

# Resposta ao Parecer Técnico nº 222/2022- Coexp/CGMac/Dilic

---

**RELATÓRIO TÉCNICO [REV.00]**

28 DE SETEMBRO DE 2022

---

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

© PROOCEANO 2022

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

---

## Equipe técnica

---

**Júlio Augusto de Castro Pellegrini**

Registro no Conselho de Classe: Não aplicável

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

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



Assinatura:

---

**Henery Ferreira Garção**

Registro no Conselho de Classe: Não aplicável

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

Responsável pela(s) Seção(ões): Todas



Assinatura:

---

**Leonardo Maturo**

Registro no Conselho de Classe: Não aplicável

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 252527

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

 **Leonardo Marques da Cruz**  
Sócio Diretor  
PROOCEANO

Assinatura:

---

**Gabriel Vieira de Carvalho**

Registro no Conselho de Classe: Não aplicável

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

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



Assinatura:

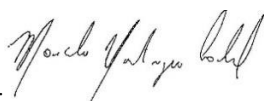
---

**Marcelo Montenegro Cabral**

Registro no Conselho de Classe: 2010110225 - CREA/RJ

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

Responsável pela(s) Seção(ões): Todas



Assinatura:



## 1. Introdução

O presente documento foi elaborado com o propósito de endereçar as considerações sobre o estudo de modelagem de dispersão óleo que constam no Parecer Técnico de nº 222/2022-Coexp/CGMaq/Dilic, emitida pelo IBAMA como parte do processo de licenciamento ambiental da Atividade de Perfuração Marítima, no Bloco FZA-M-59, Bacia da Foz do Amazonas (Processo IBAMA nº 02022.000336/2014-53).

O Parecer Técnico nº 222/2022 reúne as principais preocupações acerca das bases hidrodinâmicas utilizadas em processos de licenciamento ambiental na Margem Equatorial Brasileira (MEq), que se agrupam nos seguintes tópicos:

- Representação do transporte transfronteiriço do óleo, incluindo as Bahamas.
- Representação da dinâmica da foz do Amazonas.
- Elaboração de modelos para as áreas costeiras, devido a alta sensibilidade na região, além das peculiaridades da Foz do Amazonas
- Conhecimento do comportamento de deslocamento de óleo vazado na região de vazamentos, seja em superfície, subsuperfície e fundo.
- Representação da hidrodinâmica em toda a coluna d'água, incluindo atenção à Subcorrente Norte do Brasil

Ainda que se pese o fato de que passados sete anos da elaboração do estudo avaliado pelo Parecer Técnico nº 222/2022, ele já não represente o “estado da arte” em termos de versões dos modelos utilizados e do conhecimento relativo ao ambiente natural e que, dúvidas da sociedade devem ser esclarecidas, a Prooceano entende que o relatório de modelagem de dispersão de óleo de 2015 ainda atende ao uso a que se propôs.

Por ser, em essência, uma aproximação da realidade, a técnica de modelagem numérica não deve ser tomada como verdade absoluta, mas sim, interpretada à luz do seu propósito específico. Um bom estudo de modelagem passa por uma boa escolha dos processos e escalas que afetam os fenômenos que se deseja representar.

Com o objetivo de endereçar os pontos de atenção enunciados no Parecer Técnico 222/2022 e sumarizados nos três tópicos acima, serão apresentadas novas análises dos resultados da base hidrodinâmica utilizada neste processo, com a inclusão de dados de fundeios e derivadores coletados recentemente.

No capítulo 2, são apresentadas análises da base hidrodinâmica utilizada, subdivididas em análise da dinâmica costeira e oceânica, análise das correntes superficiais e correntes em profundidade. No capítulo 3, são apresentadas análises dos resultados da modelagem de dispersão de óleo, utilizando para tal dados de derivadores lançados no âmbito do Projeto Costa Norte

([projetocostanorte.eco.br](http://projetocostanorte.eco.br)). Por fim, no capítulo 4 são sumarizadas considerações acerca das questões apresentadas no Parecer Técnico 222/2022, sob a luz das análises apresentadas.

## 2. Sobre a modelagem hidrodinâmica

O modelo hidrodinâmico utilizado (ROMS) para o estudo de modelagem de dispersão em questão considera as características da plataforma continental e da região costeira, abrangendo os processos relevantes da plataforma continental interna até a bacia oceânica.

Destaca-se que o objetivo principal de se utilizar estudos de modelagem numérica, não é a resolução de todos e quaisquer fenômenos ambientais, mas sobretudo aqueles que exercem influência determinante na resolução da questão que se busca responder.

A seguir, são destacadas características do modelo hidrodinâmico que evidenciam a qualidade do modelo para a devida representação da dinâmica responsável pelo comportamento da deriva do óleo observada a partir do ponto de vazamento no bloco FZA-M-59.

### 2.1. Dinâmica costeira e oceânica

Diferente do que é sugerido no Parecer Técnico nº 222/2022, o estudo de modelagem não foi realizado com base em um modelo global, mas sim por um modelo oceânico regional que considera a peculiaridade da dinâmica oceanográfica na região. O modelo hidrodinâmico desenvolvido abrange os processos relevantes da plataforma continental interna da região da Foz do Amazonas até a bacia oceânica.

Como pode ser observado no relatório de modelagem hidrodinâmica e dispersão de óleo, o domínio do modelo (Figura 1) compreende a plataforma Amazônica da linha de costa às águas profundas com aproximadamente 6,5 km de resolução. O modelo de elevação digital (Figura 1) foi feito com informações da base de dados batimétricos ETOPO1 e foi cuidadosamente comparada com cartas náuticas (Figura 2) especificamente para avaliar a representação das características morfológicas da plataforma continental e da região próxima à costa.

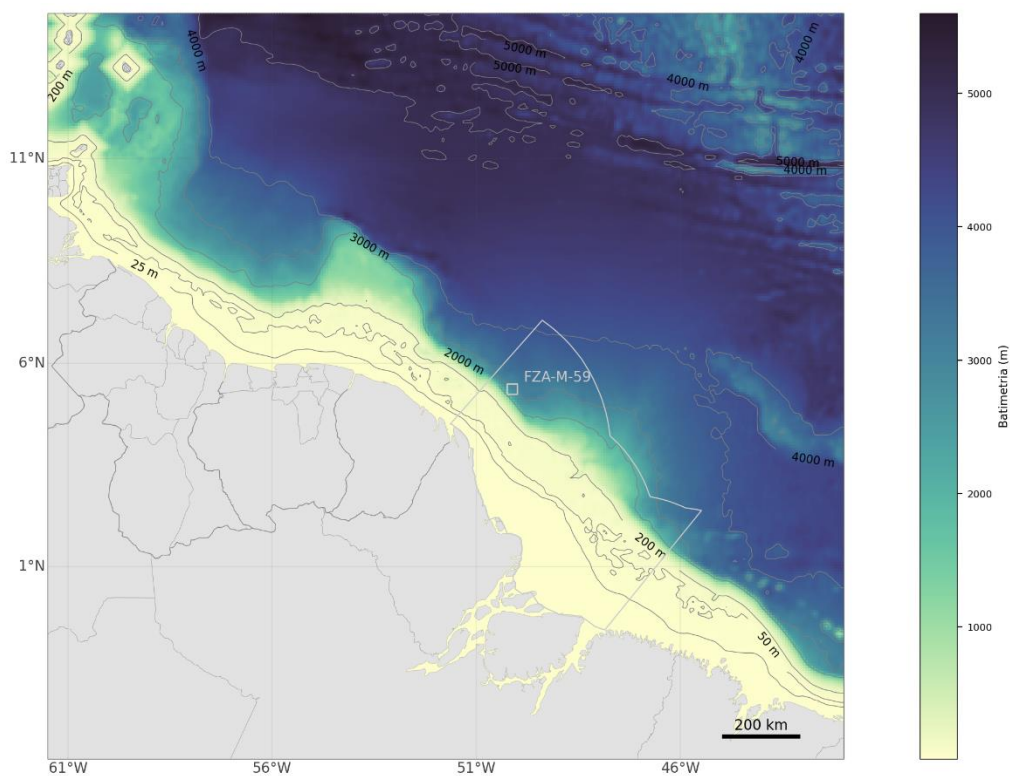


Figura 1: Modelo de elevação digital da modelagem hidrodinâmica. A escala de cor representa a batimetria em metros.

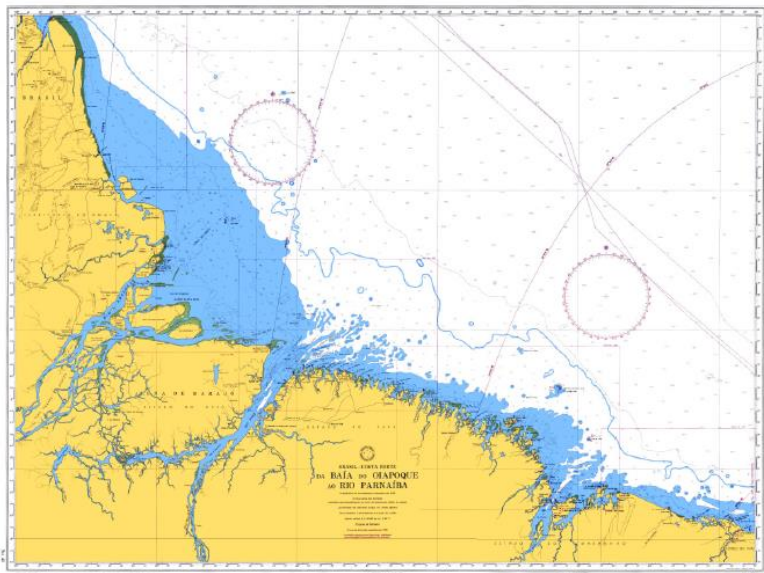


Figura 2: Carta náutica n. 040, eixo X é a Latitude e o eixo Y é Longitude. Fonte: DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação).



Para comparar a elevação de maré calculada pelo modelo numérico com dados da região modelada foram escolhidas cinco estações maregráficas (Ponta dos Índios – AP, Plataforma Penrod – AP, Ilha das Pacas – PA, Ilha dos Irmãos – MA e Mangunça - MA) da FEMAR (Figura 3) situadas ao longo do domínio de modelagem. Estas estações foram escolhidas por estarem em regiões bem distintas entre si no interior do domínio de modelagem, tanto em regiões oceânicas, quanto em regiões costeiras e compreendendo os diferentes estados.

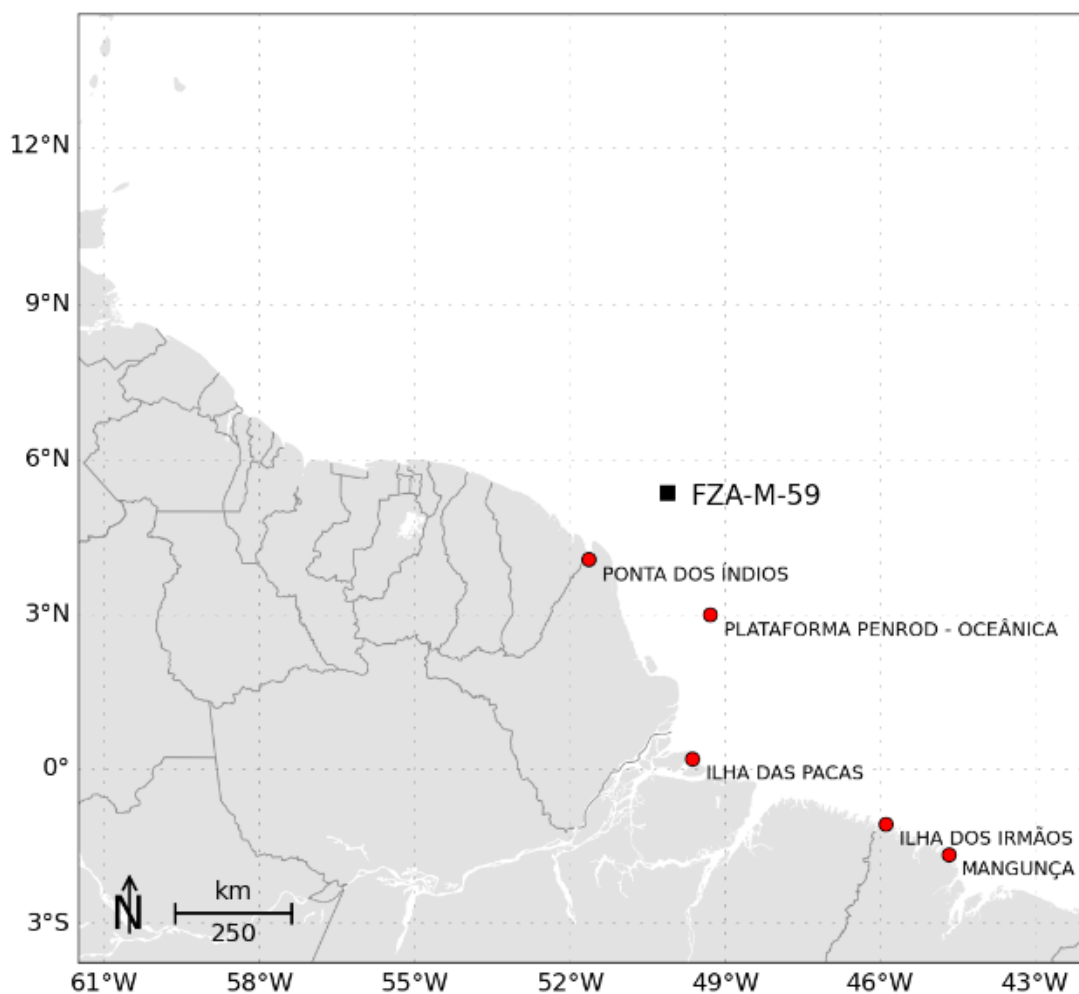


Figura 3: Localização das estações maregráficas da FEMAR, utilizadas na avaliação da representação da maré no modelo hidrodinâmico bloco FZA-M-59.

Com os dados das constantes harmônicas dessas estações foram realizadas previsões da elevação de maré para o período de simulação (janeiro de 2013 a dezembro de 2013). Esses dados foram comparados com os valores de elevação do nível do mar calculados pelo modelo nos pontos de grade mais próximos das estações (Figura 4 a Figura 8). As comparações são apresentadas para todo o período de modelagem, e em detalhamento para um período de aproximadamente 30 dias. A comparação em ~30 dias é feita para que as diferenças e semelhanças em amplitude e fase possam

ser mais bem observadas, não tendo sido escolhidos períodos em que haja maior aproximação, ou divergência entre as séries modeladas e observadas.

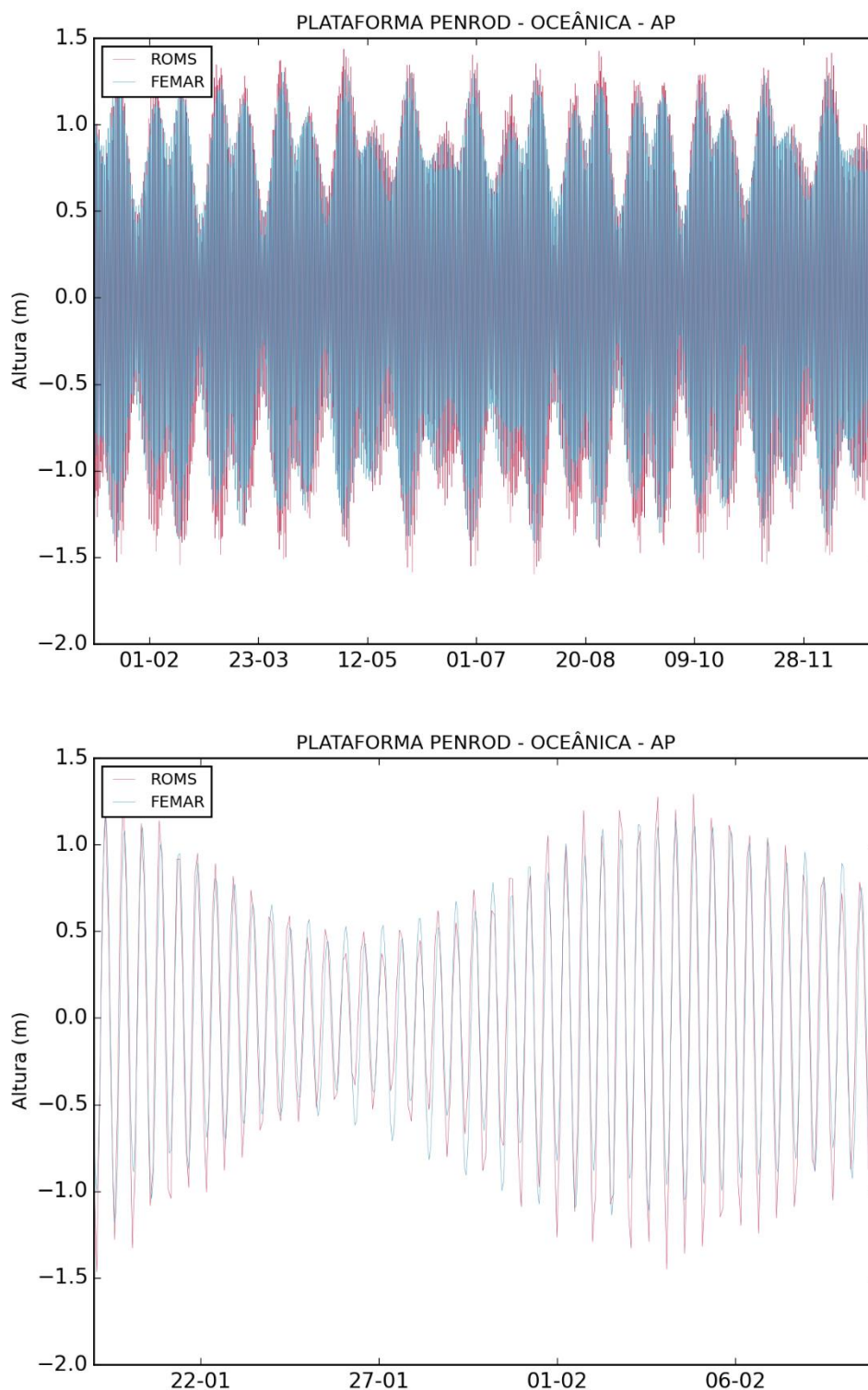


Figura 4: Comparação entre a série maregráfica da estação da Plataforma Penrod (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).

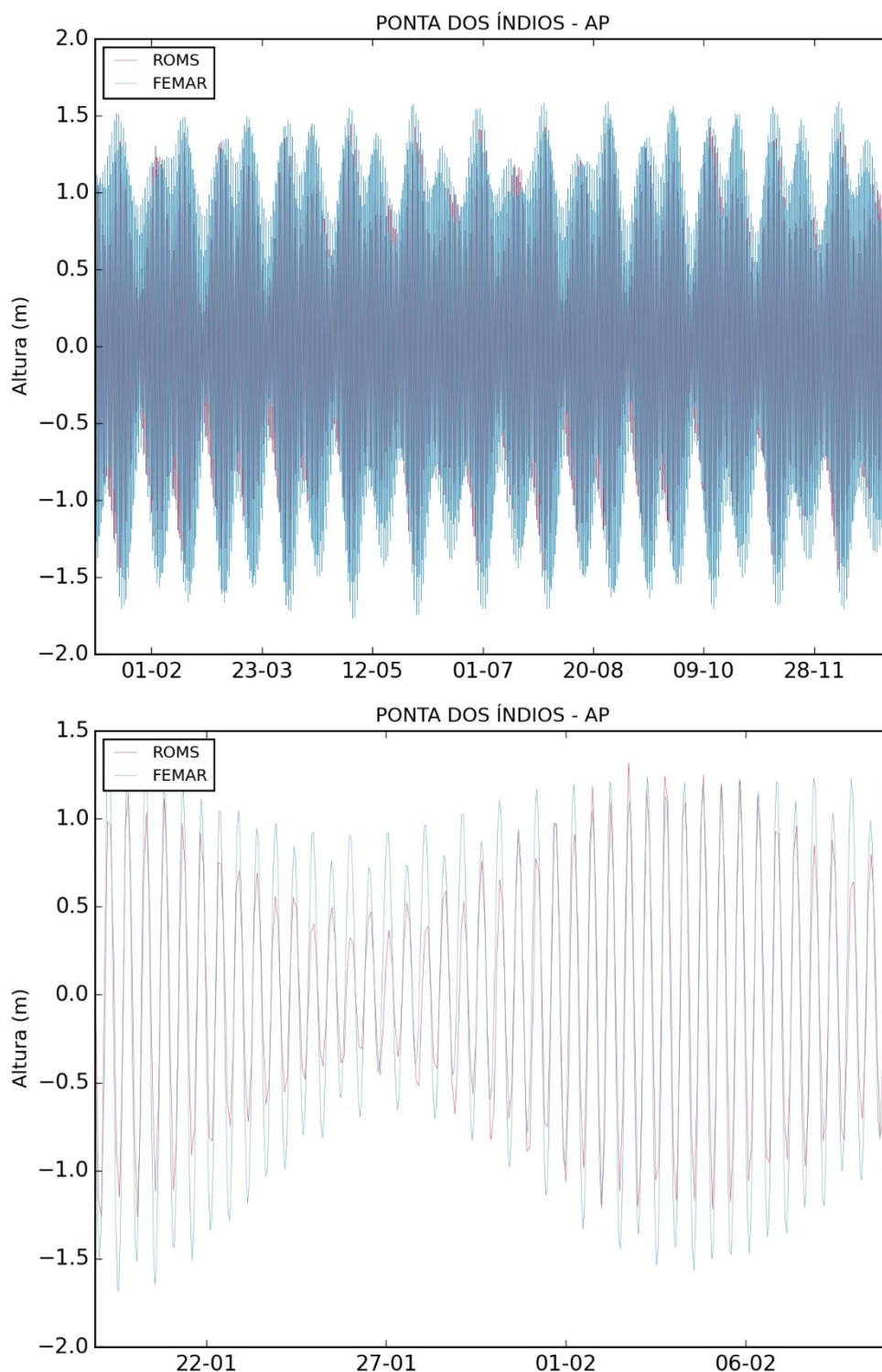


Figura 5: Comparação entre a série maregráfica da estação de Ponta dos Índios (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).

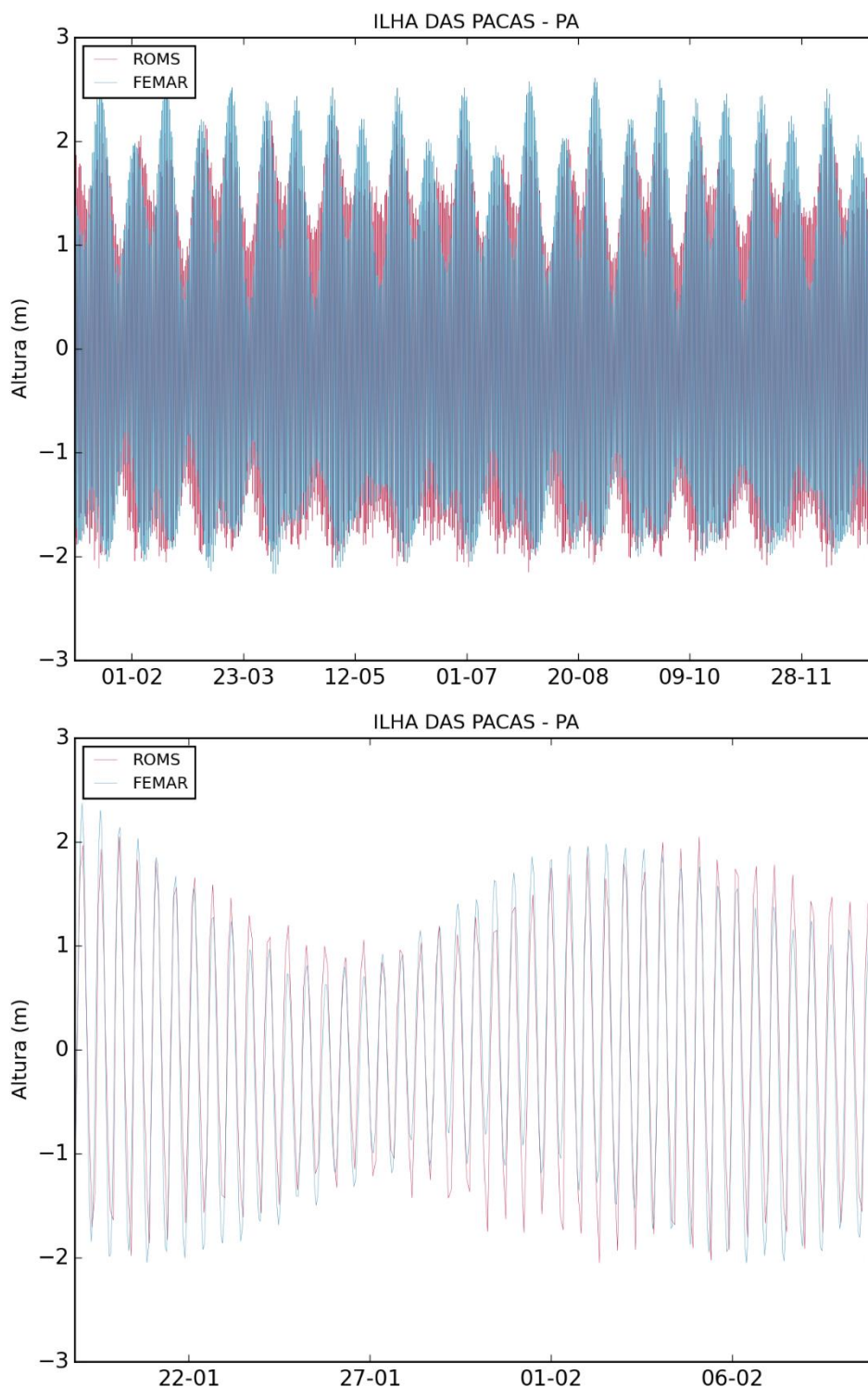


Figura 6: Comparação entre a série maregráfica da estação da Ilha das Pacas (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).

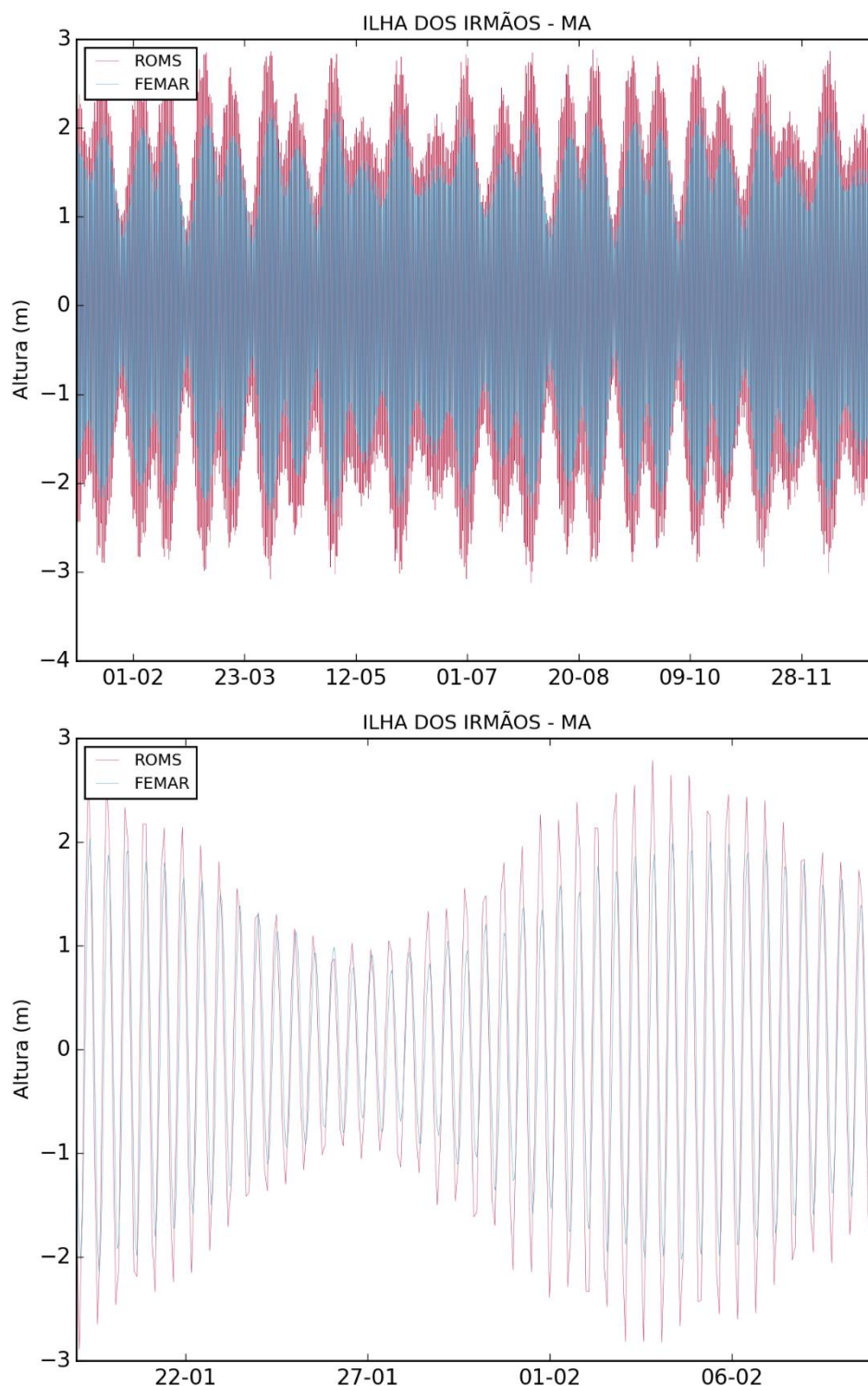


Figura 7: Comparação entre a série maregráfica da estação da Ilha dos Irmãos (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).



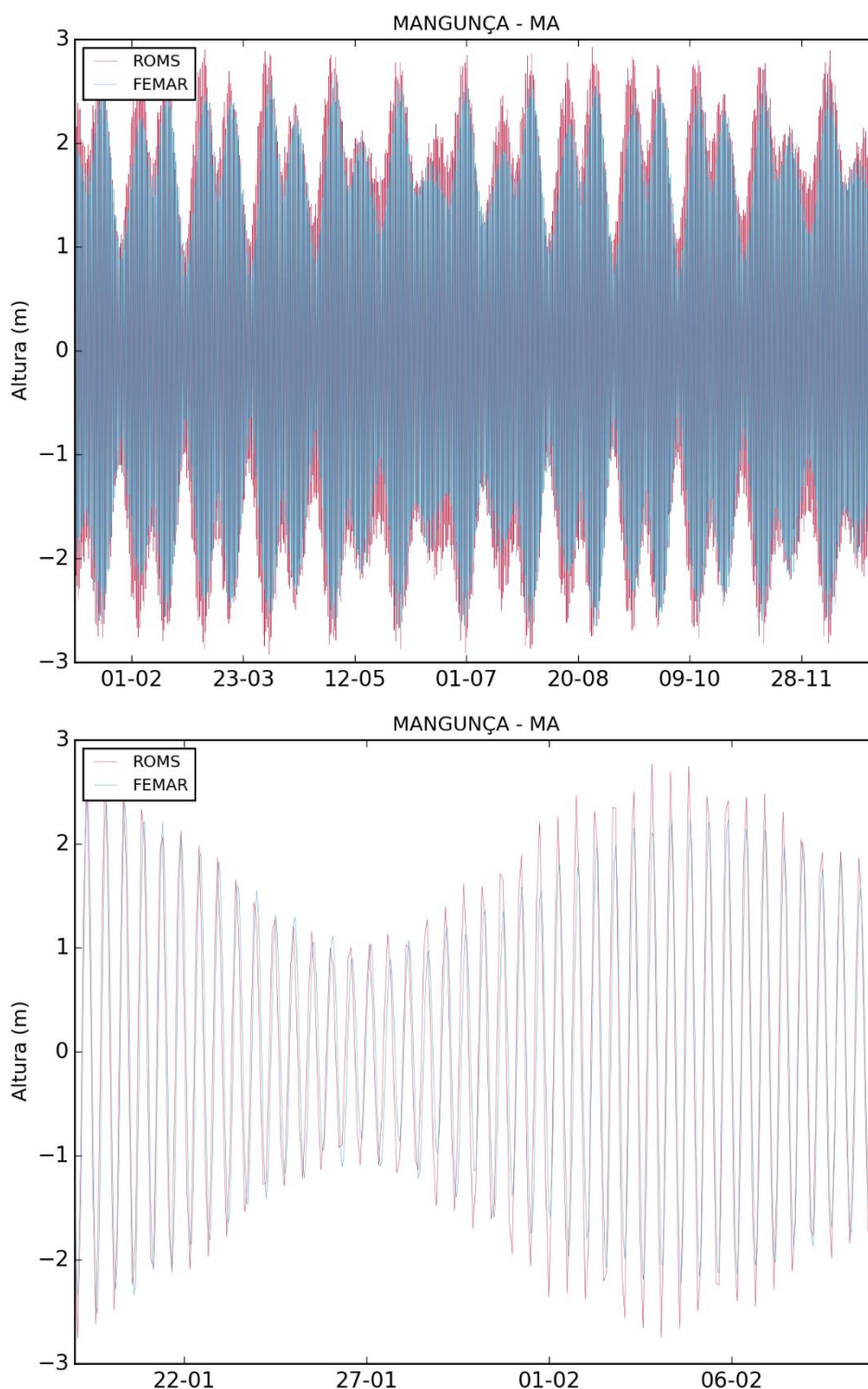


Figura 8: Comparação entre a série maregráfica da estação de Mangunça (azul) e a série de elevação do nível do mar calculada pelo modelo ROMS (vermelha), para o ponto mais próximo, para todo o período (acima) e em detalhe (abaixo).

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

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

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

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

Os índices de concordância calculados para cada local são apresentados na Tabela 1. O melhor índice de concordância foi obtido para a estação de Plataforma Penrod (0,99), e o menor valor na estação da Ilha dos Irmãos (0,91).

Tabela 1: Comparação estatística entre os dados de elevação do ROMS e os dados medidos.

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

Considerando que foram avaliadas diferentes estações ao longo do domínio, incluindo regiões oceânicas e costeiras, obtendo-se bons resultados na maioria dos casos, pode-se concluir que a maré foi bem representada pela base hidrodinâmica utilizada.

Comparações entre os resultados do modelo e correntes observadas por três correntômetros (Figura 9) do programa AmasSeds (ALESSI *et al.*, 1992) mostraram que os resultados representam os padrões observados e explicados na literatura específica e observados nos dados de corrente de AmasSeds. **Ressalta-se que as comparações apresentadas são entre séries temporais com diferentes períodos – os dados do AmasSeds são de 1992 e o dado do modelo é de 2013 – logo, as comparações devem ser analisadas com cautela. Neste tipo de comparação é interessante observar a amplitude e o comportamento geral da série.**



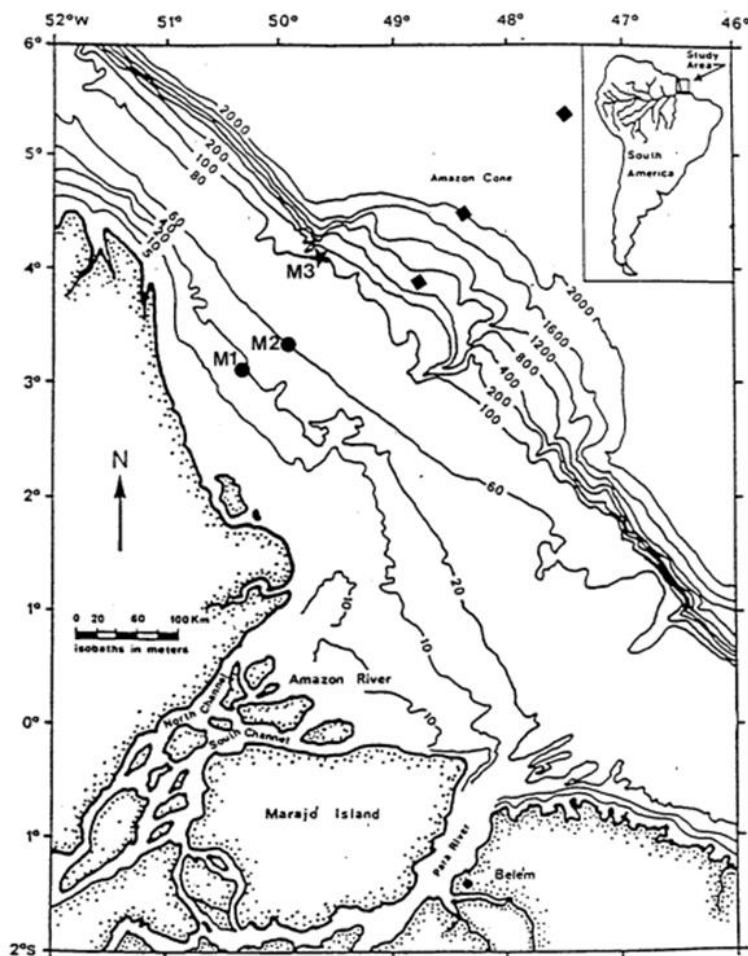


Figura 9: Localização dos pontos M1, M2 e M3 com observação de dados de corrente. Fonte: Alessi et al., 1992.

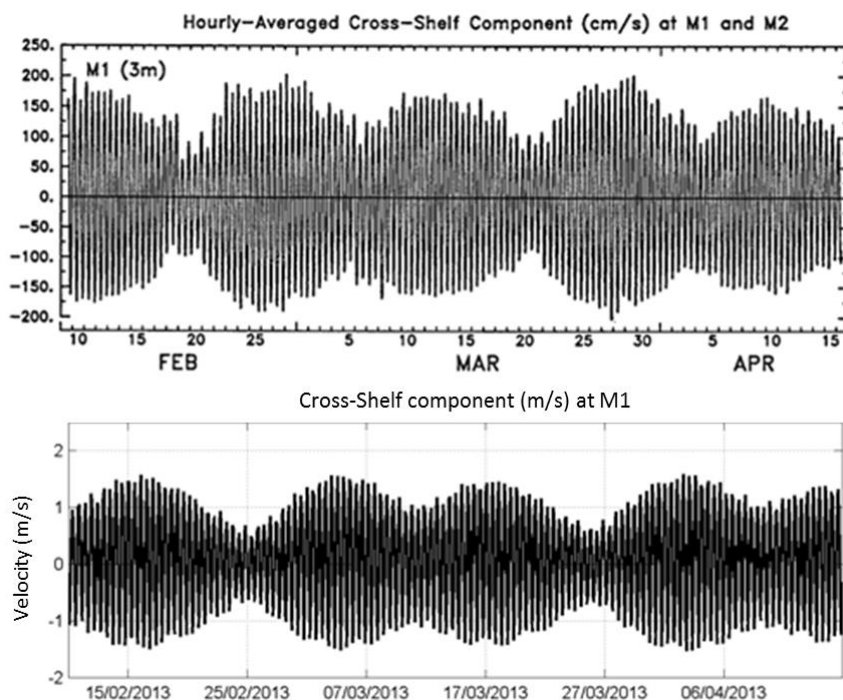


Figura 10: Série temporal da componente de corrente transversal à plataforma no ponto M1 (painel superior retirada de Alessi et al., 1992) e obtida pelo modelo no ponto de grade mais próximo (painel inferior).

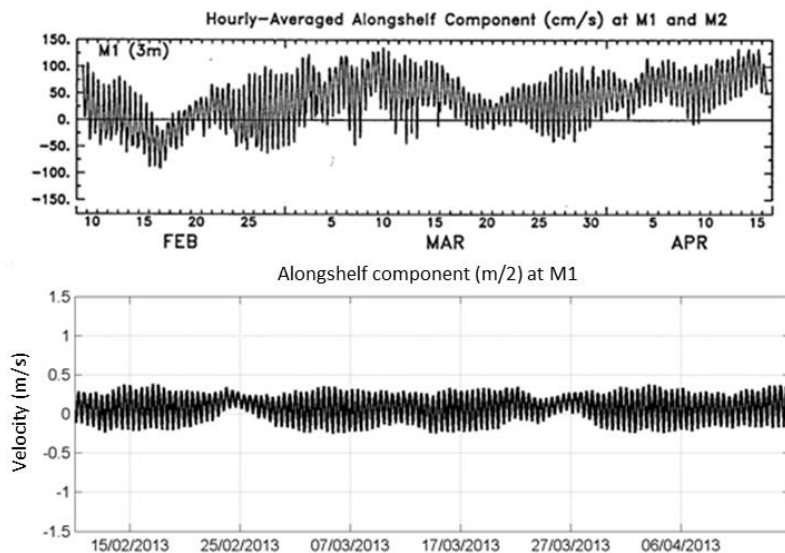


Figura 11: Série temporal da componente de corrente paralela à costa medida no ponto M1 (painel superior retirada de Alessi et al., 1992) e obtida pelo modelo no ponto de grade mais próximo (painel inferior).

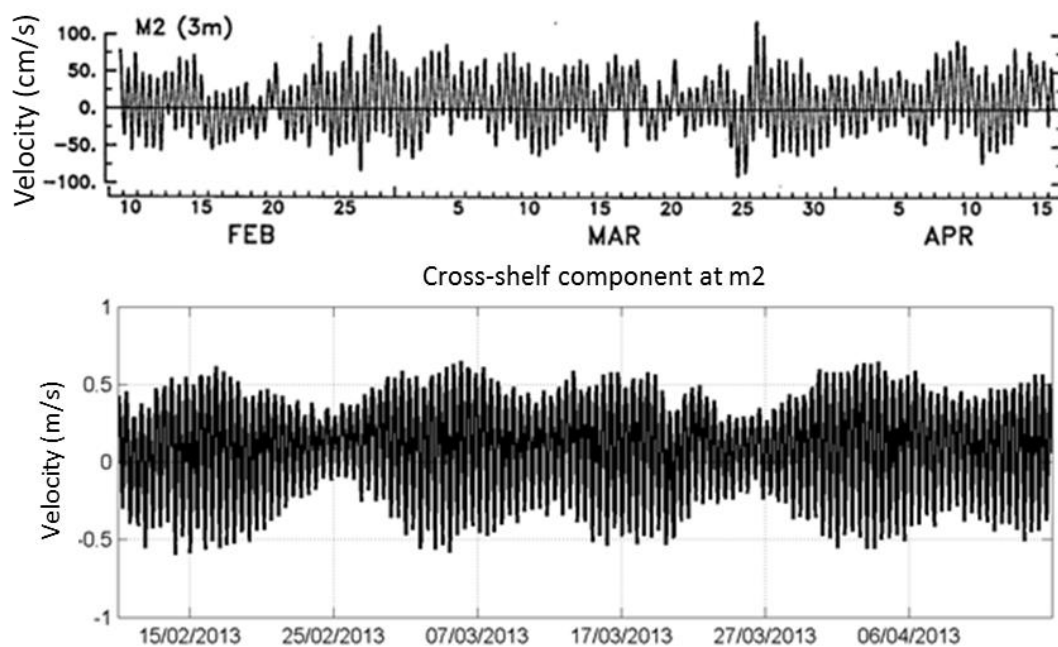


Figura 12: Série temporal da componente de corrente transversal à costa (cm/s) medida no ponto M2 (painel superior) e obtida pelo modelo no ponto de grade mais próximo (painel inferior).

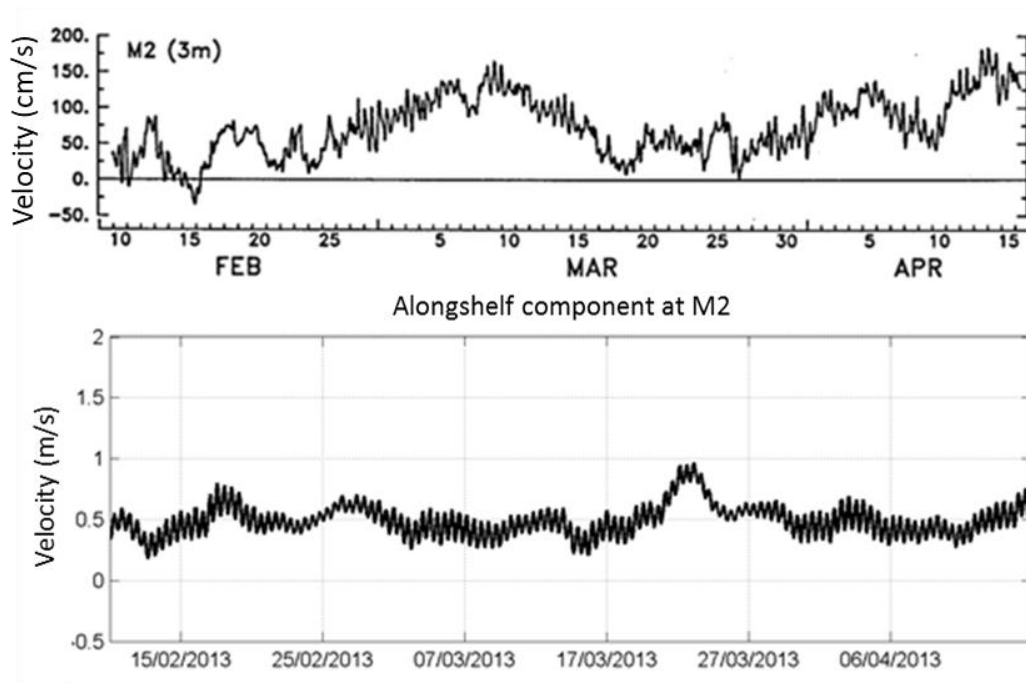


Figura 13: Série temporal da componente de corrente paralela à costa (cm/s) medida no ponto M2 (painel superior) e a obtida pelo modelo no ponto de grade mais próximo (painel inferior).

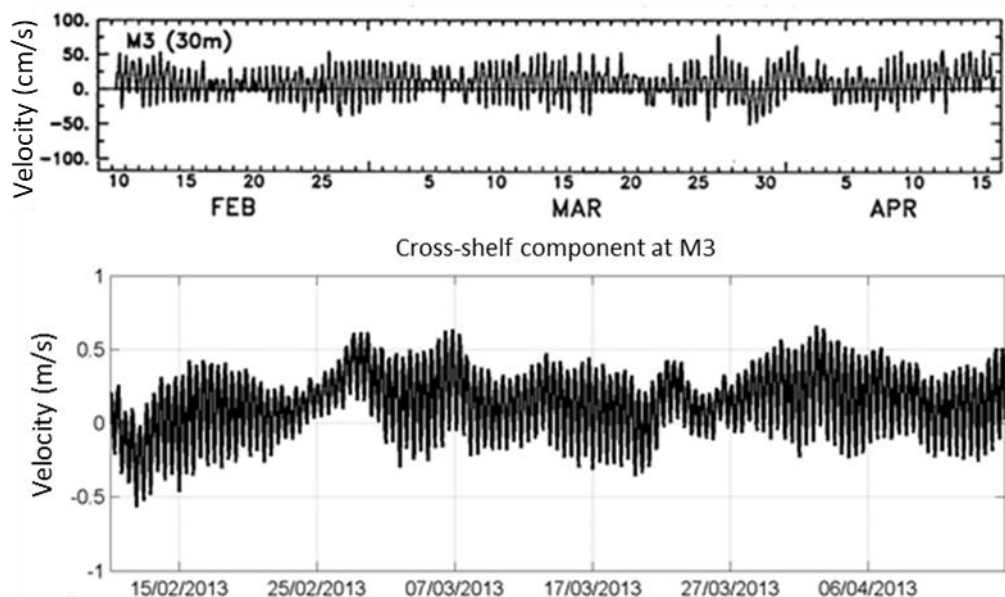


Figura 14: Série temporal da componente de corrente transversal à costa (cm/s) medida no ponto M3 (painel superior) e a obtida pelo modelo no ponto de grade mais próximo (painel inferior).

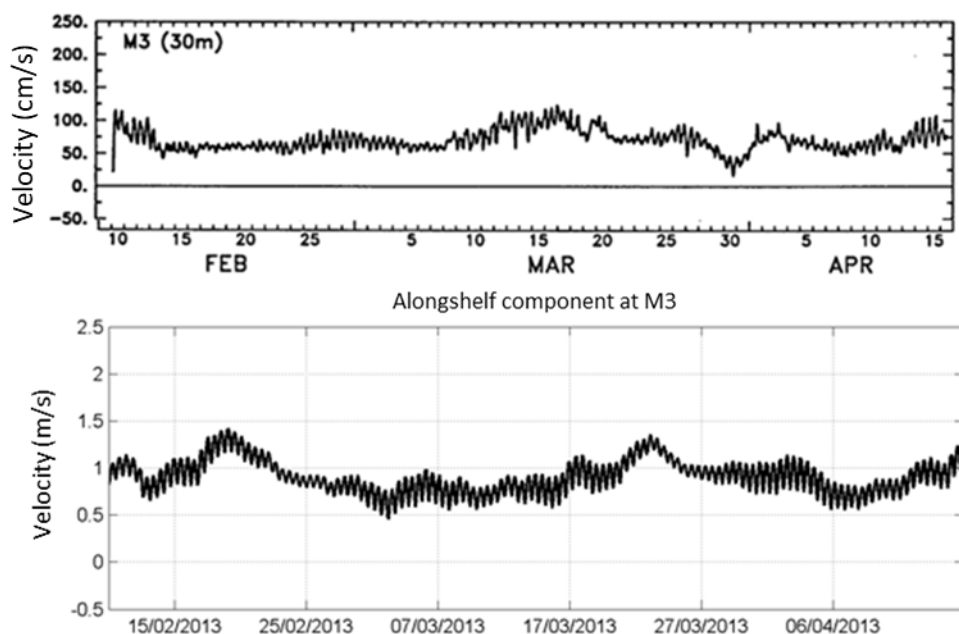


Figura 15: Série temporal da componente de corrente paralela à costa (cm/s) medida no ponto M3 (painel superior) e a obtida pelo modelo no ponto de grade mais próximo (painel inferior).

Na plataforma continental interna (ponto M1), a maré é a força que domina a componente de velocidade transversal à costa, com valores entre 1,5 e 2 m/s durante a maré de sizígia (Figura 10). Na componente de velocidade paralela à costa (Figura 11), embora a influência da maré seja observada, ela é muito menor, com correntes sendo forçadas por outros aspectos da circulação da plataforma como o vento e a influência da Corrente Norte do Brasil (CNB).

No ponto M2 (Figura 12 e Figura 13), há uma diminuição na magnitude da componente da corrente transversal à costa devido à diminuição da influência de maré. A velocidade da corrente de maré na região da plataforma média atinge pouco mais que 0,5 m/s no ponto analisado

No ponto M3 (Figura 14 e Figura 15), próximo à quebra da plataforma, além da redução da importância da maré nas correntes (incluindo a componente transversal à costa), há uma contribuição de oscilações de baixa frequência, associadas à influência da CNB e sua atividade de mesoescala na plataforma continental.

Além da boa representação das correntes de plataforma, processos de meso e larga escala que influenciam diretamente a região dos blocos podem ser observados nos resultados do modelo – como, por exemplo, no campo médio mensal de corrente de setembro (Figura 16). Este campo, junto com os outros 11 apresentados em PROOCEANO (2015), demonstra que a região do bloco é diretamente influenciada pela CNB, que flui para NO ao longo do ano com velocidades entre 1 e 1,5 m/s. Há pouca variabilidade sazonal na direção das correntes na região do bloco, entretanto, como apresentado na literatura, a retroflexão da CNB se torna mais intensa na segunda metade do ano. Vórtices gerados no processo de retroflexão também podem ser observados nos resultados do modelo.



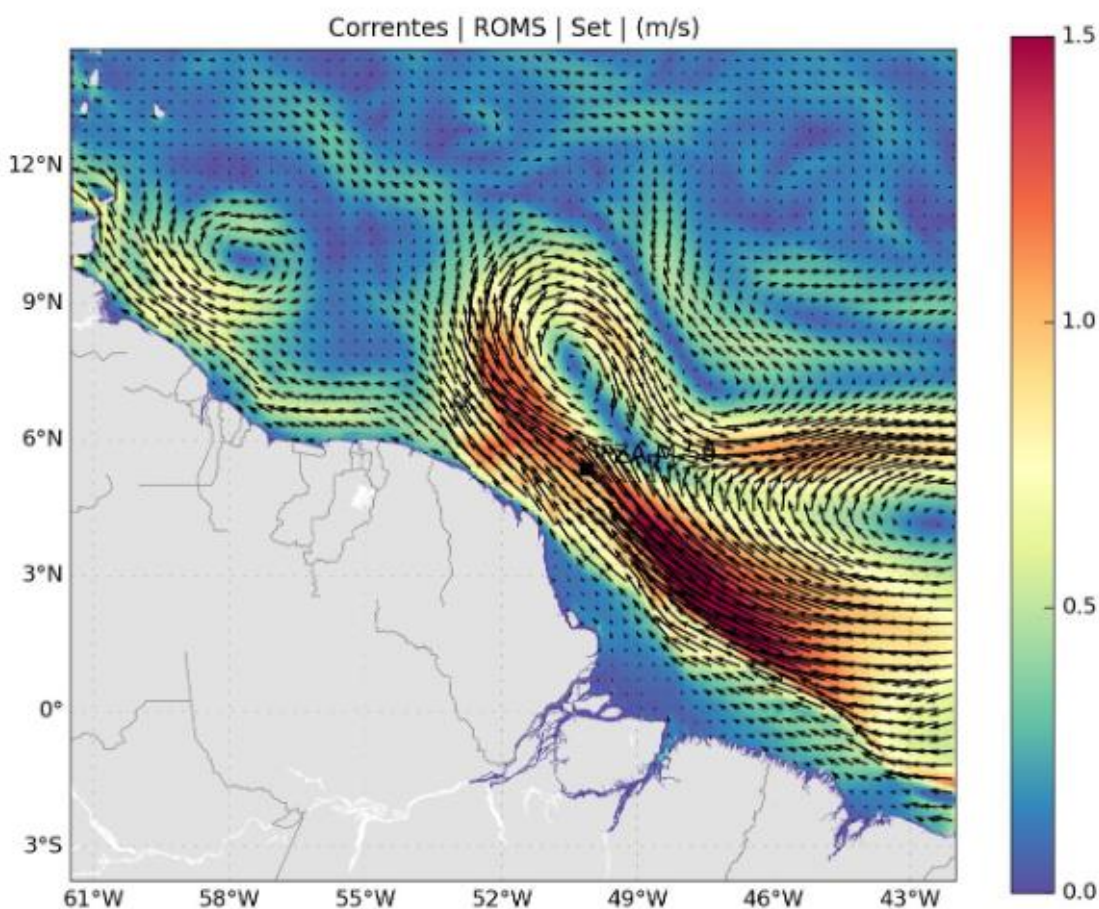


Figura 16: Campo mensal de corrente média para setembro, extraída dos resultados do modelo ROMS. Escala de cor representa a magnitude da corrente, eixo x representa a Longitude e o eixo y representa a Latitude.

## 2.2. Correntes superficiais

A representação adequada das correntes superficiais pode ser considerada o aspecto mais importante para a avaliação da modelagem hidrodinâmica em questão, tendo em vista que a menor densidade do óleo em relação à água fará com que sua deriva ocorra, em sua maior parte, na superfície do mar.

Para comparação das correntes, foram utilizados dados de 428 derivadores do *Global Drifters Program* (GDP) e dos derivadores do tipo SVP do Projeto Costa Norte (PCN). O GDP é uma iniciativa internacional para monitorar correntes marinhas ao longo do globo, de modo a contribuir para a validação dos modelos de circulação global. Já o Projeto Costa Norte (PCN) é um projeto de Pesquisa & Desenvolvimento, coordenado pela Prooceano e financiado com verbas de Participação Especial da Agência Nacional de Petróleo – ANP. O projeto contou com a participação de pesquisadores de universidades e instituições públicas e teve como objetivo principal o desenvolvimento de metodologia para avaliação da vulnerabilidade dos manguezais à vazamentos de óleo ocorridos na região da Margem Equatorial, considerando aspectos de suscetibilidade, sensibilidade e resiliência.

Informações detalhadas podem ser encontradas na página do projeto ([www.projetocostanorte.eco.br](http://www.projetocostanorte.eco.br)). Dentre as atividades realizadas no projeto, ocorreram campanhas mensais de lançamento de três derivadores do tipo SVP na Bacia do Pará-Maranhão, entre fevereiro de 2018 e fevereiro de 2019. Como o período da coleta de dados de corrente superficial no PCN difere do período da simulação hidrodinâmica do presente estudo, foi realizada uma análise estatística, a partir da comparação de mapas médios de corrente nos dois períodos sazonais identificados para a modelagem de dispersão de óleo.

A partir do conjunto de dados dos derivadores SVP do PCN e do GDP foi calculada a corrente média (magnitude e direção) em caixas de 1°, compondo mapas médios da corrente superficial nos dois períodos sazonais identificados neste estudo. Em seguida, foram utilizados os resultados do modelo hidrodinâmico para se obter a corrente média nas mesmas caixas. Os mapas comparativos podem ser vistos nas figuras a seguir para o período de verão (dezembro a junho, Figura 17) e período de inverno (julho a novembro, Figura 18).

É possível observar a capacidade do modelo hidrodinâmico em representar as principais feições médias das correntes superficiais na região de estudo em direção e intensidade – retratadas a partir dos mapas de corrente obtidos com dados coletados *in situ* pelos derivadores utilizados. Nota-se a Corrente Norte do Brasil (CNB) fluindo para NW com intensidade média de até 1,5 m/s em seu núcleo – passando pelo bloco FZA-M-59. Após cruzar a fronteira entre o Brasil e a Guiana-Francesa, nota-se que parte da CNB segue com sentido NW até a região do Caribe, e parte alimenta a retroflexão da CNB, com um giro para E. Como descrito na literatura e evidenciado pelos dados coletados pelos derivadores, a retroflexão da CNB ocorre com maior intensidade no período entre julho e novembro – padrão bem representado nos resultados da modelagem hidrodinâmica.

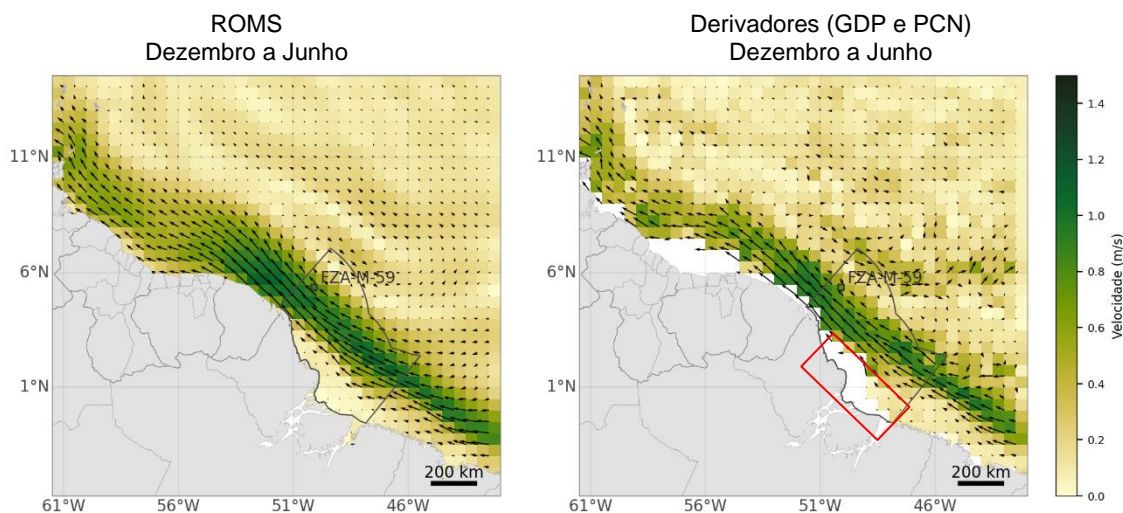


Figura 17: Correntes superficiais médias (caixas de 1°) para o período de verão (dezembro a junho). À esquerda, mapa obtido a partir dos resultados da modelagem hidrodinâmica e a direita, a partir dos dados de derivadores. O retângulo vermelho no painel direito indica a região costeira amazônica onde verifica-se a ausência de passagem de derivadores (áreas brancas).

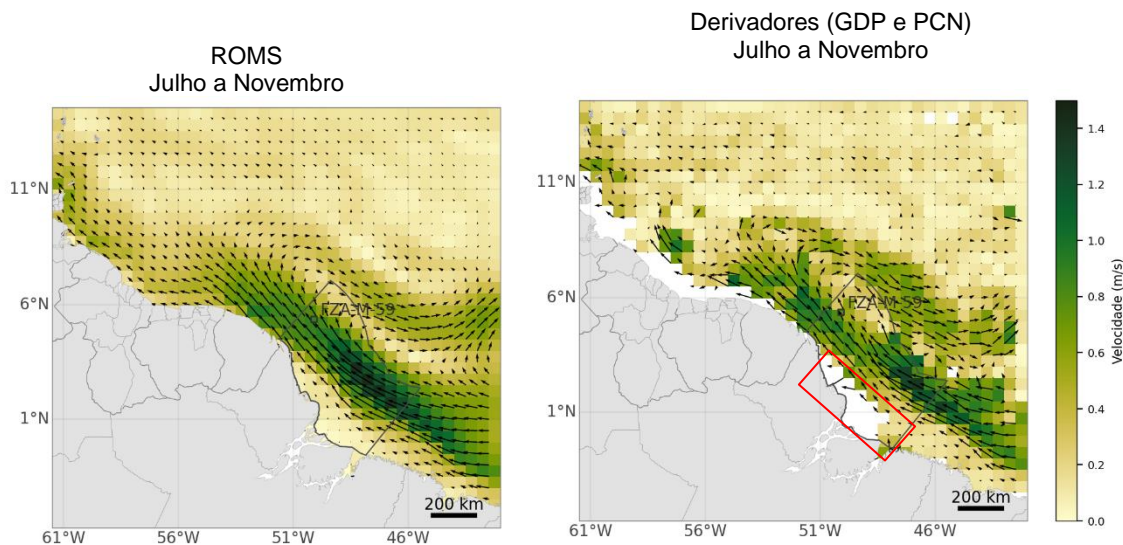


Figura 18: Correntes superficiais médias (caixas de 1°) para o período de inverno (julho a novembro). À esquerda, mapa obtido a partir dos resultados da modelagem hidrodinâmica e a direita, a partir dos dados de derivadores. O retângulo vermelho no painel direito indica a região costeira amazônica onde verifica-se a ausência de passagem de derivadores (áreas brancas).

Um aspecto importante a ser destacado na Figura 17 e na Figura 18 é a ausência de passagem de derivadores na “região branca”, destacada pelos retângulos vermelhos, em função da dinâmica da região costeira amazônica. A oceanografia desta região é dominada pela enorme descarga de cerca de  $1,8 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$  do rio Amazonas (20% da água doce do mundo, HAAS et al, 2002).



### 2.3. Correntes em profundidade

Para avaliar o comportamento das correntes ao longo da coluna d'água e dirimir dúvidas sobre a satisfatória representação destas pela base hidrodinâmica foram utilizados dados de corrente de dois fundeios (Figura 19):

- Fundeio FZA3000: fundeios instalados próximos ao bloco FZA-M-59, em lâmina d'água de 3.000 metros, aproximadamente. Estes fundeios contemplam o período de 1 ano, de 20 de setembro de 2016 a 21 de setembro de 2017 e mediram a corrente a partir de dois equipamentos do tipo ADCP para os primeiros 500 metros e correntômetros para o restante da coluna d'água;
- Fundeio WOCE: obtido pelo Programa *Current Meter Data do World Ocean Circulation Experiment* (WOCE), da *Oregon State University*. A base de dados do WOCE contempla um arranjo de linhas de fundeios na bacia norte do Brasil, o arranjo ACM7, contemplando a região do fluxo principal da CNB. Foram utilizados os fundeios K327 e K339, localizados na latitude 0,087° N e longitude 44,390° W. Destaca-se que estes fundeios foram efetuados em épocas diferentes: K327, de setembro de 1989 a outubro de 1990; K339, de outubro de 1990 a setembro de 1991. Para avaliação da estrutura vertical de correntes, foram retiradas médias de velocidade de corrente nas profundidades nas quais foram realizadas as medições.

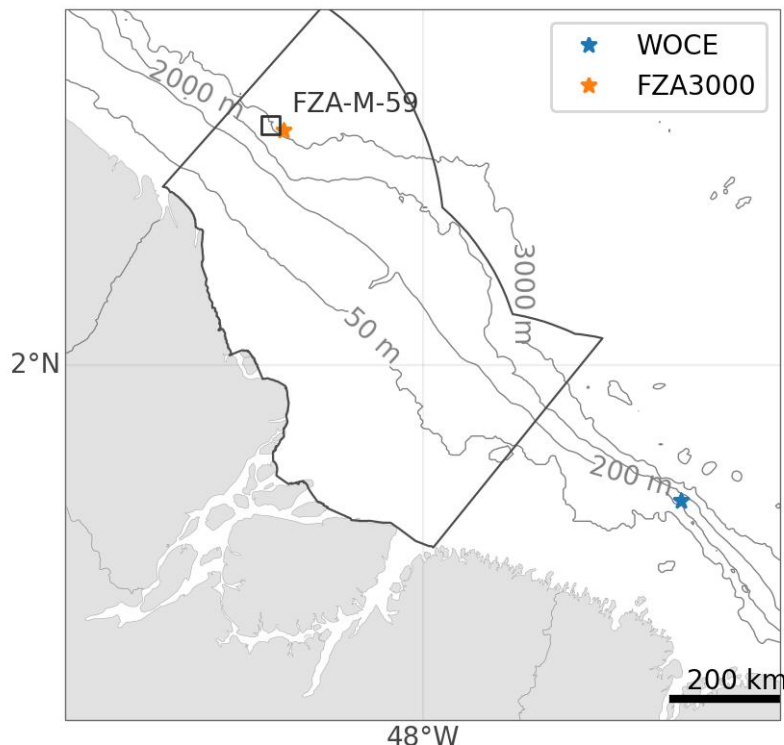


Figura 19: Localização dos fundeios utilizados para comparação. O fundoio do WOCE é representado pela estrela azul enquanto o fundoio FZA3000 é representado pela estrela laranja.

Devido ao fato de que o período de aquisição de dados de corrente dos fundeios utilizados é diferente do período simulado no modelo hidrodinâmico, as comparações realizadas possuem caráter qualitativo. Buscou-se avaliar a representatividade estatística da intensidade e direção das correntes do modelo ao longo da coluna d'água e avaliar padrões mais gerais como, por exemplo, as direções e intensidades médias da corrente, e as profundidades nas quais ocorrem inversões de fluxo.

Desta forma, são apresentados histogramas direcionais (rosas) das correntes observadas nos fundeios e simuladas pelo modelo hidrodinâmico ROMS ao longo da coluna d'água para o fundeio FZA3000 (Figura 20 a Figura 23).

Observa-se um padrão de dois núcleos de corrente com sentido invertido: o primeiro representado pela Corrente Norte do Brasil (CNB), com núcleo em superfície, direção predominante para NW e com intensidade alta (podendo chegar a mais de 1,8 m/s); e o segundo com núcleo em 1.500 metros, direção para SE e intensidade de até 0,5 m/s. A inversão das correntes ocorre gradualmente entre 200 e 1.200 metros, aproximadamente. O modelo hidrodinâmico representa esse padrão satisfatoriamente.

A partir da análise comparativa das rosas de corrente obtidas com os dados do fundeio FZA3000 e com os resultados do modelo hidrodinâmico nota-se que:

- As correntes mais intensas se encontram entre a superfície e 100 metros, com intensidades excedendo 1,6 m/s. O padrão direcional na camada entre 0 e 50 m permanece para o quadrante NW (270-360°) ao longo de todo o período evidenciando a influência da CNB, bem representada pelo modelo;
- Nota-se um padrão de inversão direcional de 200 m a 1.200 m, faixas de profundidade onde é possível observar ocorrência de direções para NW e SE. O modelo hidrodinâmico representa bem essa faixa de inversão das correntes, apesar de apresentar um espalhamento direcional menor;
- A partir de 1278 m, os dados mostram uma maior definição no padrão direcional para SE, com correntes de até 0,4 a 0,6 m/s. Desta camada até o fundo, a corrente permanece para SE com gradual redução em intensidade. Este padrão é bem representado pelo modelo hidrodinâmico, porém com menor espalhamento direcional.

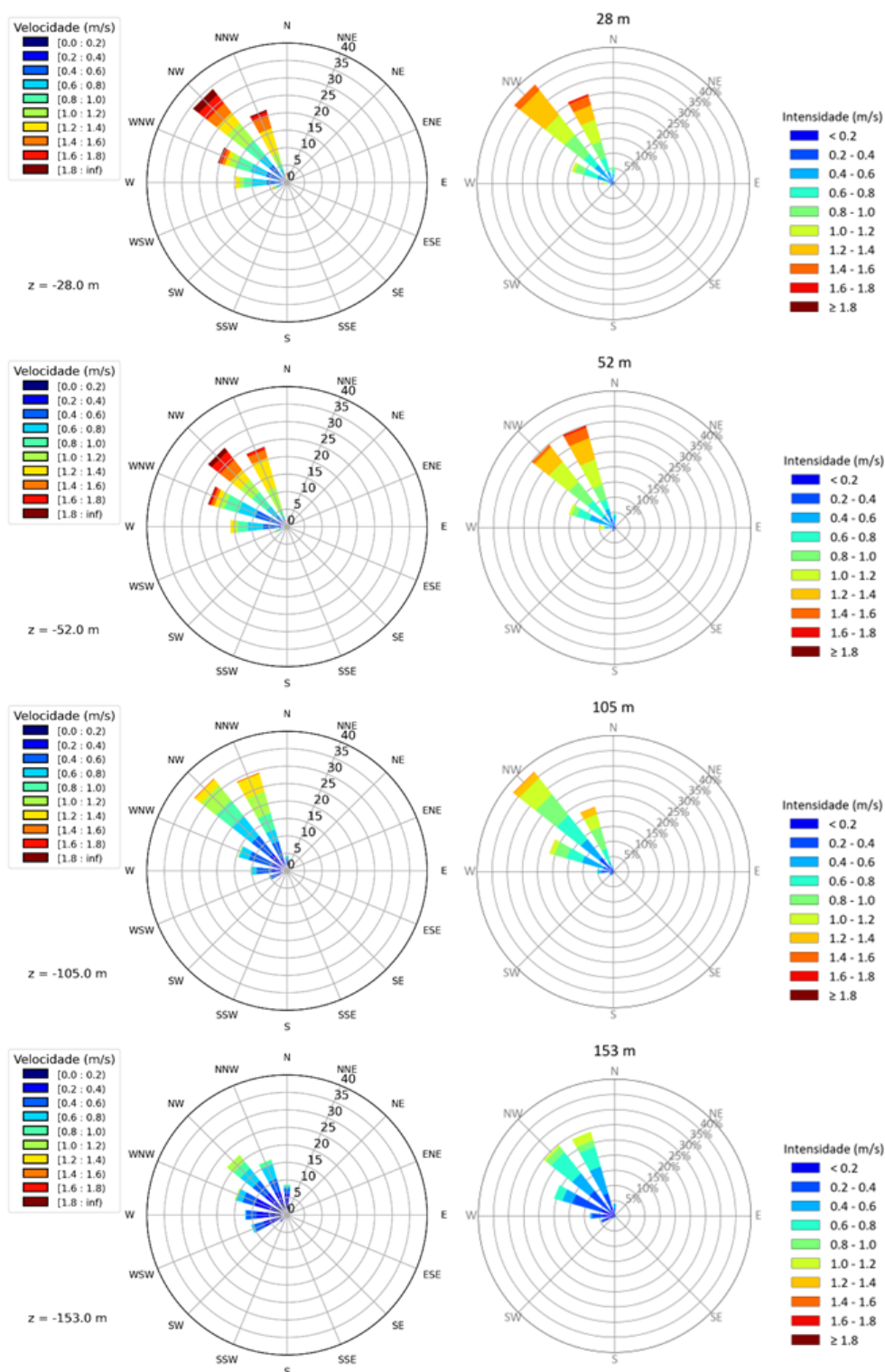


Figura 20: Rosas de corrente nos níveis de 28, 52, 105 e 153 metros obtidas a partir dos dados do fundeio FZA3000 (à esquerda) e dos resultados do modelo hidrodinâmico (ROMS) interpolados para as profundidades do fundeio (à direita).

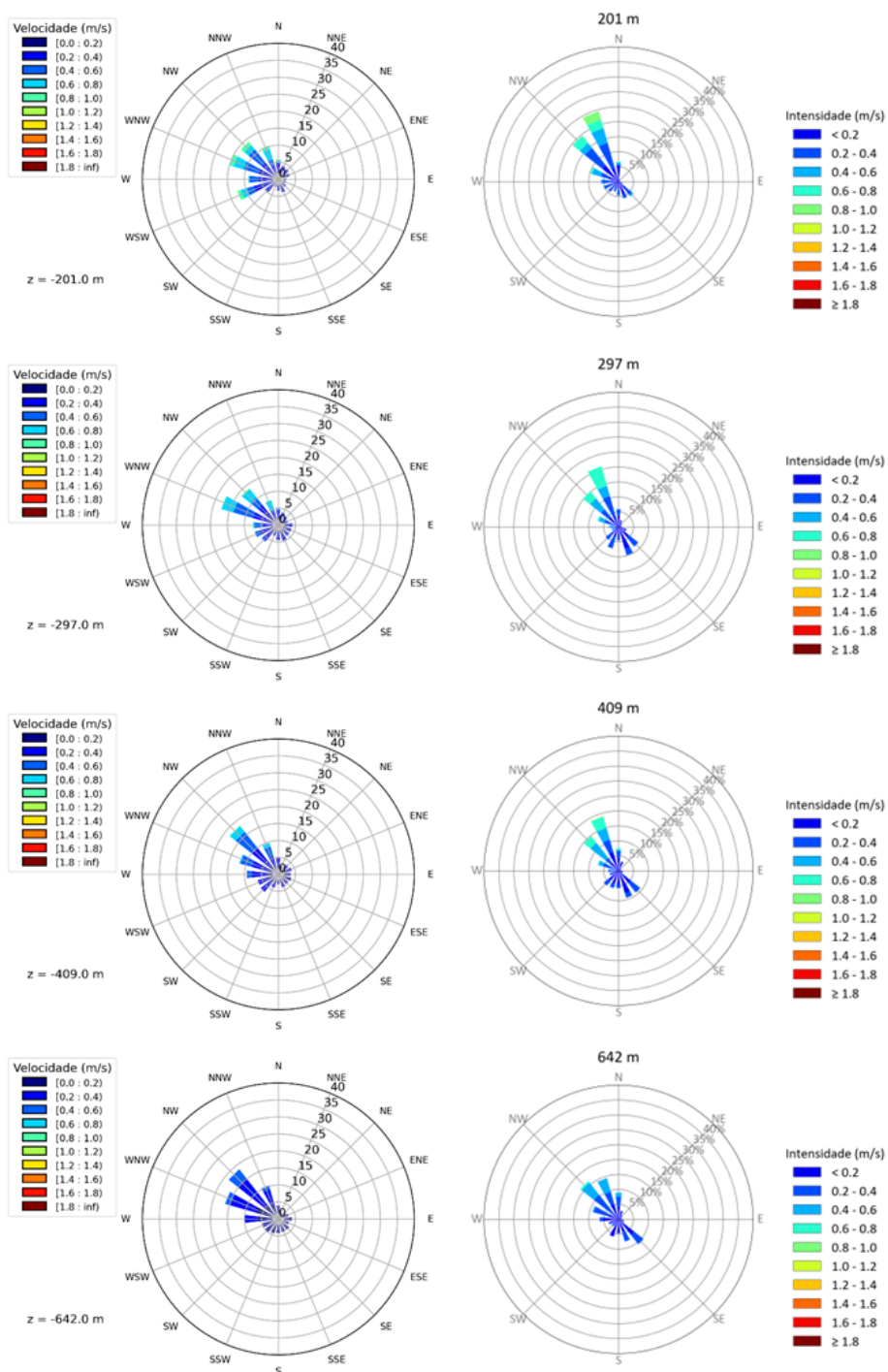


Figura 21: Rosas de corrente nos níveis de 201, 297, 409 e 642 metros obtidas a partir dos dados do fundeio FZA3000 (à esquerda) e dos resultados do modelo hidrodinâmico (ROMS) interpolados para as profundidades do fundeio (à direita).

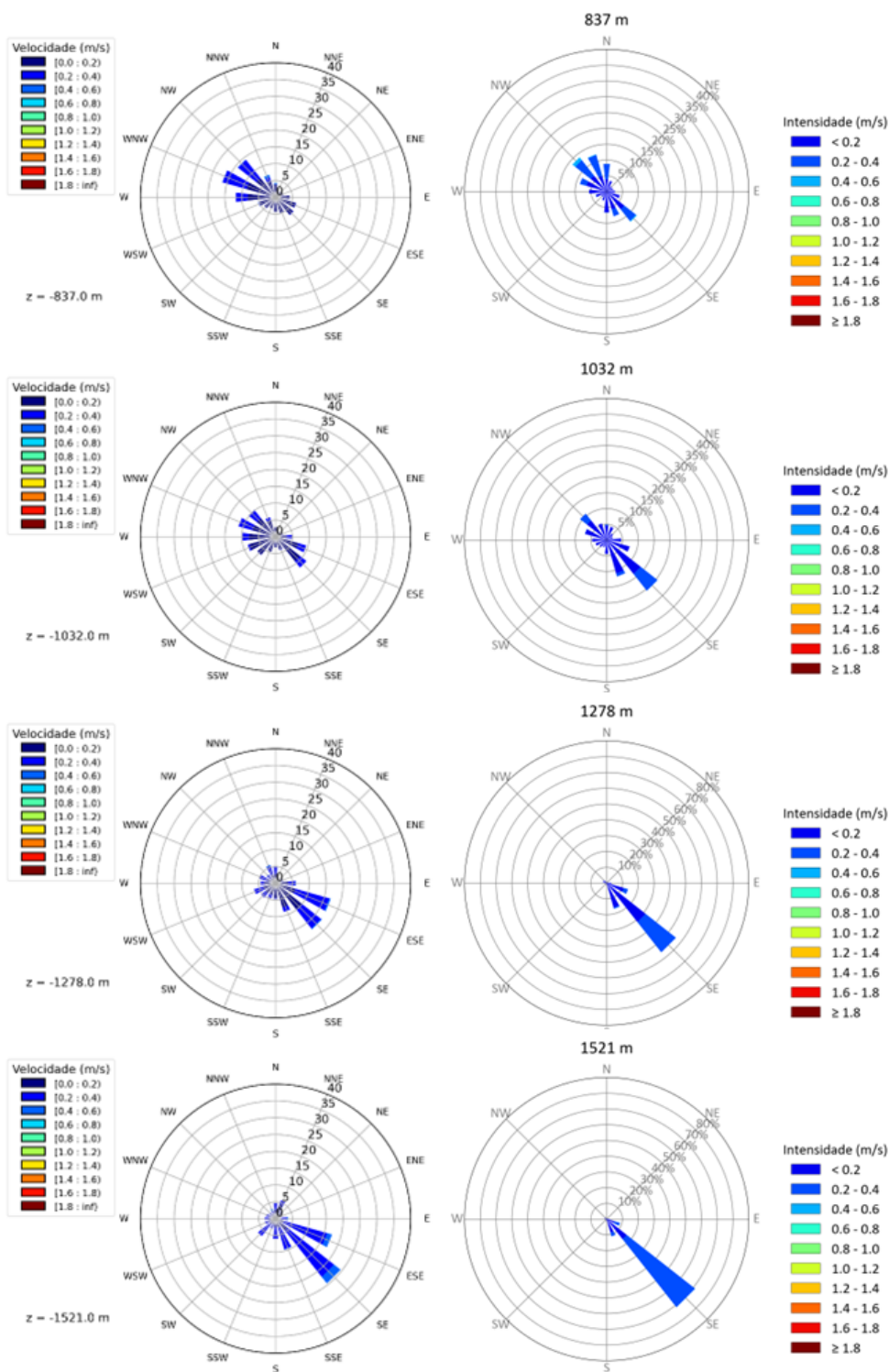


Figura 22: Rosas de corrente nos níveis de 837, 1032, 1278 e 1521 metros obtidas a partir dos dados do fundeio FZA3000 (à esquerda) e dos resultados do modelo hidrodinâmico (ROMS) interpolados para as profundidades do fundeio (à direita). Ressalta-se ao leitor que o eixo percentual das rosas de 1278 e 1521 do modelo hidrodinâmico apresenta-se diferente das demais rosas.

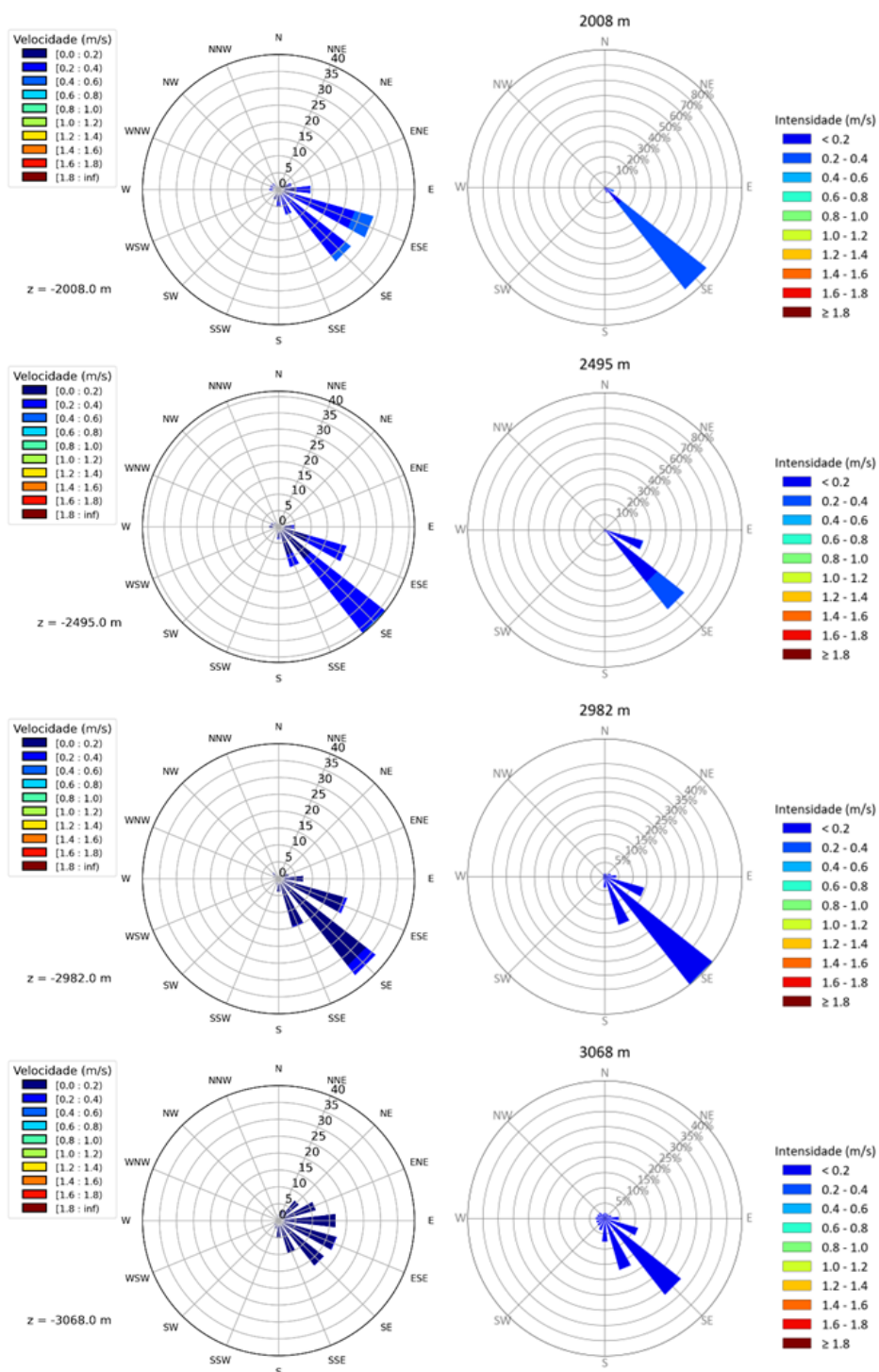


Figura 23: Rosas de corrente nos níveis de 2008, 2495, 2982 e 3068 metros obtidas a partir dos dados do fundeio FZA3000 (à esquerda) e dos resultados do modelo hidrodinâmico (ROMS) interpolados para as profundidades do fundeio (à direita). Ressalta-se ao leitor que o eixo percentual das rosas de 2008 e 2495 do modelo hidrodinâmico apresenta-se diferente das demais rosas.



A seguir apresentam-se gráficos com a estatística básica da velocidade (média, máxima e desvio padrão) ao longo da coluna d'água a partir dos dados do fundeio FZA3000 e dos resultados do modelo hidrodinâmico ROMS (Figura 24). Nota-se a concordância entre o padrão evidenciado pelo fundeio e os resultados do modelo.

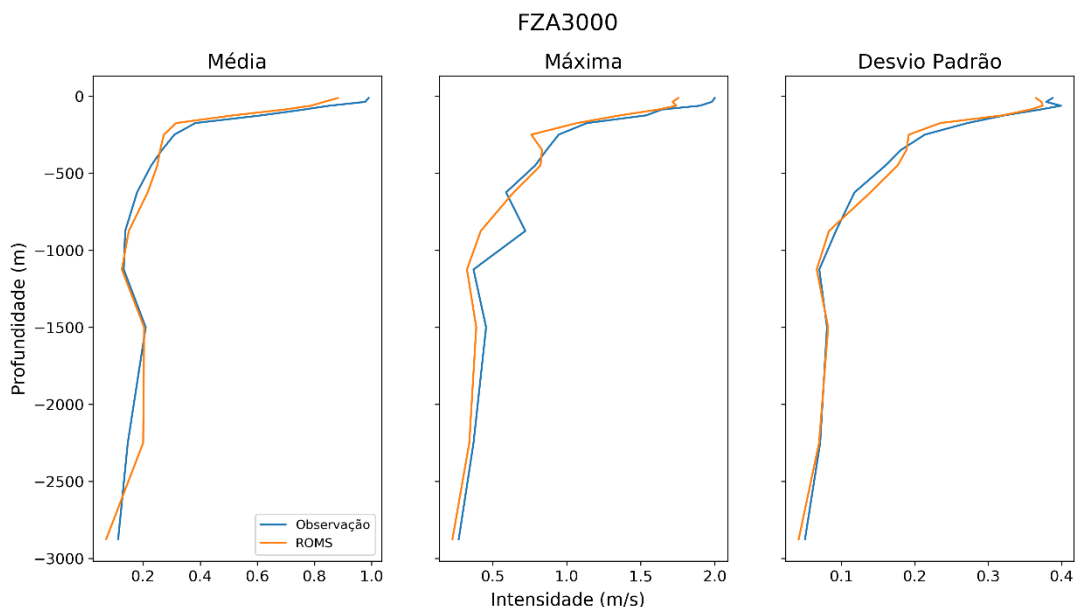


Figura 24: Média, máximo e desvio padrão da intensidade das correntes ao longo da coluna d'água. Em laranja, estatística calculada a partir dos dados observados no fundeio FZA3000 e em azul, a partir dos resultados do modelo hidrodinâmico.

Na Figura 25 são apresentados os perfis verticais médios, retirados dos dados do WOCE e dos resultados do ROMS para o ponto mais próximo aos fundeios WOCE. O perfil vertical médio obtido do ROMS apresenta o mesmo padrão verificado no WOCE: correntes superficiais para WNW, com intensidades médias próximas a 1 m/s. Entre a superfície e 600 m de profundidade há uma diminuição gradativa das intensidades. De 800 a 2000 m de profundidade há uma inversão do fluxo para ESSE, com intensidades médias da ordem de 0,3 m/s.

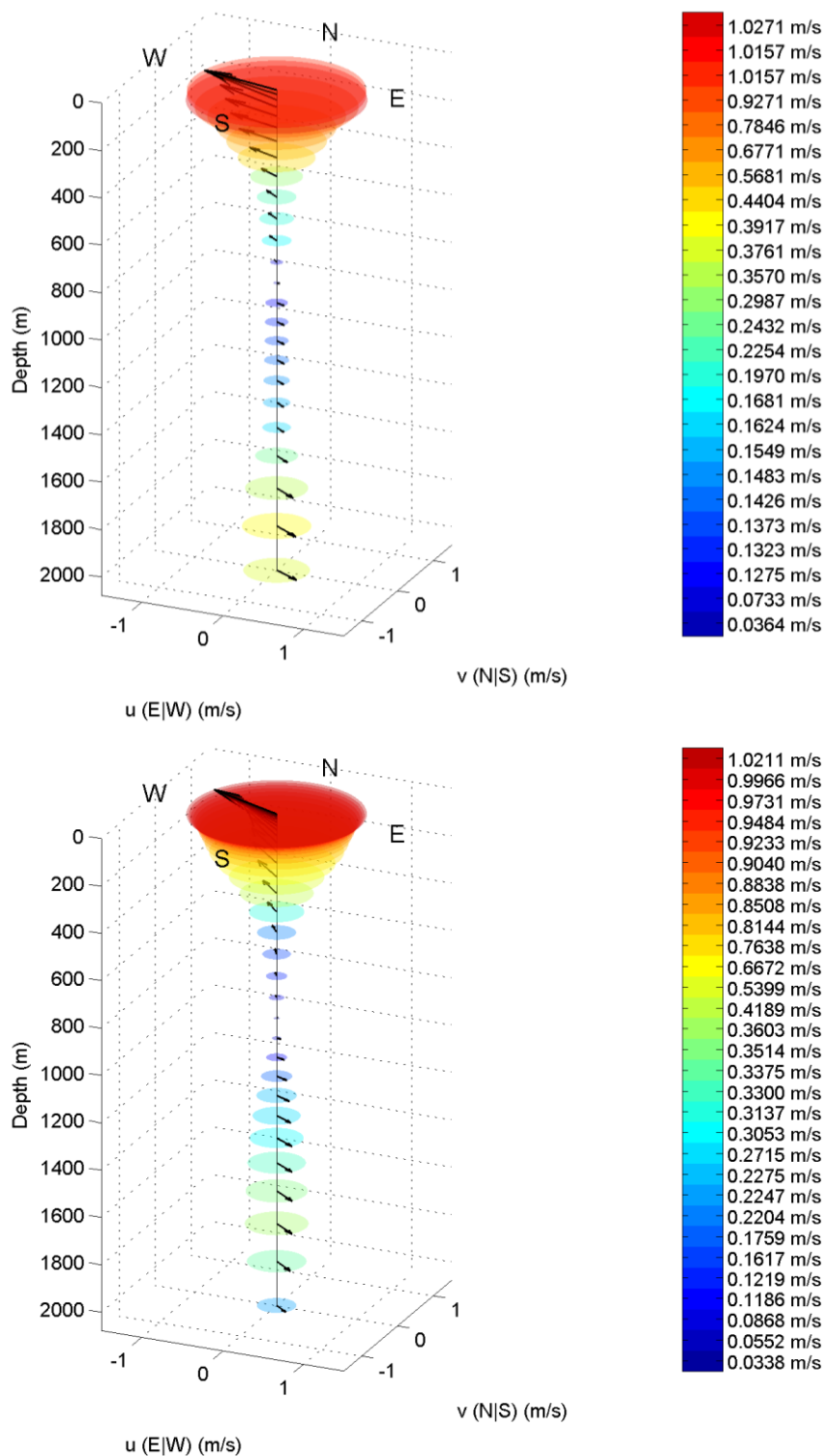


Figura 25: Perfil vertical de correntes retirado do WOCE (acima) e do ROMS (abaixo).



### 3. Sobre a modelagem de dispersão de óleo

O ponto de vazamento de óleo representativo para o bloco FZA-M-59 localiza-se a uma distância de 159 km da costa e 62 km da fronteira do mar territorial do Brasil com o mar territorial da Guiana Francesa, em região de águas ultra-profundas e sob a influência da Corrente Norte do Brasil (CNB). A CNB é uma corrente muito intensa e que apresenta baixa variabilidade direcional ao longo do ano. Esta característica faz com que ela represente uma barreira dinâmica natural, não só à deriva de óleo como a qualquer fluxo transversal a ela.

O estudo de modelagem de dispersão de óleo apresentado em 2015 considerou toda estrutura tridimensional das correntes. O mapeamento da presença de óleo é feito na superfície, ao longo de toda a coluna d'água e no fundo oceânico. Há, no entanto, uma tendência de maior concentração do óleo nas camadas mais superficiais. Nos casos de vazamento de pequeno porte ( $8\text{m}^3$ ) e médio porte ( $200\text{m}^3$ ), é prática corrente nos processos de licenciamento do IBAMA considerar o derrame do óleo na superfície da água. Por esse motivo, todo o óleo vazado se concentra nas camadas mais superficiais e fica todo o tempo sob à influência da Corrente Norte do Brasil (CNB) e seus meandramentos. No caso do vazamento de pior caso, considera-se um *blowout* com perda do controle do poço e vazamento ocorrendo a partir do fundo oceânico em região de aproximadamente 2.500 m. Neste caso, o modelo OSCAR calcula a trajetória do óleo desde o fundo até as camadas mais superficiais, considerando a influência das correntes em profundidade, ao longo de toda a coluna d'água. Devido a diferença de densidade do óleo em relação à água do mar, ocorre uma rápida ascensão do óleo, que chega às camadas superficiais em poucas horas. Assim, a influência das correntes em profundidade é passageira, pois o óleo não permanece nestas camadas por tempo suficiente para gerar transporte significativo para Sudeste. Como mostrado no estudo, mesmo no caso do vazamento de pior caso proveniente do fundo oceânico, a maior parte de massa de óleo fica concentrada na superfície e em profundidade de até 100 m. O deslocamento horizontal da massa de óleo nas camadas mais profundas também ocorre. No entanto, em profundidades superiores à 500 m, concentrações superiores ao limiar de detecção utilizado (20 ppb) apenas são observados, no máximo, a cerca de 50 Km do ponto de origem. As figuras 113, 114, 123 e 124 do relatório de 2015 ilustram essa constatação. Nas camadas mais superficiais, que estão sob a influência da CNB, é onde ocorre a maior parte da trajetória horizontal do óleo, que pode atingir várias centenas de quilômetros.

A Figura 26, apresentada no relatório de modelagem de dispersão de óleo de 2015 e que mostra as trajetórias dos derivadores do GDP (84 derivadores), a partir da vizinhança do ponto de vazamento, exemplifica a barreira dinâmica descrita pela ausência de derivadores na região costeira amazônica.

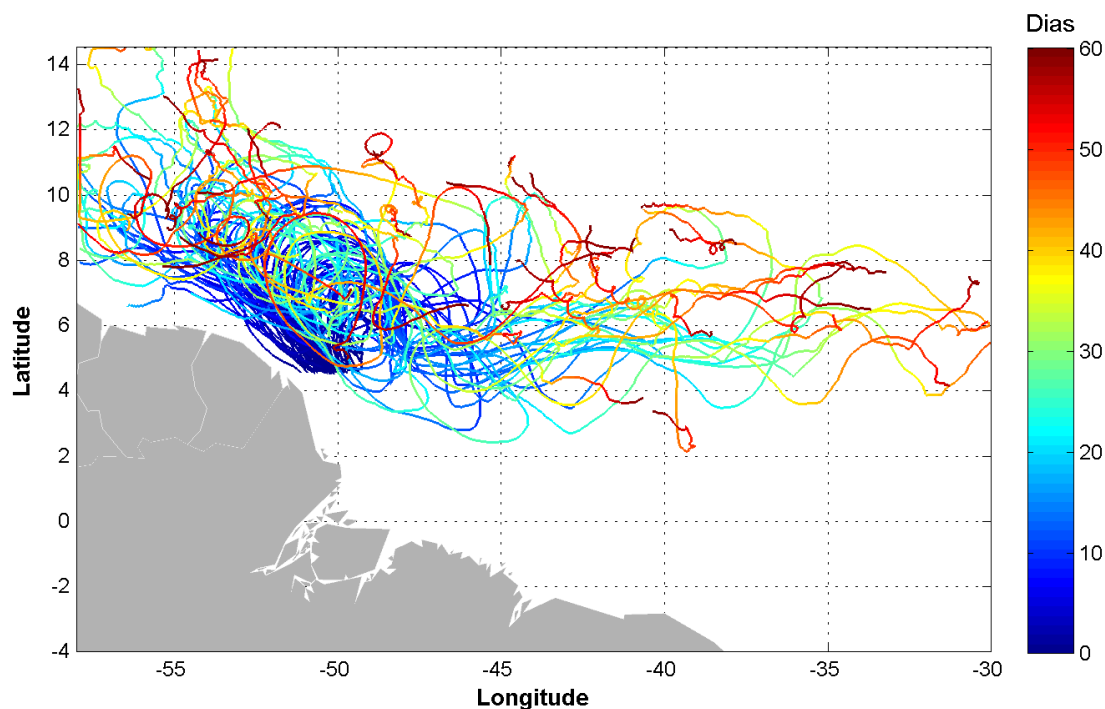


Figura 26 - Trajetórias dos derivadores do GDP (84 derivadores) a partir da vizinhança do ponto de vazamento. A escala de cor está relacionada à duração da trajetória

Os mapas de probabilidade apresentados no estudo de 2015 refletem os padrões das correntes e dos ventos, considerando o ponto de vazamento e o intemperismo do óleo. Os ventos predominantes de Leste e Nordeste (alísios), no entanto, são insuficientes para romper a barreira dinâmica da CNB e, portanto, para impor uma deriva em direção à costa.

Desta forma, a maior parte do óleo é advectada para noroeste, e uma parcela entra na retroflexão da CNB sendo advectada para leste pela Contra Corrente Norte Equatorial.

A seguir, para reforçar a validade dos resultados dos modelos, é apresentada uma análise conjunta das campanhas de monitoramento da deriva oceânica de superfície realizada no contexto do Projeto Costa Norte e dos resultados da modelagem de óleo apresentados no presente estudo.

No contexto deste projeto, campanhas de aquisição de dados oceanográficos foram realizadas ao longo de um ano. Na Plataforma Continental Amazônica (PCA) a aquisição ocorreu por meio dos lançamentos de derivadores de superfície ao longo de doze campanhas oceanográficas em seis pontos, sendo três localizados na Bacia Pará-Maranhão e os outros três na Bacia Foz do Amazonas. As informações dos derivadores lançados a partir do ponto DF6 foram as consideradas nesta análise comparativa por estar localizado na região do ponto de vazamento da modelagem de óleo (Figura 27).

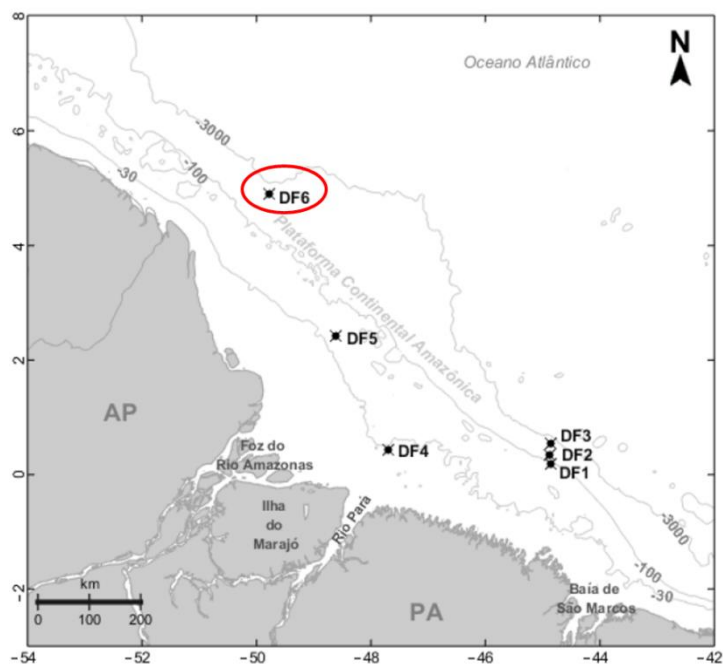


Figura 27: Representação dos pontos de lançamento de derivadores na Plataforma Costeira Amazônica do Projeto Costa Norte. Em destaque, em vermelho, o ponto DF6, considerado para a presente análise comparativa com os resultados da modelagem de óleo. Fonte: Adaptado de ROLLNIC *et al*, 2020.

A partir do ponto DF6, localizado na coordenada 4° 53,96' N e 49° 46,45' W, em frente ao estado do Amapá, na isóbata de ~2500 m, foram lançados derivadores do modelo NOMAD *Offshore* (Figura 28).

Este derivador de superfície é fabricado pela empresa SouthTek, desenvolvido para representar correntes de superfície com influência do regime de ventos. Ele apresenta seu sistema de comunicação por telemetria de satélites Iridium e posicionamento por *Global Position System* (GPS), e a frequência de transmissão de dados utilizada foi de 30 minutos. Este equipamento possui formato cilíndrico submerso, com 72 cm de comprimento total e massa de aproximadamente 3,0 kg. Ele não apresenta qualquer tipo de vela, e por estar diretamente exposto ao atrito do vento na superfície do oceano, este equipamento também sofre forte influência das ondas de gravidade superficiais e podem ser utilizados na comparação da trajetória de óleo em superfície.



Figura 28: Imagens do modelo de derivador superficial (NOMAD) lançado e considerado na análise comparativa. A direita o equipamento na água após o lançamento. Fonte: ROLLNIC *et al*, 2020.

O principal objetivo desta comparação é avaliar o comportamento dos resultados da modelagem com as trajetórias dos derivadores e, consequentemente, a avaliação do risco de chegada de óleo, sobretudo na costa brasileira.

As campanhas de lançamento no ponto DF6 ocorreram de março de 2018 a dezembro de 2018. Ao todo, trajetórias de 8 derivadores foram avaliadas e comparadas com os resultados da modelagem de dispersão de óleo (Figura 29).

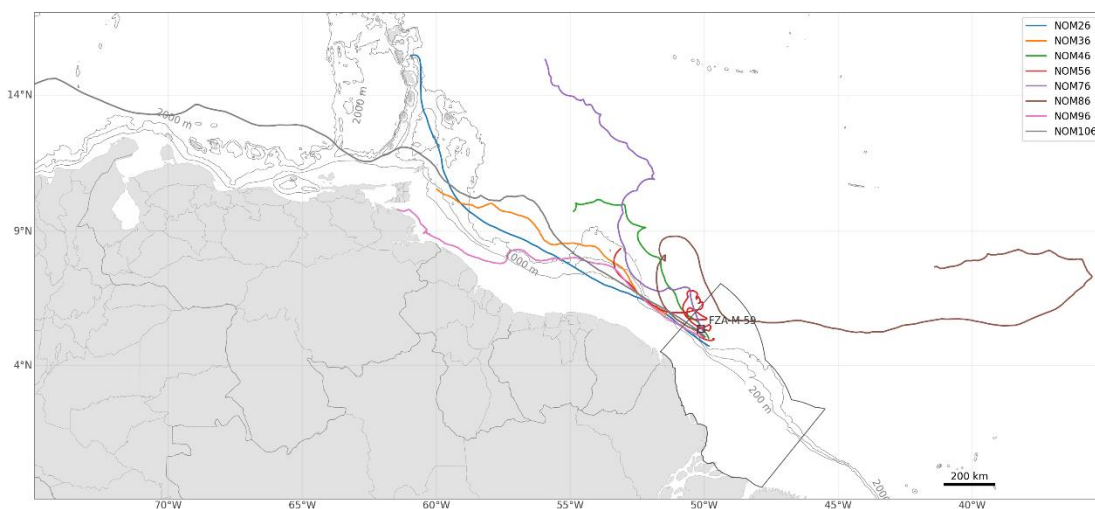


Figura 29: Mapa com as trajetórias de todos os derivadores lançados no ponto DF6.

Para as análises e comparações, a área considerada da trajetória dos derivadores será limitada à área da grade da modelagem de óleo, considerando a separação sazonal adotada: verão, compreendendo os meses de dezembro a junho, e inverno, os meses de julho a novembro.

Na Tabela 1 são apresentadas as informações referentes ao lançamento de cada derivador analisado. Nesta tabela, a data final é referente ao período no qual os dados foram analisados.

Quatro derivadores foram analisados representando o período de verão e outros quatro representando o período de inverno. A separação dos derivadores ocorreu com base na data de lançamento do derivador, exceto pelo NOM96 que foi avaliado dentro do verão por iniciar próximo a transição dos períodos e ter maior tempo de trajetória neste período específico.

Tabela 2: Informações sobre o lançamento dos derivadores analisados.

Período	Derivador	Data Inicial	Data Final	Dias ativos considerados	Distância Alcançada (km)
Verão	NOM26	17/03/2018 11:50	04/04/2018 21:50	18	1610
	NOM36	20/04/2018 20:30	13/05/2018 10:00	23	1093
	NOM96	23/11/2018 10:00	25/12/2018 13:30	32	1387
	NOM106	12/12/2018 02:30	12/01/2019 12:30	31	1501
Inverno	NOM46	28/06/2018 00:00	19/07/2018 10:30	21	774
	NOM56	02/08/2018 11:00	31/08/2018 03:00	28	533
	NOM76	26/09/2018 20:30	04/11/2018 11:30	38	1230
	NOM86	20/10/2018 23:00	14/11/2018 06:00	24	863

Sobrepostas aos resultados de probabilidade em superfície são apresentadas, juntas, as trajetórias dos quatro derivadores representativos de cada período sazonal (Figura 30 e Figura 31).

De maneira geral, o intenso fluxo noroeste da CNB e a atividade de meso escala associada (retroflexão e vórtices da CNB) geram, respectivamente, uma barreira natural à fluxos transversais já mencionada anteriormente, e uma grande dispersão espacial dos derivadores (equivalente à deriva do óleo na superfície do mar), que ocorre preferencialmente a noroeste do ponto de vazamento.

No período de verão, os quatro derivadores apresentaram suas trajetórias para noroeste em direção ao mar do Caribe, seguindo o fluxo principal da CNB. Todas as trajetórias estiveram dentro da área de probabilidade de chegada de óleo, passando inclusive pela área de maior probabilidade (entre 80% e 100%). Apenas o derivador NOM96, que a partir de uma distância maior que 1.000 km do ponto de lançamento e após 20 dias de trajetória, apresentou parte da deriva para oeste em direção à costa.

Em relação aos derivadores no período de inverno, todas as trajetórias também estiveram dentro da área de probabilidade de chegada de óleo mapeada pela modelagem, passando inclusive pela área de maior probabilidade (entre 80% e 100%). A retroflexão da CNB - mais evidente neste período e bem demarcada nos resultados de modelagem - é evidenciada pela trajetória dos derivadores,

sendo estas mais afastadas da costa e com mudança de direções. A trajetória do NOM86 é a mais representativa da influência da retroflexão dentre os derivadores analisados.

Deve ser ressaltado que embora em algum momento as trajetórias dos oito derivadores analisados tenham chegado a áreas com probabilidade de presença de óleo inferior a 5%, as manchas de óleo têm menor probabilidade de chegar nestes pontos devido às perdas por intemperismo (evaporação, entranhamento na coluna etc.), processos que não são observados nos derivadores (inerte no ambiente).

Em que pesem as diferenças entre o comportamento dos derivadores do tipo NOMAD e do óleo, onde estes apresentam/utilizam coeficientes de arrasto pelo vento diferentes (ROLLNIC *et al*, 2020), as comparações indicam uma boa correlação com os resultados de probabilidades de presença de óleo do modelo. A análise conjunta das campanhas permite observar parte da variabilidade possível que uma mancha de óleo pode apresentar dentro de um mesmo período sazonal, além de demonstrar a variabilidade espaço-temporal dos processos hidrodinâmicos em regiões além da Plataforma Continental Amazônica, indicando uma grande influência do padrão médio da CNB no verão e da retroflexão desta corrente no inverno.

O lançamento de derivadores nos permite avaliar e estimar a deriva do óleo em determinadas condições ambientais, e ao mesmo tempo avaliar os resultados das modelagens de deriva do óleo. A utilização conjugada dessas ferramentas auxilia a tomada de decisão em situações emergenciais, sendo um bom indicativo das características (direções preferenciais e tempo de deslocamento do óleo) da dispersão de poluentes no ambiente marinho.

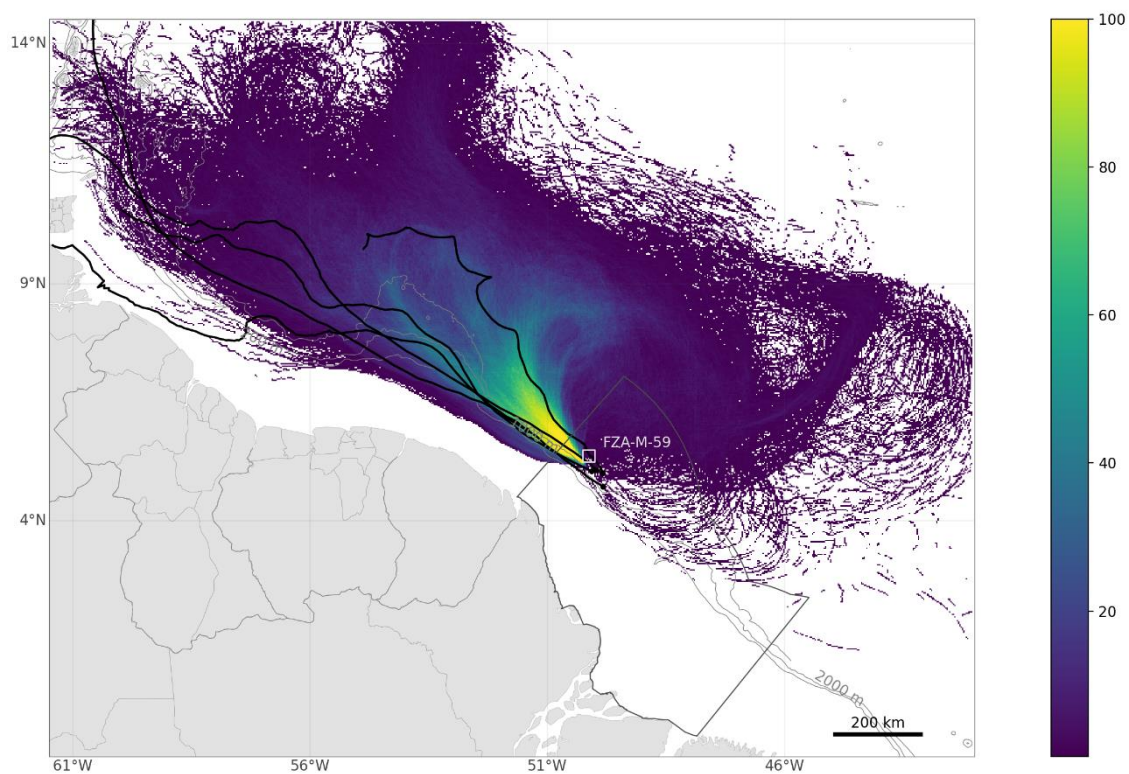


Figura 30: Trajetória dos derivadores lançados no período de verão sobrepostas ao campo de probabilidade de presença de óleo (em %) em superfície para o período de verão.



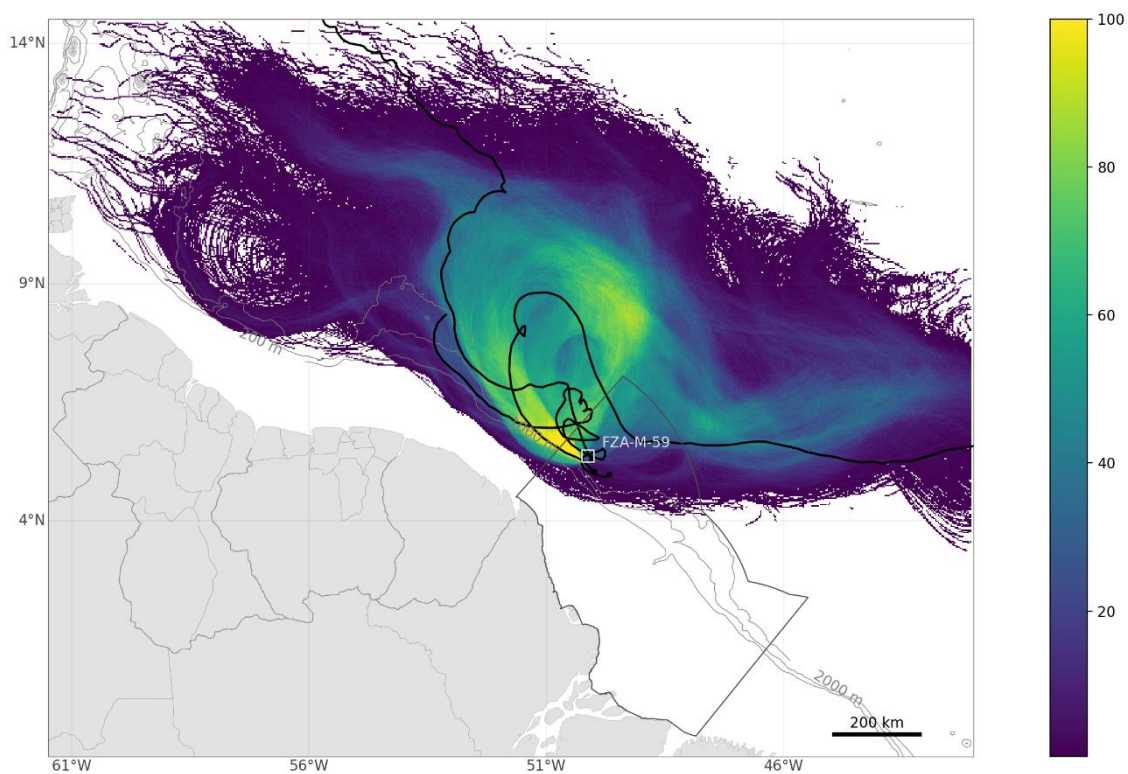


Figura 31: Trajetória dos derivadores lançados no período de inverno sobrepostas ao campo de probabilidade de presença de óleo em superfície (em %) para o período de inverno.



## 4. Considerações finais

Com base nos elementos apresentados no relatório original e neste documento de resposta ao Parecer Técnico nº 222/2022, a Prooceano entende que o relatório de modelagem de dispersão de óleo de 2015 ainda atende plenamente ao uso a que se propôs.

Tendo em vista as principais preocupações acerca das bases hidrodinâmicas utilizadas em processos de licenciamento ambiental, enunciadas no parecer técnico e resumidas em tópicos a seguir, gostaríamos de destacar, objetivamente, que:

- Representação da complexidade hidrodinâmica costeira na região da foz do Amazonas.
  - **A complexidade hidrodinâmica costeira na região da foz do Amazonas** poderia ser mais bem representada através de uma modelagem hidrodinâmica de mais alta resolução, como por exemplo, nos trabalhos de Molinas (2014) e Molinas *et al.* (2014) e nos modelos hidrodinâmicos de alta resolução do projeto Costa Norte (TOSTE *et al.*, 2020). **Porém, face a localização do empreendimento e a barreira natural que o fluxo da CNB impõe à deriva do óleo, quaisquer refinamentos da região costeira amazônica seriam irrelevantes aos resultados apresentados.**
  - **O refinamento de modelagem hidrodinâmica em regiões costeiras e estuarinas** no âmbito do licenciamento ambiental de atividade de O&G é prática corrente referenciada nos **termos de referência do IBAMA**, que solicita modelagens de alta resolução, com detalhamento das regiões estuarinas que possam ser atingidas **com tempos de toque inferiores a 60 horas e/ou probabilidades superiores a 70%**. Tais condições não se aplicam ao caso em questão.
- Representação da hidrodinâmica em toda a coluna d'água, incluindo atenção à Subcorrente Norte do Brasil.
  - **O sistema de correntes ao longo de toda a coluna d'água na região do bloco FZA-M-59 é bem representado pelo modelo hidrodinâmico utilizado**, tanto em intensidade quanto em padrões direcionais. Este fato é evidenciado por comparação com dados amostrados em fundeio próximo ao bloco FZA-M-59 ao longo de toda a coluna d'água.
  - **No cenário de blowout de fundo, o óleo vazado emerge às camadas superficiais devido a diferença de densidade em relação à água do mar.** Como evidenciado no estudo original (PROOCEANO, 2015), em sua trajetória ascendente, **a influência das correntes em profundidade na trajetória do óleo é bem representada.** Contudo, essa influência é passageira e o óleo não permanece nestas camadas por tempo suficiente para gerar transporte significativo para Sudeste.
- Representação do transporte transfronteiriço do óleo, incluindo as Bahamas.

- **O domínio do modelo hidrodinâmico e de dispersão de óleo abrange satisfatoriamente a área com probabilidade de presença de óleo em superfície e na coluna d'água.** As poucas áreas que extravasam o domínio apresentam probabilidades de presença de óleo menores que 5%.
- Embora o domínio de modelagem utilizado não englobe as Bahamas, podemos dizer de maneira conservadora, que as probabilidades de toque neste arquipélago são muito baixas (da ordem de 1%) e com tempos de toque superiores a 60 dias após o início do vazamento. Isto porque, o estudo indicou probabilidades de toque inferiores à 1,3 % e tempos de toque da ordem de 60 dias em alguns países localizados várias centenas de quilômetros à leste das Bahamas. Uma extensão do domínio de modelagem com refinamentos e inclusão das ilhas do oceânico atlântico norte para abranger a região das Bahamas não alteraria esta conclusão.

Ainda que se pese o fato de que passados sete anos da elaboração do estudo avaliado pelo Parecer Técnico nº 222/2022, ele já não represente o “estado da arte” em termos de versões dos modelos utilizados e do conhecimento relativo ao ambiente natural e que, dúvidas da sociedade devem ser esclarecidas, a Prooceano entende que o relatório de modelagem de dispersão de óleo de 2015 ainda atende ao uso a que se propôs

Em função da experiência acumulada em 18 anos de atuação em estudos semelhantes, ao longo da costa brasileira e no exterior, e conscientes da complexidade e importância do tema, nos colocamos à disposição para aprofundar quaisquer dúvidas que porventura permaneçam relativas à argumentação apresentada e às técnicas de modelagem utilizadas pela empresa.

## 5. Bibliografia

- ALESSI, C.A., LENTZ, S.J., BEARDSLEY, R.C., CASTRO, B.M. e GEYER, W.R., 1992, “A multidisciplinary Amazon Shelf SEDiment Study (AmasSeds): physical oceanography moored array component”, WHOI Technical Reports, Physical Oceanography, WHOI-92-36.
- HAAS, H., WEERING, T. C.E. van, STIGTER H., 2002. Organic carbon in shelf seas: sinks or sources, processes and products. *Continental Shelf Research* 22 (2002) 691–717.
- MOLINAS, E. 2014. Dinâmica da Frente Salina e Residuais de Velocidade na Plataforma Continental Interna Amazônica. Dissertação de Mestrado – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2014. 107 p.
- MOLINAS, E. VINZON, S. B., VILELA, C. P. X., GALLO, M. N. 2014. Structure and position of the bottom salinity front in the Amazon Estuary. *Ocean Dynamics* 64: 1583-1599. doi 10.1007/s10236-014-0763-0.
- PROOCEANO, 2015. Modelagem Hidrodinâmica e Dispersão de Óleo. Bloco FZA-M-59.
- ROLLNIC, M., MONTEIRO, S.M., ROSÁRIO, R.P., COSTA, M.S., PRESTES, Y.O., SILVA, I.O., AQUINO, R.F.O., CARNEIRO, A.G., MASCARENHAS, A.C.C., SANTANA, L.S. “Aquisição de Dados Oceanográficos”, Capítulo 4. Em: Projeto Costa Norte, – Desenvolvimento de Metodologias para o entendimento de processos costeiros e estuarinos e da vulnerabilidade de florestas de mangue na Margem Equatorial Brasileira. v.2. Rio de Janeiro (BR), 2020.
- TOSTE, R., BÖCK, C.S., NEHME, D.M., SOARES, A.E., SANCHO, L., ASSAD., L.P.F., LANDAU, L., BORBA, T.A.C., PEREIRA, D.R., ROLLNIC, M. “Modelagem Hidrodinâmica”, Capítulo 7. Em: Projeto Costa Norte – Desenvolvimento de Metodologias para o entendimento de processos costeiros e estuarinos e da vulnerabilidade de florestas de mangue na Margem Equatorial Brasileira. v.2. Rio de Janeiro (BR), 2020.
- VINZON, S. e MEHTA, A., 2001, Boundary layer effects due to suspended sediment in the Amazon River estuary, In: *Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes*, Marine Science Series (3), Elsevier, pp. 359-372.