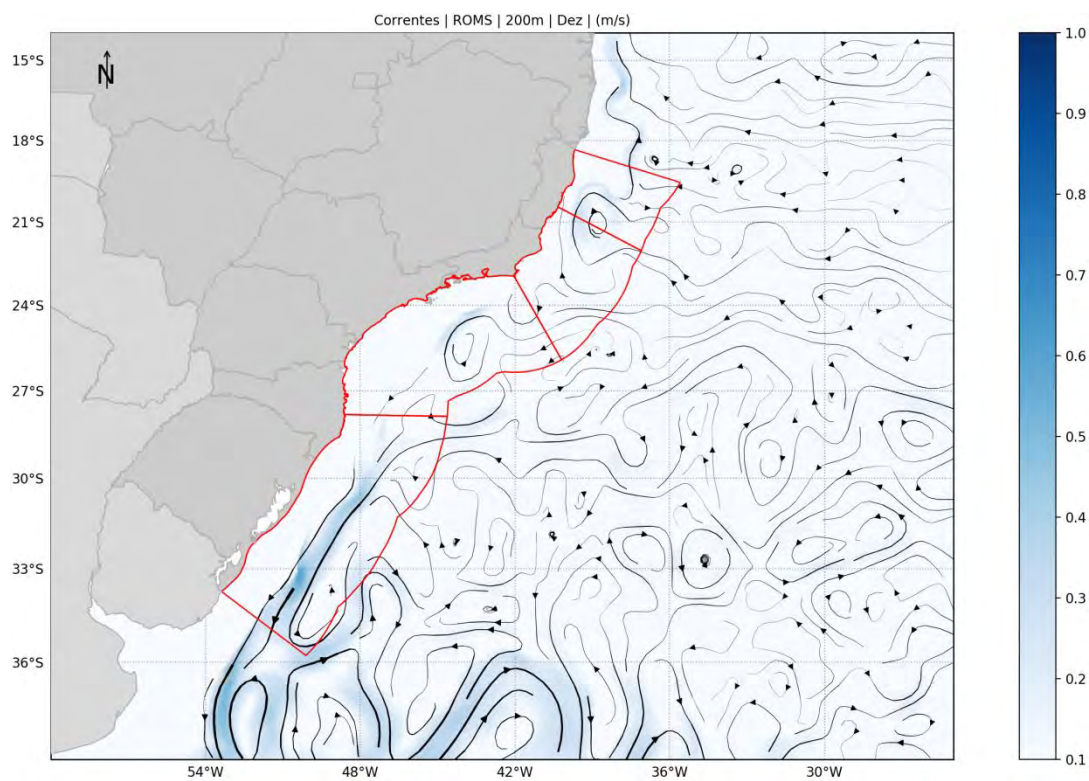


Figura 48: Campo médio de circulação em 200 metros de profundidade para o mês de dezembro.

7.1.3 500 metros de profundidade

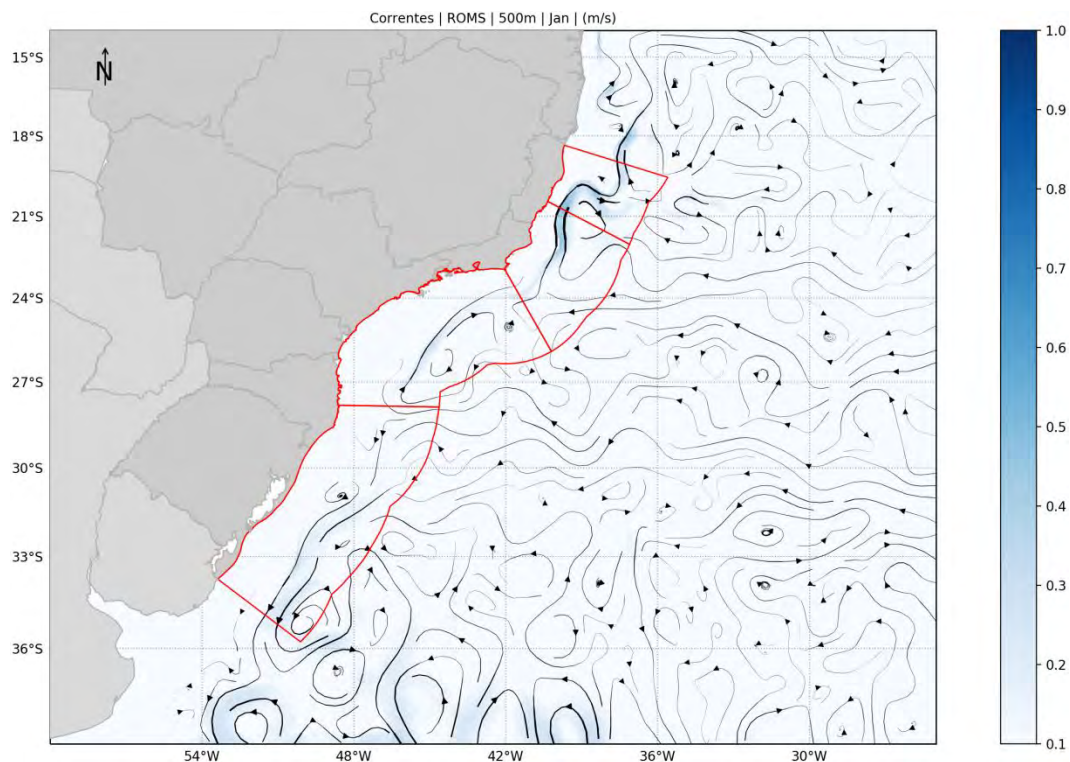


Figura 49: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de janeiro.

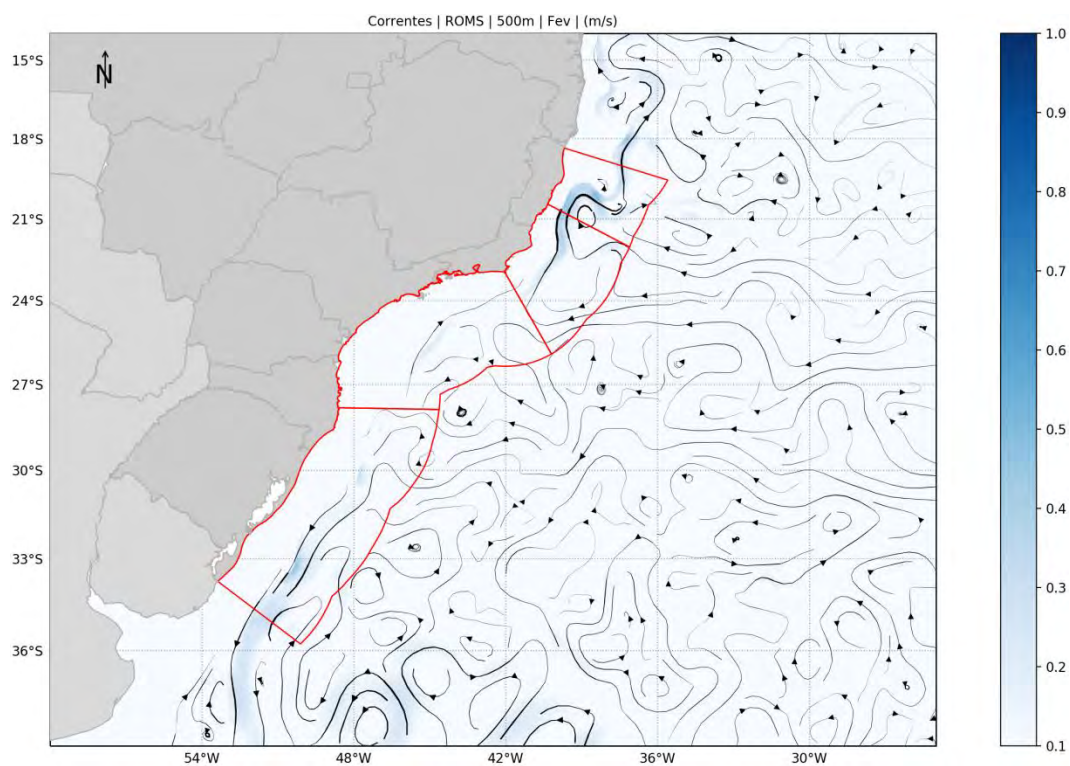


Figura 50: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de fevereiro.

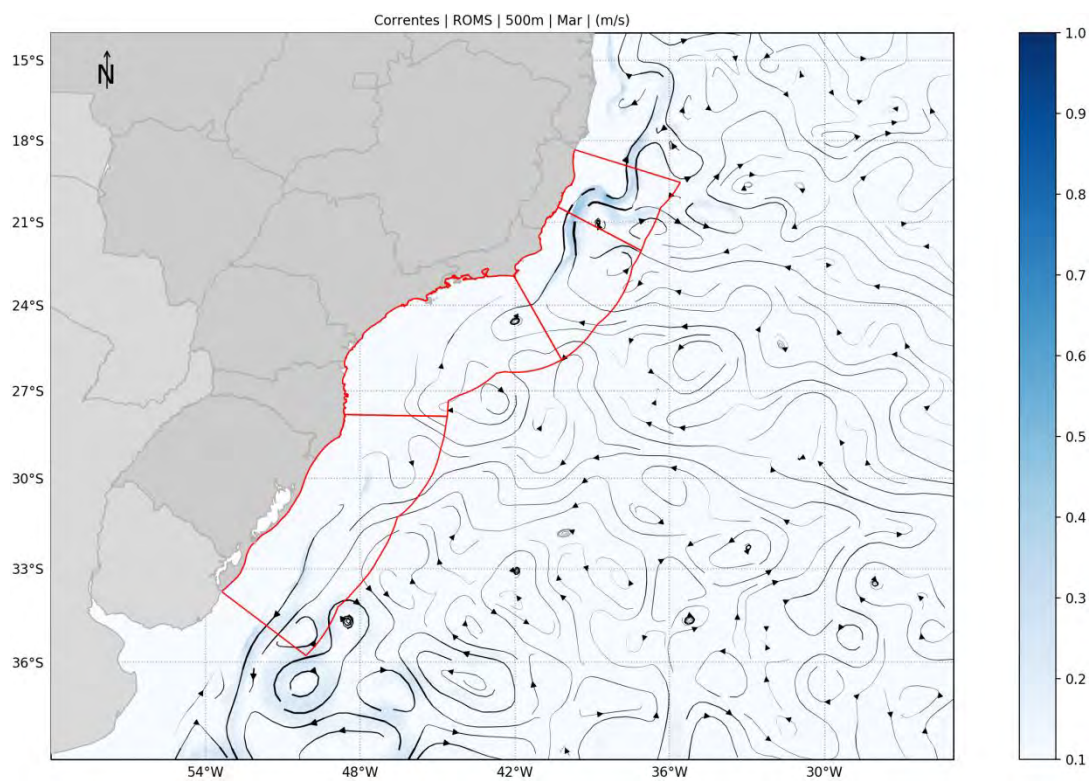


Figura 51: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de março.

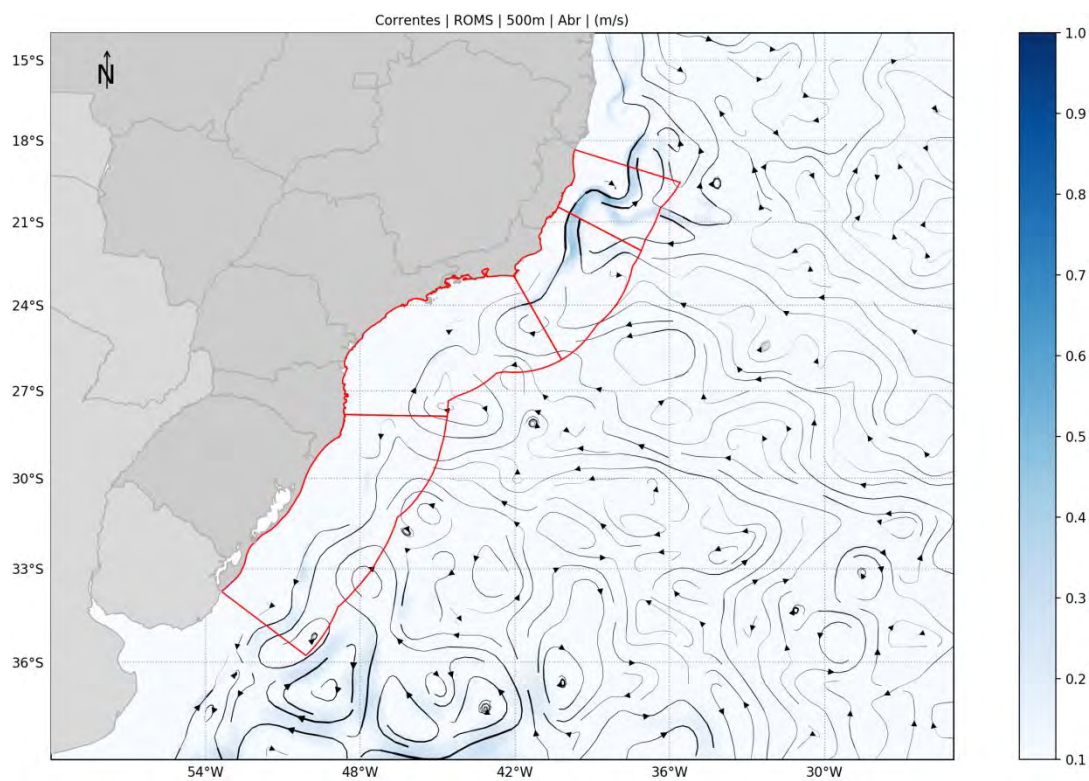


Figura 52: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de abril.

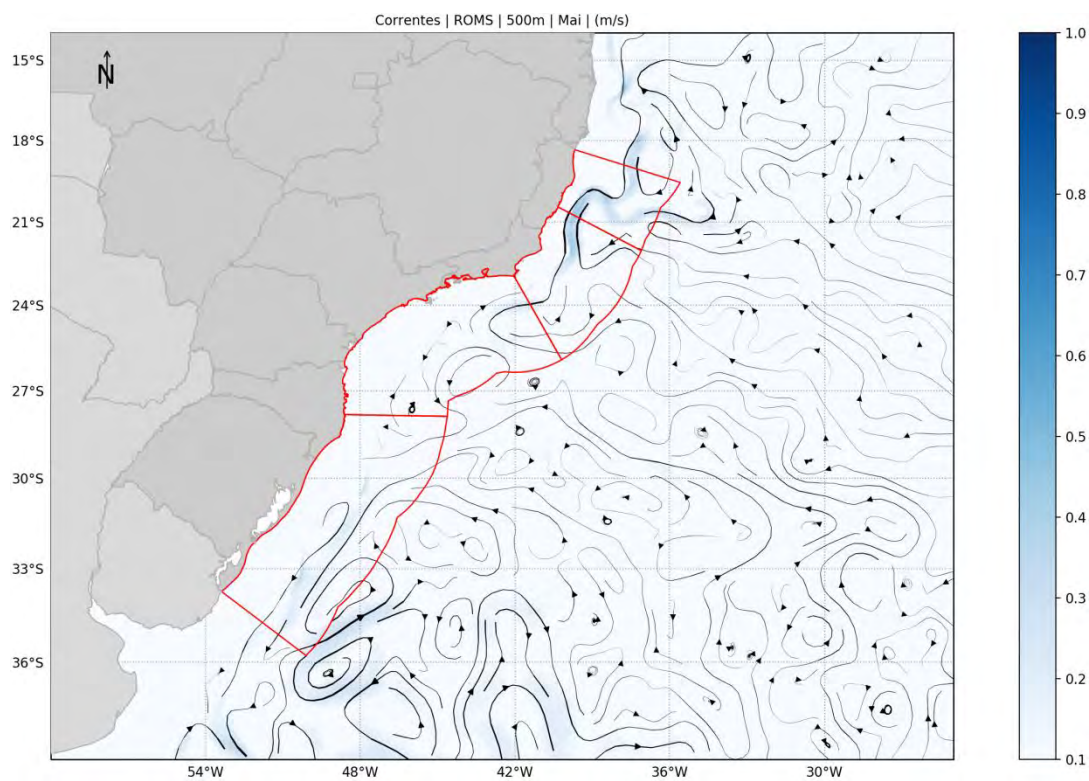


Figura 53: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de maio.

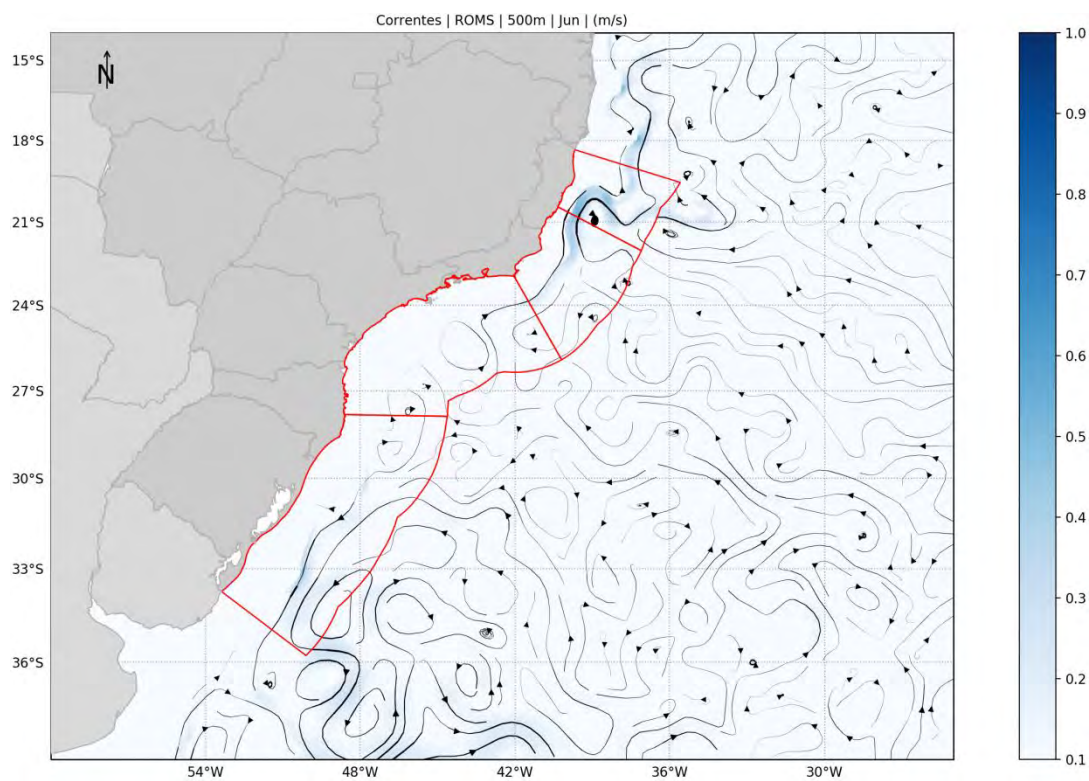


Figura 54: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de junho.

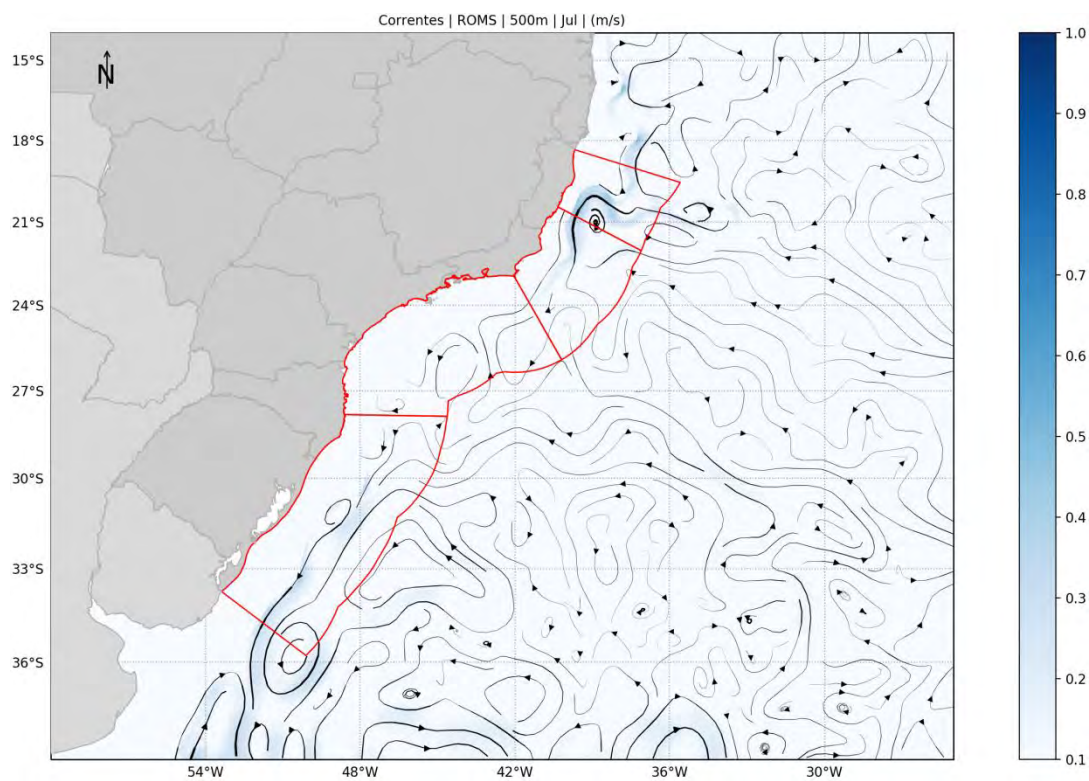


Figura 55: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de julho.

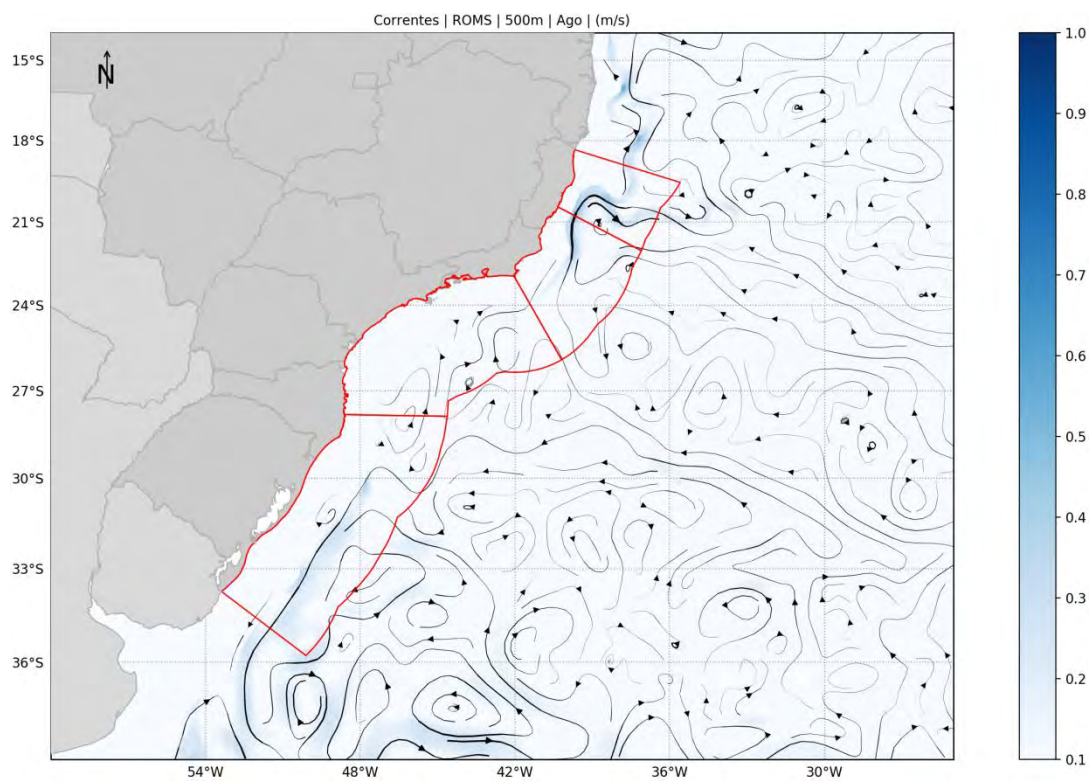


Figura 56: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de agosto.

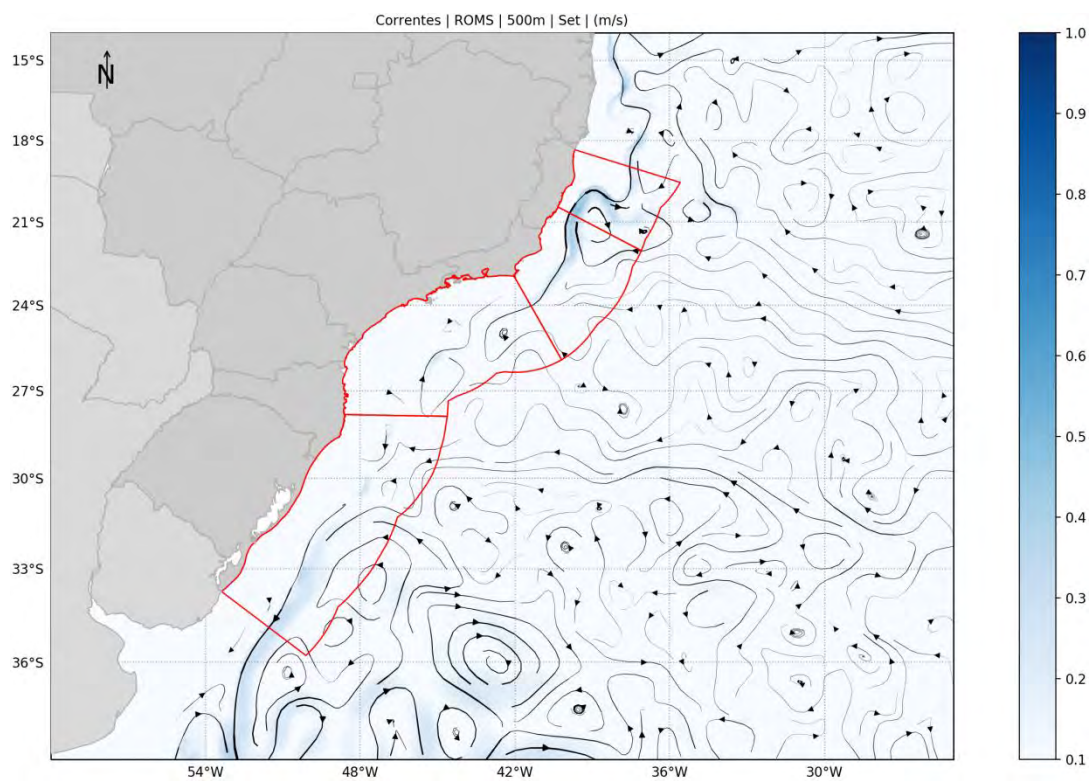


Figura 57: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de setembro.

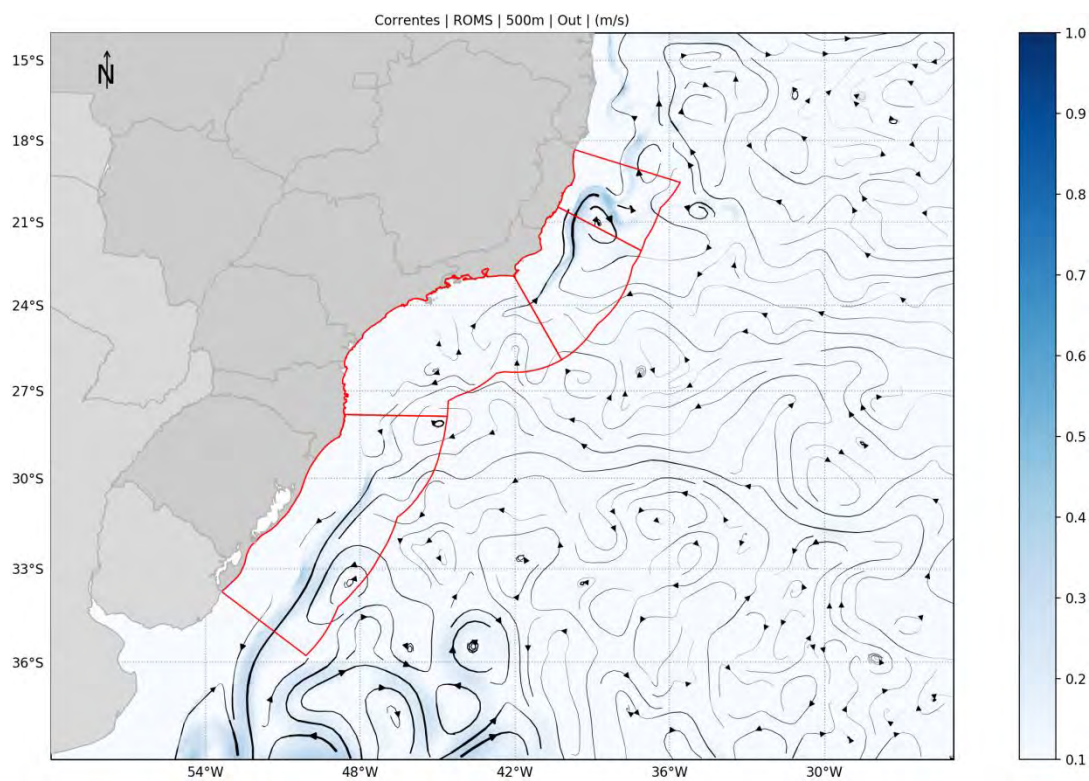


Figura 58: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de outubro.

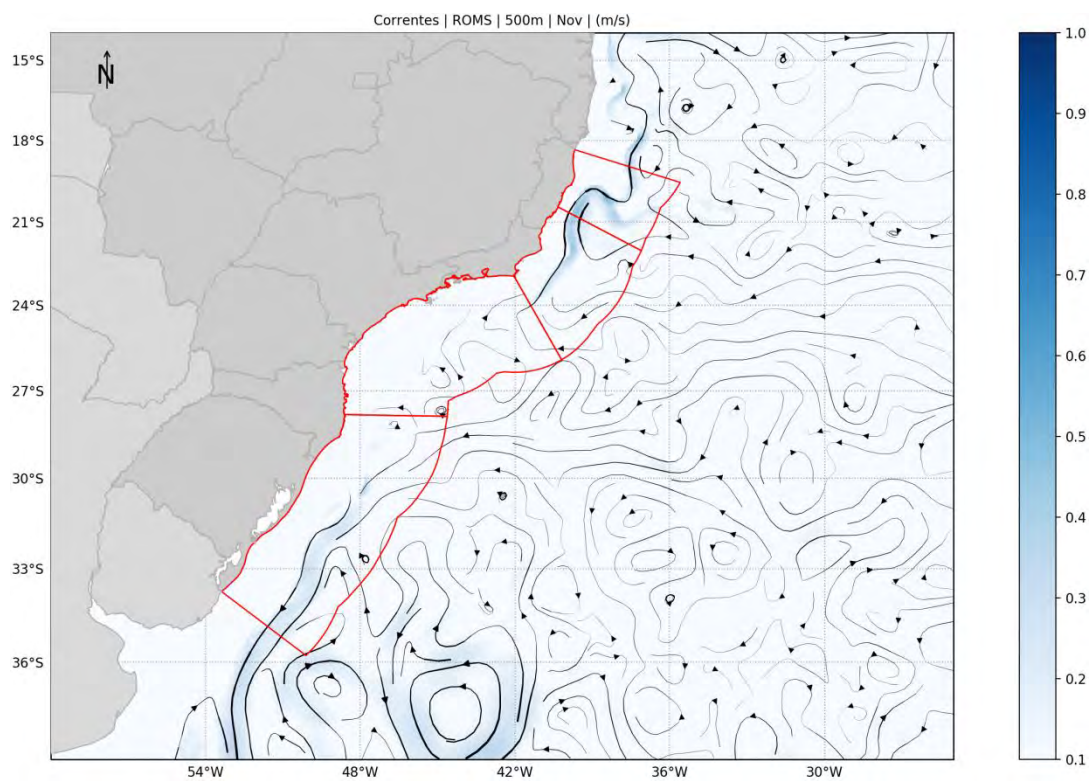


Figura 59: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de novembro.

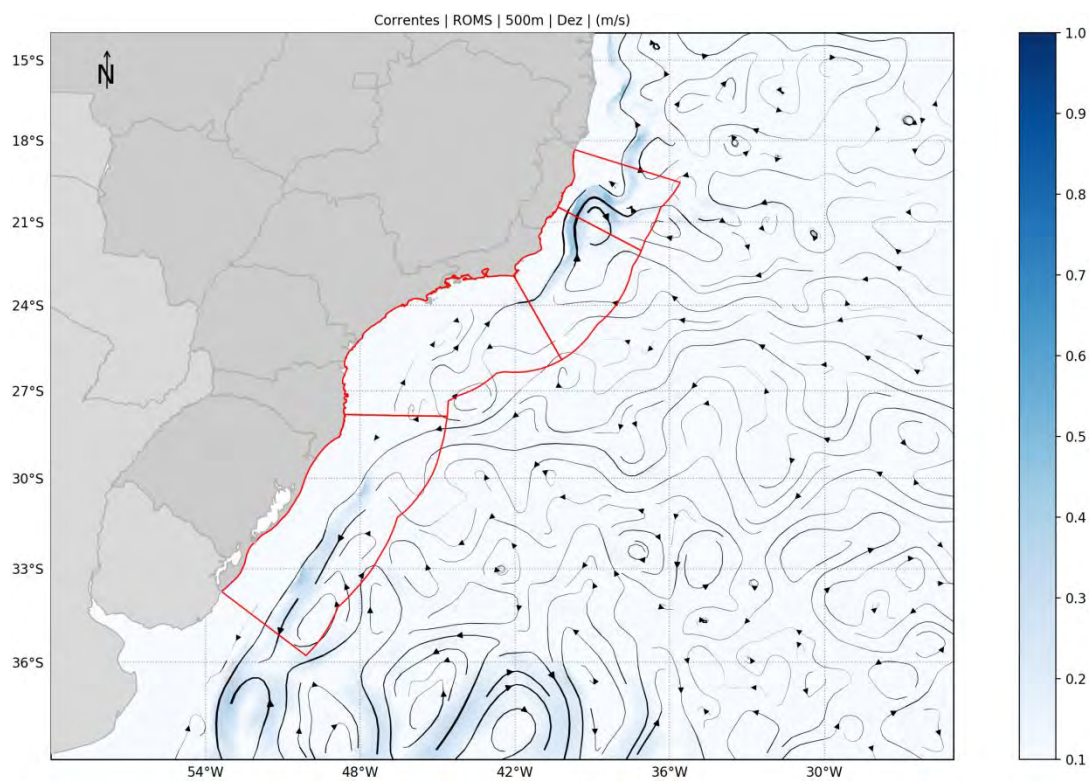


Figura 60: Campo médio de circulação em 500 metros de profundidade para o mês de dezembro.

7.1.4 1.000 metros de profundidade:

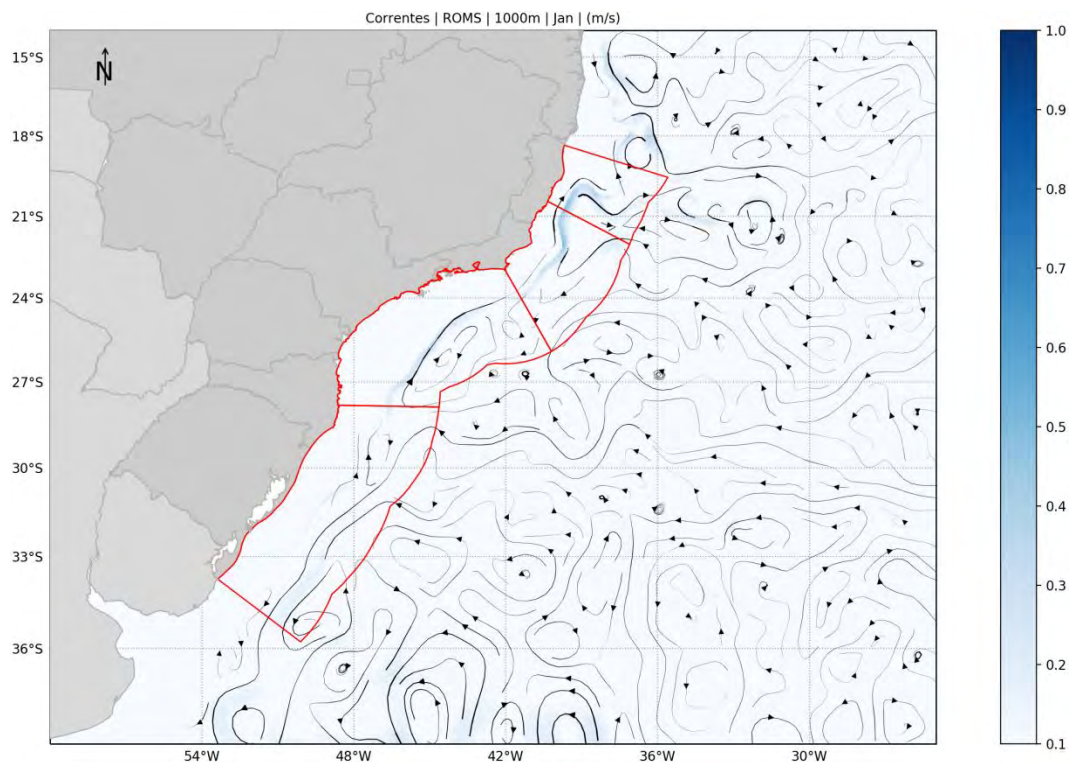


Figura 61: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de janeiro.

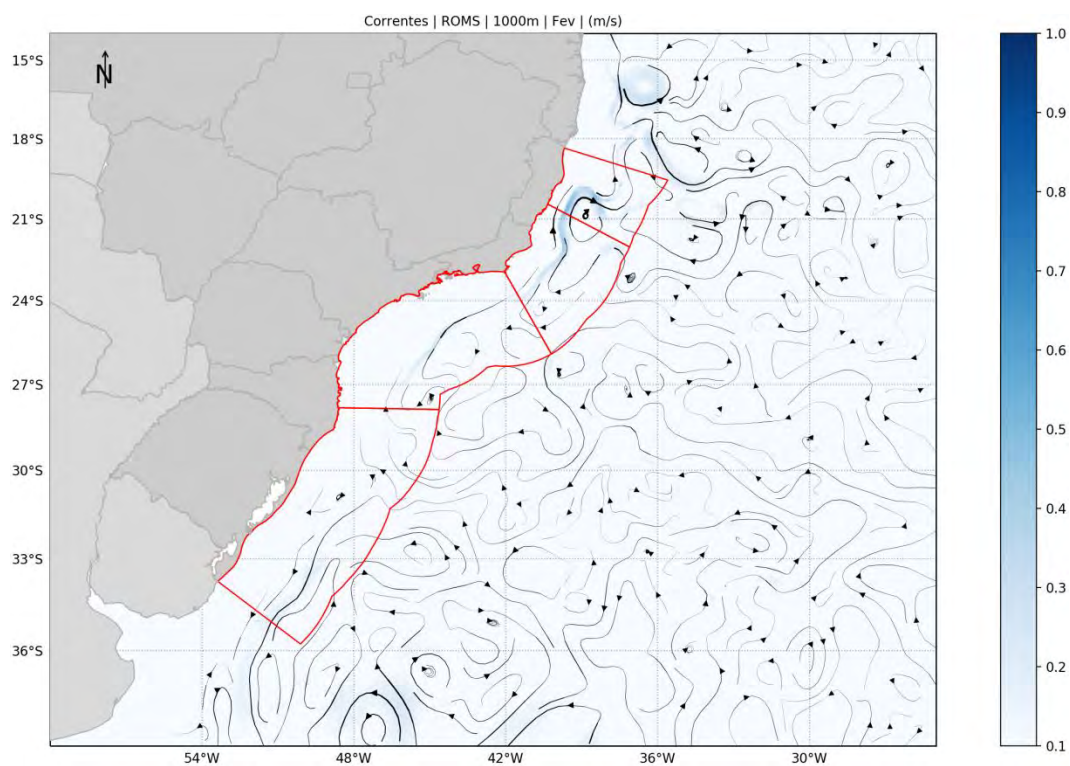


Figura 62: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de fevereiro.

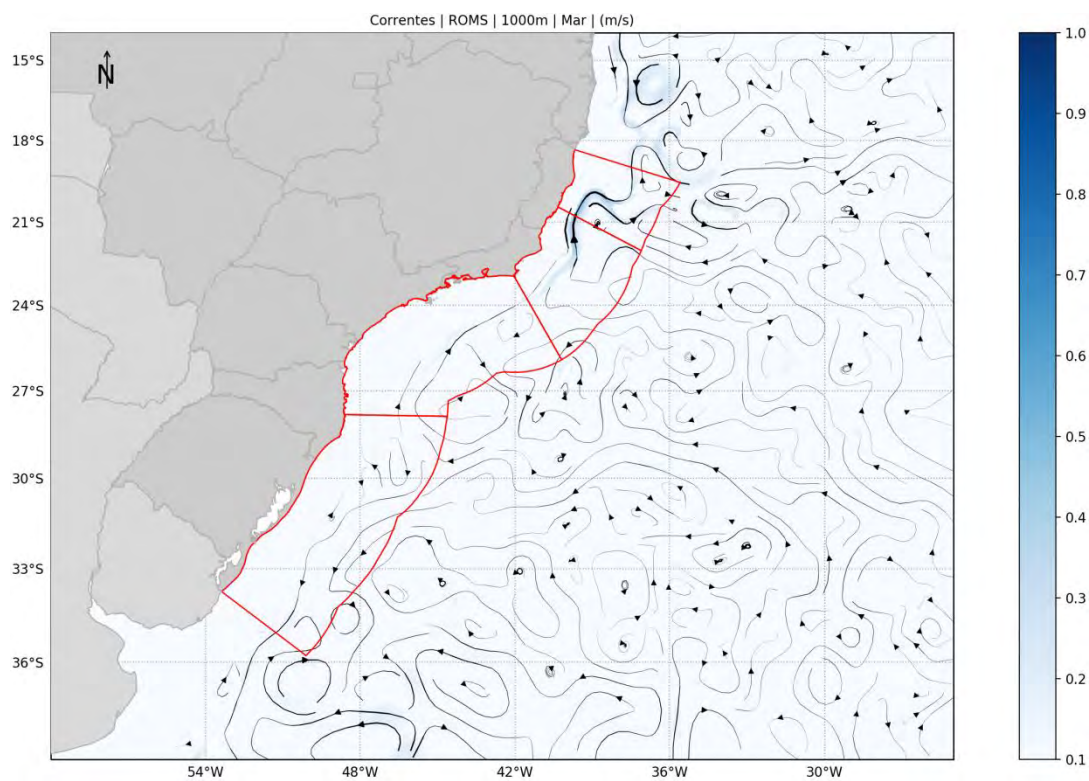


Figura 63: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de março.

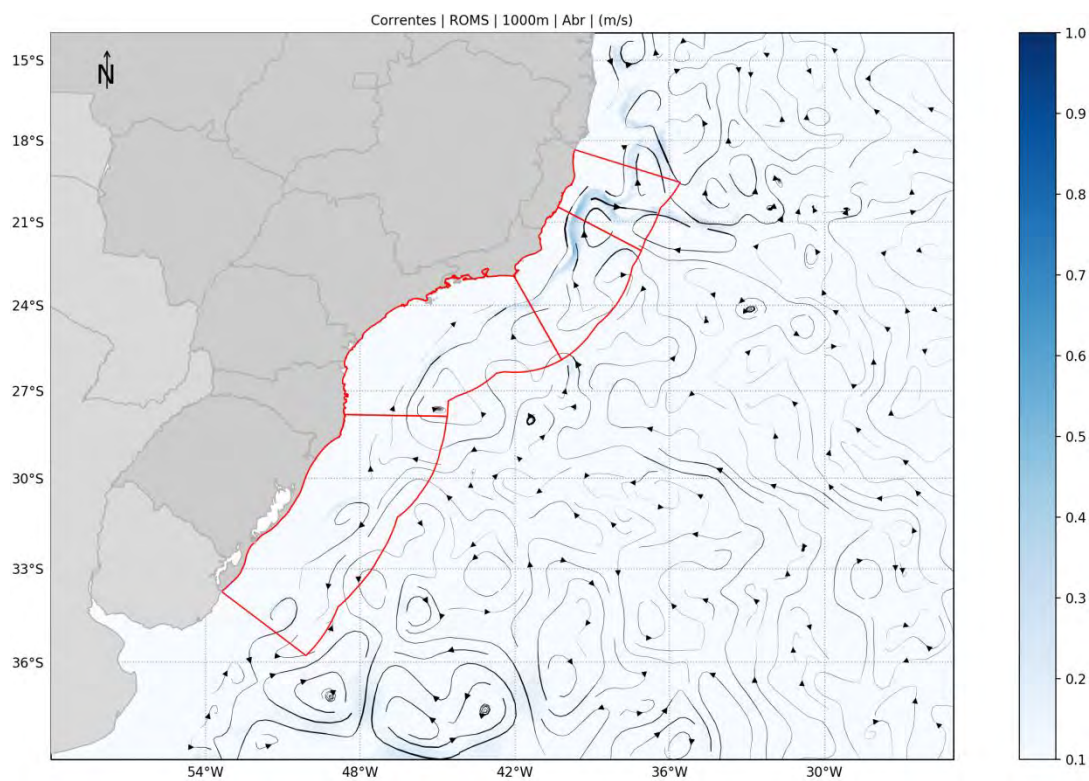


Figura 64: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de abril.

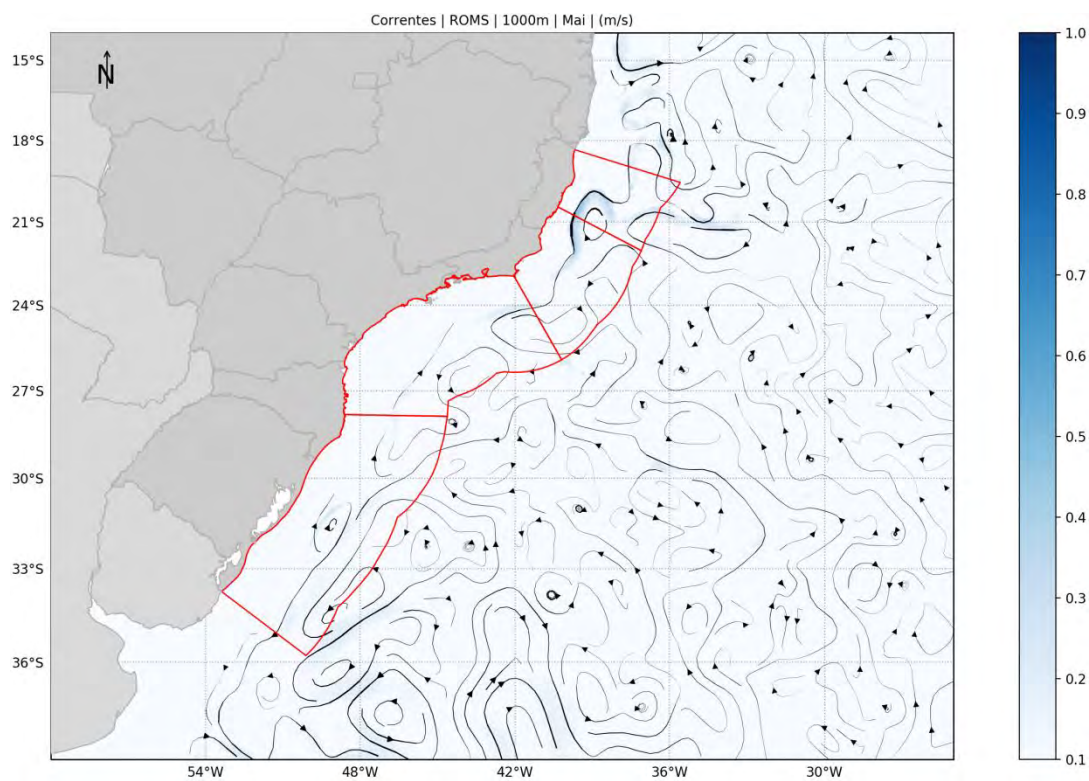


Figura 65: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de maio.

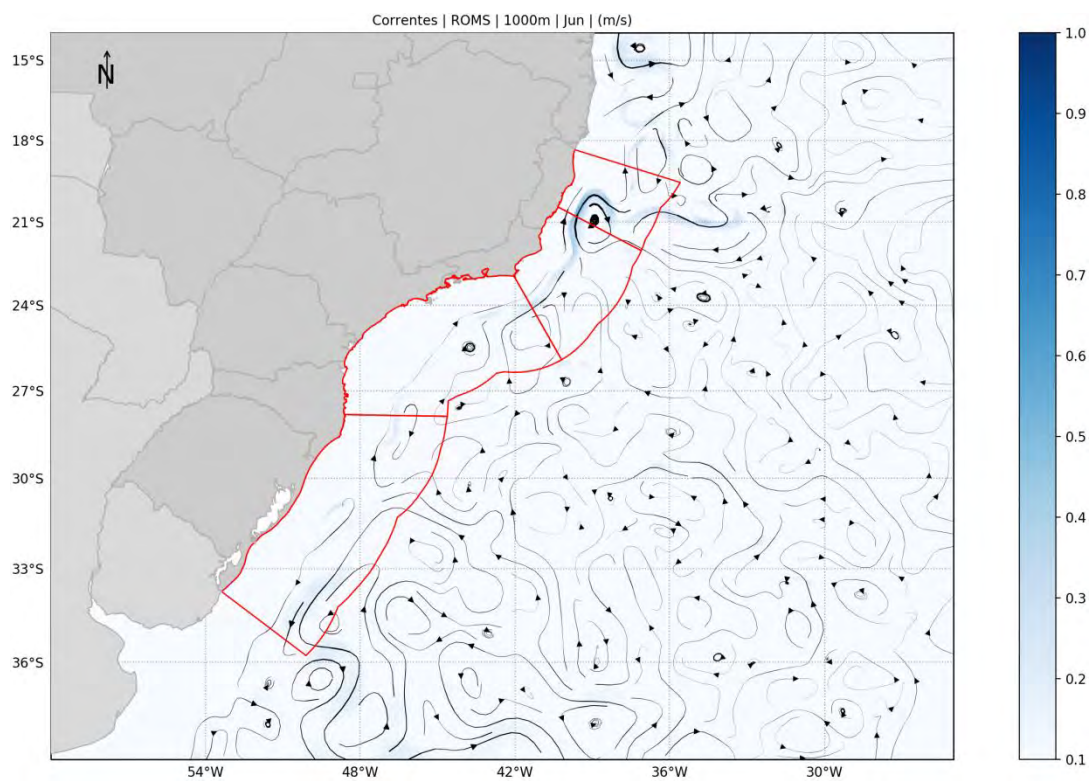


Figura 66: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de junho.

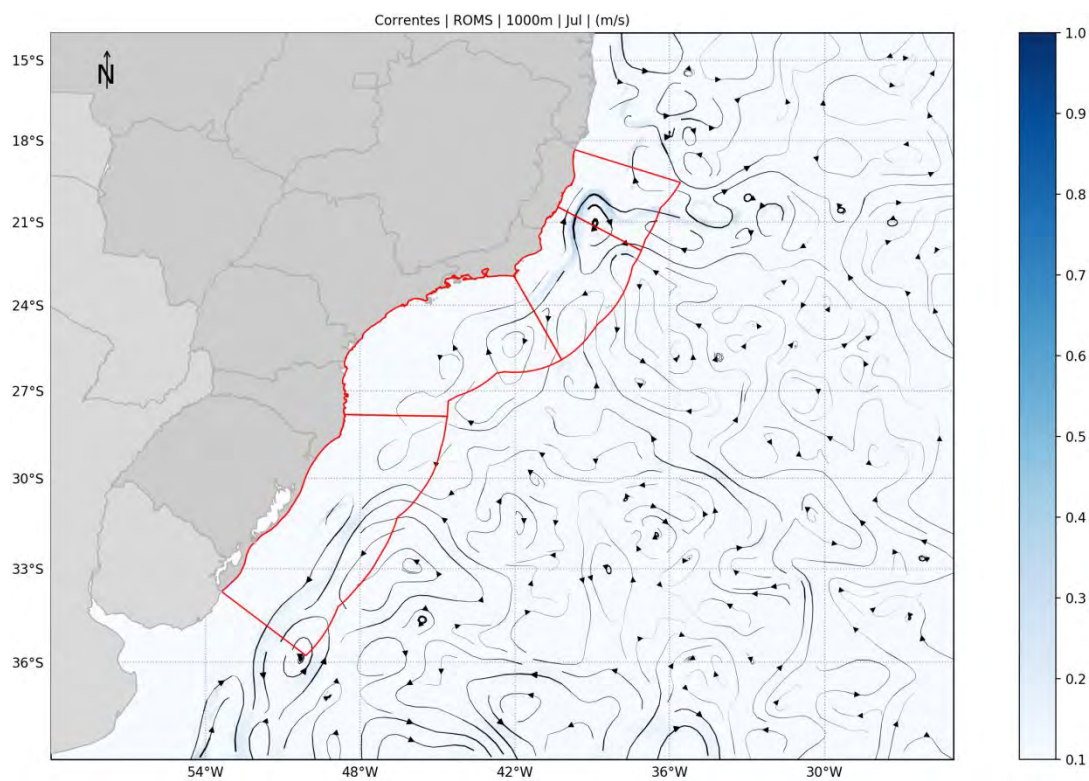


Figura 67: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de julho.

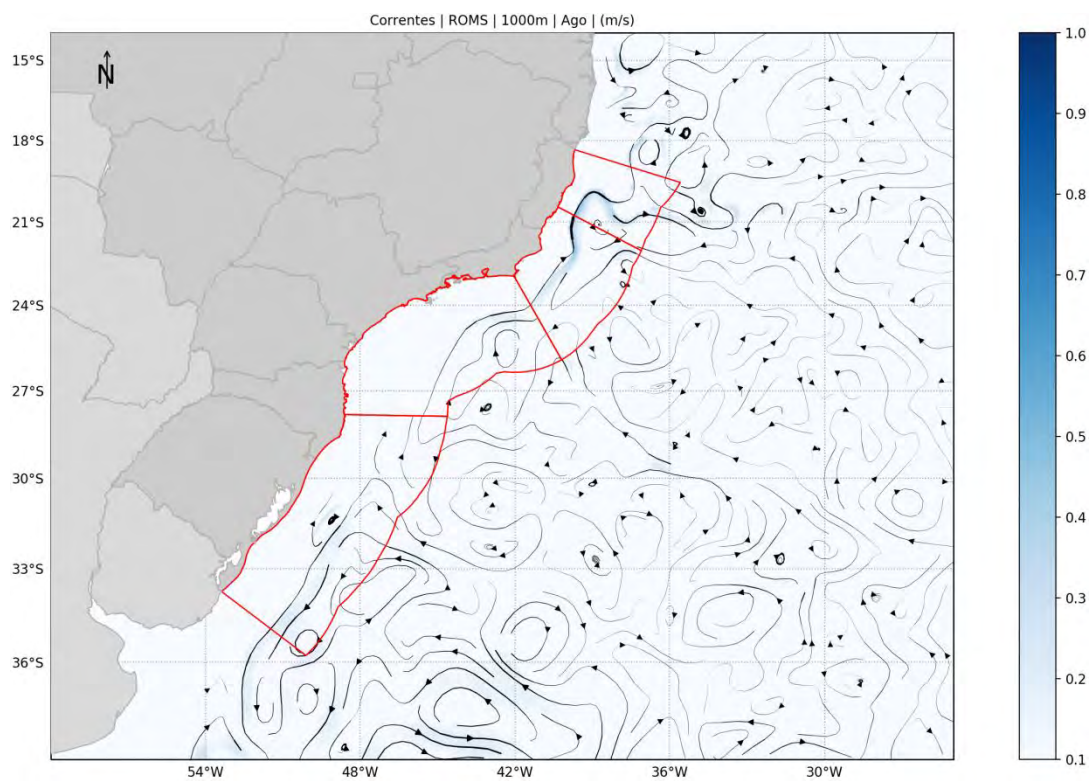


Figura 68: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de agosto.

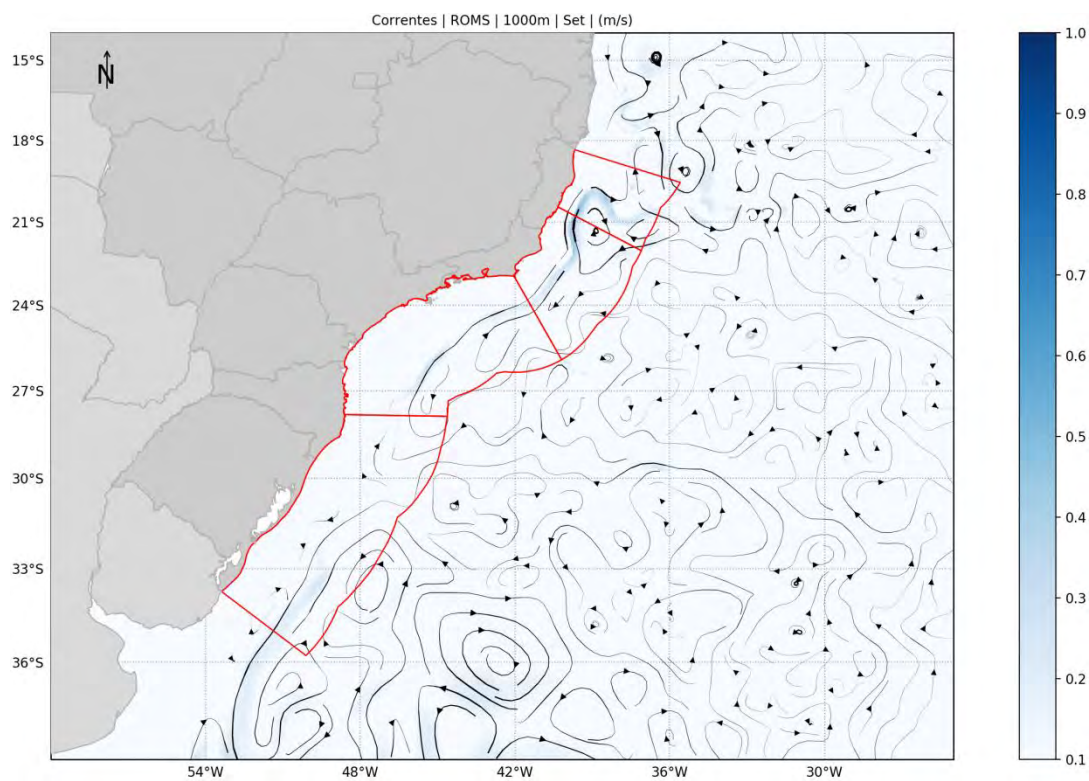


Figura 69: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de setembro.

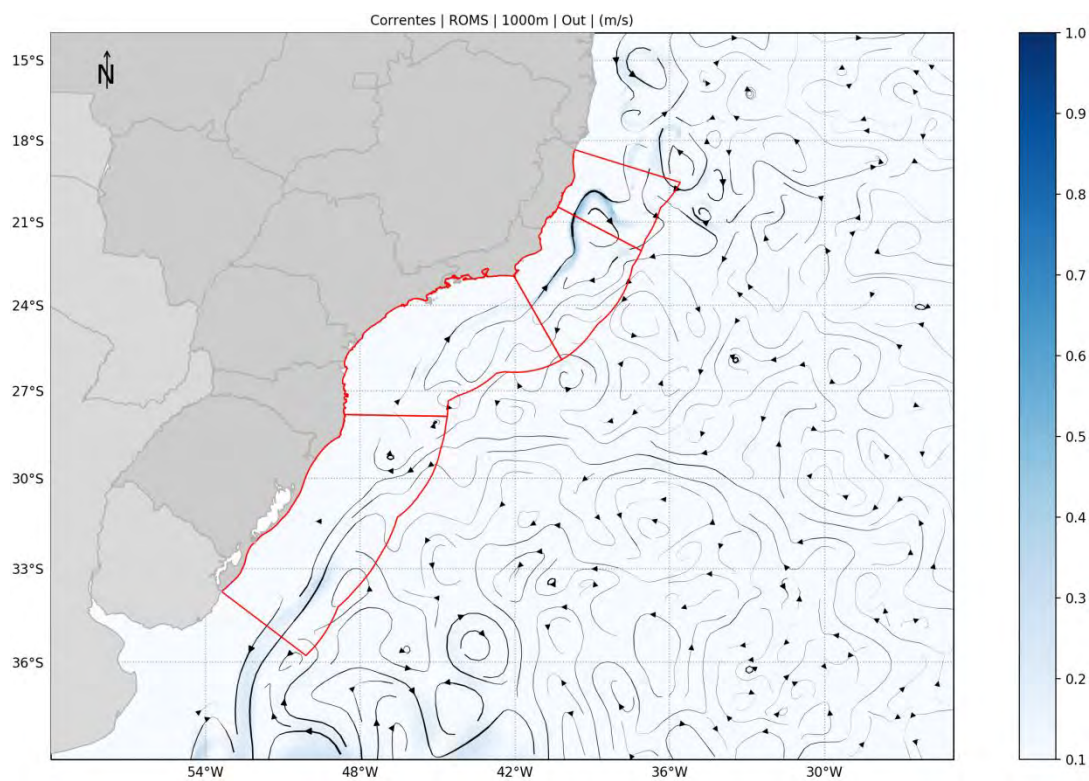


Figura 70: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de outubro.

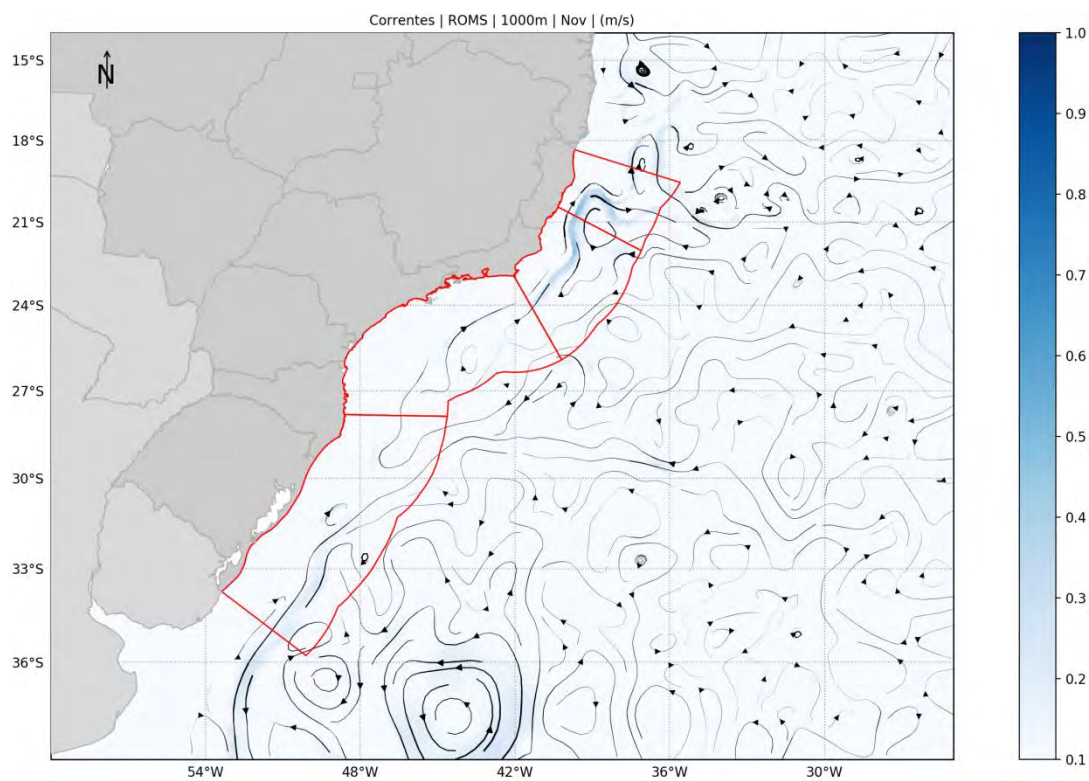


Figura 71: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de novembro.

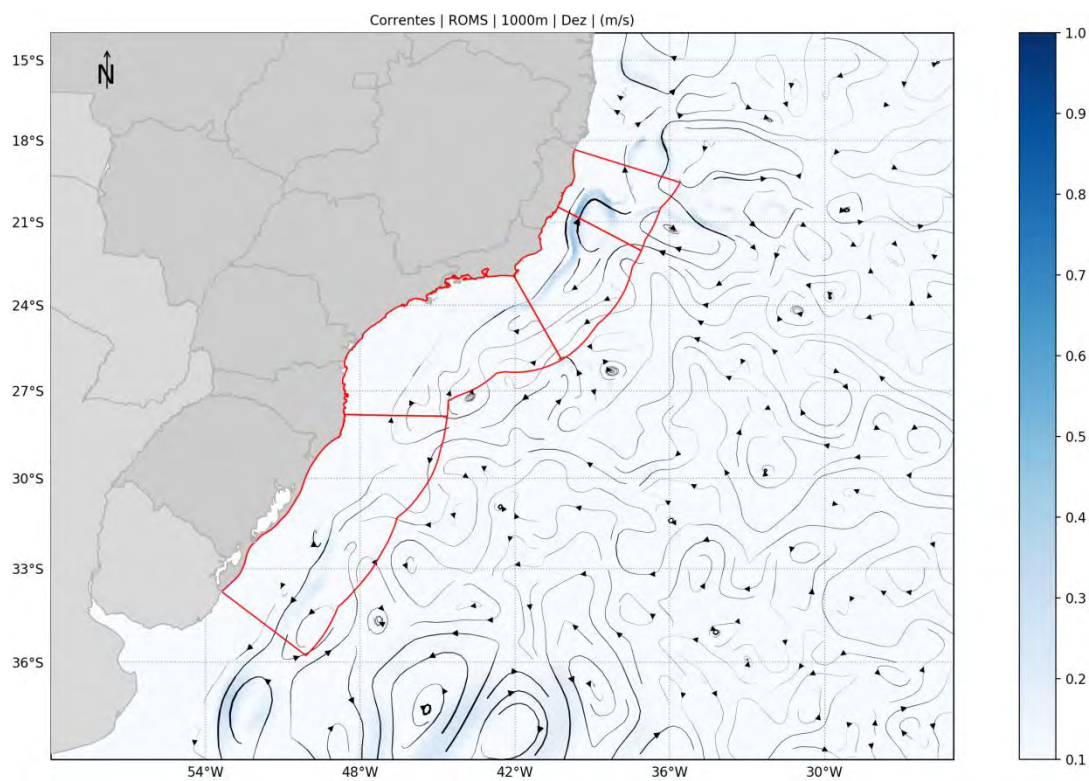


Figura 72: Campo médio de circulação em 1.000 metros de profundidade para o mês de dezembro.

7.1.5 2.000 metros de profundidade:

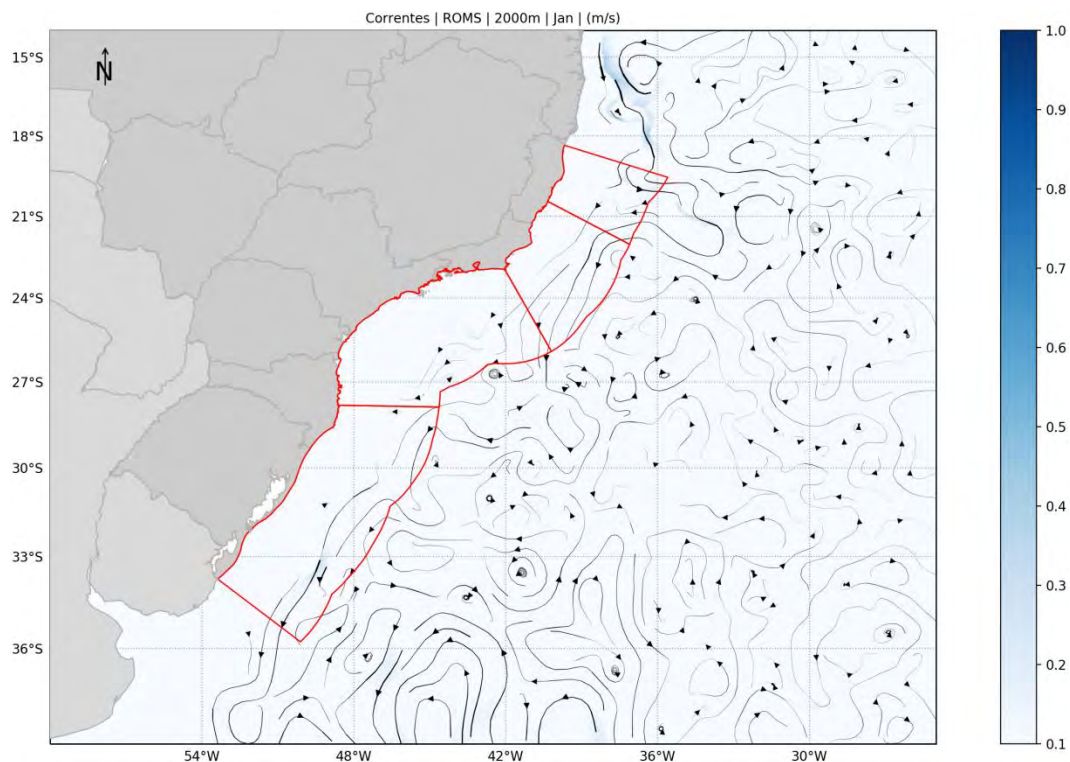


Figura 73: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de janeiro.

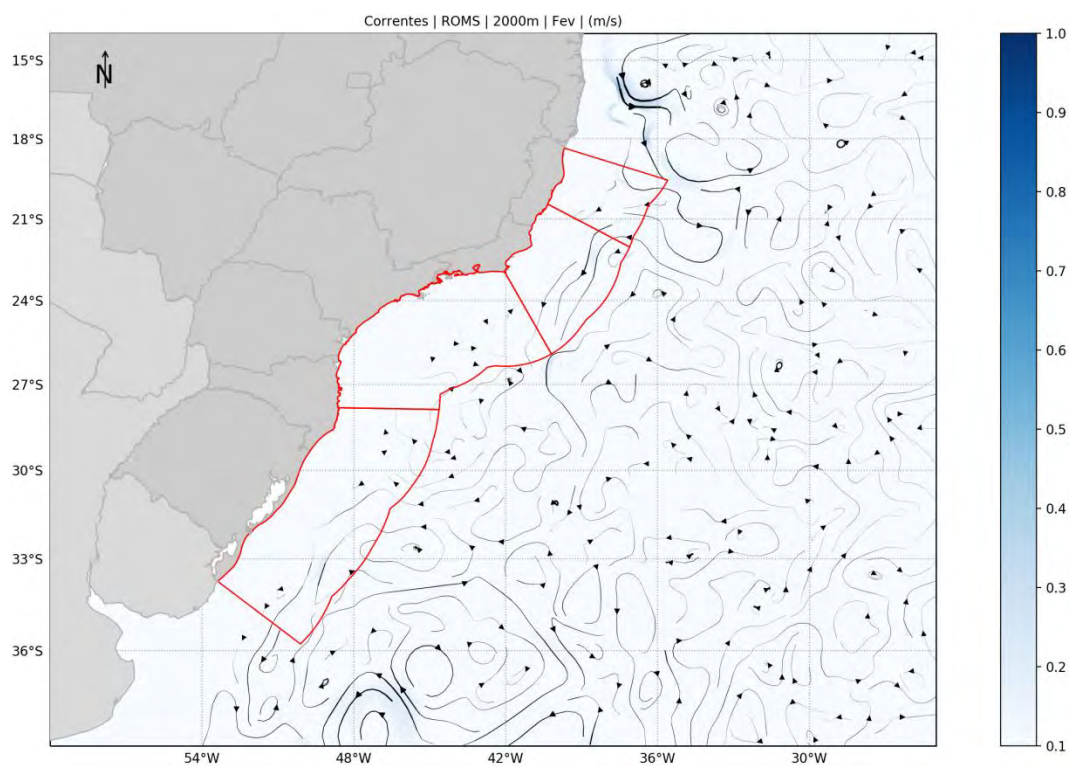


Figura 74: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de fevereiro.

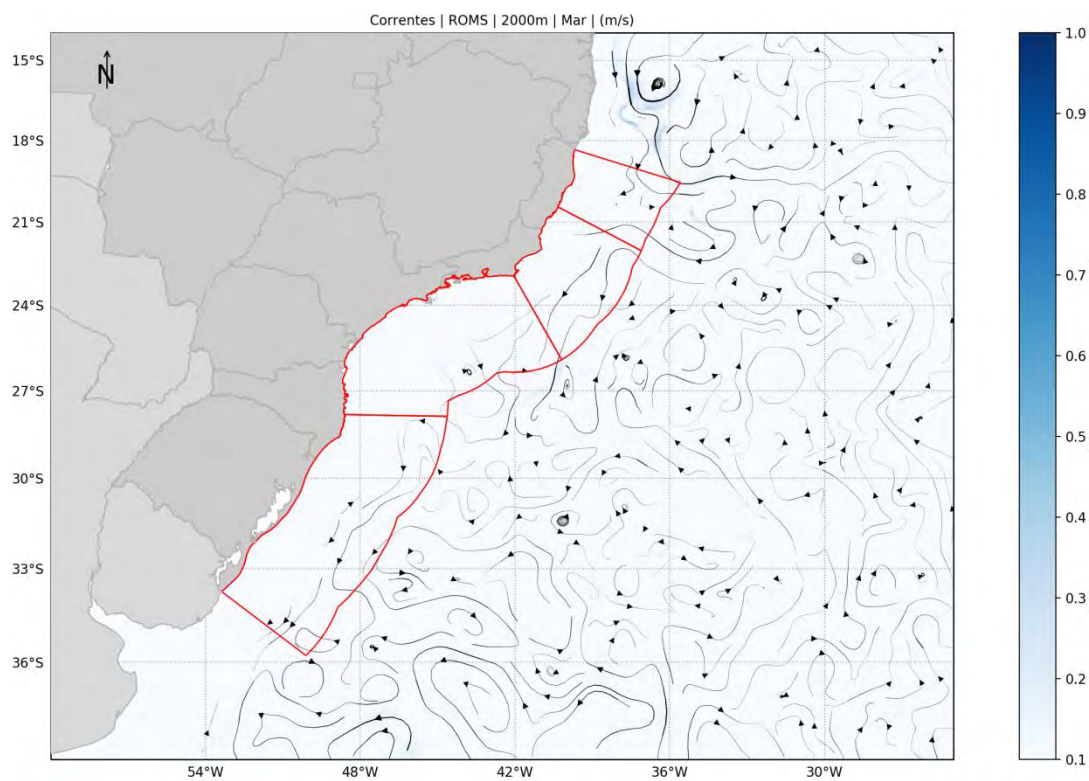


Figura 75: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de março.

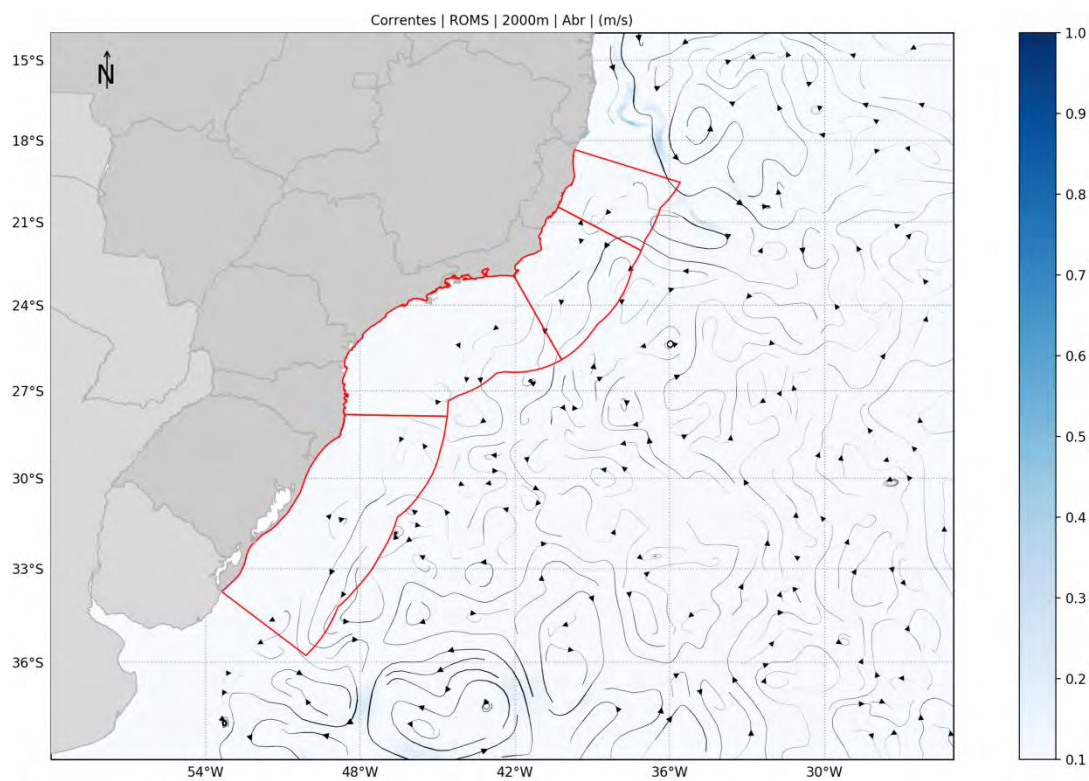


Figura 76: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de abril.

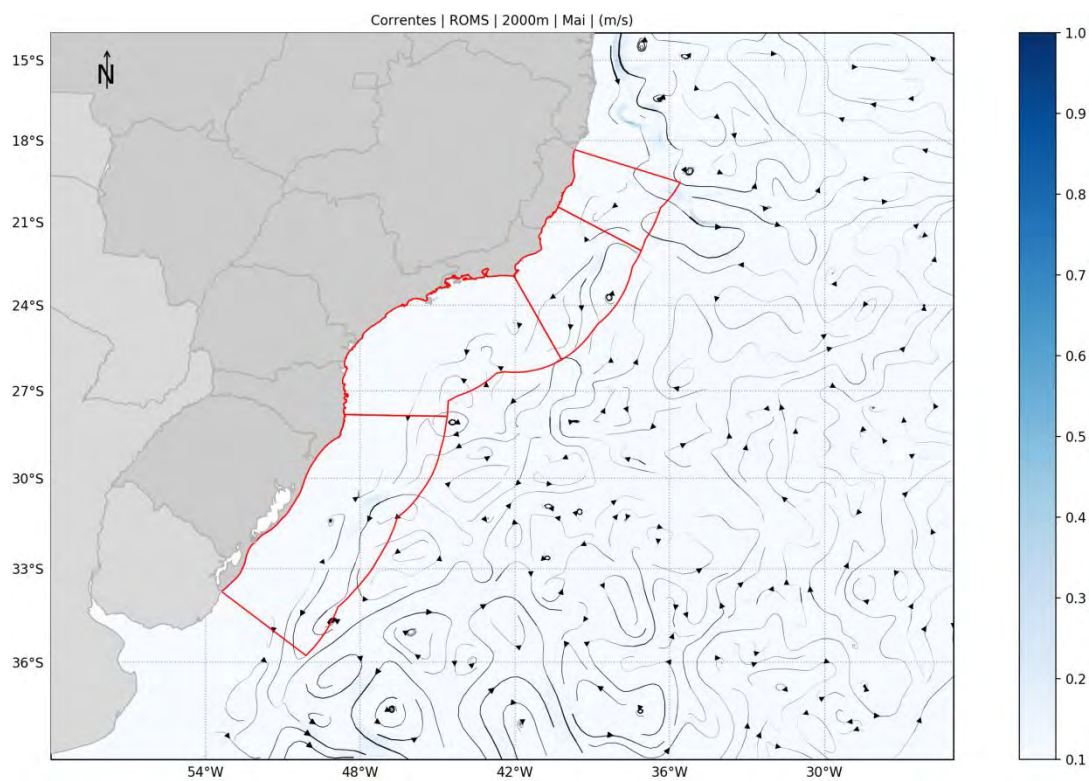


Figura 77: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de maio.

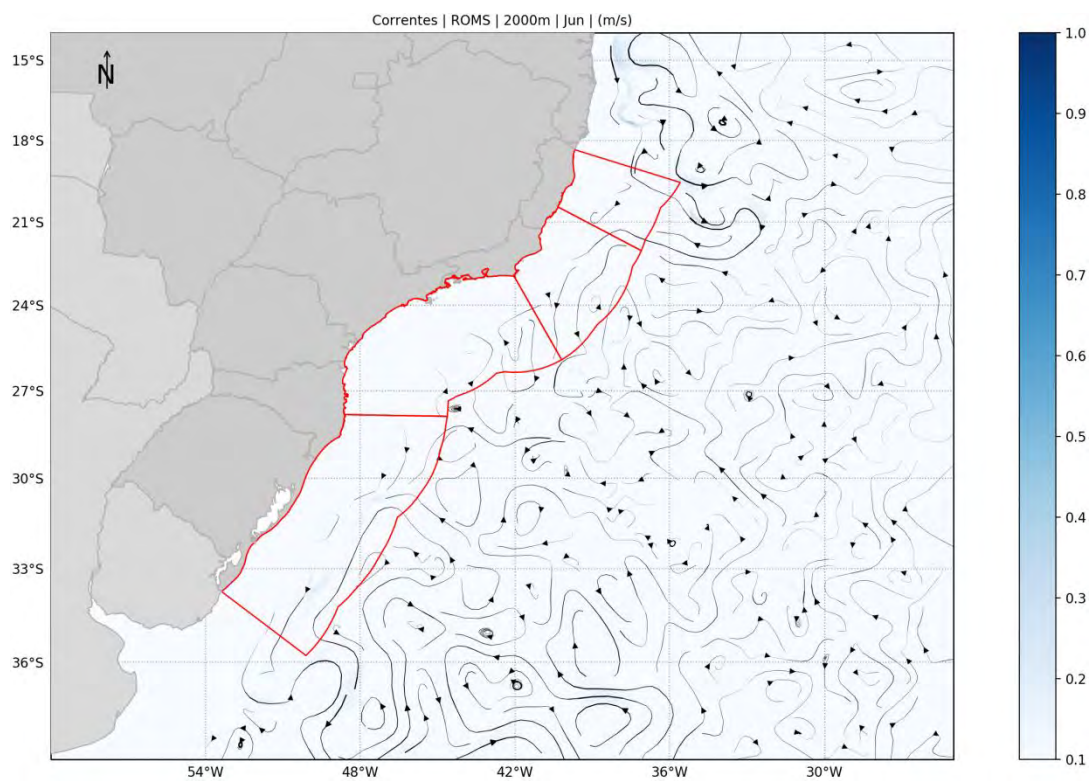


Figura 78: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de junho.

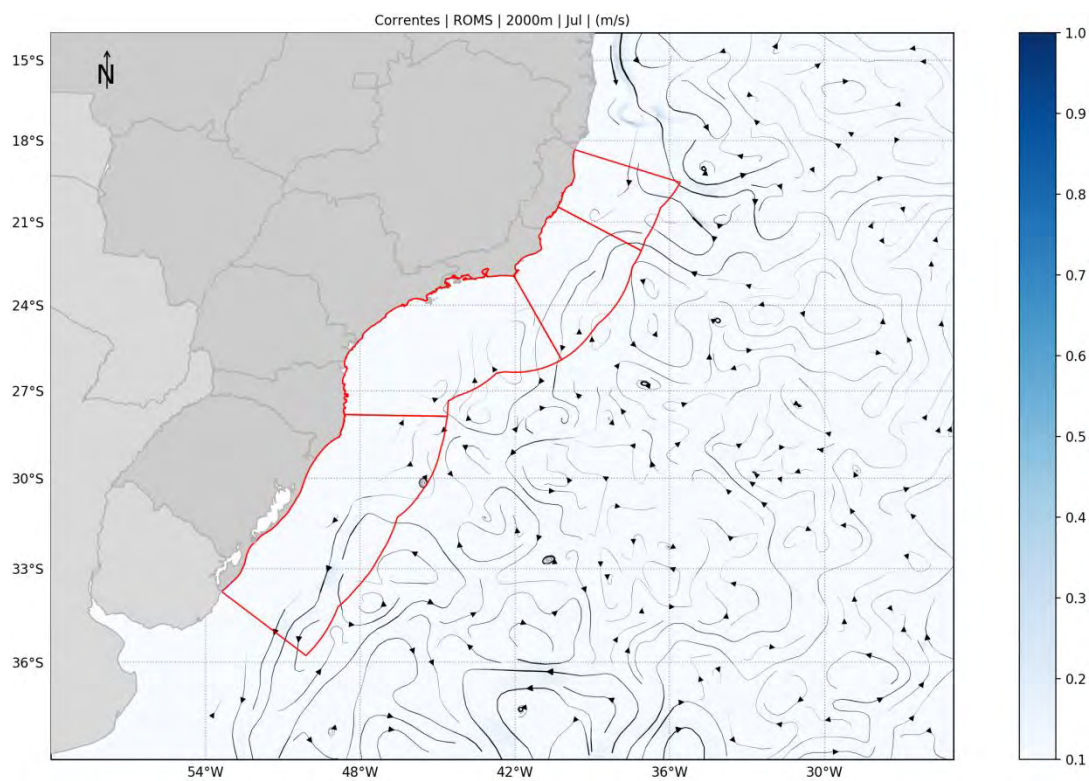


Figura 79: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de julho.

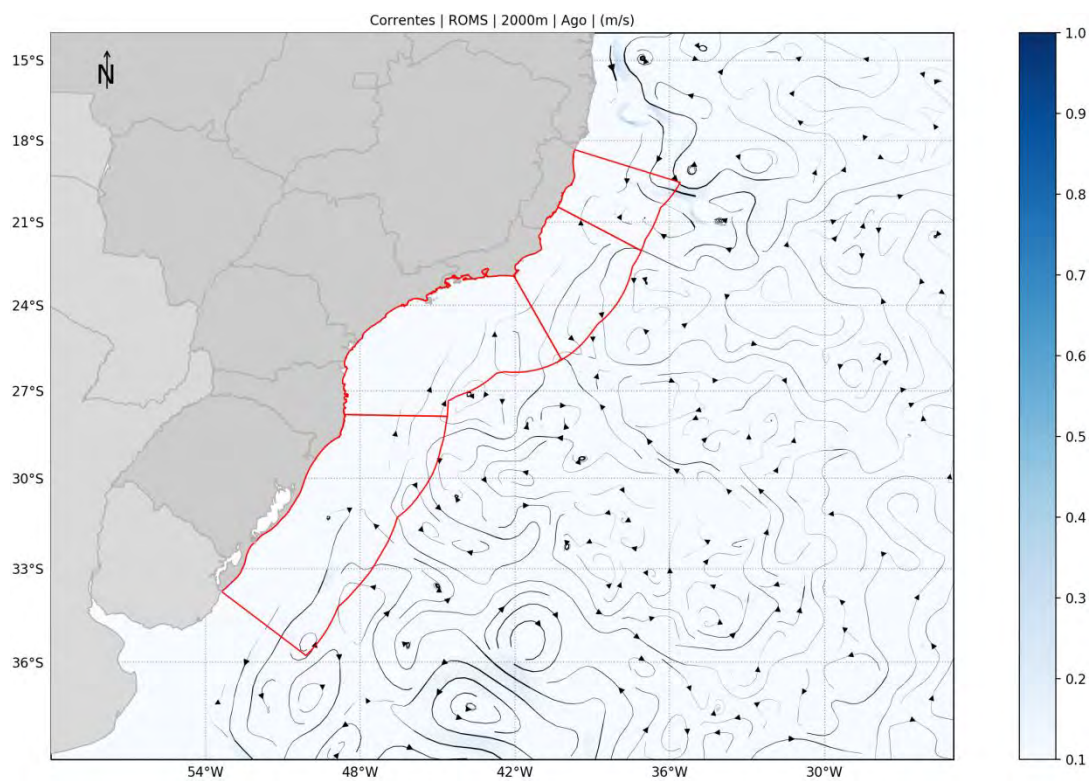


Figura 80: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de agosto.

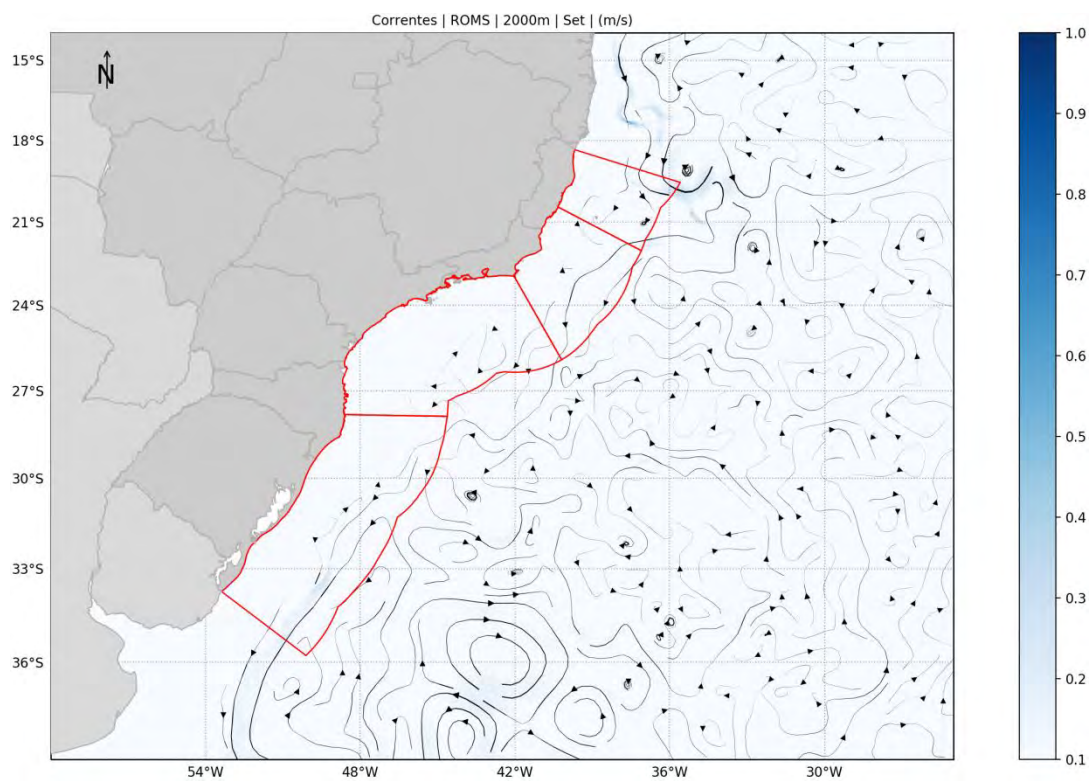


Figura 81: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de setembro.

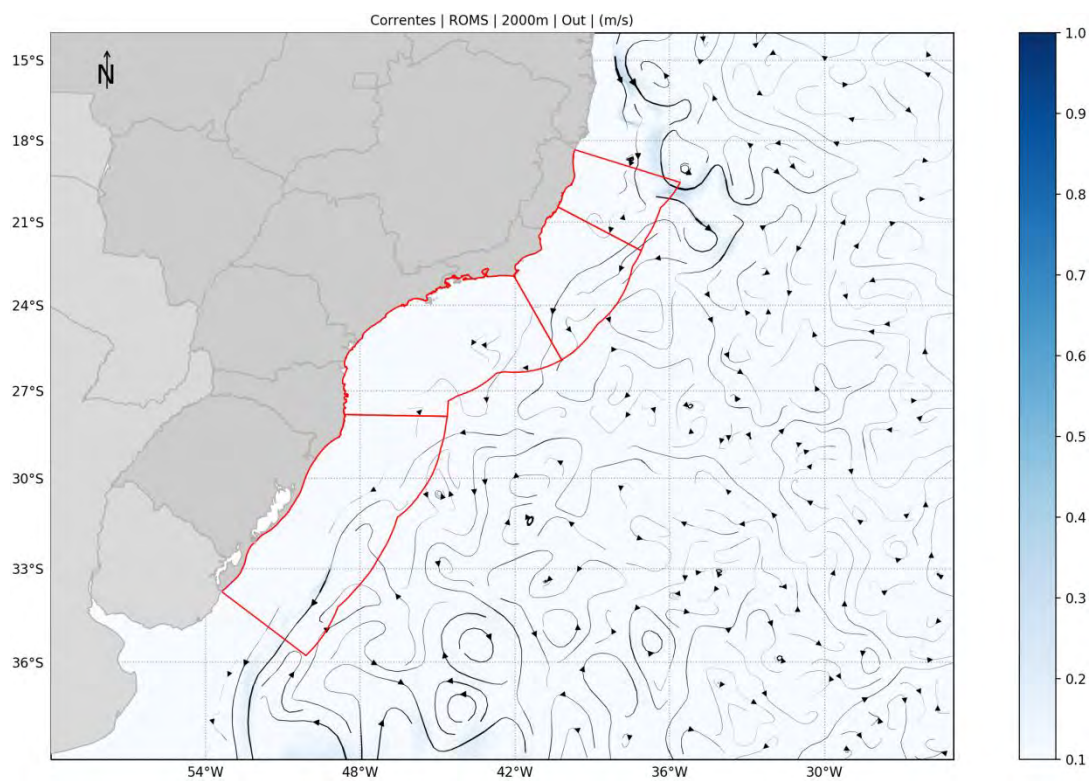


Figura 82: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de outubro.

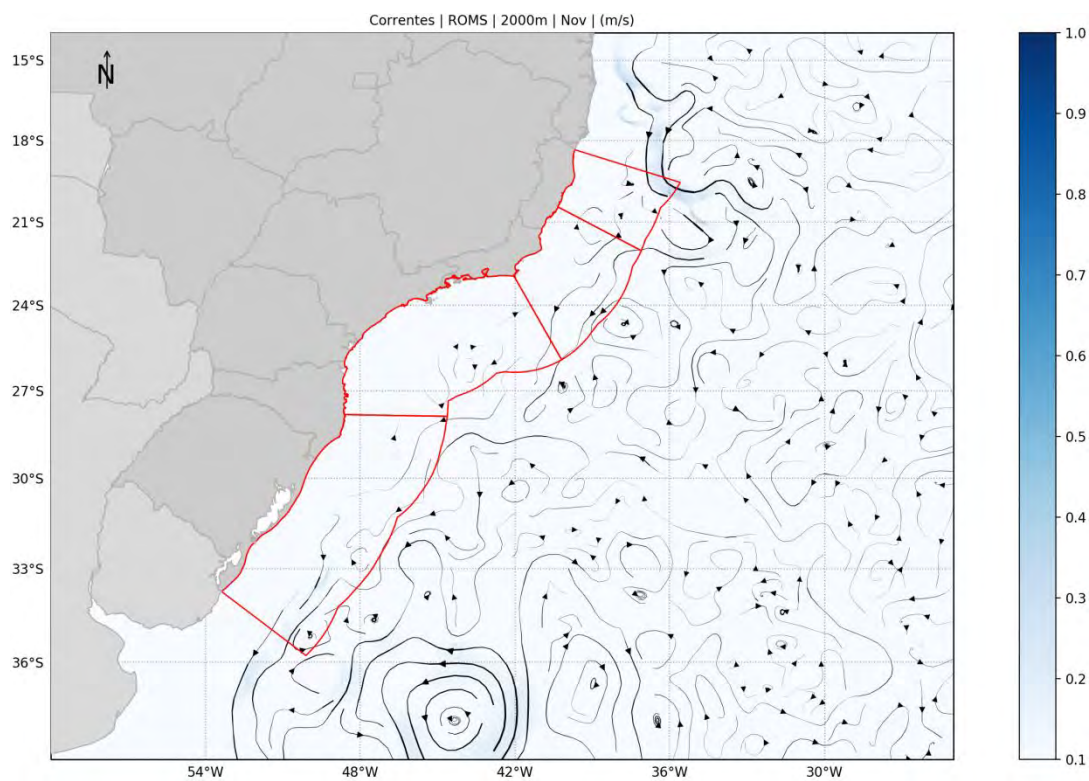


Figura 83: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de novembro.

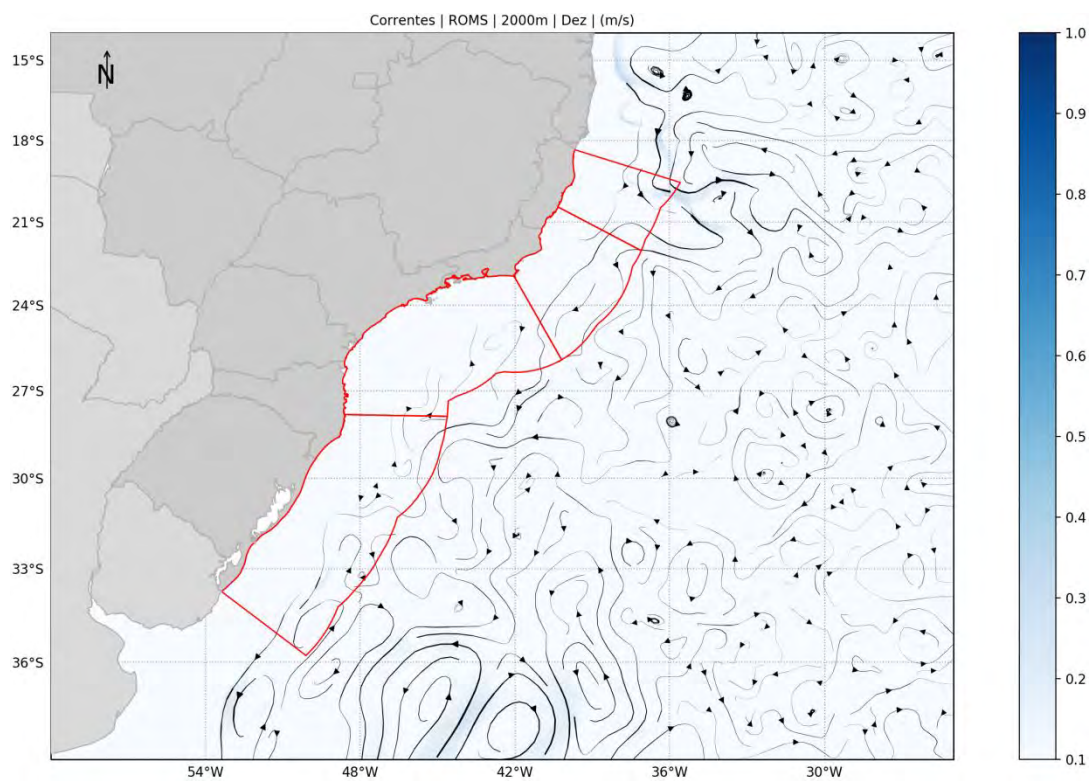


Figura 84: Campo médio de circulação em 2.000 metros de profundidade para o mês de dezembro.

7.2. Seções verticais

Em complementação aos campos mensais superficiais, a seguir, são apresentadas seções verticais mensais para duas radiais no domínio de modelagem, a primeira localizada na Bacia de Santos (fixada em longitude 42,33°W e estendendo de 23,64°S a 24,67°S) e a segunda na Bacia de Campos (fixada em latitude de 23,04°S e estendendo de longitude de 40,93°W a 40,45°W).

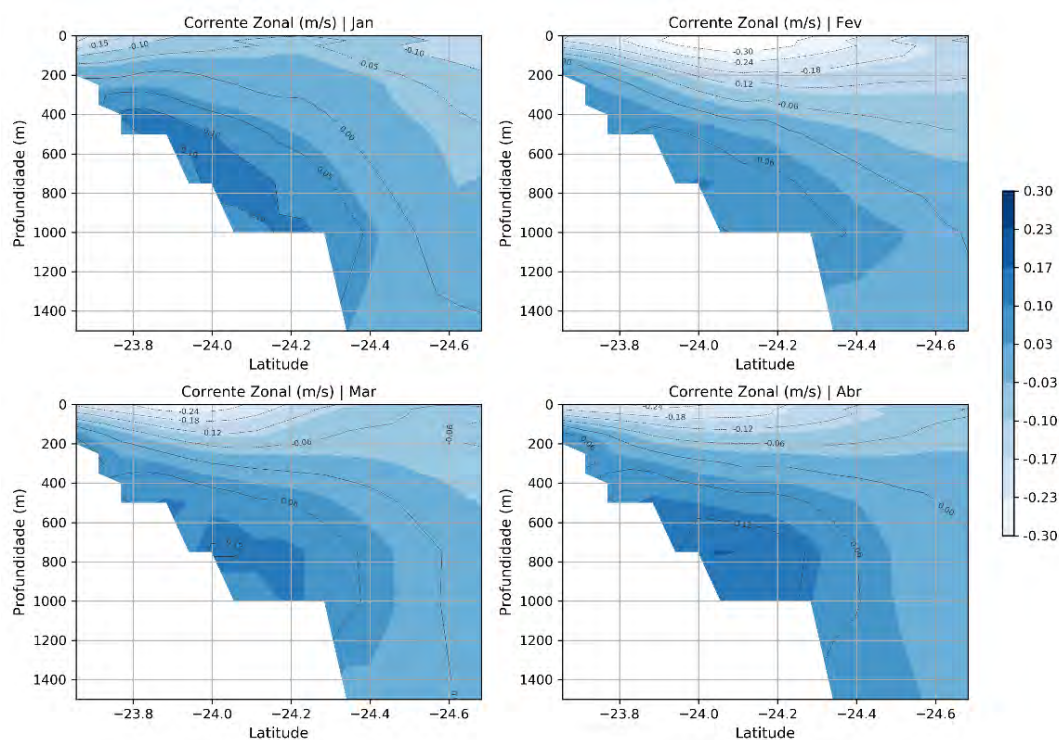


Figura 85: Seção vertical com velocidade zonal média para radial na Bacia de Santos para os meses de janeiro a abril.

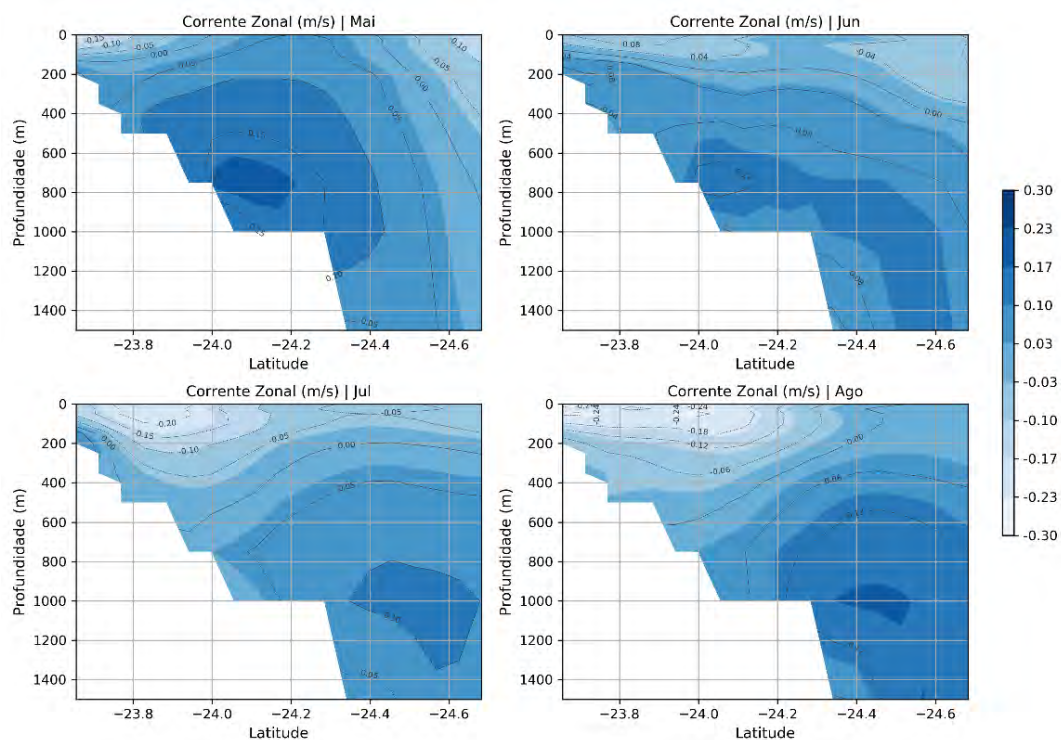


Figura 86: Seção vertical com velocidade zonal média para radial na Bacia de Santos para os meses de maio a agosto.

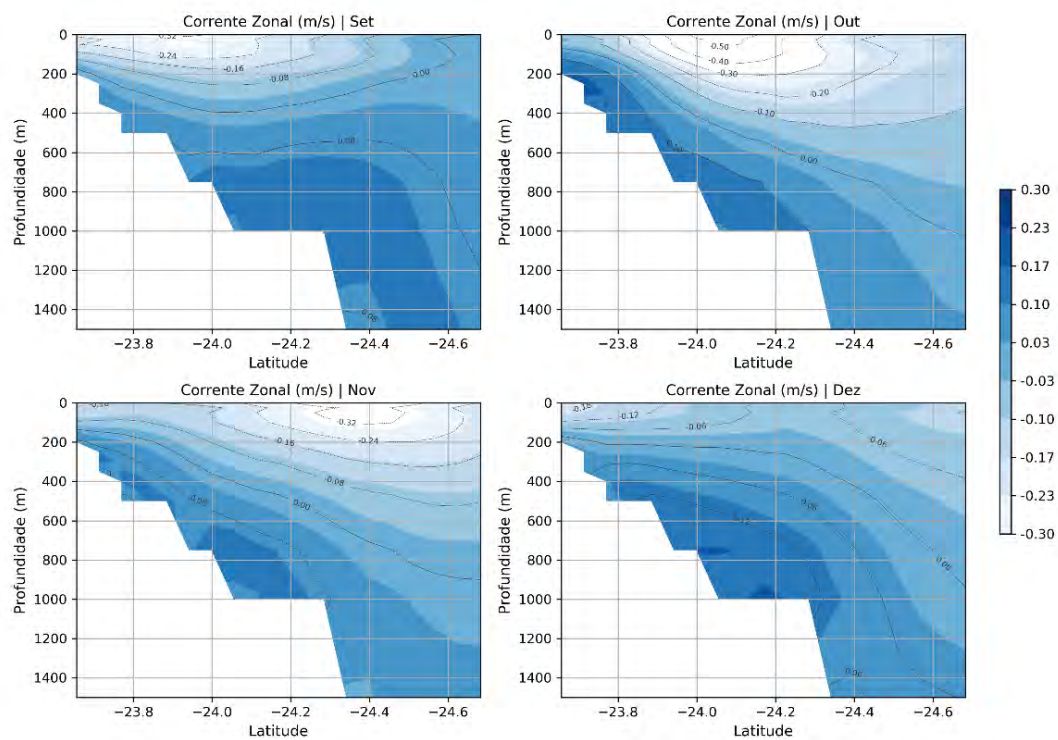


Figura 87: Seção vertical com velocidade zonal média para radial na Bacia de Santos para os meses de setembro a dezembro.

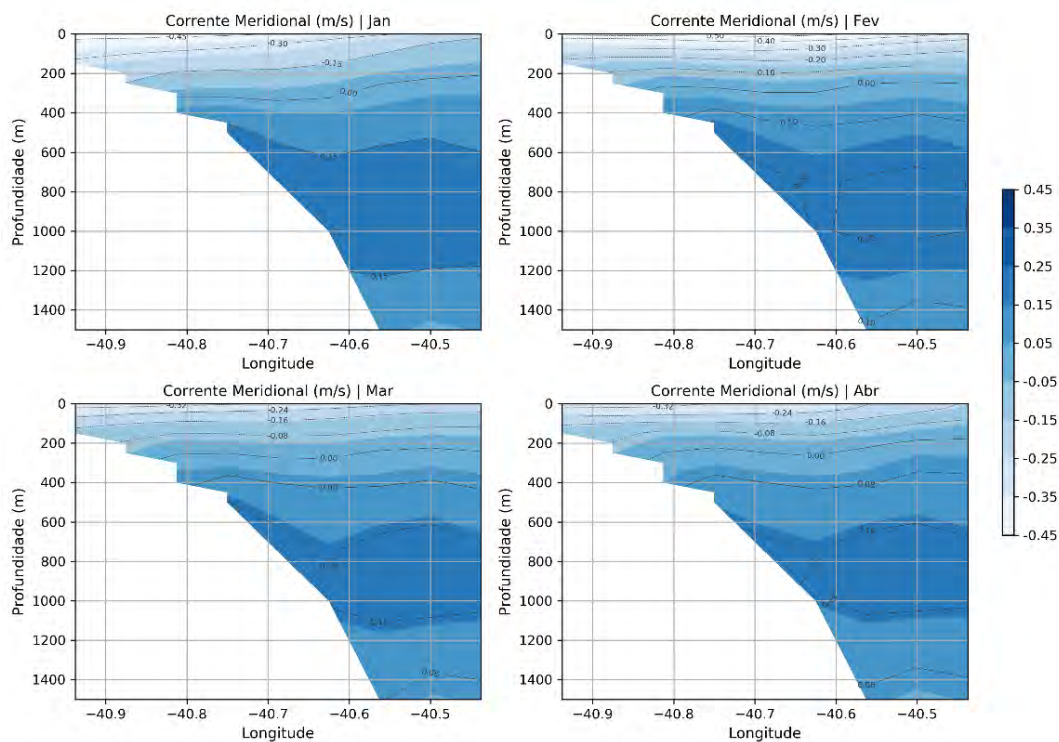


Figura 88: Seção vertical com velocidade zonal média para radial na Bacia de Campos para os meses de janeiro a abril.

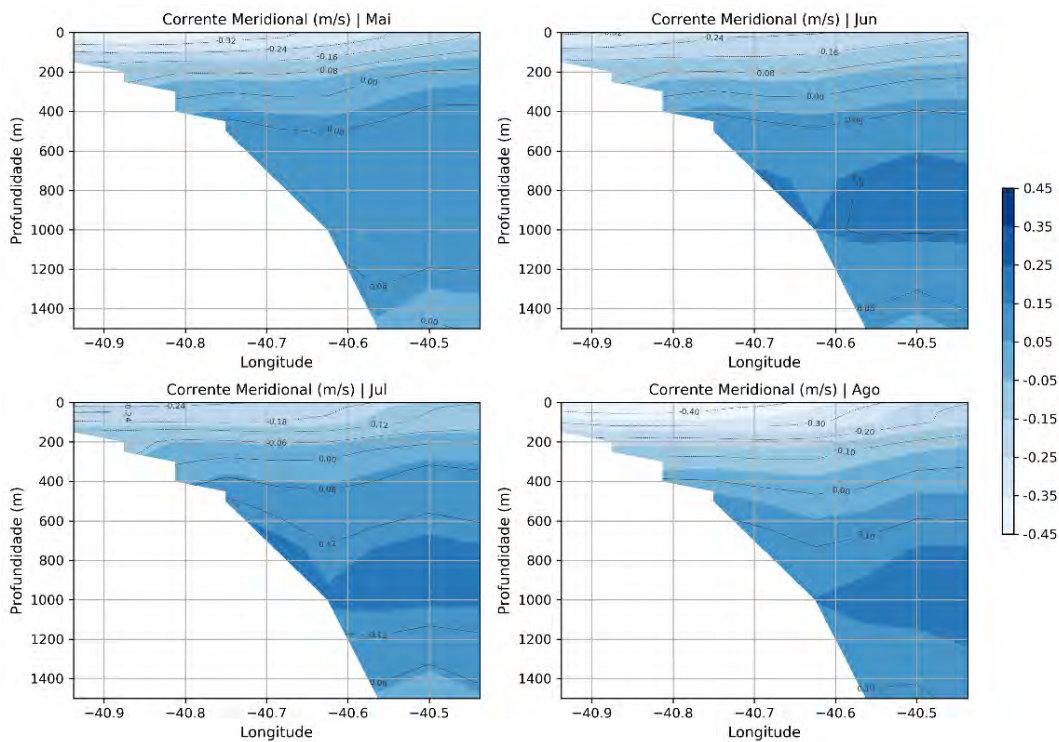


Figura 89: Seção vertical com velocidade zonal média para radial na Bacia de Campos para os meses de maio a agosto.

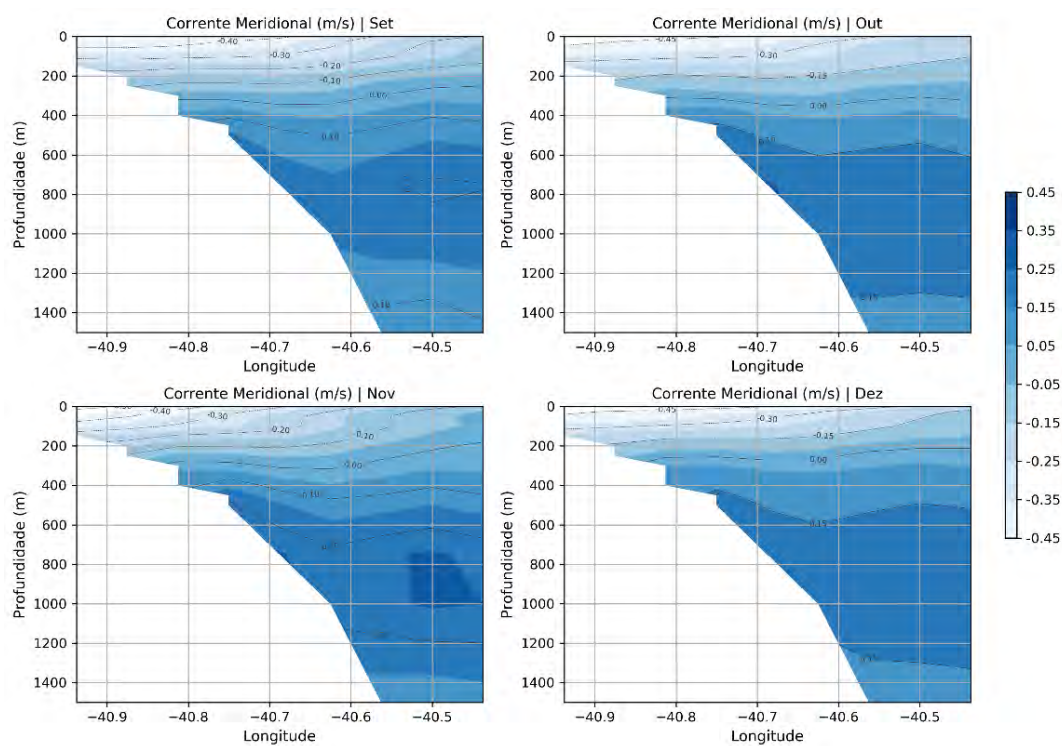


Figura 90: Seção vertical com velocidade zonal média para radial na Bacia de Campos para os meses de setembro a dezembro.

7.3. Rosas mensais de corrente

Ainda em adição aos resultados obtidos, a seguir são apresentadas as rosas de correntes mensais e tabelas de direção e intensidade em diferentes profundidades para três pontos do domínio de modelagem: Ponto 1 (~ 2.600 m) e Ponto 2 (~ 1.000 m) na Bacia de Santos; e o Ponto 3 (> 3.000 m) localizado na Bacia de Campos (Figura 91).

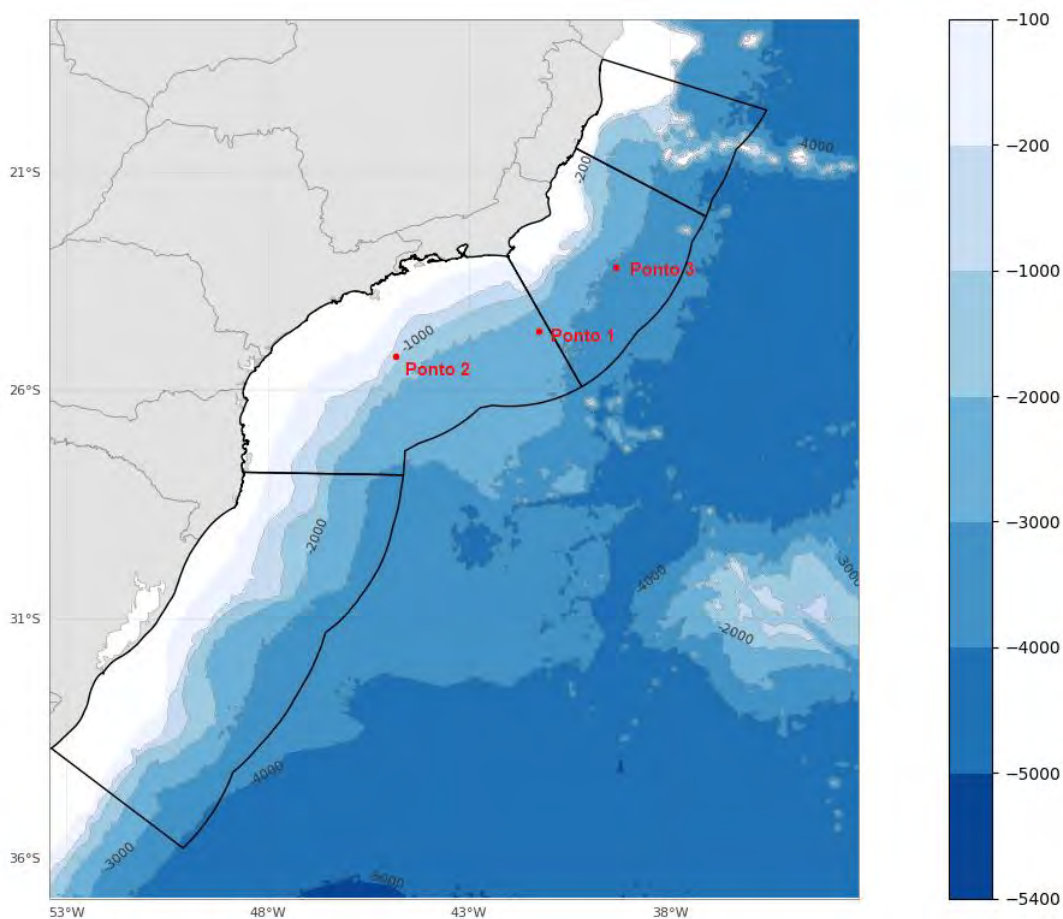


Figura 91: Pontos considerados para apresentação de análise de rosa de correntes e tabela conjunta de direção e intensidade.

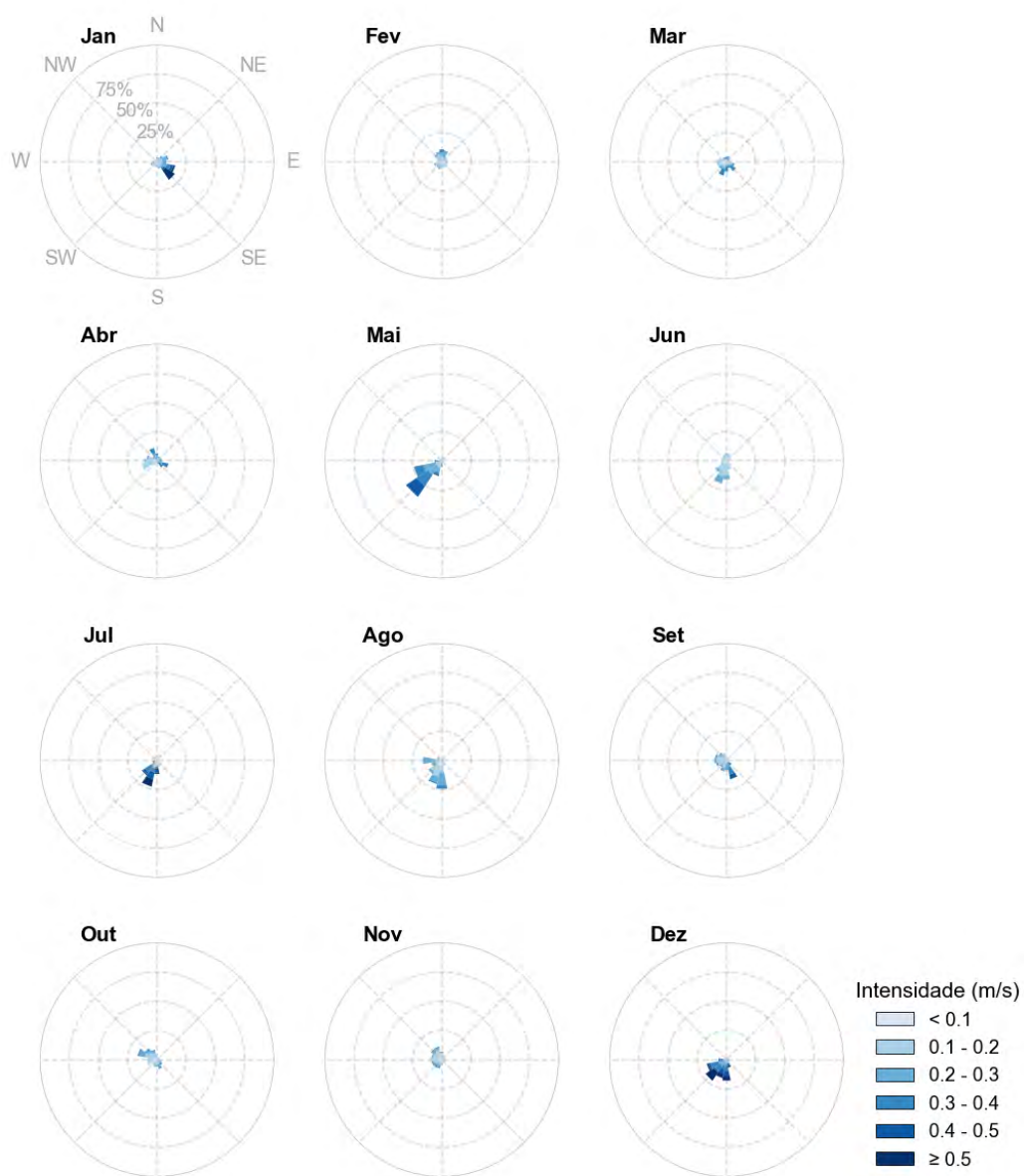


Figura 92: Rosas mensais de correntes em superfície para o Ponto 1 na Bacia de Santos.

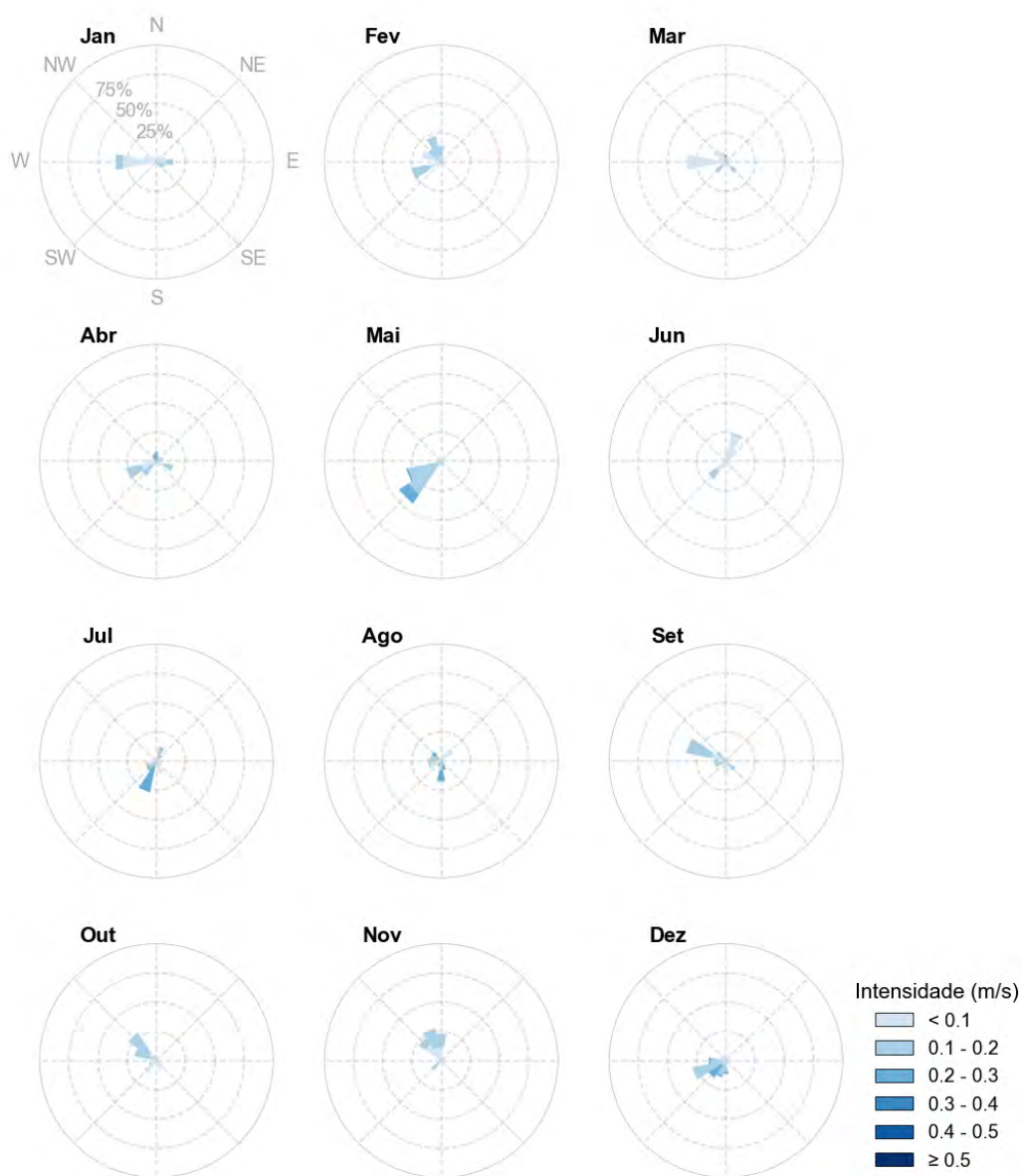


Figura 93: Rosas mensais de correntes em 200 metros de profundidade para o Ponto 1 na Baía de Santos.

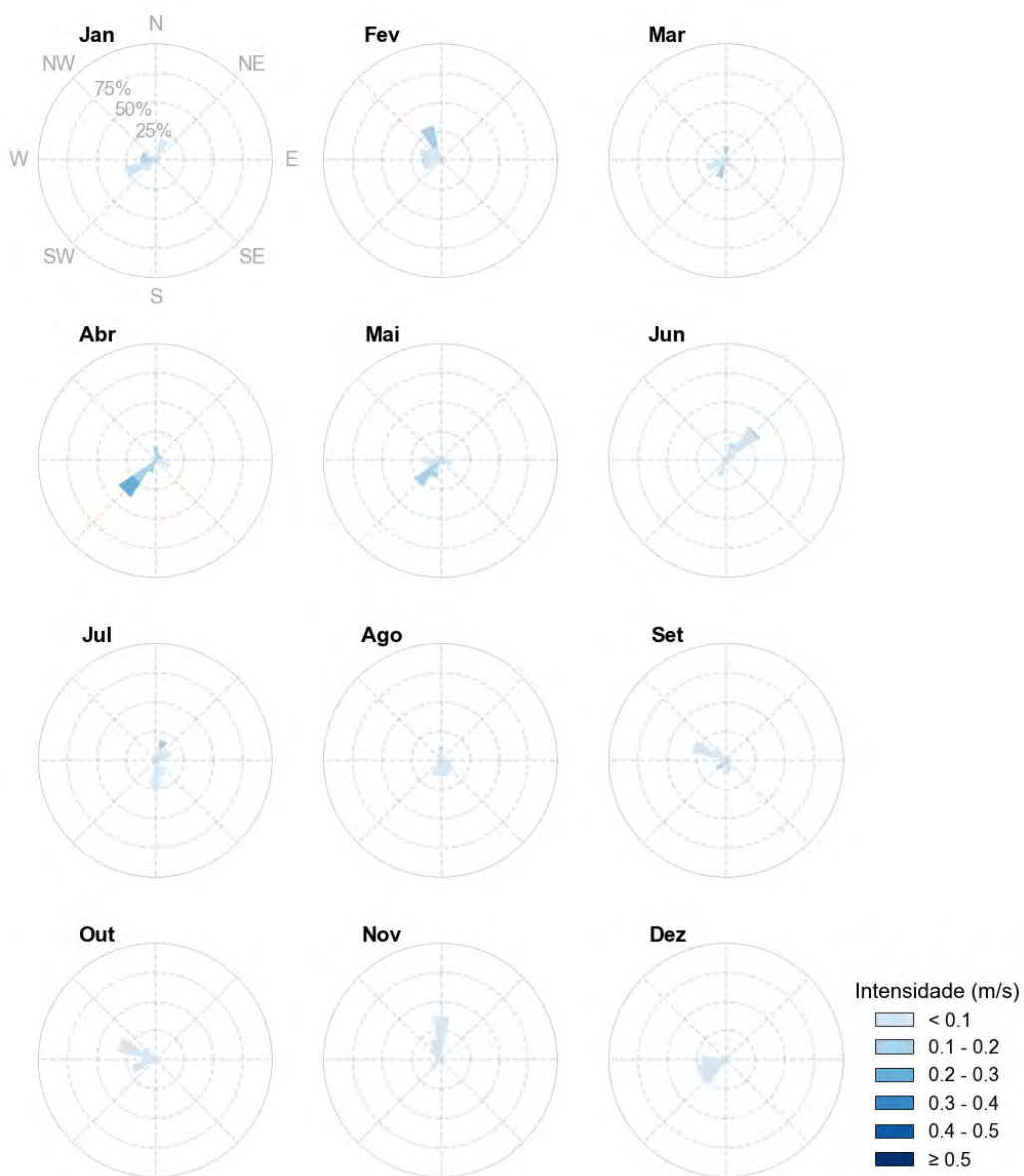


Figura 94: Rosas de correntes em 500 metros de profundidade para o Ponto 1 na Bacia de Santos.

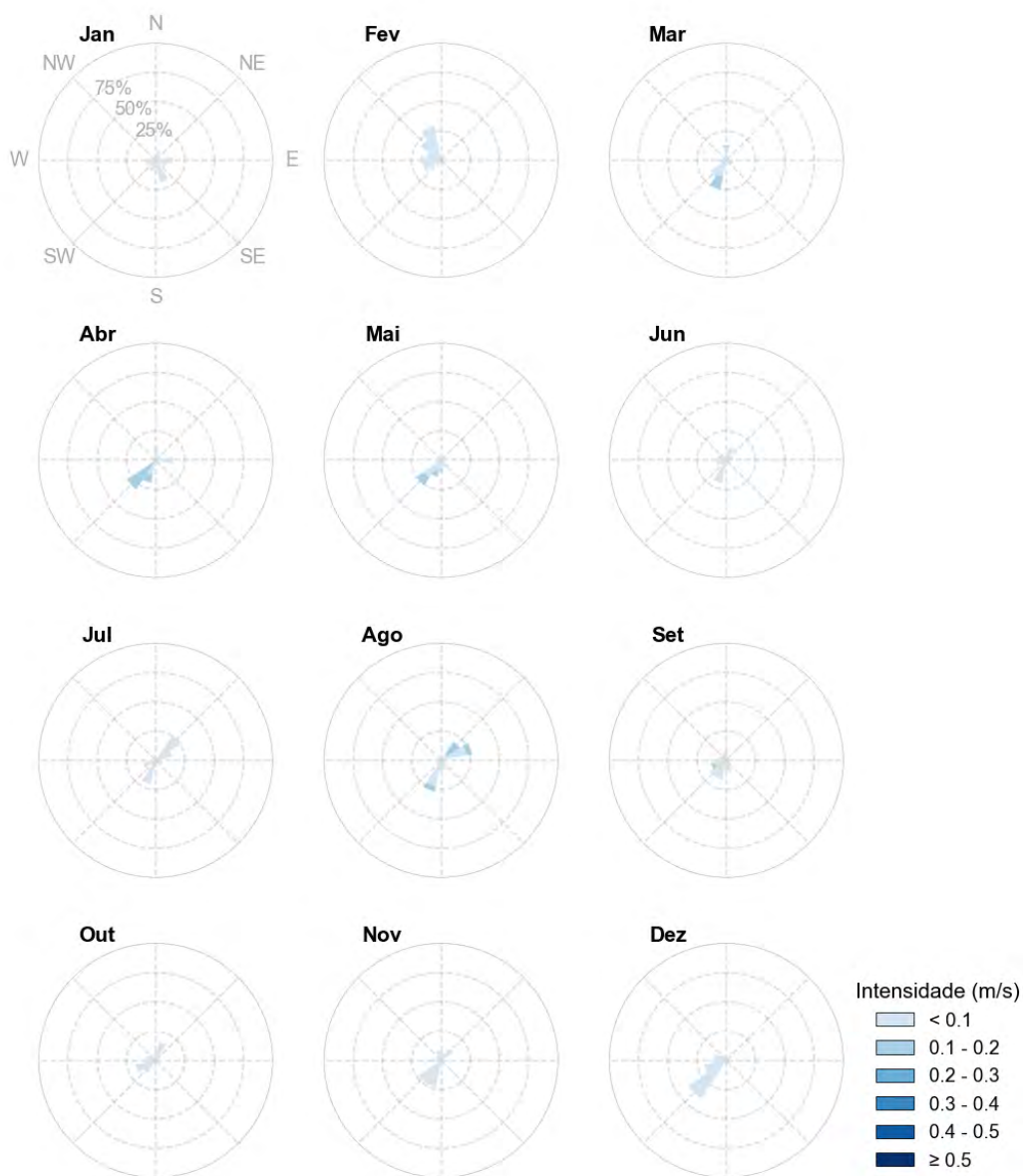


Figura 95: Rosas mensais de correntes em 1.000 metros de profundidade para o Ponto 1 na Baía de Santos.

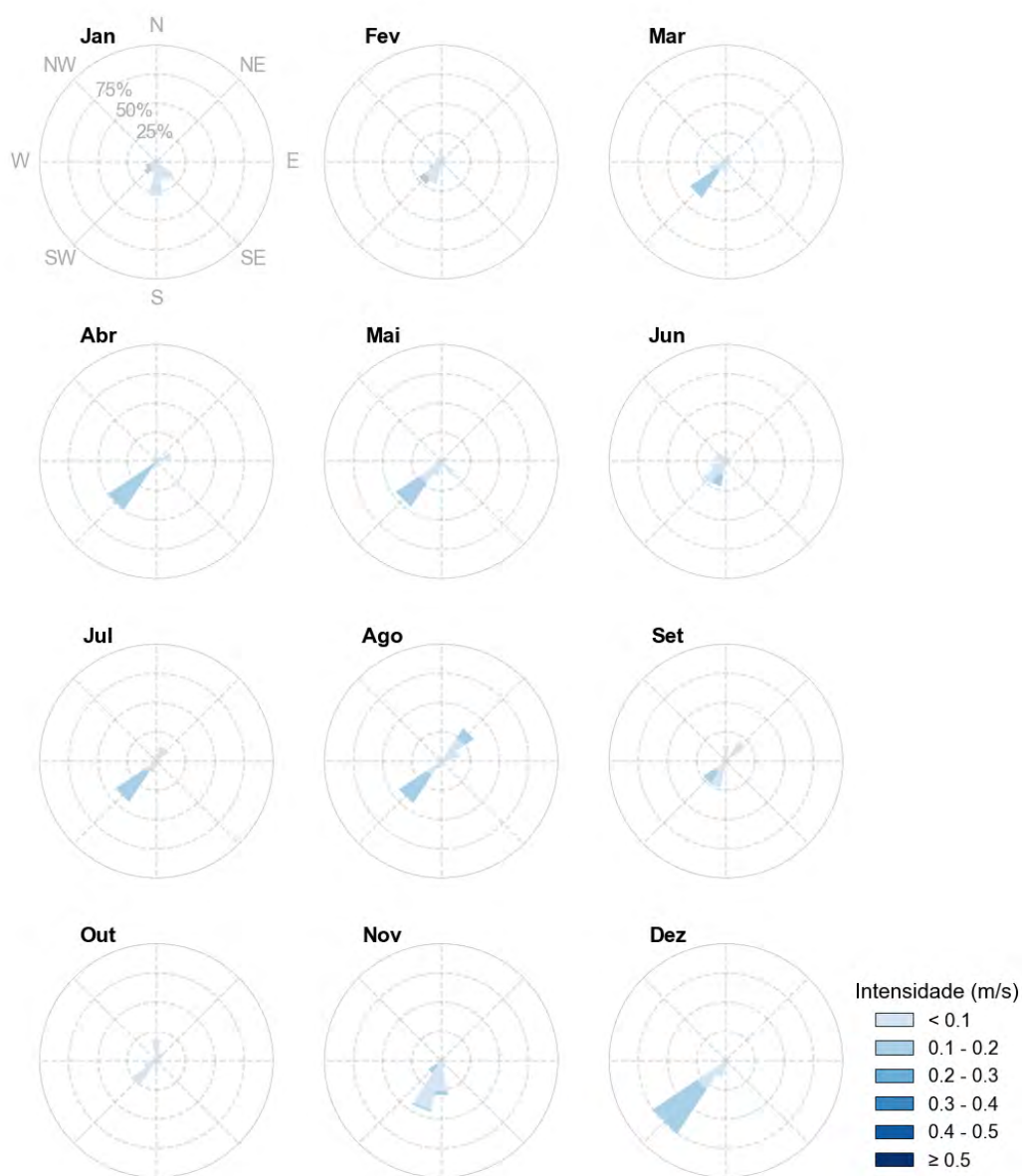


Figura 96: Rosas mensais de correntes em 2.000 metros de profundidade para o Ponto 1 na Bacia de Santos.

Tabela 3: Percentual de ocorrência sazonal de intensidade de correntes no Ponto 1 na Bacia de Santos.

	Profundidade	Intensidade (m/s)					
		< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,3	0,3 - 0,4	0,4- 0,5	> 0,5
Janeiro	Superfície	21,8	35,1	19,5	8,1	4,2	11,3
	200 m	75,8	24,2	-	-	-	-
	500 m	85,5	14,5	-	-	-	-
	1000 m	100,0	-	-	-	-	-
	2000 m	90,3	9,7	-	-	-	-
Fevereiro	Superfície	27,8	49,9	18,4	3,2	0,7	-
	200 m	40,4	59,7	-	-	-	-
	500 m	79,0	21,1	-	-	-	-
	1000 m	100,0	-	-	-	-	-
	2000 m	93,0	7,0	-	-	-	-
Março	Superfície	28,8	34,4	13,6	21,0	1,9	0,4
	200 m	74,2	22,6	3,2	-	-	-
	500 m	80,7	19,4	-	-	-	-
	1000 m	85,5	14,5	-	-	-	-
	2000 m	72,6	27,4	-	-	-	-
Abril	Superfície	17,9	42,1	23,8	14,7	1,5	-
	200 m	30,0	55,0	15,0	-	-	-
	500 m	21,7	63,3	15,0	-	-	-
	1000 m	63,3	36,7	-	-	-	-
	2000 m	50,0	50,0	-	-	-	-
Maio	Superfície	14,1	21,5	29,7	21,9	12,8	-
	200 m	22,6	66,1	11,3	-	-	-
	500 m	62,9	37,1	-	-	-	-
	1000 m	85,5	14,5	-	-	-	-
	2000 m	75,8	24,2	-	-	-	-
Junho	Superfície	32,8	51,7	14,4	1,1	-	-
	200 m	90,0	10,0	-	-	-	-
	500 m	96,7	3,3	-	-	-	-
	1000 m	100,0	-	-	-	-	-
	2000 m	90,0	10,0	-	-	-	-
Julho	Superfície	42,7	18,4	5,8	13,2	11,3	8,6
	200 m	43,6	32,3	24,2	-	-	-
	500 m	93,6	6,5	-	-	-	-
	1000 m	100,0	-	-	-	-	-
	2000 m	67,7	32,3	-	-	-	-

	Profundidade	Intensidade (m/s)					
		< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,3	0,3 - 0,4	0,4- 0,5	> 0,5
Agosto	Superfície	24,2	36,3	34,3	5,2	-	-
	200 m	51,6	25,8	22,6	-	-	-
	500 m	98,4	1,6	-	-	-	-
	1000 m	77,4	22,6	-	-	-	-
	2000 m	59,7	40,3	-	-	-	-
Setembro	Superfície	18,3	43,3	22,6	10,8	4,9	-
	200 m	50,0	50,0	-	-	-	-
	500 m	95,0	5,0	-	-	-	-
	1000 m	96,7	3,3	-	-	-	-
	2000 m	88,3	11,7	-	-	-	-
Outubro	Superfície	30,0	44,4	19,5	5,7	0,5	-
	200 m	59,7	40,3	-	-	-	-
	500 m	100,0	-	-	-	-	-
	1000 m	100,0	-	-	-	-	-
	2000 m	100,0	-	-	-	-	-
Novembro	Superfície	33,3	47,4	14,3	4,4	0,6	-
	200 m	51,7	48,3	-	-	-	-
	500 m	100,0	-	-	-	-	-
	1000 m	100,0	-	-	-	-	-
	2000 m	86,7	13,3	-	-	-	-
Dezembro	Superfície	7,8	13,9	19,1	25,8	14,5	19,0
	200 m	24,6	57,4	18,0	-	-	-
	500 m	100,0	-	-	-	-	-
	1000 m	100,0	-	-	-	-	-
	2000 m	54,1	45,9	-	-	-	-

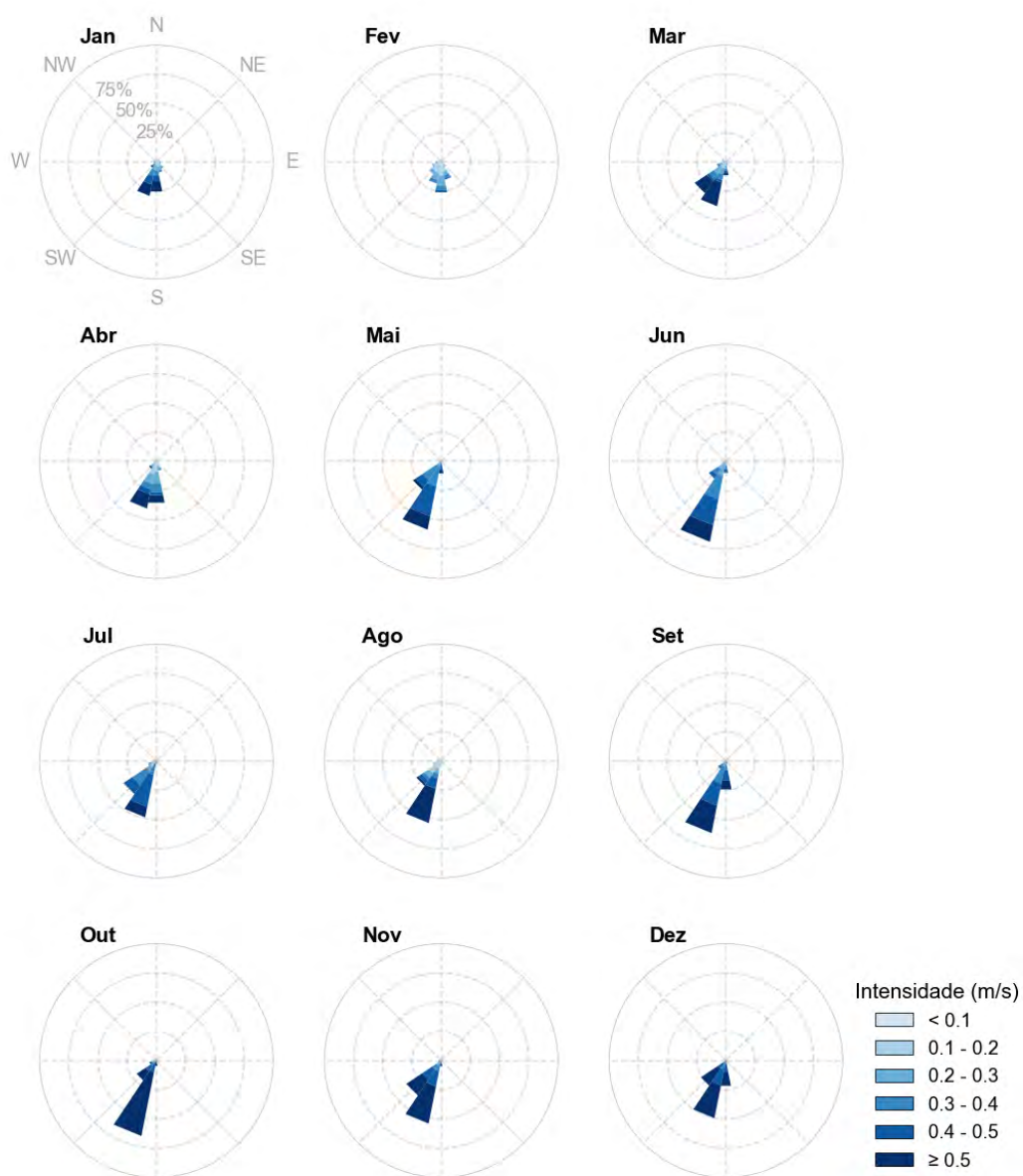


Figura 97: Rosas mensais de correntes em superfície para o Ponto 2 na Baía de Santos.

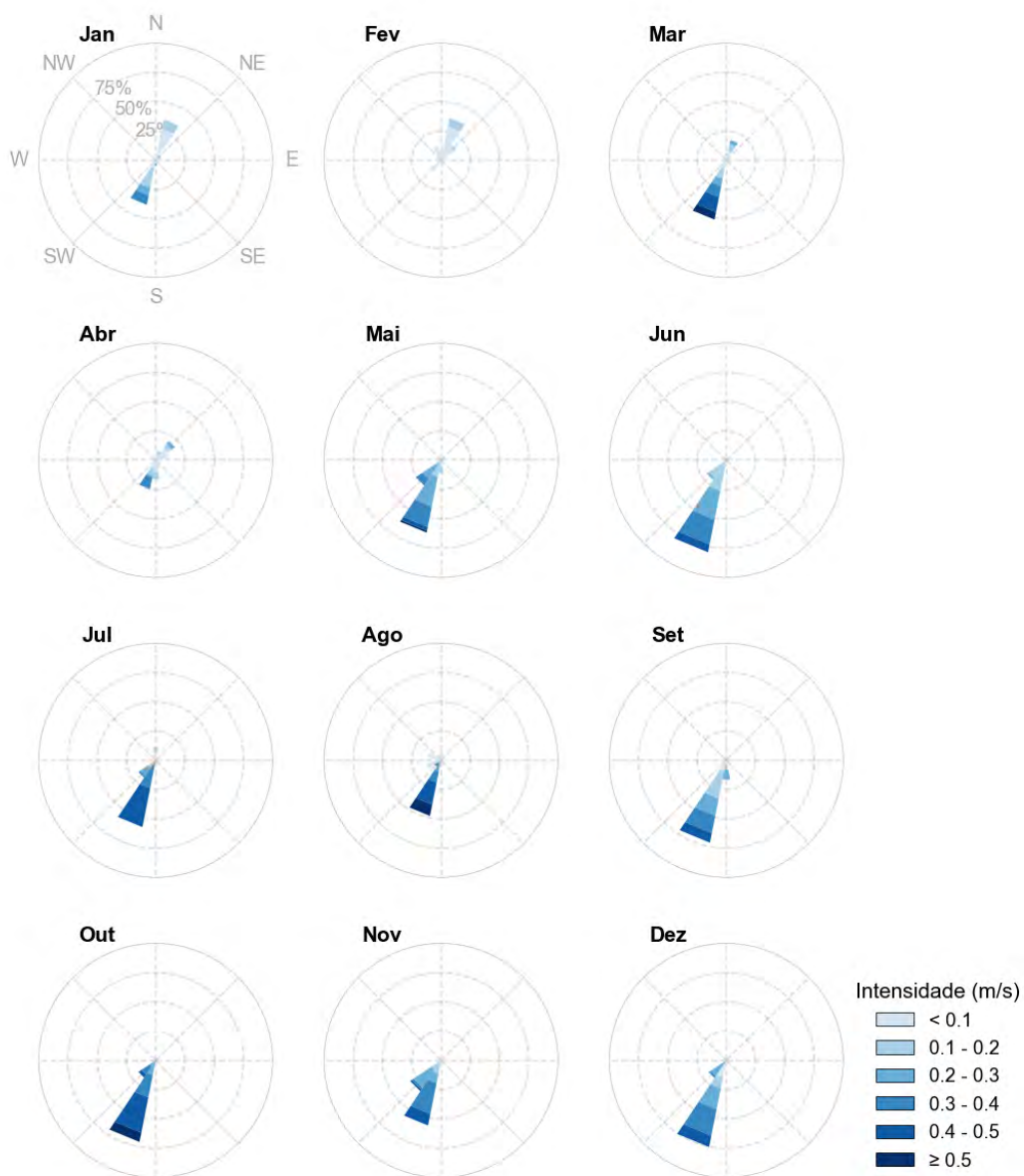


Figura 98: Rosas mensais de correntes em 200 metros de profundidade para o Ponto 2 na Bacia de Santos.

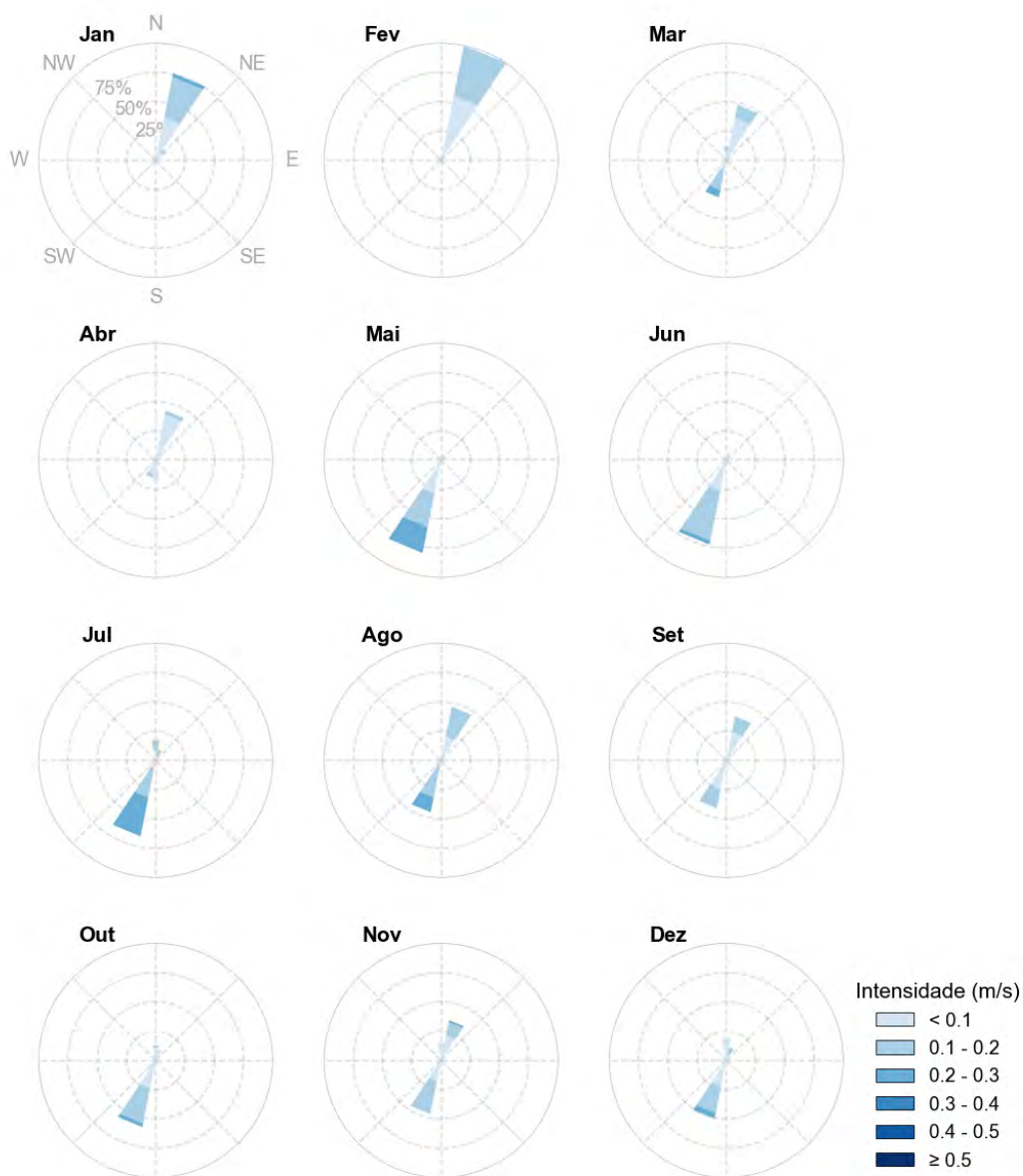


Figura 99: Rosas mensais de correntes em 500 metros de profundidade para Ponto 2 na Bacia de Santos.

Tabela 4: Percentual (%) de ocorrência de intensidade de correntes no Ponto 2 na Bacia de Santos.

	Profundidade	Intensidade (m/s)					
		< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,3	0,3 - 0,4	0,4 - 0,5	> 0,5
Janeiro	Superfície	11,7	22,2	16,7	14,8	14,0	20,6
	200 m	53,2	29,0	9,7	8,1	-	-
	500 m	58,1	38,7	3,2	-	-	-
Fevereiro	Superfície	20,9	40,6	25,4	9,9	2,8	0,3
	200 m	89,5	10,5	-	-	-	-
	500 m	56,1	43,9	-	-	-	-
Março	Superfície	5,2	18,7	20,4	13,8	6,6	35,2
	200 m	45,2	16,1	9,7	9,7	12,9	6,5
	500 m	61,3	32,3	6,5	-	-	-
Abril	Superfície	10,6	24,2	22,6	14,7	7,9	20,0
	200 m	63,3	21,7	5,0	10,0	-	-
	500 m	93,3	6,7	-	-	-	-
Maio	Superfície	0,3	1,1	8,6	35,0	37,6	17,5
	200 m	8,1	22,6	40,3	24,2	3,2	1,6
	500 m	48,4	29,0	22,6	-	-	-
Junho	Superfície	0,3	5,1	21,7	28,9	28,9	15,1
	200 m	5,0	40,0	26,7	21,7	6,7	-
	500 m	53,3	43,3	3,3	-	-	-
Julho	Superfície	6,2	11,6	9,5	25,8	37,0	10,0
	200 m	17,7	16,1	11,3	21,0	33,9	-
	500 m	24,2	41,9	33,9	-	-	-
Agosto	Superfície	12,5	26,8	9,3	7,0	12,8	31,7
	200 m	48,4	1,6	8,1	12,9	19,4	9,7
	500 m	32,3	54,8	12,9	-	-	-
Setembro	Superfície	0,8	3,6	9,9	22,9	30,4	32,4
	200 m	25,0	28,3	23,3	15,0	8,3	-
	500 m	70,0	30,0	-	-	-	-
Outubro	Superfície	0,3	2,6	5,2	6,6	15,3	70,0
	200 m	9,7	4,8	16,1	27,4	33,9	8,1
	500 m	64,5	32,3	3,2	-	-	-
Novembro	Superfície	0,8	3,2	8,1	12,1	25,8	50,0
	200 m	16,7	16,7	26,7	28,3	11,7	-
	500 m	58,3	40,0	1,7	-	-	-
Dezembro	Superfície	-	-	1,9	11,5	27,7	58,9
	200 m	23,0	9,8	32,8	24,6	9,8	-
	500 m	65,6	29,5	4,9	-	-	-

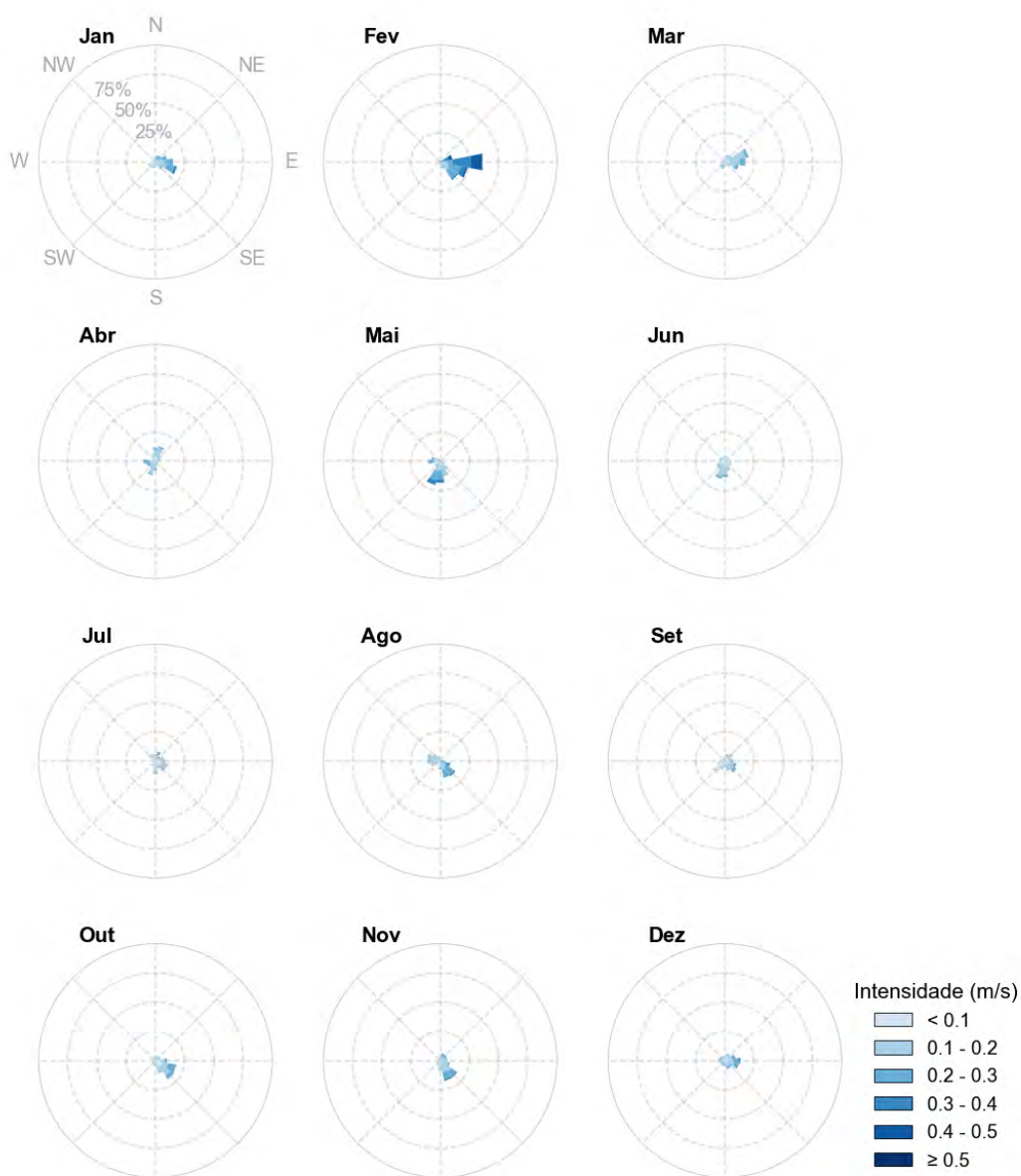


Figura 100: Rosas mensais de correntes em superfície para o Ponto 3 na Bacia de Campos.



Figura 101: Rosas mensais de correntes em 200 metros de profundidade para o Ponto 3 na Bacia de Campos.



Figura 102: Rosa mensais de correntes em 500 metros de profundidade para o Ponto 3 na Bacia de Campos.

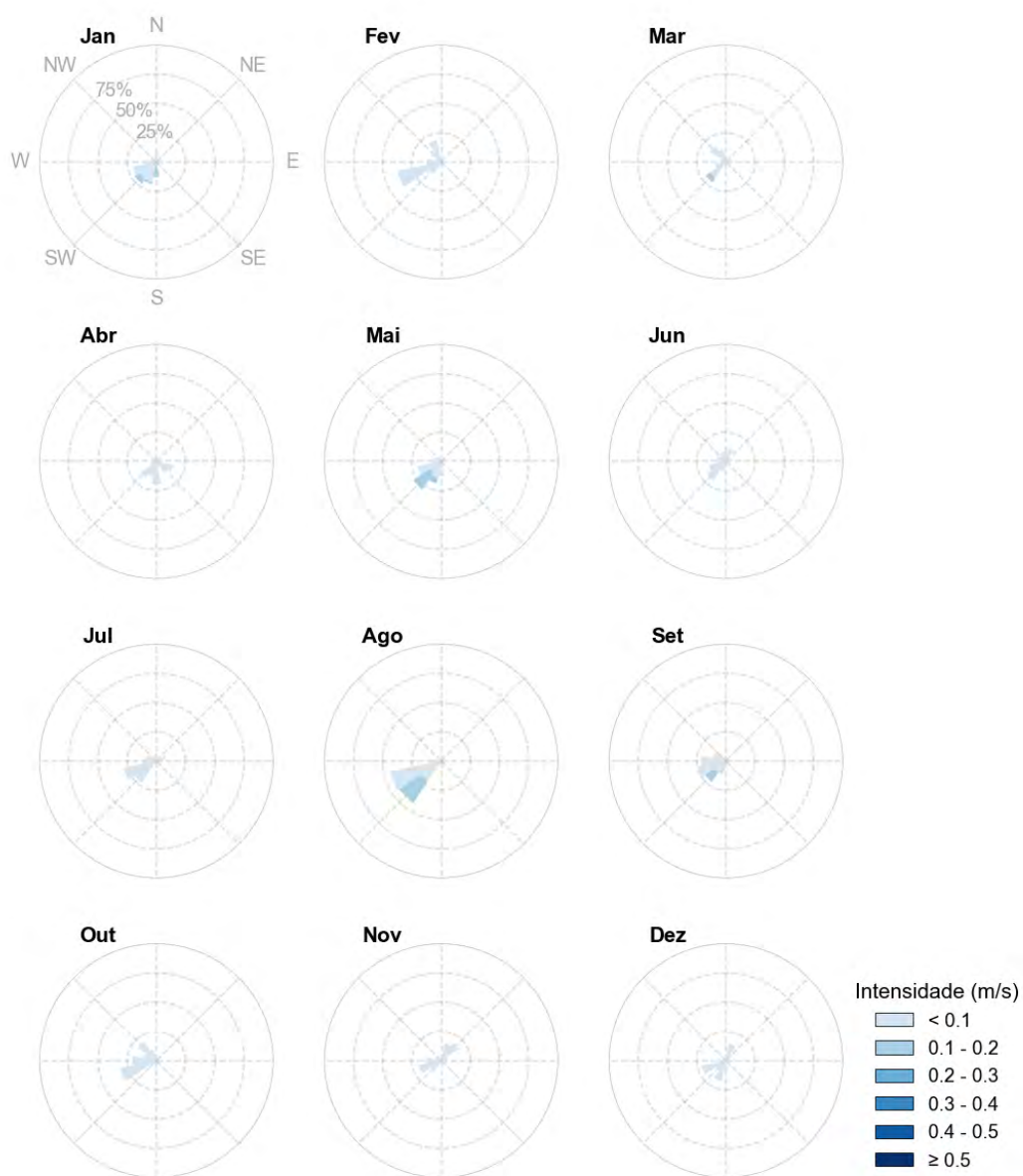


Figura 103: Rosa mensais de correntes em 1.000 metros de profundidade para o Ponto 3 na Bacia de Campos.

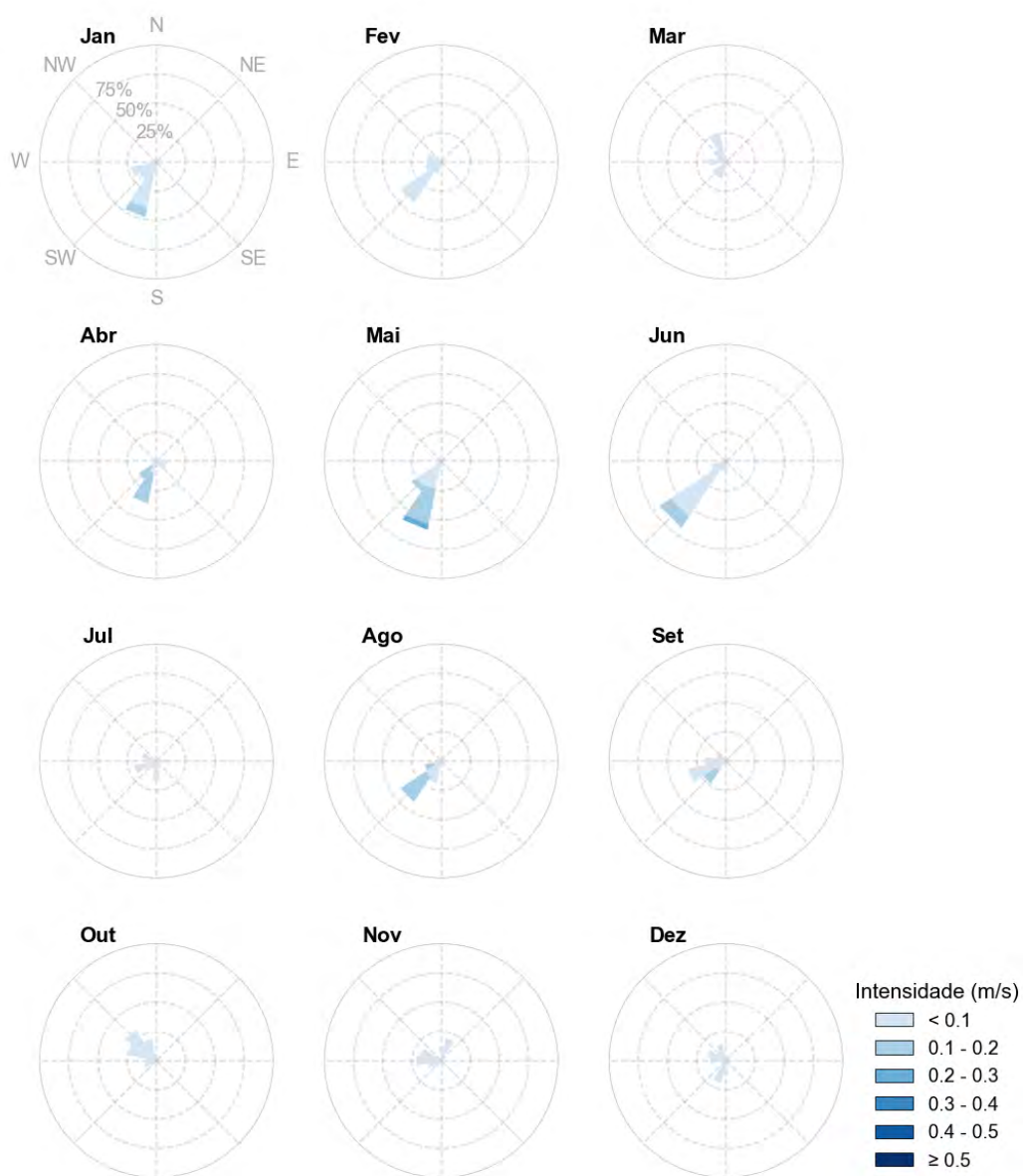


Figura 104: Rosa mensais de correntes em 2.000 metros de profundidade para o Ponto 3 na Bacia de Campos.

Tabela 5: Percentual (%) de ocorrência de intensidade de correntes no Ponto 3 na Bacia de Campos.

	Profundidade	Intensidade (m/s)					
		< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,3	0,3 - 0,4	0,4- 0,5	> 0,5
Janeiro	Superfície	24,8	45,5	24,5	4,7	0,5	-
	200 m	90,3	4,8	4,8	-	-	-
	500 m	100,0	-	-	-	-	-
	1000 m	80,7	19,4	-	-	-	-
	2000 m	91,9	8,1	-	-	-	-
Fevereiro	Superfície	4,0	27,2	26,3	27,1	14,9	0,6
	200 m	77,2	22,8	-	-	-	-
	500 m	100,0	-	-	-	-	-
	1000 m	100,0	-	-	-	-	-
	2000 m	100,0	-	-	-	-	-
Março	Superfície	33,9	53,0	12,0	1,2	-	-
	200 m	88,7	11,3	-	-	-	-
	500 m	88,7	11,3	-	-	-	-
	1000 m	95,2	4,8	-	-	-	-
	2000 m	100,0	-	-	-	-	-
Abril	Superfície	28,2	54,3	17,4	0,1	-	-
	200 m	73,3	26,7	-	-	-	-
	500 m	100,0	-	-	-	-	-
	1000 m	100,0	-	-	-	-	-
	2000 m	58,3	41,7	-	-	-	-
Maio	Superfície	29,2	38,4	24,5	7,7	0,3	-
	200 m	82,3	17,7	-	-	-	-
	500 m	93,6	6,5	-	-	-	-
	1000 m	77,4	22,6	-	-	-	-
	2000 m	58,1	37,1	4,8	-	-	-
Junho	Superfície	54,2	37,6	7,8	0,4	-	-
	200 m	81,7	18,3	-	-	-	-
	500 m	100,0	-	-	-	-	-
	1000 m	100,0	-	-	-	-	-
	2000 m	88,3	11,7	-	-	-	-
Julho	Superfície	46,1	45,0	7,7	0,8	0,4	-
	200 m	58,1	41,9	-	-	-	-
	500 m	87,1	12,9	-	-	-	-
	1000 m	100,0	-	-	-	-	-
	2000 m	100,0	-	-	-	-	-

	Profundidade	Intensidade (m/s)					
		< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,3	0,3 - 0,4	0,4 - 0,5	> 0,5
Agosto	Superfície	11,3	57,9	24,9	5,8	0,1	-
	200 m	69,4	30,7	-	-	-	-
	500 m	82,3	17,7	-	-	-	-
	1000 m	77,4	22,6	-	-	-	-
	2000 m	64,5	35,5	-	-	-	-
Setembro	Superfície	53,9	35,4	9,9	0,8	-	-
	200 m	96,7	3,3	-	-	-	-
	500 m	93,3	6,7	-	-	-	-
	1000 m	90,0	10,0	-	-	-	-
	2000 m	86,7	13,3	-	-	-	-
Outubro	Superfície	46,2	37,9	14,3	1,6	-	-
	200 m	96,8	3,2	-	-	-	-
	500 m	100,0	-	-	-	-	-
	1000 m	100,0	-	-	-	-	-
	2000 m	100,0	-	-	-	-	-
Novembro	Superfície	27,9	47,6	19,4	4,6	0,4	-
	200 m	88,3	11,7	-	-	-	-
	500 m	96,7	3,3	-	-	-	-
	1000 m	100,0	-	-	-	-	-
	2000 m	100,0	-	-	-	-	-
Dezembro	Superfície	33,2	40,8	20,5	5,1	0,6	-
	200 m	100,0	-	-	-	-	-
	500 m	98,4	1,6	-	-	-	-
	1000 m	100,0	-	-	-	-	-
	2000 m	100,0	-	-	-	-	-

Na região do Ponto 1 são observados meandros e vórtices da corrente. Sazonalmente, observa-se que as intensidades da CB são maiores nos meses entre setembro e fevereiro. Em 500 metros de profundidade, o fluxo em latitudes a norte de 28°S, em média, tem sentido para nordeste, oposto ao observado para as profundidades menores, devido à presença da Contra Corrente Intermediária (CCI). Em 1.000 metros de profundidade, o padrão é semelhante ao observado em 500 metros, com a presença da CCI em latitudes a norte de 30°S. Nas maiores profundidades, as correntes ao largo do talude se tornam menos intensas.

O Ponto 2, por se localizar em região de menor profundidade, está sob influência do fluxo principal da CB. Devido a isso, apresenta maiores intensidades, com predominância em superfície acima de 0,4 m/s ao longo do ano. Neste ponto o fluxo da CB está mais organizado, resultando em maiores porcentagens de correntes na direção SSW até 200 metros de profundidade. Em 500 metros de profundidade, a direção varia ao longo do ano, ora com direção preferencial para NNE,

indicando a presença da CCI, ora com direção preferencial para SSO, ainda sob influência da CB.

O Ponto 3 se fora do fluxo principal da CB e, com isso, a direção preferencial das correntes em superfície é para ESE entre setembro e agosto e para S entre março e agosto, com intensidades predominantes entre 0,1 e 0,2 m/s. A partir de 200 metros, as intensidades mais frequentes são menores que 0,1 m/s. Com intensidades baixas, notadamente não é observado direções preferenciais ao longo do ano a partir dessa profundidade até 2.000 metros.

7.4. Processos de mesoescala

A seguir, de forma a ilustrar a representação dos processos de mesoescala, são apresentados resultados instantâneos do modelo (Figura 105, Figura 106 e Figura 107), que correspondem os campos de corrente superficial dos dias 15/05/2013, 13/06/2013 e 01/12/2013.

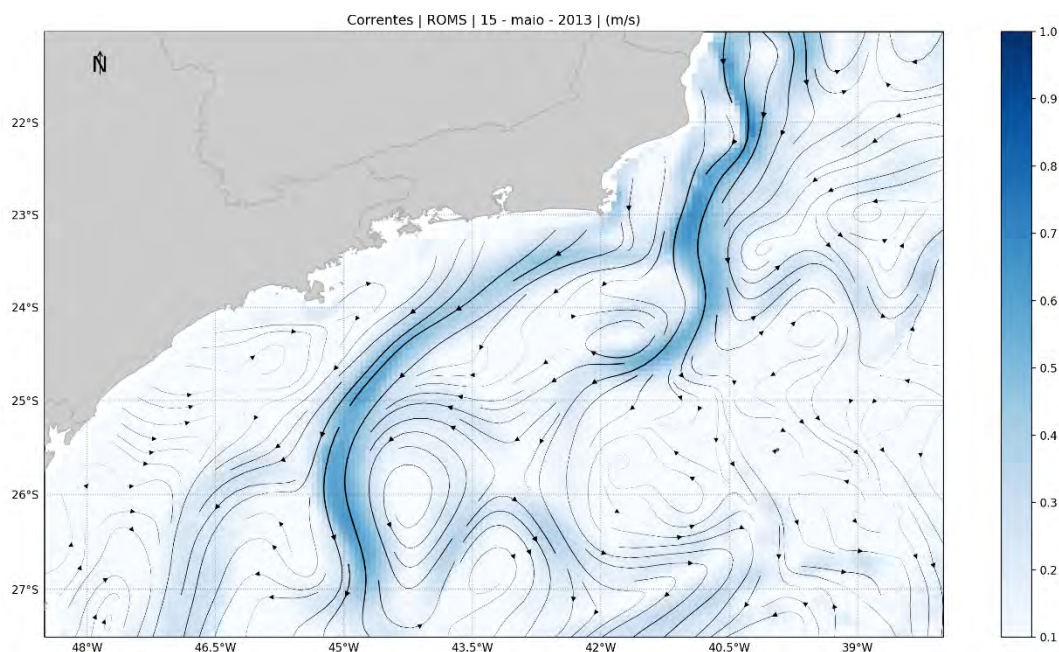


Figura 105: Campo de corrente do dia 15/05/2013.

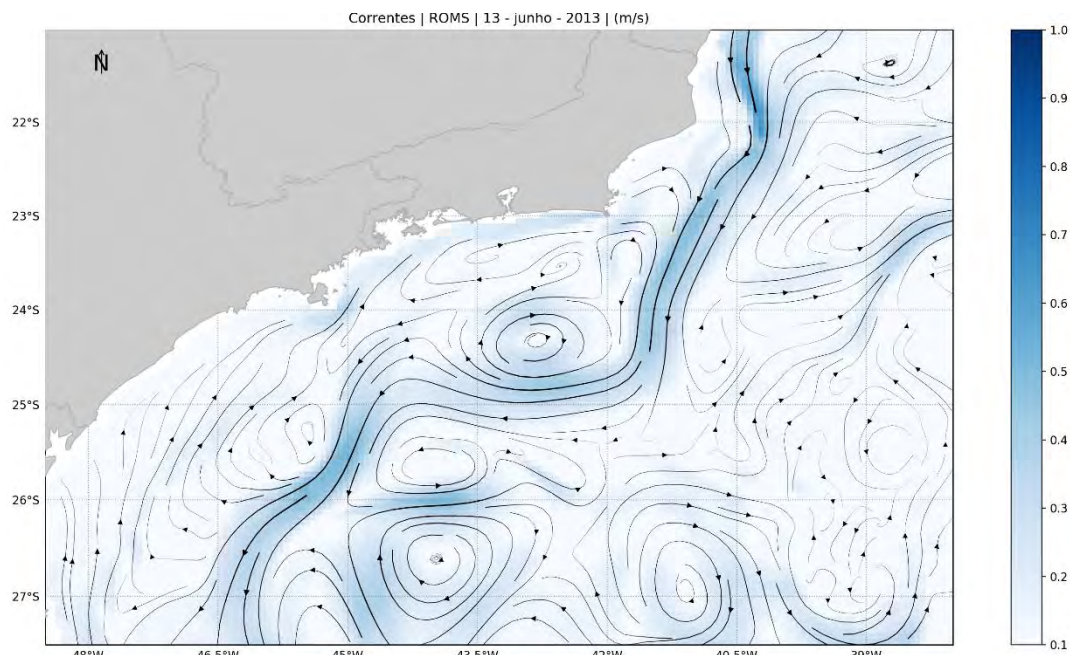


Figura 106: Campo de corrente do dia 13/06/2013.

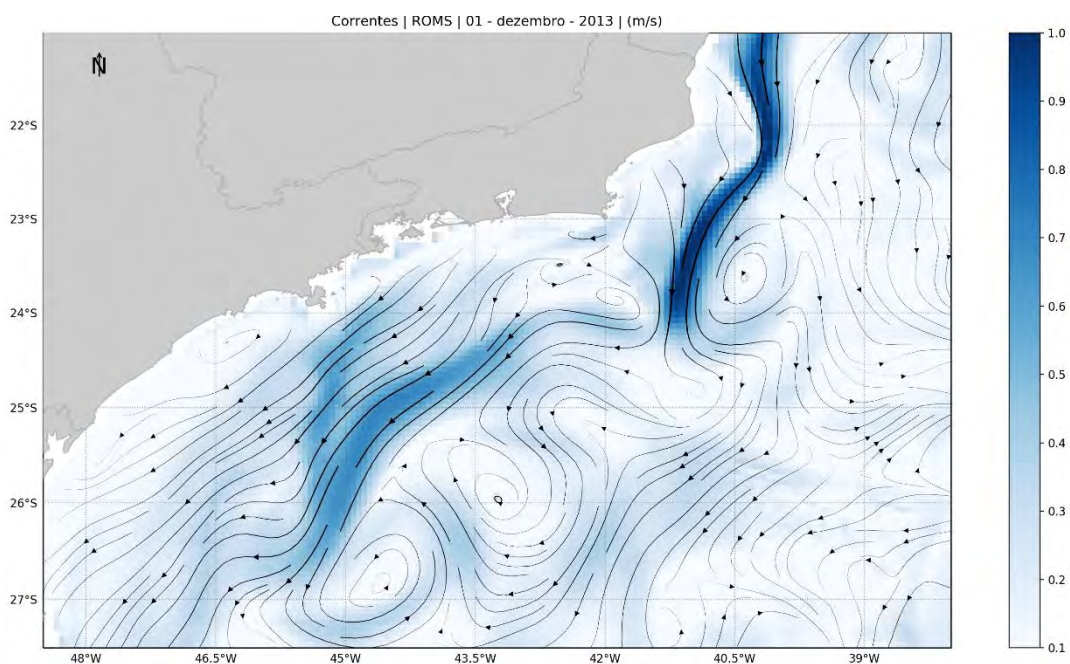


Figura 107: Campo de corrente do dia 01/12/2013.

Nota-se na Figura 105 a representação do Vórtice de Cabo Frio (VCF) pelo modelo, entre as latitudes 23,5°S e 25°S. Esta ocorrência do VCF em particular é descrita em Dos Santos *et al.* (2016) através de um transecto de dados de temperatura e salinidade obtidos por equipamento *glider* (descrito em mais detalhes no item 8.3) e dados de dois derivadores superficiais lagrangianos.

Na Figura 106 observa-se a corrente sobre a plataforma continental com sentido nordeste, exemplificando o efeito da passagem de um sistema frontal sobre a circulação oceânica. Ainda neste campo de corrente é possível observar o VCF mais a leste do que na Figura 105.

Na Figura 107, exemplifica-se o efeito do ASAS sobre a plataforma continental, onde podem ser observada a corrente fluindo com sentido sudoeste. Observa-se também a ocorrência de um vórtice anticiclônico na porção sul da Bacia de Campos, localizado na posição associada ao Vórtice do Cabo de São Tomé.

7.5. Considerações

Com todos os resultados apresentados, pode-se inferir que o modelo utilizado é capaz de representar feições de mesoescala na região de estudo, assim como o efeito da passagem de sistemas frontais nas correntes sobre a plataforma continental, como estão em conformidade com a literatura apresentada sobre os processos oceanográficos ocorrentes no domínio do modelo. Contudo, no item a seguir são apresentadas análises quantitativas com base em diferentes parâmetros e processos.

8. 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.

8.1. Maré

Para comparar a elevação de maré calculada pelo modelo numérico com dados da região modelada foram escolhidas seis estações maregráficas (Vitória-ES, Fundeio 1 Norte-RJ, Ilha da Moela-SP, Farol de Santa Marta-SC e Torres-RS) da FEMAR (Figura 108) situadas ao longo do domínio de modelagem. Estas estações foram escolhidas por estarem em regiões bem distintas entre si no interior do domínio de modelagem, tanto em regiões oceânicas, quanto em regiões costeiras e compreendendo diferentes estados do Brasil.

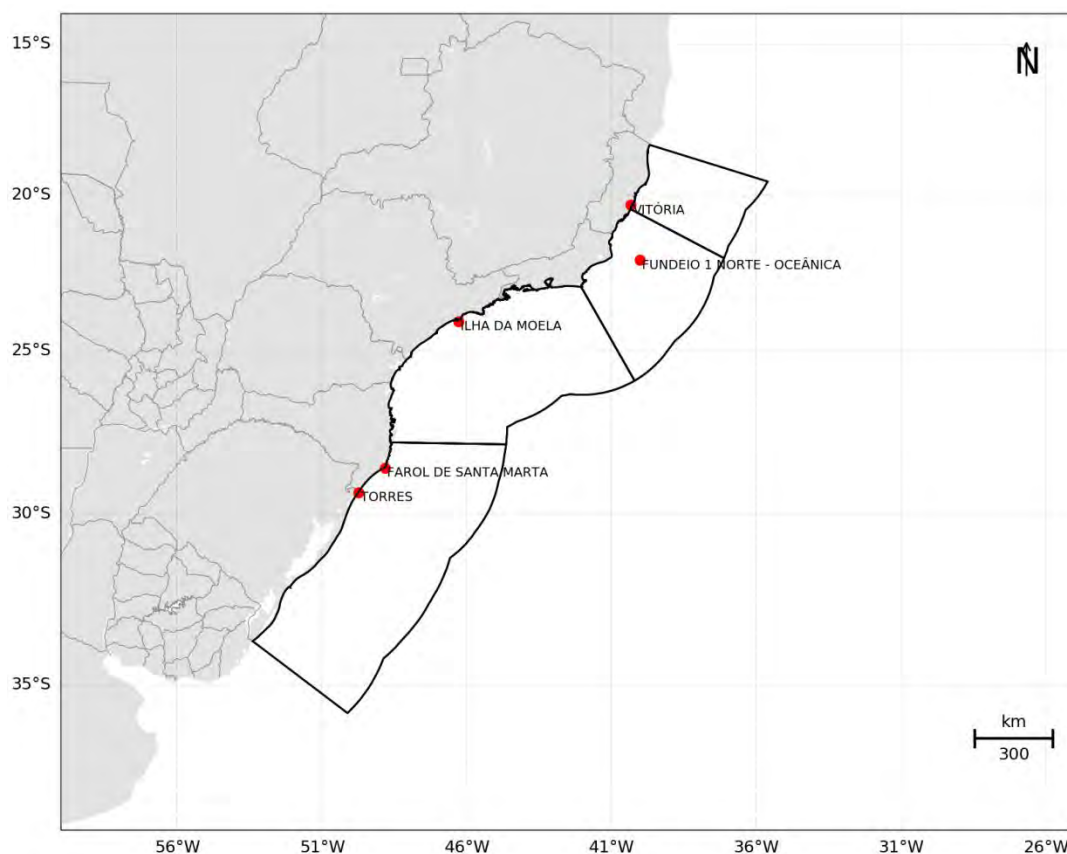


Figura 108: Localização das estações maregráficas da FEMAR, utilizadas na avaliação da representação da maré no modelo.

A partir das constantes harmônicas dessas estações foram realizadas previsões da elevação de maré para o período de simulação (janeiro de 2012 a janeiro de 2014). Séries de elevação do nível do mar nos pontos de grade mais próximos das estações foram obtidas e, a partir destas, foi realizada uma análise para se obter as mesmas constantes harmônicas utilizadas na reconstrução das séries da FEMAR e em seguida foram realizadas previsões da elevação da maré para o mesmo período. Da Figura 109 a Figura 113 as comparações são apresentadas para todo o período de modelagem.

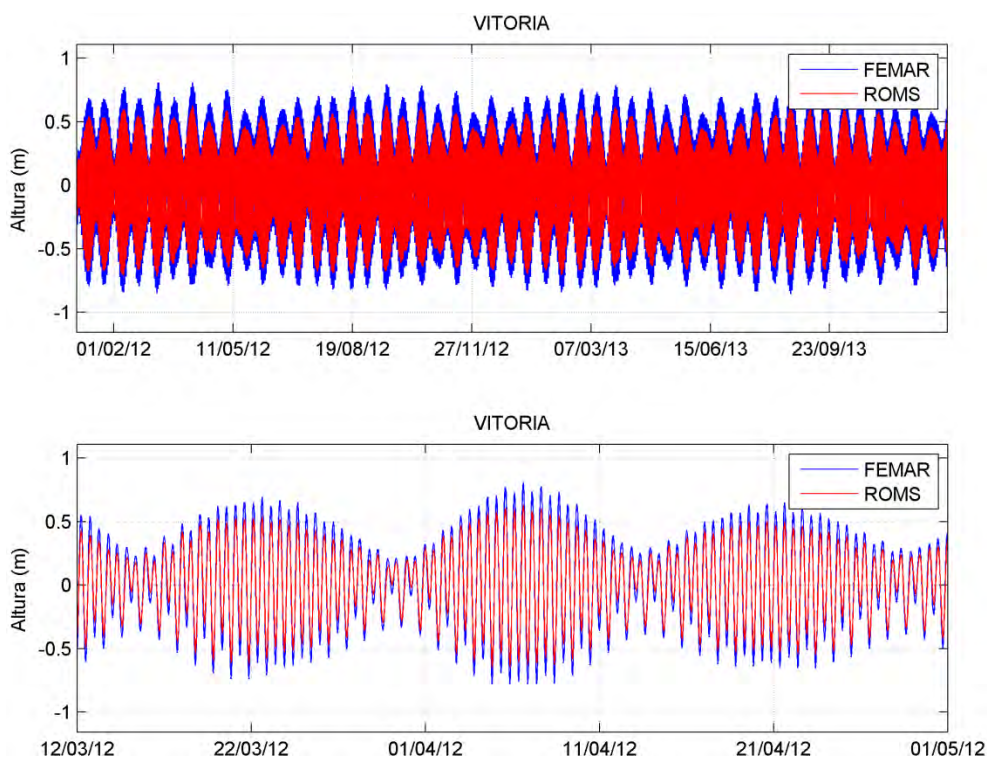


Figura 109: Comparação para a estação de Vitória – ES. Séries reconstituídas da FEMAR (azul) e do modelo ROMS (vermelha), para todo o período (acima) e em zoom (abaixo).

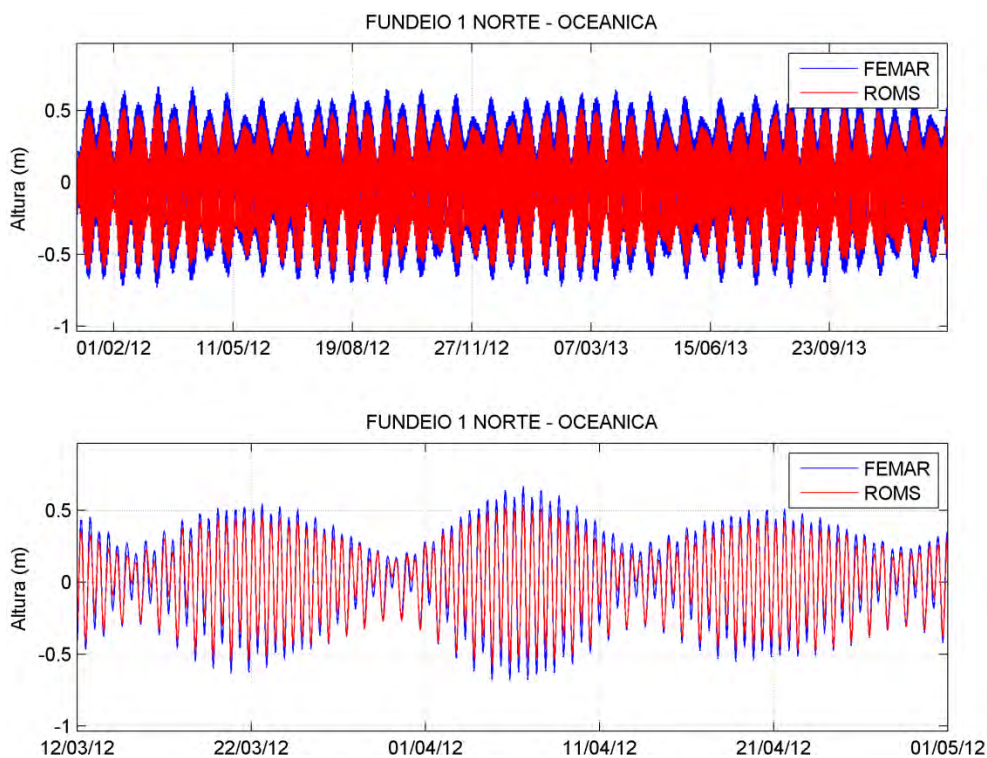


Figura 110: Comparação para a estação de Fundeio 1 Norte – Oceânica . Séries reconstituídas da FEMAR (azul) e do modelo ROMS (vermelha), para todo o período (acima) e em zoom (abaixo).

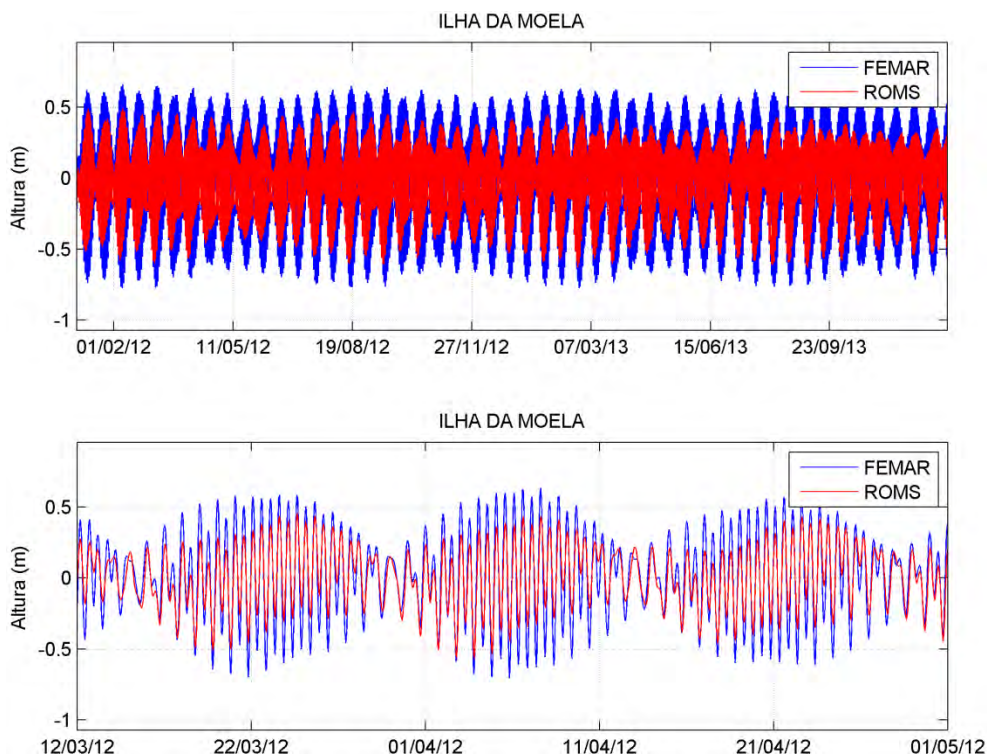


Figura 111: Comparação para a estação de Ilha da Moela. Séries reconstituídas da FEMAR (azul) e do modelo ROMS (vermelha), para todo o período (acima) e em zoom (abaixo).

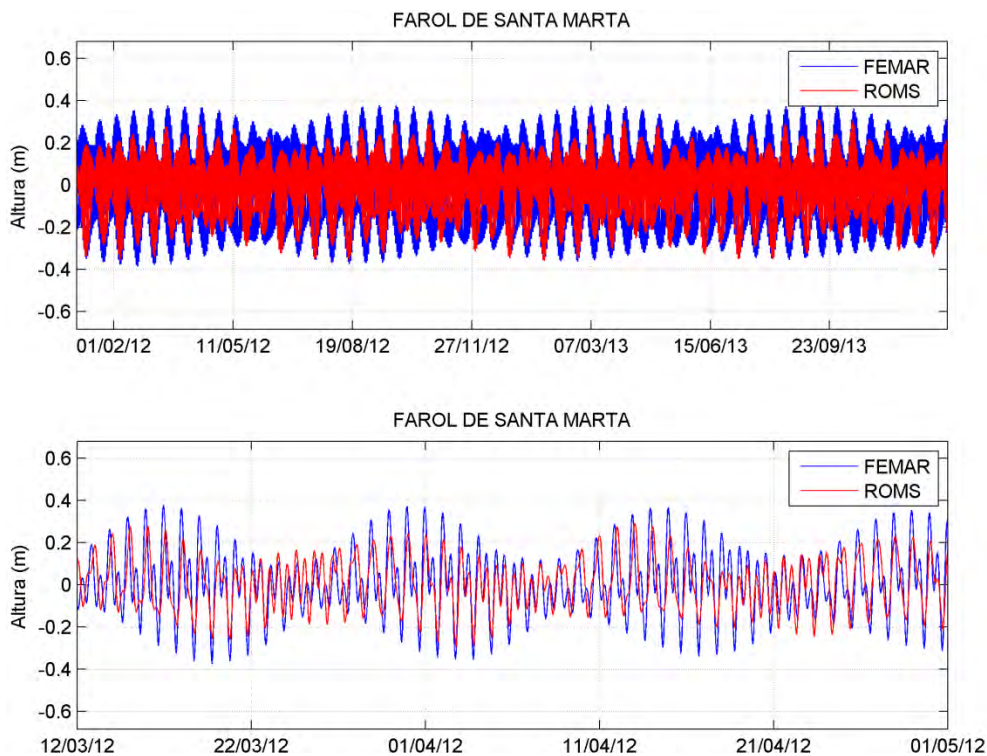


Figura 112: Comparação para a estação de Santa Marta. Séries reconstituídas da FEMAR (azul) e do modelo ROMS (vermelha), para todo o período (acima) e em zoom (abaixo).

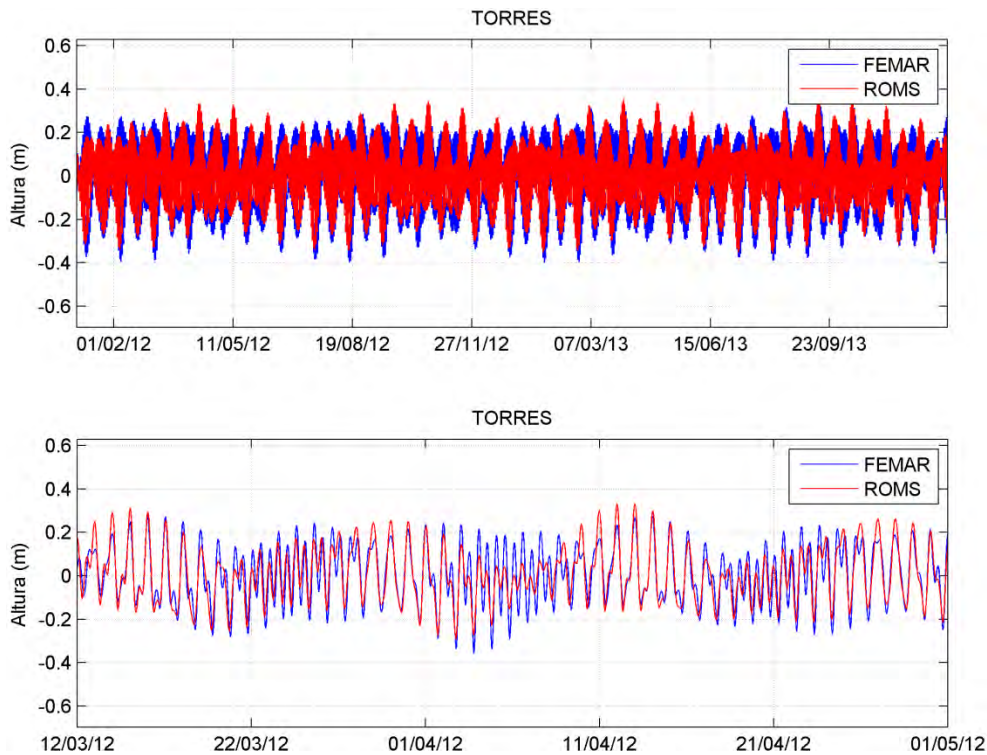


Figura 113: Comparação para a estação de Torres. Séries reconstituídas da FEMAR (azul) e do modelo ROMS (vermelha), para todo o período (acima) e em zoom (abaixo).

Para avaliar a capacidade de representação da amplitude e da fase da onda de maré pelo modelo são calculados o erro médio absoluto, “EMA”, (Eq. 1) e o coeficiente de correlação linear “p” (Eq.2), entre as séries reconstituídas. Foram utilizadas séries de dados de 730 dias, contemplando dois anos completos, com resolução horária.

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (\text{Eq. 1})$$

$$p = \frac{cov(x,y)}{\sqrt{var(x)*var(y)}} \quad (\text{Eq.2})$$

Onde “x” é a série maregráfica do modelo do modelo e “y” é a série da FEMAR. O erro médio (EMA) e o coeficiente de correlação linear (p) aplicados à série de maré indicam o desvio da amplitude e o desvio de fase, respectivamente, entre a onda de maré modelada e a reconstituída. Os índices calculados são apresentados na Tabela 6 para cada estação utilizada e para a média das estações. O EMA variou entre 0,05 (Vitória-ES e Torres-RS) e 0,11 (Ilha da Moela-SP) e o índice de correlação variou entre 0,7 (Farol de Santa Marta-SC) e 0,99 (Vitória-ES e Fundeio Norte-RJ). Os valores médios de EMA e p foram 0,09 e 0,88, respectivamente.

Tabela 6: Comparação estatística entre as séries maregráficas do modelo ROMS e da FEMAR. Apresentam-se os índices Erro Médio Absoluto (EMA) e coeficiente de correlação linear de Pearson (p).

Estação	EMA (m)	p
Vitória	0,05	0,99
Fundeio Norte	0,07	0,99
Ilha da Moela	0,11	0,92
Farol de Santa Marta	0,08	0,70
Torres	0,05	0,86
Média	0,09	0,88

A representação da amplitude com erro médio absoluto de aproximadamente 10 centímetros é considerada satisfatória para um modelo com essa dimensão de domínio e resolução, considerando que as estações são em sua maioria costeiras e que as estações mais próximas da área de estudo foram as que apresentaram menor EMA (5 cm e 7 cm). O índice de correlação linear variando de 0,7 a 0,99 demonstra que as séries apresentam correlação de forte a muito forte e, portanto, a representação da fase da maré pode ser considerada satisfatória.

8.2. Temperatura da Superfície do Mar

Da Figura 114 à Figura 125 são apresentadas as médias mensais da temperatura da superfície do mar (TSM) obtidas do ROMS para o período de janeiro de 2012 a janeiro de 2014, 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.

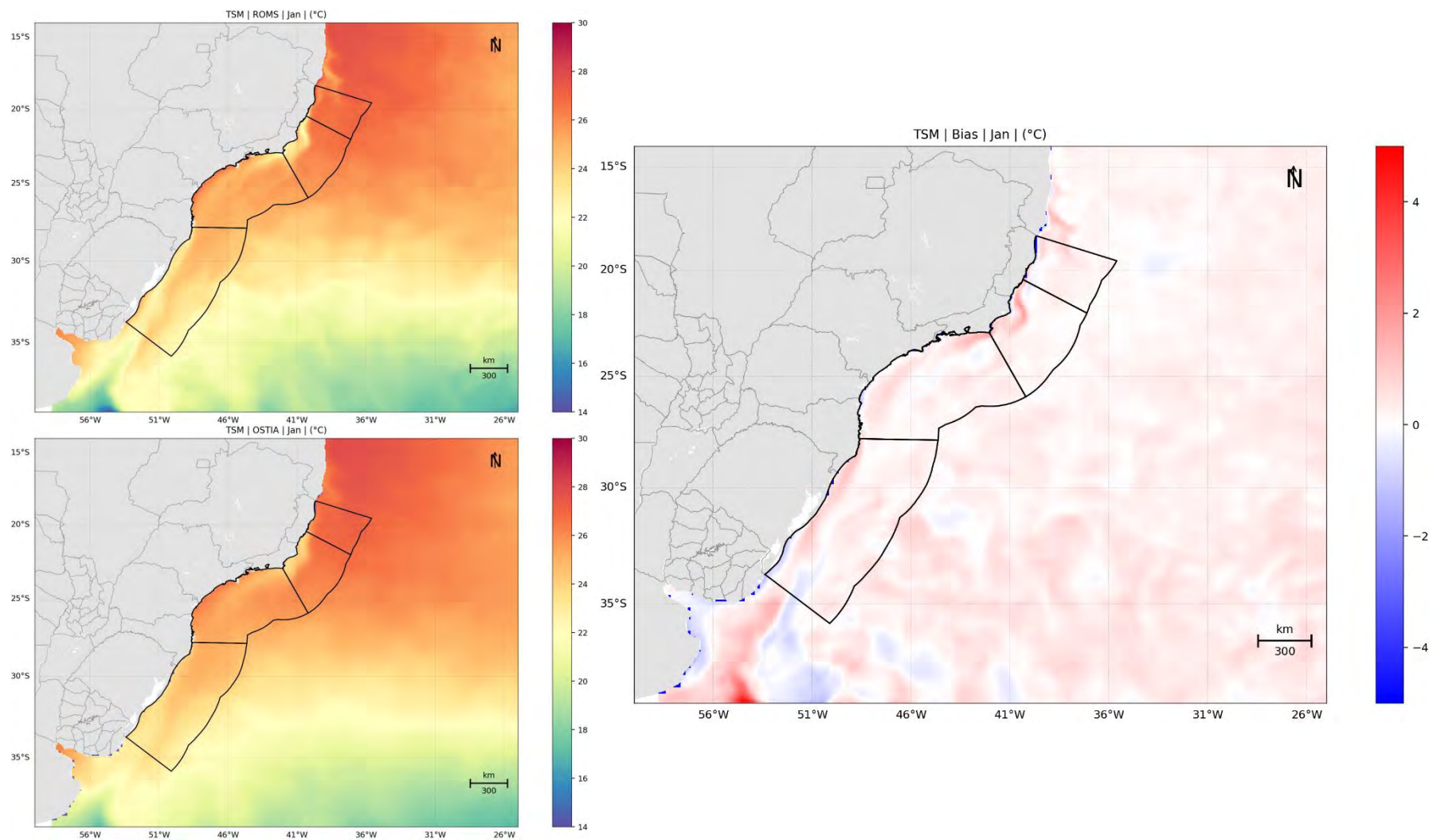


Figura 114: TSM média de janeiro (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de *bias* (Dado – Modelo).

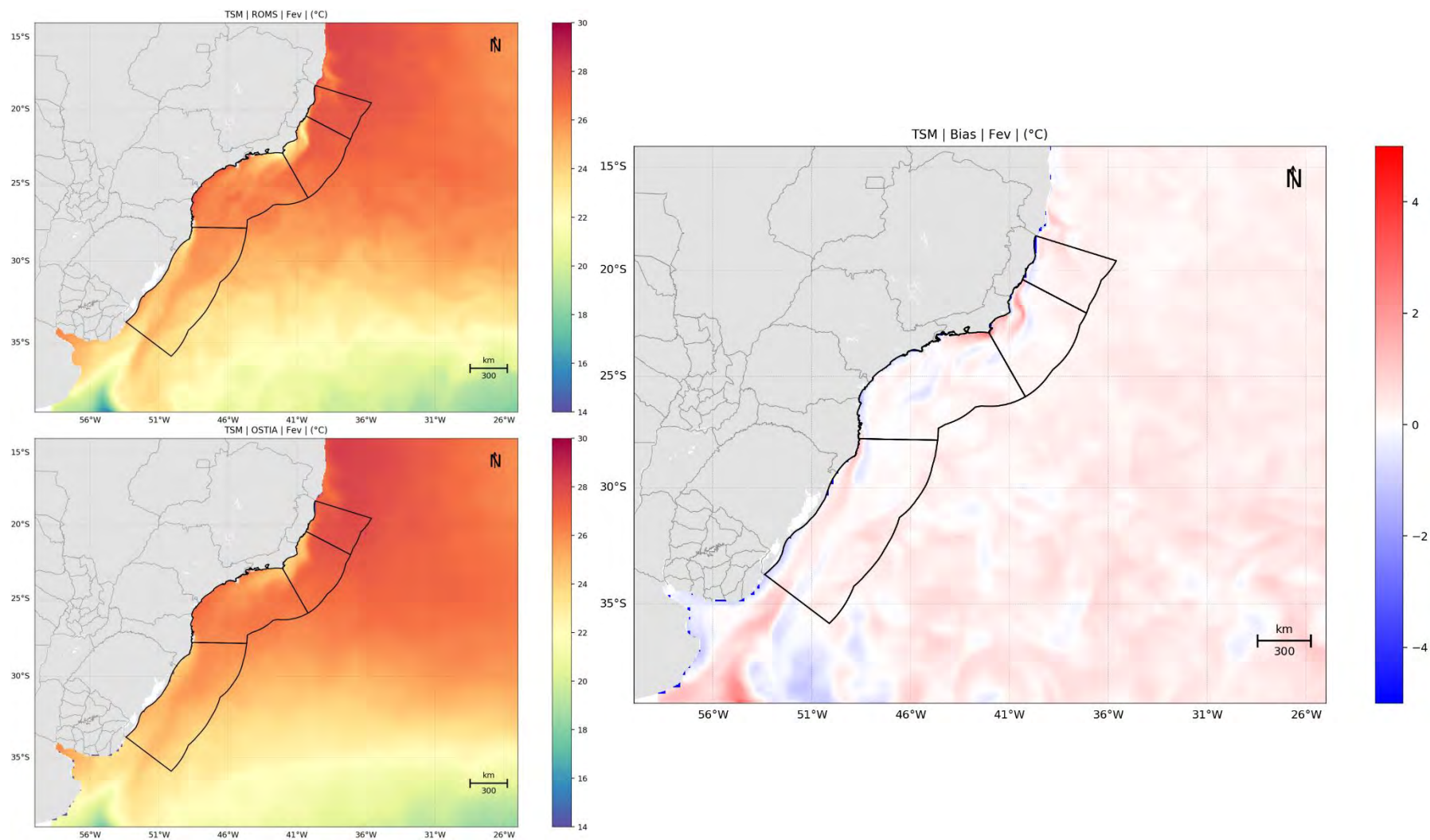


Figura 115: TSM média de fevereiro (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de *bias* (Dado – Modelo).

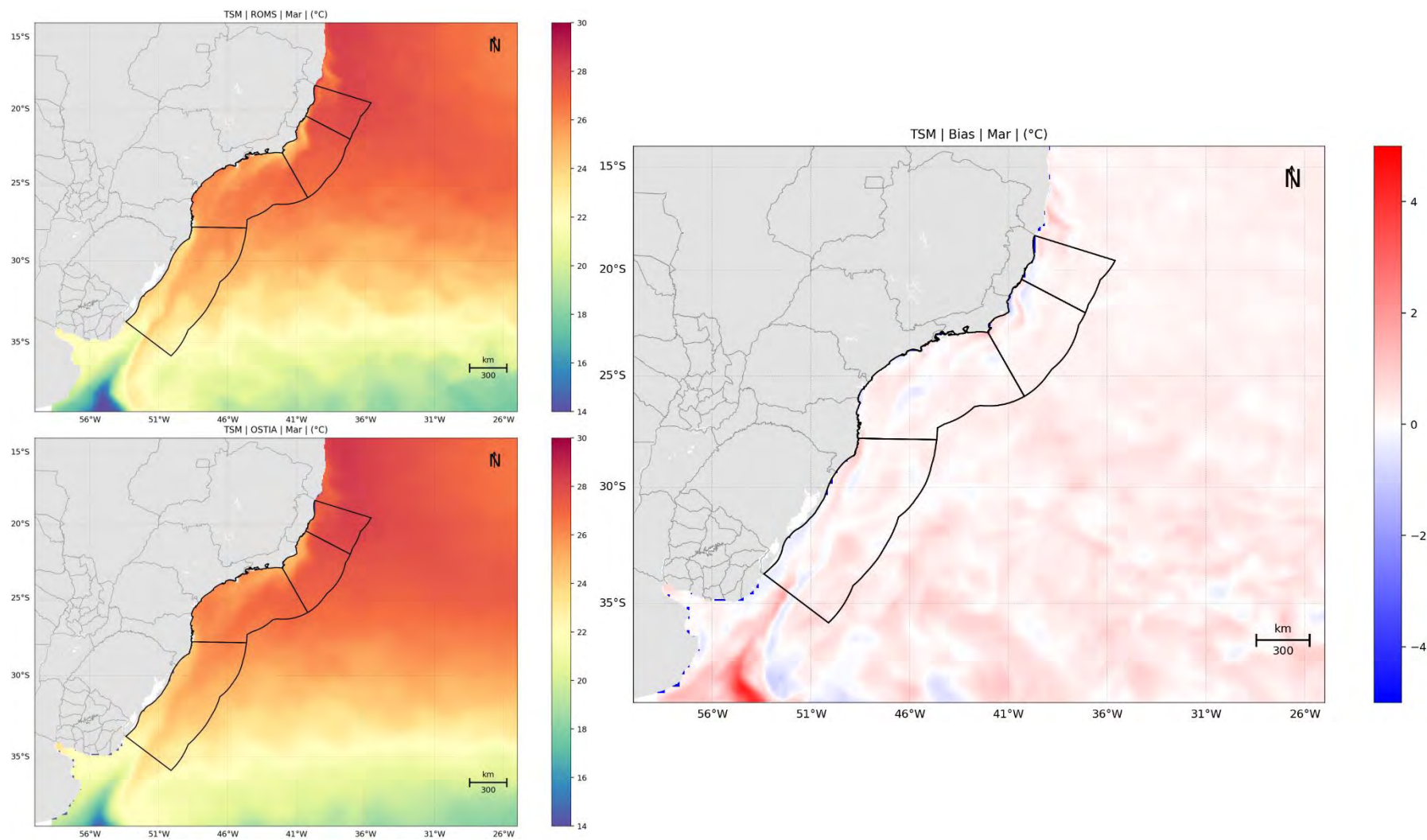


Figura 116: TSM média de março (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de *bias* (Dado – Modelo).

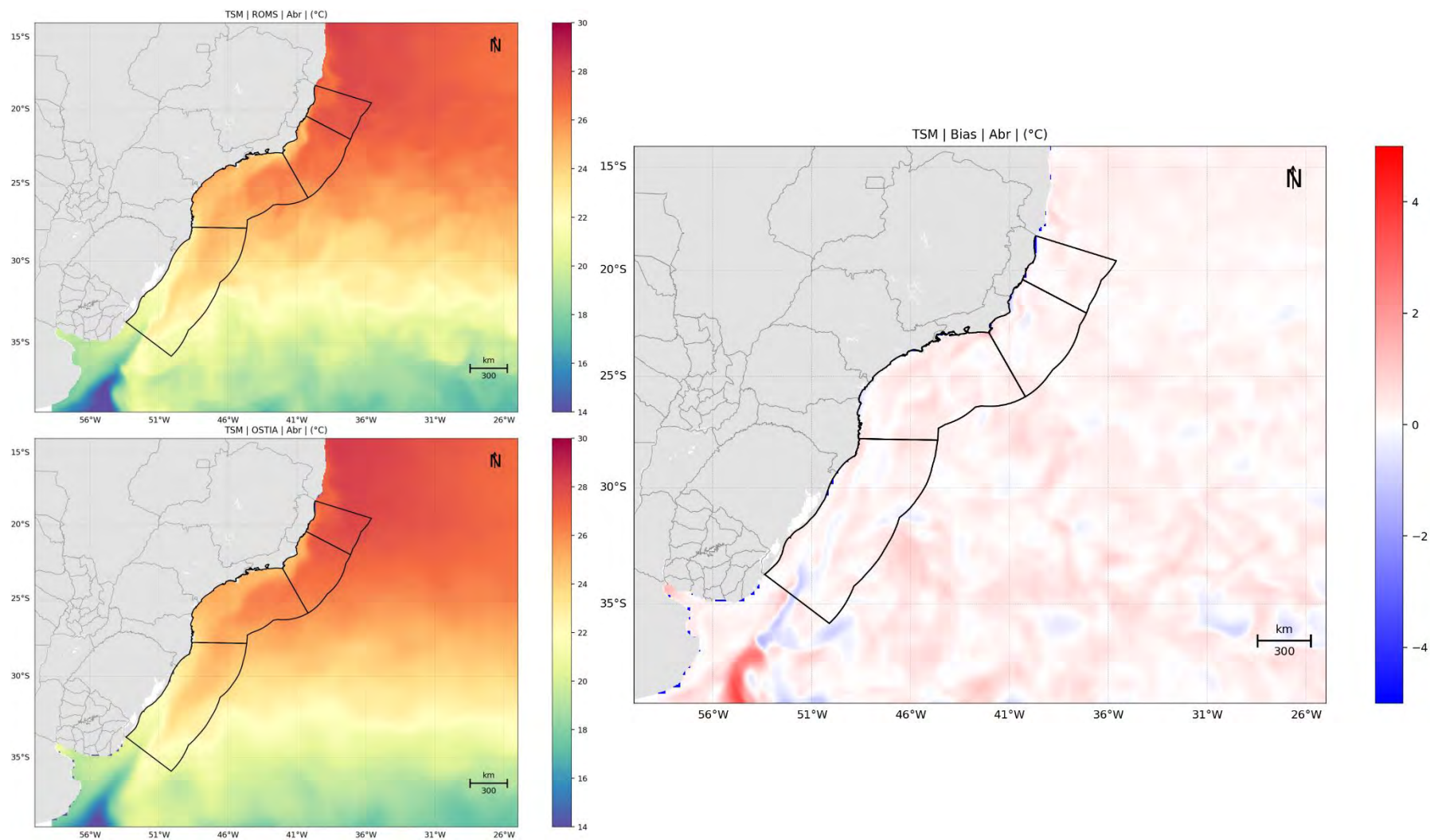


Figura 117: TSM média de abril (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de *bias* (Dado – Modelo).

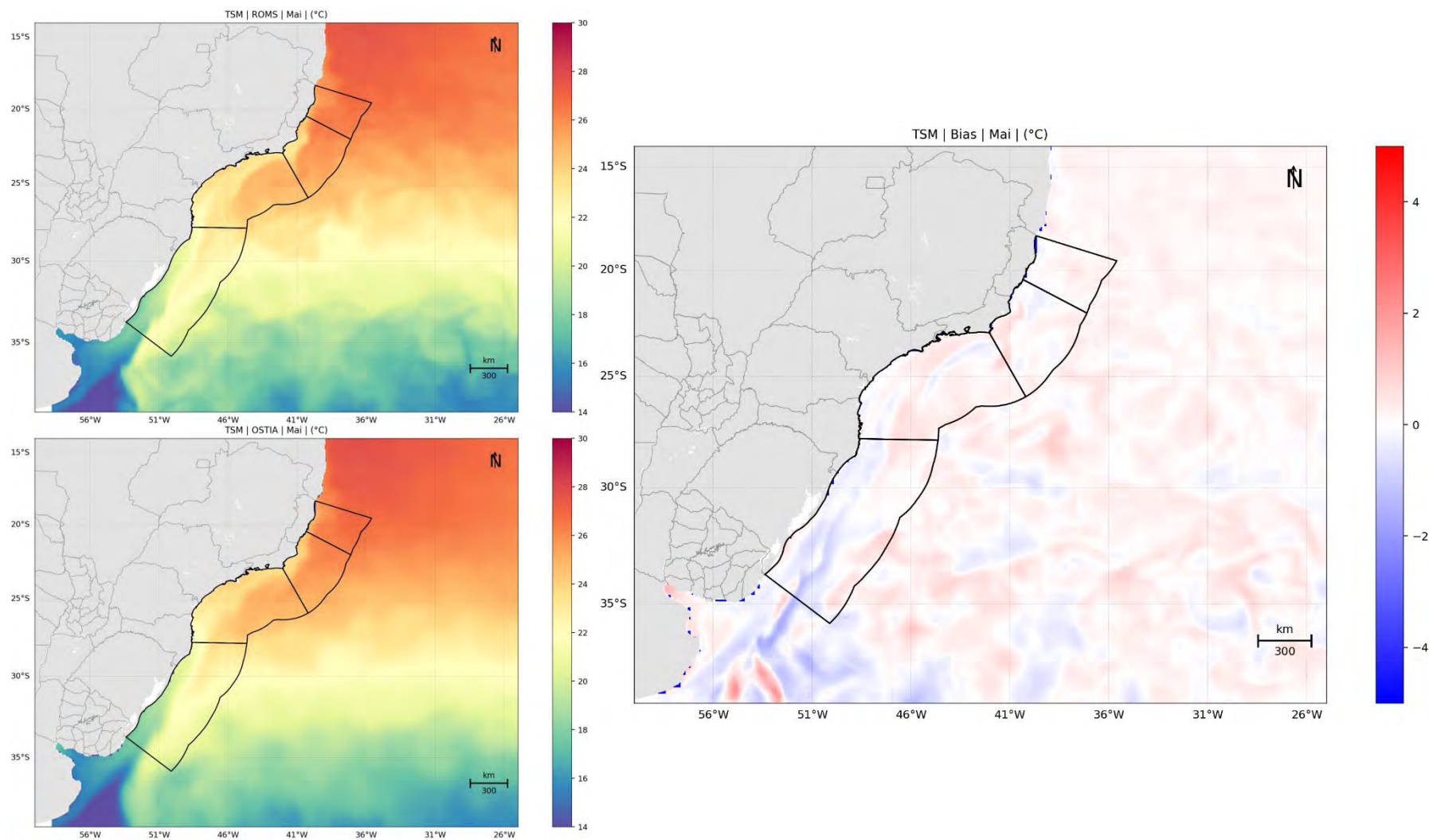


Figura 118: TSM média de maio (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de *bias* (Dado – Modelo).

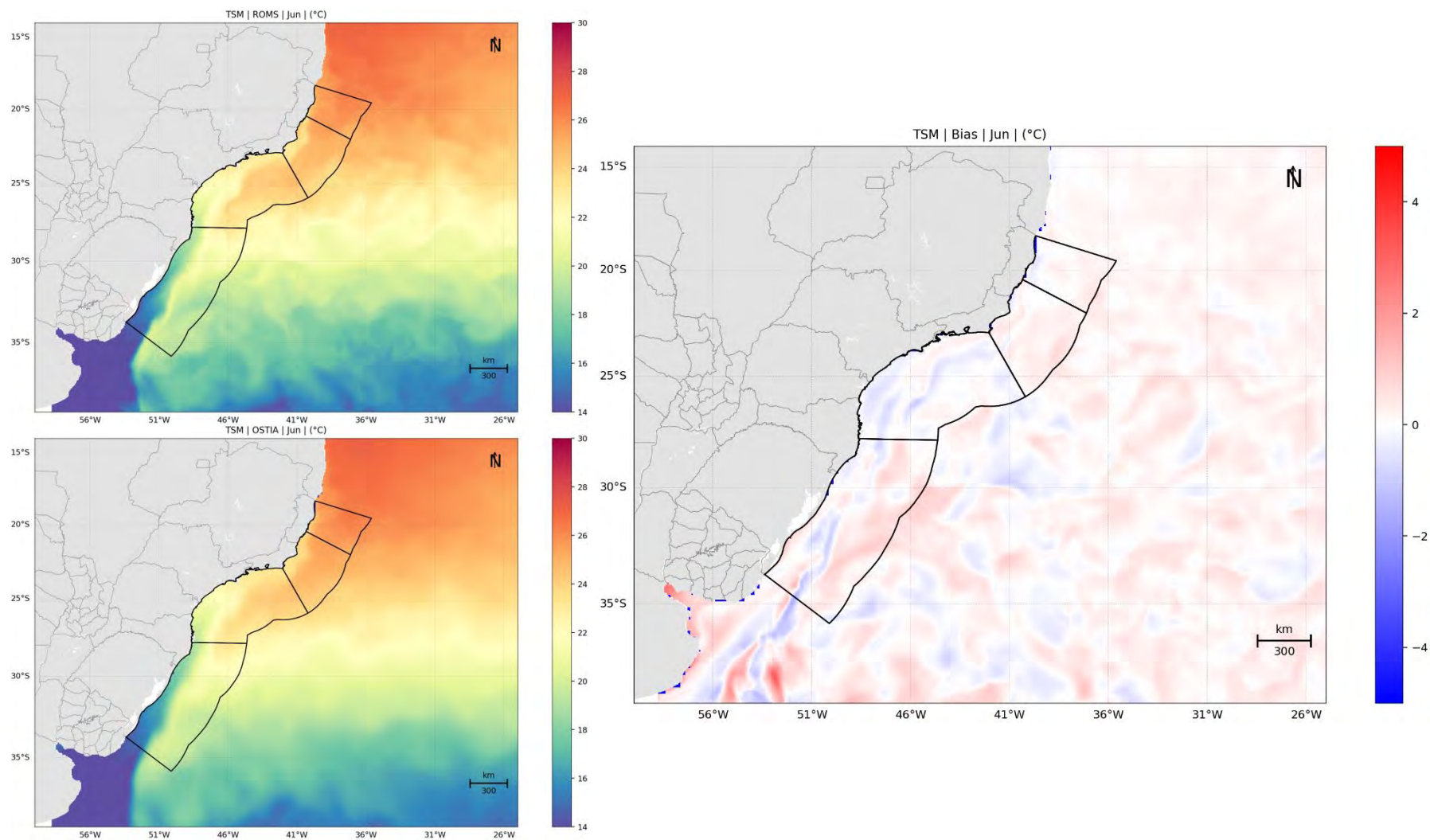


Figura 119: TSM média de junho (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de *bias* (Dado – Modelo).

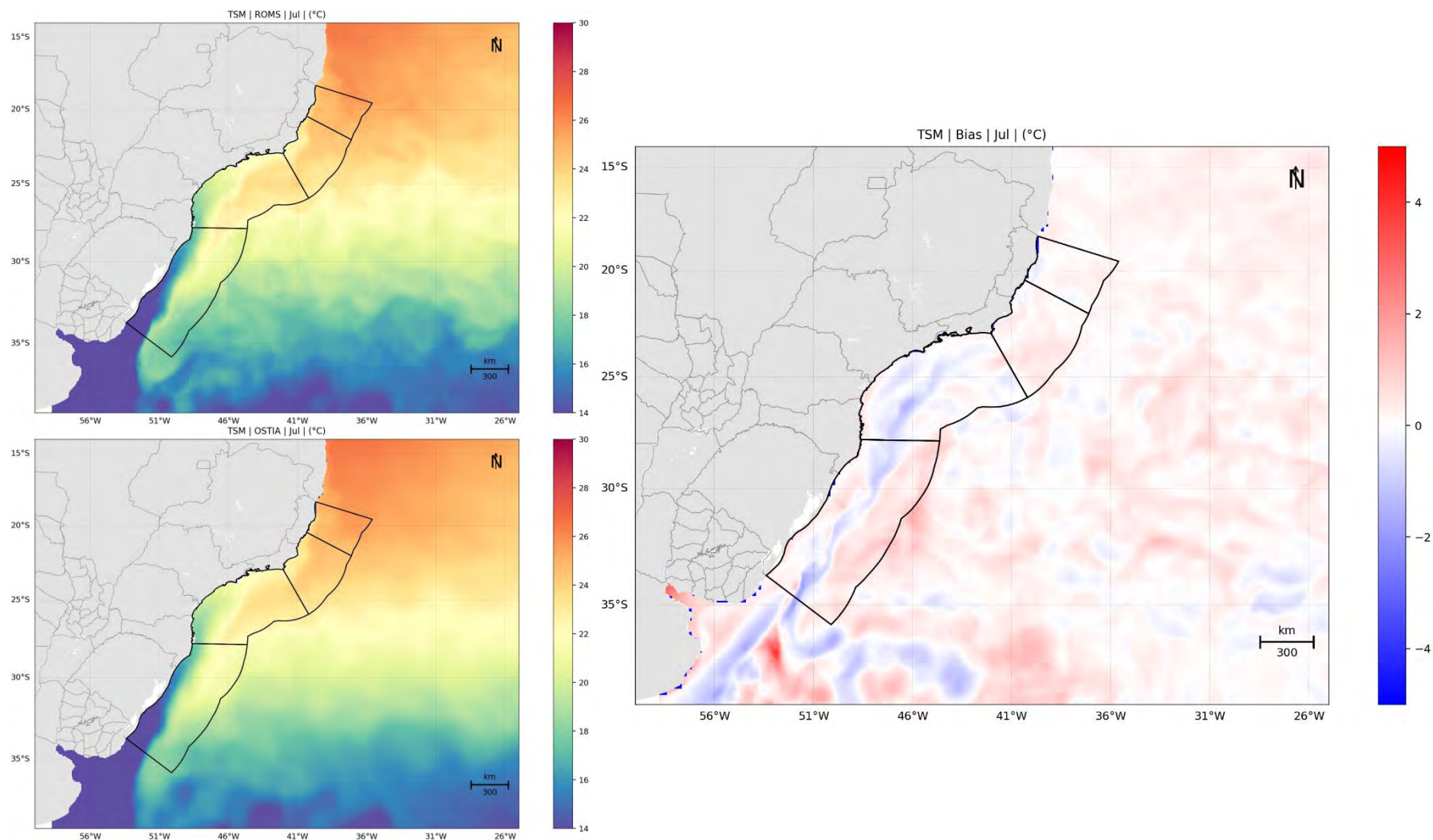


Figura 120: TSM média de julho (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de *bias* (Dado – Modelo).

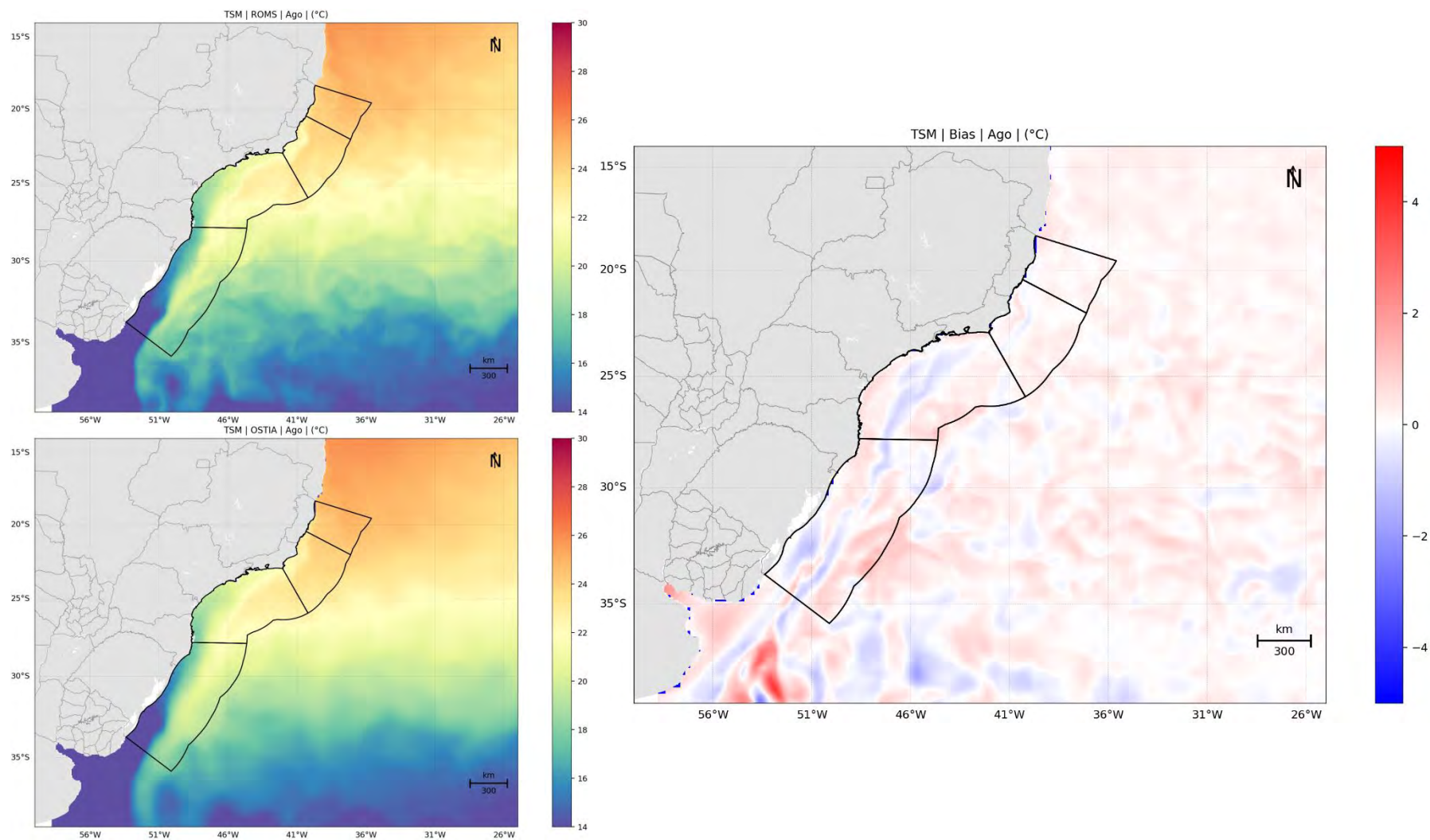


Figura 121: TSM média de agosto (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de *bias* (Dado – Modelo).

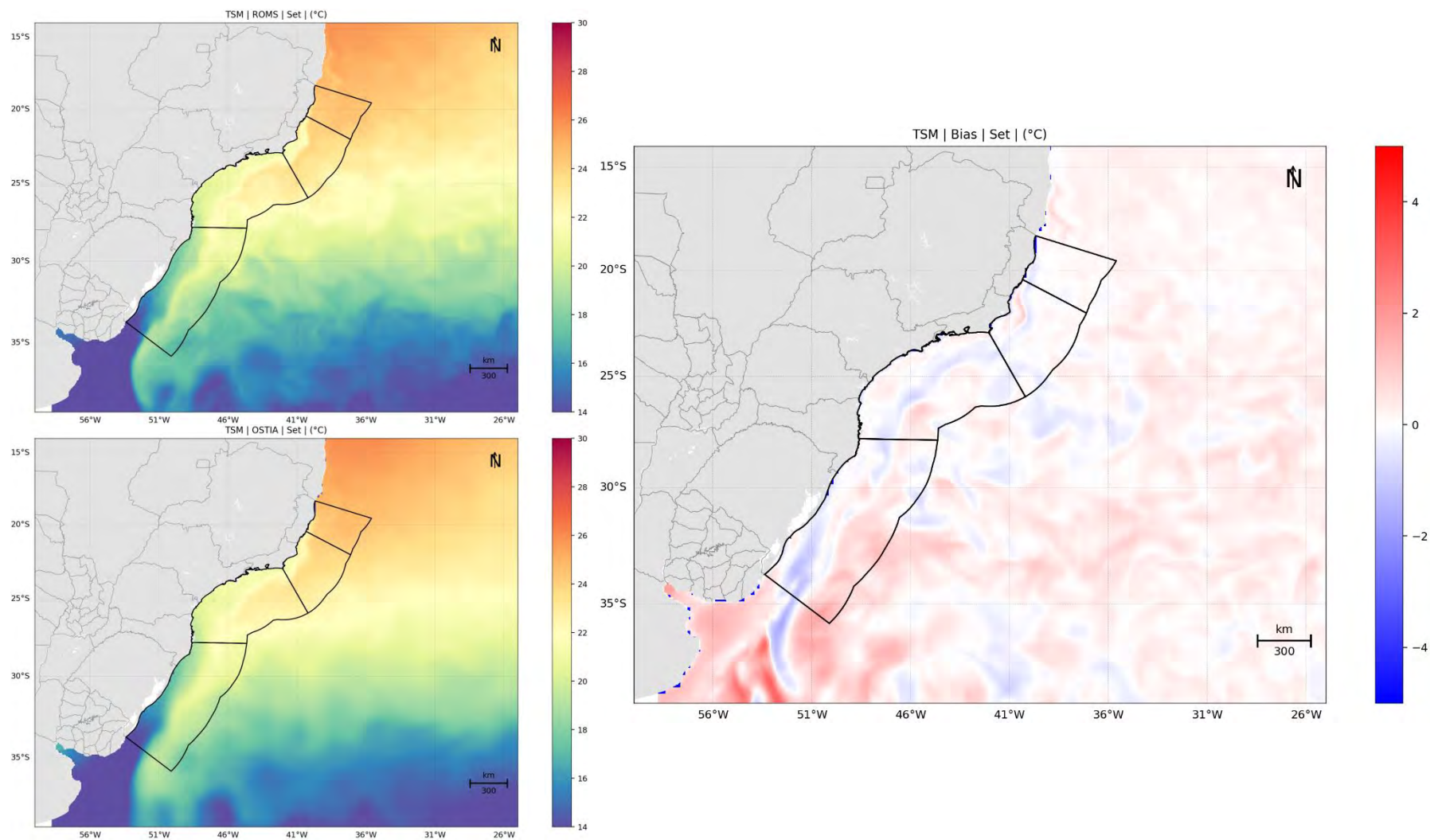


Figura 122: TSM média de setembro (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de *bias* (Dado – Modelo).

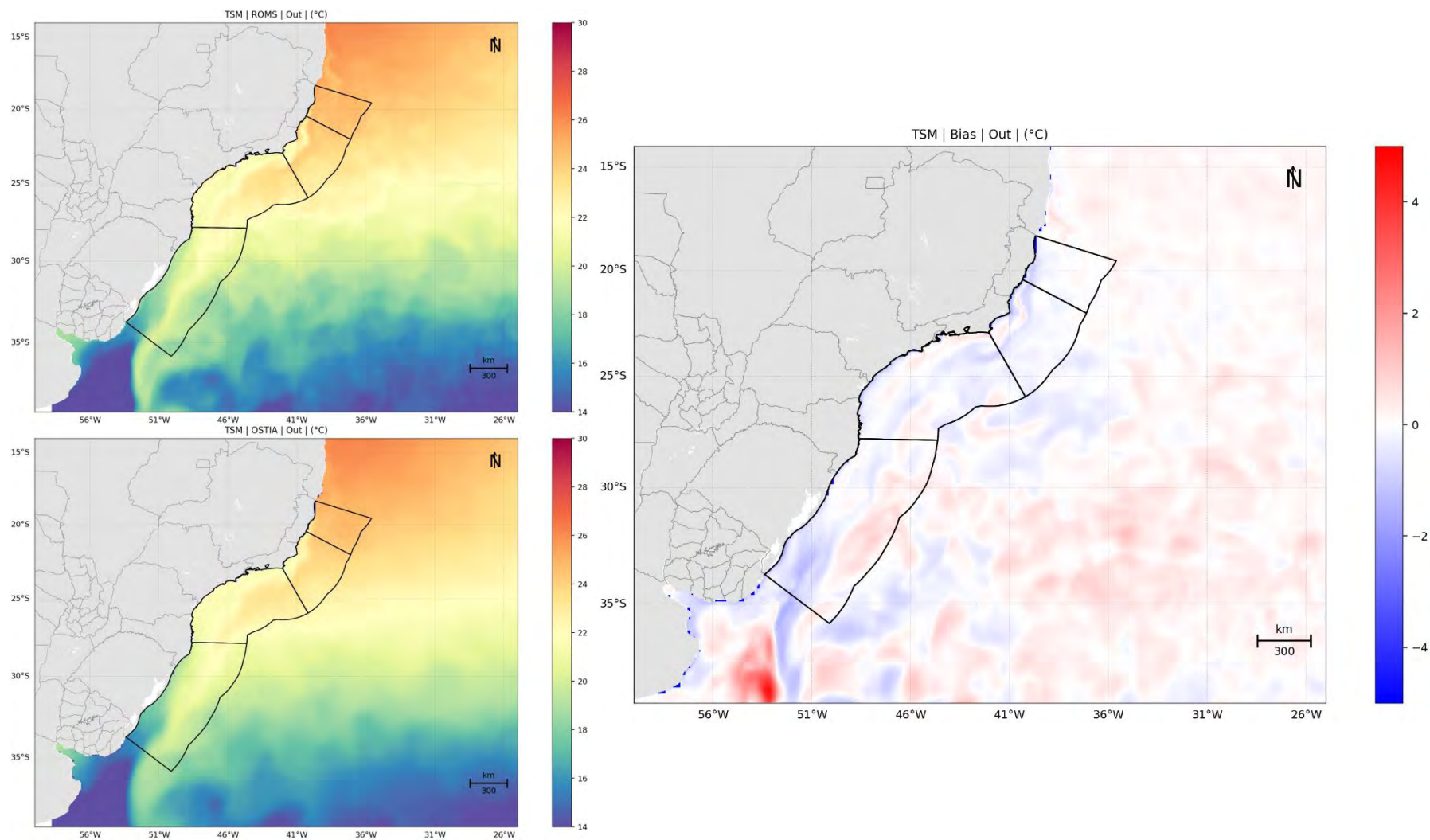


Figura 123: TSM média de outubro (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de *bias* (Dado – Modelo).

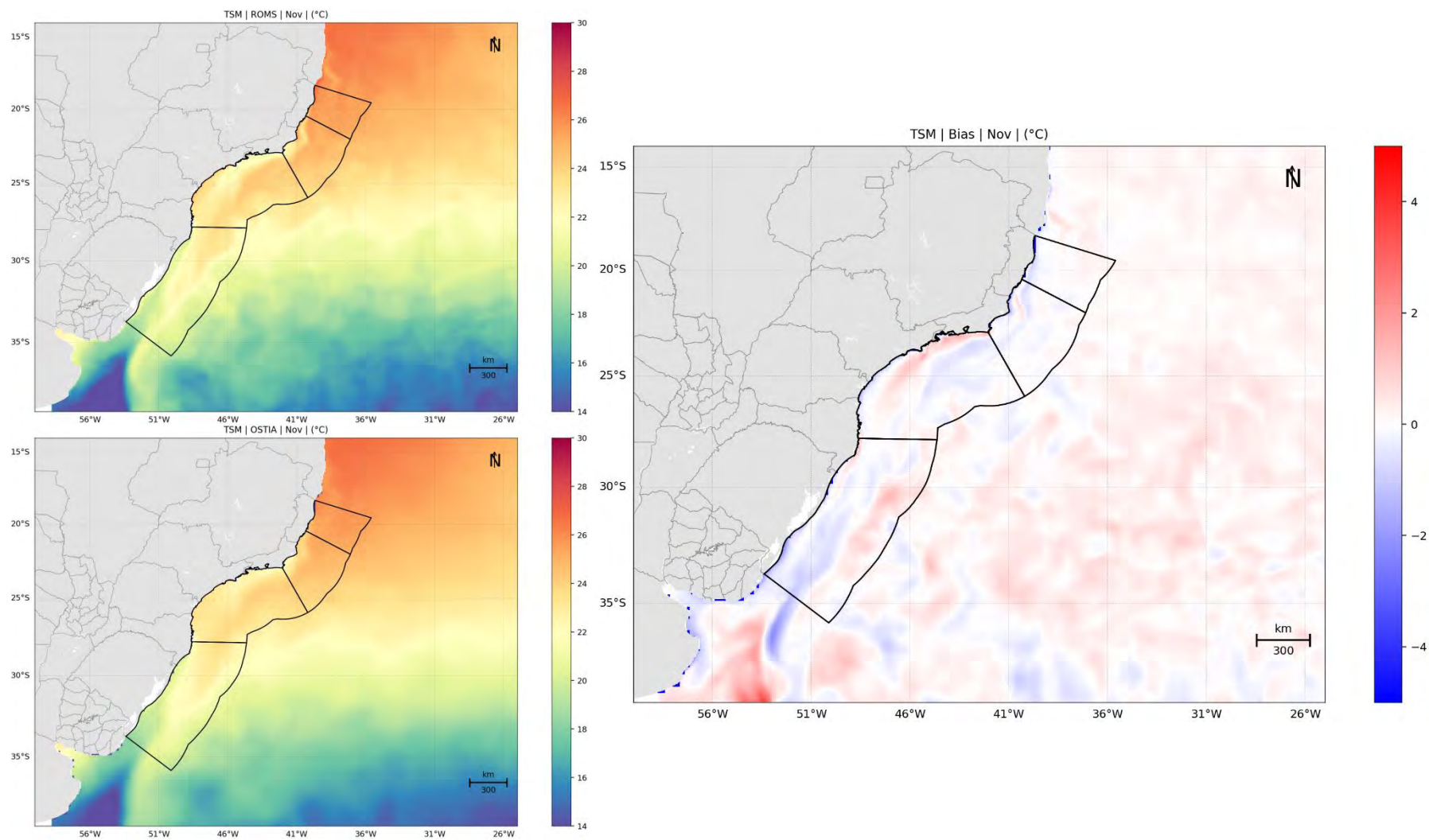


Figura 124: TSM média de novembro (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de *bias* (Dado – Modelo).

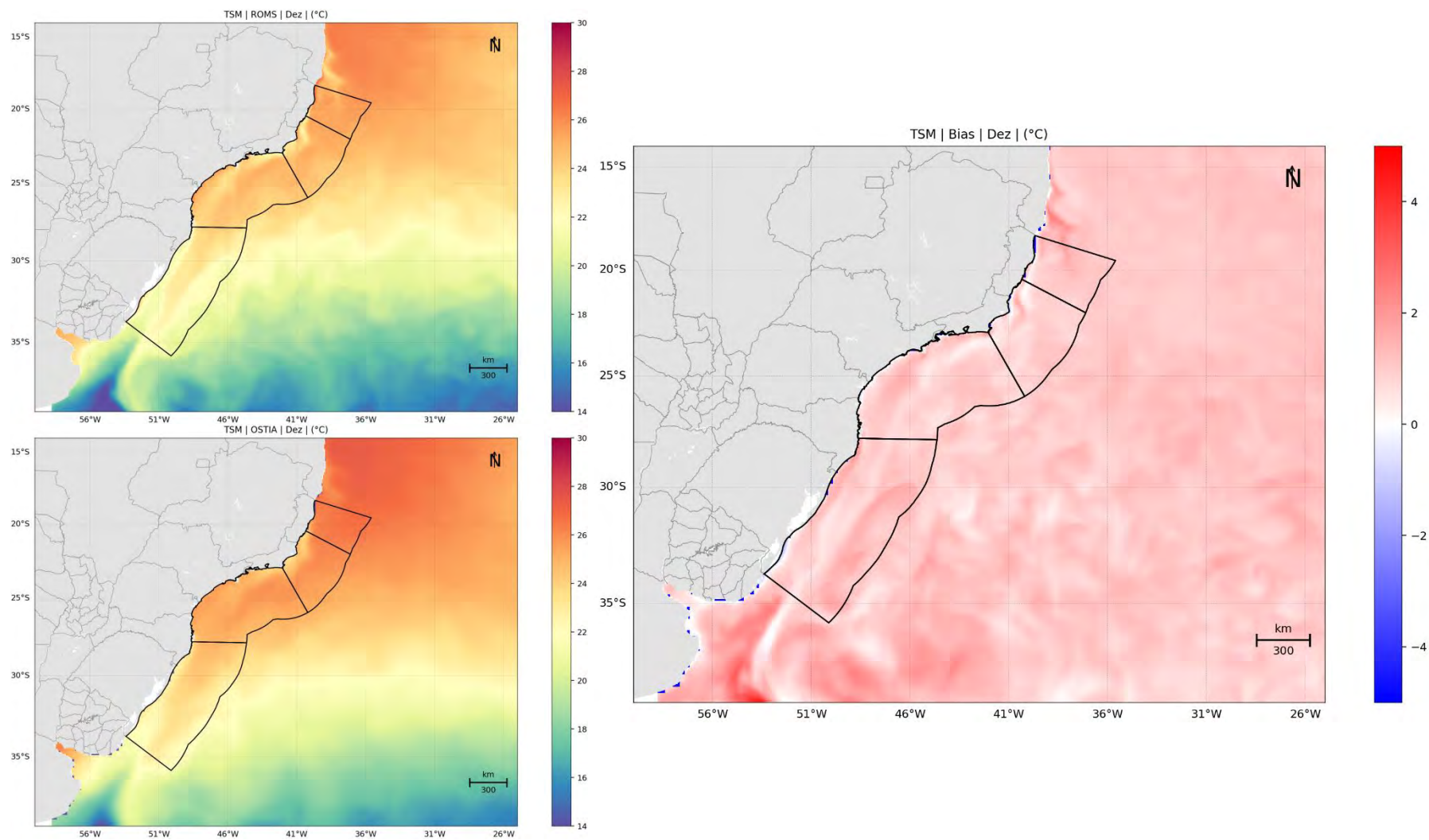


Figura 125: TSM média de dezembro (à esquerda) dos resultados obtidos do ROMS (superior) e os dados do OSTIA (inferior) e o campo de *bias* (Dado – Modelo).

Em geral, verifica-se que os padrões da TSM foram bem representados pelo ROMS. A boa representação do campo de temperatura superficial do modelo é um excelente indicador da capacidade do modelo em representar a dinâmica da região, visto que a distribuição espacial da temperatura é influenciada pela advecção das correntes.

Devido à maior resolução, verifica-se que o modelo apresenta maior detalhamento nas feições e uma melhor representação de feições costeiras como por exemplo a ressurgência que ocorre na região de Campos e Arraial do Cabo (RJ). Destaca-se a boa representação da sazonalidade da TSM e a representação da intrusão de água mais fria pela plataforma continental nos meses de inverno. Esta intrusão demonstra a capacidade do modelo de representar a Corrente Costeira do Brasil (CCB) que, através de sucessivos pulsos forçados principalmente pela passagem de sistemas frontais (frentes frias), gera uma corrente residual, sazonal, com direção nordeste, que transporta água fria e rica em nutrientes desde 38°S até 24°S (MENDONÇA et al. 2016; SOUZA & ROBINSON, 2004).

No que tange o *bias*, observa-se que entre dezembro e abril há uma baixa ($<1^{\circ}\text{C}$) subestimação do modelo nas bacias de estudo, enquanto entre os meses de maio e agosto há variações de 1°C entre subestimação e superestimação nas bacias de Pelotas e de Santos. Nos meses seguintes, setembro a novembro, essas variações de sub e superestimação se estendem até as bacias de Campos e do Espírito Santo, com valores entre -1°C e $+1^{\circ}\text{C}$.

Para além dos campos de TSM, foram feitas análises de *bias* considerando três pontos distintos e apresentados na Figura 91. Os valores mínimos, médios e máximos do *bias* em cada um são apresentados na Tabela 7.

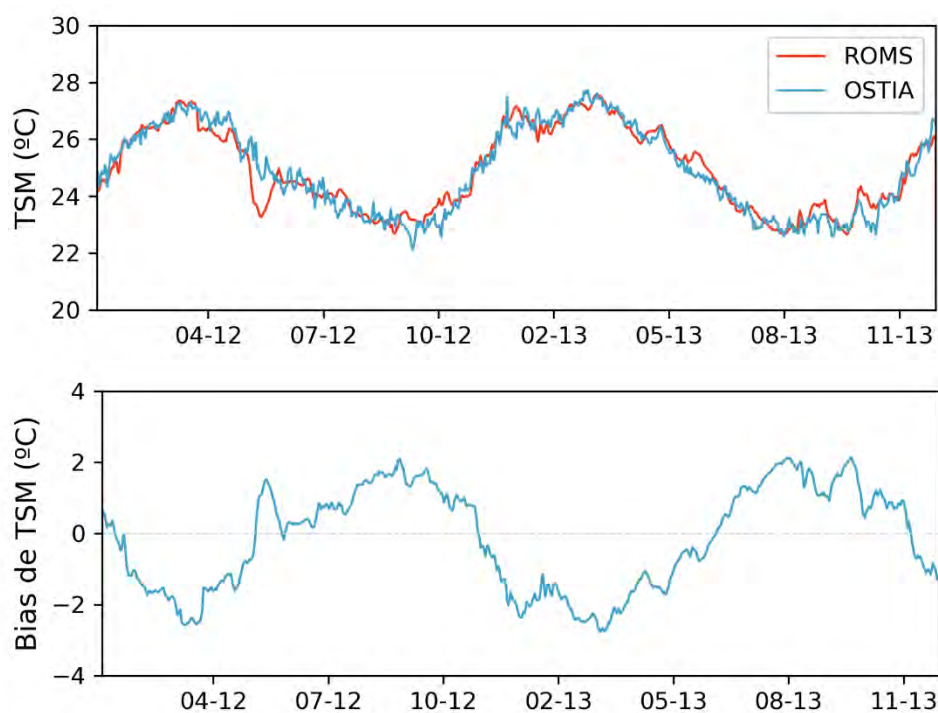


Figura 126: Série de TSM do OSTIA e do ROMS e do *bias* (dado – modelo) no Ponto 1, na Bacia de Santos.

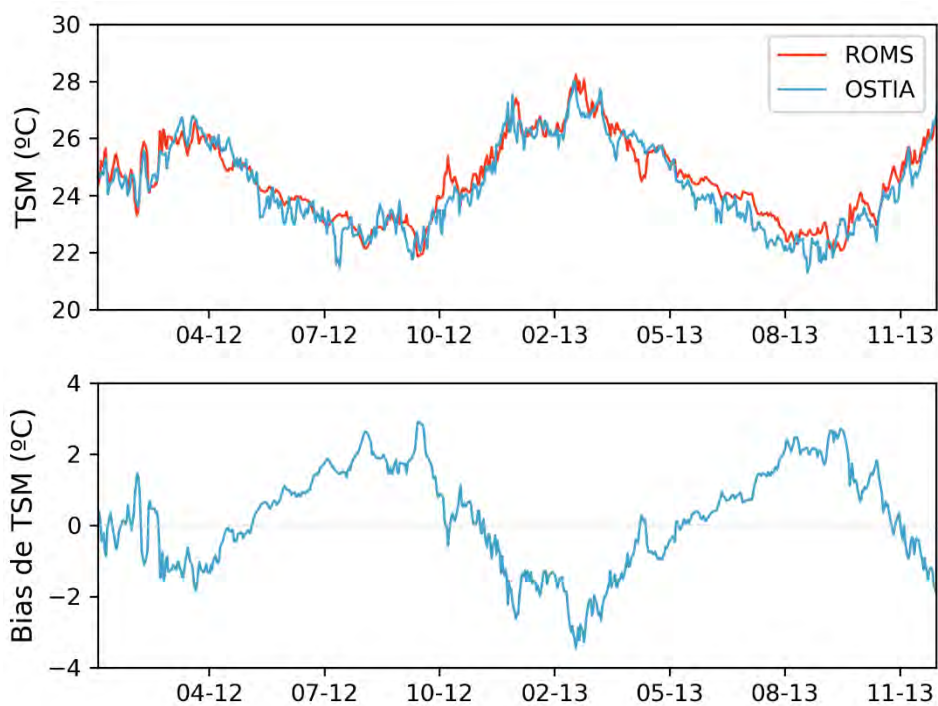


Figura 127: Série de TSM do OSTIA e do ROMS e do *bias* (dado – modelo) no Ponto 2, na Bacia de Santos.

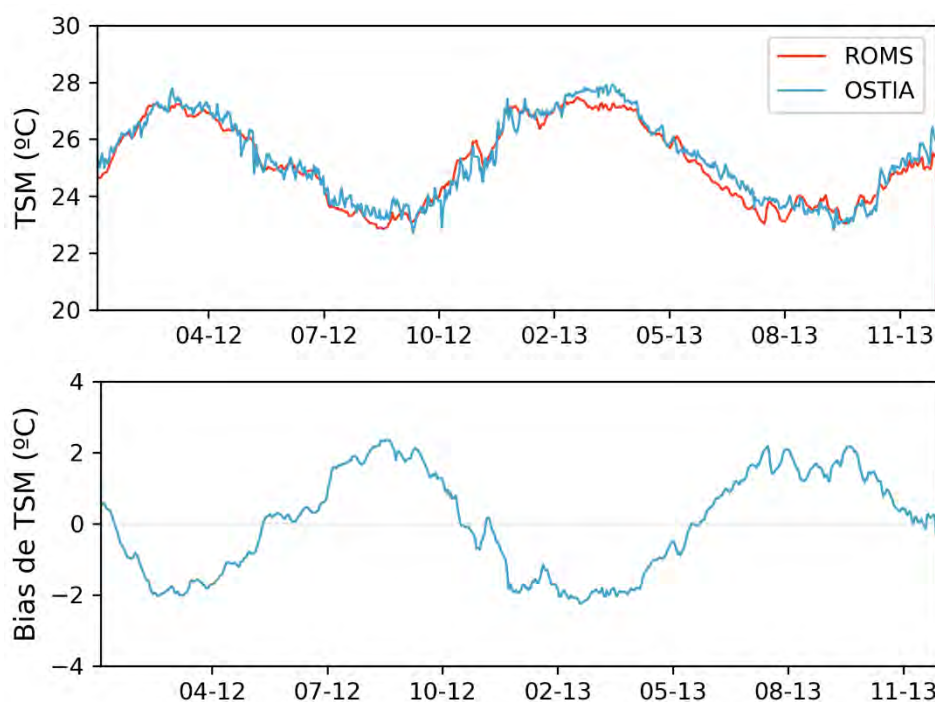


Figura 128: Série de TSM do OSTIA e do ROMS e do *bias* (dado – modelo) no Ponto 3, na Bacia de Campos.

Tabela 7: Valores de bias de TSM (°C) mínimo, médio e máximo.

Ponto	Mínimo	Médio	Máximo
1 – Bacia de Santos	-2,77	-0,11	2,13
2 – Bacia de Santos	-3,45	0,21	2,92
3 – Bacia de Campos	-2,25	0,01	2,36

De forma geral, observa-se que há uma variação sazonal do *bias*. Para o Ponto 1 se observa que a TSM é subestimada pelo modelo entre junho e novembro e superestimada entre dezembro e maio, conforme observado nos campos superficiais mensais. A variação do *bias* fica principalmente entre -2°C e +2°C, com média de -0,1°C. Esta variação é coerente se considerarmos as variações de *bias* do modelo usado como condição inicial e condição de contorno (LELLOUCHE *et al.*, 2019).

Para o Ponto 2, também localizado na Bacia de Santos, a variação do *bias* é um pouco maior e a média é positiva, de 0,21 °C. No entanto, o comportamento sazonal é semelhante. Já para o ponto localizado na Bacia de Campos, os valores mínimo e máximo são antagonicamente parecidos, resultando em uma média de *bias* menor que nos outros dois pontos, 0,01°C.

8.3. Estrutura Termohalina

Para avaliar a representação da estrutura vertical de temperatura e salinidade, na região de interesse, foram utilizados os dados da climatologia WOA13 V2 (*World Ocean Atlas 13 version 2*) 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 utiliza dados irregularmente espaçados, gerando uma grade global regularmente espaçada, disponível em 5°, 1° e 0,25°. 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, mas principalmente a partir de 1955. 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 WOA13 podem ser obtidas em Locarnini *et al.* (2013) e Zweng *et al.* (2013).

Os dados utilizados foram extraídos para 12 pontos distribuídos ao longo das bacias do Espírito Santo, Campos, Santos e Pelotas, conforme apresentado na Figura 129. Os 12 pontos foram distribuídos de forma a cobrir a plataforma continental, talude e bacia oceânica de cada uma das bacias sedimentares. A grade de 1° do WOA13-V2 foi escolhida para que a quantidade de observações utilizada na geração da média climatológica fosse mais significativa, aumentando a confiabilidade da faixa de variabilidade das variáveis analisadas.

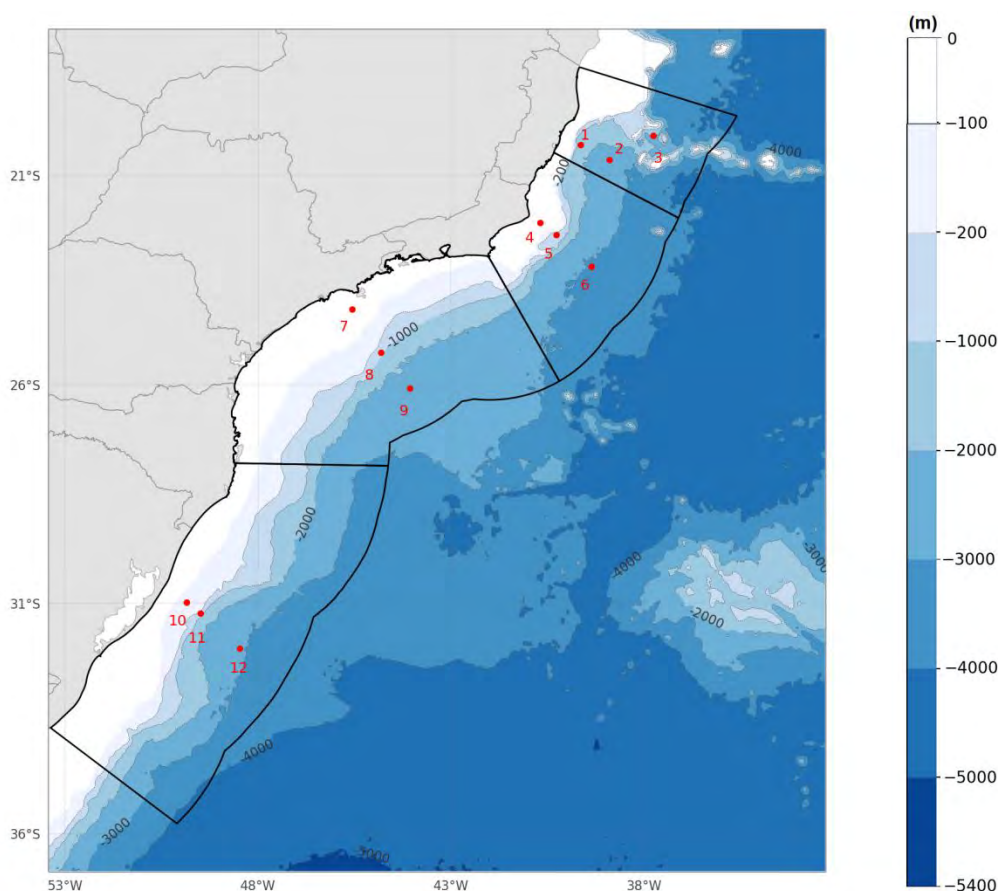


Figura 129: Localização dos pontos de grade do ROMS utilizados para as comparações com o WOA.

Abaixo, da Figura 130 a Figura 153, apresenta-se o número de observações para cada um dos pontos de grade do WOA13 V2 ao longo da coluna d'água, e as faixas de ocorrência¹ das observações de temperatura e salinidade obtidas no modelo (vermelho) e no WOA13-V2 (cinza). Pode-se observar que o modelo representou muito bem a estrutura vertical termohalina ao longo de todo domínio e sua variabilidade, pois ao longo de toda a coluna d'água as faixas de ocorrência são muito similares. Os valores de *bias* médios de salinidade e temperatura não indicam uma clara tendência do modelo, com pontos com subestimação como pontos com superestimação, contudo, sempre com valores pequenos ($\pm 1^\circ\text{C}$ e $\pm 0,2$ psu). Com essa compatibilidade de valores, mostra-se que houve uma boa representação da posição média das massas d'água no domínio de modelagem.

¹ Considerando que estas variáveis seguem uma distribuição normal, esta faixa é calculada para abranger 99,7% das ocorrências, e, portanto, seus limites representam 3 vezes o desvio padrão ao redor da média.

Ressalta-se que diferenças observadas são esperadas, uma vez que os dados do WOA representam uma climatologia obtida para áreas com 1° de resolução, sendo muito maior que a área representada pelos dados do ROMS, com resolução de 1/16°.

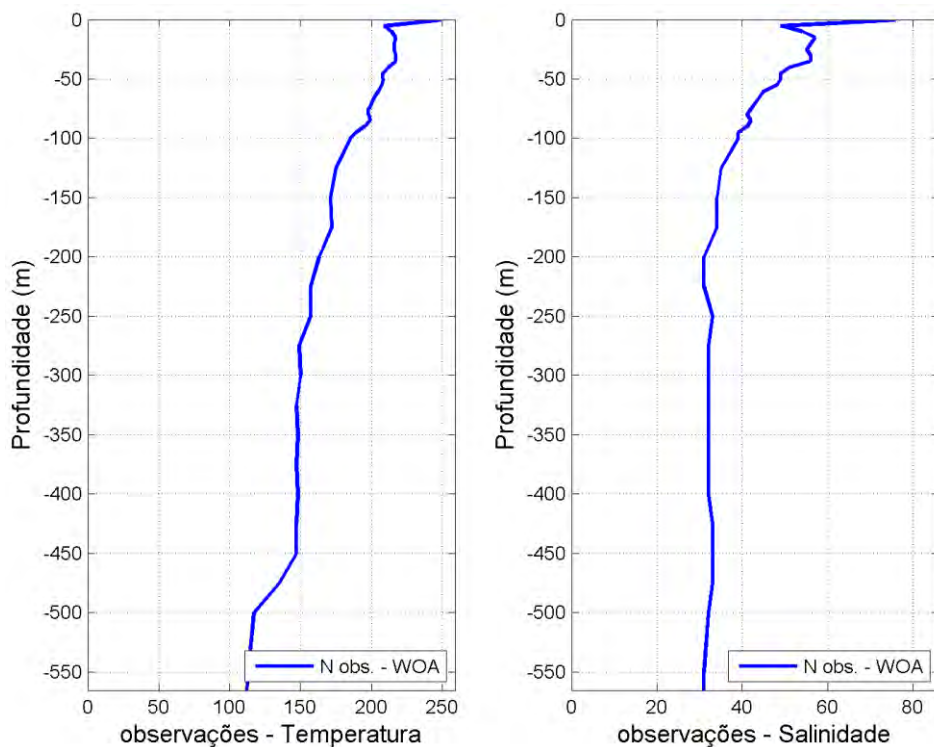


Figura 130: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 1.

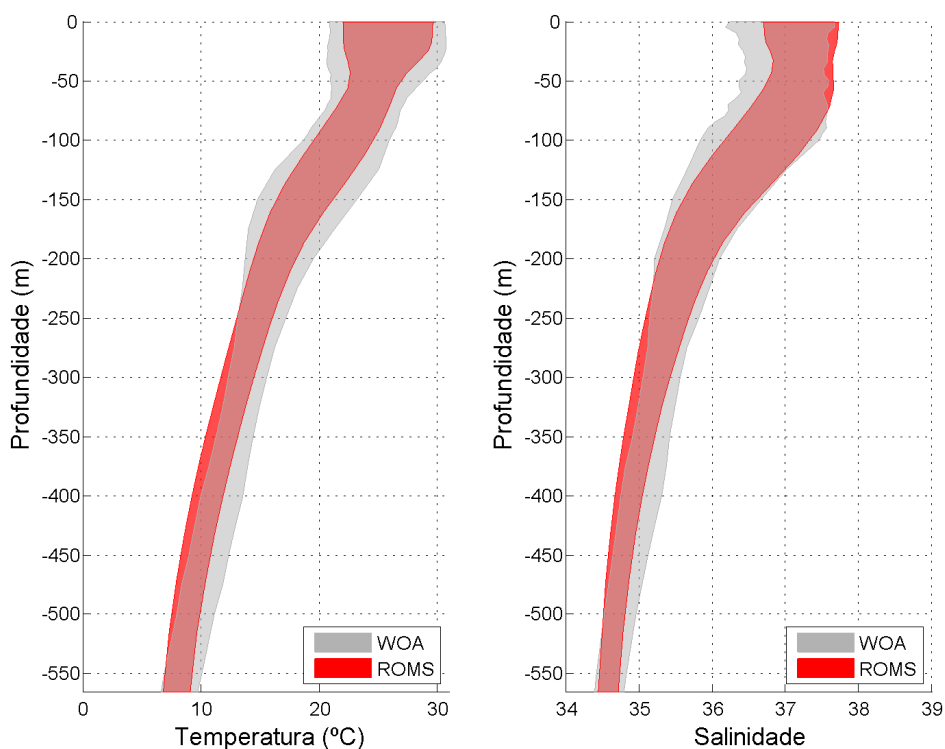


Figura 131: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 1.

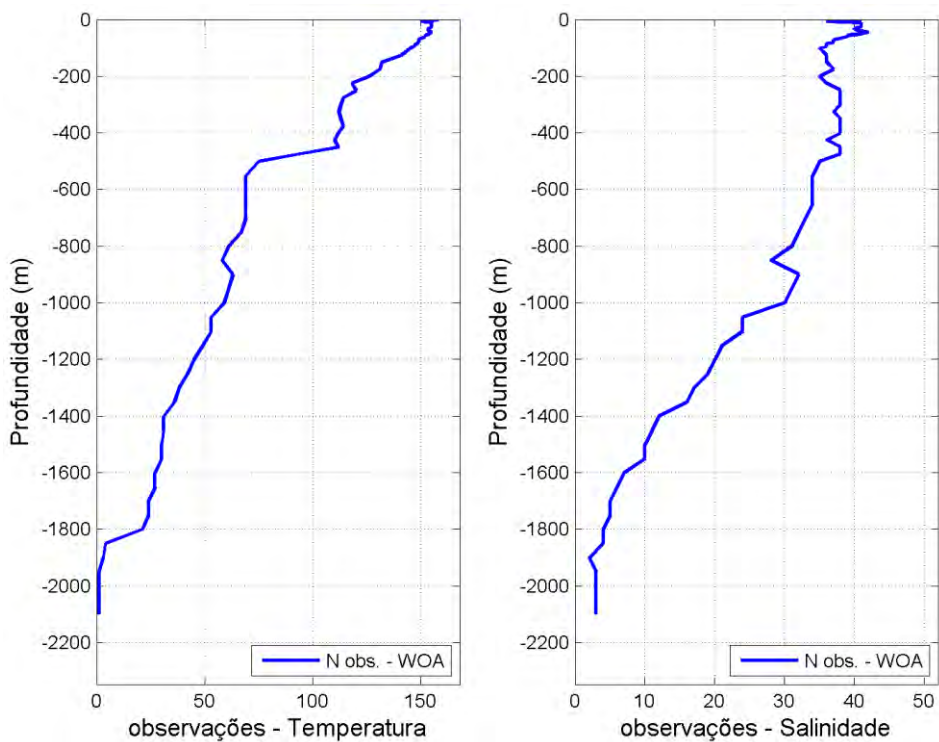


Figura 132: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 2.

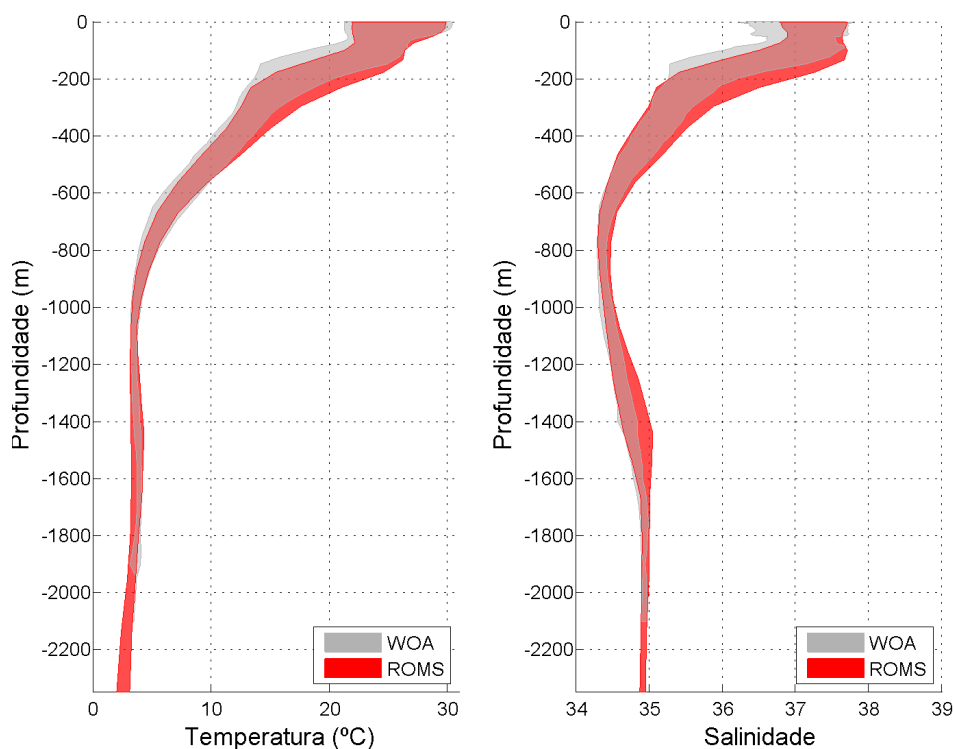


Figura 133: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 2.

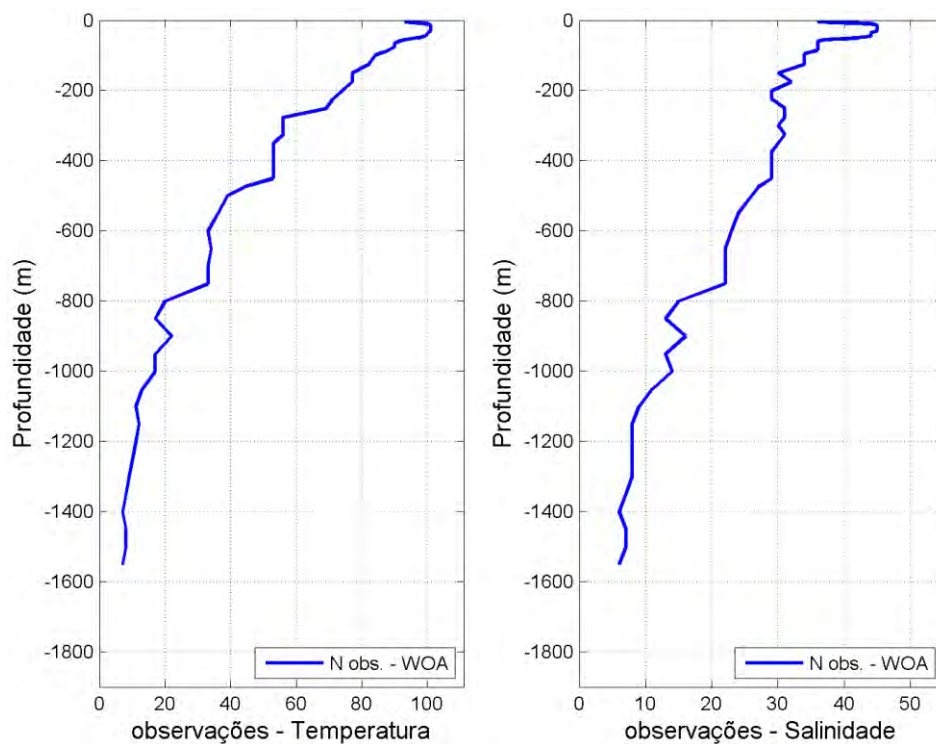


Figura 134: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 3.

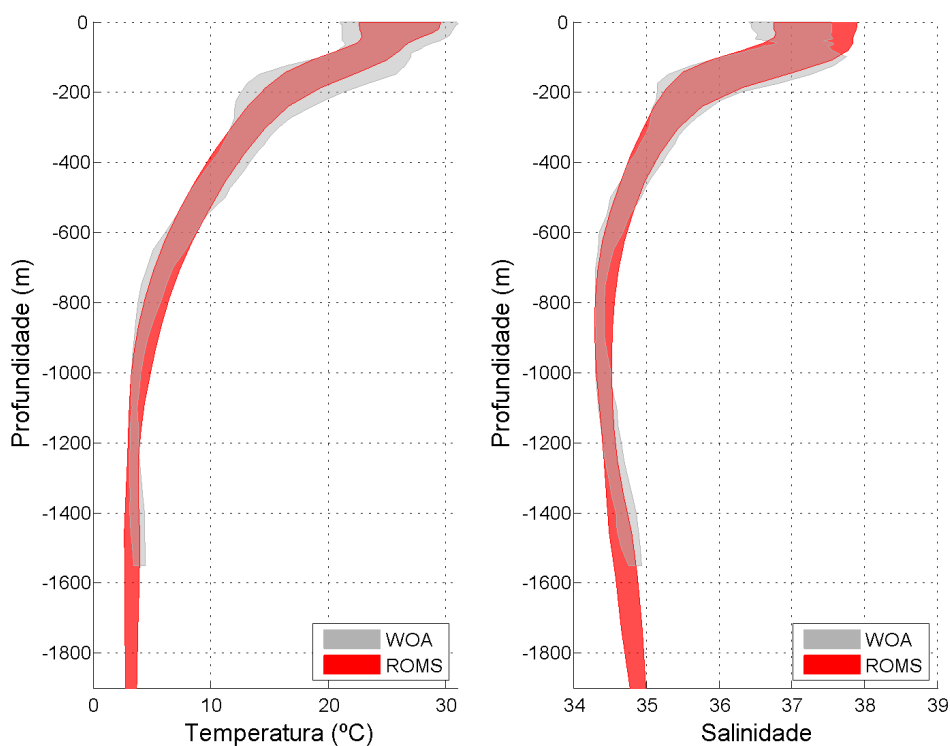


Figura 135: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 3.

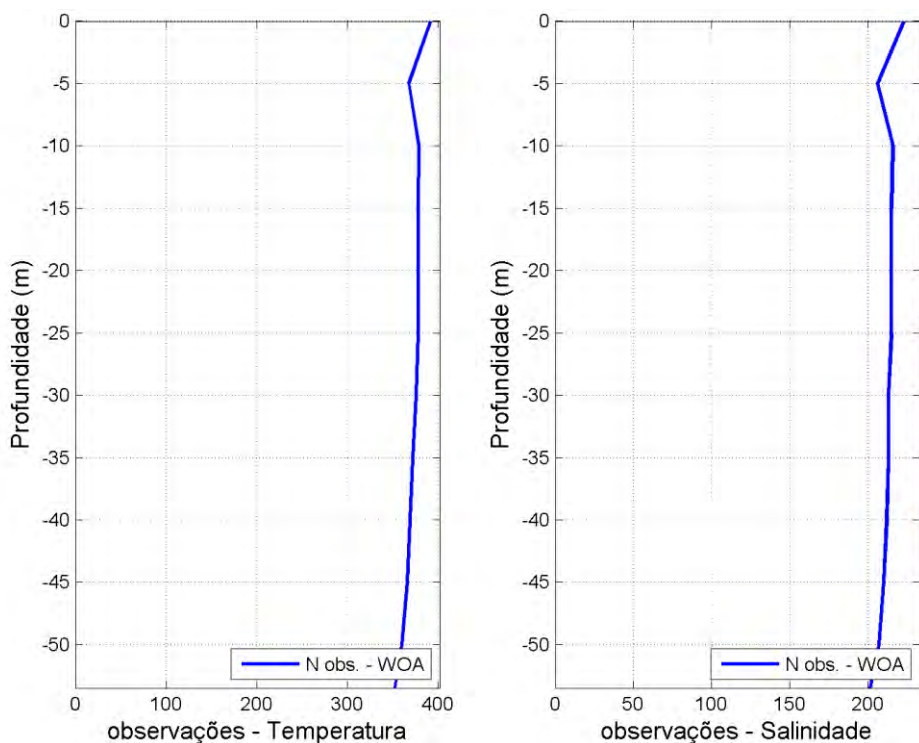


Figura 136: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 4.

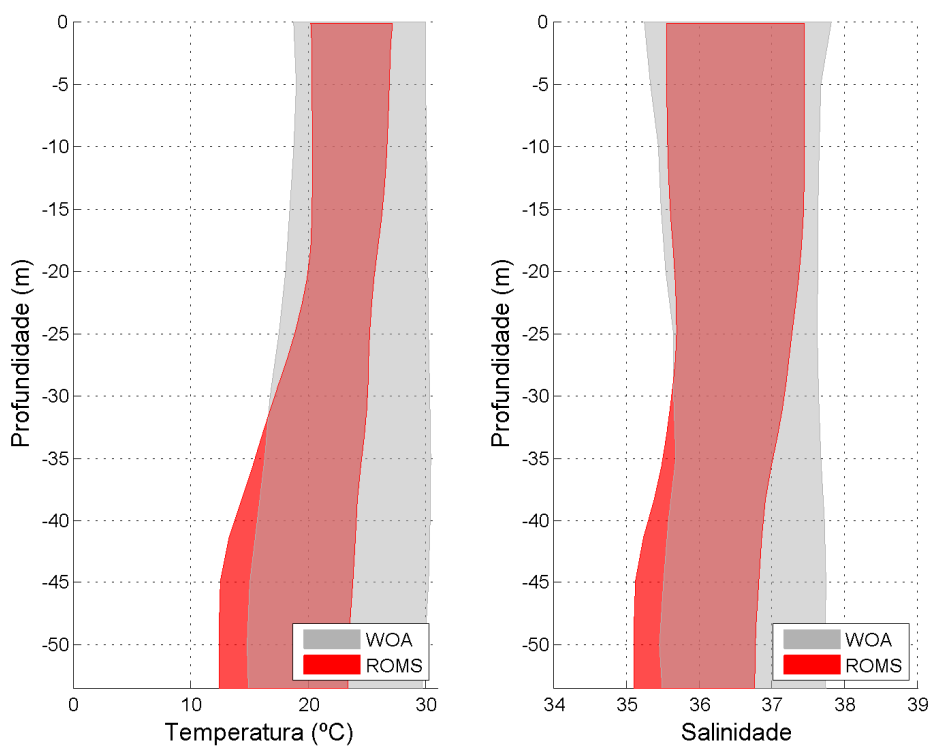


Figura 137: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 4.

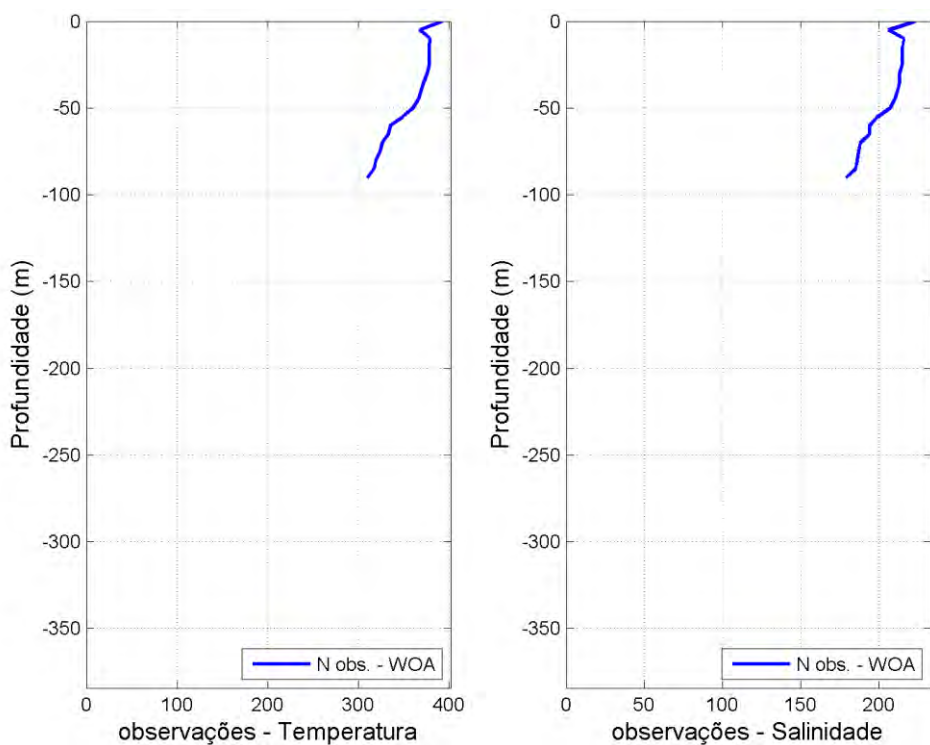


Figura 138: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 5.

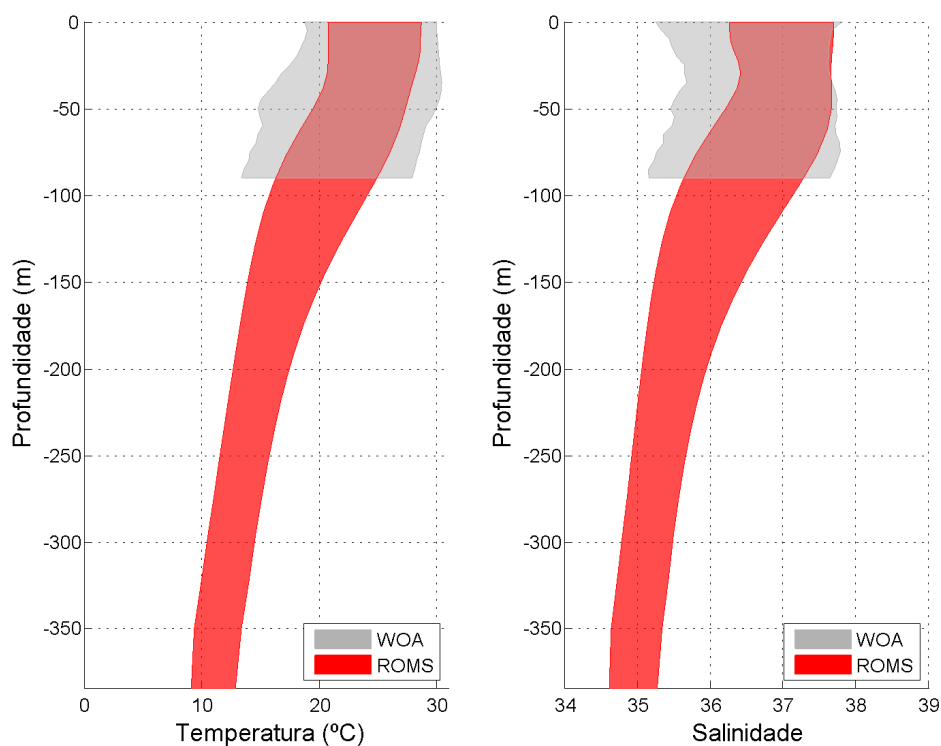


Figura 139: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 5.

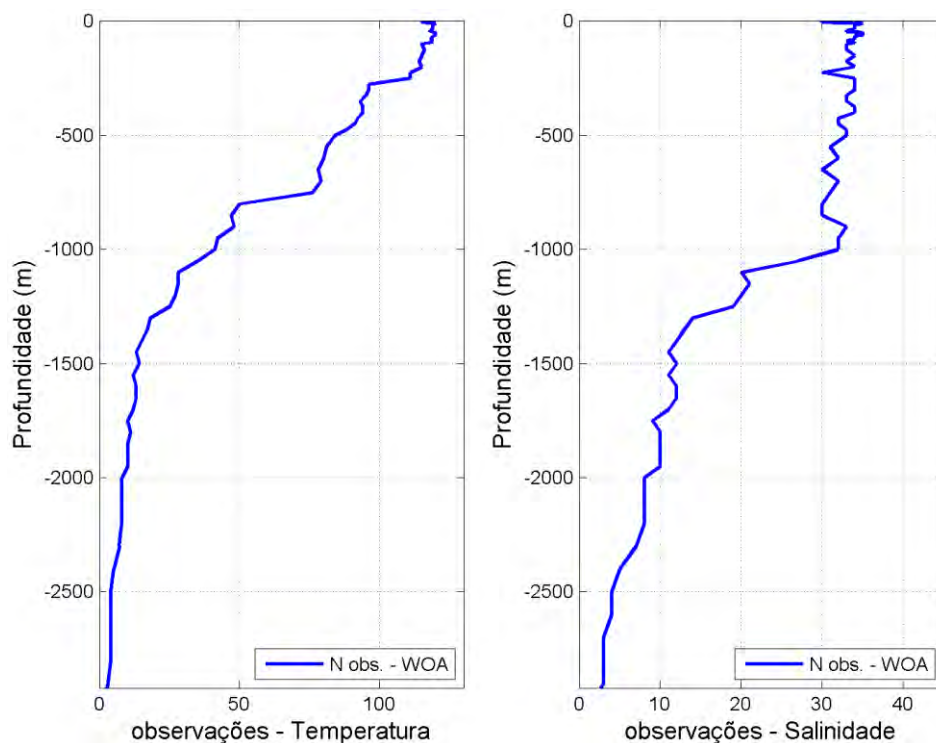


Figura 140: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 6.

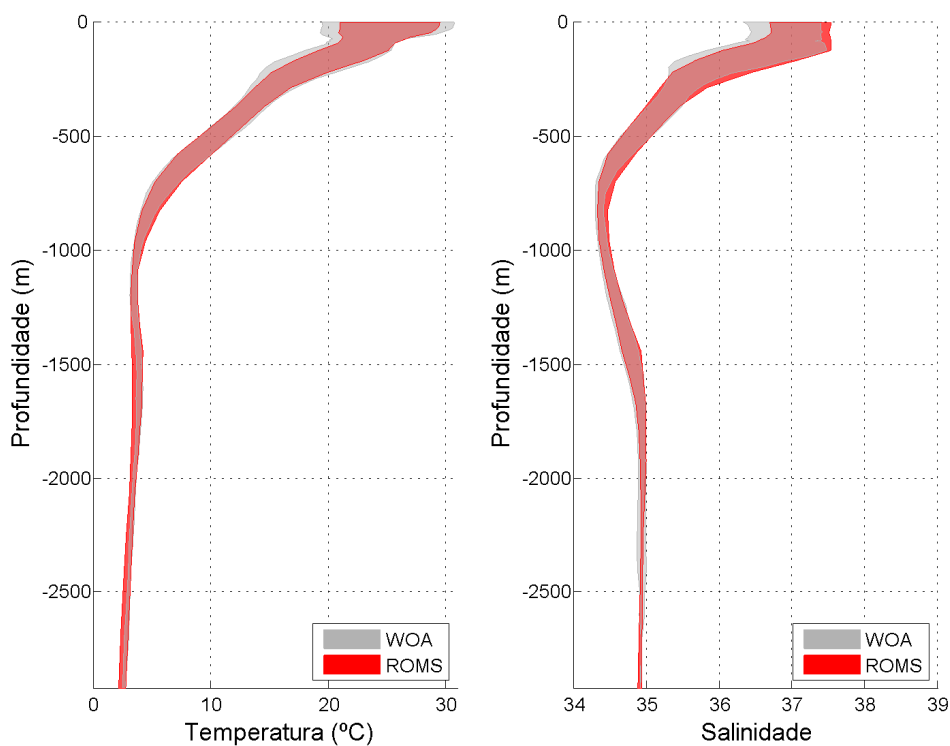


Figura 141: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 6.

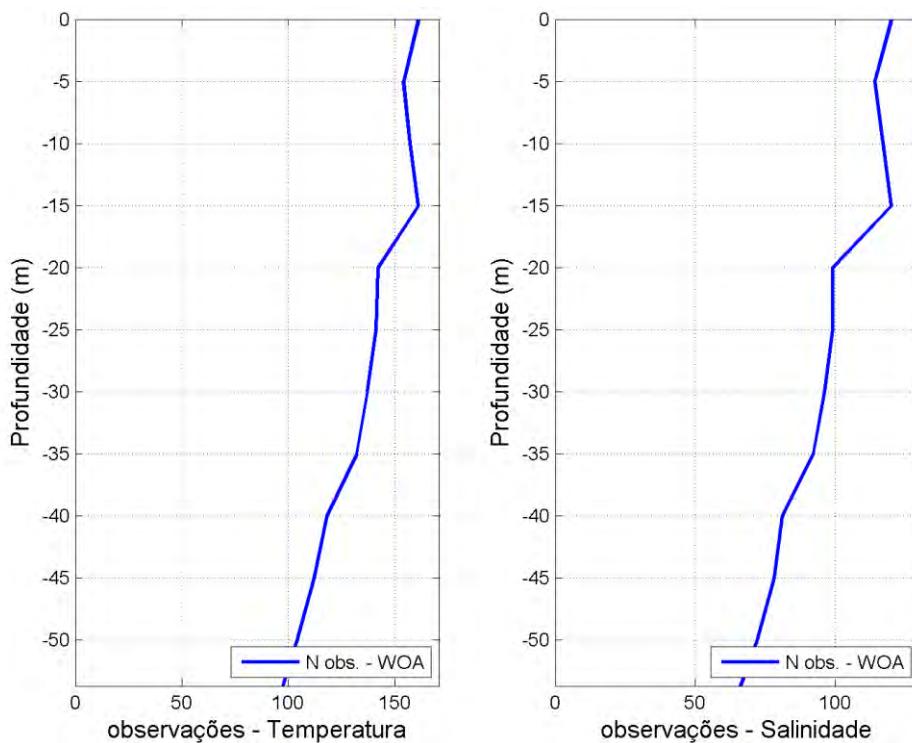


Figura 142: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 7.

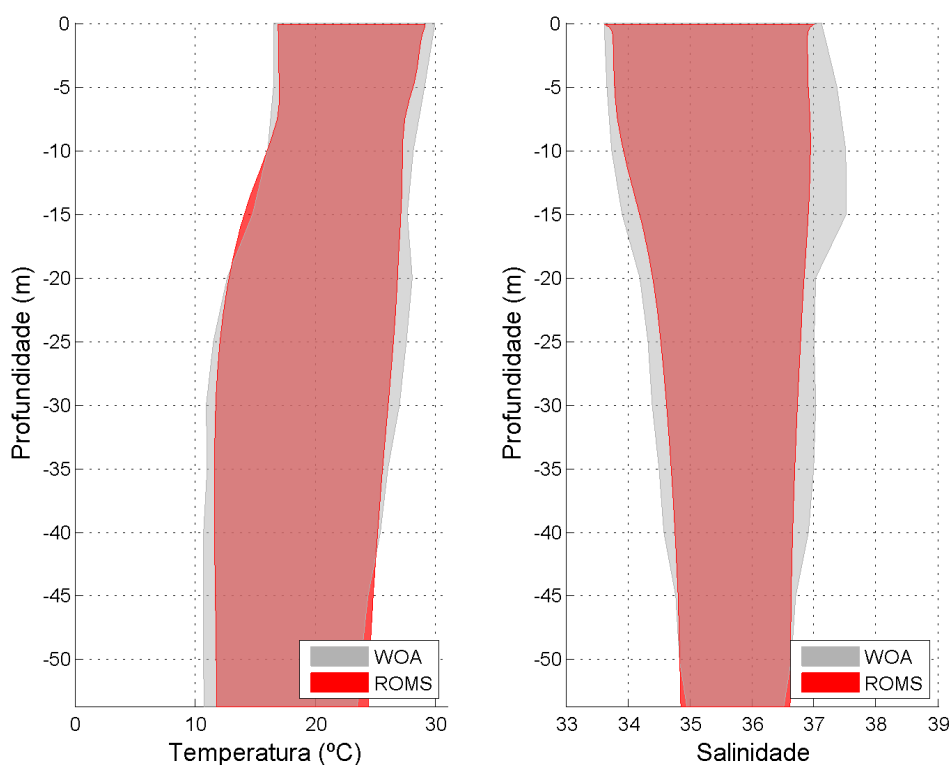


Figura 143: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 7.

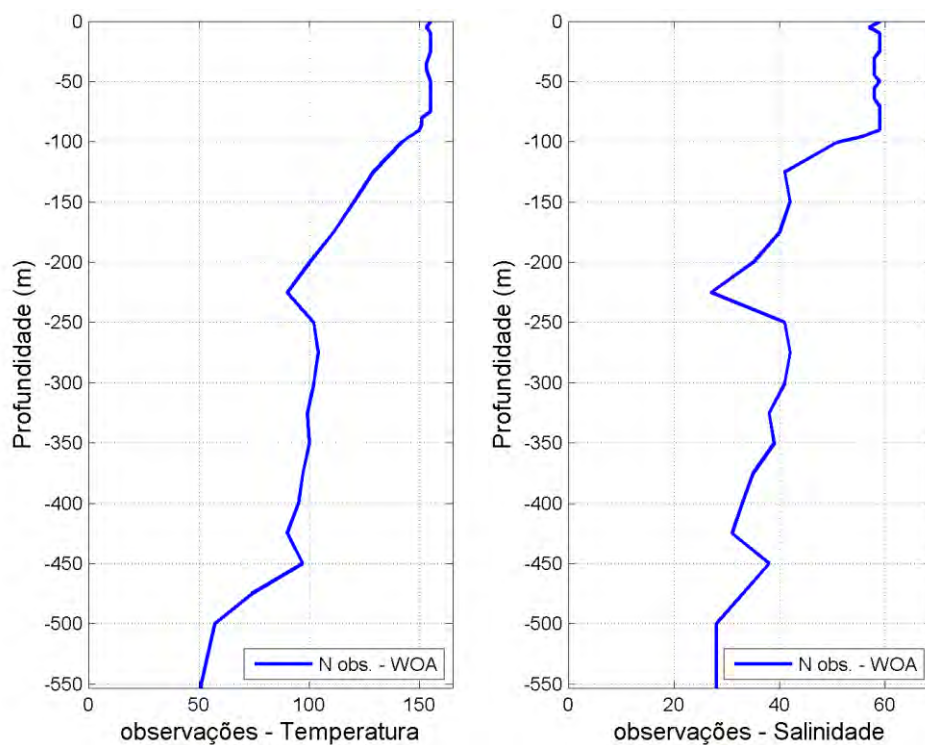


Figura 144: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 8.

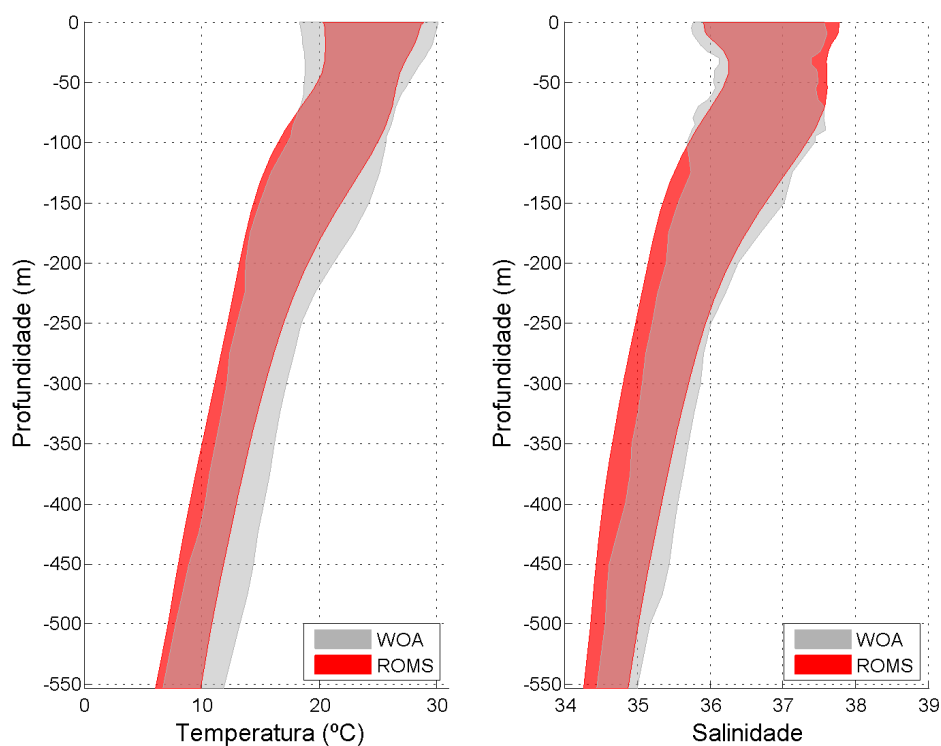


Figura 145: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 8.

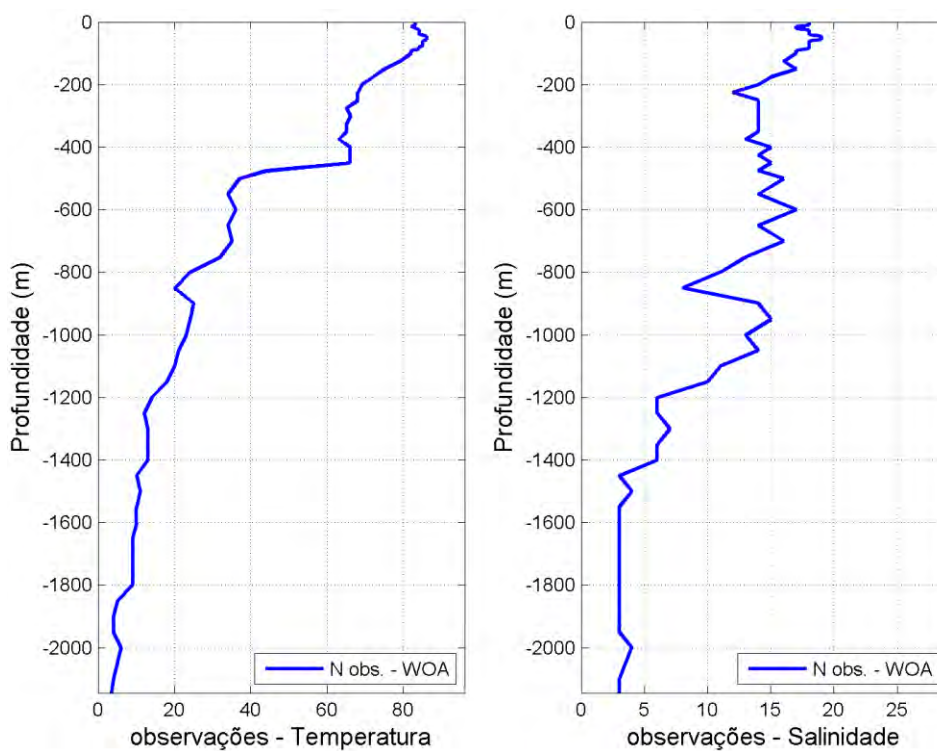


Figura 146: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 9.

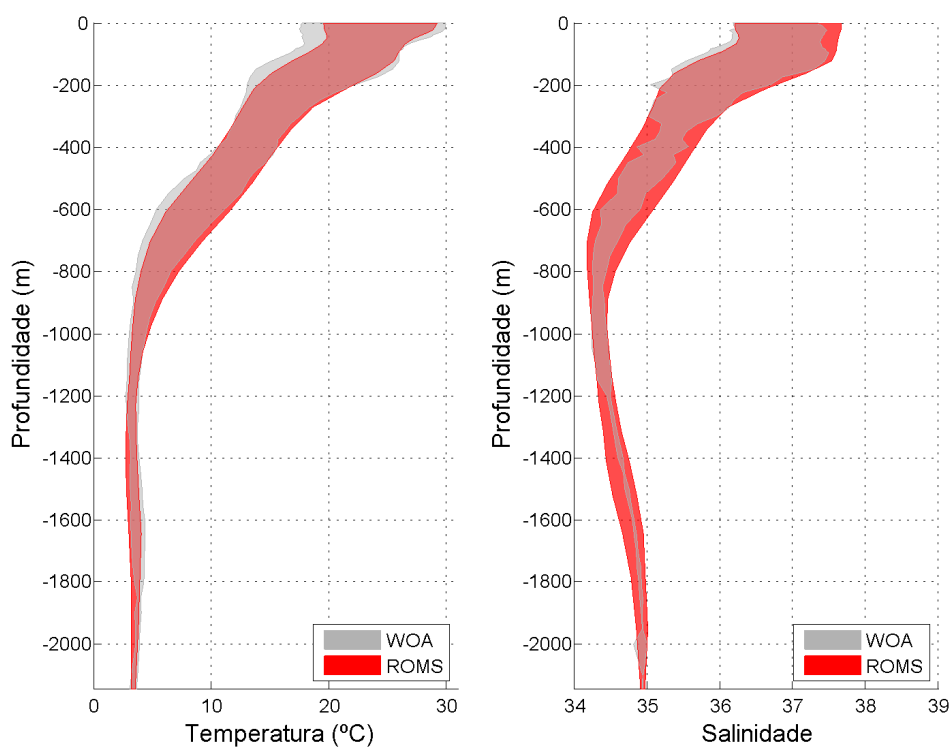


Figura 147: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 9.

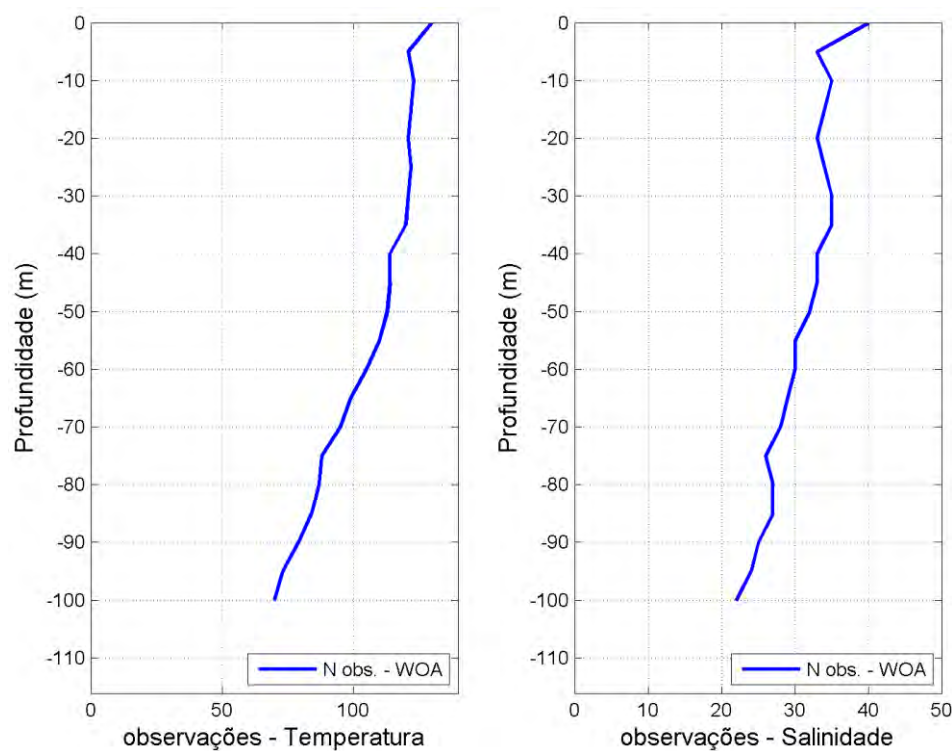


Figura 148: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 10.

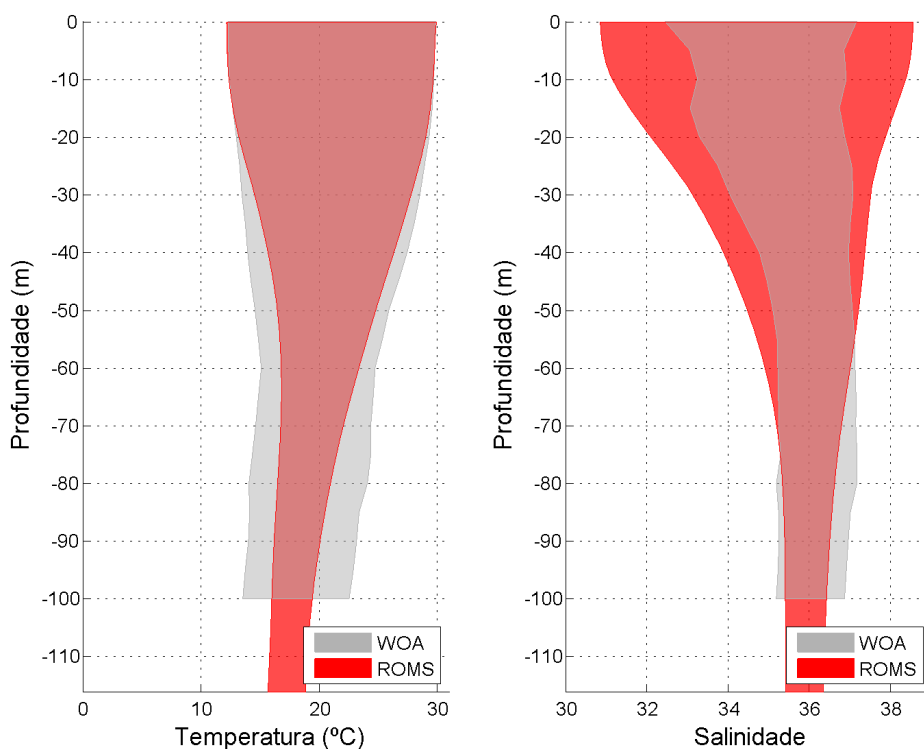


Figura 149: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 10.

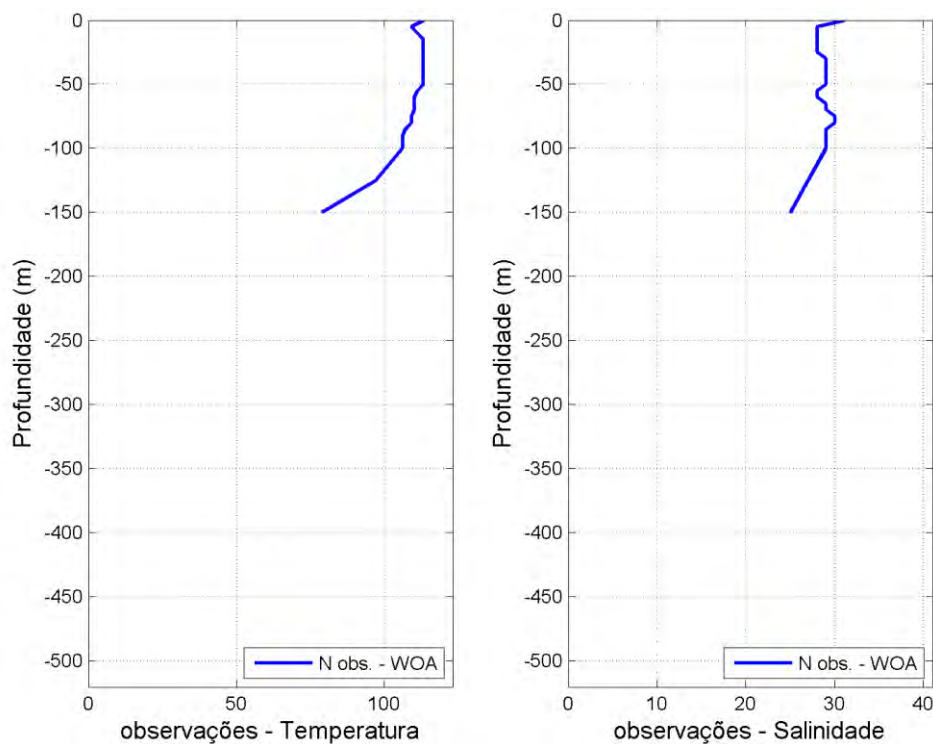


Figura 150: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 11.

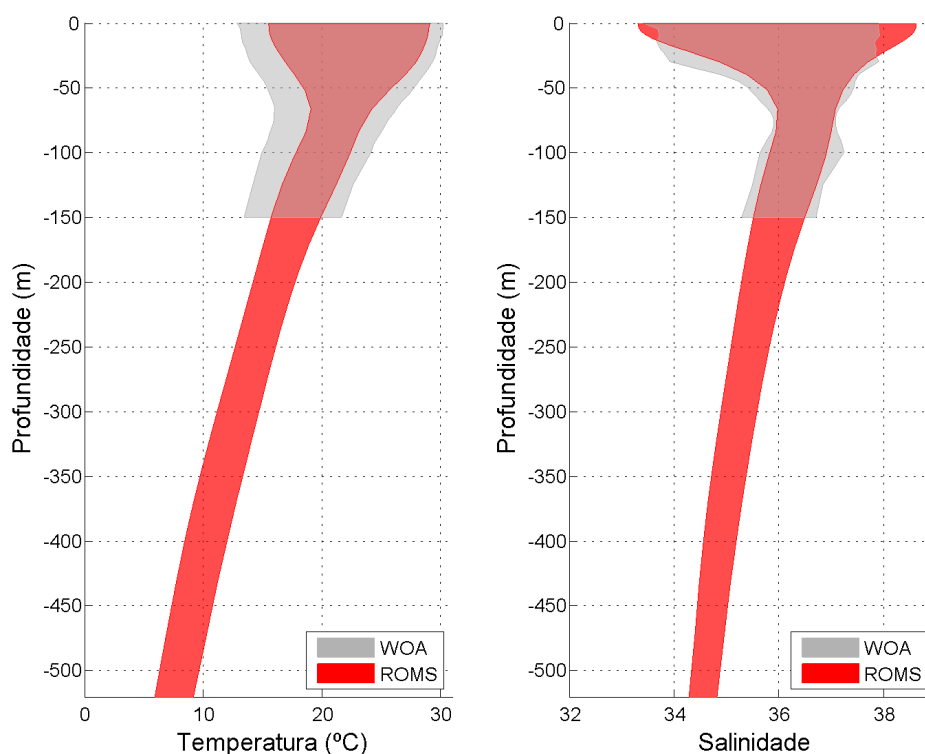


Figura 151: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 11.

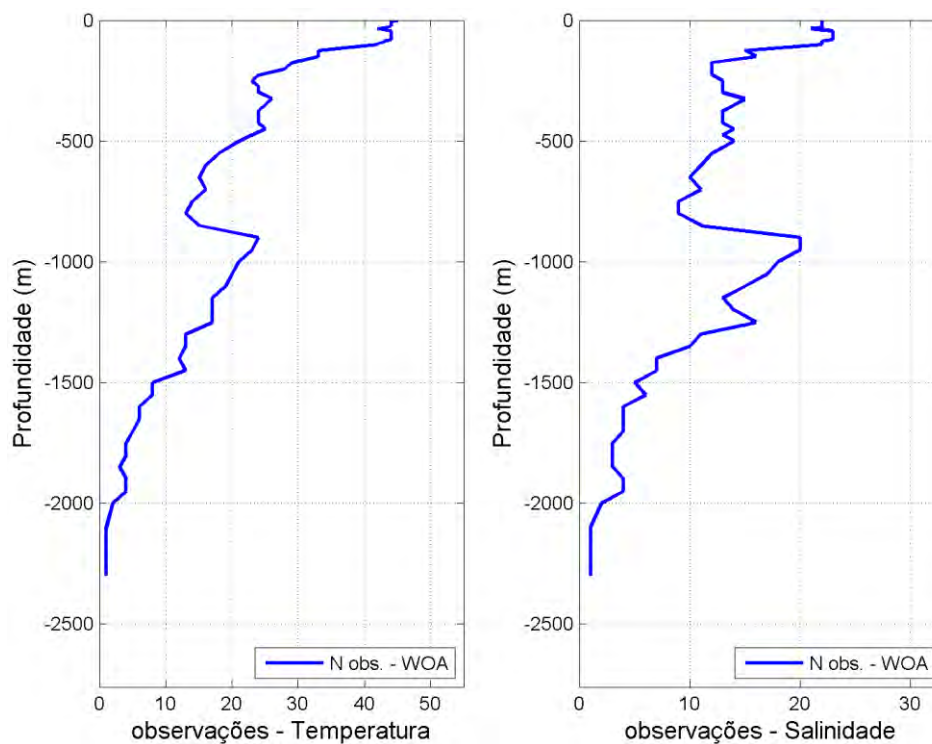


Figura 152: Número de observações utilizadas na média climatológica do WOA13 V2 ao longo das profundidades, para o ponto 12.

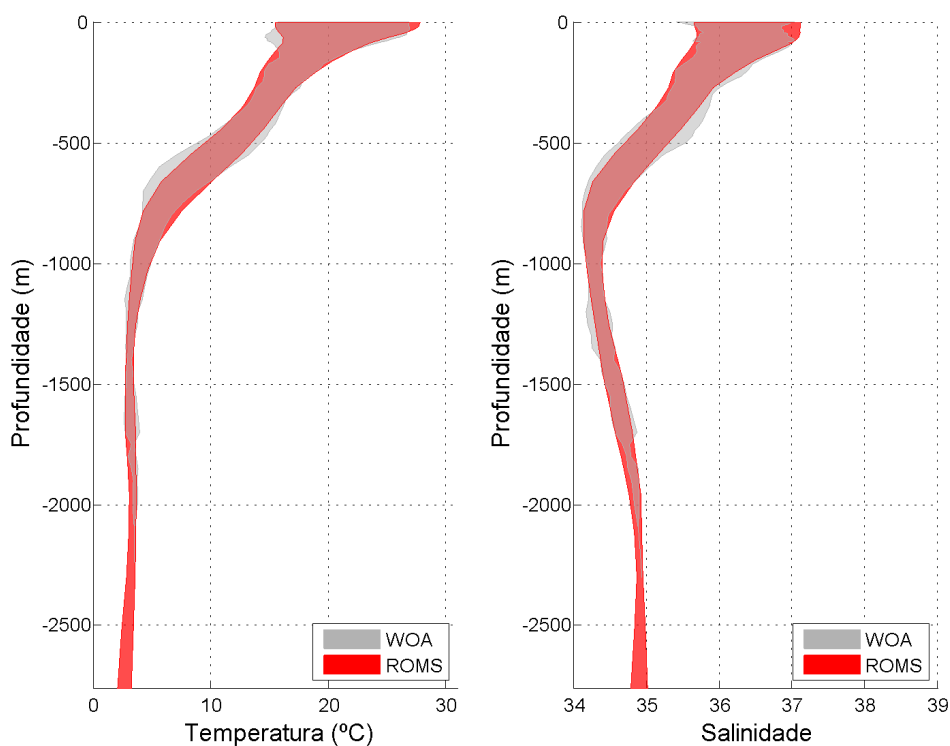


Figura 153: Faixa de ocorrência de 99,7% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) para o ponto 12.

Tabela 8: Valores de *bias* médio anual de temperatura e salinidade para os 12 pontos selecionados no domínio.

Ponto	Bias de temperatura (°C)	Bias de salinidade
1	0,40	-0,07
2	-0,41	-0,12
3	0,24	-0,04
4	2,46	0,28
5	-0,55	-0,29
6	-0,07	-0,07
7	0,01	0,07
8	0,72	0,04
9	-0,28	-0,05
10	0,03	0,20
11	-0,59	-0,11
12	-0,07	-0,002

Para avaliar estatisticamente a distribuição vertical de temperatura e salinidade, foram usados também perfis de temperatura e salinidade obtidos por gliders do Projeto Azul. Esse projeto

consistiu num sistema de observação oceânica para a Bacia de Santos nos moldes de sistemas similares ao redor do mundo e é fruto de uma parceria entre a BG BRASIL (atualmente SHELL), a PROOCEANO e a COPPE/UFRJ. Com esse intuito, ele utilizou uma sofisticada tecnologia de coleta, disponibilização de dados em tempo real, computadores de alto desempenho e uma equipe multidisciplinar.

Gliders são veículos autônomos submersíveis, relativamente pequenos, programáveis, reutilizáveis e com capacidade de acoplar múltiplos sensores (Figura 154). Esses equipamentos representam uma evolução no campo da oceanografia operacional, visto que permitem a obtenção em tempo quase real, contínua e persistente mesmo em condições de tempo muito ruins, de dados oceanográficos.

O glider pode operar de 50 a 1.000 m de profundidade e realiza, em média, oito perfis por dia, com autonomia de bateria para permanecer aproximadamente quatro meses operando. Através da sua hidrodinâmica e do controle de *roll*, *pitch* e flutuabilidade, o equipamento maneja sua trajetória na água - com limitações associadas à intensidade da corrente - como um planador, avançando até 6 km por mergulho e permitindo que o “piloto” em terra programe trajetórias ou até mesmo *moorings* virtuais (Figura 154).

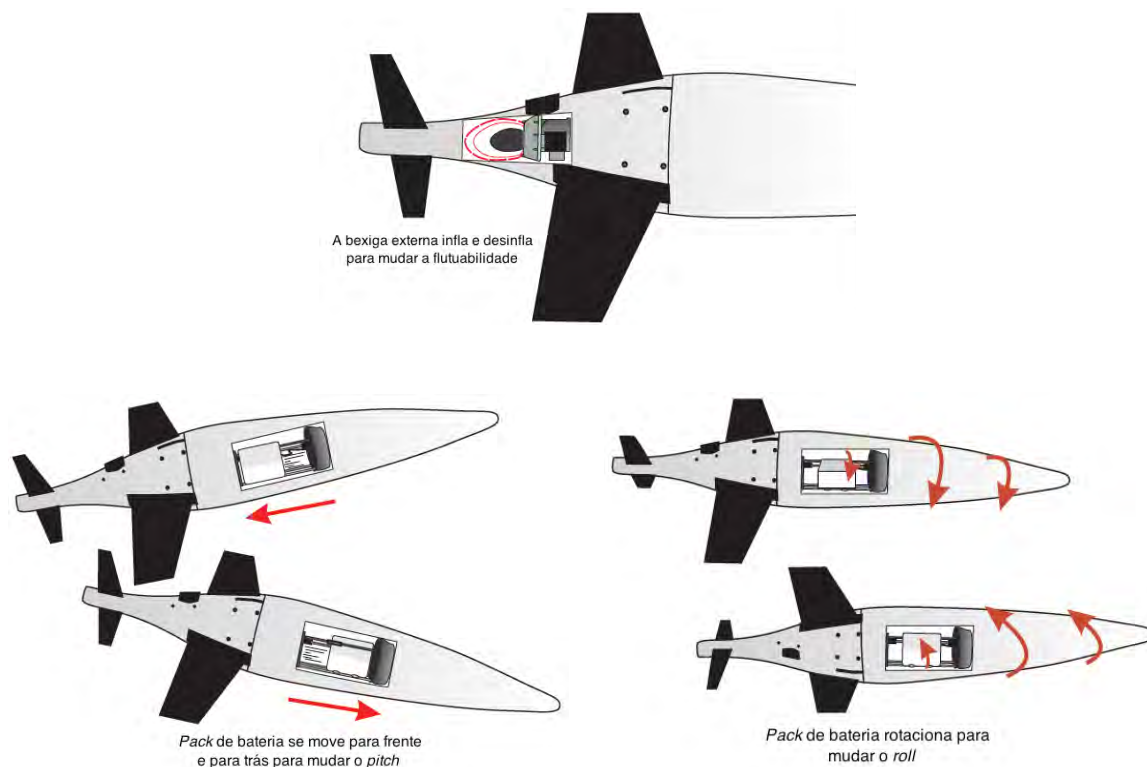


Figura 154: Representação esquemática dos mecanismos de controle de flutuabilidade, *pitch* e *roll* do Seaglider. Adaptada de IROBOT (2012) em Boechat (2015).

Os dados utilizados foram extraídos de uma área próxima da radial denominada Maricá (Figura 155). Essa área foi escolhida para que a quantidade de observações utilizada na geração das médias e dos desvios padrão fosse mais significativa, aumentando a confiabilidade da faixa de variabilidade das variáveis analisadas.

Para o período no qual o modelo foi integrado, ao todo, foram coletados 2018 perfis de temperatura e salinidade no entorno da radial Maricá. As comparações estatísticas foram feitas com 9 pontos do ROMS extraídos em um polígono próximo da área da radial Maricá.

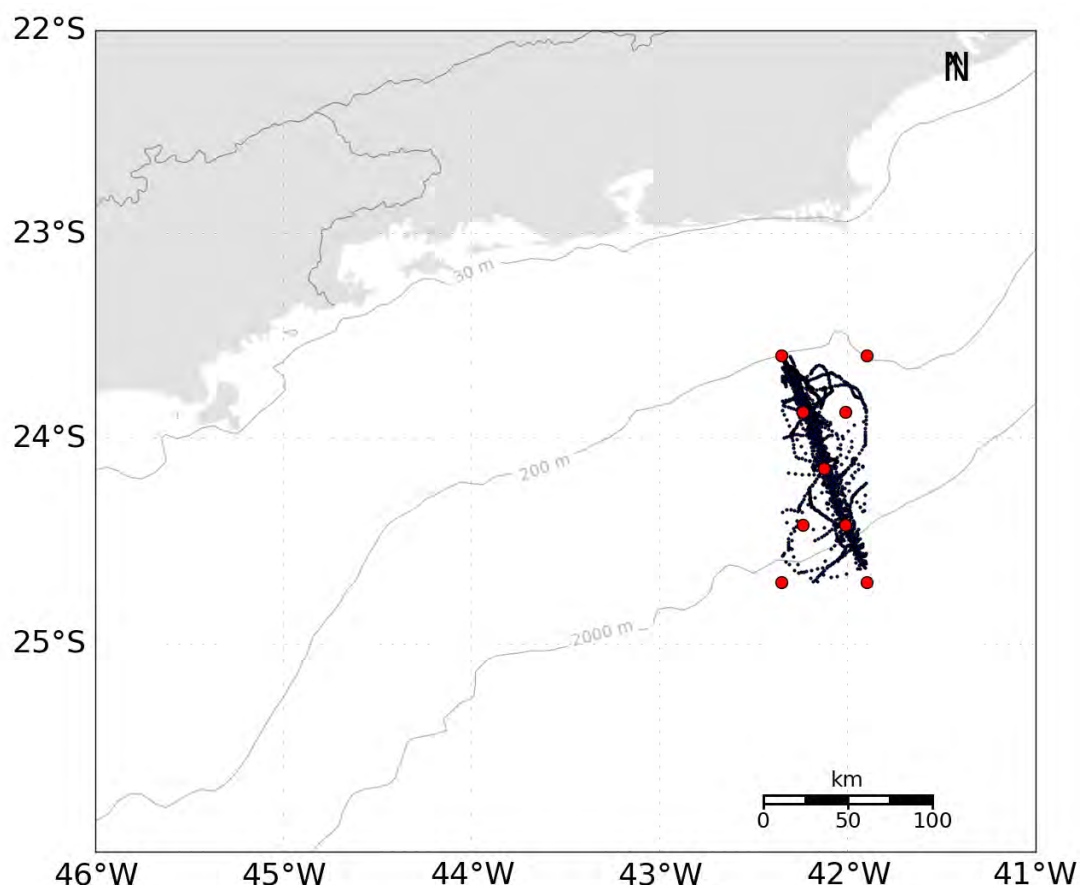


Figura 155: Localização dos perfis de temperatura e salinidade coletados por *glider* nas proximidades da radial Maricá (pontos em preto), e pontos de grade do ROMS (pontos em vermelho) de onde foram extraídos os dados para comparação.

Na Figura 156, apresentam-se as faixas de ocorrência² das observações de temperatura e salinidade obtidas no modelo (vermelho) e nos dados dos *gliders* (cinza). Pode-se observar que o modelo representou muito bem a estrutura vertical termohalina da região e sua variabilidade, pois ao longo de toda a coluna d'água as faixas de ocorrência são muito similares. Os valores de

² Considerando que estas variáveis seguem uma distribuição normal, esta faixa é calculada para abranger 95% das ocorrências, e, portanto, seus limites representam 2 vezes o desvio padrão ao redor da média.

bias médios foram negativos em praticamente toda a coluna d'água, indicando uma superestimação pelo modelo. Os valores mínimos, de $-2,6^{\circ}\text{C}$ e $-0,47$ psu, ocorrem na região de maior variabilidade na coluna d'água, a termoclina e na haloclina. Contudo, nas outras partes da coluna d'água os valores desses parâmetros foram mais próximos do observado, ocasionando valores médios de $-0,85^{\circ}\text{C}$ e $-0,19$ psu.

Esta comparação é um indicativo de que houve uma boa representação da posição média das massas d'água na região do bloco.

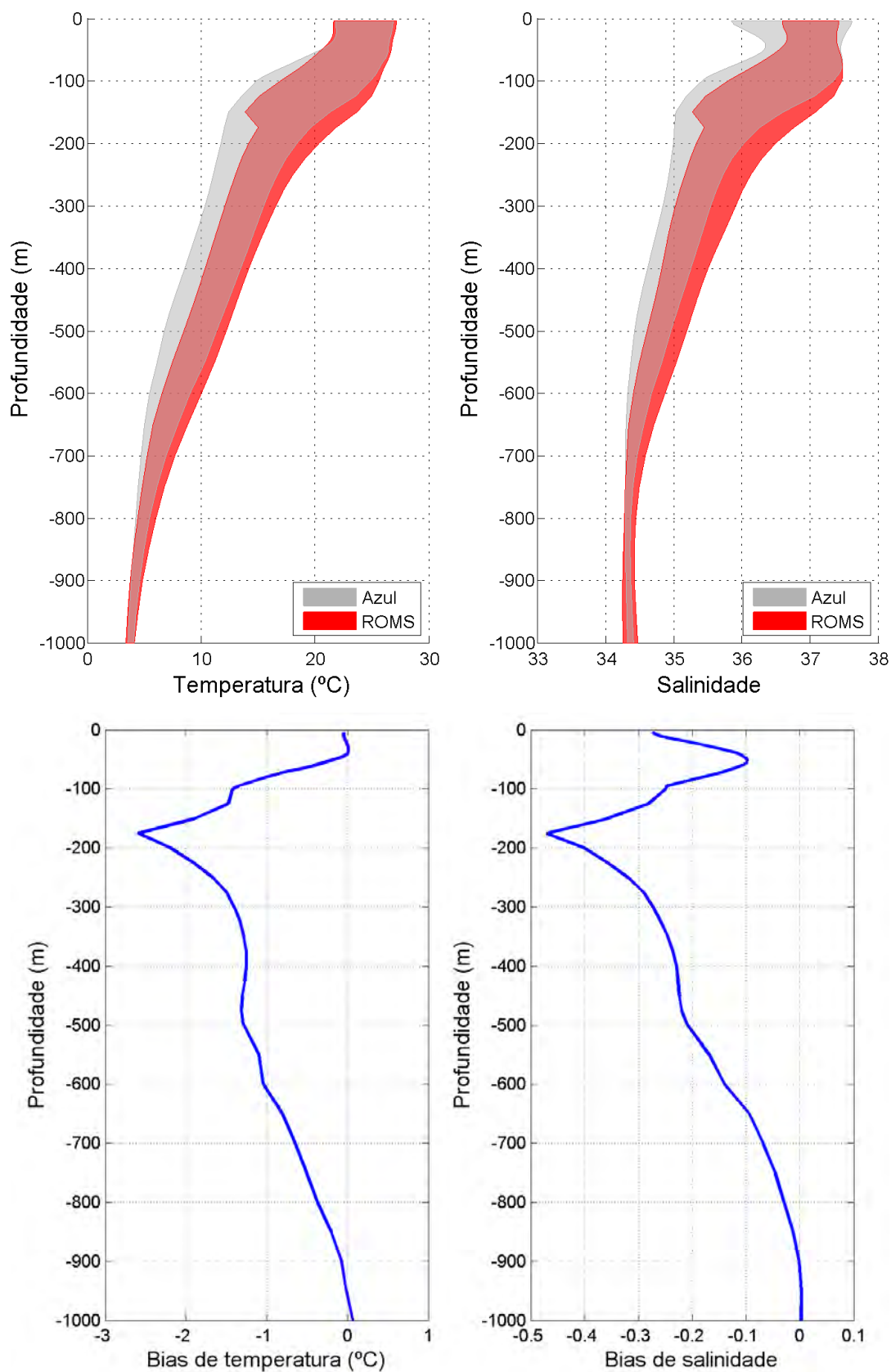


Figura 156: Faixa de ocorrência de 95% das observações de temperatura e salinidade obtidos do WOA13 (faixa cinza) e pelo modelo ROMS (faixa vermelha) – acima – e *bias* médio anual – abaixo.

8.4. Correntes

Para comparação das correntes, foram utilizados dados de derivadores lagrangianos de superfície do Projeto AZUL. Esse projeto consistiu num sistema de observação oceânica para a Baía de Santos nos moldes de sistemas similares ao redor do mundo e é fruto de uma parceria entre a BG BRASIL, a PROOCEANO e a COPPE/UFRJ. Com esse intuito, ele prevê a utilização de uma sofisticada tecnologia de coleta, disponibilização de dados em tempo real, computadores de alto desempenho e uma equipe multidisciplinar. Dentre as atividades propostas pelo projeto, ocorreu o lançamento mensal de três derivadores do tipo SVP na Baía de Santos, entre março de 2013 e julho de 2015. Para o presente estudo, foram considerados os derivadores cuja trajetória está contida no domínio espacial e temporal da modelagem e que efetuaram transmissões por um período superior a duas semanas. Nesse contexto, 25 derivadores aparecem como relevantes para a comparação. A Tabela 9 agrupa as coordenadas do primeiro e último ponto onde cada derivador é encontrado no domínio espacial e temporal.

Tabela 9: Posição e datas iniciais e finais de cada derivador ao longo do período de comparação.

Derivador	Data Inicial	Longitude (°W)	Latitude (°S)	Data Final	Longitude (°W)	Latitude (°S)
1	05/03/2013	42,51	23,65	12/04/2013	48,56	30,86
2	05/03/2013	41,61	24,32	08/04/2013	45,96	27,92
3	05/03/2013	42,05	23,94	14/05/2013	45,76	25,01
4	26/03/2013	40,92	23,01	11/10/2013	44,09	27,30
5	14/05/2013	42,15	24,01	11/12/2013	52,25	36,56
6	14/05/2013	41,98	24,52	15/09/2013	41,88	29,12
7	01/10/2013	42,15	24,01	12/10/2014	45,17	35,38
8	15/06/2013	42,19	24,01	09/05/2014	40,44	36,89
9	25/10/2013	42,18	24,04	30/08/2014	28,19	39,00
10	20/07/2013	42,18	23,96	17/08/2013	42,34	22,94
11	28/08/2013	42,19	24,00	24/08/2014	48,77	32,90
12	15/06/2013	42,17	24,01	29/08/2013	47,04	24,48
13	15/06/2013	42,19	24,01	31/10/2013	45,47	26,37
14	25/10/2013	42,18	24,04	23/07/2014	40,16	32,02
15	01/10/2013	42,15	24,01	18/07/2014	36,76	33,72
16	28/08/2013	42,19	24,00	28/04/2014	49,82	36,25
17	28/11/2013	42,16	24,02	11/09/2014	33,87	33,23
18	25/10/2013	42,18	24,04	14/11/2013	44,21	24,04
19	20/07/2013	42,19	23,95	21/04/2014	42,89	35,45

20	01/10/2013	42,15	24,00	02/04/2014	51,92	32,02
21	28/11/2013	42,16	24,01	01/06/2014	40,45	35,05
22	19/12/2013	42,15	24,01	14/04/2015	32,41	33,84
23	14/01/2014	42,16	24,00	28/06/2014	43,73	37,84
24	19/12/2013	42,15	24,01	30/01/2015	33,29	37,16
25	28/11/2013	42,16	24,01	10/04/2014	50,93	39,00

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

Para fins de comparação foram usados os dados de velocidade dos derivadores, espaçados de 2h, 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 157 a Figura 181 são apresentadas as trajetórias descritas pelos 30 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.

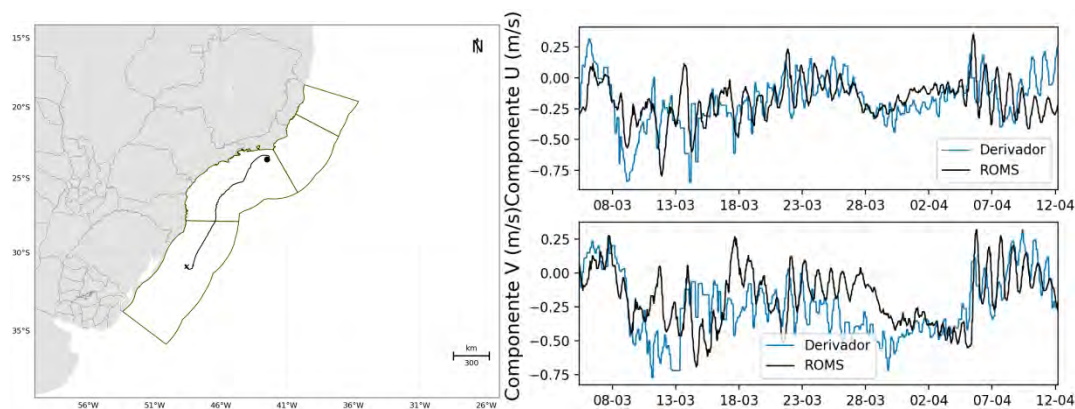


Figura 157: Trajetória descrita pelo derivador 01 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 01 e os resultados do ROMS (direita).

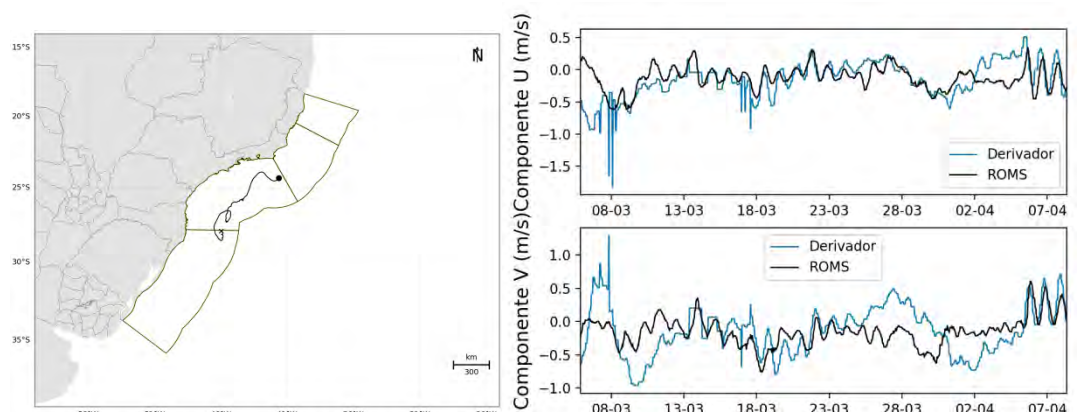


Figura 158: Trajetória descrita pelo derivador 02 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 02 e os resultados do ROMS (direita).

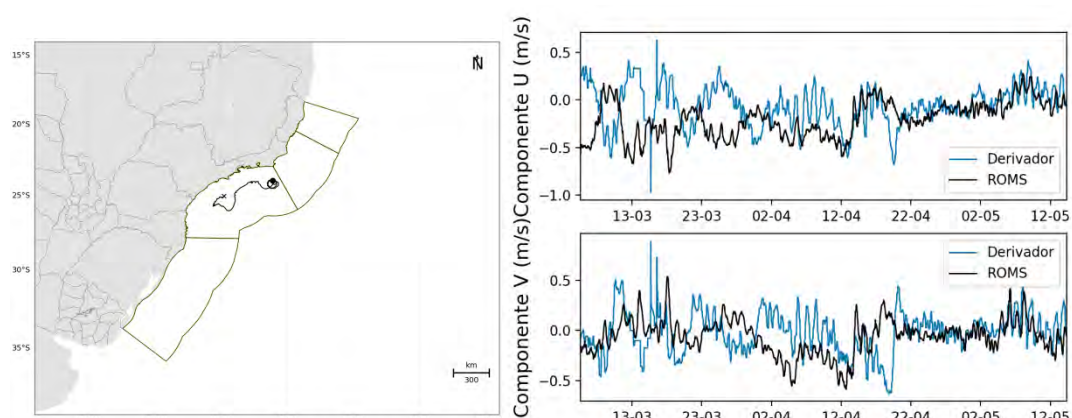


Figura 159: Trajetória descrita pelo derivador 03 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 03 e os resultados do ROMS (direita).

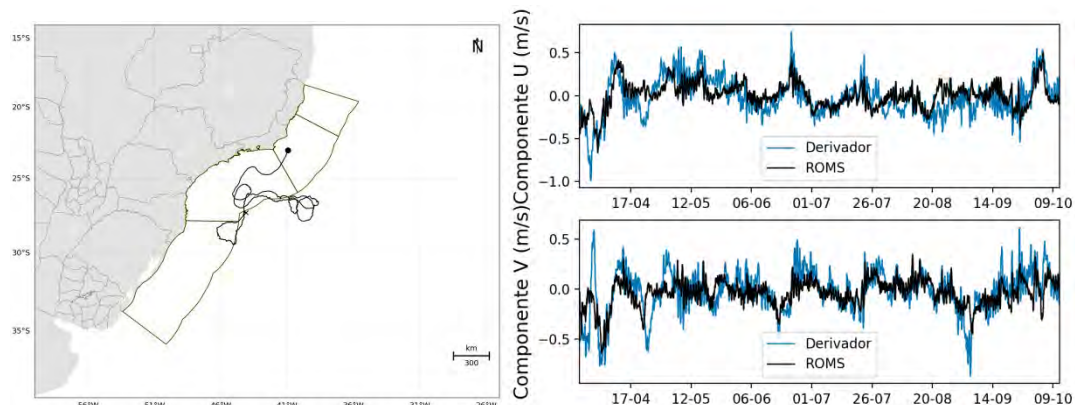


Figura 160: Trajetória descrita pelo derivador 04 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 04 e os resultados do ROMS (direita).

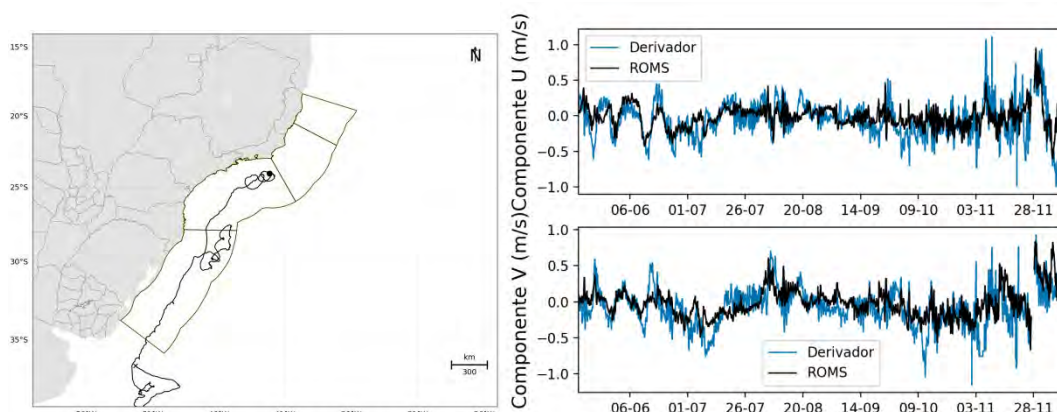


Figura 161: Trajetória descrita pelo dor 05 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 05 e os resultados do ROMS (direita).

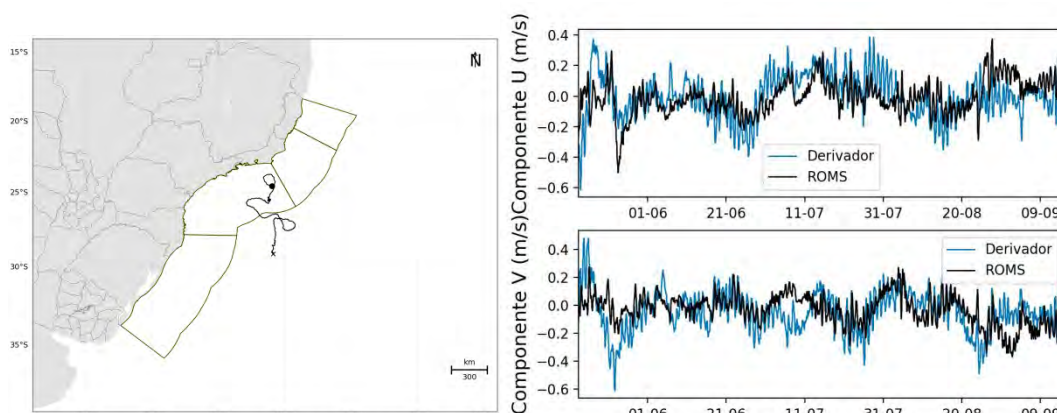


Figura 162: Trajetória descrita pelo derivador 06 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 06 e os resultados do ROMS (direita).

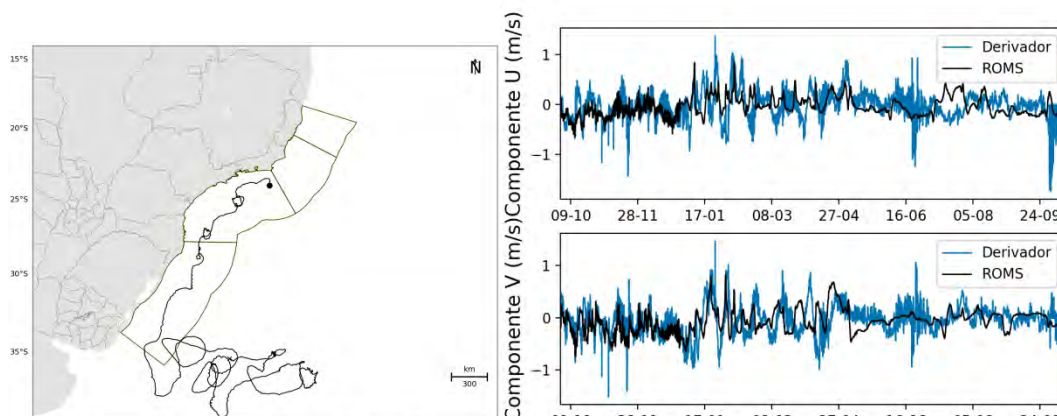


Figura 163: Trajetória descrita pelo derivador 07 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 07 e os resultados do ROMS (direita).

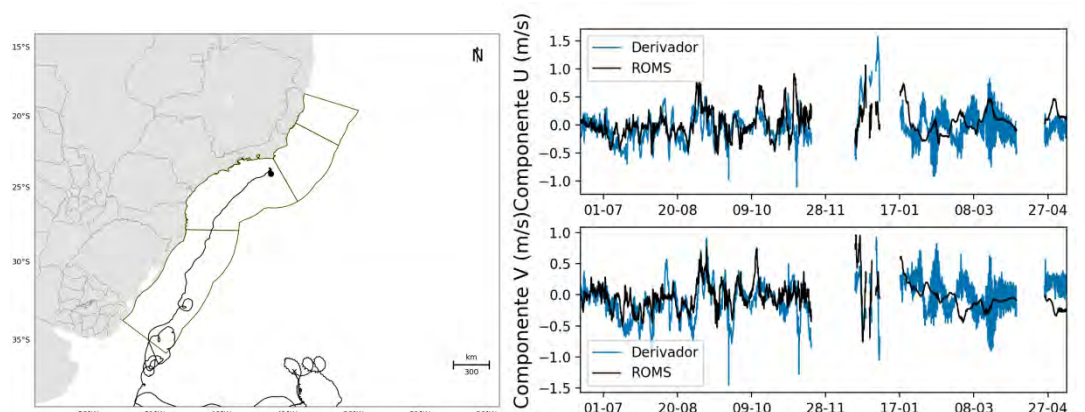


Figura 164: Trajetória descrita pelo derivador 08 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 08 e os resultados do ROMS (direita).

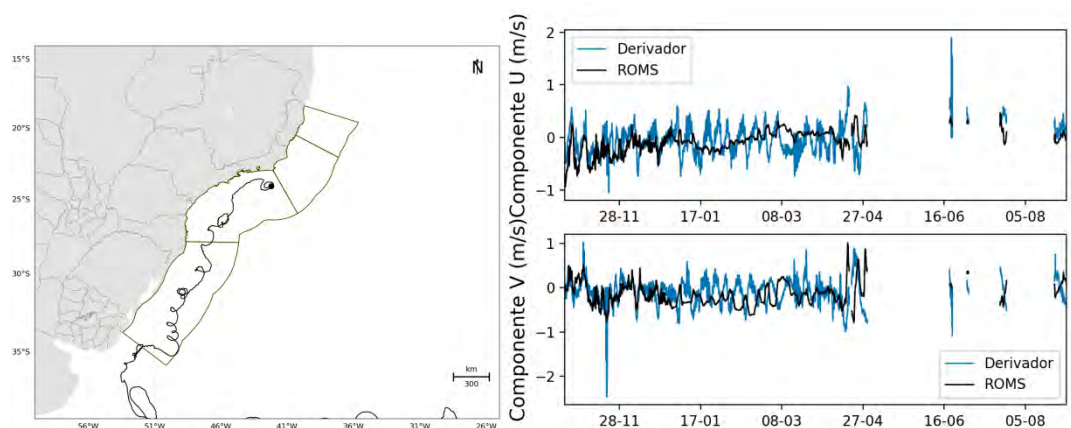


Figura 165: Trajetória descrita pelo derivador 09 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 09 e os resultados do ROMS (direita).

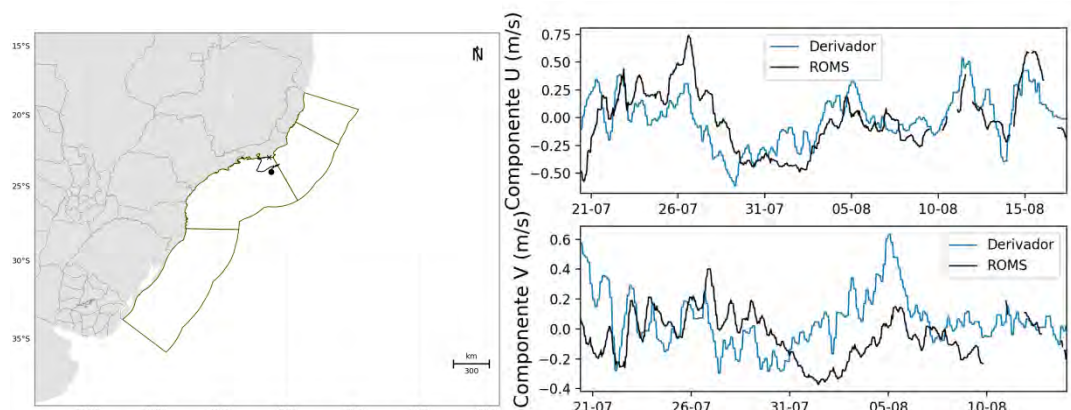


Figura 166: Trajetória descrita pelo derivador 10 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 10 e os resultados do ROMS (direita).

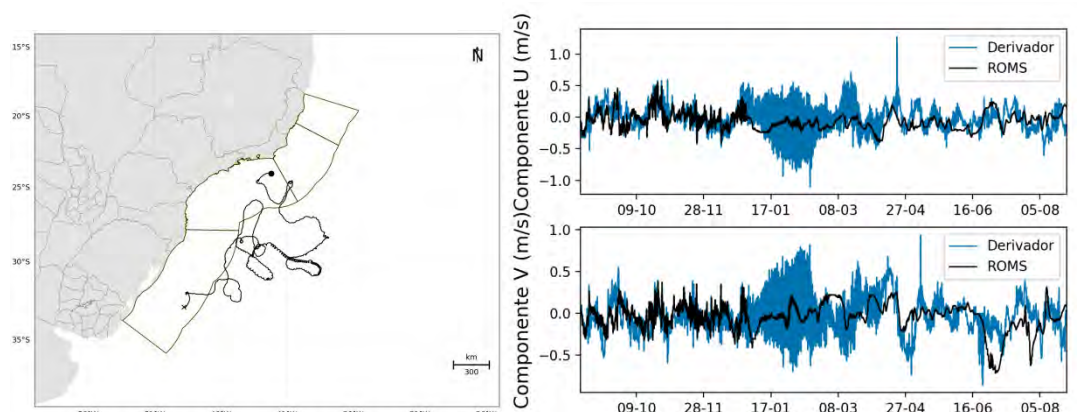


Figura 167: Trajetória descrita pelo derivador 11 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 11 e os resultados do ROMS (direita).

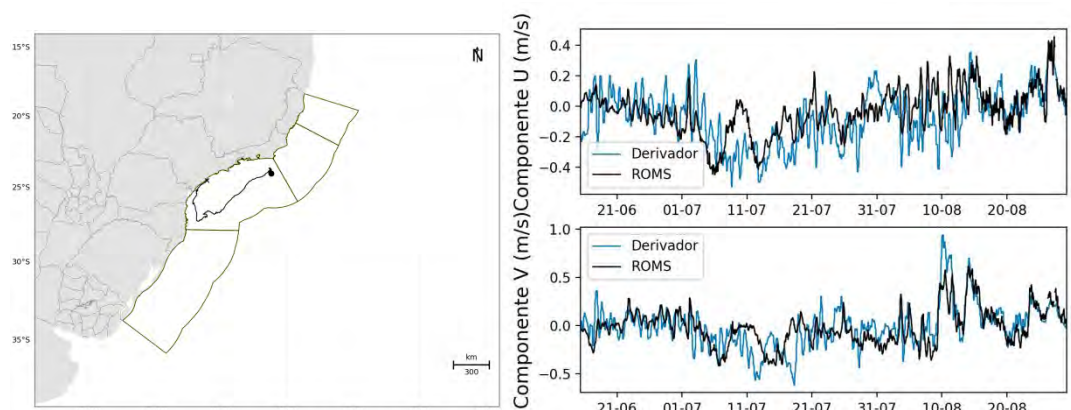


Figura 168: Trajetória descrita pelo derivador 12 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 12 e os resultados do ROMS (direita).

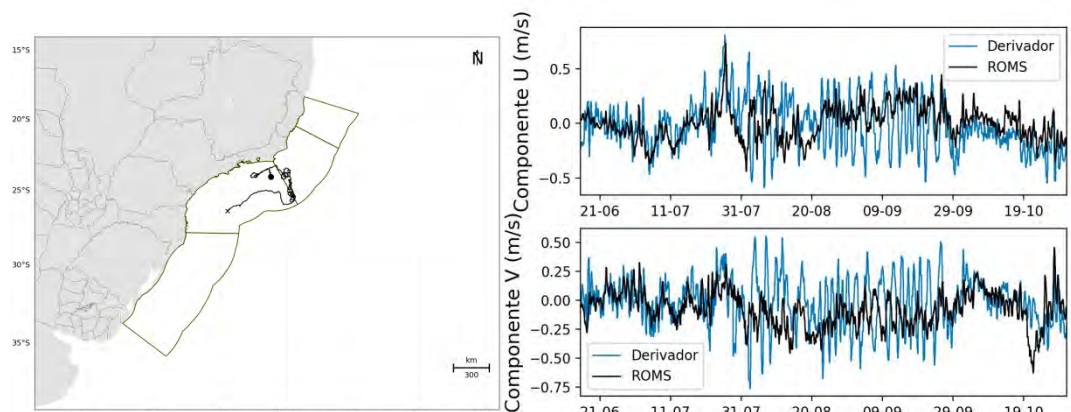


Figura 169: Trajetória descrita pelo derivador 13 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 13 e os resultados do ROMS (direita).

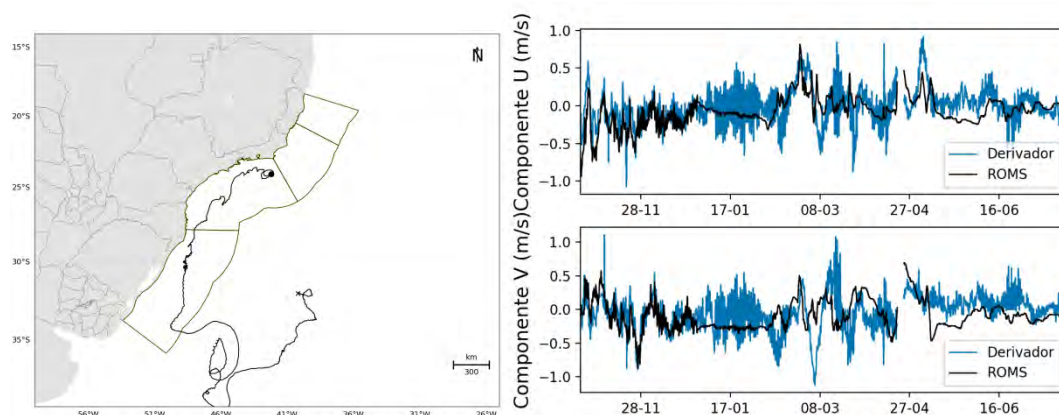


Figura 170: Trajetória descrita pelo derivador 14 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 14 e os resultados do ROMS (direita).

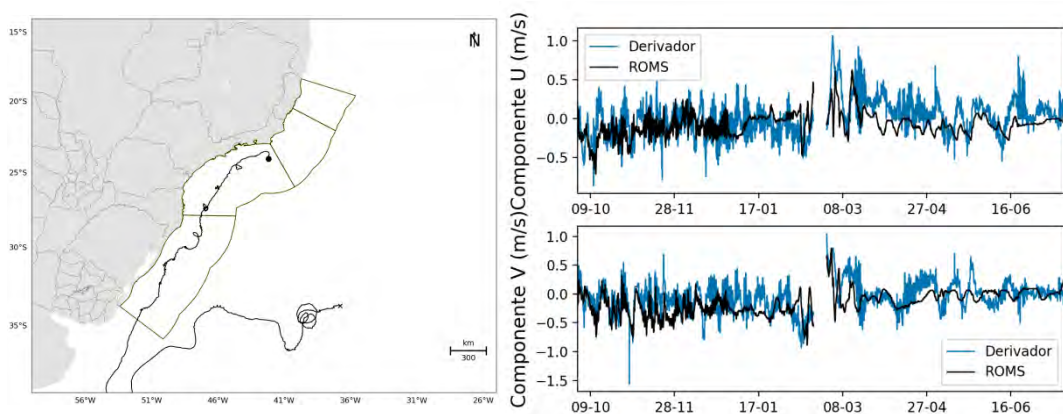


Figura 171: Trajetória descrita pelo derivador 15 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 15 e os resultados do ROMS (direita).

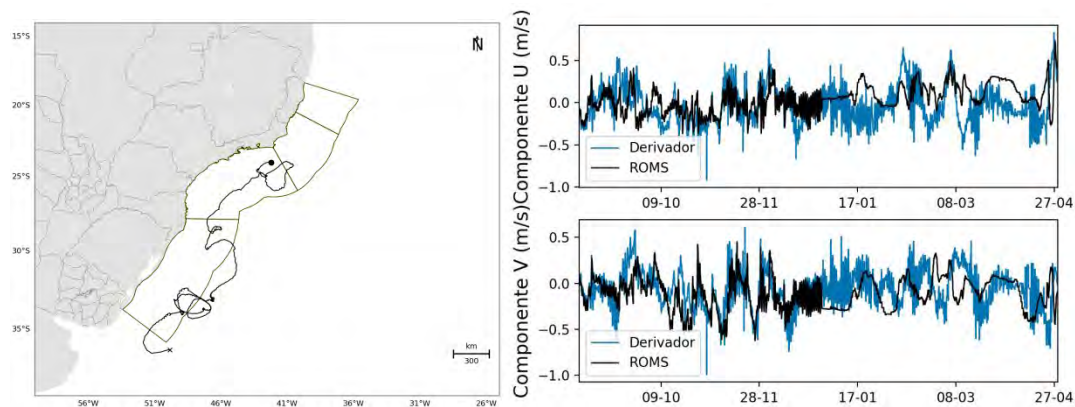


Figura 172: Trajetória descrita pelo derivador 16 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 16 e os resultados do ROMS (direita).

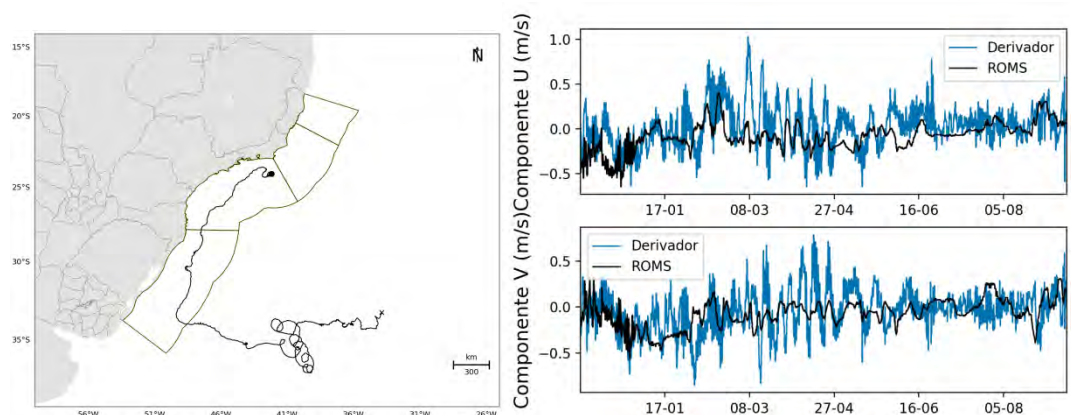


Figura 173: Trajetória descrita pelo derivador 17 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 17 e os resultados do ROMS (direita).

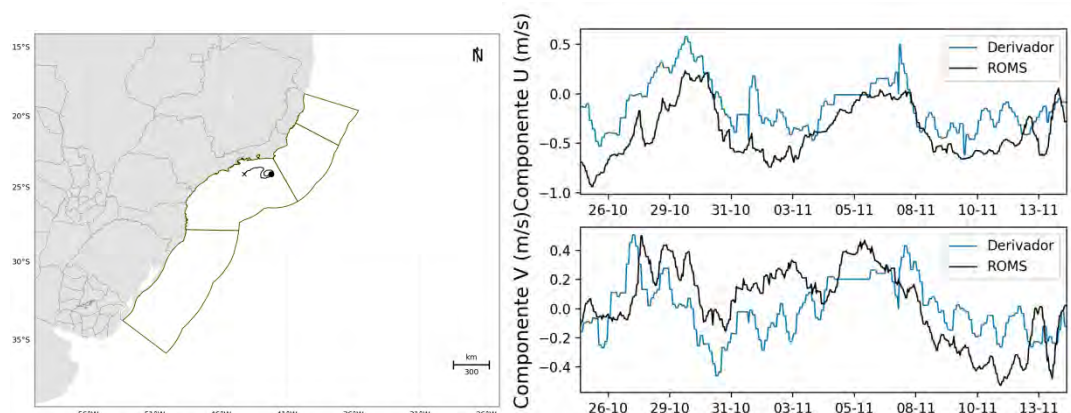


Figura 174: Trajetória descrita pelo derivador 18 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 18 e os resultados do ROMS (direita).

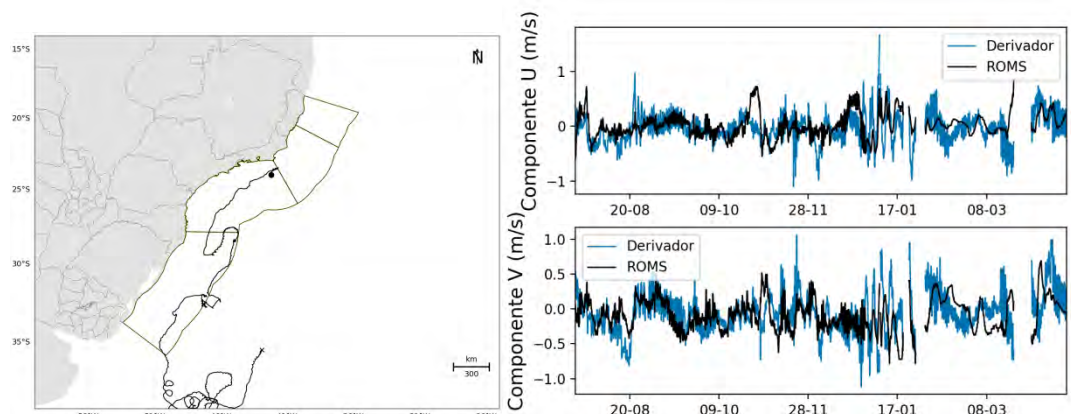


Figura 175: Trajetória descrita pelo derivador 19 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 19 e os resultados do ROMS (direita).

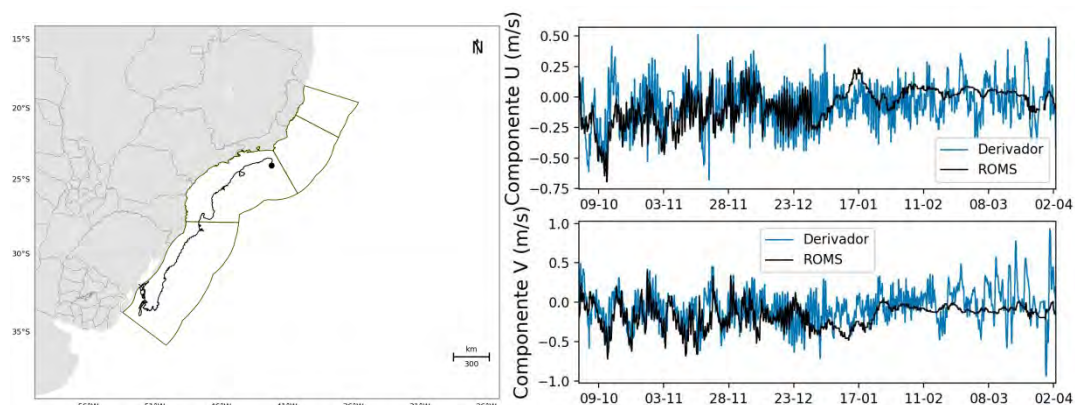


Figura 176: Trajetória descrita pelo derivador 20 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 20 e os resultados do ROMS (direita).

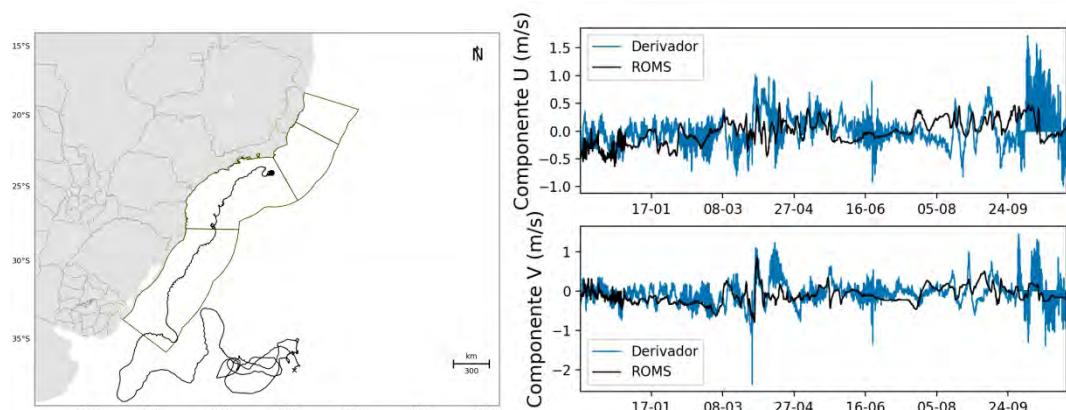


Figura 177: Trajetória descrita pelo derivador 21 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 21 e os resultados do ROMS (direita).

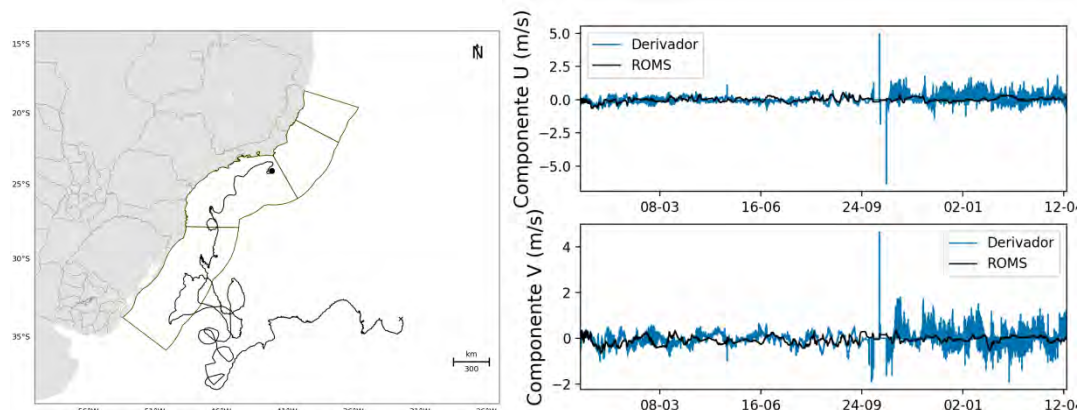


Figura 178: Trajetória descrita pelo derivador 22 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 22 e os resultados do ROMS (direita).

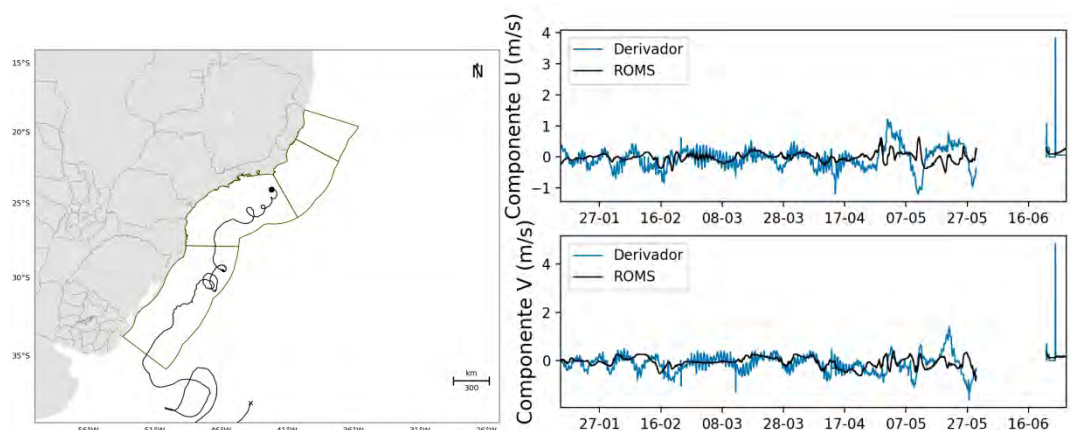


Figura 179: Trajetória descrita pelo derivador 23 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 23 e os resultados do ROMS (direita).

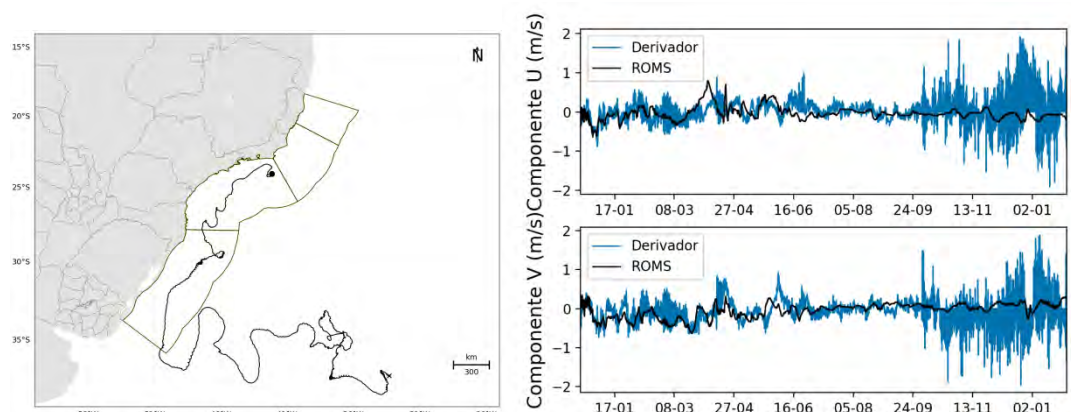


Figura 180: Trajetória descrita pelo derivador 24 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 24 e os resultados do ROMS (direita).

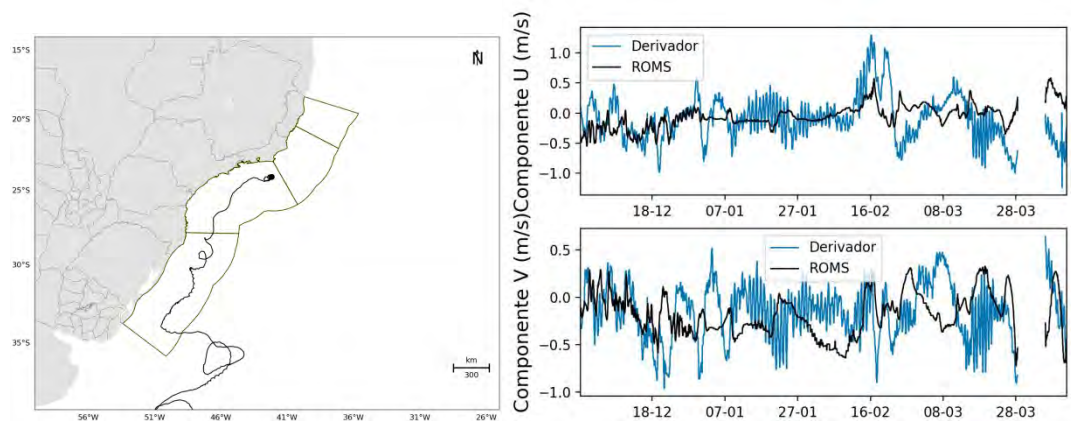


Figura 181: Trajetória descrita pelo derivador 25 (esquerda) e comparação entre os dados obtidos do derivador 25 e os resultados do ROMS (direita).

Através dos gráficos comparativos pode-se observar que os resultados do ROMS apresentaram uma boa aproximação com os dados medidos pelos derivadores, tanto nas amplitudes das oscilações quanto na fase. A fim de quantificar as comparações apresentadas, foi feita uma análise estatística calculando o índice de Wilmot. O valor médio do índice de Wilmot (1982) para cada componente das correntes é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10: Índice de Wilmot e bias da velocidade (m/s) das comparações modelo/derivadores.

Deriva- dor	d comp. zonal	d comp. meridio- nal	bias vel.	Deriva-dor	d comp. zonal	d comp. meridio- nal	bias vel.
1	0,86	0,85	0,07	14	0,83	0,77	0,03
2	0,81	0,73	0,14	15	0,82	0,81	0,05
3	0,69	0,76	-0,03	16	0,81	0,82	0,04
4	0,89	0,88	0,09	17	0,81	0,82	0,07
5	0,85	0,85	0,11	18	0,82	0,85	-0,18
6	0,90	0,90	0,05	19	0,75	0,75	0,05
7	0,74	0,75	0,07	20	0,88	0,81	0,02
8	0,74	0,77	0,08	21	0,71	0,75	0,03
9	0,74	0,65	0,03	22	0,65	0,68	0,06
10	0,87	0,78	-0,02	23	0,62	0,64	0,22
11	0,82	0,79	0,08	24	0,74	0,76	0,05
12	0,89	0,90	0,04	25	0,75	0,77	0,09
13	0,81	0,79	0,08				
Média		d componente zonal	0,79	d componente meridional	0,79	Bias velocidade	0,05

De forma geral, quando avaliada a média de todos os derivadores, as velocidades apresentadas pelo modelo foram menores que as observadas pelos derivadores. Porém, ressalta-se a média do *bias* foi de 0,05 m/s, valor dentro da oscilação de *bias* observada nesta região para o modelo global utilizado como condição inicial, conforme apresentado em Lellouche *et al.* (2019). As médias de cada derivador se mantiveram dentro ou próximo desta faixa (-0,1 m/s a +0,1 m/s).

Os índices de Wilmot dos derivadores apresentam 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.

Com esta comparação pode-se concluir que o modelo representa bem as correntes em superfície no que tange o padrão de intensidade e direção.

8.5. Transporte de volume

A fim de avaliar as correntes em termos de transporte, foram selecionadas duas radiais, uma na Bacia de Campos (23,04°S – 40,93°W a 40,45°W) e outra na Bacia de Santos (23,64°S a 24,67°S

– 42,33°W). A profundidade de referência utilizada foi de 500 m, com radiais limitadas entre as isóbatas de 200 e 2000 m. Os valores obtidos foram comparados com a literatura (SILVEIRA, 2007).

Para a radial na Bacia de Campos, o transporte máximo obtido foi de -8,9 Sv e médio de $-3,2 \pm 2,2$ Sv. Para a radial na Bacia de Santos, o transporte máximo obtido foi de -14,2 Sv e médio de $-3,7 \pm 4,18$ Sv – o alto desvio padrão indica grande variabilidade na região, com maior tendência a inversões da corrente (transporte positivo), o que é esperado nessa localização da Bacia de Santos, com frequente interferência do Vórtice de Cabo Frio. Os valores observados estão coerentes com a literatura (Tabela 11).

Tabela 11: Estimativas para o transporte de volume e para a velocidade máxima da CB entre 21°S e 24°S. Sinais negativos representam a direção sul-sudoeste da corrente. Adaptada de Silveira (2007).

Latitude	Prof. referência (m)	Transporte (Sv)	Velocidade (m s ⁻¹)	Referência
21°S	600	-9.4	-	Schmid <i>et al.</i> (1995)
21°S	numérico	-6.7	-0.83	Silveira <i>et al.</i> (2005)
21°S	numérico	-7.9	-0.6	Silveira <i>et al.</i> (2005)
21°40'S	500	-4.4	-0.61	Evans <i>et al.</i> (1983)
22°S	600	-5.2	-0.55	Signorini (1978)
22°S	fundeio	-5,5±2,6	-	Lima (1997)
22°S	numérico	-7.1	< -0,55	Lima (1997)
23°S	600	-6	-0.7	Signorini (1978)
23°S	550	-2,2/-2,7	-0.49	Miranda & Castro Filho (1979)
23°S	Pegasus	-11	-0.5	Evans & Signorini (1985)
23°S	Pegasus	-6	-0.7	Garfield (1990)
23°S	600/1300	-10,1/10,9	-	Stramma (1989)
23°S	fundeio	-1.3	-0.28	Muller <i>et al.</i> (1998)
23°30'S	600	-9.4	-0.55	Signorini (1978)
24°S	1300	-7.5	-0.25	Fisher (1964)
24°S	600	-7.5	-0.57	Signorini (1978)
24°S	500/1000	-4,1/-7,8	-0.31	Evans <i>et al.</i> (1983)
24°S	600/1300	-9,4/-10,1	-	Stramma (1989)
24°S	750/900	-7,3/-8,8	-	Campos <i>et al.</i> (1995)

9. Considerações Finais

Com base nos resultados apresentados e nas avaliações feitas com base em diferentes processos e parâmetros oceanográficos, o modelo mostra capacidade de representação dos padrões oceanográficos da região e se apresenta apto para subsidiar modelagens de transporte e dispersão de poluentes no mar.

As diferenças apresentadas entre dados medidos no domínio e os resultados da modelagem, na ordem de magnitude que estão, tanto para temperatura e salinidade como para as velocidades, são totalmente aceitáveis na comunidade científica e representam os processos oceanográficos da região. O estudo de Paiva *et al.* (2012), por exemplo, buscou a validação da base hidrodinâmica à luz dos processos e fenômenos oceanográficos. Por mais que os resultados em Paiva *et al.* (2012) de TSM média, por exemplo, tenha apresentado valores de 1°C a 2°C mais elevada do que a climatologia, os processos na região considerada foram bem representados.

Para além disso, é de conhecimento que modelos numéricos de circulação do oceano geram resultados que são aproximações do estado real e possuem limitações e erros inerentes ao método. Destes pode-se citar, por exemplo, erro de truncamento, erro de aproximação e parametrização de processos físicos não resolvíveis. Todas essas fontes contribuem para divergências entre o estado real e o simulado do oceano e possuem grau de incerteza que é inerente da modelagem.

10. 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.
- BECK, B., 2002: Model evaluation and performance. In Encyclopedia of Environmetrics, Eds. A. H. El-Shaarawi and W. W. Piegorsch, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester.
- BOECHAT, A.C.R. 2015. Análise de Dados Oceanográficos Oriundos do Projeto Azul Obtidos em uma Radial no Norte da Bacia de Santos. Dissertação de Mestrado. UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro-RJ. 127 p.
- BOWDEN, K.F. 1983. Physical oceanography of coastal waters. John Wiley, NY, 302 p.
- CARVALHO, J.L.B. 2003. 190 p. Modelagem e Análise do Lançamento de Efluentes Através de Emissários Submarinos. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

- CHAPMAN, D. C., 1985: Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model, *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1060–1075.
- DOS SANTOS, F. A.; DE OLIVEIRA, A. L. S. C.; SOARES, F. L. M.; CARVALHO, G. V.; SÃO TIAGO, P. M.; SANTOS, N. G.; GARÇÃO, H. F.; PIMENTEL, F. P.; BOECHAT, A. C.; MARIANO, L. S.; BERGMAN, C.; RINALDI, F. L.; MIRANDA, T. C.; CABRAL, M. M.; DA CRUZ, L. M. M.; PELLEGRINI, J. A. C.; ASSAD, L. P. F.; LANDAU, L.; FRAGOSO, M. R. 2016. Projeto Azul: operational oceanography in an active oil and gas area southeastern Brazil. In: Liu Y, Kerker H, Weisberg RH (eds) *Coastal ocean observing systems*, 1st edn. Elsevier, London, pp 99–116. doi: 10.1016/
- EGBERT, G.D., EROFEEVA, S. Y, 2002: Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19(2), 183-204.
- 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.
- 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.
- IROBOT. IROBOT® 1KA Seaglider™ User's Guide. Revision C. 444. p. 2012. Disponível em <http://doga.ogs.trieste.it/sire/glider/manuali_seaglider/Seaglider%20User%20Guide%20-%20Rev.%20C.pdf>. Acessado em 17 de maio de 2014.
- LARGE, W. G., J. C. McWILLIAMS, and S. C. DONEY, 1994: Oceanic vertical mixing: a review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Rev. Geophys.*, 32, 363-403.

- LARNICOL, G., GUINEHUT S., RIO M.H., DREVILLON M., FAUGÈRE Y., HERNANDEZ F. (2006). The global observed ocean products of the French Mercator project. 15 years of radar altimetry symposium, Venice.
- LELLOUCHE, J-M.; LEGALLOUDEC, O.; REGNIER, C.; LEVIER, B.; GREINER, E.; DREVILLON, M. . 2019. Quality Information Document: For Global Sea Physical Analysis and Forecasting Product GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_ PHY_001_024. Marine Environment Monitoring Service: issue 2.1.
- 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.
- 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.
- MARCHESIELLO, P., J.C. McWILLIAMS, and A. SCHNEPETERKIN, 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.
- MENDONÇA, L.F., SOUZA, R.B., ASSEF, C.R.C., PEZZI, L.P., MÖLLER, O.O., ALVES, R.C.M. 2016. Regional modeling of the water masses and circulation annual variability at the Southern Brazilian Continental Shelf. Journal of Geophysical Research, doi: 10.1002/2016JC011780.
- PAIVA, A. M., GABIOUX, M., Costa, V. S., Oliveira, B. F. 2012. B ASE HIDRODINAMICA SSE. Remo – Rede de Modelagem e Observação Oceânica. COPPE/UFRJ.
- 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.
- PETERSON, R. G.; STRAMMA, L., 1991: Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. Progress in Oceanography, v. 26, p. 1–73.
- SEELIGER, U., C. ODEBRECHT, J.P. CASTELLO, 1998: Os ecossistemas costeiro e marinho do extremo sul do Brasil. Ecoscientia.
- SCHEPETERKIN, A. F., and J. C. McWILLIAMS (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.
- SILVEIRA, I. C. A. 2007. 160p. O Sistema Corrente do Brasil na Bacia de Campos, RJ. Tese (Doutorado em Oceanografia Física), Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SONG, Y. and D. B. HAIDVOGEL, 1994: A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system. J. Comp. Phys., 115(1), 228-244.
- SOUZA, R.B.de and ROBINSON, I.S. 2004. Lagrangian and satellite observations of the Brazilian Coastal Current. Continental Shelf Research, 24: 241-262
- 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, 2005: Performance of four Turbulence Closure Methods Implemented using a Generic Length Scale Method. Ocean Modelling, 8, 81-113.
- WILMOT, C. J., 1982. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. Bulletin American Meteorological Society. Vol. 63, No. 11, pp. 1309-1313.
- ZWENG, M.M., J.R. REAGAN, J.I. ANTONOV, R.A. LOCARNINI, A.V. MISHONOV, T.P. BOYER, H.E. GARCIA, O.K. BARANOVA, D.R. JOHNSON, D. SEIDOV, M.M. BIDDLE, 2013. World Ocean Atlas 2013, Volume 2: Salinity. S. Levitus, Ed., A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 74, 39 pp.

ANEXO II – Descrição do Modelo de Transporte de Óleo

Relatório Técnico [rev.02]

Modelo de Dispersão de Óleo

Descrição do modelo OSCAR

Preparado por: Prooceano

Prooceano

Av. Rio Branco, 311/1205 – Centro

CEP 20.040-009 – Rio de Janeiro – RJ

Tel./Fax + 55 21 2532.5666

www.prooceano.com.br

© PROOCEANO 2019

The copyright in this document is vested in Prooceano. This document may only be reproduced in whole or in part, or stored in a retrieval system, or transmitted in any form, or by any means electronic, mechanical, photocopying or otherwise, with the prior permission of PROOCEANO.

Os direitos autorais deste documento são propriedade da PROOCEANO. Este documento somente poderá ser reproduzido inteiro ou em partes, ou armazenado, ou transmitido em qualquer forma, ou por quaisquer meios: eletrônico, mecânico, fotocópia ou qualquer outro modo, com a permissão prévia da PROOCEANO.

Controle de revisão

Revisão nº 01

Data: 22 / 06 / 2020

Descrição: Adição do coeficiente do vento na Tabela 4

Responsável: Henery Garção

Empresa: Prooceano

Revisão nº 02

Data: 07 / 07 / 2020

Descrição: Adição da Tabela 2

Responsável: Flávia Pozzi Pimentel

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	9
2. Processos Físico-Químicos do Óleo	10
2.1. Advecção	10
2.2. Espalhamento	11
2.3. Evaporação	12
2.4. Dispersão natural	13
2.5. Emulsificação	14
2.6. Dissolução	15
2.7. Degradação	16
2.8. Sedimentação	18
3. Propriedades físicas do óleo	19
4. Concentração na coluna d'água	21
5. Óleo na costa	22
6. Massa Máxima de Óleo na Costa	24
7. <i>Blowout</i> submerso	24
8. Resumo dos parâmetros físicos e numéricos	27
9. Bibliografia	29

Índice das imagens

Figura 1: Esquema simplificado dos dados de entrada, processos e dados de saída (resultados) usados e obtidos pelo modelo OSCAR. Adaptado de Reed (2001).	9
Figura 2: Esquema da degradação dos principais componentes do óleo. Adaptado de Reed (2001).	17
Figura 3: Esquema geral de plumas de <i>blowout</i> de óleo em profundidade. Adaptado de Lindersen (2013).	24
Figura 4: 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).	26

Índice das tabelas

Tabela 1: Equações de regressão para estimativa dos parâmetros Koc e Kow para diferentes componentes químicos. Fonte: Reed, 2001.	19
Tabela 2: Capacidades máximas de retenção (mm) e taxas de remoção de óleo (por dia), para três classes de óleo e vários tipos de linha de costa.	23
Tabela 3: Parâmetros físicos e químicos utilizados no modelo de óleo.	27
Tabela 4: Constantes físicas utilizadas no modelo de óleo.	28

Equipe técnica

Nome: Flávia Pozzi Pimentel

Registro no Conselho de Classe: Não aplicável

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

Assinatura: 

Nome: Livia Sant'Angelo Mariano

Registro no Conselho de Classe: Não aplicável

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

Assinatura: 

Nome: Henery Ferreira Garção

Registro no Conselho de Classe: Não aplicável

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

Assinatura: 

Nome: Marcelo Montenegro Cabral

Registro no Conselho de Classe: 2010110225 - CREA/RJ

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

Assinatura: 

1. Introdução

O presente relatório apresenta o modelo computacional OSCAR utilizado em estudos de dispersão de óleo tanto em regiões *offshore* como para corpos d'água interiores. O OSCAR (*Oil Spill Contingency and Response*), modelo desenvolvido pela SINTEF, 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 1 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).

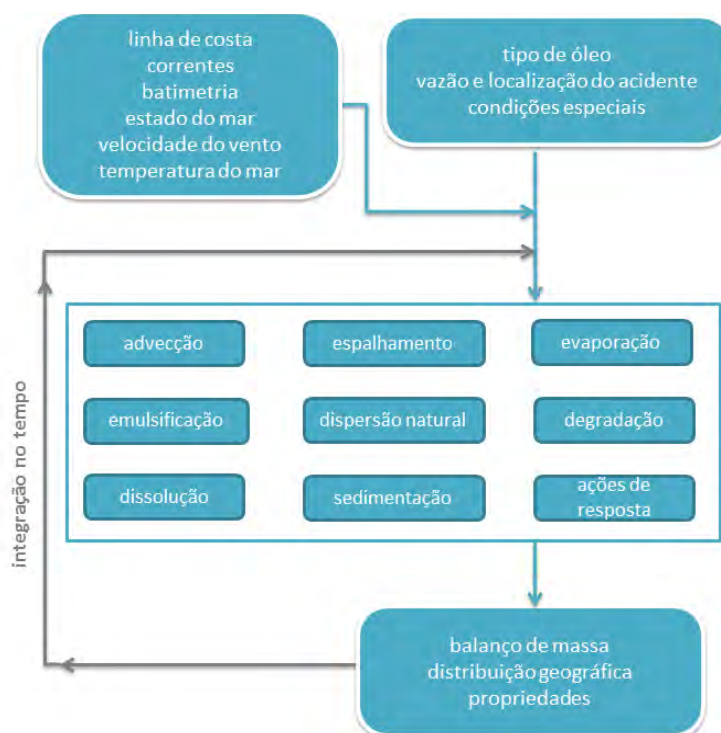


Figura 1: Esquema simplificado dos dados de entrada, processos e dados de saída (resultados) usados e obtidos pelo modelo OSCAR. Adaptado de Reed (2001).

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).

2. Processos Físico-Químicos do Óleo

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.

2.1. Advecção

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

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

onde R é um número aleatório 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):

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

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

O coeficiente de difusão turbulenta acima da picnoclina relacionado às condições de onda, segundo Ichiye (1967, *apud* REED, 2001), é:

$$K_z = 0,0028 \frac{H^2}{T} \exp(-2Kz) \quad 1-3$$

sendo H a altura de onda, T o período de onda e K o número de onda. Abaixo da profundidade da picnoclina, K_z é assumido como uma constante igual a 10^{-4} m/s^2 (KULLENBERG, 1984 *apud* REED, 2001). Na ausência da picnoclina, 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):

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

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**.

2.2. 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:

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

onde x_{LE} é a largura da mancha de óleo (m), g é a aceleração da gravidade (m/s²), $\Delta \rho$ é a diferença entre as densidades da água e do óleo (kg/m³), ρ_w é a densidade da água (kg/m³), μ_w é a viscosidade da água (cP), m é 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.

2.3. 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):

$$dm_i / dt = K_e P_i A M_i F_i / (RT) \quad 1-5$$

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 (m²); 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 x 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):

$$K_e = C_d U(t) \quad 1-6$$

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:

$$C_d = \left(\frac{U^*}{U(t)} \right)^2 \quad 1-7$$

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).

2.4. Dispersão natural

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

$$Q_{di} = C^* D^{0,57} S F d_i^{0,7} \Delta d \quad 1-8$$

onde Q_{di} é a taxa de dispersão por unidade de área das gotículas de óleo com diâmetros entre $(d_i - \Delta d)$ e $(d_i + \Delta d)$ (kg/m²s); C^* é um coeficiente de dispersão derivado empiricamente; D é a energia da onda dissipada por unidade de área (kg/s²); 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:

$$C^* = 4450 \nu^{-0,4} \quad 1-9$$

onde ν é a viscosidade cinemática do óleo (m²/s). A energia dissipada da quebra da onda D , é aproximadamente:

$$D = 0,0034 \rho_w g H_b^2 \quad 1-10$$

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:

$$F = 3 \cdot 10^{-6} U(t)^{3,5} \quad 1-11$$

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

$$d_0 = \frac{C_0 \nu^{0,34}}{\sqrt{e}} \quad 1-12$$

sendo ν é a viscosidade cinemática do óleo (m^2/s); e é a taxa de dissipação de energia (geralmente $1000 \text{ J/m}^3\text{s}$); 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.

2.5. Emulsificação

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

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

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:

$$t_{ref} = Ct_{lab} \quad 1-14$$

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):

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

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.

2.6. Dissolução

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

$$dm_i / dt = K_d A (F_i S_i - C_i) \quad 1-16$$

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):

$$K_d = Sh_i D_i / L \quad 1-17$$

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

$$Sh_i = 0,578 Re^{0,5} Sc_i^{0,33} \quad 1-18$$

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:

$$Sh = 2 + 0,347 Re^{0,62} Sc_i^{0,31i} \quad 1-19$$

2.7. 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 2 mostra o esquema de transformação dos componentes considerados no modelo OSCAR.

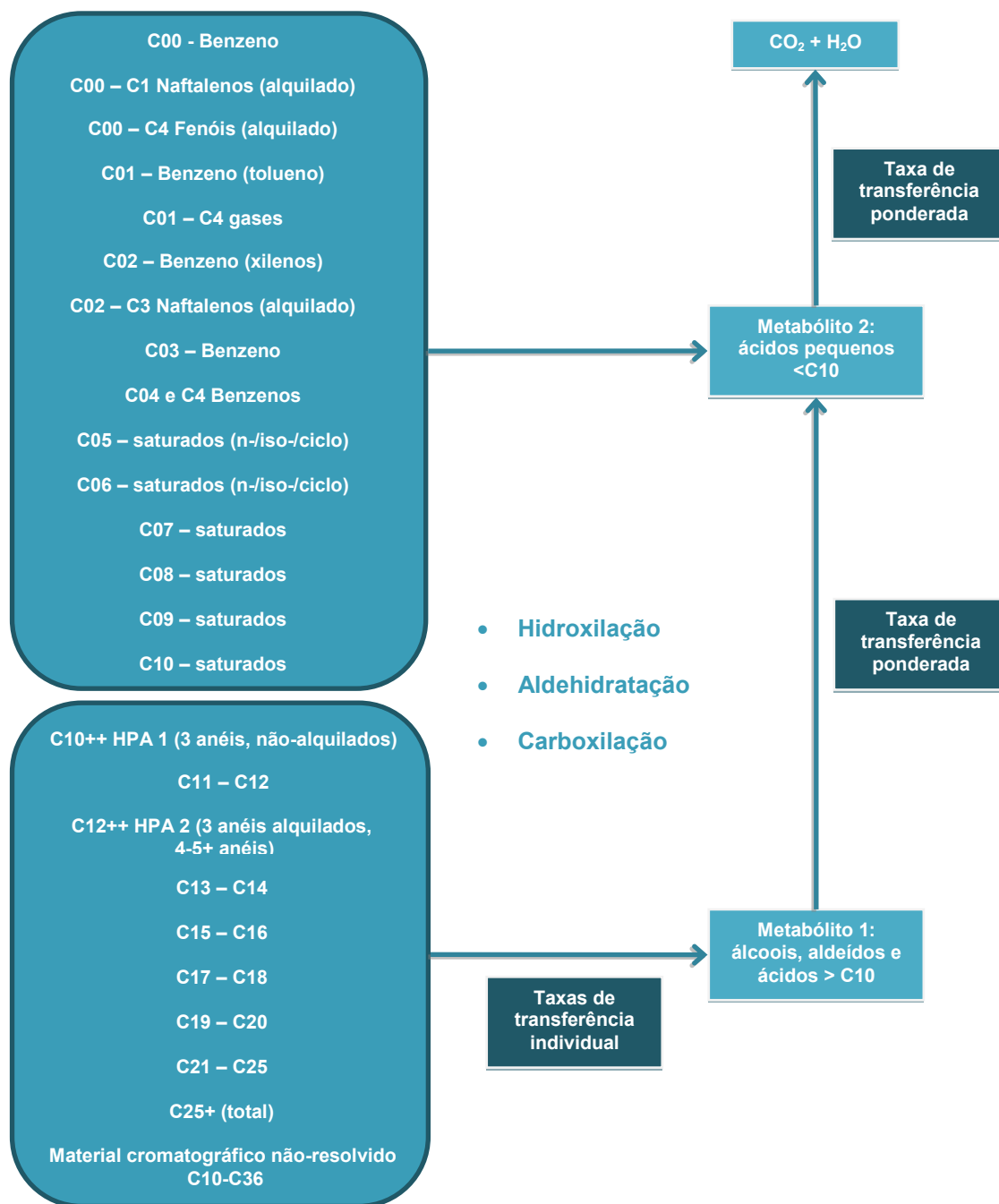


Figura 2: Esquema da degradação dos principais componentes do óleo. Adaptado de Reed (2001).

2.8. 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 1-20) e de Freundlich (Equação 1-21) (REED, 2001).

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

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

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 1-21 é geralmente igual a 1 e o termo $K_1 C_w$ na equação 1-20 é muito menor do que 1. Dessa forma, as equações podem ser reduzidas a uma equação linear

$$C_s = K_p C_w C_{ss} \quad 1-22$$

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})

$$K_{oc} = \frac{K_p}{f_{oc}} \quad 1-23$$

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 1-24 e 1-25, respectivamente).

$$\log K_{oc} = A \log K_{ow} + B \quad 1-24$$

$$\log K_{oc} = a \log S + b \quad 1-25$$

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 1 mostra algumas equações de correlação entre K_{oc} , K_{ow} e S usados no modelo.

Tabela 1: 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. 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):

$$\text{Densidade (g/L)} \quad \rho_0 = a_p + b_p f \quad 1-1$$

$$\text{Viscosidade (cP)} \quad \mu_0 = e^{(a\mu + b\mu f)} \quad 1-2$$

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:

$$\rho(t) = \frac{W(t)\rho_w + [100 - W(t)]\rho_0(t)}{100} \quad 1-3$$

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 $\mu(t)$:

$$\mu(t) = \mu_0(t) e^{\frac{aW(t)}{100 - bW(t)}} \quad 1-4$$

onde a e b são constantes empíricas.

4. 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:

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

onde C_i é a concentração do i -ésimo constituinte químico do vazamento; t é o tempo; \vec{V} é o vetor do transporte advectivo; e D_k é o coeficiente de difusão turbulenta para $k = x, y$ e z .

O primeiro termo da equação é a taxa de variação temporal da concentração de um determinado constituinte em uma determinada localização espacial. Esta taxa de variação é calculada através da determinação dos outros termos da equação utilizando partículas lagrangeanas para representar o campo de concentração. Os termos r_j são taxas de vários processos, tais como a evaporação, emulsificação e espalhamento das manchas superficiais e volatilização dos compostos do óleo.

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

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

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

Enquanto os modelos Eulerianos calculam diretamente os valores das concentrações, os modelos de partículas calculam a distribuição espacial de massa do contaminante representada

por uma nuvem de partículas, sendo cada partícula uma representação discreta de uma parcela da massa total do contaminante no ambiente.

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

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

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

5. Óleo na costa

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

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

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

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

$$V_{\max} = \delta_i L W_i \quad 5-1$$

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:

$$\Delta m = m_i (1 - \exp[-r_i \Delta t]) \quad 1-2$$

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 .

Na Tabela 2 são apresentadas as capacidades máximas de retenção e taxas de remoção do óleo do modelo para vários tipos de linha de costa.

Tabela 2: Capacidades máximas de retenção (mm) e taxas de remoção de óleo (por dia), para três classes de óleo e vários tipos de linha de costa.

	Manguezal / Barra de Rio Vegetada	Areia	Areia / Cascalho	Rocha protegida	Rocha exposta	Estrutura Artificial
Capacidade máxima de retenção (mm)						
$\mu < 30$ cP	70	30	70	5	5	1
$\mu < 2000$ cP	70	25	40	15	15	2
$\mu > 2000$ cP	70	20	30	20	20	5
Taxas de remoção de óleo (por dia)						
$\mu < 30$ cP	0,001	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5
$\mu < 2000$ cP	0,001	0,01	0,005	0,01	0,1	0,1
$\mu > 2000$ cP	0,001	0,01	0,005	0,01	0,1	0,1

6. 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).

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 4.

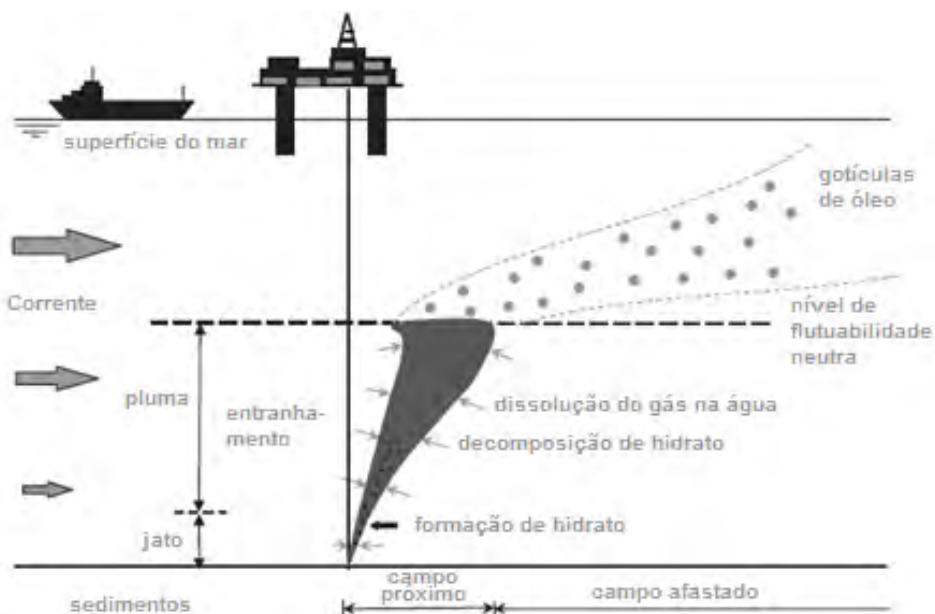


Figura 3: Esquema geral de plumas de *blowout* de óleo em profundidade. Adaptado de Lindersen (2013).

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

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

Na fase de pluma, as gotículas e bolhas de diversos tamanhos 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, consequentemente, o cálculo das concentrações de óleo na coluna d'água e espessuras de óleo em superfície, conforme ilustrado na Figura 5.

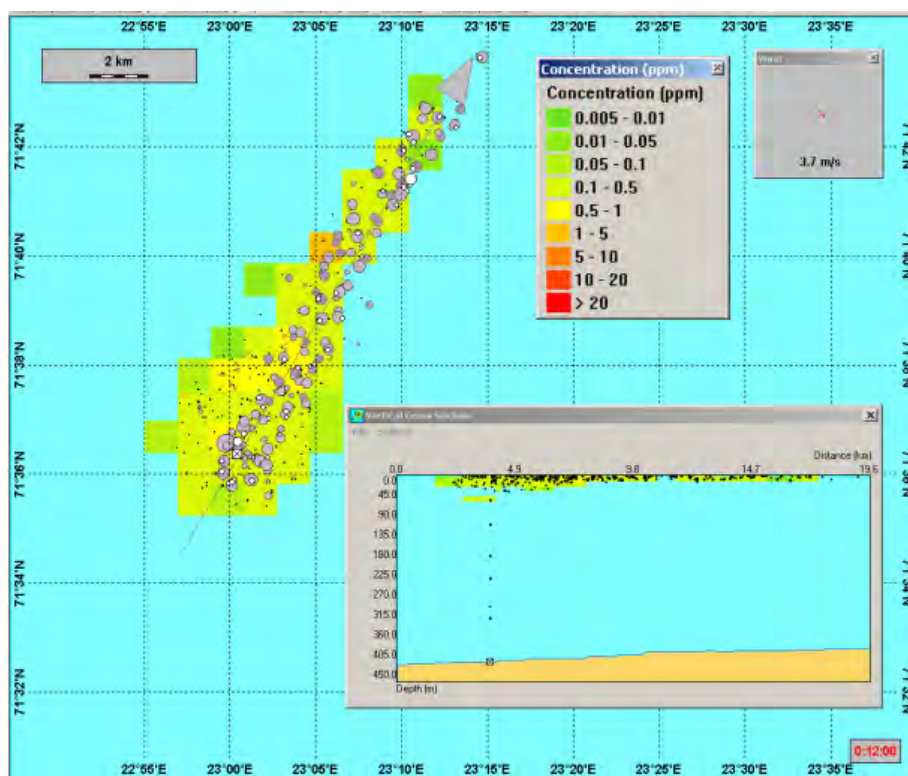


Figura 4: Ilustração de uma simulação de *blowout* no fundo oceânico com o OSCAR. O mapa mostra a distribuição de partículas representando o óleo em superfície (círculos em cinza) e as partículas representando o óleo na coluna d'água (pontos pretos e marrons).

8. Resumo dos parâmetros físicos e numéricos

Os parâmetros físicos utilizados no modelo de dispersão de óleo são apresentados na Tabela 3 enquanto as constantes são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 3: Parâmetros físicos e químicos utilizados no modelo de óleo.

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

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

Tabela 4: Constantes físicas utilizadas no modelo de óleo.

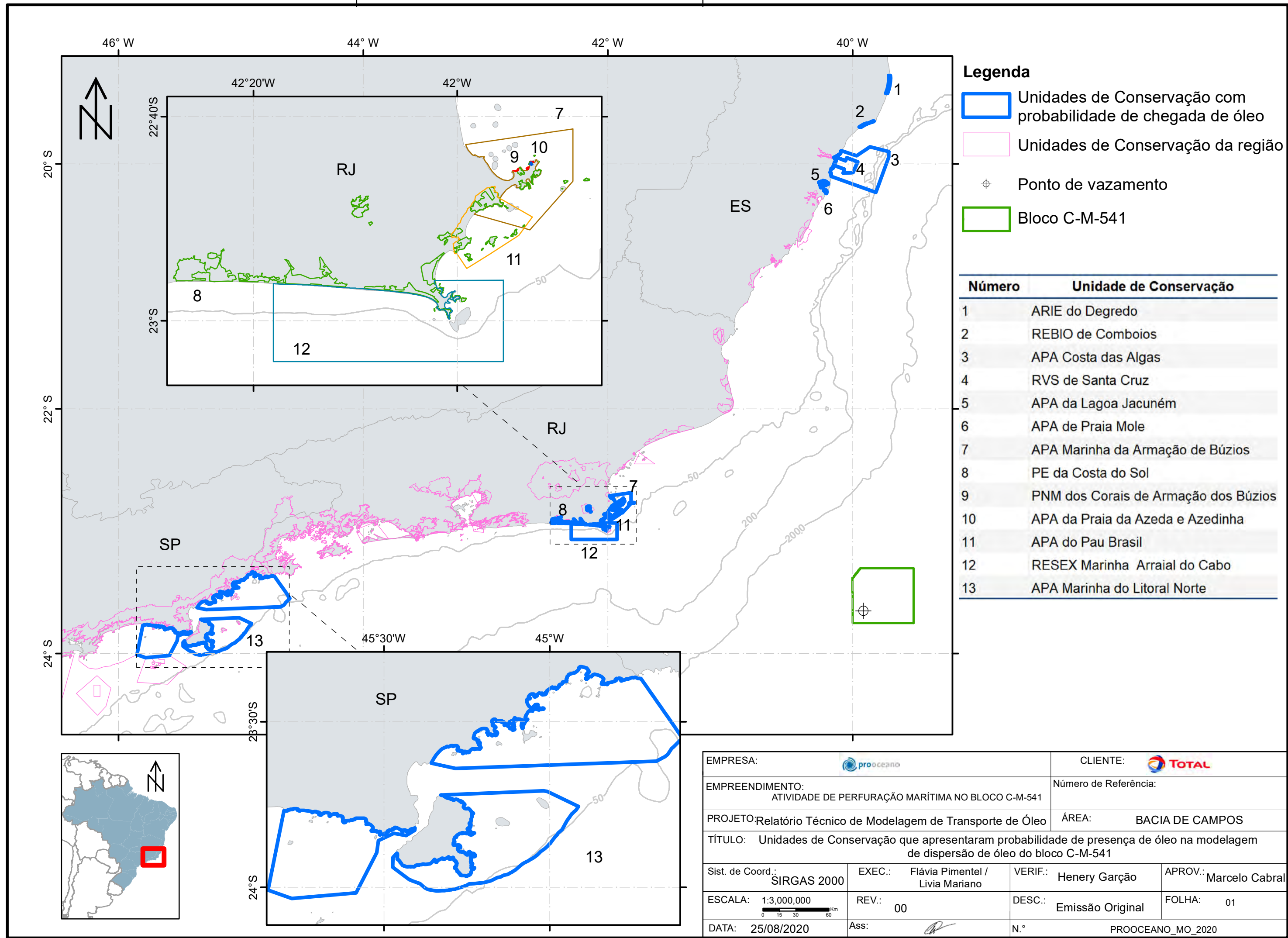
Constante	Valor	Descrição
K_z	10^{-4} m/s^2	coeficiente de dispersão vertical
g	$9,81 \text{ m/s}^2$	aceleração gravitacional
ν	$1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	viscosidade cinemática da água
R	$8,206 \times 10^{-5} \text{ atm} \cdot \text{m}^3/\text{mol} \cdot \text{K}$	constante universal dos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



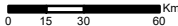

9. Bibliografia

- 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.
- BOWDEN, K.F. 1983. Physical oceanography of coastal waters. John Wiley, NY, 302 p.
- 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 .
- DELVIGNE, G. A. L.; SWEENEY, C. E.. Natural dispersion of Oil. Oil & Chemical Pollution 4 (1988) 281-310.
- 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.
- FISCHER, H. B.; LIST, E. J.; KOH, R. C. Y.; IMBERGER, J.; BROOKS, N.,1979. Mixing in Inland and Coastal Waters., Academic Press, New York,1979
- 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 theERMS model, Technical report, SINTEF.
- JONG, K, 2004 A Comparison of Four Particle Models. A Comparison of DemWaq, DREAM, GNOME, and SIMPAR. Ministeriere Van Verkeer en Waterstraat.
- 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.
- MACKAY, D., I. BUIST, R. MASCARENHAS & S. PATERSON. 1980. Oil Spill Processes and Models. Environmental Protection Service. Canada. Report EE-8.
- 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.

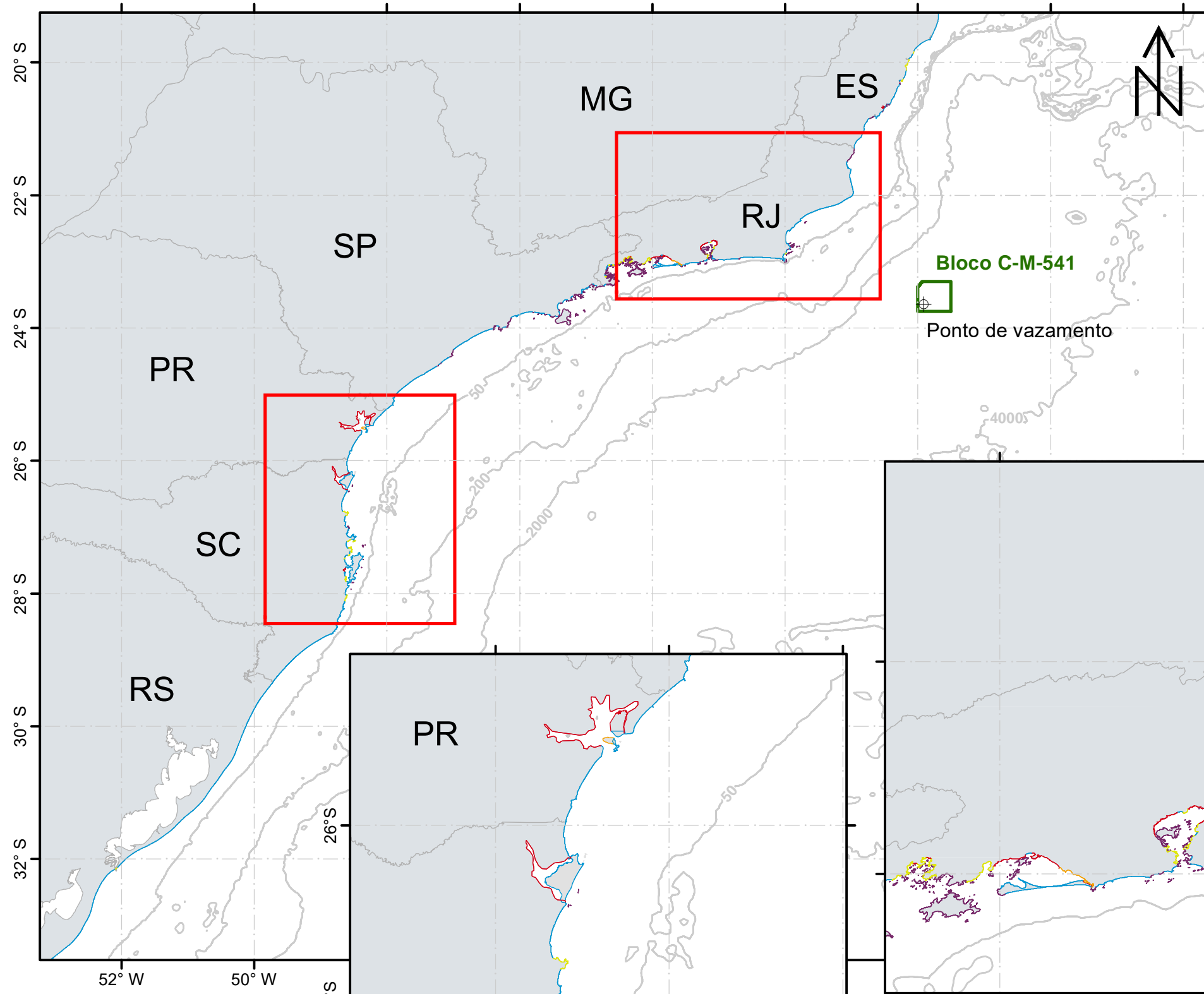
- REED, M., AAMO, O. M., DOWNING, K. (1996): Calibration and Testing of IKU's Oil Spill Contingency and Response (OSCAR) Model System. Proceedings of the 1996 Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, pp.689-726.
- REED, M.; DALING, P.; LEWIS, A.; DITLEVSEN, M. K.; BRØRS, B.; CLARK, 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.

ANEXO III - Mapa com Unidades de Conservação consideradas no estudo










EMPRESA:				CLIENTE:			
EMPREENDIMENTO: ATIVIDADE DE PERFURAÇÃO MARÍTIMA NO BLOCO C-M-541				Número de Referência:			
PROJETO: Relatório Técnico de Modelagem de Transporte de Óleo				ÁREA: BACIA DE CAMPOS			
TÍTULO: Unidades de Conservação que apresentaram probabilidade de presença de óleo na modelagem de dispersão de óleo do bloco C-M-541							
Sist. de Coord.: SIRGAS 2000		EXEC.: Flávia Pimentel / Livia Mariano		VERIF.: Henery Garção		APROV.: Marcelo Cabral	
ESCALA: 1:3,000,000 		REV.: 00		DESC.: Emissão Original		FOLHA: 01	
DATA: 25/08/2020		Ass: 		N.º PROOCEANO_MO_2020			

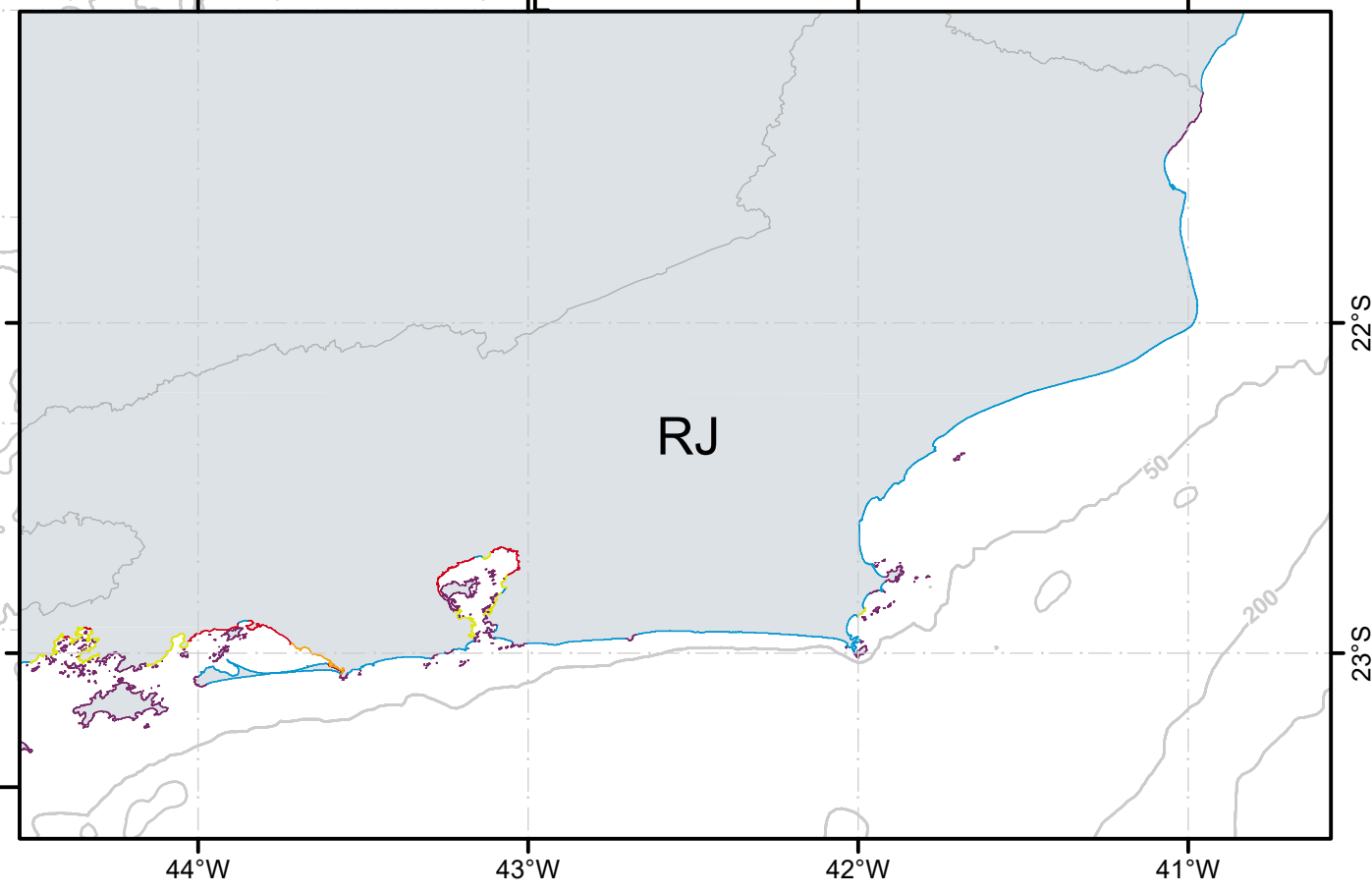
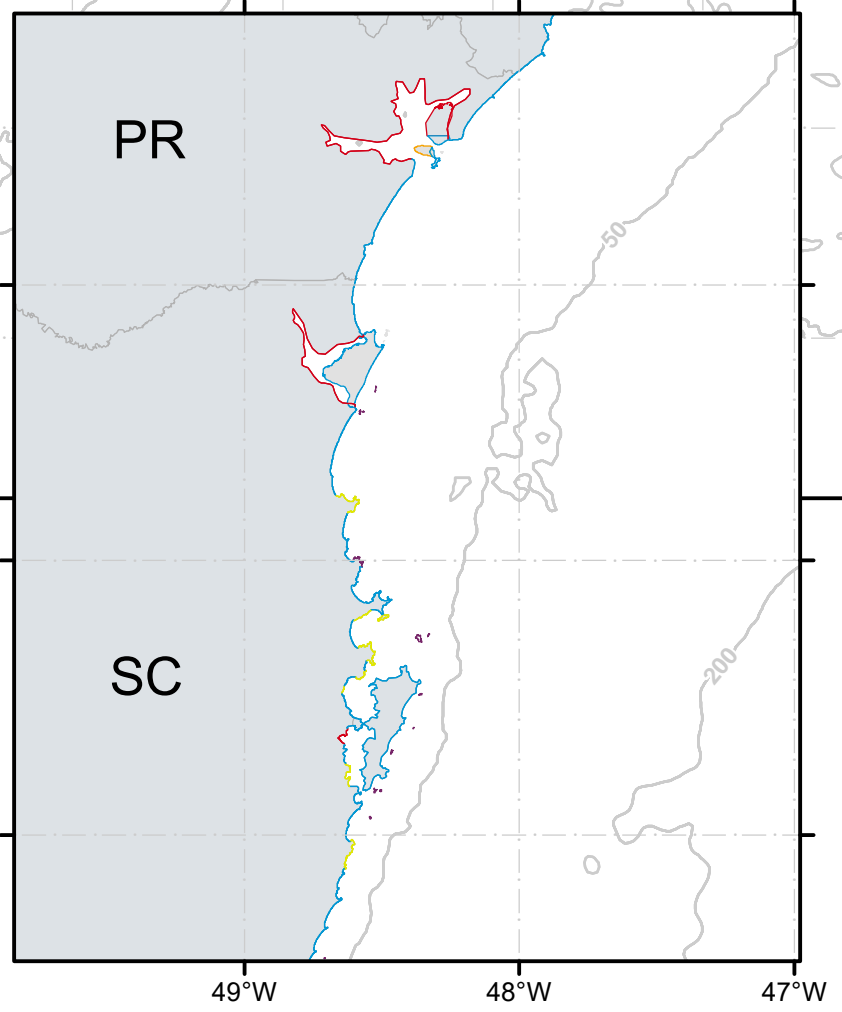
ANEXO IV - Mapa com Detalhamento de linha de costa utilizado para a definição da grade do modelo do OSCAR



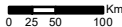



Tipos de costa

-  Costão rochoso
-  Praia arenosa
-  Estrutura artificial
-  Planície de maré
-  Manguezal
-  Ponto de vazamento
-  Bloco C-M-541

Bloco C-M-541
Ponto de vazamento



EMPRESA: 		CLIENTE: 	
EMPREENDIMENTO: ATIVIDADE DE PERFURAÇÃO MARÍTIMA NO BLOCO C-M-541		Número de Referência:	
PROJETO: Relatório Técnico de Modelagem de Transporte de Óleo		ÁREA: BACIA DE CAMPOS	
TÍTULO: Detalhamento da linha de costa considerada na modelagem de dispersão de óleo no Bloco C-M-541.			
Sist. de Coord.: SIRGAS 2000	EXEC.: Flávia Pimentel / Henery Garção / Livia Mariano	VERIF.: Marcelo Cabral	APROV.: Marcelo Cabral
ESCALA: 1:8,000,000 	REV.: 00	DESC.: Emissão Original	FOLHA: 01
DATA: 25/08/2020	Ass: 	N.º PROOCEANO_MO_2020	

ANEXO V – Justificativa do Volume de Pior Caso

Relatório Técnico [rev.00]

Justificativa do Volume de Pior Caso

Preparado por: Prooceano

Prooceano

Av. Rio Branco, 311/1205 – Centro

CEP 20.040-009 – Rio de Janeiro – RJ

Tel./Fax + 55 21 2532.5666

www.prooceano.com.br

© PROOCEANO 2020

The copyright in this document is vested in Prooceano. This document may only be reproduced in whole or in part, or stored in a retrieval system, or transmitted in any form, or by any means electronic, mechanical, photocopying or otherwise, with the prior permission of PROOCEANO.

Os direitos autorais deste documento são propriedade da PROOCEANO. Este documento somente poderá ser reproduzido inteiro ou em partes, ou armazenado, ou transmitido em qualquer forma, ou por quaisquer meios: eletrônico, mecânico, fotocópia ou qualquer outro modo, com a permissão prévia da PROOCEANO.

1. Introdução

O presente relatório apresenta o descritivo do cálculo do volume de pior caso considerado no estudo de modelagem de dispersão de óleo para o bloco C-M-541, poço Ubaia. O descritivo é baseado no arquivo “00_Worst case discharge Data for Oil Spill Modeling.docx” enviado pela empresa Total.

2. Objetivo

O objetivo do estudo foi analisar a fase de perfuração que atravessa um reservatório de hidrocarbonetos e calcular o fluxo de *blow-out* nos piores casos para os poços do Bloco C-M-541.

3. Premissas adotadas

Considerando o contexto exploratório dos poços de interesse, as premissas adotadas para este estudo foram:

- Pressão hidrostática do nível do mar à jusante do BOP (poços submarinos);
- Diâmetro interno do poço constante (sem erosão e/ou obstrução);
- Sem bloqueios por formação de hidratos ou depósito de asfaltenos;
- Sem dano mecânico (*skin* mecânico $S_m = 0$);
- Propriedades do reservatório segundo as previsões de cenário mais provável;
- Depleção do reservatório não é considerada nesta análise pois o contato dos fluidos e a extensão do reservatório são desconhecidos no cenário exploratório. Esta consideração é mais conservadora para a descarga de óleo e a capacidade de matar o poço (i.e., esta abordagem leva a uma potencial descarga maior do que ocorreria em um cenário real).

4. Dados de entrada

Os seguintes dados de entrada foram considerados para o cálculo do volume:

- Lâmina d'água: 3.020 m;
- Fluido esperado: óleo leve;
- Tipo de reservatório: carbonático;
- Pressão *in loco* do reservatório: 10948 psi a 7050 m (profundidade vertical);
- Permeabilidade: 300 mD;
- Espessura do reservatório: 450 m;
- Viscosidade do óleo *in loco*: 1 cP;
- Densidade do óleo *in loco*: 635 kg/m³;
- Fator Volume de Formação do óleo: 2 m³/Sm³;
- Área de drenagem: 6 km²;
- Diâmetro do poço: 8 ½ polegadas;
- Razão gás/óleo [Sm³/Sm³]: 350;
- Fator de dano (*skin*): zero (sem dano; estimativa bastante conservativa dado que o poço está cheio de fluido de perfuração e/ou cimento).

5. Volume de Pior Caso

Para calcular o valor da descarga de pior caso, considera-se:

- O reservatório é perfurado na seção de 8 ½" até o contato de fluidos óleo-água esperado;
- Um *blow-out* de abertura total – sem coluna de perfuração (ou outro elemento de restrição) dentro do poço;
- BOP completamente aberto – considera-se falha em fechar o BOP, assim não há qualquer restrição ao fluxo. *Blow-out* com descarga direta no fundo do mar.

Estima-se, assim, a descarga de pior caso em: **136.541 bbl/dia** de óleo e **7.58 M Sm³/dia** de gás.