

DOUGLAS MARCHIONI PASCHOALETI

**Modelagem numérica hidrodinâmica para apoio a operações portuárias: estudo de caso
da Baía de São Marcos (MA)**

São Paulo

2023

DOUGLAS MARCHIONI PASCHOALETI

Modelagem numérica hidrodinâmica para apoio a operações portuárias: estudo de caso da Baía de São Marcos (MA)

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Física.

Orientador: Prof. Dr. Joseph Harari

São Paulo

2023

Paschoaleti, D. M. **Modelagem numérica hidrodinâmica para apoio a operações portuárias**: estudo de caso da Baía de São Marcos (MA). Dissertação (Mestrado) apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Física.

Aprovado em: ___/___/____.

Versão Corrigida

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Dedico este estudo a duas pessoas formidáveis, as quais fizeram parte da trajetória percorrida neste trabalho: Maria José de Arruda Campos Rocha Passos e Tiago Cortez. Por vocês minha eterna gratidão.

AGRADECIMENTOS

Primeiro aos meus pais, sem vocês não teria ninguém mais para agradecer, pois não teria sido possível fazê-lo sem este apoio. Muito obrigado, vocês são a minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Joseph Harari pelos ensinamentos, conselhos e recursos dados a mim durante todos esses anos no laboratório.

Ao técnico do laboratório do LabSIP Tiago Cortez pelos ensinamentos e pela amizade nestes anos tão difíceis de pandemia, descanse em paz.

À Maria José de Arruda Campos Rocha Passos por ser uma mãe do IO-USP durante todos esses anos de convivência, muito obrigado, muita saúde e conforto.

Ao meu antigo orientador Prof. Dr. Vicente Gomes pela amizade e pelos ensinamentos que se perpetuam até hoje, muito obrigado.

À minha família e aos meus amigos pelo apoio, carinho, amor, afeto e suporte durante minha vida inteira. Amo muito vocês com todas as minhas forças!

À Minha tia Dirce e à minha psicóloga Andrea pelo apoio emocional.

À Turma XIII do IO-USP que fizeram meus dias serem maravilhosos dentro da faculdade.

Ao G.R.A.D por me inserir neste grupo de pessoas maravilhosas com um propósito lindo e de tamanha importância, espero poder contribuir cada vez mais.

À equipe da Brigada do ICMBio da Rebio Gurupi, em 2020, pela ajuda para continuar este trabalho mesmo em condições remotas.

À minha professora de inglês, Doroti, pelo suporte nos momentos finais do trabalho.

Ao Caique Dias Luko, ao José Eduardo Carneiro Barros, à Natalia Silva e ao Pedro Walfir

Martins e Souza Neto pelo suporte nas disciplinas de DFG I e II.

A todos os funcionários do IO USP, em especial à Marlene. Obrigado!

Ao Centro de Computação Avançada HPC da USP pelo processamento do modelo.

À DHN pela disponibilização dos dados da L.H da Baía de São Marcos.

À HidroMares pela coleta dos dados utilizados neste estudo e aos seus colaboradores por tornar isto possível.

À equipe da sala náutica do Píer IV do Terminal Ponta da Madeira da VALE.S.A pelos ensinamentos sobre o Terminal.

Aos comandantes Paruolo e Albuquerque da APEM pelo esclarecimento de duvidas sobre as manobras no complexo portuário.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Paschoaleti, D. M. **Modelagem numérica hidrodinâmica para apoio a operações portuárias**: estudo de caso da Baía de São Marcos (MA). 2023. 125 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

O uso da modelagem hidrodinâmica para caracterizar e simular as condições oceanográficas se torna uma ferramenta útil para portos e terminais, haja visto que condições extremas de mar podem se tornar um risco para as operações portuárias. A Baía de São Marcos, que constitui o maior complexo portuário da América Latina, em movimentações de carga, tem sua janela de manobra restringida pelas fortes correntes de marés características da região. A partir disso, o presente trabalho visou caracterizar e simular as variáveis oceanográficas com importância para operações portuárias do complexo e, posteriormente, aplicar os resultados em um sistema de alerta de correntes. Para tal, foram utilizados resultados obtidos pelo módulo hidrodinâmico do software *Delft3D* e validados com dados de modelos globais e medições *in loco*, para os meses simulados de abril e setembro de 2020. O modelo implantado apresentou resultados similares aos observados para a baía: na sizígia, amplitude de maré maior que 7m e correntes acima de 2,5m/s. A análise do sistema de alerta para o dia 15 de abril de 2020, mínimo de quadratura, estimou um acréscimo de 3 horas na janela de manobra para o Píer 4 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, a qual, caso fosse utilizada, proporcionaria um ganho potencial calculado na ordem de 114 mil dólares por hora para o Terminal.

Palavras-chave: Modelagem Numérica, Hidrodinâmica, Baía de São Marcos, Terminal Marítimo Ponta da Madeira, Sistema de Alerta.

ABSTRACT

Paschoaleti, D. M. **Numerical hydrodynamic modeling to support port operations:** case study for the São Marcos Bay (MA). 2023. 125 p. Dissertation (Master) – Oceanographic Institute, University of São Paulo, São Paulo, 2023.

The use of hydrodynamic modeling to characterize and simulate oceanographic conditions becomes a useful tool for ports and terminals, considering that extreme sea conditions may become a risk for port operations. The bay of São Marcos the second largest port complex in Latin America has its operational window restricted by the strong tidal currents, which are characteristic for the region. Based on that, the present work aimed to characterize and simulate the important oceanographic variables with importance for port complex operations and subsequently, apply the results in a current alert system. For this purpose, results obtained by the hydrodynamic module of the *Delft3D* software were used and validated with data from global models and measurements *in loco* for the simulated months of April and September, 2020. The implemented model showed similar results to those observed for the bay: in syzygy, the tidal range was higher than 7m and currents were above 2.5m/s. The analysis of the alert system on April 15th, 2020, in minimum quadrature, estimated an increase of 3 hours in the operational window for pier 4 at Ponta da Madeira Maritime Terminal. This time increase would provide a calculated potencial gain of about 114 thousand dollars per hour for the Terminal.

Key words: Numerical Modeling, Hydrodynamic, São Marcos Bay, Ponta da Madeira Maritime Terminal, Alert System.

Lista de Figuras

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Mapa do Complexo Portuário da Baía de São Marcos: Porto de Itaqui, Terminal Portuário Privativo da Alumar e Terminal Marítimo de Ponta da Madeira. A baía recebe contribuições das vazões dos rios Mearim, Pindaré, Munim e Itapecuru, entre outros. | 6 |
| 2 | Localização dos berços de atracação do Porto de Itaqui: os berços são enumerados na ordem crescente da direita (berço 100) à esquerda (berço 108) da foto. O berço 99 ainda não estava construído no momento do registro fotográfico (Fonte: portodoitaqui.ma.gov.br). | 7 |
| 3 | Localização dos píeres de atracação do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira -VALE Fonte: Imagem modificada de Magalhães (2018). | 9 |
| 4 | Localização dos berços de atracação do Terminal da ALUMAR: berço 1 localizado á direita da foto e o berço 2, à esquerda. (Fonte: webportos.labtrans.ufsc.br). | 10 |
| 5 | Disposição de bancos de areia que oferecem perigo à navegação na Baía de São Marcos (Fonte: EMAP (2019)). | 11 |
| 6 | Imagem recortada do <i>RGFGRID</i> do <i>Delft3D</i> da grade principal estabelecida para a Baía de São Marcos. | 15 |
| 7 | Imagem recortada do Módulo <i>Flow Input</i> do <i>Delft3D</i> da grade local estabelecida para a região de interesse: Terminal Marítimo Ponta da Madeira e Porto do Itaqui. | 16 |
| 8 | Imagem contendo as cartas náuticas 410 a 414 disponibilizadas pela DHN (DHN, 2018) para obtenção da batimetria. | 17 |
| 9 | Batimetria da grade regional. | 18 |
| 10 | Batimetria de grade local do Terminal Marítimo Ponta da Madeira e do Porto do Itaqui. | 19 |
| 11 | Mapa das estações fluviais da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico e dos pontos de descargas fluviais inseridos na grade principal. | 22 |
| 12 | | 28 |
| 13 | Distribuição dos pontos de monitoramento para a grade local do modelo numérico hidrodinâmico, Terminal Ponta da Madeira, dolfin 15. | 29 |

| | | |
|----|--|----|
| 14 | Distribuição dos pontos de monitoramento para a grade local do modelo numérico hidrodinâmico, Terminal Ponta da Madeira, Píer 1. | 29 |
| 15 | Regras estipuladas pela Capitania do Portos do Maranhão para manobras de navios no Píer 1 e Píer 4 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira (Fonte: NPCP (2022)) | 33 |
| 16 | Comparação estatística das séries temporais de pressão atmosférica entre os dados do modelo global <i>CFRS</i> e da estação A203 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o ano de 2020. | 35 |
| 17 | Série temporal da pressão atmosférica para o período de 2019 a 2021. Dados do Instituto Nacional de Meteorologia e do modelo global <i>CFRS</i> | 35 |
| 18 | Comparação estatística das séries temporais de temperatura atmosférica entre os dados do modelo global <i>CFRS</i> e da estação A203 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o ano de 2020. | 36 |
| 19 | Comparação estatística das séries temporais de umidade relativa do ar entre os dados do modelo global <i>CFRS</i> e da estação A203 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o ano de 2020. | 37 |
| 20 | Série temporal da precipitação média diária da estação 82280 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o ano de 2020. | 38 |
| 21 | Comparação estatística das séries temporais da intensidade do vento entre os dados do modelo global <i>CFRS</i> e da estação A203 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o ano de 2020. | 39 |
| 22 | Comparação das rosas dos ventos (para intensidade e direção) entre os dados do modelo global <i>CFRS</i> (à esquerda) e da estação A203 do Instituto Nacional de Meteorologia (à direita), para o mês de abril do ano de 2020. | 40 |
| 23 | Comparação das rosas dos ventos (para intensidade e direção) entre os dados do modelo global <i>CFRS</i> (à esquerda) e da estação A203 do Instituto Nacional de Meteorologia (à direita), para o mês de setembro do ano de 2020. | 40 |
| 24 | Séries temporais típicas da quadratura e da sizígia para a Baía de São Marcos (MA). | 43 |
| 25 | Comparação estatística das séries temporais de nível do mar entre os resultados do <i>Delft3D</i> , ponto <i>DOLF_15</i> , e obtidos <i>in loco</i> , pelo perfilador acústico de corrente (<i>ADCP</i>), para o mês de abril de 2020. | 44 |

| | | |
|----|---|----|
| 26 | Comparação estatística das séries temporais de nível do mar entre os resultados do <i>Delft3D</i> , ponto <i>DOLF_15</i> , e obtidos <i>in loco</i> , pelo perfilador acústico de corrente (<i>ADCP</i>), para o mês de setembro de 2020. | 44 |
| 27 | Comparação estatística das séries temporais de magnitude das correntes, entre os resultados do <i>Delft3D</i> , ponto <i>DOLF_15</i> , e obtidos <i>in loco</i> , pelo perfilador acústico de corrente (<i>ADCP</i>), para o mês de abril de 2020. | 45 |
| 28 | Comparação estatística das séries temporais de magnitude das correntes, entre os resultados do <i>Delft3D</i> , ponto <i>DOLF_15</i> , e obtidos <i>in loco</i> , pelo perfilador acústico de corrente (<i>ADCP</i>), para o mês de setembro de 2020. | 46 |
| 29 | Séries temporais de magnitude das correntes dos dados do <i>Delft3D</i> , no ponto <i>PLAT_02</i> , para os meses de abril e setembro de 2020. | 46 |
| 30 | Comparação estatística das séries temporais de temperatura da superfície do mar entre os resultados dos dados do <i>Delft3D</i> , ponto <i>PLAT_3</i> , e do modelo global <i>HYCOM</i> , para o mês de abril de 2020. | 47 |
| 31 | Comparação estatística das séries temporais de temperatura da superfície do mar entre os resultados dos dados do <i>Delft3D</i> , ponto <i>PLAT_3</i> , e do modelo global <i>HYCOM</i> , para o setembro de abril de 2020. | 48 |
| 32 | Comparação estatística das séries temporais de salinidade na superfície entre os resultados do <i>Delft3D</i> , no ponto <i>PLAT_3</i> , e do modelo global <i>HYCOM</i> , para o mês de abril de 2020. | 49 |
| 33 | Comparação estatística das séries temporais de salinidade na superfície entre os resultados do <i>Delft3D</i> , no ponto <i>PLAT_3</i> , e do modelo global <i>HYCOM</i> , para o mês de setembro de 2020. | 49 |
| 34 | Mapa da elevação do nível do mar e distribuição das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na baixamar, no dia 10 de abril de 2020. | 50 |
| 35 | Mapa da elevação do nível do mar e distribuição das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de enchente, no dia 10 de abril de 2020. | 51 |
| 36 | Mapa da elevação do nível do mar e distribuição das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na preamar, no dia 10 de abril de 2020. | 52 |

| | | |
|----|--|----|
| 37 | Mapa da elevação do nível do mar e distribuição das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de vazante, no dia 10 de abril de 2020. | 53 |
| 38 | Mapa da elevação do nível do mar e distribuição das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na baixamar, no dia 20 de setembro de 2020. | 54 |
| 39 | Mapa da elevação do nível do mar e distribuição das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de enchente, no dia 20 de setembro de 2020. | 55 |
| 40 | Mapa da elevação do nível do mar e distribuição das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na preamar, no dia 20 de setembro de 2020. | 56 |
| 41 | Mapa da elevação do nível do mar e distribuição das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de vazante, no dia 20 de setembro de 2020. | 57 |
| 42 | Séries temporais do nível do mar dos pontos de 1 a 12, localizados ao longo do canal de acesso das embarcações ao complexo portuário da Baía de São Marcos (MA), para o dia 14 de abril de 2020. | 58 |
| 43 | Mapa da magnitude das correntes de superfície, produzido com resultados do modelo regional, na baixamar, no dia 08 de abril de 2020. | 59 |
| 44 | Mapa da magnitude das correntes de superfície, produzido com resultados do modelo regional, na maré de enchente, no dia 08 de abril de 2020. | 60 |
| 45 | Mapa da magnitude das correntes de superfície, produzido com resultados do modelo regional, na preamar, no dia 08 de abril de 2020. | 61 |
| 46 | Mapa da magnitude das correntes de superfície, produzido com resultados do modelo regional, na maré de vazante, no dia 08 de abril de 2020. | 62 |
| 47 | Mapa da magnitude das correntes de meio e fundo, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de vazante, no dia 08 de abril de 2020. | 63 |
| 48 | Mapa da magnitude das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na baixamar, no dia 17 de setembro de 2020. | 64 |
| 49 | Mapa da magnitude das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de enchente, no dia 17 de setembro de 2020. | 65 |

| | | |
|----|---|----|
| 50 | Mapa da magnitude das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na preamar, no dia 17 de setembro de 2020. | 66 |
| 51 | Mapa da magnitude das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de vazante, no dia 17 de setembro de 2020. | 67 |
| 52 | Mapa da magnitude das correntes de meio e fundo, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de vazante, no dia 17 de setembro de 2020. | 68 |
| 53 | Mapa da distribuição da temperatura de superfície do mar, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de sizígia, no dia 10 de abril de 2020. | 69 |
| 54 | Mapa da distribuição da temperatura de superfície do mar, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de quadratura, no dia 19 de abril de 2020. | 70 |
| 55 | Mapa da distribuição da temperatura de meio e fundo, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de quadratura, no dia 19 de abril de 2020. | 71 |
| 56 | Mapa da distribuição da temperatura de superfície do mar, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de sizígia, no dia 20 de setembro de 2020. | 72 |
| 57 | Mapa da distribuição da temperatura de superfície do mar, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de quadratura, no dia 15 de setembro de 2020. | 73 |
| 58 | Mapa da distribuição da temperatura de meio e fundo, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de quadratura, no dia 15 de setembro de 2020. | 74 |
| 59 | Mapa da distribuição de salinidade da superfície do mar, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de sizígia, no dia 10 de abril de 2020. | 75 |
| 60 | Mapa da distribuição de salinidade da superfície do mar, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de quadratura, no dia 19 de abril de 2020. | 76 |
| 61 | Mapa da distribuição da salinidade de meio e fundo, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de quadratura, no dia 19 de abril de 2020. | 77 |
| 62 | Mapa da distribuição de salinidade da superfície do mar, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de sizígia, no dia 20 de setembro de 2020. | 78 |
| 63 | Mapa da distribuição de salinidade da superfície do mar, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de quadratura, no dia 15 de setembro de 2020. | 79 |

| | | |
|----|--|----|
| 64 | Mapa da distribuição da salinidade de meio e fundo, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de quadratura, no dia 15 de setembro de 2020. | 80 |
| 65 | Comparação estatística das séries temporais de magnitude das correntes entre os resultados do <i>Delft3D</i> , ponto <i>DOLFIN 15</i> , e obtidos <i>in loco</i> , pelo perfilador acústico de corrente (<i>ADCP</i>), a 70m do píer, para o mês de abril de 2020. Em vermelho, encontram-se os dois períodos escolhidos para a análise do sistema de alerta: dias 09 e 15 de abril. | 82 |
| 66 | Comparação estatística das séries temporais de magnitude das correntes entre os resultados do <i>Delft3D</i> , ponto <i>PIER 1</i> , e obtidos <i>in loco</i> , pelo perfilador acústico de corrente (<i>ADCP</i>), a 110m do píer, para o mês de abril de 2020. Em vermelho, encontram-se os dois períodos escolhidos para a análise do sistema de alerta: dias 09 e 15 de abril. | 83 |
| 67 | Estudo da Norma de Manobra para o Complexo Portuário da Baía de São Marcos (NPCP) do Píer 1, durante o período de máximo da sizígia, em 09 de abril de 2020, para obtenção de um sistema de alerta e prospecção do aumento da janela operacional do Píer em questão. | 84 |
| 68 | Estudo da Norma de Manobra para o Complexo Portuário da Baía de São Marcos (NPCP) do Píer 1, durante o período de mínimo de quadratura, em 15 de abril de 2020, para obtenção de um sistema de alerta e prospecção do aumento da janela operacional do Píer em questão. | 85 |
| 69 | Estudo da Norma de Manobra para o Complexo Portuário da Baía de São Marcos (NPCP) do Píer 4, durante o período de máximo da sizígia, em 09 de abril de 2020, para obtenção de um sistema de alerta e prospecção do aumento da janela operacional do Píer em questão. | 86 |
| 70 | Estudo da Norma de Manobra para o Complexo Portuário da Baía de São Marcos (NPCP) do Píer 4, durante o período de mínimo de quadratura, em 15 de abril de 2020, para obtenção de um sistema de alerta e prospecção do aumento da janela operacional do Píer em questão. | 87 |
| 71 | Imagem ilustrativa da localização do Píer 1 e Píer 4 na grade local. | 88 |
| 72 | Sistema de alerta para o Píer 1 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, com correntes acima de 1,25 nós durante a janela operacional em vigor, no máximo de sizígia, em 09 de abril de 2020. | 89 |

| | | |
|----|---|-----|
| 73 | Sistema de alerta para o Píer 1 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, com correntes acima de 1,25 nós durante a janela operacional possível no máximo de sizígia, em 09 de abril de 2020. | 90 |
| 74 | Sistema de alerta para o Píer 1 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, com correntes acima de 1,25 nós fora da janela operacional, na maré vazante, no máximo de sizígia, em 09 de abril de 2020. | 91 |
| 75 | Sistema de alerta para o Píer 1 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, com correntes acima de 1,25 nós, para as quatro fases da maré, no mínimo da quadratura, em 15 de abril de 2020. | 92 |
| 76 | Sistema de alerta para o Píer 4 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, com correntes acima de 1,7 nós durante as janelas operacionais em vigor e proposta, no máximo da sizígia, em 09 de abril de 2020. | 94 |
| 77 | Sistema de alerta para o Píer 4 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, com correntes acima de 1,7 nós durante e logo após, a janela operacional possível e proposta, na maré vazante, no máximo da sizígia, em 09 de abril de 2020. | 95 |
| 78 | Sistema de alerta para o Píer 4 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, com correntes acima de 1,7 nós durante a janela operacional possível, anterior à baixamar, no mínimo da quadratura, em 15 de abril de 2020. | 97 |
| 79 | Sistema de alerta para o Píer 4 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, com correntes acima de 1,7 nós durante a janela operacional possível, posterior à preamar, no mínimo da quadratura, em 15 de abril de 2020. | 99 |
| 80 | Mapa da distribuição da densidade da água do mar na superfície, calculada pelo modelo local, na maré de quadratura, no dia 15 de abril de 2020. | 101 |
| 81 | Seções de densidade, em kg/m^3 , adjacentes ao Píer 1 e ao Píer 4, na maré de quadratura, no dia 15 de abril de 2020. | 102 |

Lista de Tabelas

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Características dos berços do cais do Porto de Itaqui (Fonte: Tabela modificada de EMAP (2019)). | 8 |
| 2 | Valores escolhidos do coeficiente de Manning para diferentes faixas de profundidade da Baía de São Marcos (MA). | 20 |
| 3 | Informações dos parâmetros atmosféricos selecionados para o trabalho obtidos pelo modelo global <i>CFRS</i> | 21 |
| 4 | Valores mensais de vazão, temperatura e salinidade utilizados como condições de contorno no modelo hidrodinâmico da Baía de São Marcos (MA). | 23 |
| 5 | Espessuras das 15 camadas verticais Sigma σ estabelecidas para o modelo numérico hidrodinâmico deste trabalho. | 25 |
| 6 | Coordenadas e profundidade dos pontos de monitoramento selecionados, divididos por finalidade, para a grade regional. | 27 |
| 7 | Parâmetros estatísticos para as séries temporais de nível do mar, temperatura e salinidade, em abril de 2020. | 41 |
| 8 | Parâmetros estatísticos para as séries temporais de nível do mar, temperatura e salinidade, em setembro de 2020. | 41 |
| 9 | Parâmetros estatísticos para as séries temporais de corrente, em abril de 2020. | 42 |
| 10 | Parâmetros estatísticos para as séries temporais de corrente, em setembro de 2020. | 42 |
| 11 | Parâmetros estatísticos comparativos de nível do mar e corrente, para a grade local, referentes ao processamento de abril de 2020. | 81 |

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | HIPÓTESE | 4 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 4 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral | 4 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos | 4 |
| 2 | ÁREA DE ESTUDO | 5 |
| 2.1 | COMPLEXO PORTUÁRIO | 6 |
| 2.1.1 | Porto do Itaqui | 7 |
| 2.1.2 | Terminal de Ponta da Madeira | 8 |
| 2.1.3 | Terminal da Alumar | 9 |
| 2.2 | CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS | 10 |
| 2.2.1 | Geomorfológicas | 10 |
| 2.2.2 | Meteorológicas | 11 |
| 2.2.3 | Hidrodinâmicas | 12 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 14 |
| 3.1 | AQUISIÇÃO DE DADOS | 14 |
| 3.1.1 | Linha de Costa | 14 |
| 3.1.2 | Grade Computacional | 14 |
| 3.1.3 | Batimetria | 16 |
| 3.1.4 | Rugosidade do Fundo | 19 |
| 3.1.5 | Pontos Secos | 20 |
| 3.1.6 | Forçantes | 20 |
| 3.2 | TRATAMENTO DOS DADOS | 23 |
| 3.2.1 | Pré-Processamento | 23 |
| 3.2.2 | Modelagem Numérica | 24 |
| 3.2.3 | Pós-Processamento | 27 |
| 4 | RESULTADOS | 34 |
| 4.1 | CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS TÍPICAS | 34 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.1.1 | Pressão Atmosférica | 34 |
| 4.1.2 | Temperatura Atmosférica | 36 |
| 4.1.3 | Umidade Relativa | 37 |
| 4.1.4 | Precipitação | 37 |
| 4.1.5 | Velocidade e Direção do Vento | 38 |
| 4.2 | VALIDAÇÃO E DEMONSTRAÇÃO DA QUALIDADE DO MODELO | 41 |
| 4.2.1 | Validação do Nível do Mar | 42 |
| 4.2.2 | Validação da Corrente | 45 |
| 4.2.3 | Demonstração da Qualidade da Distribuição de Temperatura e Salinidade | 47 |
| 4.3 | MAPAS TEMÁTICOS | 50 |
| 4.3.1 | Nível do Mar e Direção das Correntes | 50 |
| 4.3.2 | Magnitude das Correntes | 58 |
| 4.3.3 | Distribuição de Temperatura | 68 |
| 4.3.4 | Distribuição de Salinidade | 74 |
| 4.4 | SISTEMA DE ALERTA | 80 |
| 4.4.1 | Validação do Modelo Local | 80 |
| 4.4.2 | Análise da NPCP | 83 |
| 4.4.3 | Mapas do Sistema de Alerta - Píer 1 | 87 |
| 4.4.4 | Mapas do Sistema de Alerta - Píer 4 | 93 |
| 4.5 | DISTRIBUIÇÃO DE DENSIDADE | 100 |
| 5 | DISCUSSÃO | 103 |
| 5.1 | MODELO REGIONAL | 103 |
| 5.2 | MODELO LOCAL | 110 |
| 5.3 | MODELO FUTURO | 114 |
| 6 | CONCLUSÃO | 116 |
| | REFERÊNCIAS | 126 |

1 INTRODUÇÃO

A sociedade moderna é irreversivelmente dependente dos recursos de ecossistemas costeiros marinhos. Aproximadamente dois terços das maiores cidades do mundo¹ localizam-se em regiões litorâneas (Dias et al., 2009). No Brasil, dezoito, das quarenta e duas regiões metropolitanas, encontram-se na zona costeira² (PBMC, 2016). Em termos econômicos, segundo estudo de Carvalho (2018), a zona costeira brasileira gerou à economia, em 2015, R\$ 1,11 Trilhões do PIB (19% do PIB nacional), sendo que 14% deste valor provieram diretamente dos setores marinhos (R\$ 157 Bilhões). Mensurado a importância desta região, fica evidente a necessidade de gerenciá-la adequadamente e protegê-la frente a impactos ambientais.

A Constituição Federal de 1988 garante que todos têm o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado e estabelece a Zona Costeira como patrimônio nacional, sendo dever do poder público e da coletividade garantir a utilização de seus recursos em condições que asseguram a preservação e a sustentabilidade (Brasil, 1988). O Brasil, no mesmo ano de promulgação da Constituição Federal vigente, instituiu o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC), o qual visa estabelecer estratégias nacionais para elevar a qualidade de vida e proteção do seu patrimônio natural, histórico, étnico e cultural (Pereira & Oliveira, 2015). Entretanto, passados mais de 30 anos da implementação da PNGC, ainda há a necessidade de aprimoramento no quesito de avaliação do gerenciamento costeiro no país, principalmente no que diz respeito a boas práticas de gestão (Torma, 2018). Um guia publicado, em 2018, pelo Governo Federal, sobre diretrizes de prevenção e proteção à erosão costeira confirma a necessidade urgente de sistematização técnica para minimizar ou eliminar os impactos neste patrimônio tão importante (CIRM, 2018). A modelagem numérica hidrodinâmica, portanto, passa a ter destaque, auxiliando os gestores e tomadores de decisões a garantir o sucesso do gerenciamento, sintetizando os resultados em informações úteis para estabelecer respostas eficazes (Pereira & Oliveira, 2015). Em agosto de 2019, a costa nordeste brasileira foi atingida pelo maior desastre ambiental causado por derramamento de óleo do Brasil e de regiões costeiras tropicais do mundo (Escobar, 2019; Lourenço et al., 2020). Os prejuízos causados pelo acidente foram potencializados devido a atrasos nas ações de contenção ao derramamento, sendo que o incidente só veio a ser formalizado pelo governo federal após 41 dias do início do desastre (Araújo et al.,

¹Considerando as cidades com mais de 6 milhões de habitantes

²Macapá-Santana, Belém, São Luis, Fortaleza, Natal, Aracaju, Maceió, João Pessoa, Recife, Salvador, Vitória, Rio de Janeiro, Vale do Paraíba, Baixada Santista, Joinville, Foz do Itajaí, Florianópolis e Porto Alegre

2020).

No acidente ambiental citado, mais de 5 mil toneladas de óleo foram removidos de ambientes costeiros, em sua maioria por ações voluntárias sem o apoio de órgãos do governo, além do que não foi removido e continua ameaçando a saúde dos ecossistemas costeiros (Araújo et al., 2020; Lourenço et al., 2020; Magris & Giarrizzo, 2020). Quatro anos antes, em novembro de 2015, na desembocadura do Rio Doce, a costa sudeste foi atingida por uma pluma de lama tóxica que se originou do rompimento da barragem do Fundão em Mariana, Minas Gerais (FTG, 2016; Fernandes et al., 2016; Garcia et al., 2017; Hatje et al., 2017). Por volta de 50 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério foram liberados na bacia do Rio Doce e atingiram o mar 16 dias após o rompimento (Fernandes et al., 2016; Marta-Almeida et al., 2016; Miranda & Marques, 2016). O evento foi considerado, na época, um dos maiores desastres ambientais da história recente do Brasil (Miranda & Marques, 2016). Os prejuízos iniciais causados são estimados em R\$ 1,2 bilhões de reais apenas nos municípios atingidos de Minas Gerais (FTG, 2016); foi calculada por Garcia et al. (2017), uma perda mínima regional nos serviços ecossistêmicos de US\$ 521 milhões de dólares anuais, não levando em conta os impactos no oceano. A resposta retardada, somada ao não monitoramento e a inexistência de dados técnicos da região costeira atingida, são indícios de que a costa brasileira necessita de um aprimoramento em seu gerenciamento costeiro, para mitigar futuros prejuízos socioambientais e permitir um diagnóstico adequado e fidedigno para imposição de multas e indenizações aos causadores de danos em desastres ambientais.

O uso da modelagem hidrodinâmica para caracterizar e simular as condições oceanográficas (nível do mar, ondas, correntes e densidade) se torna uma ferramenta útil para resolução de problemas no gerenciamento costeiro nacional (Alfredini & Arasaki, 2014). Entre os inúmeros benefícios de um modelo numérico hidrodinâmico, destacam-se: aumento na eficiência e segurança de operações portuárias; prevenção, mitigação e respostas a desastres naturais e antrópicos (e. g. derramamento de óleo); monitoramento da qualidade da água para uso recreativo; e auxílio em buscas e salvamentos (Vincent et al., 2003). No Brasil, já existe um modelo acadêmico operacional de previsão estabelecido das condições oceanográficas para o canal de São Sebastião e o estuário de Santos – São Vicente – Bertioga, com principal intuito de auxílio à navegação na região, implementado por Costa (2019). Este trabalho é referência de um modelo operacional de previsão; embora a implantação de um sistema operacional de previsão não esteja no escopo do projeto aqui proposto, a pesquisa a ser desenvolvida constitui a base de um

futuro projeto de previsão operacional para a região de estudo.

Os portos e terminais estão entre os principais beneficiários de um modelo hidrodinâmico. Condições extremas de mar (e. g. correntes fortes e elevada altura das ondas) podem se tornar um risco para portos e embarcações durante atividades portuárias. Transformar modelos acadêmicos em um sistema operacional de previsão pode trazer grandes benefícios nesse setor: aumentar a janela de operação do porto, evitar interrupções desnecessárias, auxiliar tomadores de decisão a operar com maior segurança em condições adversas, além de diminuir a possibilidade de desastres (Solari et al., 2012). O Porto de Santos reduziu em aproximadamente quatro vezes o tempo de “barra fechada” (não operante) após instalação das estações de monitoramento meteo-oceanográficas em tempo real (Paschoal, 2020). Acredita-se que, com a implementação de um sistema de previsão, o tempo de não operação do Porto seria ainda mais reduzido. Uma vez estabelecido um sistema operacional de previsão para uma determinada região portuária, novos modelos podem ser acoplados ao mesmo, sejam eles hidrossedimentológicos, biogeoquímicos ou ecológicos, possibilitando a solução de problemas relacionados aos portos, e conseqüentemente ao gerenciamento costeiro.

Dentre os temas que contemplam o gerenciamento da costa brasileira, foi escolhido para este trabalho a utilização da modelagem numérica para apoio à operação portuária, pelo fato da mesma ser uma atividade essencial em nossa sociedade. Assim, se faz necessário trabalhar para que a mesma tenha maior eficiência, alavancando a economia nacional e mitigando o maior número possível de impactos ambientais. O presente trabalho tem como área de estudo a Baía de São Marcos, Maranhão, Brasil, que constitui o maior complexo portuário da América Latina, em termos de movimentação de carga, com principais cargas sendo minérios e grãos (Amaral & Alfredini, 2010). A região do estudo abrange: Porto de Itaqui, Terminal Marítimo de Ponta da Madeira e Terminal Portuário Privativo da Alumar.

1.1 HIPÓTESE

Modelos numéricos hidrodinâmicos simulam adequadamente a circulação costeira, de modo que podem ser usados para aumentar a eficiência e segurança das operações do complexo portuário da Baía de São Marcos, Maranhão, Brasil.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

- O presente trabalho visa caracterizar e simular as variáveis oceanográficas com importância para operações portuárias do complexo portuário da Baía de São Marcos, Maranhão, Brasil.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar as condições meteorológicas típicas e extremas da região, através de levantamento de dados de modelos meteorológicos globais;
- Determinar as características típicas da circulação marítima em grande escala, a partir do levantamento de dados de modelos numéricos globais;
- Implantar um modelo numérico hidrodinâmico de alta resolução para a Baía de São Marcos: adequadamente validado e calibrado.

2 ÁREA DE ESTUDO

O Estado do Maranhão possui cerca de 1.230km de extensão costeira, localizados entre o rio de Gurupi e o delta do Parnaíba; esta extensão faz parte de uma das áreas costeiras mais bem preservadas em regiões tropicais do mundo (Pereira et al., 2016). O índice demográfico da região varia espacialmente, desde um milhão de habitantes por quilômetro quadrado na capital São Luís, até densidades baixíssimas em comunidades costeiras que vivem basicamente da pesca. A base da economia dessas comunidades inclui transporte marítimo, pesca, turismo e comércio (Andrade et al., 2010; Silva et al., 2013). Entretanto, no que diz respeito ao gerenciamento costeiro, o Estado do Maranhão requer maior desenvolvimento: a urbanização já causou sérios problemas socioambientais na região, e efetivos planos de gestão ambientais são urgentemente necessários (Pereira et al., 2016).

Segundo Pereira et al. (2016), a costa do Maranhão pode ser dividida em três sub-regiões: central, leste e oeste. A sub-região central abrange a Baía de São Marcos, área de estudo do presente trabalho, e a Baía de São José, em que juntas são denominadas de Golfo do Maranhão, o qual recebe as águas dos rios Mearim, Pindaré, Munim e Itapecuru, entre outros (Figura 1).

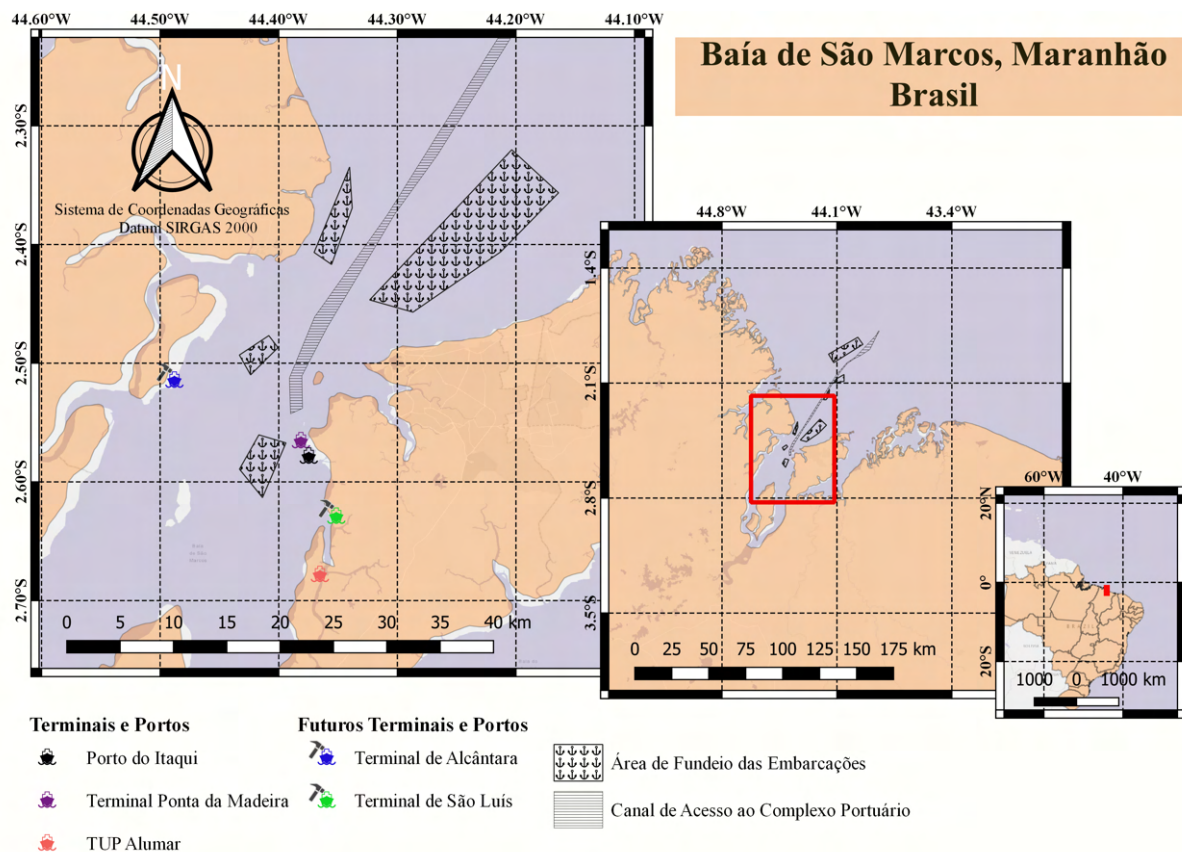


Figura 1: Mapa do Complexo Portuário da Baía de São Marcos: Porto de Itaqui, Terminal Portuário Privativo da Alumar e Terminal Marítimo de Ponta da Madeira. A baía recebe contribuições das vazões dos rios Mearim, Pindaré, Munim e Itapecuru, entre outros.

A Baía de São Marcos contém elementos socioeconômicos e ambientais susceptíveis: extensas faixas de manguezais, onde ocorre o extrativismo de caranguejo e camarão; planícies de supramaré, áreas utilizadas para aquicultura; praias de lazer/turismo; pesca artesanal e comercial (Andrade et al., 2009). Pelo exposto, a região é altamente dependente dos recursos provindo da baía, o que resulta em uma alta vulnerabilidade da mesma a impactos decorrentes de danos ambientais, podendo comprometer o sustento da população local.

2.1 COMPLEXO PORTUÁRIO

No lado ocidental do município de São Luís se encontra o Complexo Portuário da Baía de São Marcos. O complexo abrange o Porto de Itaqui, Terminal Marítimo de Ponta da Madeira e Terminal Portuário Privativo da Alumar, os quais, em conjunto, são os responsáveis pela maior movimentação de carga nacional (Alfredini & Arasaki, 2014). Além destes, há dois novos Portos em fase de implementação: os Terminais Portuários de São Luís e de Alcântara.

Segundo relatório anual da Agência Nacional de Transporte Aquaviário (ANTAQ), o Complexo Portuário da Baía de São Marcos movimentou um total de 230 milhões de toneladas de carga no ano de 2019, 100 milhões a mais que o complexo portuário de Santos no mesmo ano (ANTAQ, 2019).

2.1.1 Porto do Itaqui

O Porto de Itaqui, Porto público pertencente atualmente à Empresa Maranhense de Administração Portuária (EMAP) começou suas atividades em 1972, quando concluídas as obras no berço de atracação 101 e 102 (Figura 2). Em 1976, houve a construção do berço 103; dezoito anos depois, em 1994, o Porto foi ampliado com a construção dos berços 104 e 105; em 1999, berço 106; em 2017, foi inaugurado o berço 108, especializado em movimentação de cargas derivadas de petróleo; e, em 2022, inauguração do berço 99 (EMAP, 2019, 2021). Este Porto movimentou 25 milhões de toneladas em 2019 e tem projeção de crescimento de 2,5% por ano, com previsão de movimentar em 2060, um total de 68,6 milhões de toneladas (ANTAQ, 2019; EMAP, 2019).



Figura 2: Localização dos berços de atracação do Porto de Itaqui: os berços são enumerados na ordem crescente da direita (berço 100) à esquerda (berço 108) da foto. O berço 99 ainda não estava construído no momento do registro fotográfico (Fonte: portodoitaqui.ma.gov.br).

Segundo relatório da EMAP (2019) a principal carga movimentada pelo Porto de Itaqui é granel sólido vegetal, que em 2018 representou 44,1% do total. Entre os principais produtos destacam-se a exportação de soja e milho, em especial para a China. A movimentação de

granel líquido representou 28% do total em 2018, uma grande parte oriunda da importação de derivados de petróleo dos EUA, sendo que o restante faz parte da distribuição de combustível nacional pela cabotagem³. Os demais produtos responsáveis pela movimentação de carga no Porto são: fertilizantes, carvão mineral, escória, clínquer e calcário (produtos importados) e ferro-gusa, celulose e concentrado de cobre (exportados). A Tabela 1 mostra informação de cada berço e suas respectivas características. O berço 107 foi desativado, antes mesmo de sua inauguração, devido à periculosidade para manobras de atracação.

Tabela 1: Características dos berços do cais do Porto de Itaquí (Fonte: Tabela modificada de EMAP (2019)).

| Berço | Comprimento (m) | Cota em relação ao Nível de Redução (m) | Calado máximo autorizado (m) | Destinação operacional |
|--------------|------------------------|--|-------------------------------------|---|
| 99 | 264 | -15 | 14,5 | Granel sólido e carga geral |
| 100 | 320 | -15 | 14,5 | Granel sólido e carga geral |
| 101 | 223 | -12 | 11,5 | Granel sólido e carga geral |
| 102 | 223 | -12 | 11,5 | Granel sólido, granel líquido e carga geral |
| 103 | 270 | -15 | 14,5 | Granel sólido e carga geral |
| 104 | 200 | -13 | 12,5 | Granel líquido |
| 105 | 280 | -18 | 17,5 | Granel sólido e carga geral |
| 106 | 340 | -19 | 18,5 | Granel líquido |
| 108 | 300 | -15 | 14,5 | Granel líquido |

2.1.2 Terminal de Ponta da Madeira

O Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (TMPM), pertencente à companhia da VALE S.A., foi inaugurado, em 1986, para atender a demanda de exportação de minérios produzidos no Pará, oriundos na jazidas de Carajás (Silva, 2016a). O Terminal exporta majoritariamente minério de ferro (98,8%) e manganês (1,1%) e sozinho foi responsável por 17% da movimentação nacional total de cargas em 2019, totalizando 190,1 milhões de toneladas exportada (ANTAQ, 2019; EMAP, 2019). Essa mega movimentação só é possível devido à construção da ferrovia EFC (Estrada de Ferro Carajás) que liga as jazidas diretamente ao TMPM (Silva, 2016a).

As instalações da TMPM são constituídas por 3 píeres: Píer 01, Píer 03 e Píer 04, com 5 berços de atracação (01, 03 Sul, 03 Norte, 04 Sul e 04 Norte) (Figura 3), as cotas de cada píer são, respectivamente, -23m, -21m e -25m. A grande profundidade permite, receber os

³Navegação entre portos do mesmo país

maiores navios mineraleiros do mundo (Valemax) com calado carregado de 23m e capacidade para transporte de 400.000 toneladas de carga (Silva, 2016a). O Terminal está abrigado por dois espigões, Sul e Norte, construídos para proteger o mesmo da ação das fortes correntes (EMAP, 2019).



Figura 3: Localização dos píeres de atracação do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira - VALE Fonte: Imagem modificada de Magalhães (2018).

2.1.3 Terminal da Alumar

O Terminal de uso privativo (TUP) da Alumar (Consórcio de Alumínio do Maranhão S.A.), pertencente à empresa multinacional Alcoa, começou suas atividades em 1983. Diferente dos Portos supracitados, que estão próximos um do outro, o TUP Alumar se localiza na confluência do Estreito dos Coqueiros com o Rio dos Cachorros, a uma distância de 10km do Porto de Itaqui. O mesmo exporta majoritariamente minério de alumínio e desembarca soda cáustica, carvão mineral, óleo combustível e bauxita para a produção de alumina (produto exportado) (EMAP, 2019). Em 2019, o TUP Alumar movimentou cerca de 14,9 milhões de toneladas (ANTAQ, 2019), a menor movimentação entre os Portos do complexo, porém, o mesmo opera com apenas dois berços de atracação (Figura 4); se for considerada a razão do total de carga pelo número de berços, o TUP Alumar passa o Porto de Itaqui em movimentação de carga por quantidade de berços. A cota nos berços é de aproximadamente -13m e o calado máximo

permitido para atracação é de 11,5m (EMAP, 2019).



Figura 4: Localização dos berços de atracação do Terminal da ALUMAR: berço 1 localizado à direita da foto e o berço 2, à esquerda. (Fonte: webportos.labtrans.ufsc.br).

2.2 CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS

2.2.1 Geomorfológicas

A Baía de São Marcos, a maior reentrância costeira do nordeste brasileiro, está situado em um platô de baixo relevo, no interior da bacia do Parnaíba e embasada pelo escudo cristalino Cráton São Luís (Bandeira, 2013). A mesma teve aparente origem durante massivas erosões de rochas sedimentares, em períodos de baixos níveis do mar durante o quaternário (Dominguez, 2009). Há domínio na região de sedimentos cenozoicos inconsolidados ou pouco consolidados, depositados em meio aquoso (Bandeira, 2013). A entrada da baía apresenta leito submarino com ondulações rítmicas, bancos de areia alongados e alinhados perpendicularmente à costa, em direção à propagação da onda de maré (Chagas, 2013). A Figura 5 mostra os bancos de areia datados que oferecem risco à navegação.

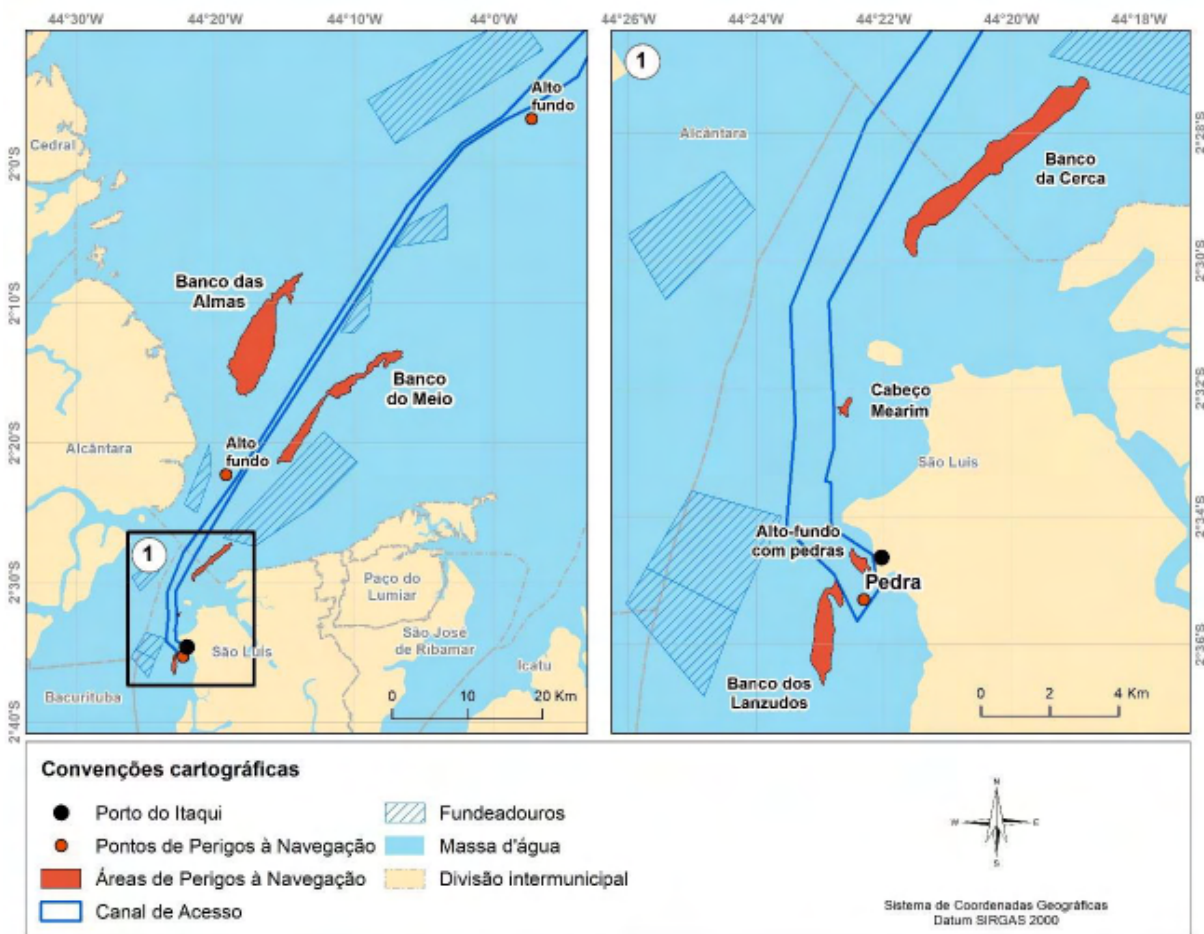


Figura 5: Disposição de bancos de areia que oferecem perigo à navegação na Baía de São Marcos (Fonte: EMAP (2019)).

2.2.2 Meteorológicas

O principal sistema meteorológico responsável pela intensidade/direção do vento, pluviosidade e altura significativa/direção das ondas que chegam na região é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Rodríguez et al., 2016). A variação latitudinal da mesma (2°S e 14°N) e a proximidade do sistema à costa proporcionam à região dois cenários distintos a cada ano (Cavalcanti, 2016): no pico do verão, nos meses de agosto-setembro, quando o sistema se encontra ao norte e mais próximo ao continente africano, a pluviosidade é muito baixa, com precipitação média de 20 mm/mês, e os ventos são intensos provindos do quadrante leste. Em contrapartida, no pico do inverno (março-abril), a ZCIT se encontra ao sul e a zona de convergência próxima à costa, resultando pluviosidade muito alta, com média em torno de 450mm/mês; os ventos são enfraquecidos e a direção com maior intensidade provém do quadrante nordeste (Cavalcanti,

2016; Vasconcelos et al., 2018). Pereira & Harari (1995) mostraram que, apesar de sua importância para o regime de ondas, os principais sistemas meteorológicos que afetam a Baía de São Marcos influenciam muito pouco na hidrodinâmica da região.

2.2.3 Hidrodinâmicas

Em geral, as ondas que influenciam a região são formadas pelos ventos alísios, de modo que a direção de incidência na costa é um reflexo da orientação da ZCIT, de nordeste e de leste. A altura significativa que incide é de 1m, variando entre 0,6m a 1,4m (Feitosa, 1989; Finkl, 2008). Em algumas ocasiões, com ciclones extratropicais no hemisfério norte, podem incidir ondas mais energéticas (Innocentini et al., 2000). Devido ao fato da plataforma continental interna ser rasa, de declividade suave e com presença recorrente de bancos de areia (Finkl, 2008) as ondas mais energéticas aparentemente são atenuadas ao chegar costa a dentro. As ondas se diferenciam nas diferentes fases da macro-maré: durante a preamar, ondas de maior altura significativa conseguem penetrar mais no interior da baía do que na baixa-mar (Pereira et al., 2016). Devido às características de ventos e ondas, o transporte de sedimento ocorre majoritariamente em um único sentido, de leste para oeste (Dominguez & Da Silva Pinto Bittencourt, 1996; Finkl, 2008; Pereira et al., 2016).

A componente dominante que rege a hidrodinâmica da Baía de São Marcos é a maré, a qual possui grandes amplitudes, em um regime semi-diurno (Pereira & Harari, 1995). Os máximos valores de amplitude de maré e intensidade da corrente de maré, encontrados no canal da baía, são alcançados no período de equinócio de primavera, podendo atingir valores maiores que 7m e 2,5m/s, respectivamente (Morais, 1977; González-Gorbeña et al., 2015). A maré na região é assimétrica, ou seja, as correntes de maré vazante são, na média espacial, mais intensas do que as de enchente (Pereira et al., 2016).

Segundo estudos de Garcia (2007), as construções dos espigões, sul e norte, alteraram os padrões de correntes no Terminal Marítimo Ponta da Madeira e no Porto de Itaqui; em específico, no Porto de Itaqui as mudanças deslocaram a corrente de enchente para Oeste, diminuindo sua intensidade. Havia a preocupação que o espigão sul poderia acarretar o assoreamento dos berços de atracação do Porto de Itaqui, porém, foi demonstrado que a evolução do fundo não foi impactada pela construção do espigão, pois a corrente de manutenção da profundidade dos berços, corrente de vazante, não foi substancialmente alterada. No caso do TMPM, a construção

dos espigões, norte e sul, acarretou assoreamento e vórtices mais intensos próximo aos píeres, trazendo problemas a manobras e amarrações de navios. Foram necessárias modificações nos dois espigões para a solução do problema: recuo do espigão norte com defletor de 150m com 80° de deflexão, e arrasamento nos finais do espigão sul (- 2,75m). Mesmo reduzindo a 50% do volume dragado no TMM após as alterações nos espigões, são ainda necessárias dragagens constantes de manutenção, atualmente, com uma menor periodicidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 AQUISIÇÃO DE DADOS

3.1.1 Linha de Costa

A linha de costa, utilizada como um acessório para montar a grade computacional, foi adquirida pela ferramenta *DelftDashboard* no sistema de coordenadas geográficas. O arquivo adquirido, em formato *.ldb*, extensão específica para o *Delft3D*, é composto por duas colunas: longitude e latitude, respectivamente.

A ferramenta se torna muito útil para uma aquisição rápida, no entanto, por se tratar de uma linha de costa global, a mesma carece em resolução localmente. Como a área de estudo do presente trabalho se caracteriza pelo seus recortes acentuados na costa, houve a necessidade de buscar outras alternativas de maior resolução nas regiões de interesse interiores, como por exemplo os terminais portuários. O software de geoprocessamento *QGIS* supriu esta demanda.

3.1.2 Grade Computacional

A grade principal foi construída no campo *RGFGRID* da interface gráfica do *Delft3D* (Figura 6). Optou-se por uma grade espaçamento variável para melhor adequar a modelagem computacional para a região de estudo. A maior resolução de grade se encontra no centro, que abrange o complexo portuário, com espaçamento de 123m e a menor nas demais regiões, com espaçamento de até 3,3km.

A grade retangular foi rotacionada para melhor se adequar à orientação da costa, no sentido noroeste-sudoeste, e recortada até no mínimo de 3 pontos secos adjacentes a pontos molhados. No total, a grade contém 53.048 células, sendo 44.978 em água e 8.120 em terra.

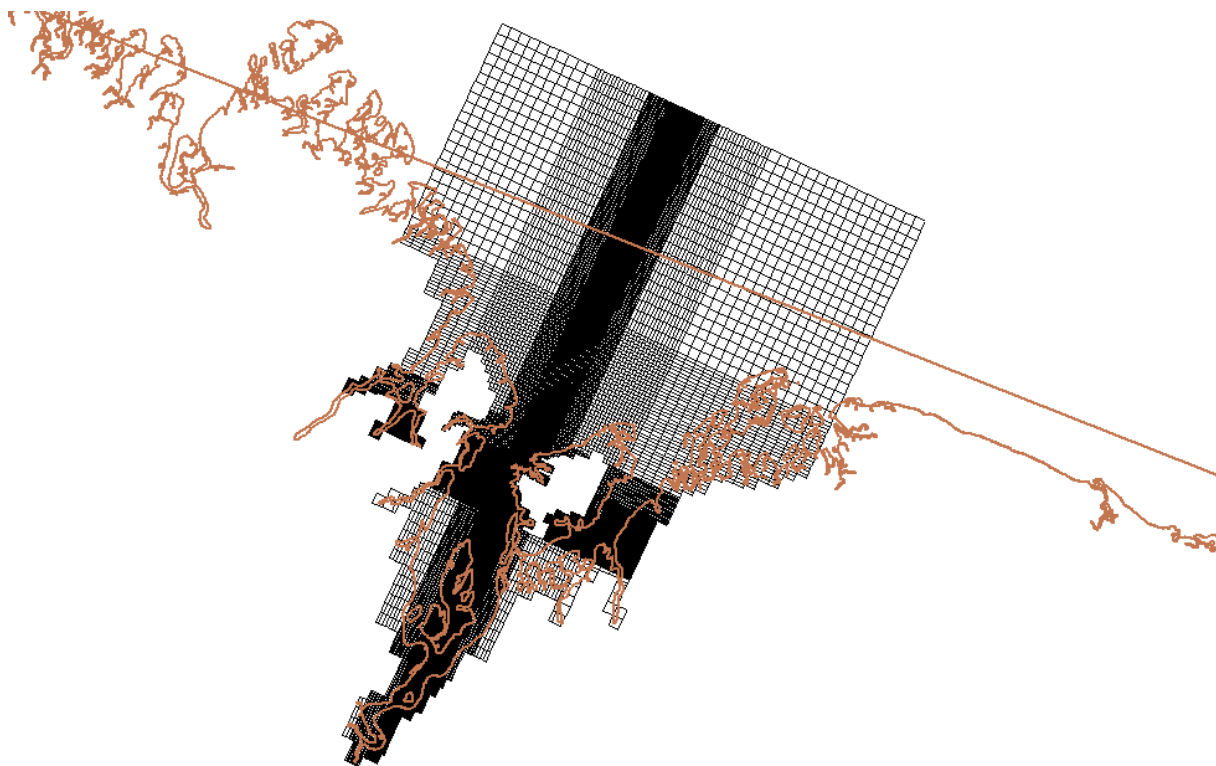


Figura 6: Imagem recortada do *RGFGRID* do *Delft3D* da grade principal estabelecida para a Baía de São Marcos.

A grade local abrange o Terminal Marítimo de Ponta da Madeira e o Porto do Itaqui (Figura 7) e tem como objetivo o maior detalhamento dos resultados desta região. A grade tem espaçamento fixo de 25m, sendo não rotacionada. As grades do *Delft3D* originalmente são do tipo C de Arakawa, o que foi mantido no presente trabalho.

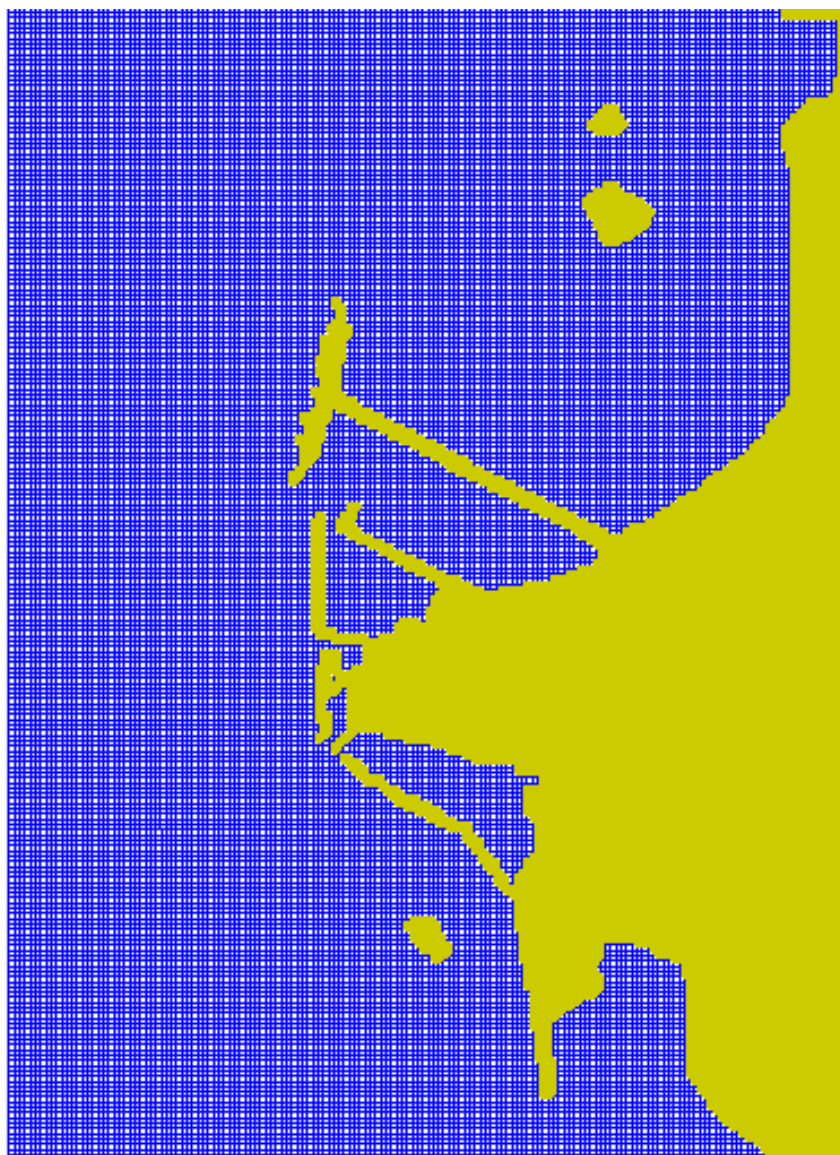


Figura 7: Imagem recortada do Módulo *Flow Input* do *Delft3D* da grade local estabelecida para a região de interesse: Terminal Marítimo Ponta da Madeira e Porto do Itaqui.

3.1.3 Batimetria

A batimetria foi obtida, em sua maior parte, por meio da digitalização das cartas náuticas 410 a 414 (Figura 8) disponibilizadas no site Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil, renovadas em 2018 (DHN, 2018). As cartas, no formato *raster*, foram acessadas no software *QGIS* para sua digitalização, e posteriormente exportadas como arquivo *.csv* e adequadas no padrão aceito pelo *Delft3D* em uma rotina do *Python*. O processamento das imagens *rasters* foi feito no *QGIS*, utilizando a ferramenta *gdal2xyz* para extração dos dados batimétricos.

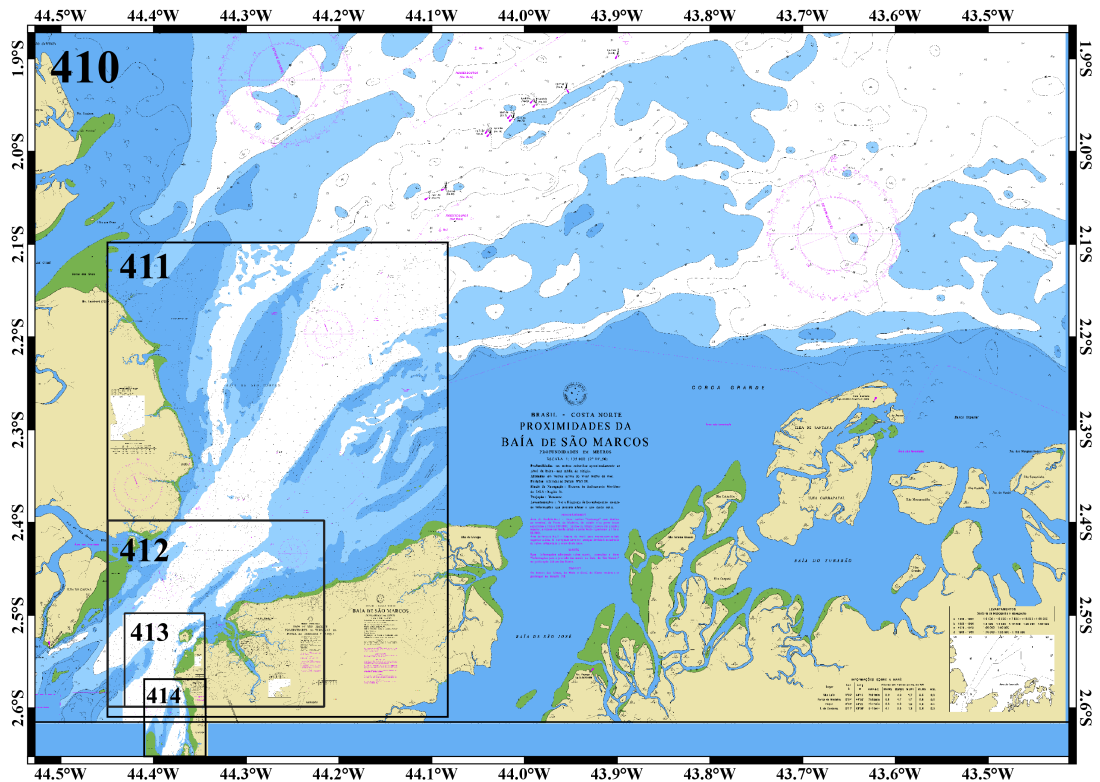


Figura 8: Imagem contendo as cartas náuticas 410 a 414 disponibilizadas pela DHN (DHN, 2018) para obtenção da batimetria.

Foram utilizadas outras fontes para preencher as áreas não contempladas pelas cartas náuticas: as regiões a norte do eixo 2,4°S foram preenchidas pelos dados do *ETOPO* (Amante & Eakins, 2009) e *GEBCO* (Monahan et al., 2008). Em relação ao interior da Baía de São José e o rio Mearim, os dados foram aproximados visualmente aos mostrados nos trabalhos de Coutinho & Moraes (1975) e Czizewski et al. (2020b), respectivamente. Para outras áreas sem dados de batimetria, os valores foram obtidos por extrapolação, através do *QUICKIN* do *Delft3D*, após o processo de interpolação triangular de todos os dados batimétricos (Figura 9).

Quanto à definição da batimetria da grade local, foram utilizados os mesmos dados da grade principal, sendo a região contemplada principalmente pelas cartas náuticas 413 e 414 (Figura 10).

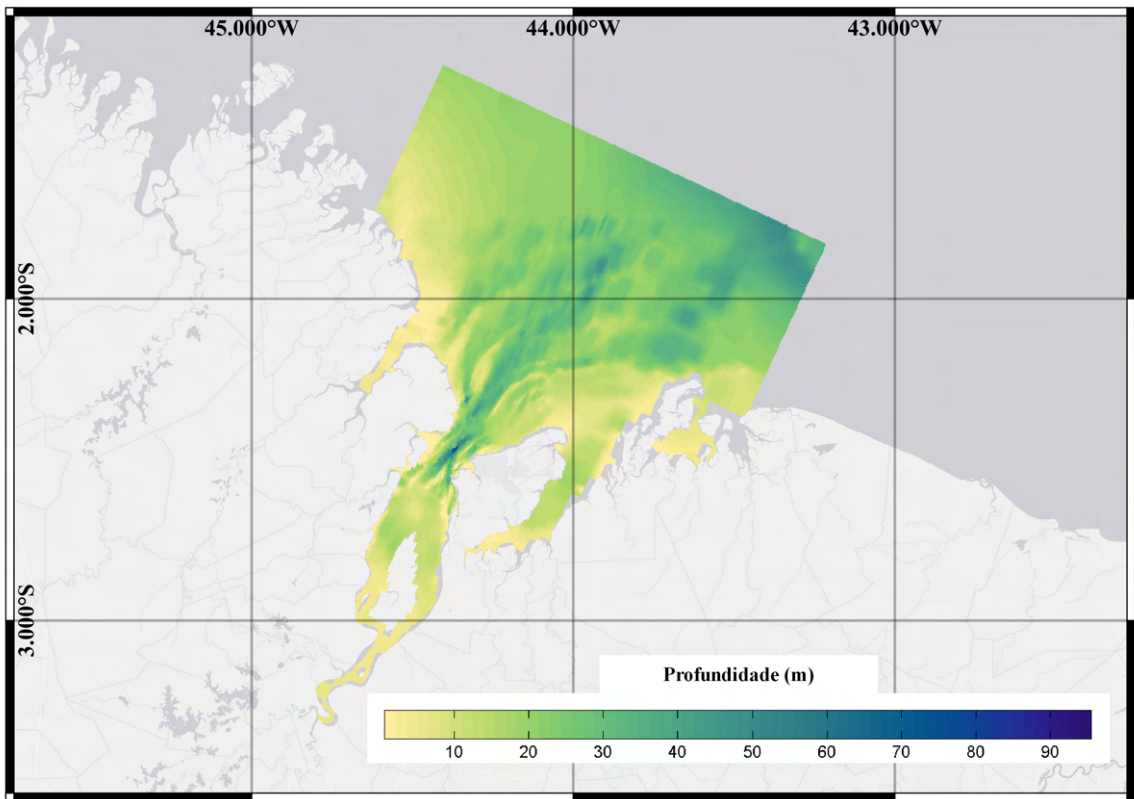


Figura 9: Batimetria da grade regional.

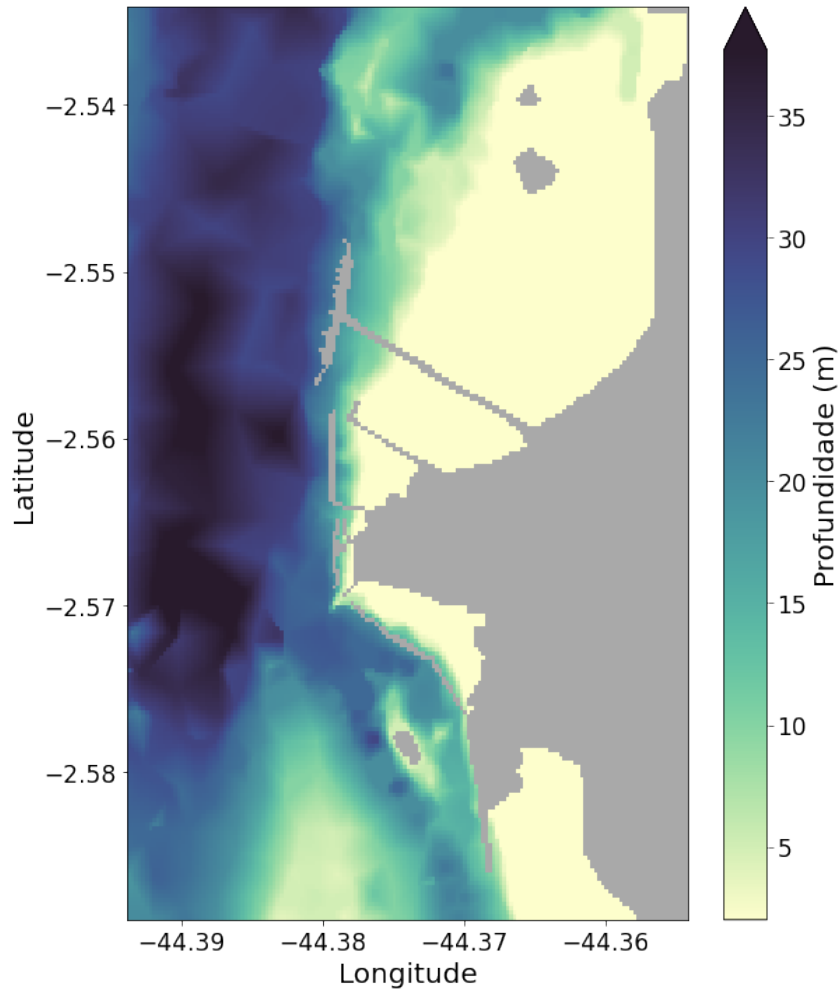


Figura 10: Batimetria de grade local do Terminal Marítimo Ponta da Madeira e do Porto do Itaqui.

3.1.4 Rugosidade do Fundo

O coeficiente de rugosidade foi calculado pela formula de *Manning* (Deltares, 2021):

$$C = \frac{H^{\frac{1}{6}}}{n} \quad (1)$$

Onde: C é o coeficiente de fricção; H é a profundidade; e n é o coeficiente de *Manning*, o qual precisa ser especificado no modelo.

A região de estudo é dotada de uma batimetria de alta variabilidade e com presença de vegetação de manguezal em uma extensa faixa da linha de costa, o que resulta na variabilidade espacial da rugosidade. Portanto, uma matriz do coeficiente de rugosidade foi criada para melhor representar a fricção no fundo nos diferentes pontos da grade. O trabalho de Arcement &

Schneider (1989) foi utilizado como guia para a escolha dos valores do coeficiente.

Após inúmeros testes, a distribuição espacial obteve melhores resultados do coeficiente de rugosidade em função das seguintes faixas de profundidade, conforme a Tabela 2:

Tabela 2: Valores escolhidos do coeficiente de Manning para diferentes faixas de profundidade da Baía de São Marcos (MA).

| Faixa de Profundidade (m) | Coefficiente de Manning (n) |
|--------------------------------------|--|
| 0-2 | 0,080 |
| 2-10 | 0,035 |
| 10-max. | 0,014 |

3.1.5 Pontos Secos

Pontos secos são células da grade que estão localizadas em terra, sendo escolhidos conforme o recorte da costa. Os pontos secos são importantes pois definem as condições nos contornos continentais e ilhas, como por exemplo: correntes normais a esses contornos são nulas. Essas condições em geral definem a circulação nas áreas próximas aos pontos secos, de modo que é essencial adotar um recorte da costa o mais próximo possível da realidade.

3.1.6 Forçantes

As forçantes hidrodinâmica e meteorológica em grande escala definem o comportamento da área de estudo e a região oceânica adjacente, que por sua vez fornece dados de contorno para a modelagem numérica oceanográfica de alta resolução. Os dados utilizados como forçantes no presente trabalho são a seguir detalhados.

Dados oceanográficos de larga escala

Os dados gratuitos do Programa Europeu *CMEMS COPERNICUS Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS)* foram adquiridos por meio de requisição em seu sítio eletrônico. Os obtidos, após deferimento, são constituídos de nível do mar, correntes, temperatura, salinidade e densidade; com resolução espacial de 0,083° e temporal de 24 horas, e 5 camadas de 110m de profundidade do modelo global *GLOBAL ANALYSIS FORECAST PHY 001 024* (CMEMS, 2019).

Ademais, as informações de maré são adquiridas através do *DelftDashboard*, com base no modelo global *Oregon State University TOPEX/Poseidon Global Inverse Solution (TPXO)*,

Versão 7.2, para obtenção das constantes harmônicas das principais componentes da maré⁴ (Egbert & Erofeeva, 2002).

Dados meteorológicos de larga escala

Foram obtidos os dados meteorológicos a partir do modelo global *Climate Forecast System Version 2 (CFRS)*, do *National Center for Environmental Prediction (NCEP)*, com resolução temporal de 1 hora, e resolução espacial variável, conforme os parâmetros utilizados pelo modelo, sendo escolhida sempre a maior resolução disponível (Saha et al., 2017). Os dados são constituídos por: pressão atmosférica, ventos, nebulosidade, temperatura e umidade relativa (Tabela 3).

Tabela 3: Informações dos parâmetros atmosféricos selecionados para o trabalho obtidos pelo modelo global *CFRS*.

| Parâmetro Atmosférico | Resolução Espacial | Especificidade Vertical |
|------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Componentes do Vento | 0,205° | 10m acima da superfície |
| Pressão Atmosférica | 0,5° | nível médio do mar |
| Umidade Relativa | 0,5° | 2m acima da superfície |
| Nebulosidade | 0,205° | comprimida em uma única camada |
| Temperatura do Ar | 0,205° | superfície do mar |

Dados de descarga fluvial

Dados de vazões fluviais foram extraídos do Banco de Dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), do Governo Federal. Os mesmos são gratuitos e de livre acesso ao público. Esses dados foram obtidos através do sítio eletrônico da agência, no sistema *HIDROWEB* (ANA, 2017).

Foram analisados dados de vazão de seis estações fluviométricas (Figura 11): três estações - Aratói Grande, Bacabal e Pindaré-Mirim - foram somadas para compor o ponto de descarga Q1, duas - Nina Rodrigues e São Benedito - somadas para compor Q3, e a estação Cantanhede, sozinha, compôs Q2. Em *Python*, uma rotina foi estabelecida para selecionar e obter as médias

⁴Componentes consideradas pelo modelo *TPXO*: M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm, Ssa

mensais de vazão, assim como da temperatura da água, para cada mês de processamento; nos casos de falta de dados, foram consideradas médias trimestrais de dados.

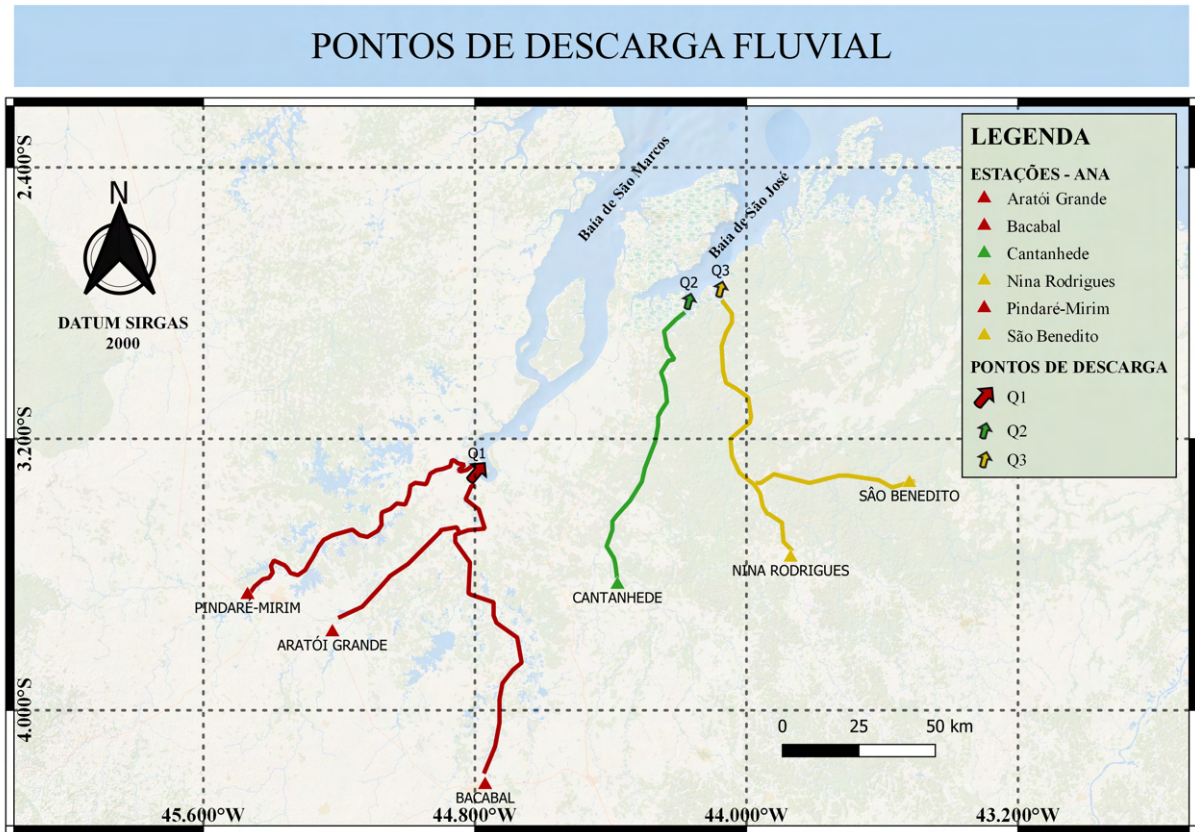


Figura 11: Mapa das estações fluviais da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico e dos pontos de descargas fluviais inseridos na grade principal.

Para as condições de contorno de salinidade, foi usado um modelo simples, com a definição dos valores a partir dos dados mensais de pluviosidade, considerando que a região possui duas estações com índices pluviométricos bem definidos. A Tabela 4 mostra os dados sistematizados, que foram utilizados no modelo deste trabalho.

Tabela 4: Valores mensais de vazão, temperatura e salinidade utilizados como condições de contorno no modelo hidrodinâmico da Baía de São Marcos (MA).

| PONTO DE DESCARGA | Mês de 2020 | Vazão Média Mensal (m³/s) | Temperatura da água (°C) | Salinidade (PSU) |
|--------------------------|--------------------|---|---------------------------------|-------------------------|
| Q1 | Fevereiro | 638,915 | 29 | 7 |
| Q1 | Março | 1508,139 | 29 | 5 |
| Q1 | Abril | 2182,599 | 29 | 5 |
| Q1 | Agosto | 132,241 | 32,5 | 13 |
| Q1 | Setembro | 108,903 | 32,5 | 15 |
| Q1 | Outubro | 101,737 | 32,5 | 15 |
| Q2 | Fevereiro | 563,286 | 28 | 7 |
| Q2 | Março | 1046,433 | 28 | 5 |
| Q2 | Abril | 1260,655 | 28 | 5 |
| Q2 | Agosto | 36,791 | 32 | 13 |
| Q2 | Setembro | 29,281 | 32 | 15 |
| Q2 | Outubro | 24,431 | 32 | 15 |
| Q3 | Fevereiro | 361,189 | 28 | 7 |
| Q3 | Março | 935,461 | 28 | 5 |
| Q3 | Abril | 870,561 | 28 | 5 |
| Q3 | Agosto | 66,366 | 32 | 13 |
| Q3 | Setembro | 45,152 | 32 | 15 |
| Q3 | Outubro | 38,343 | 32 | 15 |

3.2 TRATAMENTO DOS DADOS

3.2.1 Pré-Processamento

Dados batimétricos

Após aquisição das amostras batimétricas no software *QGIS*, foi criada uma rotina simples no *Python* para adequá-los ao formato usado pelo *Delft3D*, alterando o arquivo de *.csv* para *.xyz*. A batimetria da grade foi construída na ferramenta *QUICKIN* do *Delft3D* pela interpolação triangular dos dados originais. Entretanto, não houve a cobertura total da grade por este procedimento, sendo necessário o uso da extrapolação no *QUICKIN*.

A extrapolação foi feita com cautela: foram utilizados polígonos desenhados pelo autor para o direcionamento da extrapolação, levando em conta as células que deveriam ser usadas neste processo, no intuito de remover dados inadequados. Finalizando a aquisição da batimetria, foi considerada uma profundidade mínima de 2m para todo o domínio da grade, a fim de preservar a estabilidade do modelo.

Dados de modelos globais

Após a aquisição dos dados globais, há a necessidade de remodelá-los para um tipo de formato que o *Delft3D* reconheça: os dados oceanográficos do *CMEMS* e *TPXO* foram convertidos pelo pacote *Open Earth Tools (OET)* do software *Matlab*, para criação das forçantes oceanográficas impostas em cada borda do modelo, para todo o período de processamento.

Os dados meteorológicos globais, por sua vez, foram concatenados em um só arquivo para cada parâmetro atmosférico: este procedimento foi executado pelo pacote *NetCDF Operator* no terminal *Cygwin*, emulador de terminal *Linux* em *Windows*. Na sequência, para conversão dos dados em um formato reconhecido pelo *Delft3D*, rotinas do pacote *OET* foram utilizadas novamente.

3.2.2 Modelagem Numérica

Segundo Harari (2015) há 2 tipos de modelos de circulação marítima: geral e específico. O modelo utilizado neste trabalho é classificado como geral, o qual se preocupa em simular o ambiente da maneira mais completa possível, levando em conta as forçantes de maré, meteorológicas e de densidade. O software *Delft3D* foi o escolhido para executar as simulações hidrodinâmicas, módulo *FLOW*.

Foi optado, neste trabalho, pelo modelo tridimensional de coordenadas verticais sigma σ , onde as espessuras das camadas são menores próximo à superfície e ao fundo (Deltares, 2021). As coordenadas σ tem como vantagem um maior detalhamento nas interfaces verticais do modelo hidrodinâmico: região de cisalhamento das correntes pelo atrito com o fundo e, na indução de correntes pela ação direta dos ventos; as espessuras das 15 camadas sigma na vertical consideradas são fornecidas na Tabela 5. As simulações foram realizadas para as condições típicas das estações de inverno (Fevereiro, Março e Abril) e verão (Agosto, Setembro e Outubro): dentre os meses simulados de cada estação foi escolhido um para representação de resultados no presente trabalho, o de melhor desempenho estatístico.

Tabela 5: Espessuras das 15 camadas verticais Sigma σ estabelecidas para o modelo numérico hidrodinâmico deste trabalho.

| Nível Vertical | Espessura (%) |
|----------------|---------------|
| σ 1 | 2,5 |
| σ 2 | 2,5 |
| σ 3 | 2,5 |
| σ 4 | 2,5 |
| σ 5 | 5 |
| σ 6 | 5 |
| σ 7 | 10 |
| σ 8 | 10 |
| σ 9 | 10 |
| σ 10 | 10 |
| σ 11 | 10 |
| σ 12 | 10 |
| σ 13 | 10 |
| σ 14 | 5 |
| σ 15 | 5 |

O modelo foi processado no Centro de Computação Avançada *High Performance Computing (HPC)* da USP. O passo de tempo utilizado foi de 0,25 minutos tanto para a grade regional quanto para a local. Após inúmeros testes com os parâmetros de rugosidade e viscosidade, obteve-se os valores de 300m²/s e 30m²/s para os coeficientes de viscosidade horizontal e vertical, respectivamente. Foram estabelecidos os contornos abertos para as duas grades de modo a ter o melhor aproveitamento possível de informações, do modelo global para o regional, e do regional para a local. Nos processamentos das duas grades foram utilizados as condições de contorno do tipo *Riemman*, que minimiza reflexões das oscilações nos contornos (Deltares, 2021). Para coeficientes não citados no presente texto, foram mantidos os valores padrão estabelecidos pelo *Delft3d* (Deltares, 2021).

Delft3D - módulo FLOW

A modelagem tridimensional do módulo *FLOW* resolve numericamente o sistema de equações hidrodinâmicas para um fluido: estratificado, incompressível, de águas rasas, assumindo a aproximação de Boussinesq, em um referencial não inercial (Deltares, 2021):

Eq. da Continuidade:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + H \left(\frac{\partial \vec{U}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} \right) - Q = 0 \quad (2)$$

Eq. do Movimento Horizontal:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \frac{\partial \vec{U}}{\partial x} + \vec{V} \frac{\partial \vec{U}}{\partial y} + \frac{\vec{W}}{H} \frac{\partial \vec{U}}{\partial \sigma} - f \vec{V} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + A_H \nabla^2 \vec{U} + \frac{1}{H^2} A_V \frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial \sigma^2} + M_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{U} \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + \vec{V} \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + \frac{\vec{W}}{H} \frac{\partial \vec{V}}{\partial \sigma} + f \vec{U} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + A_H \nabla^2 \vec{V} + \frac{1}{H^2} A_V \frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial \sigma^2} + M_y \quad (4)$$

Eq. do Equilíbrio Hidrostático:

$$\frac{\partial p}{\partial \sigma} = -g\rho H \quad (5)$$

Eq. de Transporte de Calor

$$\frac{\partial (TH)}{\partial t} + \frac{\partial (\vec{U} TH)}{\partial x} + \frac{\partial (\vec{V} TH)}{\partial y} + \frac{\partial (\vec{W} T)}{\partial \sigma} = H(D_H \nabla^2 T) + \frac{1}{H^2} (D_V \frac{\partial^2 T}{\partial \sigma^2}) - \lambda_d HT + S_T \quad (6)$$

Eq. de Transporte de Sal

$$\frac{\partial (SH)}{\partial t} + \frac{\partial (\vec{U} SH)}{\partial x} + \frac{\partial (\vec{V} SH)}{\partial y} + \frac{\partial (\vec{W} S)}{\partial \sigma} = H(D_H \nabla^2 S) + \frac{1}{H^2} (D_V \frac{\partial^2 S}{\partial \sigma^2}) - \lambda_d HS + S_S \quad (7)$$

Onde: \vec{U} , \vec{V} e \vec{W} são respectivamente as componentes zonal, meridional e vertical das correntes; t é o tempo; H é a profundidade; f é o parâmetro de Coriolis; ρ é a densidade da água; $-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}$ e $-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y}$ são gradientes de pressão hidrostática nas direções x e y , respectivamente; A_H é o coeficiente de difusão turbulenta horizontal de momento; A_V é o coeficiente de difusão turbulenta vertical de momento; M_x e M_y são fontes adicionais de movimento nas direções x e y , respectivamente; p é a pressão hidrostática; g é a aceleração da gravidade; η é a elevação do nível do mar; Q representa fontes de contribuições de descarga fluvial por unidade de área; T é a temperatura; S é a salinidade; D_H é o coeficiente de difusão horizontal de calor e sal; D_V é o coeficiente de difusão vertical de calor e sal; λ_d representa o processo de decaimento de primeira ordem de calor e sal; e, por fim, S_T e S_S são fontes adicionais de temperatura e salinidade, respectivamente.

3.2.3 Pós-Processamento

Após a obtenção dos resultados, foram utilizados os softwares *Python* e *Matlab* para obtenção de séries temporais e análises estatísticas. Para a confecção de mapas temáticos, utilizou-se o módulo do *Delft3d QUICKPLOT* para a geração das figuras, que posteriormente foram direcionadas ao software *QGIS*, a fim de adicionar elementos importantes ao mapa. O sistema de alerta construído para a grade local foi desenvolvido por completo no software *Python* após a conversão dos dados de saída do *Delft3D* em *NetCDF*.

Pontos de monitoramento

Pontos de monitoramento foram distribuídos nas grades regional e local, para procedimentos posteriores de análise e validação. A Tabela 6 e a Figura 12 mostram os pontos de monitoramento estabelecidos neste trabalho para a grade regional.

Tabela 6: Coordenadas e profundidade dos pontos de monitoramento selecionados, divididos por finalidade, para a grade regional.

| Grupo | Nome do Ponto | Latitude (°S) | Longitude (°W) | Profundidade (m) |
|--|--------------------|---------------|----------------|------------------|
| Pontos para Validação com dados de modelos globais | PLAT_P1 | -1,4901 | -44,3285 | 16,00 |
| | PLAT_P2 | -1,5859 | -44,1270 | 19,75 |
| | PLAT_P3 | -1,6685 | -43,9488 | 21,25 |
| | PLAT_P4 | -1,7464 | -43,7815 | 24,00 |
| | PLAT_P5 | -1,8232 | -43,6186 | 26,50 |
| | PLAT_P6 | -1,9002 | -43,4554 | 34,40 |
| Pontos para Validação com dados locais do ADCP | DOLF_15 | -2,5484 | -44,3785 | 24,50 |
| | DOLF_08 | -2,5525 | -44,3804 | 29,00 |
| | PIER_01 | -2,5684 | -44,3805 | 26,00 |
| Pontos utilizados para análises complementares | Canal__Nav_Entrada | -1,7961 | -43,8163 | 25,00 |
| | Canal_Nav_Meio | -2,4621 | -44,3616 | 96,00 |
| | Rio_Merim | -3,0845 | -44,6041 | 6,00 |

PONTOS DE MONITORAMENTO DA GRADE REGIONAL

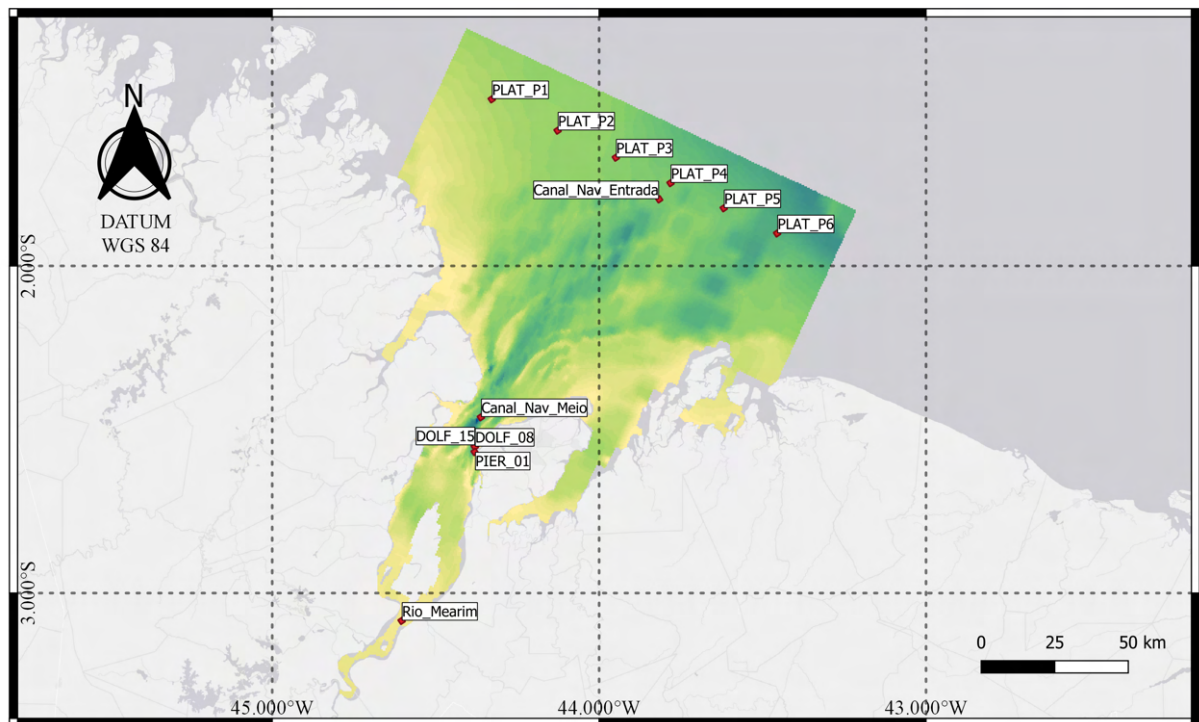


Figura 12: Distribuição dos pontos de monitoramento para a grade regional do modelo numérico hidrodinâmico da Baía de São Marcos

Uma radial de pontos de monitoramento paralela à linha de costa, adjacente à Baía de São Marcos, foi estabelecida para a comparação dos resultados das simulações deste trabalho com resultados de modelos globais. Adentrando a baía, mais 3 pontos de monitoramento foram utilizados a fim de validar a modelagem com dados locais. Os demais pontos de monitoramento foram utilizados para análises suplementares.

As Figuras 14 e 13 mostram os pontos de monitoramento considerados neste trabalho para a grade local. Duas radiais de pontos de monitoramento perpendiculares aos Píeres 1 e 4 norte (dolfin 15) foram estabelecidas para comparação de saídas do modelo com medições dos correntômetros instalados nos respectivos Píeres.



Figura 13: Distribuição dos pontos de monitoramento para a grade local do modelo numérico hidrodinâmico, Terminal Ponta da Madeira, dolfin 15.



Figura 14: Distribuição dos pontos de monitoramento para a grade local do modelo numérico hidrodinâmico, Terminal Ponta da Madeira, Píer 1.

Validação e calibração do modelo hidrodinâmico

A validação do modelo consiste em comparar estatisticamente as séries temporais de saída da simulação com um conjunto de dados ou informações independentes, visando inferir a qualidade dos resultados obtidos (Harari, 2015). Neste trabalho foram utilizados dados coletados *in loco* e dados hidrodinâmicos de modelos globais amplamente conhecidos.

Os dados meteorológicos de larga escala utilizados como forçante (*CFRS*) foram previamente validados com dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), no intuito de inferir sua qualidade. Foram obtidos dados das estações A203 e 82280 (INMET, 2014) para as variáveis: pressão atmosférica, componentes do vento, temperatura, umidade relativa e precipitação, sendo ambas situadas na mesma posição com latitude 2,5266°S, longitude 44,2136°W e altitude: 54 m. Para a validação da pressão atmosférica, os dados do *CFRS* foram ajustados para a altitude das estações.

Foram simulados seis meses de 2020 e escolhidos os meses de abril e setembro para a representação dos resultados. As variáveis temperatura e salinidades da superfície do mar foram comparadas com dados oceanográficos de larga escala do *Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) - Global Ocean Forecasting System (GOFS) 3.1* (Metzger et al., 2009), com resolução espacial de 0.08° e temporal de 3 horas, para os pontos de monitoramento do grupo *PLAT_Pn*, situados na plataforma. As variáveis nível do mar e as componentes da corrente de superfície dos pontos de monitoramento do grupo *PLAT_Pn* foram comparadas com dados do *CMEMS*, do modelo *Global Analysis Forecast PHY 001 024 Hourly*, com resolução espacial de 0.083° e temporal de 1 hora (CMEMS, 2019).

No interior da Baía de São Marcos foram utilizados dados de 3 perfiladores de correntes acústico na horizontal (*ADCP*), modelo *Argonaut-SL-500* da marca *SonTek*. Os equipamentos estão instalados no Terminal Ponta da Madeira, localizados nos dolphins 8 do Píer 4 Sul (latitude: -2,5521°; longitude: -44,3794°), 15 do Píer 4 Norte (latitude: -2,5480°; longitude: -44,3784°) e 1 do Píer 1 (latitude: -2,5674°; longitude: -44,3788°). Atendendo às normas da Marinha do Brasil, os dados disponíveis para o presente trabalho foram obtidos em levantamento hidrográfico, pela empresa HidroMares, no projeto Sistema de Monitoramento, em Tempo Real Meteo-Oceanográfico (SISMO) contratado pela companhia da VALE S.A. (De Caroli et al., 2017).

O *ADCP* efetuou medições de intensidade e direção das correntes, perpendicular aos píeres,

nas distâncias de 0m, 30m, 50m, 70m, 90m e 110m em relação ao equipamento. O mesmo, também, é dotado de um sensor de pressão que permite a medição do nível da água acima do equipamento. Para a comparação dos dados do *ADCP* com os resultados da grade regional, foi necessário fazer uma média das camadas verticais do modelo (σ : 2 a 7) e horizontais do equipamento (30m a 110m). A camada adjacente ao píer (0m) e de superfície (σ : 1) foram removidas das comparações, visto que os equipamentos estão instalados em placas nos alicerces dos píeres, permanentemente imersos na água: portanto, a influencia da estrutura na velocidade da corrente imediatamente adjacente ao equipamento não é captada pela célula da grade regional de espaçamento 120m, e, a velocidade na camada superficial do modelo não é medida pelo equipamento.

A validação do modelo local foi feita apenas pela comparação com os dados dos correntômetros. A resolução espacial da grade local, uniforme, é de 25m, portanto cada célula de medição do *ADCP* foi comparada com uma célula do modelo. Foram realizadas medias das camadas verticais σ : 1 a 7. Em contrapartida na validação do modelo regional, foi levado em consideração a célula adjacente ao píer e da superfície, devido ao espaçamento menor das células da grade.

Foram utilizados três parâmetros estatísticos para a validação dos resultados. Nas fórmulas a seguir apresentadas, se considerou a letra *O* para os dados observados e a letra *M* para os resultados do modelo.

Coefficiente de correlação de Pearson (r):

O coeficiente de correlação de Pearson mede a relação linear entre duas bases de dados, sendo este coeficiente um número adimensional. Os valores mínimo e máximo são -1 e 1, que indicam uma relação linear perfeita, inversa e direta, respectivamente. Em contrapartida, o valor 0 mostra que a relação linear não existe (Ferreira, 2015):

$$r = \frac{\sum(O_i - \bar{O})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum(O_i - \bar{O})^2 \sum(M_i - \bar{M})^2}} \quad (8)$$

Erro Absoluto Médio Relativo (RMAE):

O Erro Absoluto Médio Relativo é um parâmetro estatístico oriundo do Erro Absoluto Médio (MAE) e tem como vantagem ser menos sensível a valores extremos (Reich et al., 2016). Quanto mais próximo ao 0, melhor o desempenho do modelo. Valores abaixo de 0,2 são considerados excelentes (Walstra et al., 2001).

$$RMSE = \frac{\sum |O_i - M_i|}{\sum |O_i|} \quad (9)$$

Coefficiente Skill:

O coeficiente Skill, ou índice de concordância, é definido de acordo com a equação abaixo; valor maior que 0,8 indica que a modelagem apresenta reduzido nível de erros, sendo 1 o seu valor ideal Willmott (1981).

$$Skill = 1 - \frac{\sum |M_i - O_i|^2}{\sum (|M_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (10)$$

Mapas temáticos

Após a validação e calibração, foram confeccionados mapas temáticos para a região da Baía de São Marcos, considerando diversas condições hidrodinâmicas: nos períodos de preamar, baixamar, picos de vazante e enchente, na sizígia e na quadratura - para resultados de nível do mar, correntes, temperatura e salinidade. Os mapas, provindos da grade regional, são sempre referentes a 0 h GMT e as unidades são em m/s para as correntes.

Sistema de alerta

Um sistema de alerta foi implantado com base no documento emitido pela Capitania dos Portos do Maranhão, Norma de Manobra para o Complexo Portuário da Baía de São Marcos (NPCP) (NPCP, 2022). As regras estipuladas pela NPCP para a realização de manobras nos Píeres 1 e 4 foram analisadas em conjunto com os dados dos ADCPs. A partir desta análise, uma corrente limite foi estimada para a operação segura de atracação e desatracação; posteriormente, o alerta de corrente foi estabelecido para a grade local. Os resultados do sistema de alerta, provindos da grade local, estão em GMT -3, em nós, e foram simulados apenas para o mês de abril, devido ao tempo limite para finalizar este trabalho.

O manual leva em consideração a amplitude da maré e as especificações do navio e da própria manobra (Figura 15). Onde: DWT (*Dead Weight Tonnage*) é o peso, em toneladas, que o navio consegue carregar; BE e BB são manobras realizadas de boreste e bombordo, respectivamente; A é a amplitude de maré; BM e PM são períodos de baixamar e preamar, respectivamente. O presente estudo considerou conjuntamente todas as restrições das diferentes especificações, exceto para o Píer 1, no qual se diferenciou as restrições impostas pela amplitude

de maré.

| PÍER 1 | | |
|--------------------------|-------|--|
| A t r a c a ç ã o | | |
| DWT | BORDO | PERÍODO DE MANOBRA |
| Até 210k | BE | BM até 1h30min antes da PM (com $A \leq 4,5m$) |
| > 210k | BE | BM e 2h antes da PM |
| Até 210k | BB | 1h30min antes da BM 1h30min antes da PM até PM (com $A \leq 4,5m$) |

| D e s a t r a c a ç ã o | | |
|--------------------------------|-------|---|
| DWT | BORDO | PERÍODO DE MANOBRA |
| Até 260k | BE | $A \leq 4,5m$ BM até 1h antes da PM. Quando a saída for 1h antes da PM, a entrada será 1h30min antes da PM |
| | | $A > 4,5m$ BM e 2h antes da PM Com simultânea (s): BM e de 2h 30min antes da PM até 2h antes da PM |
| > 260k | BE | BM e 2h antes da PM Com simultânea (s): BM e de 2h 30min antes da PM até 2h antes da PM |
| Até 210k | BB | 1h antes da BM até 30min antes da BM 1h30min antes da PM até a PM, com $A \leq 4,5m$ |

| PÍER 4 NORTE | |
|--------------------------|---|
| A t r a c a ç ã o | |
| BORDO | PERÍODO DE MANOBRA |
| BE | BM e 2h antes da PM (em caráter experimental) |

| D e s a t r a c a ç ã o | | |
|--------------------------------|-------|--|
| DWT | BORDO | PERÍODO DE MANOBRA |
| Até 330K | BE | BM e 2h antes da PM Com simultânea (s): 30 min antes da BM e 2h antes da PM |
| > 330K | BE | BM e 1h 30min antes da PM Com simultânea (s): 30 min antes da BM e 2h antes da PM |

Observações:

- a) Não serão realizadas manobras por corrente no Pier 4; e
- b) Manobras serão realizadas com dois Práticos.

Figura 15: Regras estipuladas pela Capitania do Portos do Maranhão para manobras de navios no Píer 1 e Píer 4 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira (Fonte: NPCP (2022))

Distribuição de Densidade

A distribuição de densidade na grade local foi incluída neste trabalho devido a importância do monitoramento desta variável para a arqueação de navios mercantes e, conseqüentemente, do volume seguro de carga permitido para o seu carregamento. Duas seções adjacentes aos Píeres 1 e 4 foram analisadas para esta variável.

4 RESULTADOS

4.1 CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS TÍPICAS

A climatologia da Baía de São Marcos apresenta dois cenários bem distintos ao longo do ano (Rodríguez et al., 2016). O deslocamento meridional da ZCIT no decorrer do ano é o principal sistema responsável por essa distinção (Cavalcanti, 2016). A série temporal extraída do modelo *CFRS*, para comparação com os dados do INMET, provém de um *pixel*, que representa uma área de tamanho determinado pela resolução do modelo. Em contrapartida, a série temporal do INMET provém de um ponto de coleta de dados. Portanto, a comparação de uma área em relação a um ponto tem limitações de precisão, que devem ser levadas em conta na análise que segue.

4.1.1 Pressão Atmosférica

Os dados de pressão atmosférica utilizados como forçante no modelo deste trabalho estão bem correlacionados com os dados locais, o que é confirmado pelos parâmetros estatísticos comparativos (Figura 16). A média da pressão atmosférica do primeiro semestre do ano foi de $1005,69 \pm 1,44$ hPa para os dados do *CFRS* e $1005,92 \pm 1,54$ hPa para os do INMET. No segundo semestre: $1005,14 \pm 1,85$ hPa e $1005,46 \pm 1,78$ hPa, respectivamente.

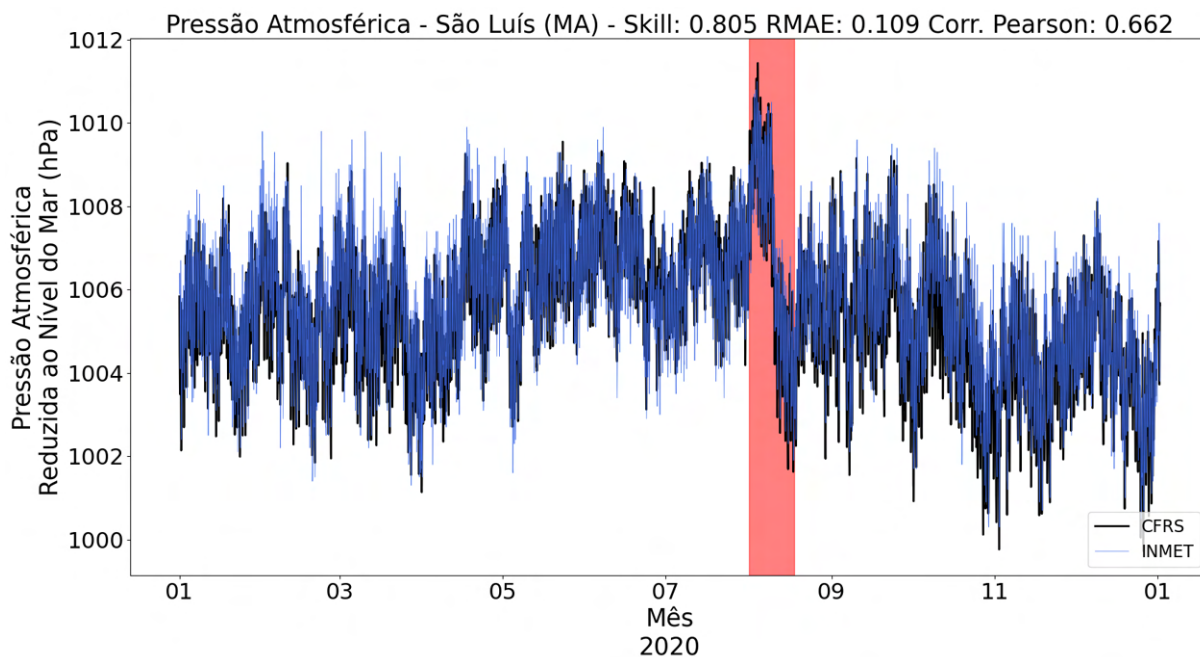


Figura 16: Comparação estatística das séries temporais de pressão atmosférica entre os dados do modelo global *CFRS* e da estação A203 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o ano de 2020.

No intuito de verificar se a variação abrupta encontrada em todas as variáveis atmosféricas para o ano de 2020 representava a climatologia da região, e não uma anomalia eventual, a série temporal de 2019 à 2021 foi analisada (Figura 17). Observa-se, nesta figura, que o padrão de variação abrupta também ocorreu no ano anterior e posterior a 2020.

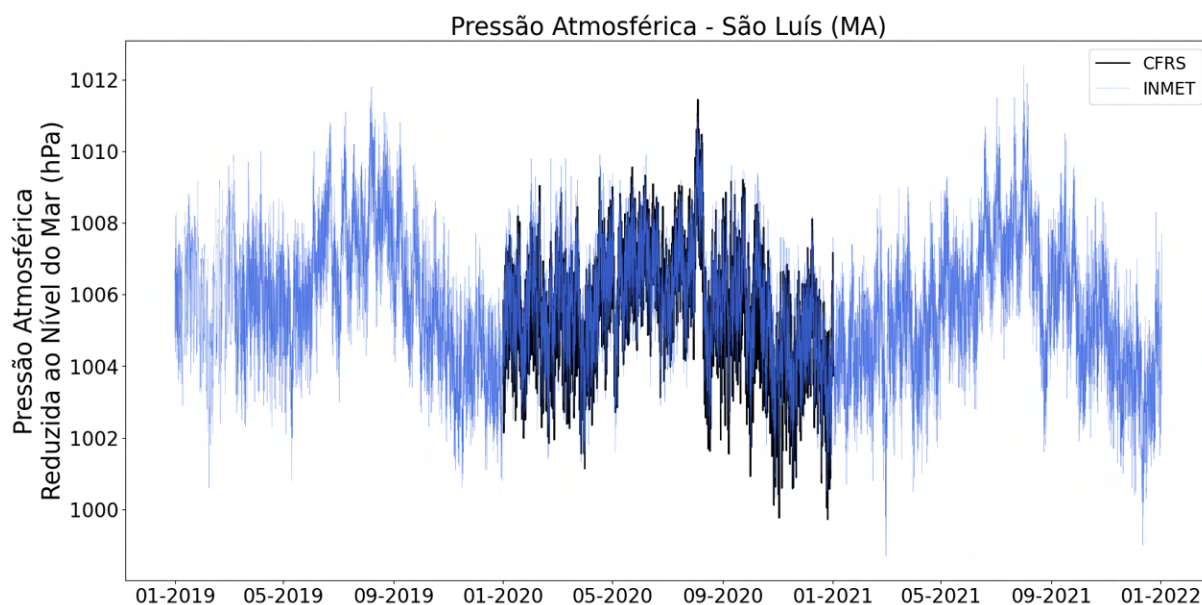


Figura 17: Série temporal da pressão atmosférica para o período de 2019 a 2021. Dados do Instituto Nacional de Meteorologia e do modelo global *CFRS*.

A variação abrupta da pressão, ressaltada pelo marcador vermelho na figura 16, marca a mudança de estação, de inverno para verão. Variações abruptas similares foram observadas em todas as demais variáveis atmosféricas analisadas no presente estudo.

4.1.2 Temperatura Atmosférica

A temperatura atmosférica média do *CFRS* foi bastante próxima à média dos dados medidos pelo INMET. Nos meses de inverno (janeiro - junho), o *CFRS* forneceu a média de $26,22 \pm 2,05^\circ\text{C}$ e no verão (julho - dezembro), $27,79 \pm 2,73^\circ\text{C}$. Em relação ao INMET, foi medido, na média, $26,38 \pm 1,98^\circ\text{C}$ para o inverno e $27,37 \pm 2,24^\circ\text{C}$ para o verão.

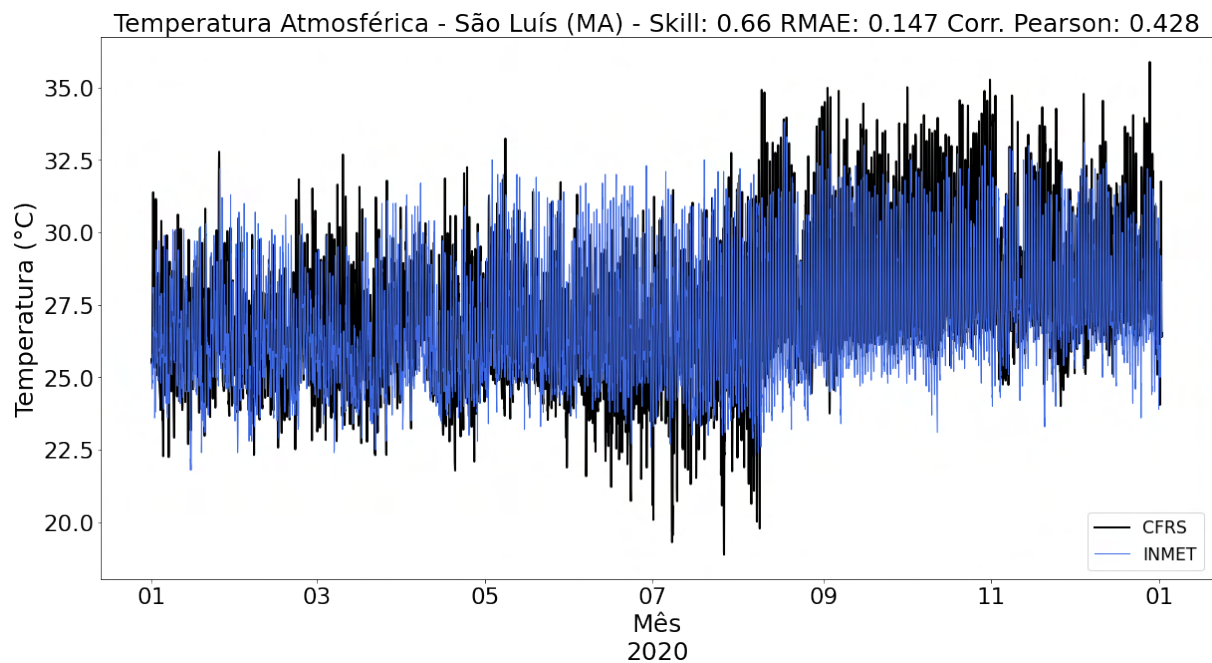


Figura 18: Comparação estatística das séries temporais de temperatura atmosférica entre os dados do modelo global *CFRS* e da estação A203 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o ano de 2020.

Há um aumento em torno de 1°C entre os dois cenários sazonais. O modelo global *CFRS* obteve boa correlação, nos limites da comparação, com os dados do INMET para o ano de 2020; observa-se que os dados do modelo global apresentaram maior variação ($\pm 1,5^\circ\text{C}$) do que os dados locais ($\pm 1^\circ\text{C}$). Essa diferença está relacionada aos diferentes modo de assimilação do dado, já anteriormente mencionada: *pixel* x pontual. A temperatura no modelo *CFRS* sofre influência do continente e da Baía de São Marcos, em contrapartida, os dados obtidos pelo INMET não.

4.1.3 Umidade Relativa

Os valores médios de umidade relativa do ar nos dados do *CFRS* e do INMET, para os meses de inverno (janeiro - junho) e verão (julho - dezembro) foram, respectivamente: $89,67 \pm 5,07\%$ e $78,13 \pm 9,27\%$ do *CFRS*, e $88,06 \pm 10,29\%$ e $78,00 \pm 11,53\%$ do INMET.

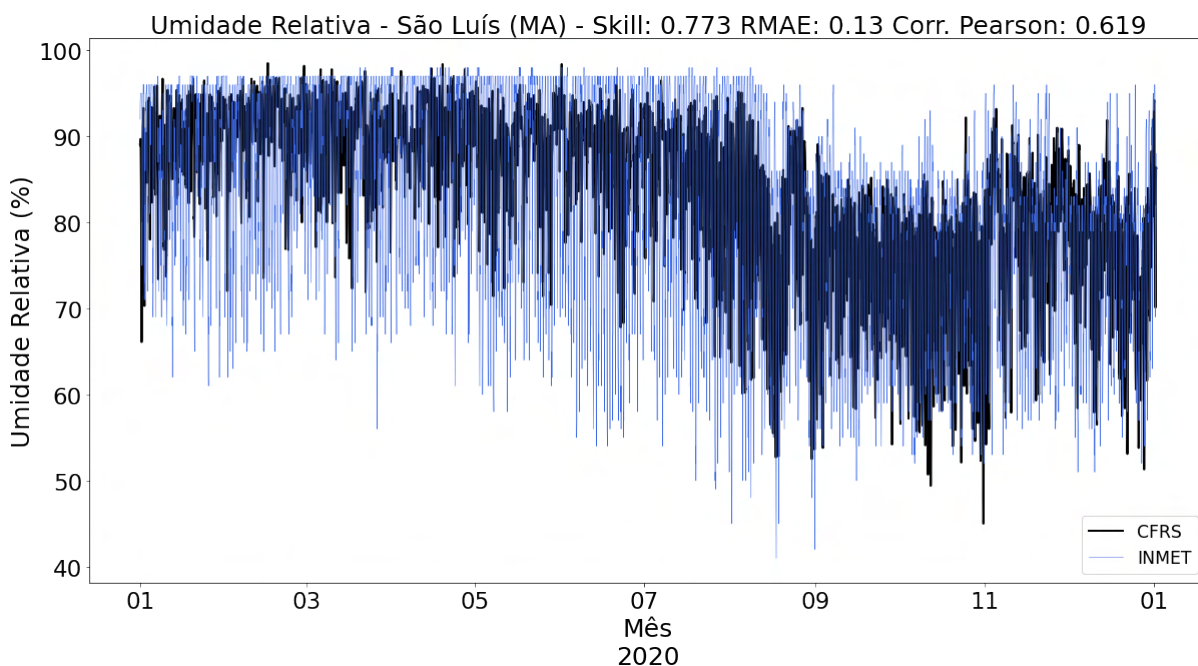


Figura 19: Comparação estatística das séries temporais de umidade relativa do ar entre os dados do modelo global *CFRS* e da estação A203 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o ano de 2020.

Observa-se que os dados medidos pela estação do INMET apresentam um teto de medição próximo ao 95%. Essa limitação se dá, provavelmente, por problemas no sensor. Este limitante, para a comparação, interfere nos resultados estatísticos, contudo, os parâmetros apresentaram ótimos índices para esta variável.

4.1.4 Precipitação

A precipitação não foi um parâmetro introduzido no modelo, porém, sua análise é de interesse para este estudo (Figura 20). Nos meses de inverno, período caracterizado por grandes volumes de chuva, a precipitação apresentou valor médio diário de $14,08 \pm 22\text{mm}$ e no verão, caracterizado pela seca, de $0,81 \pm 3\text{mm}$. A precipitação segue o padrão sazonal típico das demais variáveis atmosféricas acima citadas. Em 2020, no inverno, a média diária, ultrapassa 50mm em diversos dias, o que é considerado como chuva muito forte.

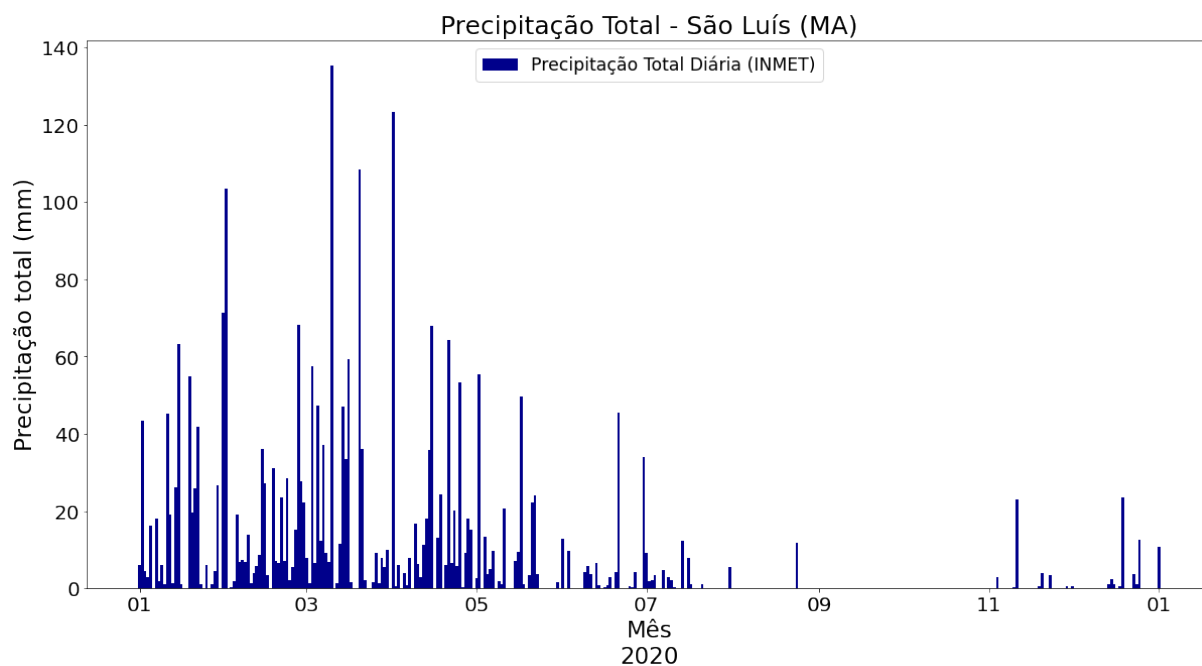


Figura 20: Série temporal da precipitação média diária da estação 82280 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o ano de 2020.

4.1.5 Velocidade e Direção do Vento

A variável intensidade do vento, dentre todas as demais, foi a que obteve piores índices estatísticos comparativos. A intensidade do vento do modelo global é, na média, maior que a medida localmente. Esta diferença fica mais discrepante entre os meses de agosto e dezembro (Figura 21): $3,94 \pm 1,25$ m/s do *CFRS* e $2,15 \pm 1,10$ m/s do INMET. No inverno, os valores das médias são mais próximos: $2,42 \pm 0,94$ m/s e $1,17 \pm 0,98$ m/s, respectivamente. O fato da estação meteorológica estar localizada em um ponto dentro do continente contribui para as discrepâncias entre as médias citadas.

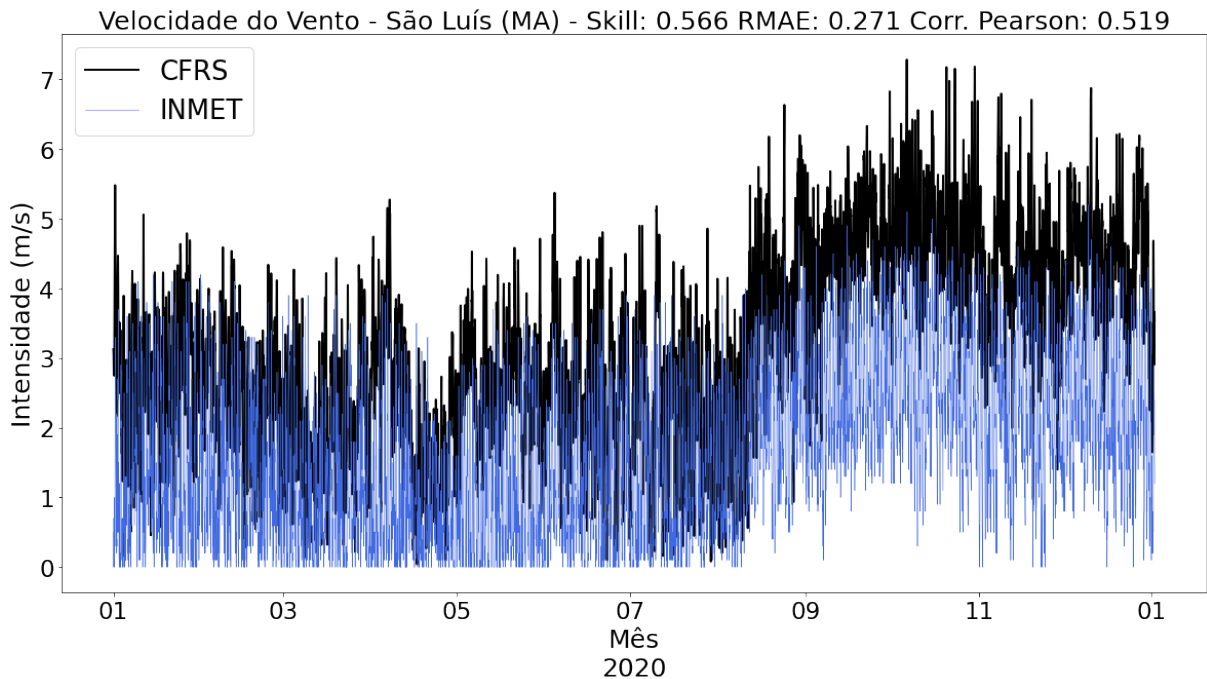


Figura 21: Comparação estatística das séries temporais da intensidade do vento entre os dados do modelo global *CFRS* e da estação A203 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para o ano de 2020.

O gráfico das rosas dos ventos, considerando sua intensidade e direção, para o mês de abril de 2020 (Figura 22), indica uma predominância na frequência e maior intensidade dos ventos do dados do *CFRS* provindo dos quadrantes norte-nordeste e nordeste. Em contrapartida, os dados do INMET mostram uma maior diversidade: a maior frequência está em ventos de leste e leste-sudeste; e as maiores intensidades provém de ventos de 0° a $22,5^\circ$, com máximos na faixa de 3 a 4m/s.

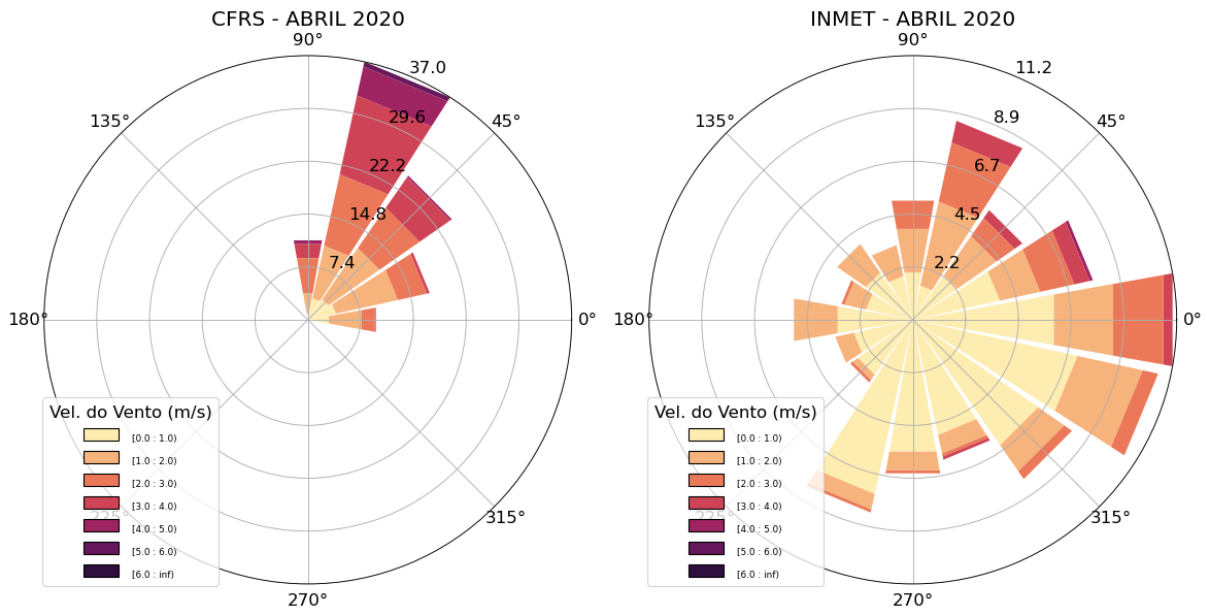


Figura 22: Comparação das rosas dos ventos (para intensidade e direção) entre os dados do modelo global *CFRS* (à esquerda) e da estação A203 do Instituto Nacional de Meteorologia (à direita), para o mês de abril do ano de 2020.

As rosas dos ventos para o mês de setembro de 2020 (Figura 23) tem maior similaridade, sobretudo em relação à direção do vento: observa-se, predominantemente, ventos fortes vindos de nordeste e norte-nordeste no modelo global, enquanto nos dados do INMET a predominância é de leste-nordeste.

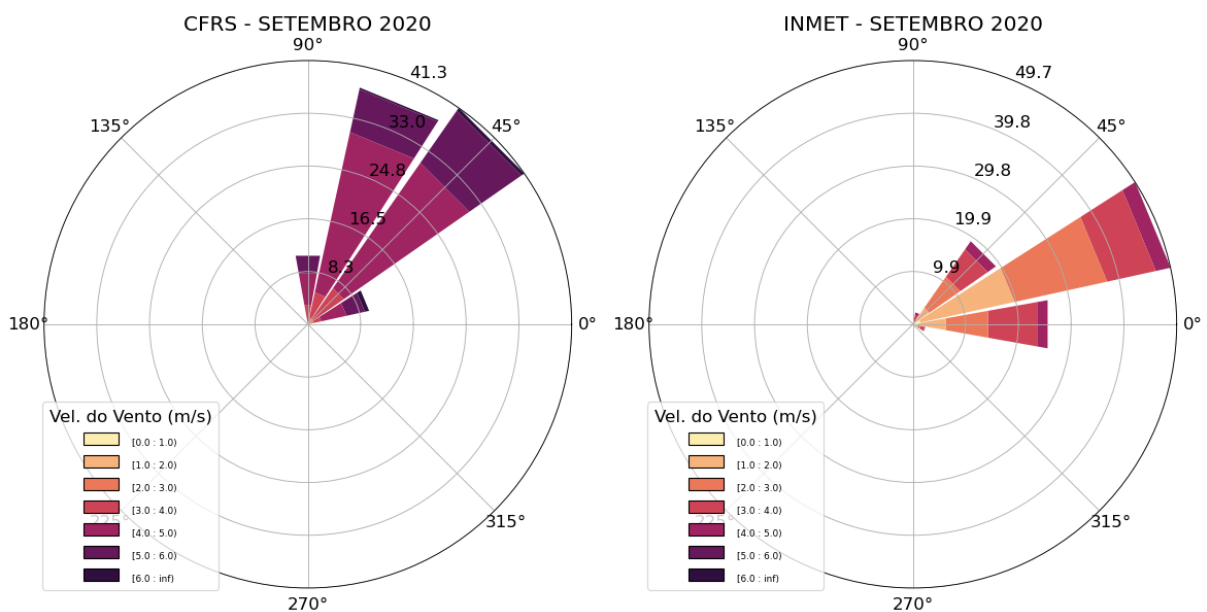


Figura 23: Comparação das rosas dos ventos (para intensidade e direção) entre os dados do modelo global *CFRS* (à esquerda) e da estação A203 do Instituto Nacional de Meteorologia (à direita), para o mês de setembro do ano de 2020.

4.2 VALIDAÇÃO E DEMONSTRAÇÃO DA QUALIDADE DO MODELO

As tabelas abaixo mostram os resultados estatísticos obtidos na validação do modelo regional. Os pontos do grupo *PLAT_N* são todos dispostos na plataforma maranhense, adjacente a Baía de São Marcos, com validação por dados de modelos globais. Em contrapartida, os pontos *DOLF_15*, *DOLF_08* e *PIER_01* são validados pelos *ADCPs* instalados nos píeres do Terminal Portuário Ponta da Madeira. A fim de facilitar a visualização das melhores comparações estatísticas, foram demarcadas, com o preenchimento verde, resultados com *skill* maior que 0,8; *r* maior que 0,7; *RMAE* menor que 0,2.

Tabela 7: Parâmetros estatísticos para as séries temporais de nível do mar, temperatura e salinidade, em abril de 2020.

| Validação ABRIL | Nível do Mar | | | Temperatura | | | Salinidade | | |
|--------------------|--------------|-------|-------|-------------|-------|-------|------------|-------|--------|
| | Skill | RMAE | r | Skill | RMAE | r | Skill | RMAE | r |
| PLAT_01 | 0,837 | 0,178 | 0,815 | 0,554 | 0,198 | 0,393 | 0,091 | 3,086 | -0,58 |
| PLAT_02 | 0,807 | 0,197 | 0,838 | 0,475 | 0,229 | 0,26 | 0,086 | 1,796 | -0,41 |
| PLAT_03 | 0,760 | 0,221 | 0,815 | 0,449 | 0,297 | 0,137 | 0,068 | 1,365 | -0,229 |
| PLAT_04 | 0,693 | 0,248 | 0,789 | 0,426 | 0,306 | 0,124 | 0,063 | 1,45 | -0,276 |
| PLAT_05 | 0,661 | 0,259 | 0,775 | 0,4 | 0,325 | 0,101 | 0,067 | 1,875 | 0,088 |
| PLAT_06 | 0,642 | 0,264 | 0,765 | 0,357 | 0,318 | 0,148 | 0,075 | 2,946 | 0,529 |
| DOLF_15 | 0,994 | 0,041 | 0,972 | - | - | - | - | - | - |
| DOLF_08 | 0,995 | 0,039 | 0,975 | - | - | - | - | - | - |
| PIER_01 | 0,995 | 0,04 | 0,973 | - | - | - | - | - | - |

Tabela 8: Parâmetros estatísticos para as séries temporais de nível do mar, temperatura e salinidade, em setembro de 2020.

| Validação SETEMBRO | Nível do Mar | | | Temperatura | | | Salinidade | | |
|-----------------------|--------------|-------|-------|-------------|-------|-------|------------|-------|--------|
| | Skill | RMAE | r | Skill | RMAE | r | Skill | RMAE | r |
| PLAT_01 | 0,793 | 0,241 | 0,401 | 0,384 | 1,001 | 0,16 | 0,157 | 0,876 | -0,371 |
| PLAT_02 | 0,837 | 0,248 | 0,526 | 0,442 | 0,842 | 0,324 | 0,138 | 0,998 | -0,393 |
| PLAT_03 | 0,828 | 0,260 | 0,542 | 0,51 | 0,539 | 0,392 | 0,105 | 0,959 | -0,432 |
| PLAT_04 | 0,838 | 0,251 | 0,591 | 0,469 | 0,406 | 0,261 | 0,083 | 1,011 | -0,368 |
| PLAT_05 | 0,837 | 0,241 | 0,661 | 0,42 | 0,335 | 0,154 | 0,069 | 1,024 | -0,299 |
| PLAT_06 | 0,822 | 0,248 | 0,662 | 0,425 | 0,273 | 0,128 | 0,075 | 1,052 | -0,489 |
| DOLF_15 | 0,996 | 0,03 | 0,981 | - | - | - | - | - | - |
| DOLF_08 | 0,997 | 0,03 | 0,984 | - | - | - | - | - | - |
| PIER_01 | 0,996 | 0,033 | 0,977 | - | - | - | - | - | - |

Tabela 9: Parâmetros estatísticos para as séries temporais de corrente, em abril de 2020.

| Validação ABRIL | Magnitude da Corrente | | | Comp. N/S da Corrente | | | Comp. L/O da Corrente | | |
|--------------------|-----------------------|--------------|--------------|-----------------------|--------------|--------------|-----------------------|--------------|--------------|
| | Skill | RMAE | r | Skill | RMAE | r | Skill | RMAE | r |
| PLAT_01 | - | - | - | 0,935 | 0,244 | 0,905 | 0,958 | 0,105 | 0,946 |
| PLAT_02 | - | - | - | 0,944 | 0,168 | 0,825 | 0,944 | 0,106 | 0,943 |
| PLAT_03 | - | - | - | 0,805 | 0,223 | 0,374 | 0,949 | 0,114 | 0,898 |
| PLAT_04 | - | - | - | 0,802 | 0,230 | 0,502 | 0,966 | 0,107 | 0,914 |
| PLAT_05 | - | - | - | 0,876 | 0,182 | 0,618 | 0,963 | 0,122 | 0,890 |
| PLAT_06 | - | - | - | 0,814 | 0,215 | 0,452 | 0,955 | 0,137 | 0,856 |
| DOLF_15 | 0,889 | 0,111 | 0,349 | - | - | - | - | - | - |
| DOLF_08 | 0,889 | 0,113 | 0,264 | - | - | - | - | - | - |
| PIER_01 | 0,812 | 0,137 | 0,789 | - | - | - | - | - | - |

Tabela 10: Parâmetros estatísticos para as séries temporais de corrente, em setembro de 2020.

| Validação SETEMBRO | Magnitude da Corrente | | | Comp. N/S da Corrente | | | Comp. L/O da Corrente | | |
|-----------------------|-----------------------|--------------|--------------|-----------------------|--------------|--------------|-----------------------|--------------|--------------|
| | Skill | RMAE | r | Skill | RMAE | r | Skill | RMAE | r |
| PLAT_01 | - | - | - | 0,935 | 0,169 | 0,927 | 0,948 | 0,121 | 0,883 |
| PLAT_02 | - | - | - | 0,976 | 0,106 | 0,960 | 0,962 | 0,097 | 0,918 |
| PLAT_03 | - | - | - | 0,961 | 0,113 | 0,959 | 0,975 | 0,079 | 0,918 |
| PLAT_04 | - | - | - | 0,971 | 0,087 | 0,966 | 0,979 | 0,087 | 0,949 |
| PLAT_05 | - | - | - | 0,964 | 0,092 | 0,943 | 0,953 | 0,099 | 0,896 |
| PLAT_06 | - | - | - | 0,964 | 0,092 | 0,943 | 0,993 | 0,036 | 0,979 |
| DOLF_15 | 0,922 | 0,094 | 0,469 | - | - | - | - | - | - |
| DOLF_08 | 0,888 | 0,113 | 0,402 | - | - | - | - | - | - |
| PIER_01 | 0,776 | 0,14 | 0,783 | - | - | - | - | - | - |

As comparações entre os dados de nível do mar obtidos pelo modelo e as medidas locais do ADCP tiveram os melhores resultados estatísticos (Tabelas 7 e 8). Em contrapartida, a salinidade e a temperatura apresentaram os piores índices estatísticos comparativos, cujos motivos serão discutidos nas próximas etapas do trabalho. As correntes tiveram bons parâmetros estatísticos comparativos, tanto na validação com modelos globais, quanto com dados locais. Após a validação, verificou-se uma defasagem temporal no nível do mar de 10 minutos de atraso em relação aos dados obtidos *in loco*, para a corrente a defasagem aumentou para 70 minutos de atraso. Foram aplicadas as devidas correções na confecção dos resultados.

4.2.1 Validação do Nível do Mar

O ponto *DOLF_15* foi utilizado para a análise dos dados de nível do mar do modelo regional. As Figuras 25 e 26 mostram a comparação dos dados processados do *Delft3D* com os

medidos *in loco* e com a tabua de maré, disponibilizada pela Marinha. Foram obtidos excelentes resultados estatísticos de nível do mar, tanto para abril como para setembro. Os dados da tabua de maré corroboraram com as demais séries, o que reforça a confiabilidade dos dados obtidos pelo modelo.

O regime de macro-maré é a principal forçante hidrodinâmica da região (Pereira & Harari, 1995). Como podemos observar na Figura 24: a flutuação do nível do mar na sizígia é mais bem definida e regular do que na quadratura, que parece sofrer influência de outras forçante.

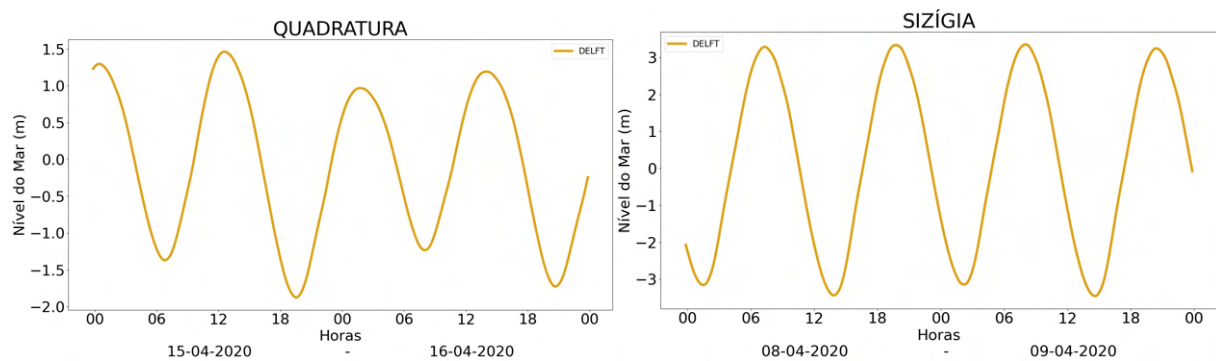


Figura 24: Séries temporais típicas da quadratura e da sizígia para a Bacia de São Marcos (MA).

No ponto *DOLF_15*, a amplitude máxima é de 6,77m, na sizígia, e mínima de 3,35m, na quadratura, para o mês de abril de 2020. Observa-se uma diminuição na altura da preamar, em relação aos dados locais, na transição da quadratura para a sizígia na segunda metade do mês (Figura 25). Fato que não ocorreu com mesma expressão para o mês de setembro (Figura 26).

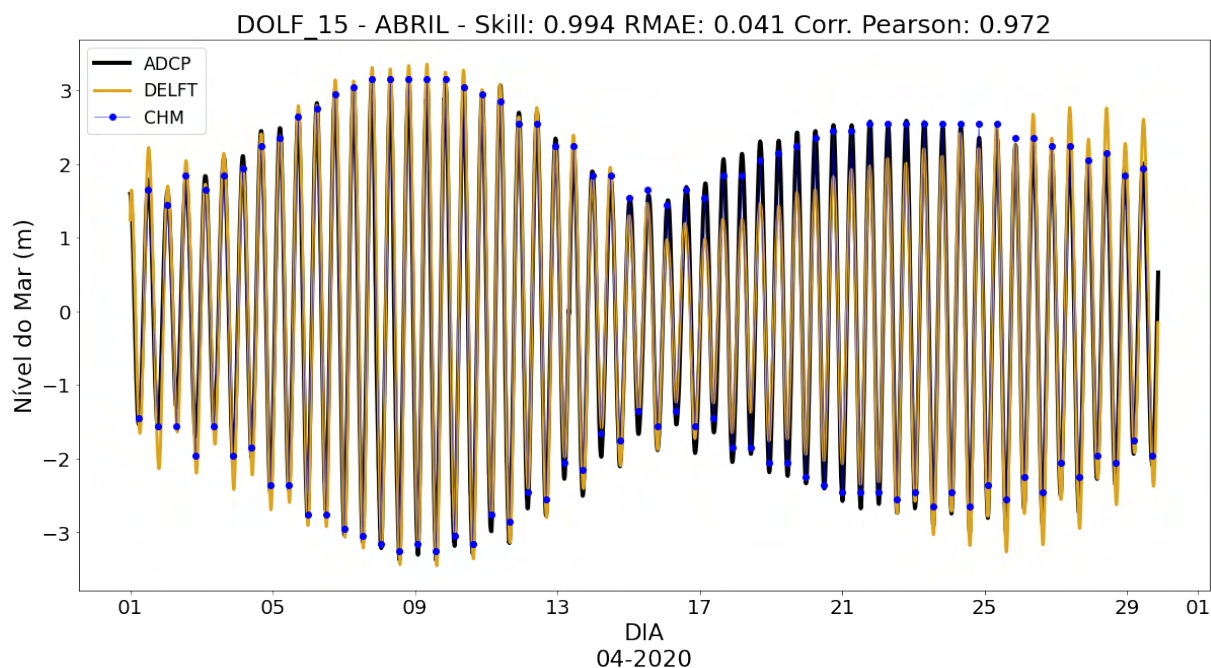


Figura 25: Comparação estatística das séries temporais de nível do mar entre os resultados do *Delft3D*, ponto *DOLF_15*, e obtidos *in loco*, pelo perfilador acústico de corrente (*ADCP*), para o mês de abril de 2020.

Em relação a setembro, no mesmo ponto: a amplitude máxima atingiu 6,87m, na sizígia, e a mínima 3,56m, na quadratura.

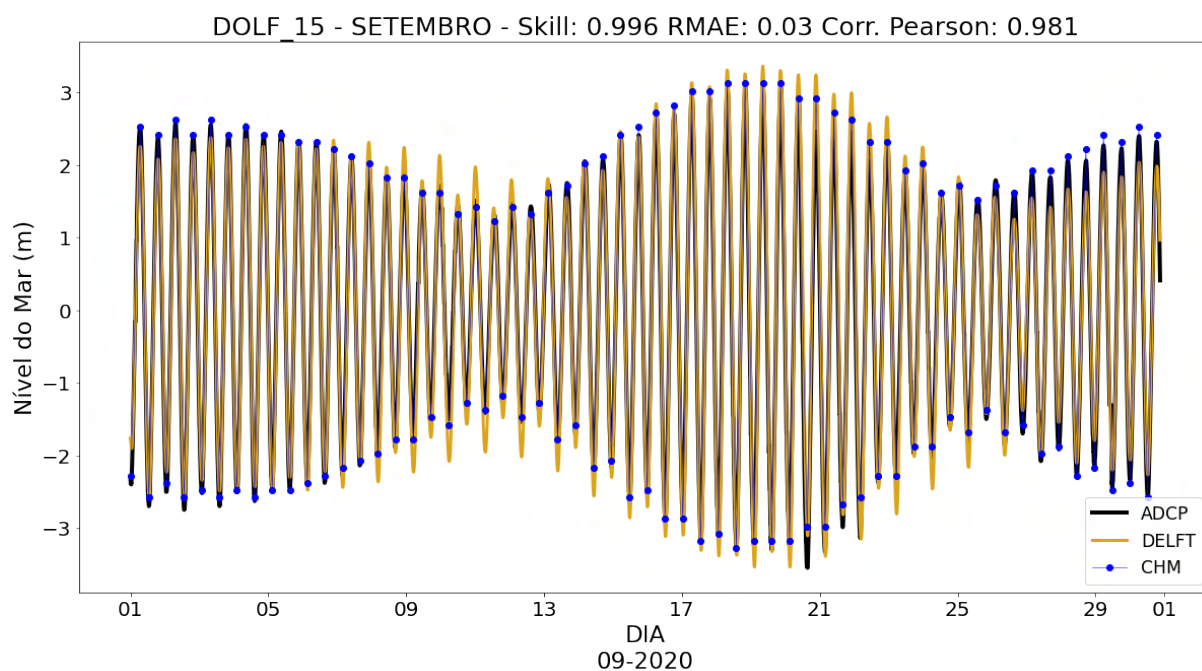


Figura 26: Comparação estatística das séries temporais de nível do mar entre os resultados do *Delft3D*, ponto *DOLF_15*, e obtidos *in loco*, pelo perfilador acústico de corrente (*ADCP*), para o mês de setembro de 2020.

4.2.2 Validação da Corrente

O padrão das correntes, em um regime de macro-maré, responde à variação do nível do mar. No mês de abril, foi obtida uma média de $0,8 \pm 0,4$ m/s com máximo valor no período de sizígia de 1,77 m/s e de 1,2 m/s na quadratura. Em comparação, os dados locais medidos apresentaram valores acima dos resultados da modelagem: média de $0,73 \pm 0,4$ m/s, máxima na sizígia de 1,97 m/s e de 1,27 m/s na quadratura. Os parâmetros estatísticos *skill* e *RMAE* atingiram valores excelentes, em contrapartida, o índice de correlação de Pearson apresentou valores baixos, visto que variabilidades em altas frequências nos dados do *ADCP* não foram contempladas pela modelagem. A Figura 27 mostra as diferenças entre as magnitudes calculadas pelo modelo e nos dados medidos localmente, as quais são maiores nas marés enchentes.

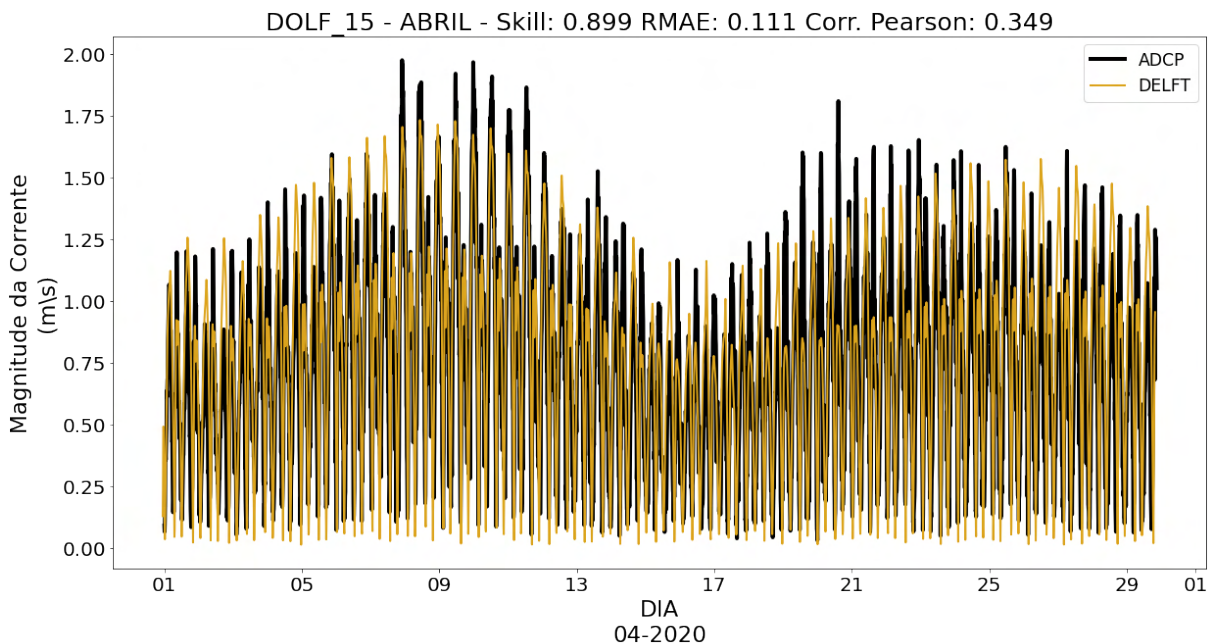


Figura 27: Comparação estatística das séries temporais de magnitude das correntes, entre os resultados do *Delft3D*, ponto *DOLF_15*, e obtidos *in loco*, pelo perfilador acústico de corrente (*ADCP*), para o mês de abril de 2020.

Em comparação com o mês de abril, setembro teve uma melhora nos resultados: observa-se que os picos estão com menores diferenças em comparação com os dados do *ADCP*, o que resultou em melhores valores dos parâmetros estatísticos (Figura 28). A média da intensidade da corrente calculada foi de $0,76 \pm 0,39$ m/s e pelos dados locais foi de $0,67 \pm 0,37$ m/s. O valor máximo calculado, na sizígia, foi de 1,73 m/s e o medido pelo equipamento 1,91 m/s. O máximo valor de corrente calculado, na quadratura, foi de 1,15 m/s e o medido pelo *ADCP* foi de 1,04 m/s.

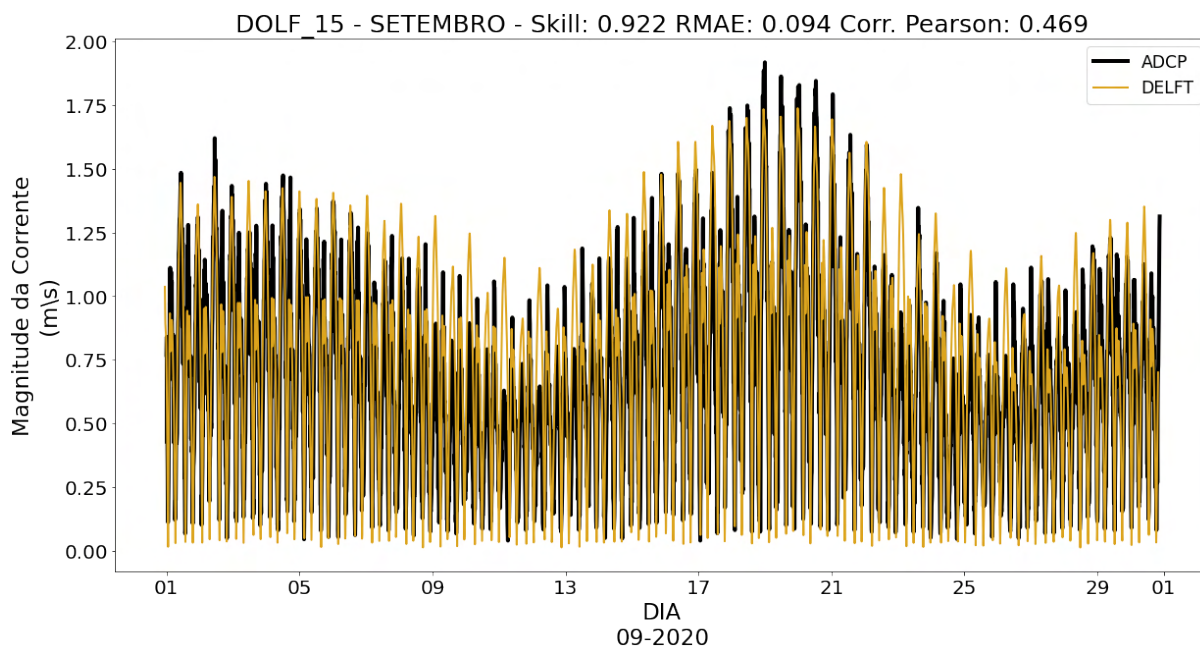


Figura 28: Comparação estatística das séries temporais de magnitude das correntes, entre os resultados do *Delft3D*, ponto *DOLF_15*, e obtidos *in loco*, pelo perfilador acústico de corrente (*ADCP*), para o mês de setembro de 2020.

O ponto *PLAT_02* foi escolhido devido aos seus bons índices estatísticos obtidos quando comparados seus resultados com os do modelo global *CMEMS*, para a análise da magnitude das correntes na plataforma. A figura 29 mostra que, mesmo estando a 52km da margem mais próxima, há uma forte influência da maré nas correntes da plataforma, com magnitudes de $\pm 1,4$ m/s no pico da maré de sizígia. A influência do maior aporte fluvial no mês de abril pode ser observada na Figura 29, a qual interfere no padrão de maré no período de quadratura.

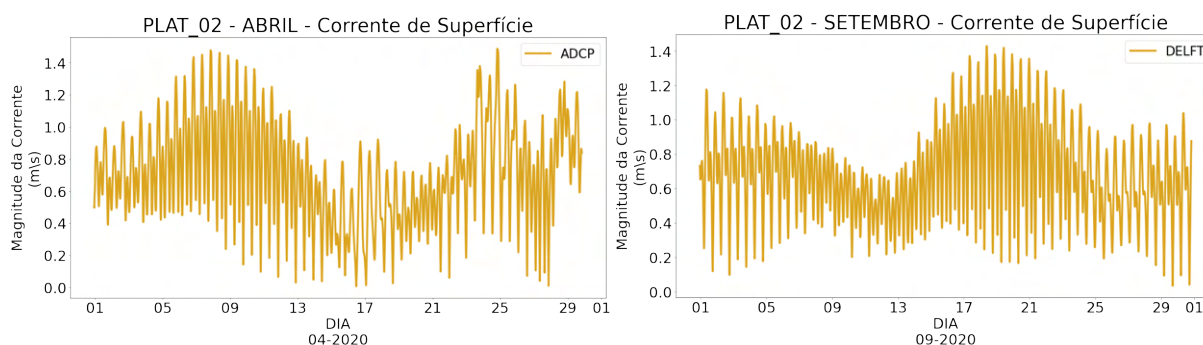


Figura 29: Séries temporais de magnitude das correntes dos dados do *Delft3D*, no ponto *PLAT_02*, para os meses de abril e setembro de 2020.

4.2.3 Demonstração da Qualidade da Distribuição de Temperatura e Salinidade

Os resultados de temperatura e salinidade do modelo foram muito discrepantes dos valores produzidos pelo modelo global *HYCOM*, visto que este não leva em conta o aporte fluvial da baía. Isto afeta principalmente a comparação da salinidade, especialmente no período chuvoso, mês de abril.

Em abril, a temperatura da superfície do mar teve médias da modelagem regional e da modelagem global de $29,48 \pm 0,18^\circ\text{C}$ e $29,07 \pm 0,33^\circ\text{C}$, respectivamente. Mas as flutuações em relação à média tiveram correlação baixíssima (Figura 30).

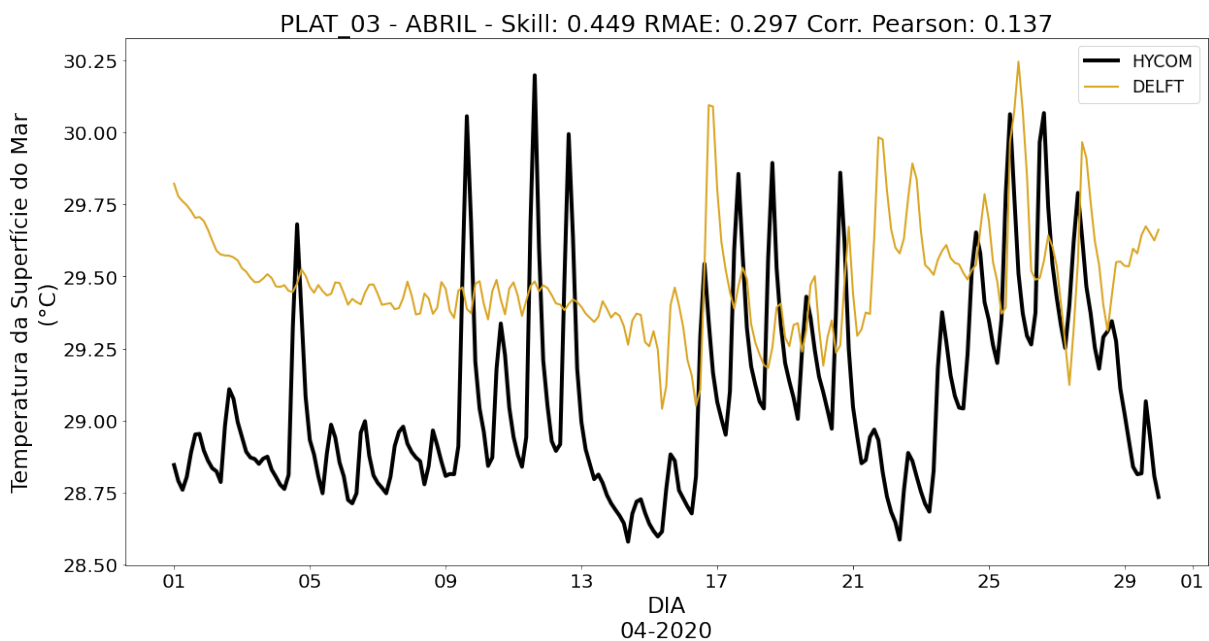


Figura 30: Comparação estatística das séries temporais de temperatura da superfície do mar entre os resultados dos dados do *Delft3D*, ponto *PLAT_3*, e do modelo global *HYCOM*, para o mês de abril de 2020.

Já em setembro, a temperatura da superfície do mar obteve, em relação a média, diferença de $0,46^\circ\text{C}$ entre os dados do *Delft3D*, $27,24 \pm 0,14^\circ\text{C}$, e os dados do *HYCOM*, $27,70 \pm 0,33^\circ\text{C}$. Entretanto, as diferenças entre as séries foram muito grandes, e aumentando ao longo do mês (Figura 31). Nota-se que as temperatura no mês de setembro foram menores do que no mês de abril.

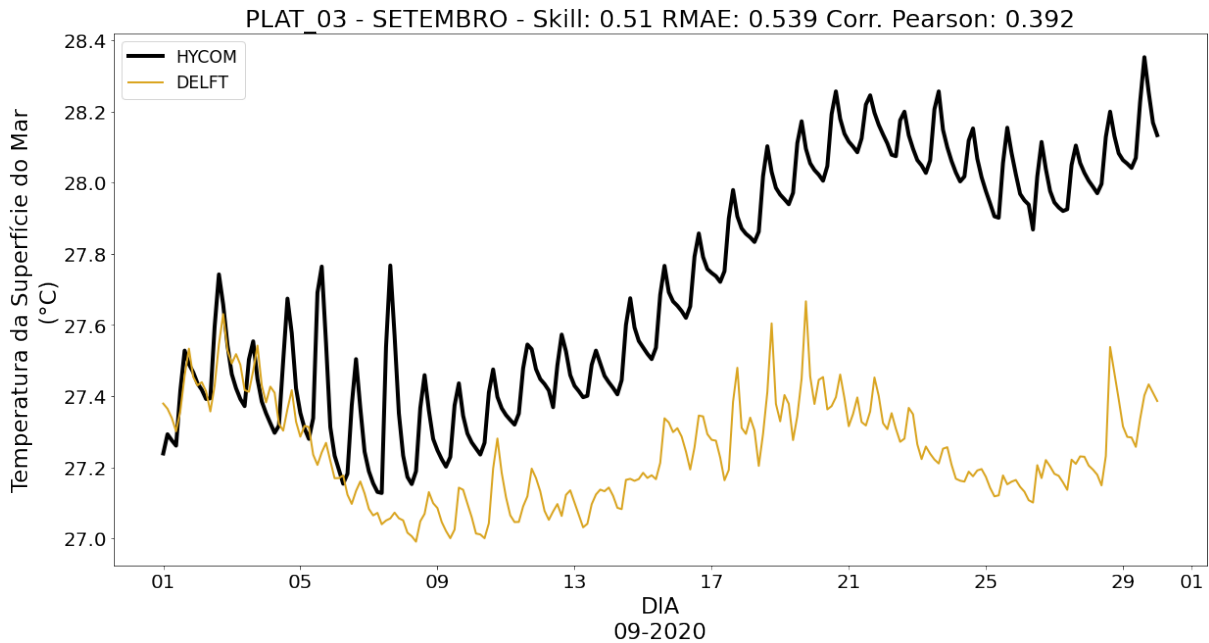


Figura 31: Comparação estatística das séries temporais de temperatura da superfície do mar entre os resultados dos dados do *Delft3D*, ponto *PLAT_3*, e do modelo global *HYCOM*, para o setembro de abril de 2020.

Quanto à salinidade, os resultados do modelo para o mês de abril são os mais discrepantes em relação aos cálculos do modelo global, por se tratar de um mês com aporte fluvial muito elevado, considerado no modelo regional mas não no global (Tabela 4 e Figura 32). É interessante notar a flutuação da salinidade conforme a maré: na sizígia, a salinidade aumenta devido à estratificação, na qual impede que a pluma do rio chegue à plataforma; na quadratura, a pluma “vence” a estratificação horizontal e diminui a salinidade baía a fora. Já o mês de setembro (Figura 33), o aporte fluvial é muito baixo e a estratificação se mantém por todo o mês. Quanto à média da salinidade, para os resultados do modelo regional, em abril foi de $33,83 \pm 1,8$ psu e em setembro de $36,46 \pm 0,1$ psu.

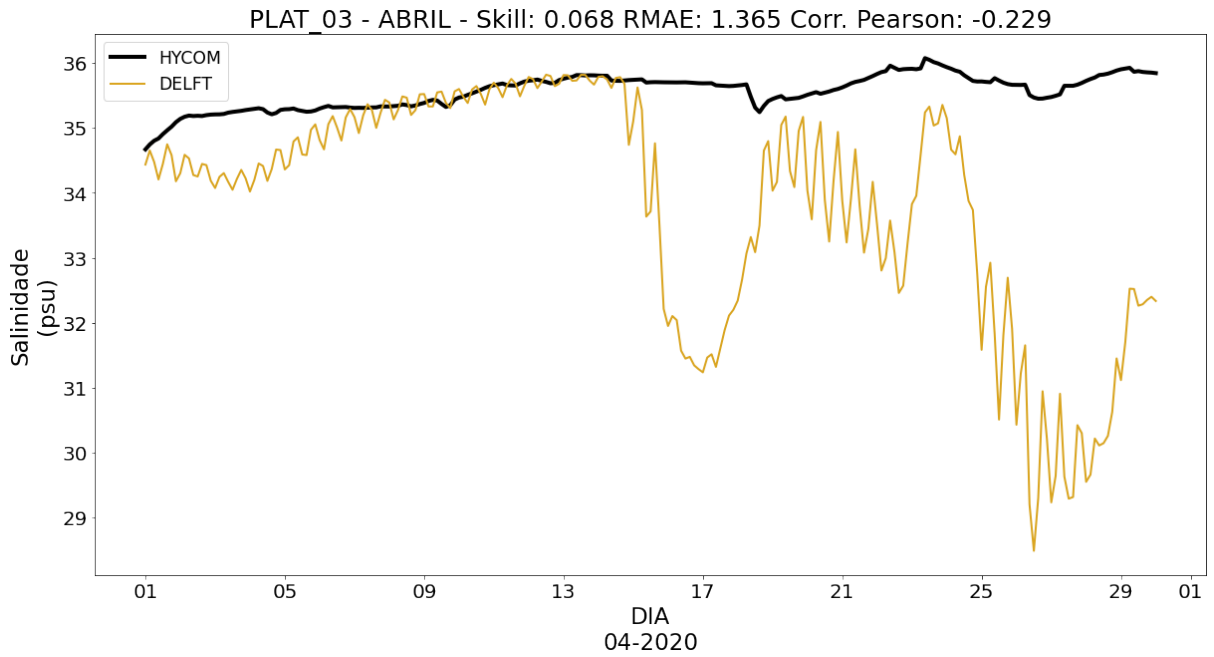


Figura 32: Comparação estatística das séries temporais de salinidade na superfície entre os resultados do *Delft3D*, no ponto *PLAT_3*, e do modelo global *HYCOM*, para o mês de abril de 2020.

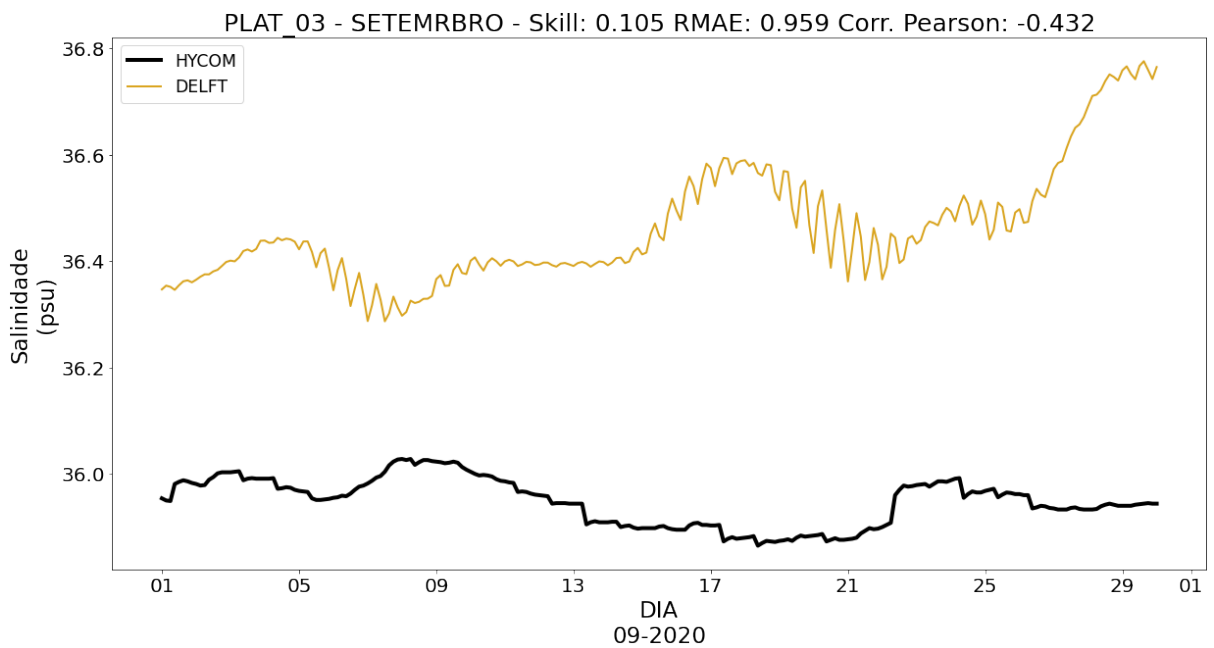


Figura 33: Comparação estatística das séries temporais de salinidade na superfície entre os resultados do *Delft3D*, no ponto *PLAT_3*, e do modelo global *HYCOM*, para o mês de setembro de 2020.

4.3 MAPAS TEMÁTICOS

4.3.1 Nível do Mar e Direção das Correntes

Os mapas temáticos de elevação com vetor das correntes foram confeccionados para o dia com maior amplitude de maré nos meses de abril e setembro. As 4 fases da maré foram contempladas (preamar, vazante, baixamar, enchente). Os pontos de observação *Canal_Nav_Entrada*, *Canal_Nav_Meio* e *Rio_Mearim* foram utilizados a fim de auxiliar nas análises dos mapas.

Abril de 2020

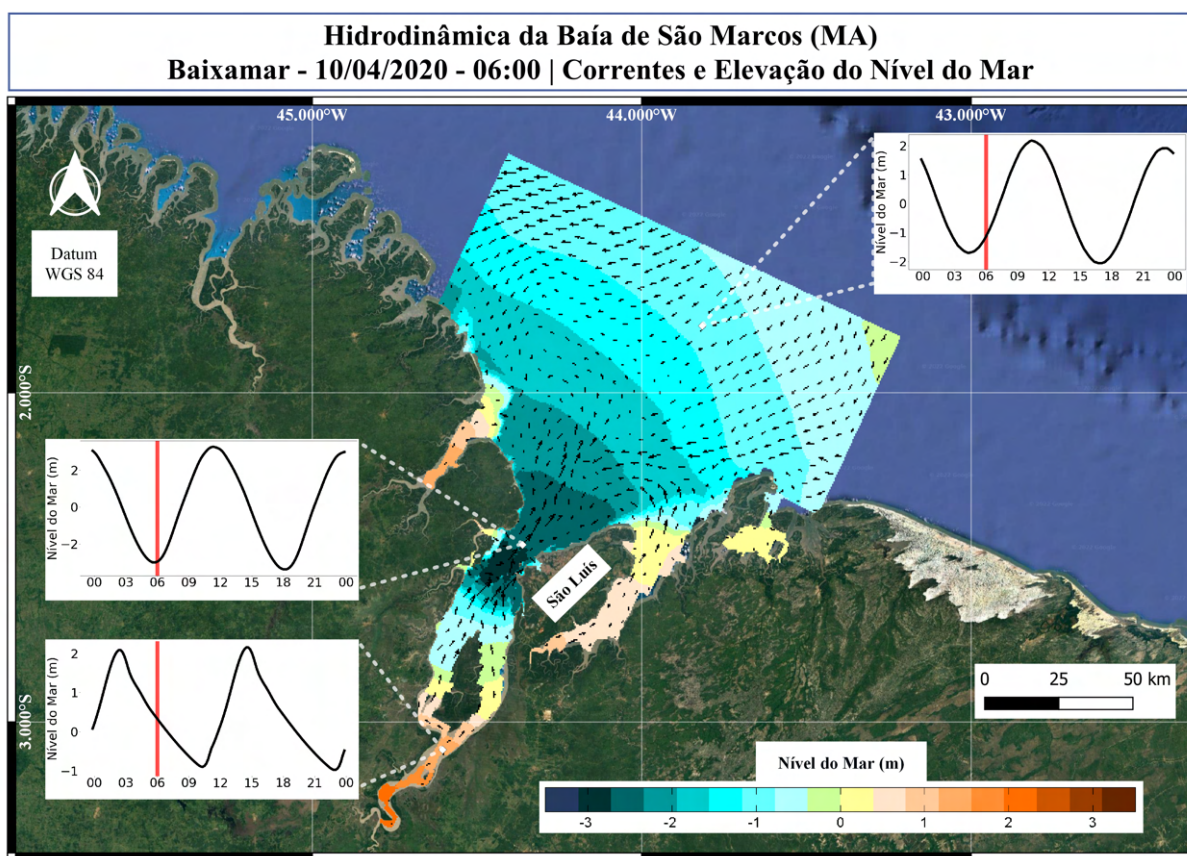


Figura 34: Mapa da elevação do nível do mar e distribuição das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na baixamar, no dia 10 de abril de 2020.

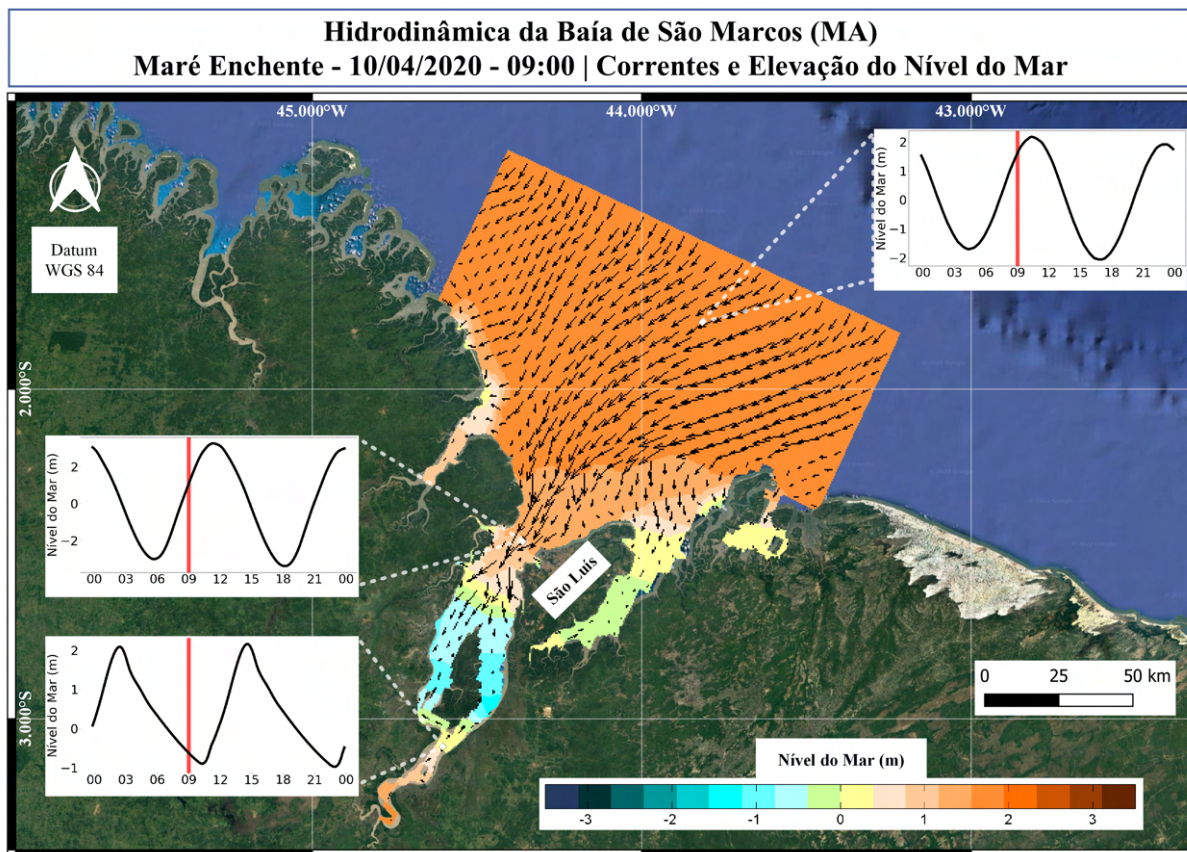


Figura 35: Mapa da elevação do nível do mar e distribuição das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de enchente, no dia 10 de abril de 2020.

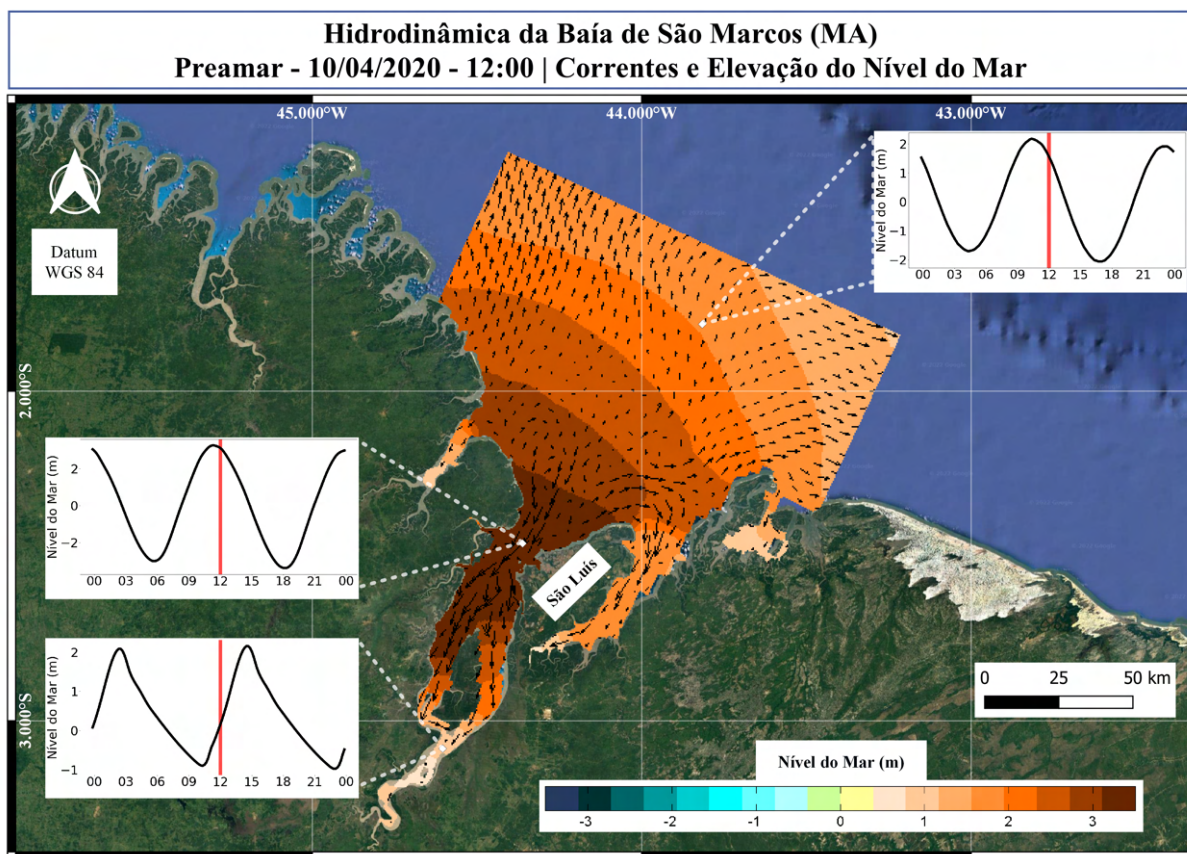


Figura 36: Mapa da elevação do nível do mar e distribuição das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na preamar, no dia 10 de abril de 2020.

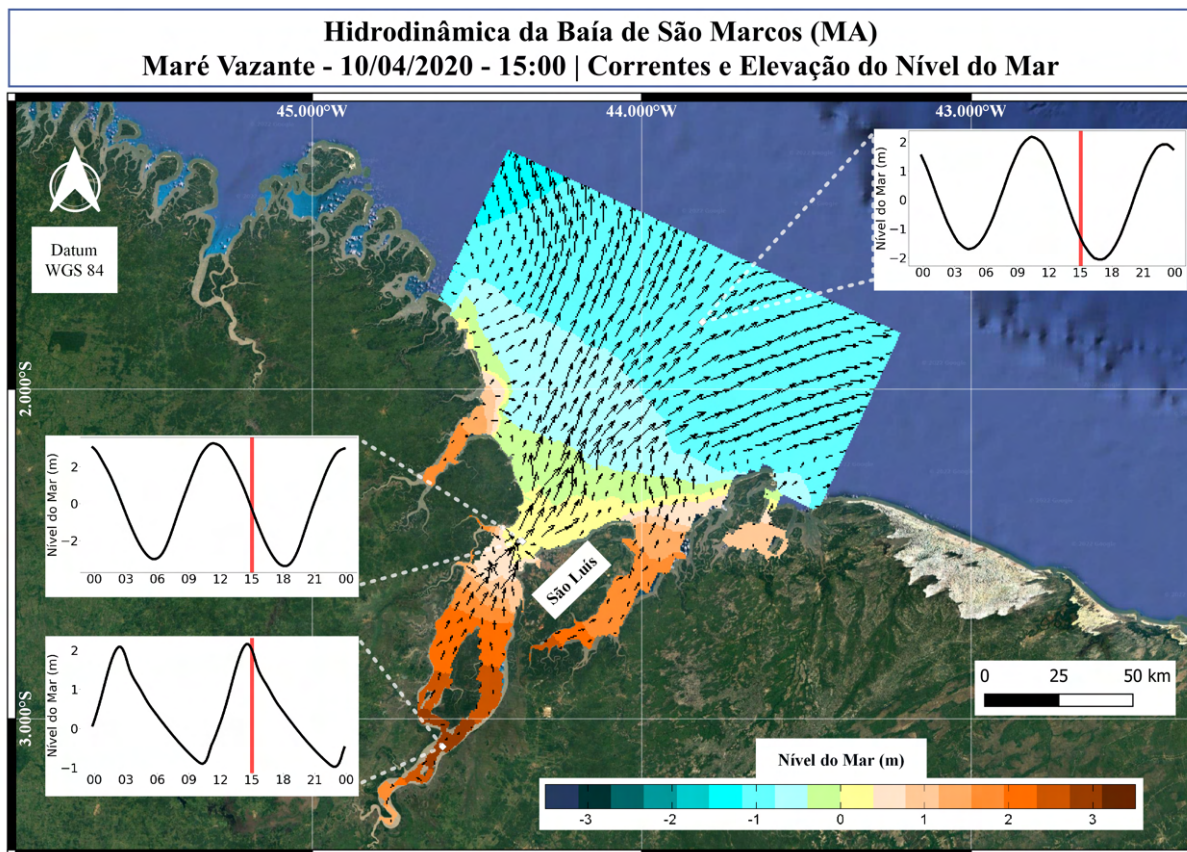


Figura 37: Mapa da elevação do nível do mar e distribuição das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de vazante, no dia 10 de abril de 2020.

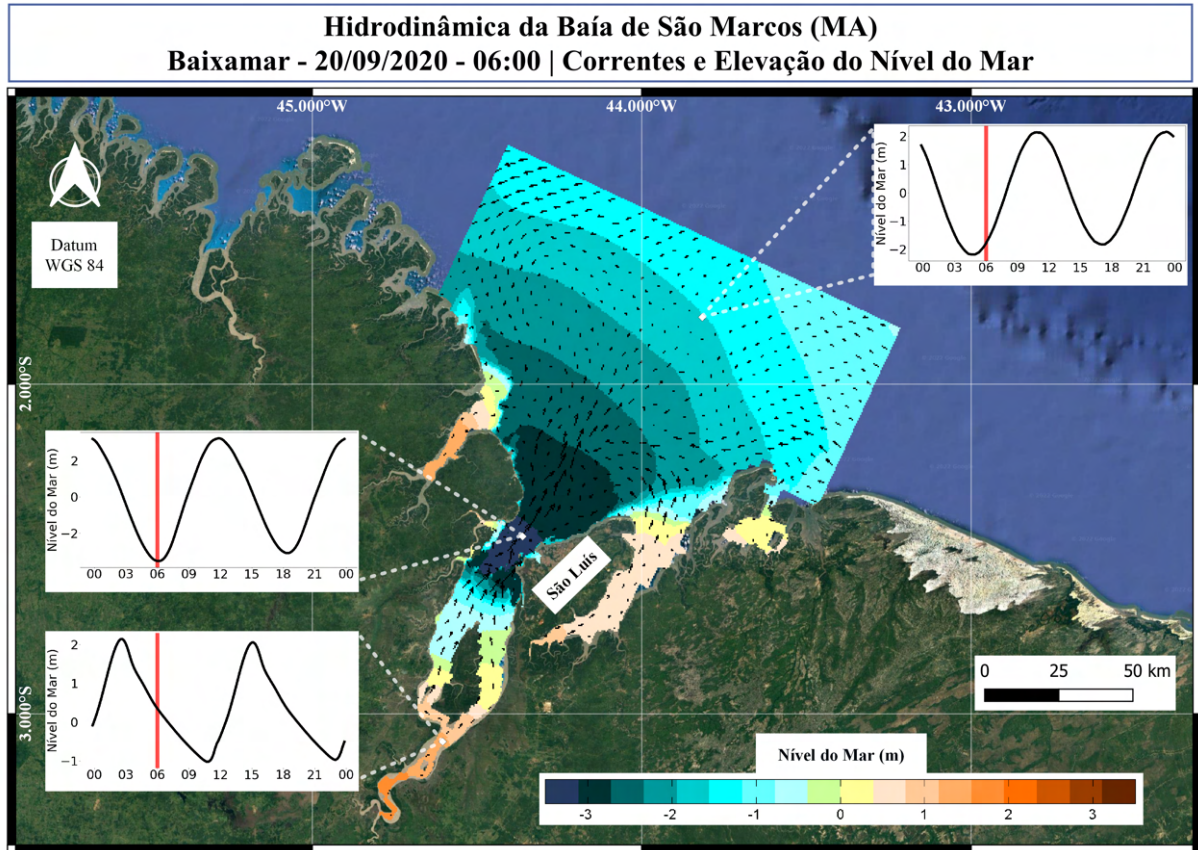


Figura 38: Mapa da elevação do nível do mar e distribuição das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na baixamar, no dia 20 de setembro de 2020.

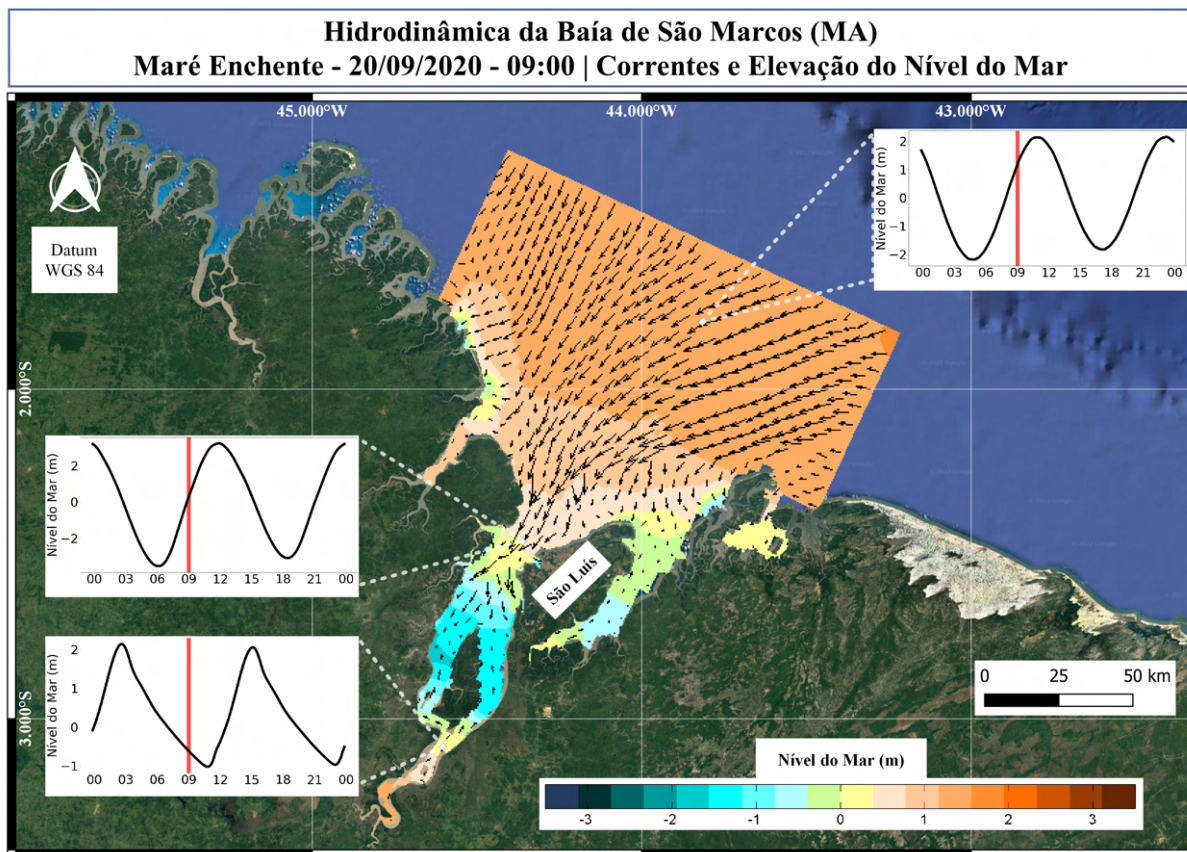


Figura 39: Mapa da elevação do nível do mar e distribuição das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de enchente, no dia 20 de setembro de 2020.

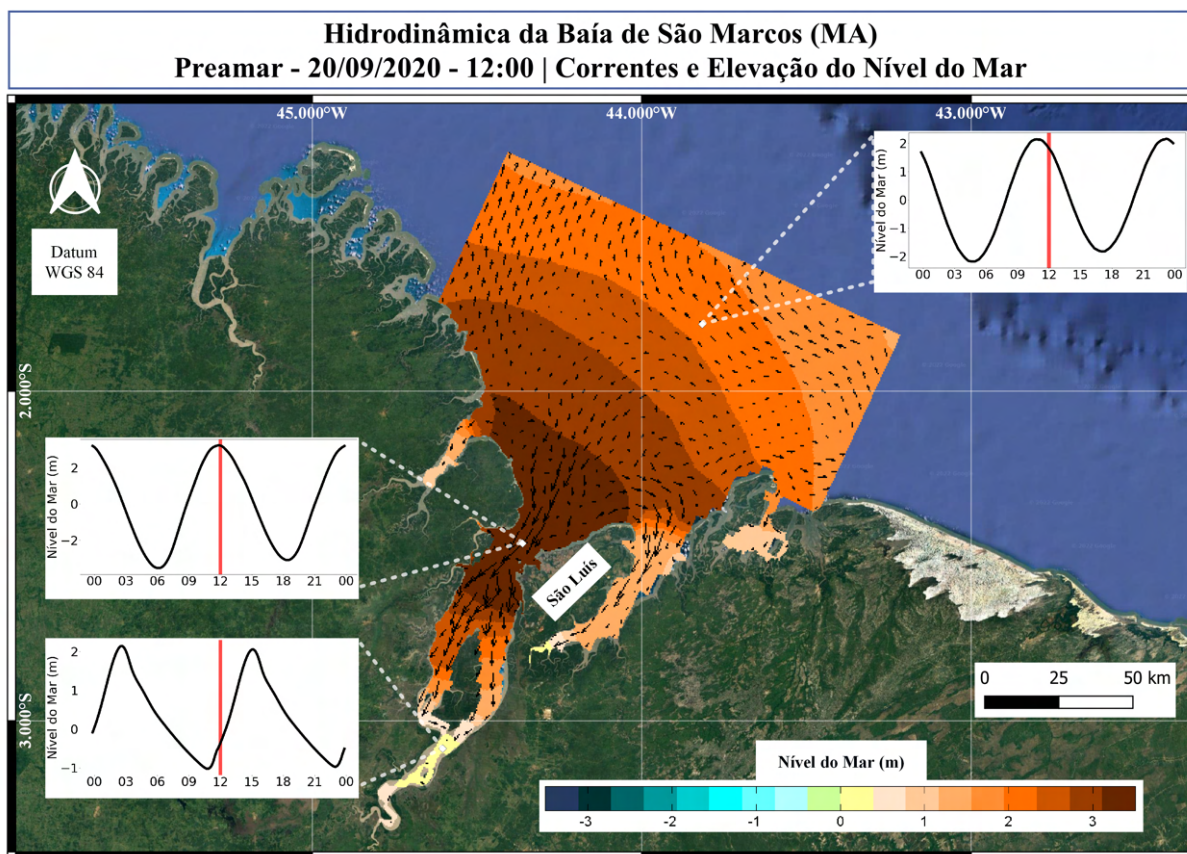


Figura 40: Mapa da elevação do nível do mar e distribuição das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na preamar, no dia 20 de setembro de 2020.

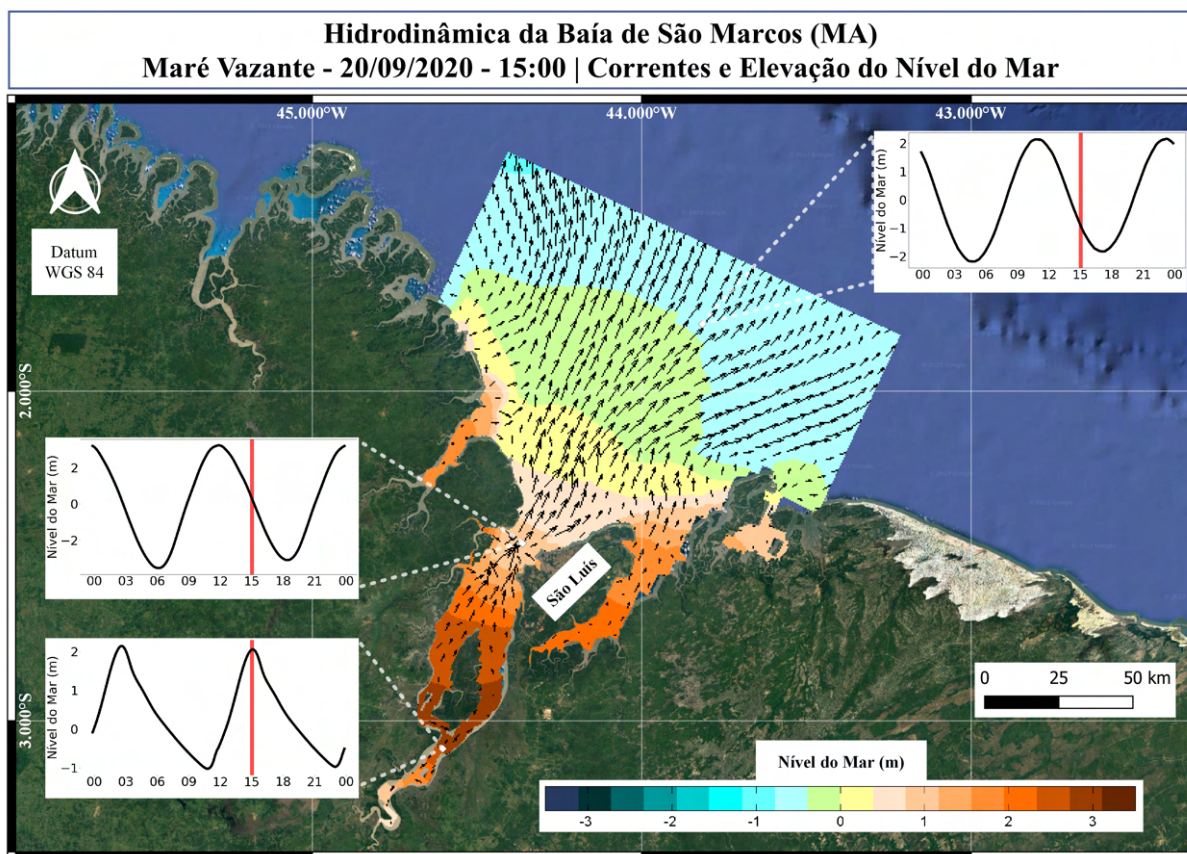


Figura 41: Mapa da elevação do nível do mar e distribuição das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de vazante, no dia 20 de setembro de 2020.

Os dois meses apresentaram similaridade na distribuição do nível do mar nas 4 fases da maré. No entanto, é perceptível uma ligeira diferença devido a maior amplitude obtida para o mês de setembro. Ademais, Podemos há diferenças no nível do mar nos 3 pontos de observação apresentados com os mapas, tanto na amplitude, como na fase e no formato da curva representativa da série temporal. No cenário de enchente, devido à assimetria de maré, o modelo indicou uma convergência dos vetores de corrente a Norte da Ilha do Caranguejos.

A Figura 42 foi elaborada para determinação da variação do nível do mar ao longo do canal de acesso para o complexo portuário da Baía de São Marcos. Pode-se visualizar que as séries temporais, a partir do ponto 1, à medida que vai se adentrando na baía, aumentam a amplitude, até a entrada o Terminal Marítimo Ponta da Madeira; e, na sequência, diminuem a amplitude e alteram seu formato senoidal.

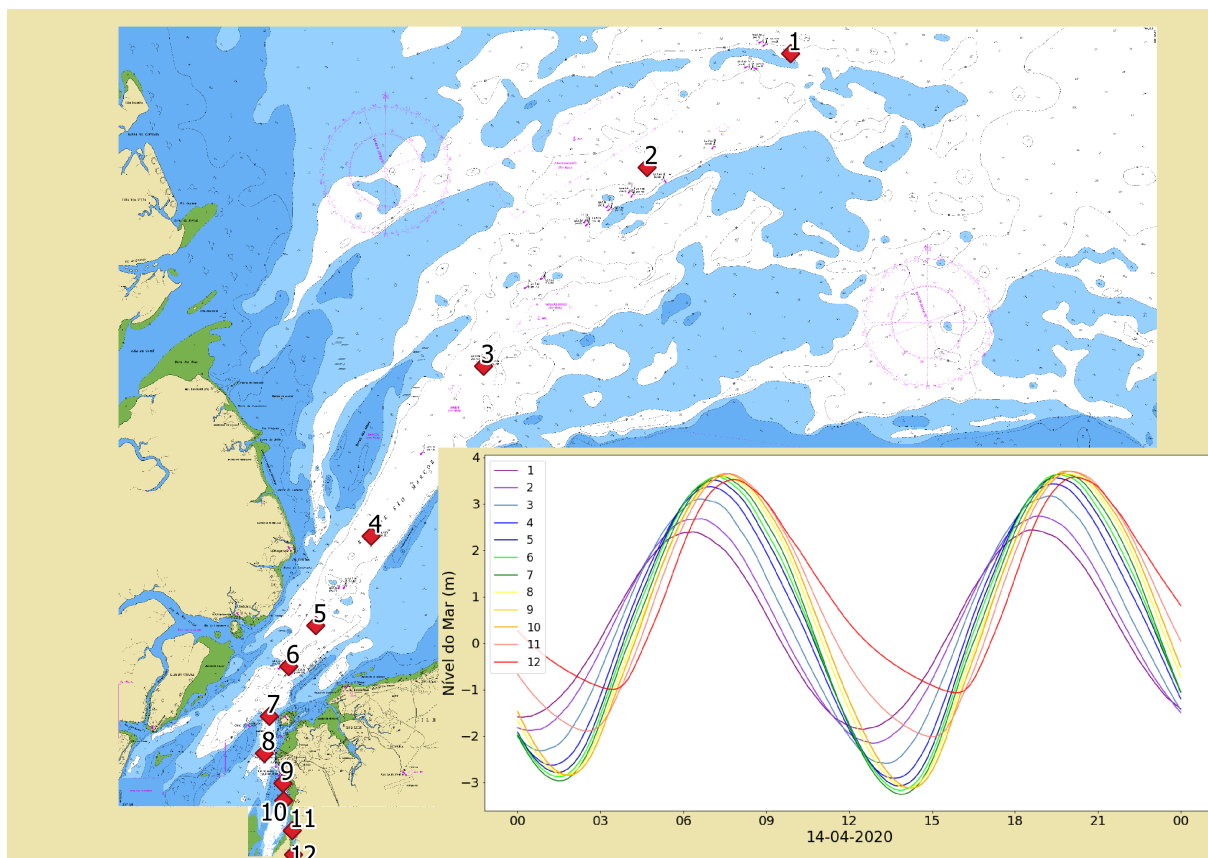


Figura 42: Séries temporais do nível do mar dos pontos de 1 a 12, localizados ao longo do canal de acesso das embarcações ao complexo portuário da Baía de São Marcos (MA), para o dia 14 de abril de 2020.

4.3.2 Magnitude das Correntes

Os mapas temáticos de magnitude das correntes foram confeccionados para o pico da maré de sizígia do mês de abril e setembro. As 4 fases da maré foram contempladas (preamar, vazante, baixamar, enchente). O ponto de observação *Canal_Nav_Meio* foi utilizado a fim de auxiliar as análises dos mapas.

Abril de 2020 - superfície

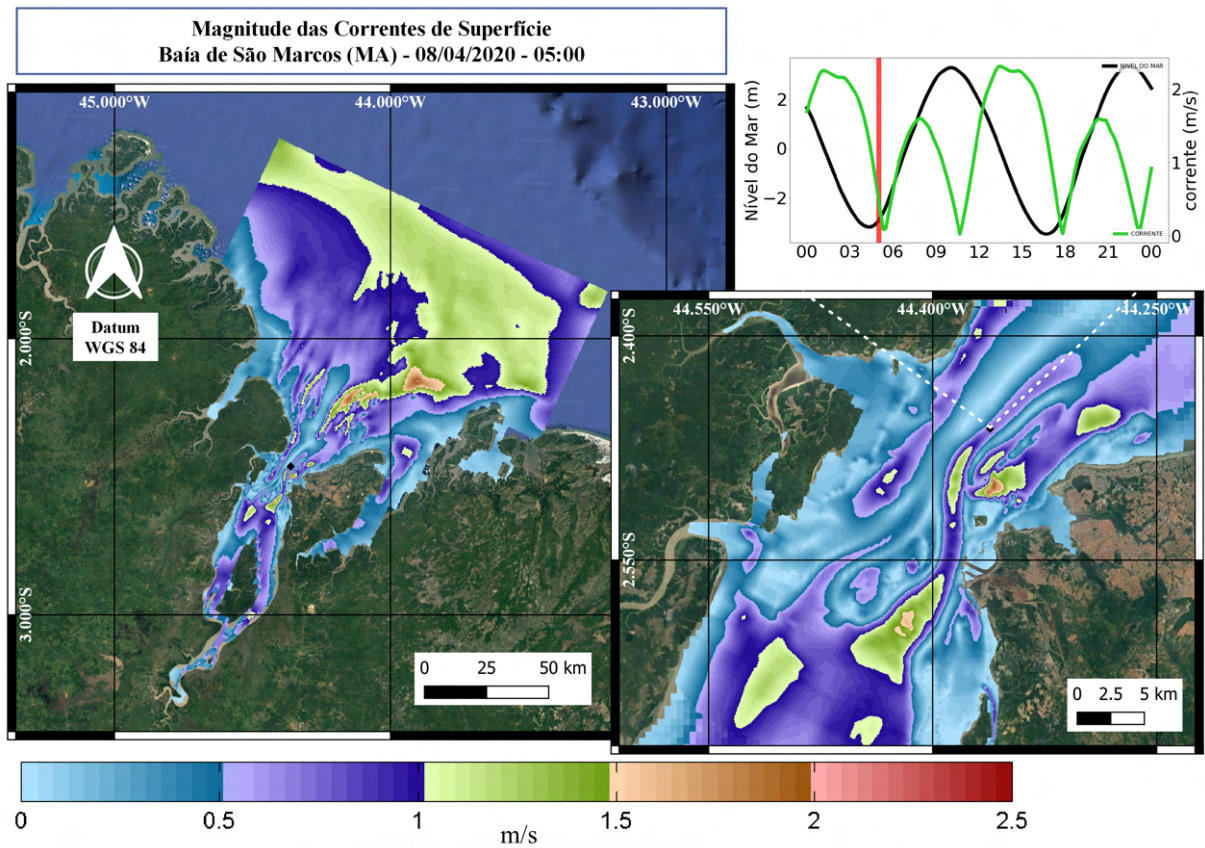


Figura 43: Mapa da magnitude das correntes de superfície, produzido com resultados do modelo regional, na baixamar, no dia 08 de abril de 2020.

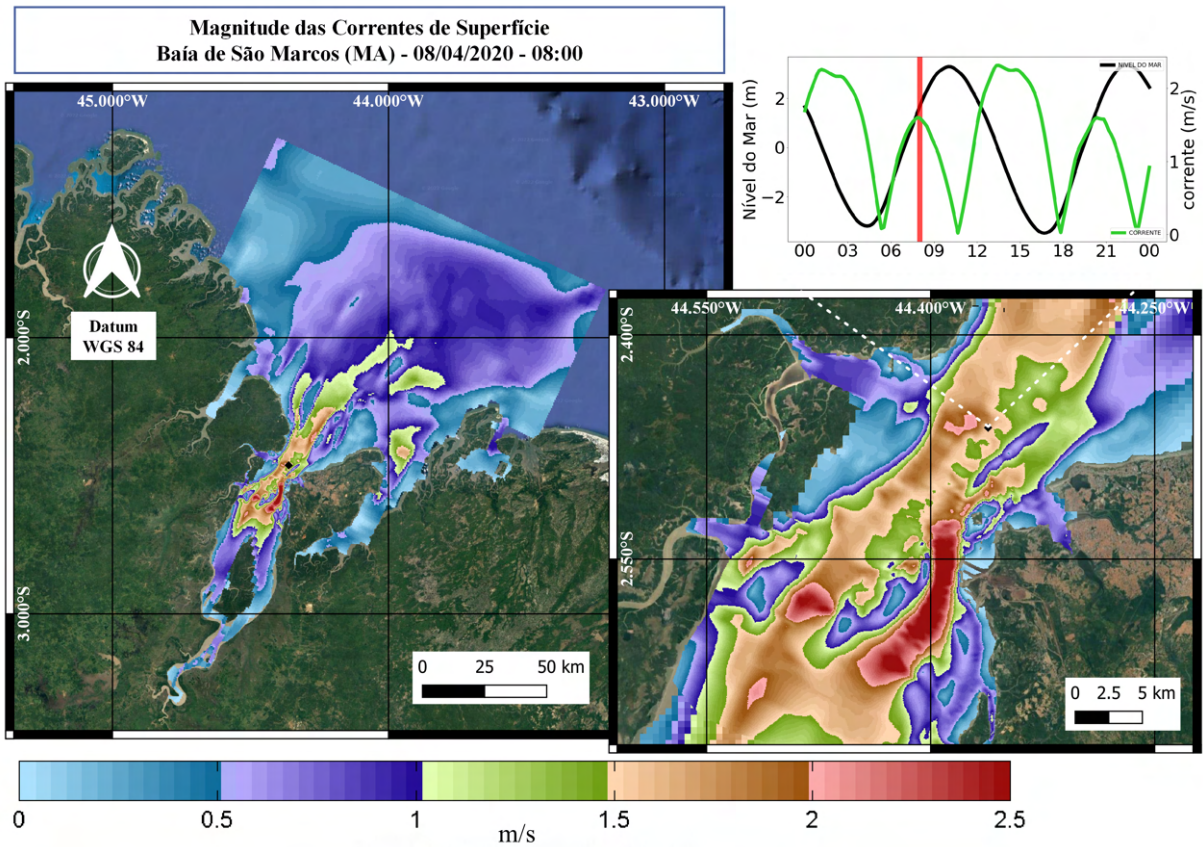


Figura 44: Mapa da magnitude das correntes de superfície, produzido com resultados do modelo regional, na maré de enchente, no dia 08 de abril de 2020.

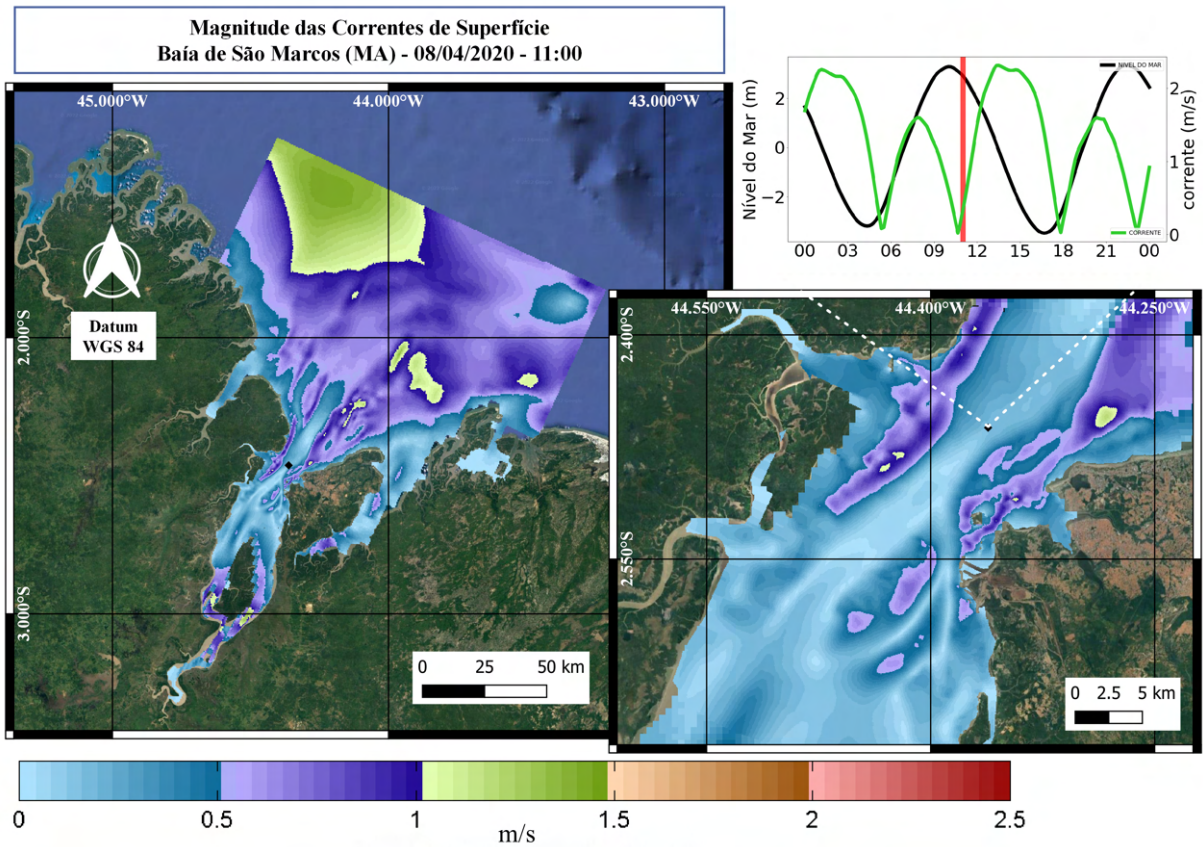


Figura 45: Mapa da magnitude das correntes de superfície, produzido com resultados do modelo regional, na preamar, no dia 08 de abril de 2020.

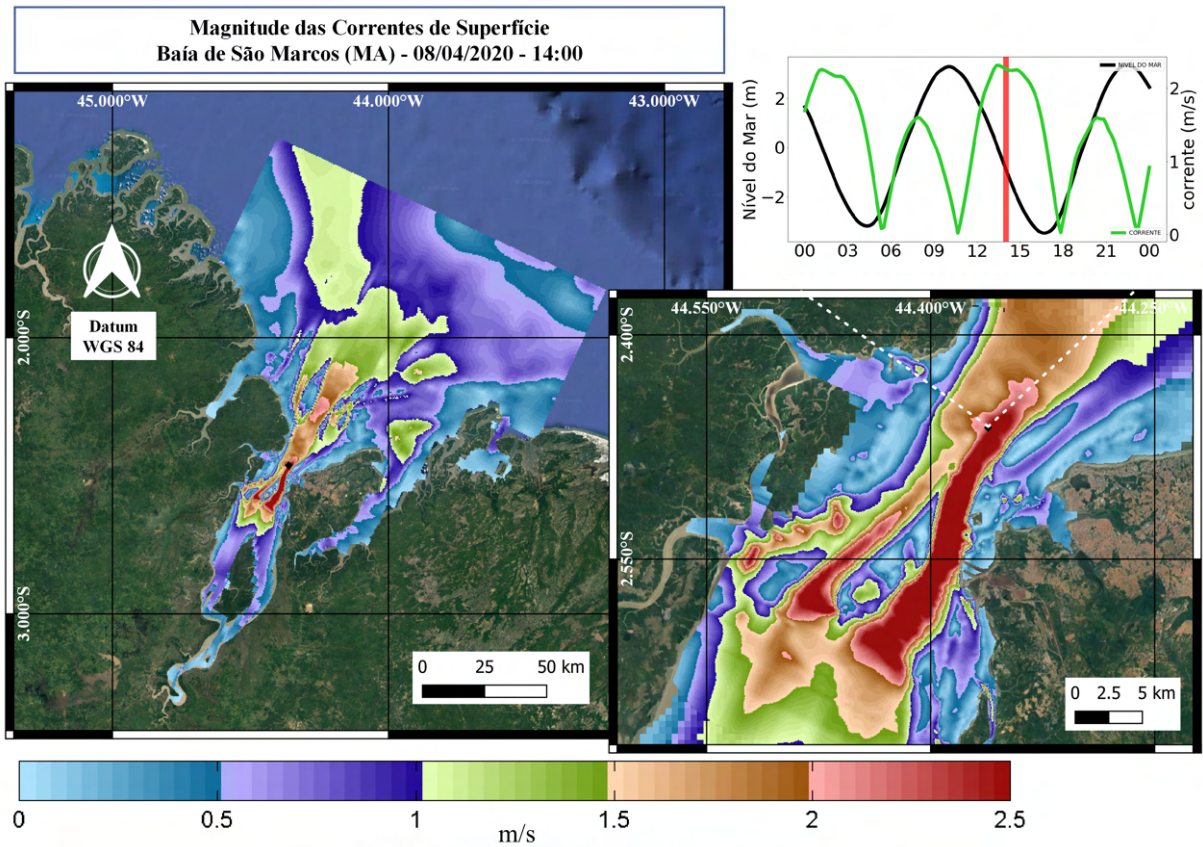


Figura 46: Mapa da magnitude das correntes de superfície, produzido com resultados do modelo regional, na maré de vazante, no dia 08 de abril de 2020.

Abril de 2020 - meio e fundo

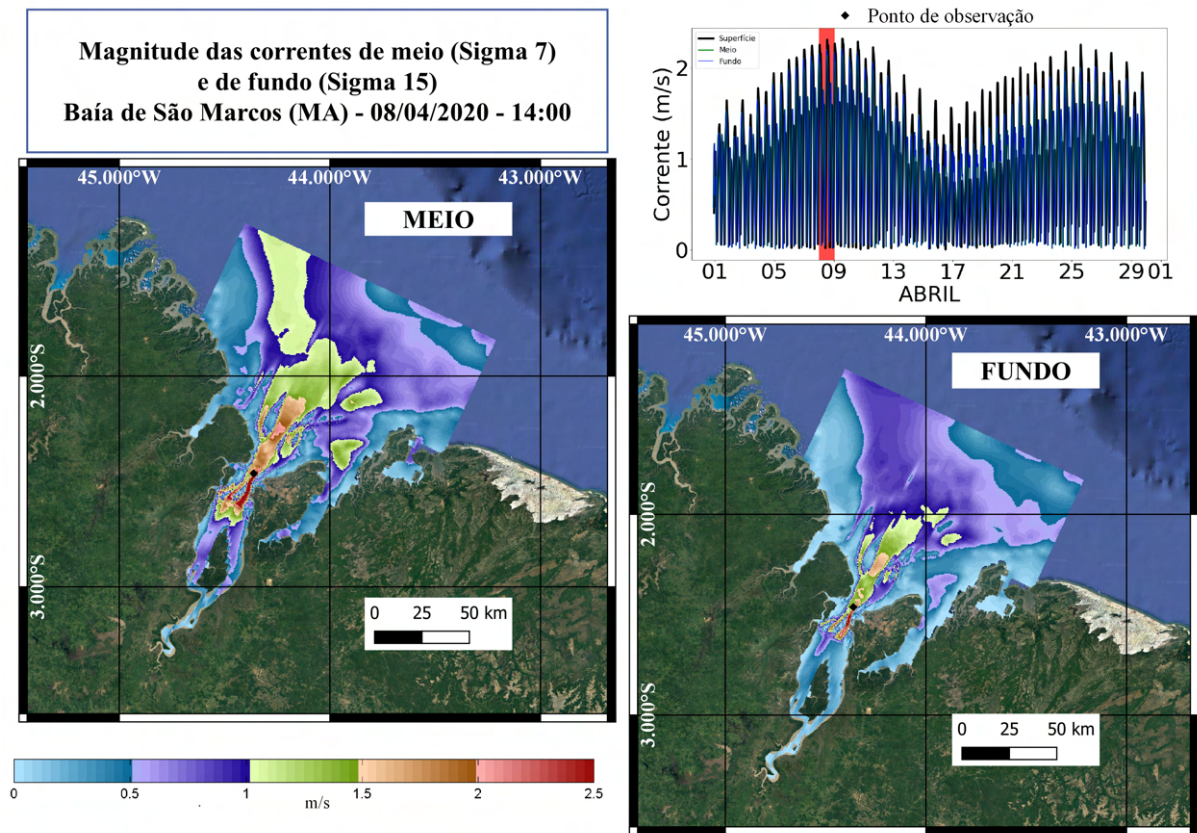


Figura 47: Mapa da magnitude das correntes de meio e fundo, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de vazante, no dia 08 de abril de 2020.

Setembro de 2020 - superfície

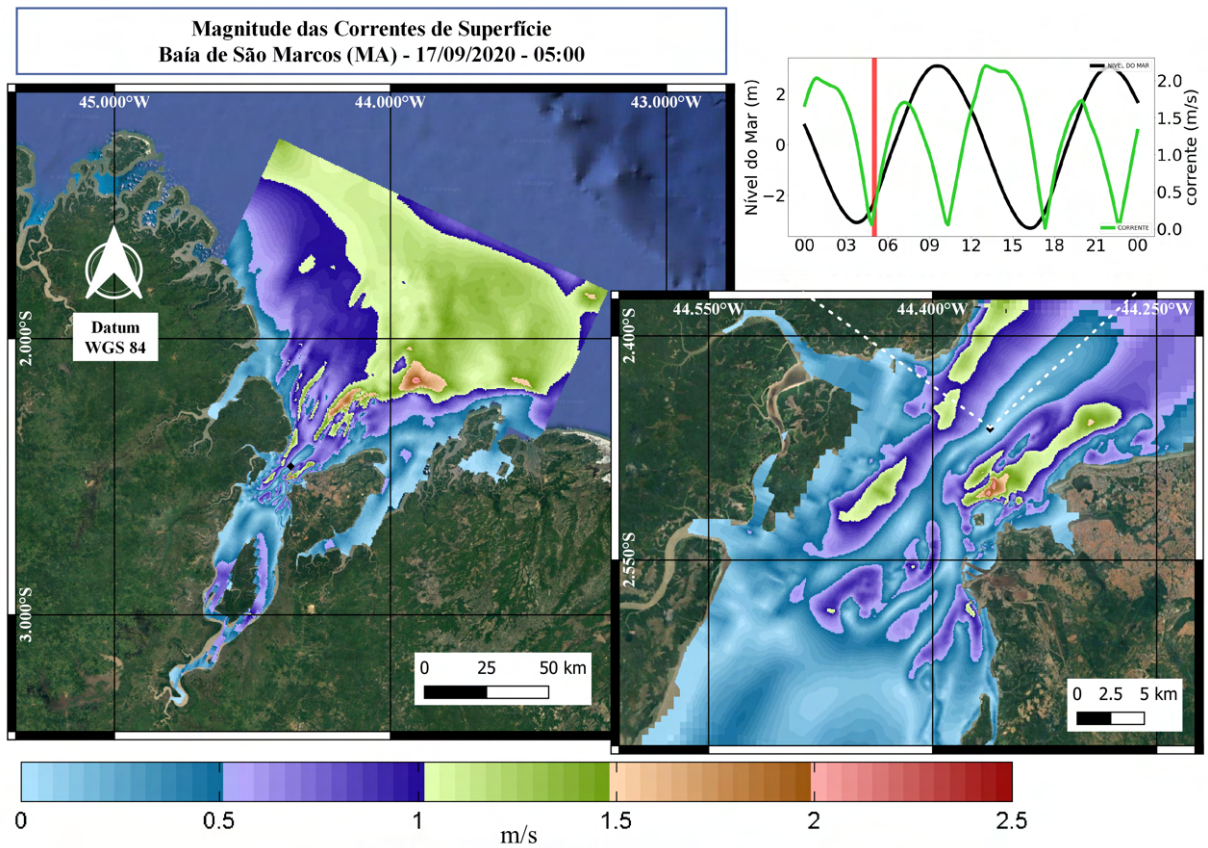


Figura 48: Mapa da magnitude das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na baixamar, no dia 17 de setembro de 2020.

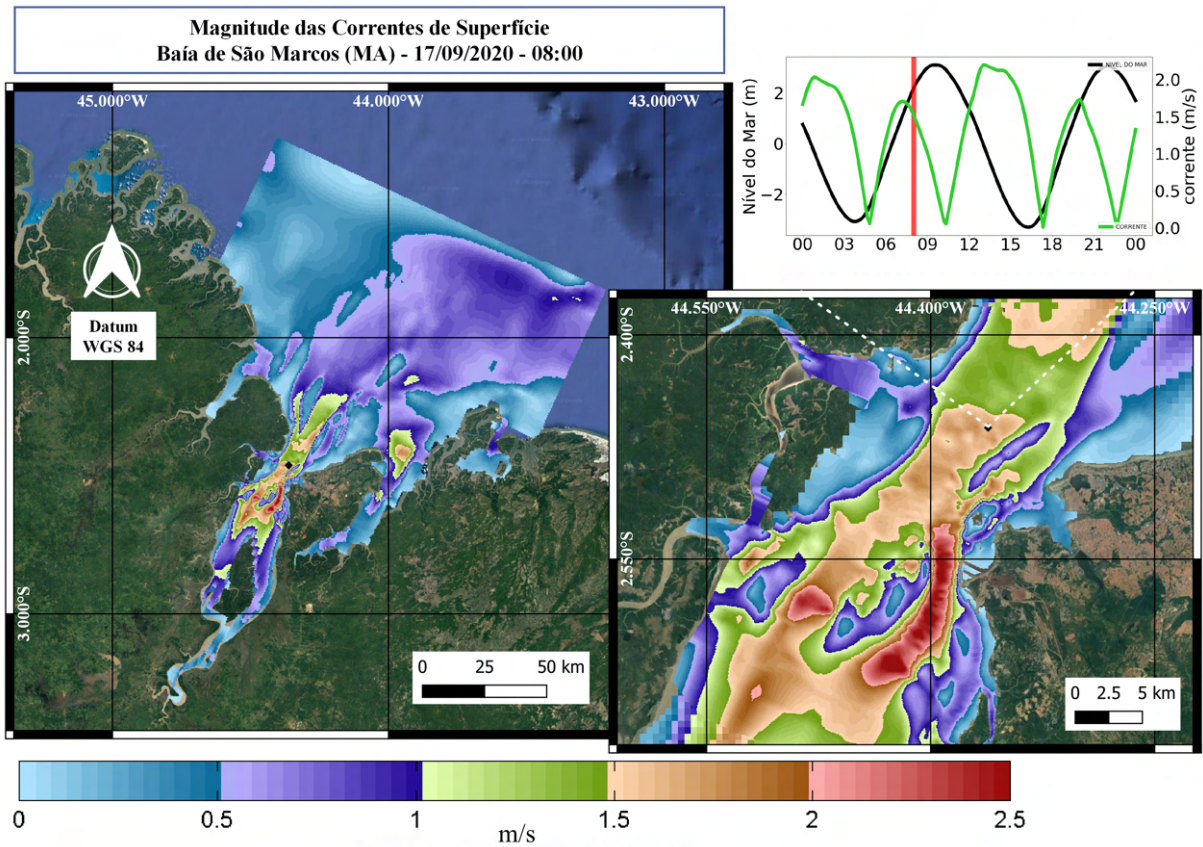


Figura 49: Mapa da magnitude das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de enchente, no dia 17 de setembro de 2020.

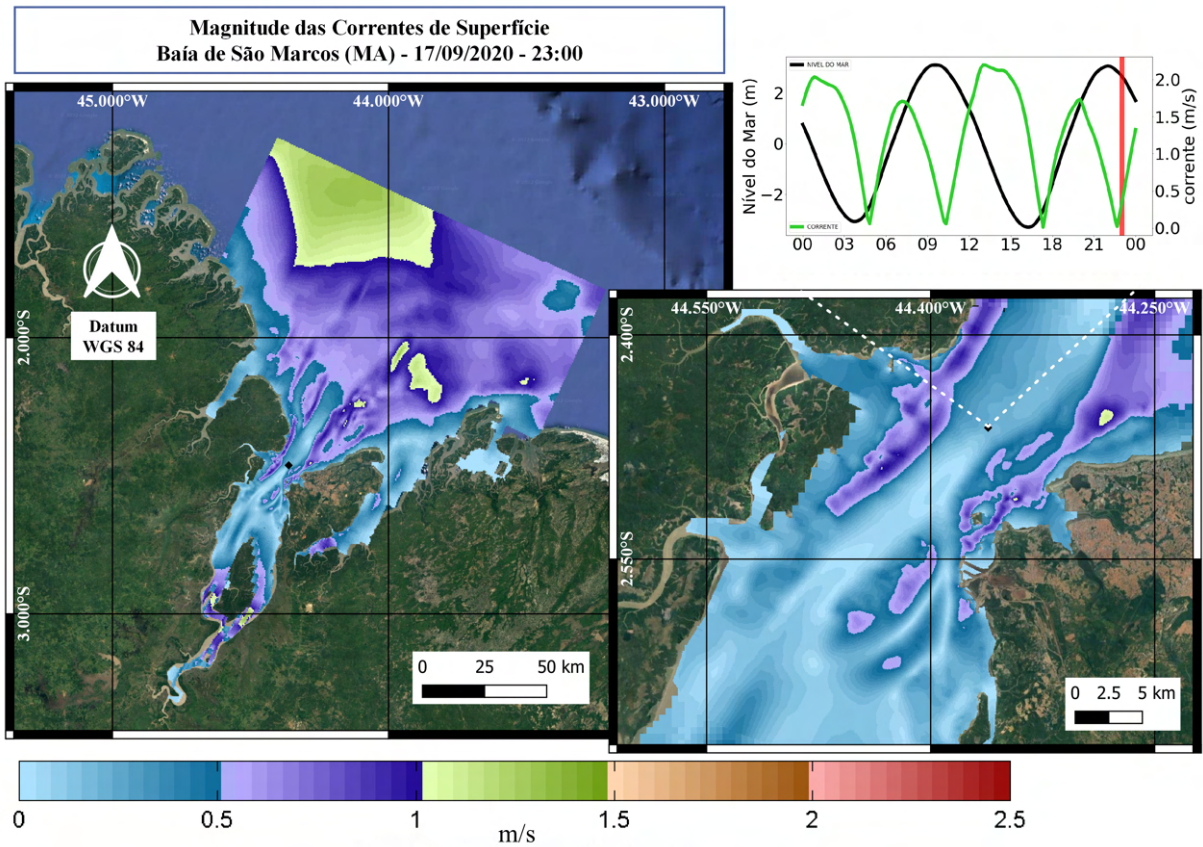


Figura 50: Mapa da magnitude das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na preamar, no dia 17 de setembro de 2020.

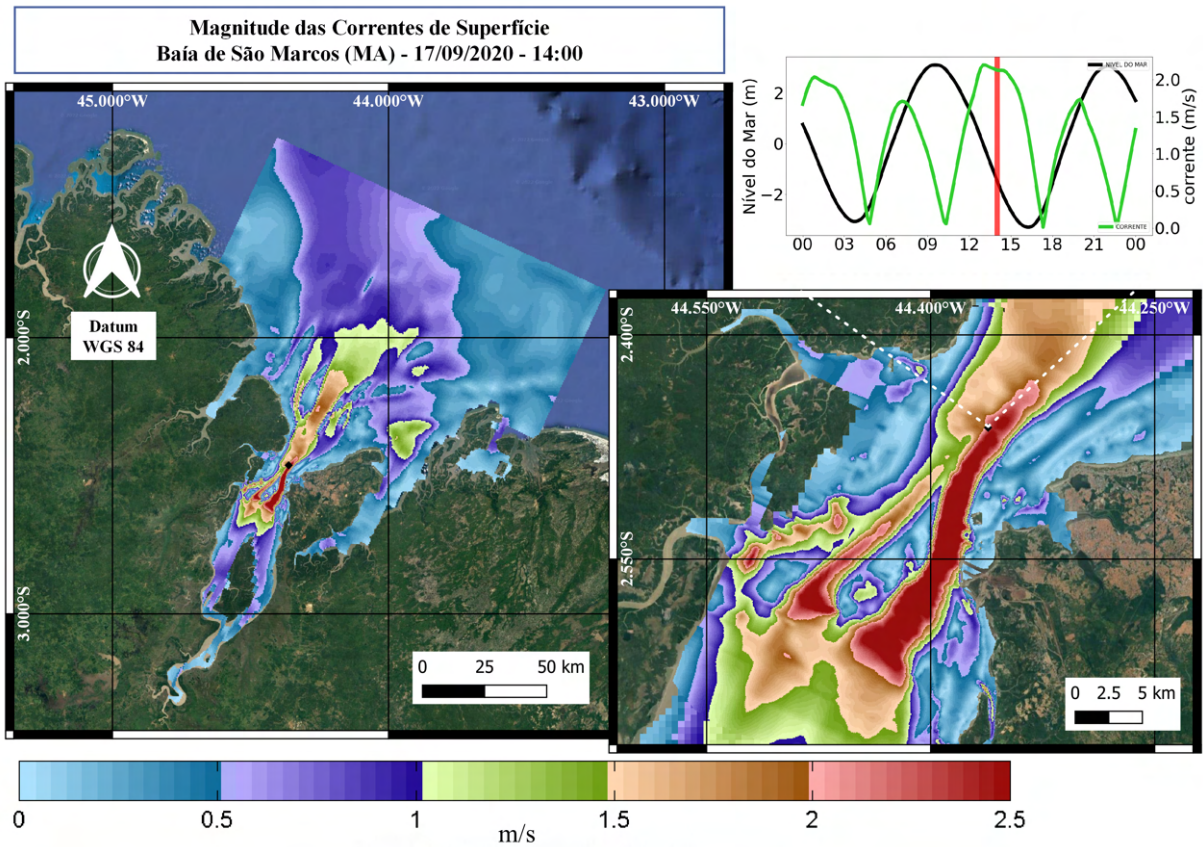


Figura 51: Mapa da magnitude das correntes de superfície, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de vazante, no dia 17 de setembro de 2020.

Setembro de 2020 - meio e fundo

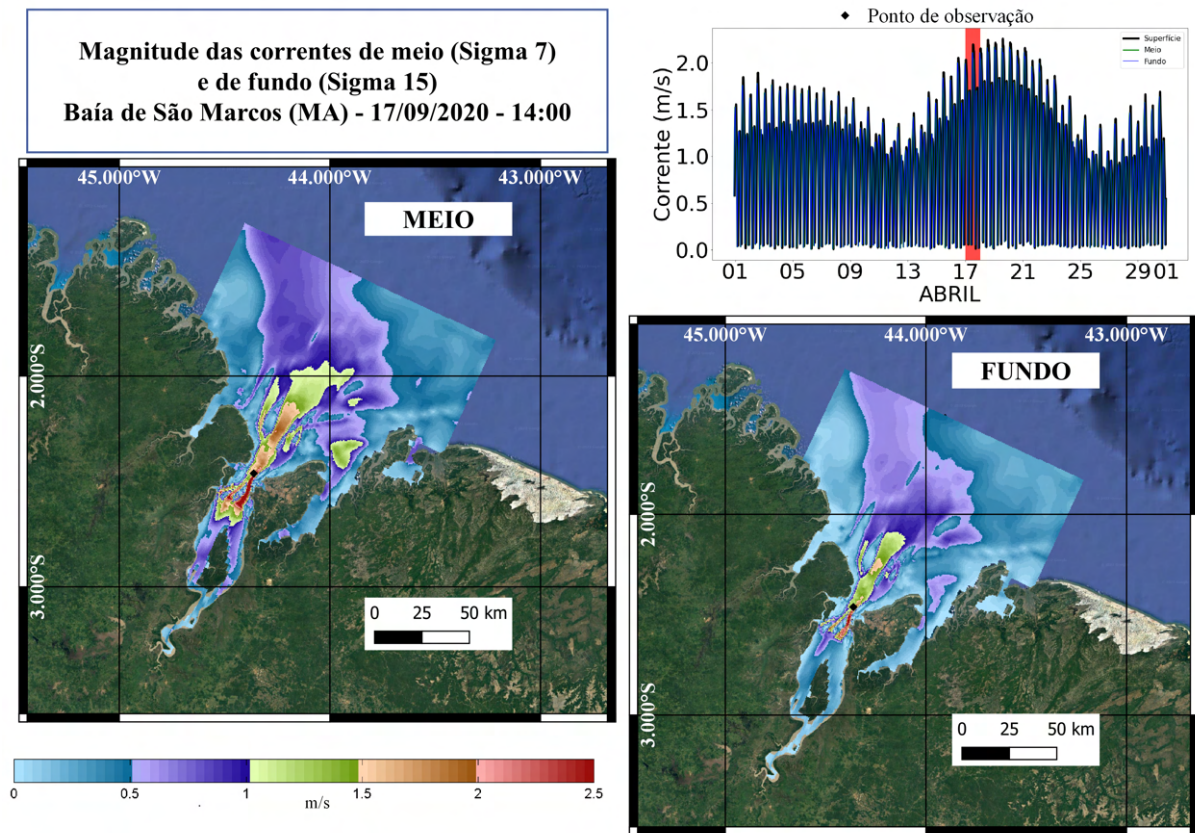


Figura 52: Mapa da magnitude das correntes de meio e fundo, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de vazante, no dia 17 de setembro de 2020.

Os dois meses apresentaram similaridade na distribuição da magnitude das correntes nas 4 fases da maré. Pode-se notar uma defasagem entre os picos do nível do mar e de corrente. A magnitude de meio e fundo é menor que a de superfície, como esperado, devido ao atrito com o fundo; no entanto, esta atenuação não ocorre em locais com intensidade maior ou igual a 2,5m/s.

4.3.3 Distribuição de Temperatura

Os mapas temáticos de temperatura foram confeccionados para os regimes de maré de si-zígia e quadratura. O pontos de observação *Canal_Nav_Meio* foi utilizado a fim de auxiliar nas análises dos mapas; uma sessão, perpendicular a linha de costa, foi representada graficamente, para averiguar a presença da pluma fluvial e estratificação horizontal.

Abril de 2020 - superfície

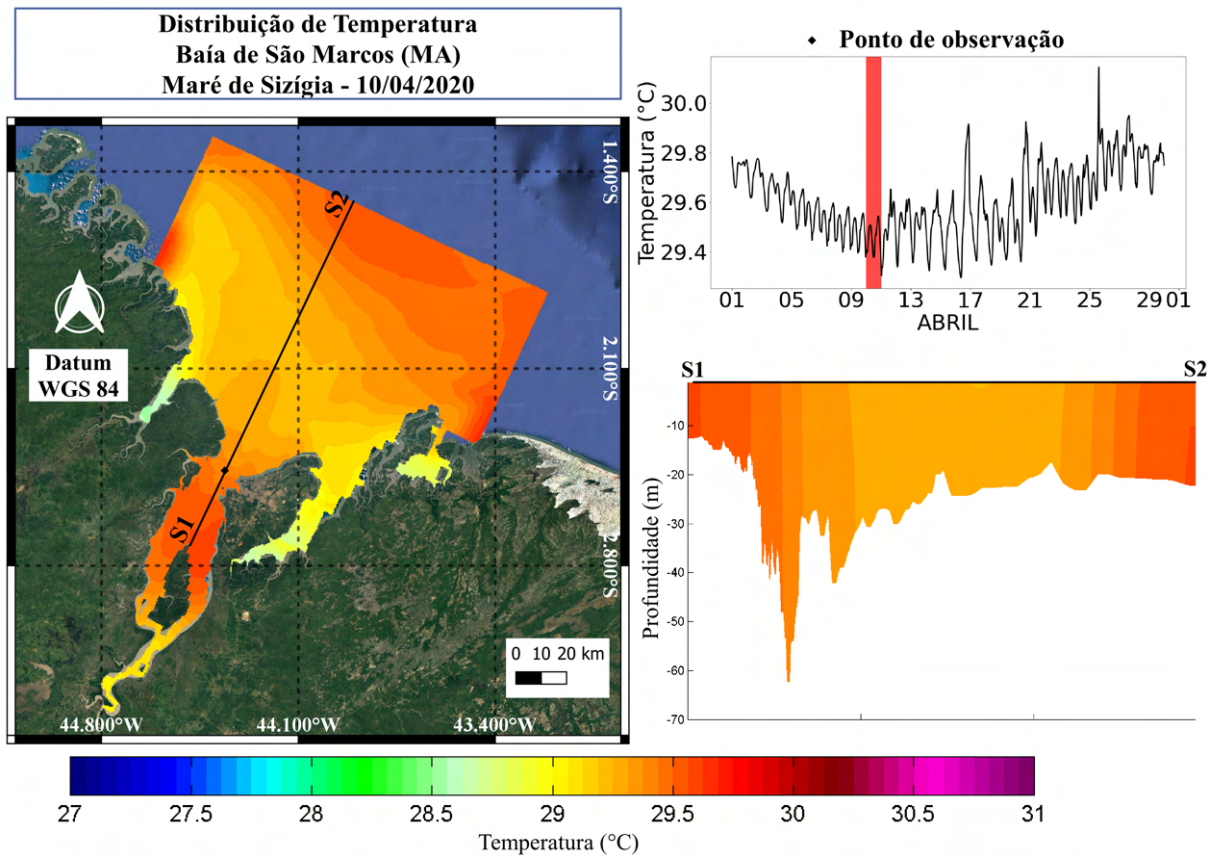


Figura 53: Mapa da distribuição da temperatura de superfície do mar, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de sízigia, no dia 10 de abril de 2020.

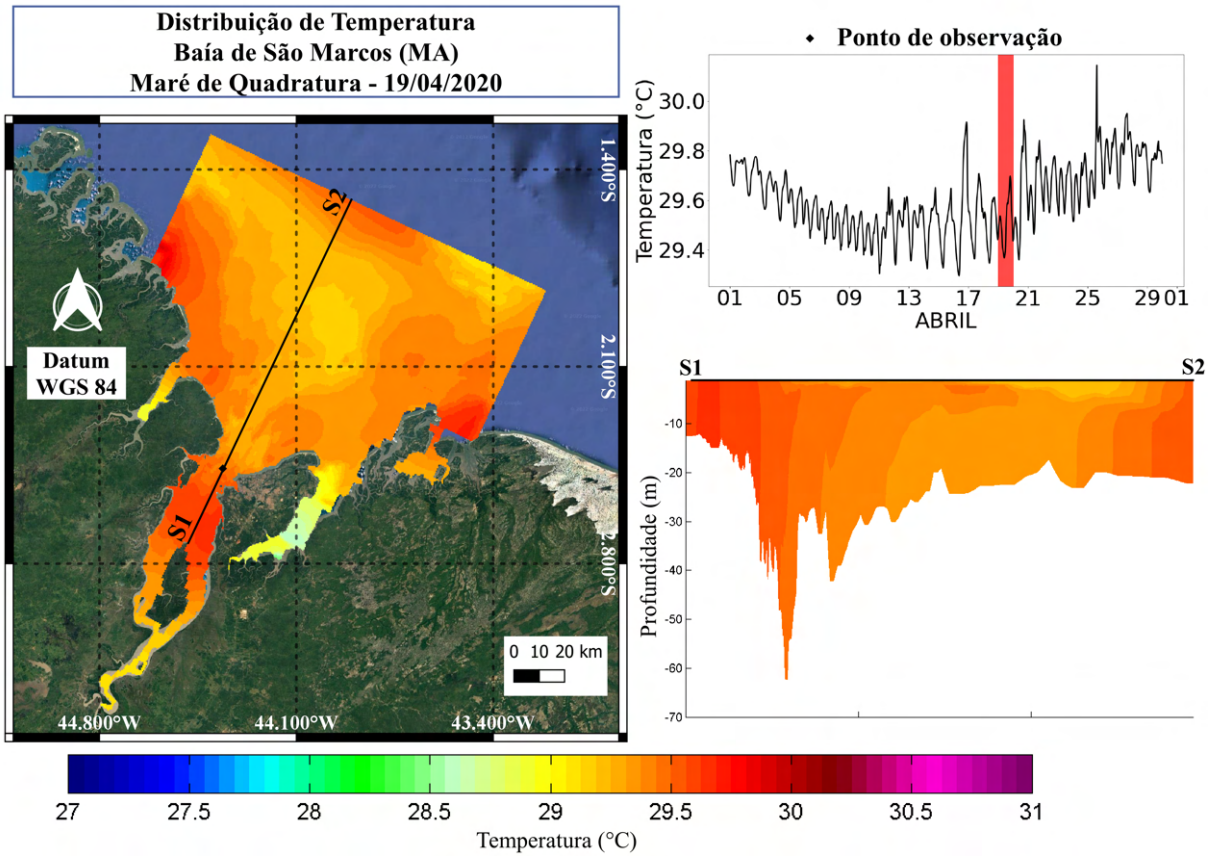


Figura 54: Mapa da distribuição da temperatura de superfície do mar, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de quadratura, no dia 19 de abril de 2020.

Abril de 2020 - meio e fundo

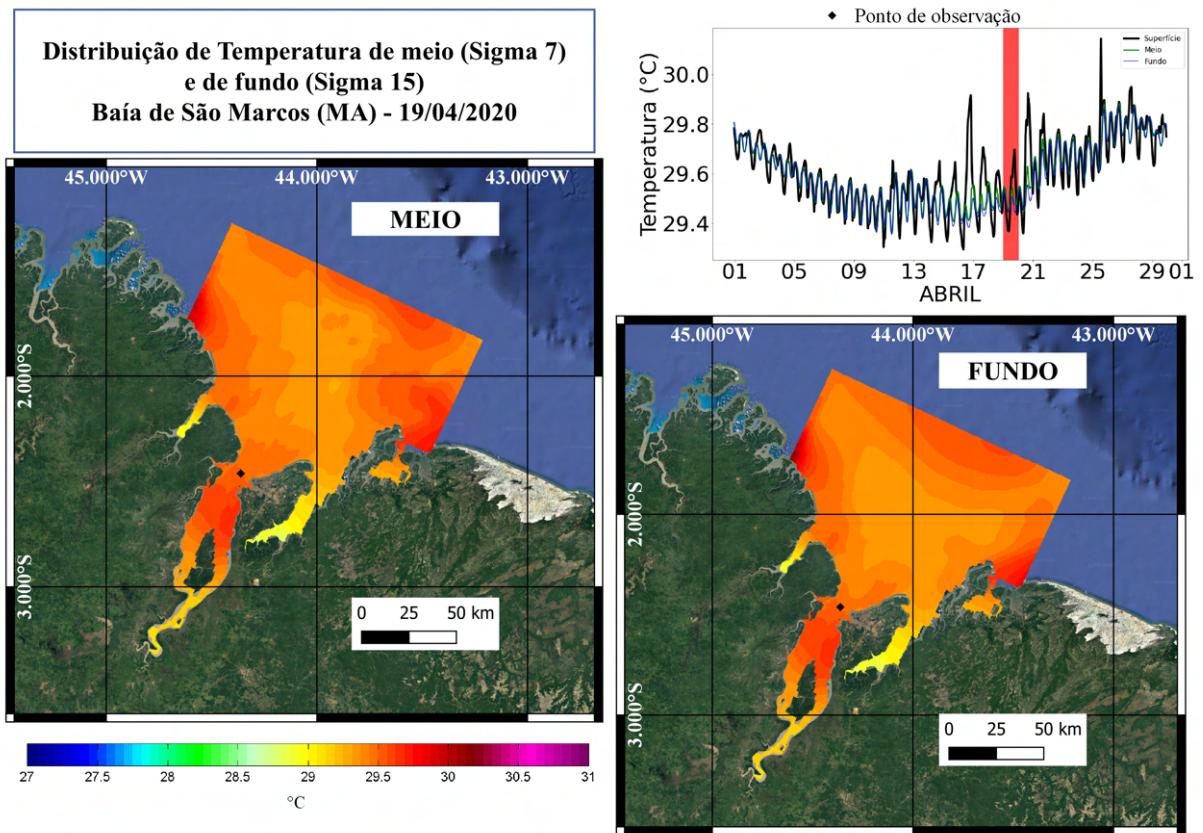


Figura 55: Mapa da distribuição da temperatura de meio e fundo, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de quadratura, no dia 19 de abril de 2020.

Setembro de 2020 - superfície

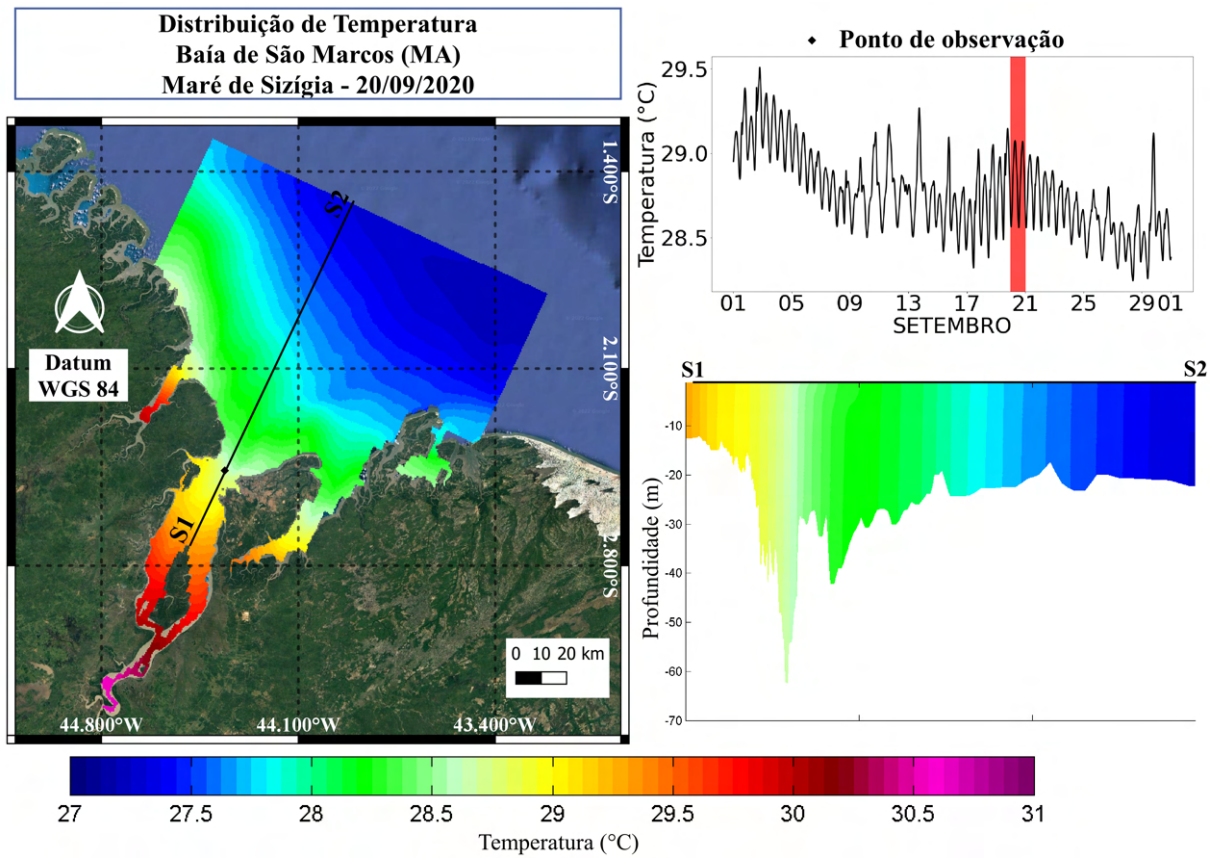


Figura 56: Mapa da distribuição da temperatura de superfície do mar, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de sízigia, no dia 20 de setembro de 2020.

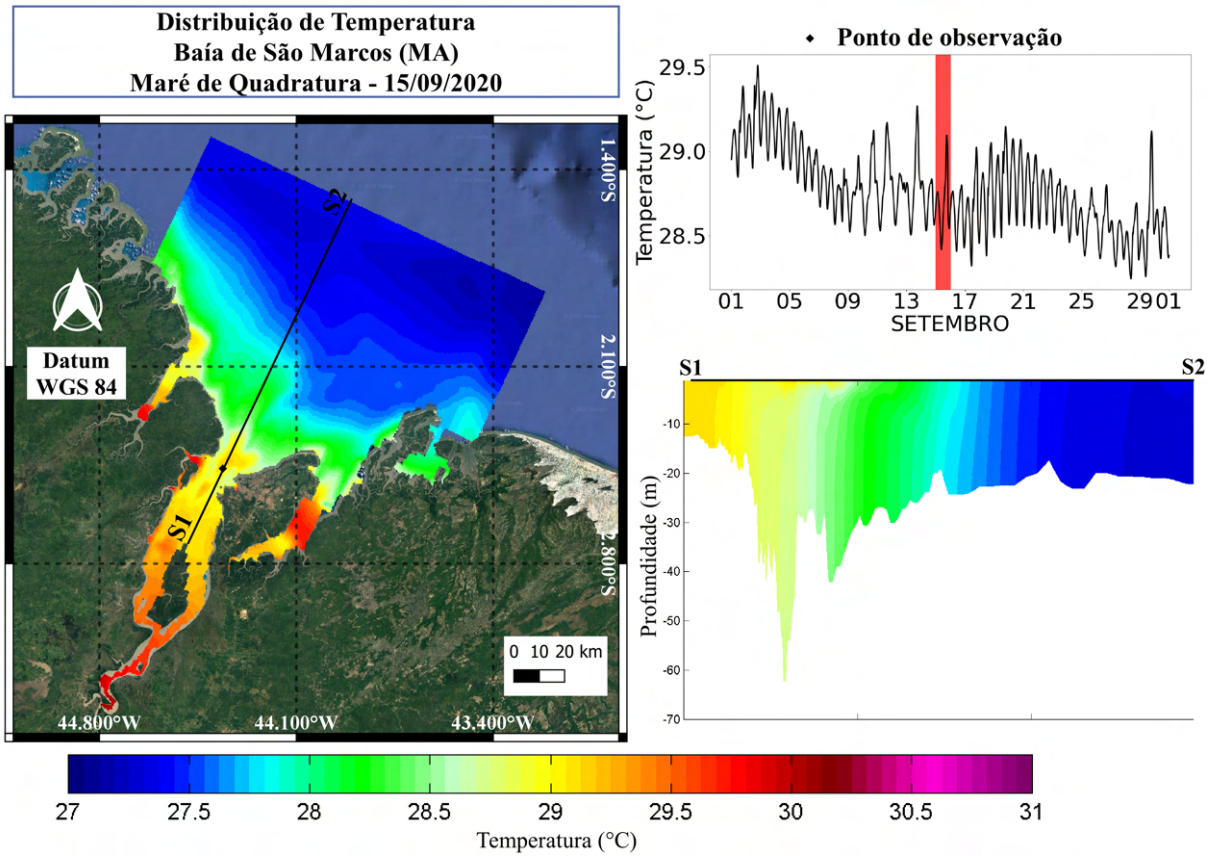


Figura 57: Mapa da distribuição da temperatura de superfície do mar, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de quadratura, no dia 15 de setembro de 2020.

Setembro de 2020 - meio e fundo

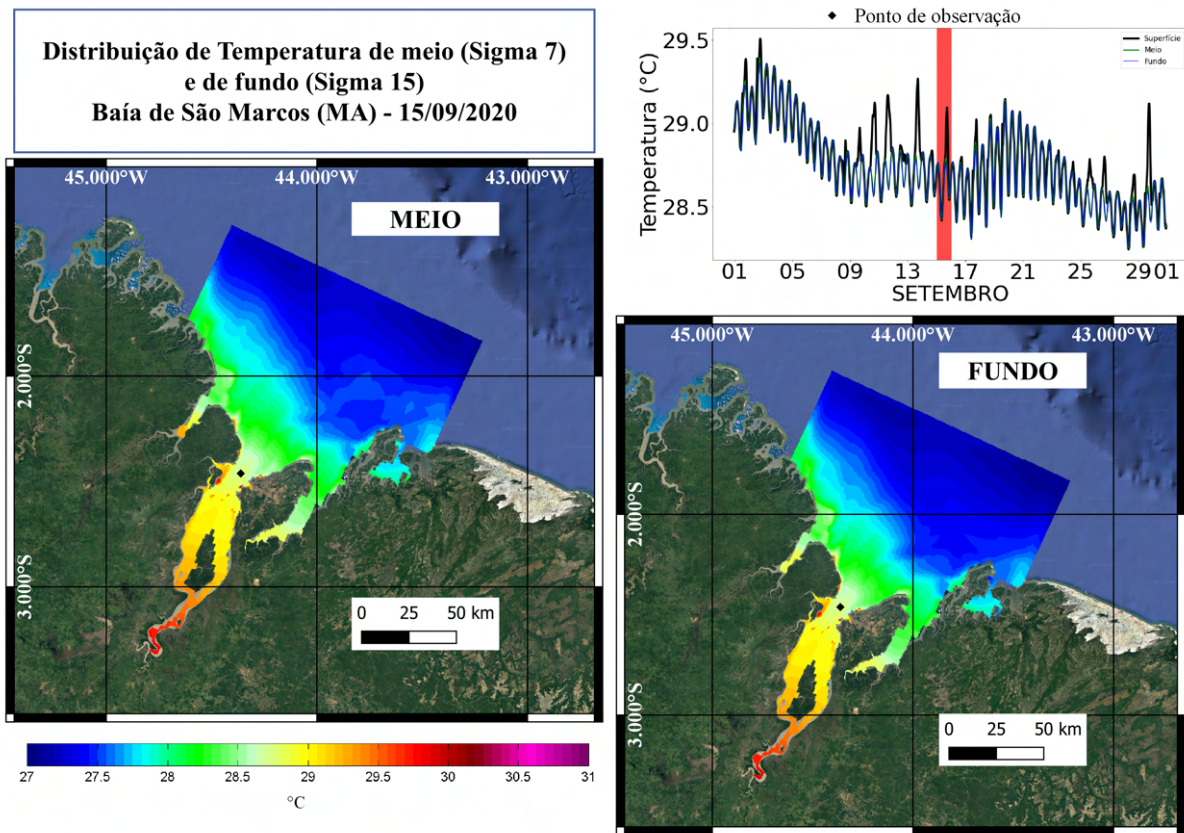


Figura 58: Mapa da distribuição da temperatura de meio e fundo, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de quadratura, no dia 15 de setembro de 2020.

Os mapas temáticos de temperatura da superfície do mar corroboram, para todo o domínio do modelo, com as respectivas séries temporais anteriormente analisadas, onde se tem temperaturas em setembro menores do que em abril. A temperatura, na quadratura, para o mês de abril, indica a presença de uma pluma fluvial que se desloca para noroeste ao chegar na plataforma (Figura 54). Em setembro, também na quadratura, foi observado uma tênue pluma fluvial (Figura 57). Na sizígia, para os dois meses, a estratificação horizontal é predominante.

4.3.4 Distribuição de Salinidade

Os mapas temáticos de salinidade foram confeccionados para os regimes de maré de sizígia e quadratura. O ponto de observação *Canal_Nav_Meio* foi utilizado a fim de auxiliar as análises dos mapas e uma sessão, perpendicular a linha de costa, foi representada graficamente, para averiguar a presença da pluma fluvial e a estratificação horizontal.

Abril de 2020 - superfície

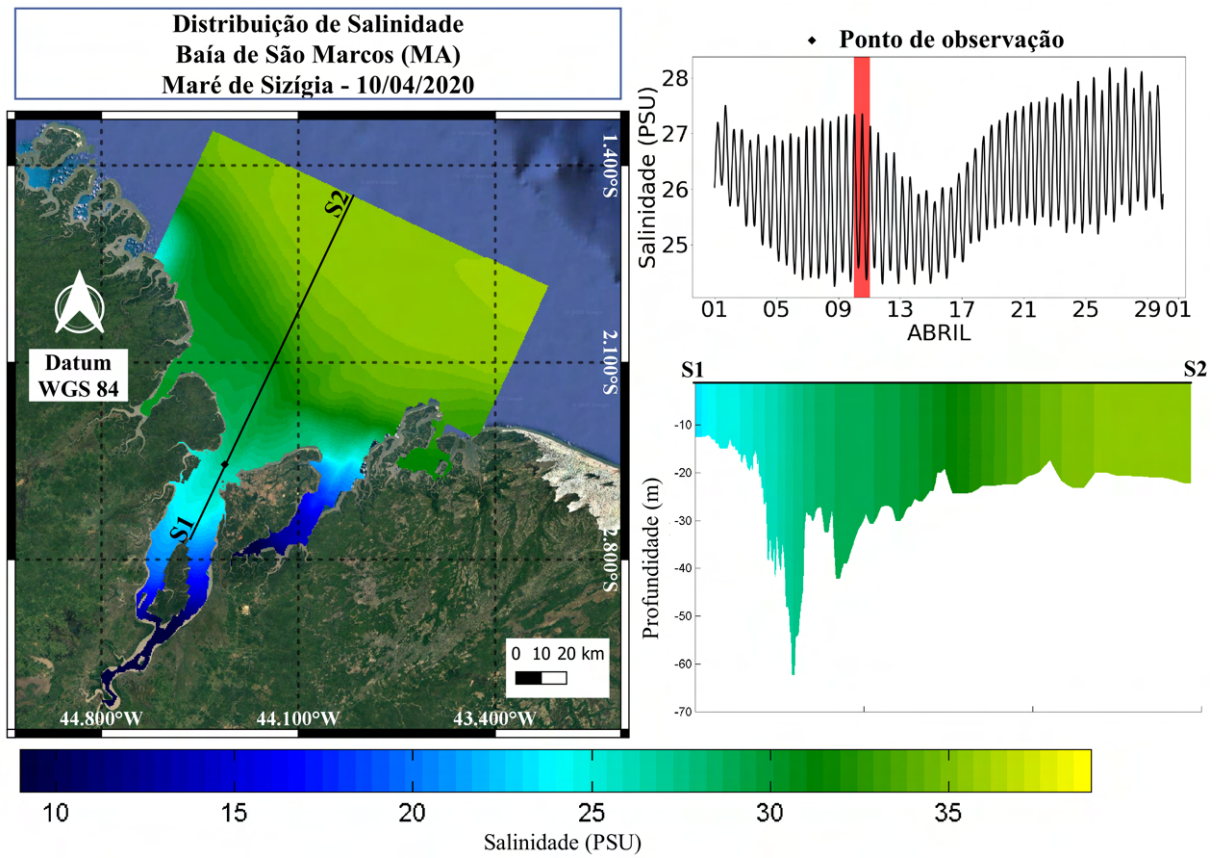


Figura 59: Mapa da distribuição de salinidade da superfície do mar, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de sizigia, no dia 10 de abril de 2020.

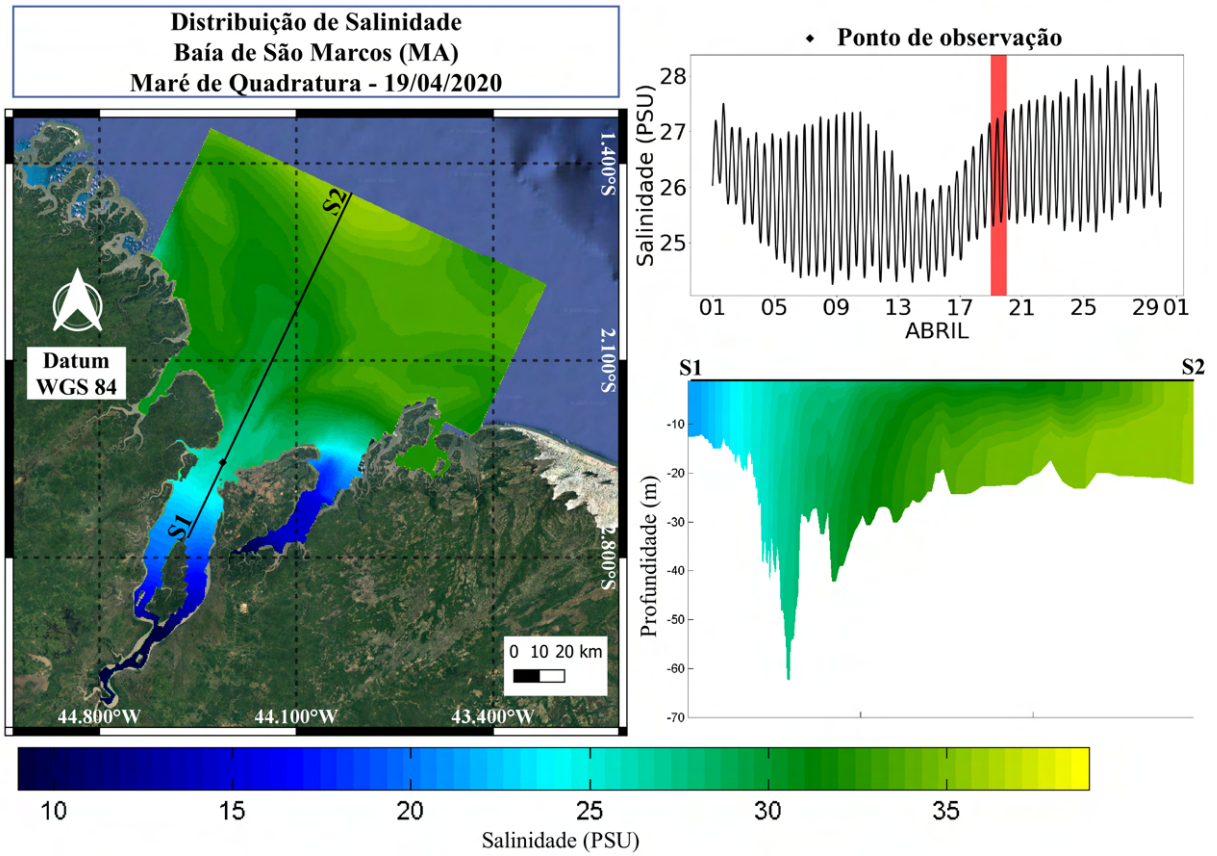


Figura 60: Mapa da distribuição de salinidade da superfície do mar, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de quadratura, no dia 19 de abril de 2020.

Abril de 2020 - meio e fundo

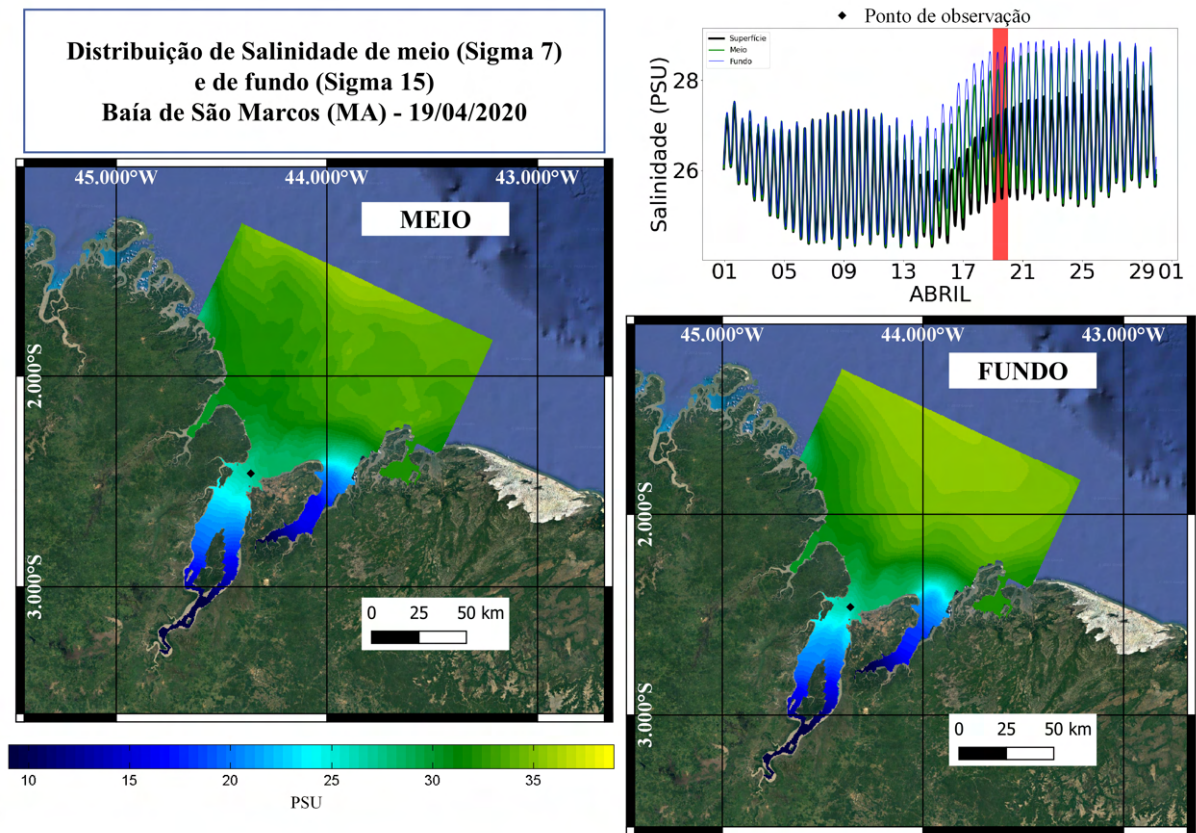


Figura 61: Mapa da distribuição da salinidade de meio e fundo, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de quadratura, no dia 19 de abril de 2020.

Setembro de 2020 - superfície

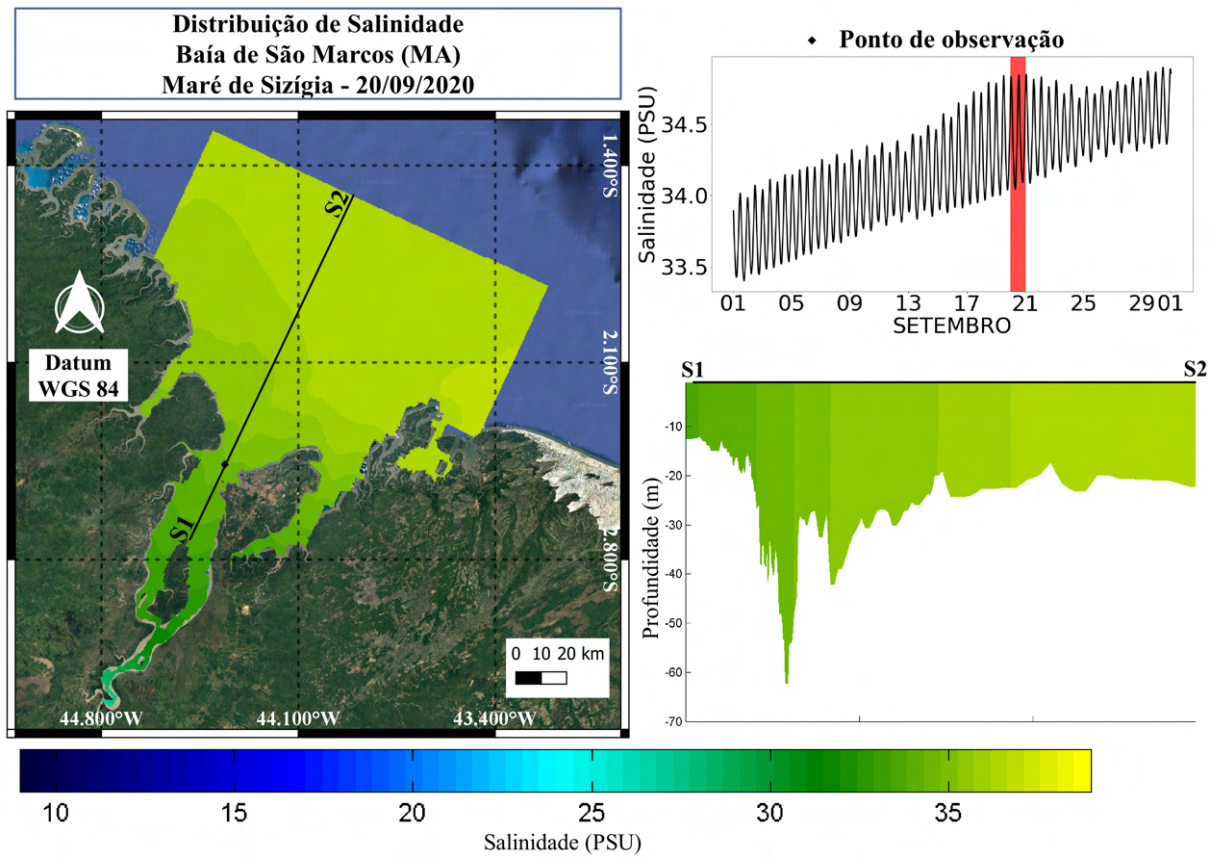


Figura 62: Mapa da distribuição de salinidade da superfície do mar, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de sizígia, no dia 20 de setembro de 2020.

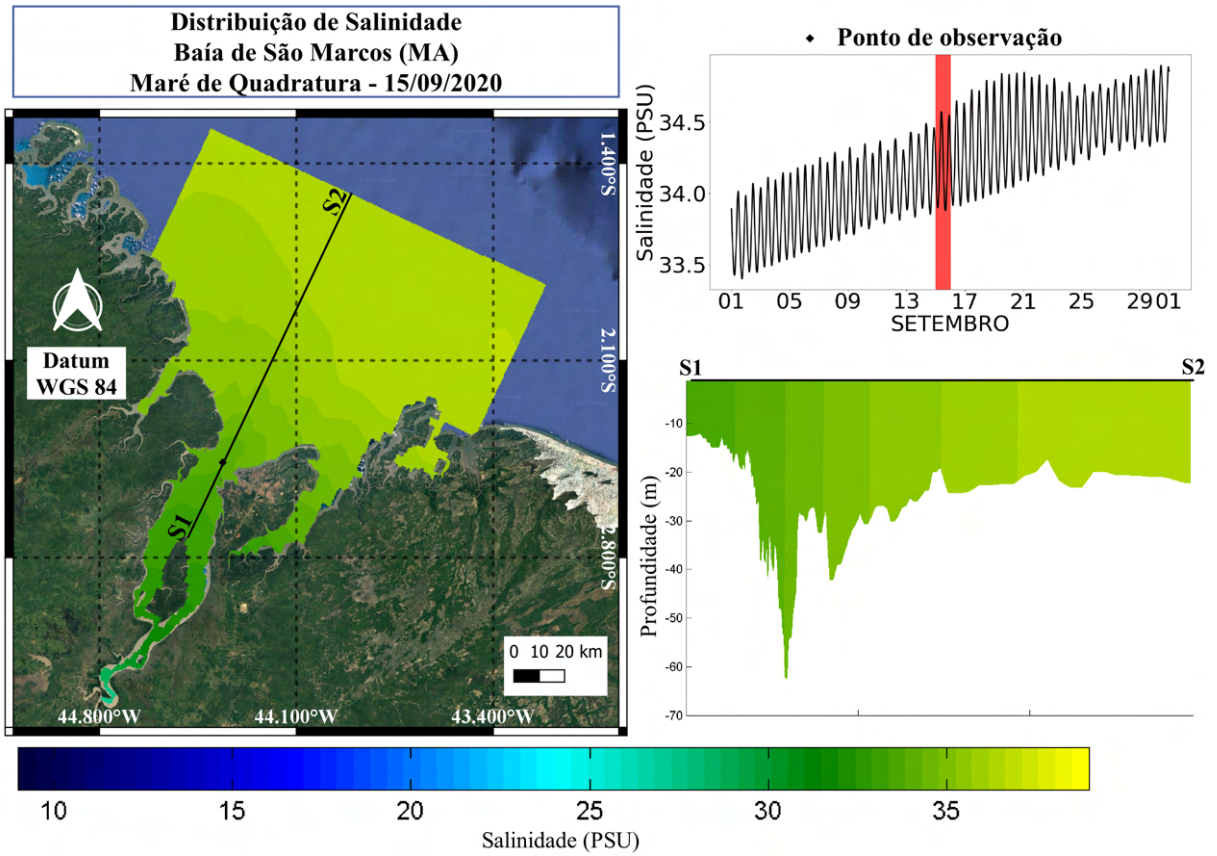


Figura 63: Mapa da distribuição de salinidade da superfície do mar, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de quadratura, no dia 15 de setembro de 2020.

Setembro de 2020 - meio e fundo

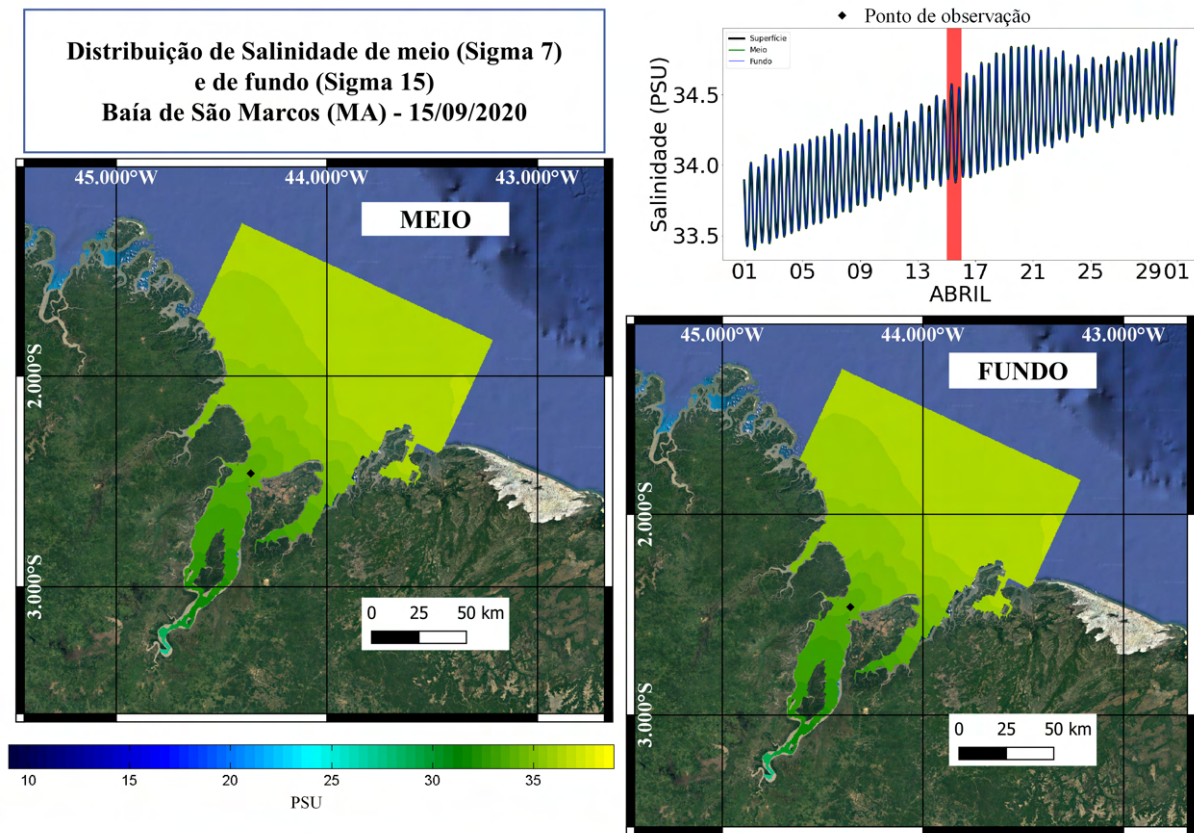


Figura 64: Mapa da distribuição da salinidade de meio e fundo, produzidos com resultados do modelo regional, na maré de quadratura, no dia 15 de setembro de 2020.

A salinidade é a variável que possui maior distinção entre os meses de abril e setembro. Isso é justificado, pela variação sazonal do aporte de água doce na baía. Porém, durante a sizígia, em nenhum dos dois meses, a pluma fluvial venceu a estratificação horizontal (Figuras 62 e 59). A cunha salina fica evidente, apenas na quadratura, para o mês de abril (Figura 60), sendo presente, também, na camada do meio (Figura 61).

4.4 SISTEMA DE ALERTA

4.4.1 Validação do Modelo Local

A tabela 11 mostra os resultados estatísticos utilizados para a validação do modelo local. Os pontos de grade utilizados foram comparados com cada célula de medições do *ADCP* horizontal fundeado no local. A fim de facilitar a visualização dos bons resultados indicados pelos

parâmetros estatísticos, foram demarcadas, com o preenchimento verde, os resultados com *skill* maior que 0,8; *r* maior que 0,7; e *RMAE* menor que 0,2.

Tabela 11: Parâmetros estatísticos comparativos de nível do mar e corrente, para a grade local, referentes ao processamento de abril de 2020.

| Validação Modelo Local | | DOLFIN 15 | PIER 1 |
|---------------------------|-------|-----------|--------|
| Nível do Mar | Skill | 0,995 | 0,994 |
| | RMAE | 0,041 | 0,041 |
| | r | 0,973 | 0,972 |
| Corrente Pier | Skill | 0,743 | 0,9 |
| | RMAE | 0,177 | 0,101 |
| | r | -0,032 | 0,584 |
| Corrente 30m | Skill | 0,804 | 0,817 |
| | RMAE | 0,157 | 0,116 |
| | r | -0,007 | 0,409 |
| Corrente 50m | Skill | 0,831 | 0,391 |
| | RMAE | 0,141 | 0,236 |
| | r | 0,012 | 0,037 |
| Corrente 70m | Skill | 0,841 | 0,194 |
| | RMAE | 0,135 | 0,299 |
| | r | 0,136 | -0,298 |
| Corrente 90m | Skill | 0,765 | 0,237 |
| | RMAE | 0,198 | 0,289 |
| | r | 0,22 | -0,234 |
| Corrente 110m | Skill | 0,637 | 0,568 |
| | RMAE | 0,27 | 0,196 |
| | r | 0,371 | 0,073 |

A Tabela 11 expõe os mesmo valores estatísticos obtidos para o nível do mar na validação desta variável para a grade regional, como era esperado. Em relação à magnitude das correntes, existe diferenças entre a validação da grade local e da grade regional: de modo geral, os índices estatísticos do *DOLFIN 15* apresentaram melhores resultados em comparação ao *PIER 1*, para o qual se obteve bons resultados estatísticos apenas na célula adjacente ao Pier, a 30m e a 110m; já no *DOLFIN 15* não se obteve bons índices somente na célula de 110m.

A partir da análise das séries temporais dos pontos de monitoramento, levando em consideração os dados do *ADCP* nas diferentes células de medições, foram escolhidos para efetuar a análise da NPCP os pontos a 70m do *DOLFIN 15* e a 110m do *PIER 1*. A escolha levou em consideração os índices estatísticos, a similaridade na magnitude e a pouca influência do pier. No ponto *PIER 1* se obteve os melhores índices estatísticos próximo ao pier e a 30m, mas

peço fato da corrente ser atenuada devido à influência do atrito com o píer, o ponto a 120m foi escolhido, com o intuito da análise não envolver um ponto com magnitude subestimada.

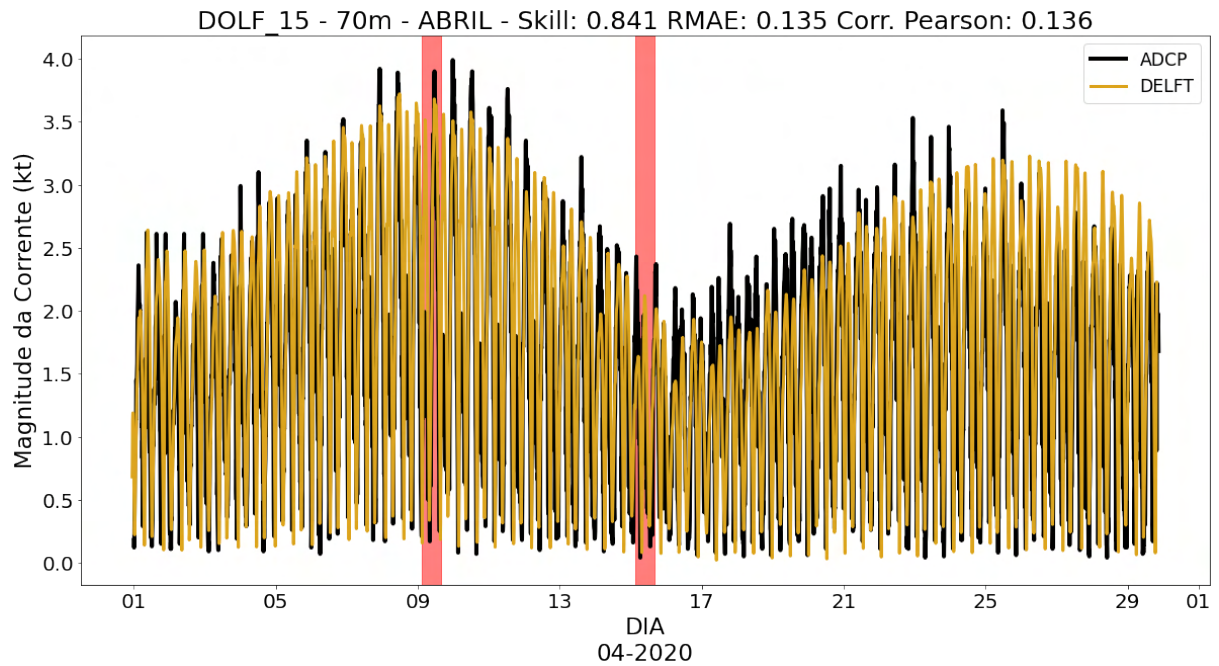


Figura 65: Comparação estatística das séries temporais de magnitude das correntes entre os resultados do *Delft3D*, ponto *DOLFIN 15*, e obtidos *in loco*, pelo perfilador acústico de corrente (*ADCP*), a 70m do píer, para o mês de abril de 2020. Em vermelho, encontram-se os dois períodos escolhidos para a análise do sistema de alerta: dias 09 e 15 de abril.

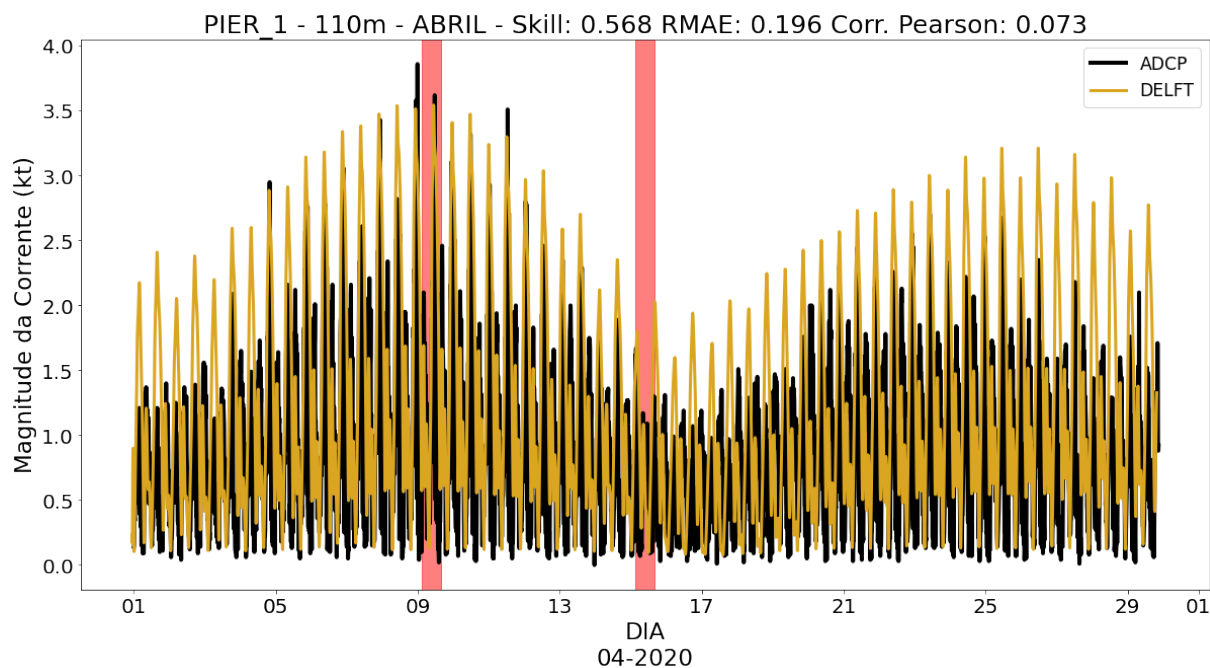


Figura 66: Comparação estatística das séries temporais de magnitude das correntes entre os resultados do *Delft3D*, ponto *PIER 1*, e obtidos *in loco*, pelo perfilador acústico de corrente (*ADCP*), a 110m do píer, para o mês de abril de 2020. Em vermelho, encontram-se os dois períodos escolhidos para a análise do sistema de alerta: dias 09 e 15 de abril.

As Figuras 65 e 66 mostram as séries temporais dos dois pontos que foram utilizados para estabelecer o sistema de alerta. Uma faixa vermelha foi adicionada nas figuras, nos períodos selecionados para realizar a análise: mínimo da quadratura e máximo da sizígia. É possível reparar que, nestes períodos, há uma boa concordância nos máximos dos dados medidos pelo *ADCP* se comparado aos resultados do modelado.

4.4.2 Análise da NPCP

A análise da NPCP se restringiu a dois momentos distintos do mês de abril: mínimo da quadratura, dia 15, e máximo da sizígia, dia 09. O objetivo consistiu em encontrar, no máximo da sizígia, a intensidade limite da corrente para se utilizar como padrão para o sistema de alerta de cada Píer; e teve a finalidade de determinar se, no mesmo período, há janelas operacionais ainda não contempladas. O mínimo da quadratura foi também analisado, com o objetivo de se encontrar a máxima janela operacional que este modelo pode proporcionar, visto que as correntes são atenuadas neste período e a possibilidade de manobra aumentam.

Os Píeres da VALE possuem regras para a manobra conforme a amplitude da maré: o Píer 1 tem regras mais restritivas acima de 4,5m e menos abaixo de 4,5m. Diferente do Píer 4, no

qual não diferencia as regras de manobra pela amplitude de maré. Para o presente estudo, foi considerado que o tempo gasto para se realizar uma manobra de atracação/desatracção é de 1 hora.

As Figuras 67, 68, 69 e 70 representam uma análise conjunta: nível do mar fornecido pelo modelo, informações da tabua de maré, correntes calculadas pelo modelo e correntes observadas. A partir dos horários fornecidos pela tábua de maré, se pode incluir a janela operacional em vigor (em verde) conforme a NPCP. A série da corrente medida *in loco* nos períodos de sizígia foi plotada e estimado o valor para o sistema de alerta a partir da intersecção com as bordas da janela operacional em vigor. Com a intensidade da corrente limite estimada, as novas janelas operacionais possíveis foram demarcadas. Apenas períodos abaixo do alerta, com extensão maior ou igual a 1 hora, foram selecionados em comparação com a corrente observada.

A magnitude da corrente limite estimada para o Píer 1 foi de 1,25 nós. A Figura 67 referente ao máximo da sizígia, mostra uma janela operacional possível de 2 horas e 15 minutos a mais do que a regra estipulada na NPCP. A corrente produzida pelo modelo foi mais intensa do que a observada em alguns pontos, porém, dentro da janela estimada, a corrente calculada pelo modelo foi próxima da observada.

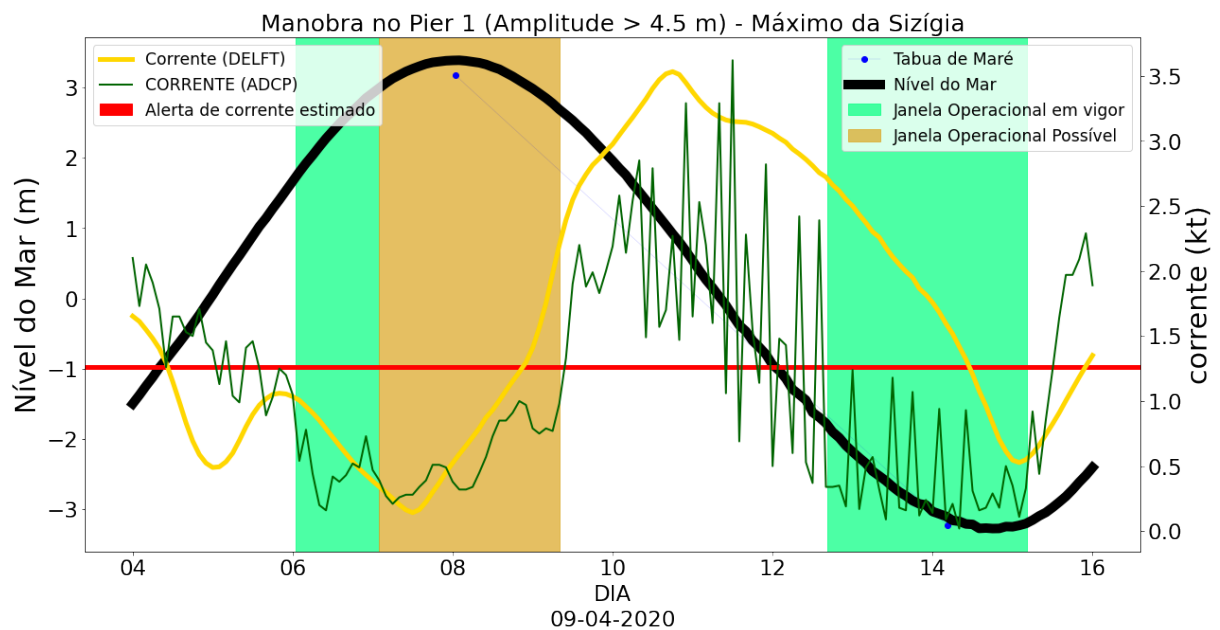


Figura 67: Estudo da Norma de Manobra para o Complexo Portuário da Baía de São Marcos (NPCP) do Píer 1, durante o período de máximo da sizígia, em 09 de abril de 2020, para obtenção de um sistema de alerta e prospecção do aumento da janela operacional do Píer em questão.

Em relação ao cenário mínimo da quadratura para o Píer 1 (Figura 68), no qual a janela operacional em vigor é extensa, a corrente observada permitiu um acréscimo de 2 horas na operação (1 hora antes e 1 hora depois da janela operacional em vigor), mas a corrente fornecida pelo modelo ficou a cima do limite nestes períodos, superestimando a corrente no sistema de alerta.

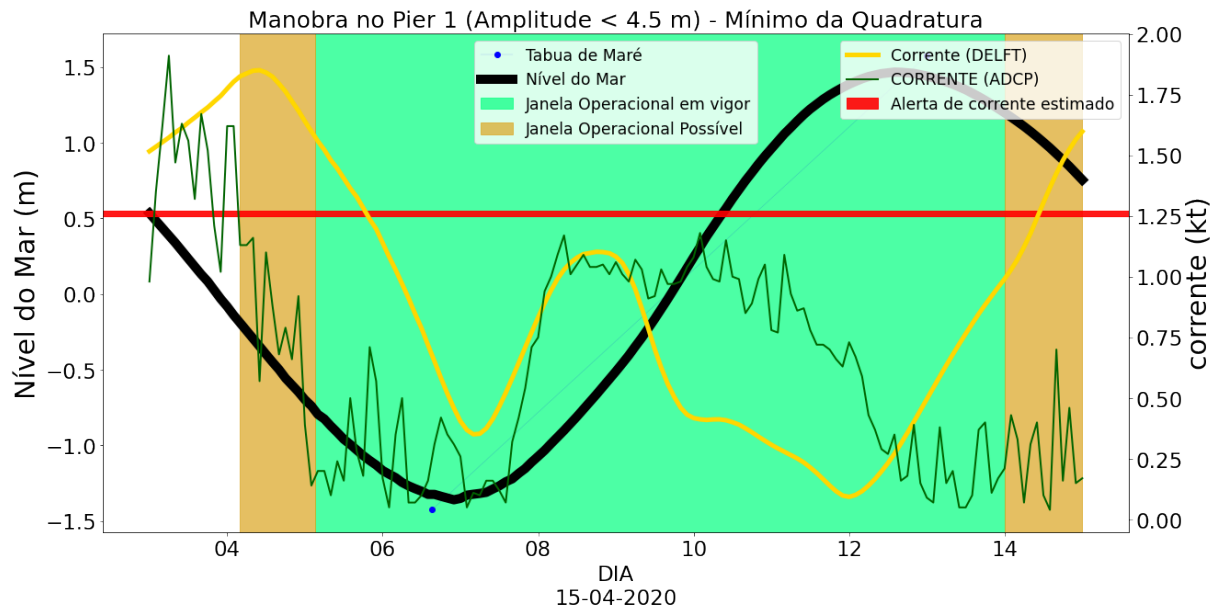


Figura 68: Estudo da Norma de Manobra para o Complexo Portuário da Baía de São Marcos (NPCP) do Píer 1, durante o período de mínimo de quadratura, em 15 de abril de 2020, para obtenção de um sistema de alerta e prospecção do aumento da janela operacional do Píer em questão.

A magnitude da corrente limite estimada para o Píer 4 foi de 1,7 nós. O mesmo apresenta regras mais restritivas do que o Píer 1. No momento de máximo da sizígia, foi estimado um acréscimo de 2 horas e 05 minutos de janela, semelhante ao Píer 1. A variação da corrente ficou próxima do observado durante a janela proposta.

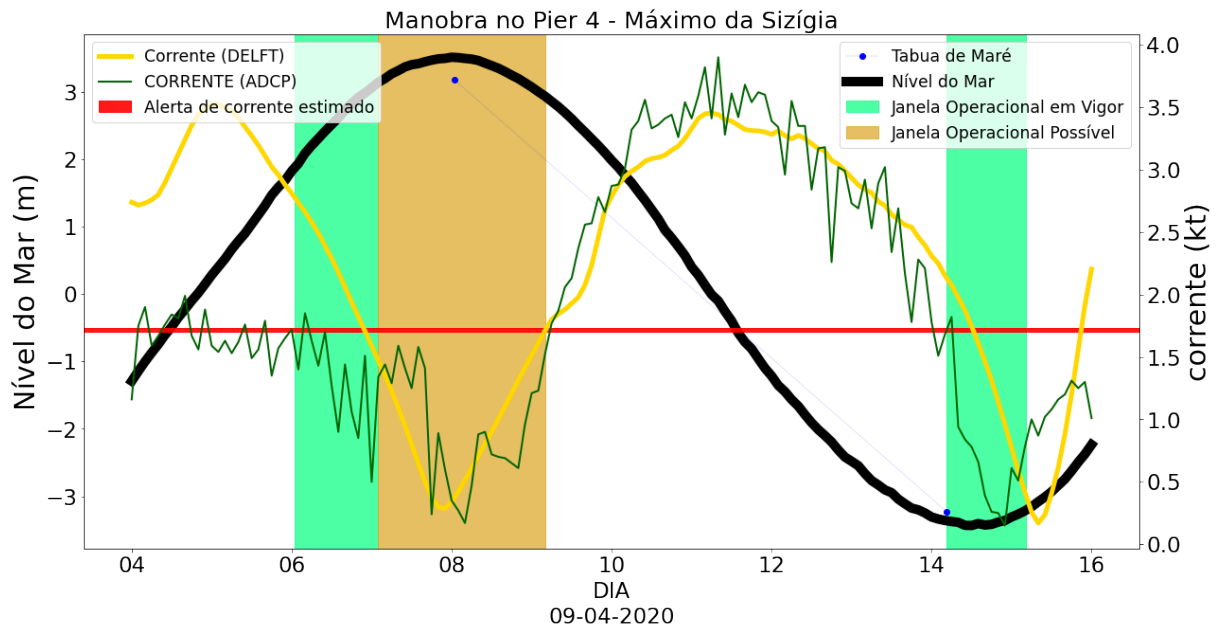


Figura 69: Estudo da Norma de Manobra para o Complexo Portuário da Baía de São Marcos (NPCP) do Pier 4, durante o período de máximo da sizígia, em 09 de abril de 2020, para obtenção de um sistema de alerta e prospecção do aumento da janela operacional do Pier em questão.

O cenário mínimo de quadratura para o Pier 4 apresentou resultados de grande interesse, com 5 horas e 25 minutos de janela possível, mais que o dobro da regra atual prevista na NPCP (Figura 70).

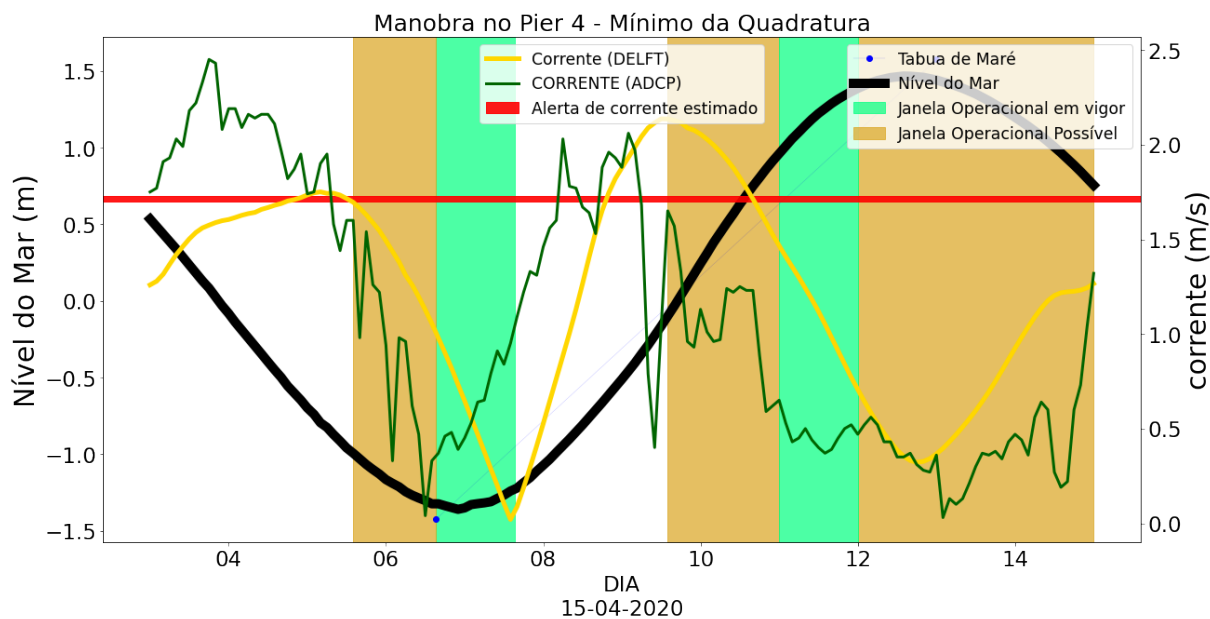


Figura 70: Estudo da Norma de Manobra para o Complexo Portuário da Baía de São Marcos (NPCP) do Píer 4, durante o período de mínimo de quadratura, em 15 de abril de 2020, para obtenção de um sistema de alerta e prospecção do aumento da janela operacional do Píer em questão.

As análises da NPCP supracitadas nos mostra uma defasagem variável no tempo entre a corrente modelada e a observada. Aparentemente esta defasagem é mais acentuada nos períodos de quadratura.

4.4.3 Mapas do Sistema de Alerta - Píer 1

A Figura 71 foi inserida para ilustrar a localização do Píeres 1 e 4, os quais serão explorados a seguir.

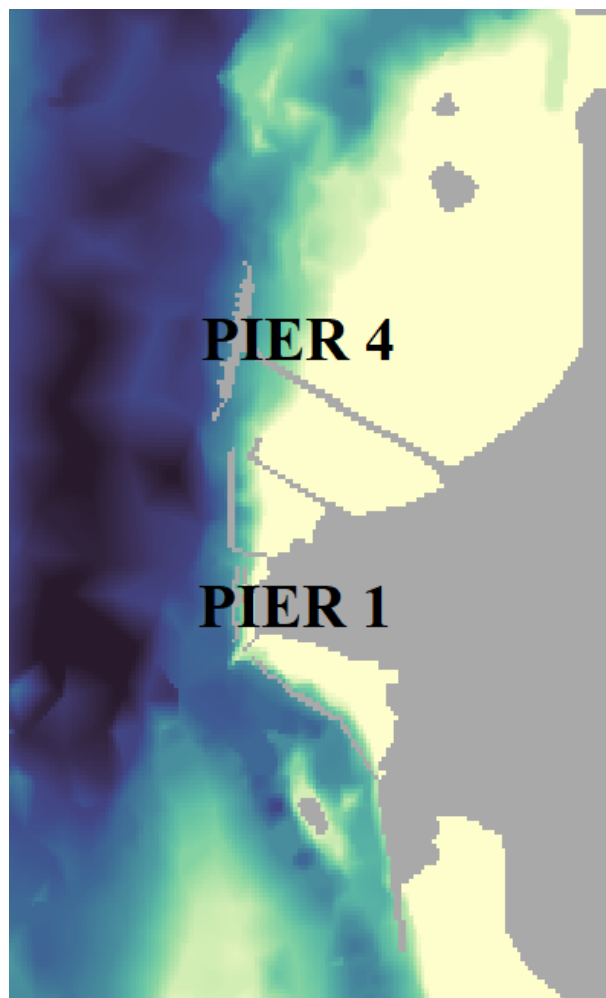


Figura 71: Imagem ilustrativa da localização do Píer 1 e Píer 4 na grade local.

09 de abril de 2020

O horário escolhido para a janela pelo sistema de alerta, para o máximo da sizígia, foi das 06:00 às 09:20, enquanto o horário das 06:00 às 07:00 representa a janela operacional em vigor pela análise da NPCP (Figura 67).

A janela operacional atual (Figura 72) para a estufa da enchente mostra que o Píer 1 fica em uma zona de sombra gerada pelo Píer 4 durante o fim da maré enchente.

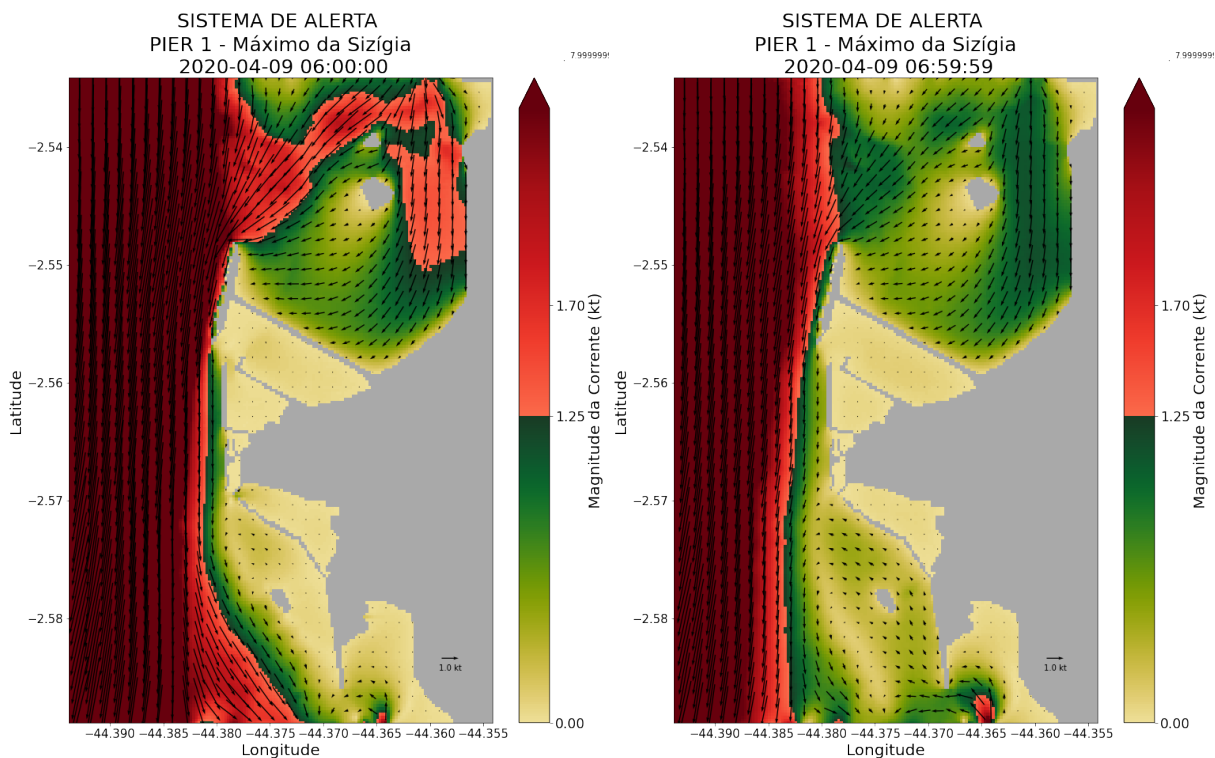


Figura 72: Sistema de alerta para o Píer 1 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, com correntes acima de 1,25 nós durante a janela operacional em vigor, no máximo de sизіgia, em 09 de abril de 2020.

Logo na sequência da janela operacional em vigor, foi estimada uma janela adicional de 2 horas e 15 minutos. A Figura 73 apresenta 4 períodos desta janela: às 07:10, o Píer 1 continua na zona de sombra do Píer 4, provendo condições favoráveis para a manobra; às 07:50, o alerta é deslocado para oeste; às 08:40, o início da maré de vazante se intensifica próximo ao Píer 1; e às 09:00, quando a corrente do modelo está superestimada, verifica-se que a mesma é desviada pelo espigão sul, deixando um bolsão com correntes a baixo de 1,25 nós adjacente ao Píer 1.

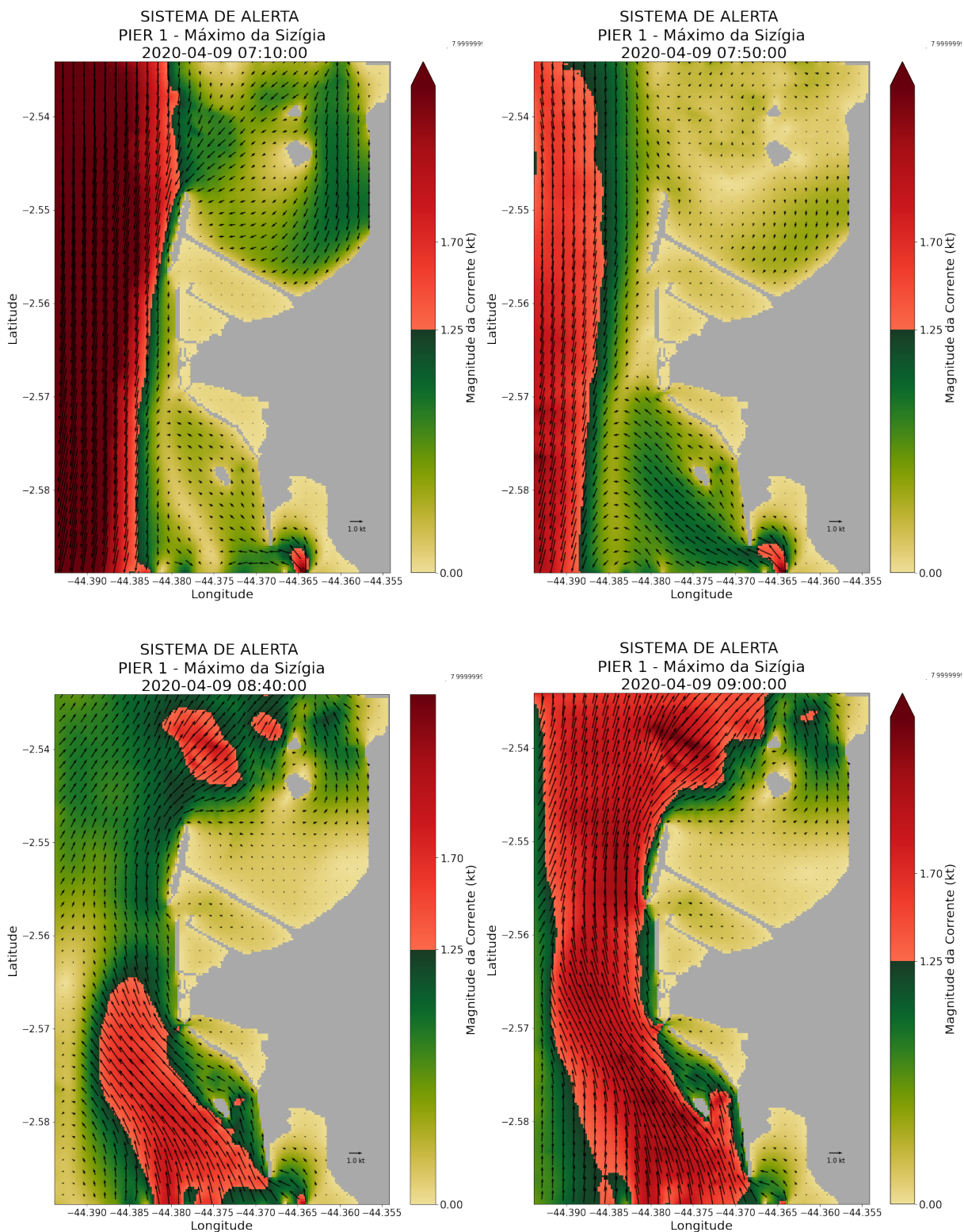


Figura 73: Sistema de alerta para o Píer 1 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, com correntes acima de 1,25 nós durante a janela operacional possível no máximo de sizígia, em 09 de abril de 2020.

Posteriormente, podemos observar pela Figura 74 que, após 10 minutos do fim da janela

operacional possível, a corrente de vazante se torna muito intensa, expondo no mapa a mancha vermelha em quase toda a área.

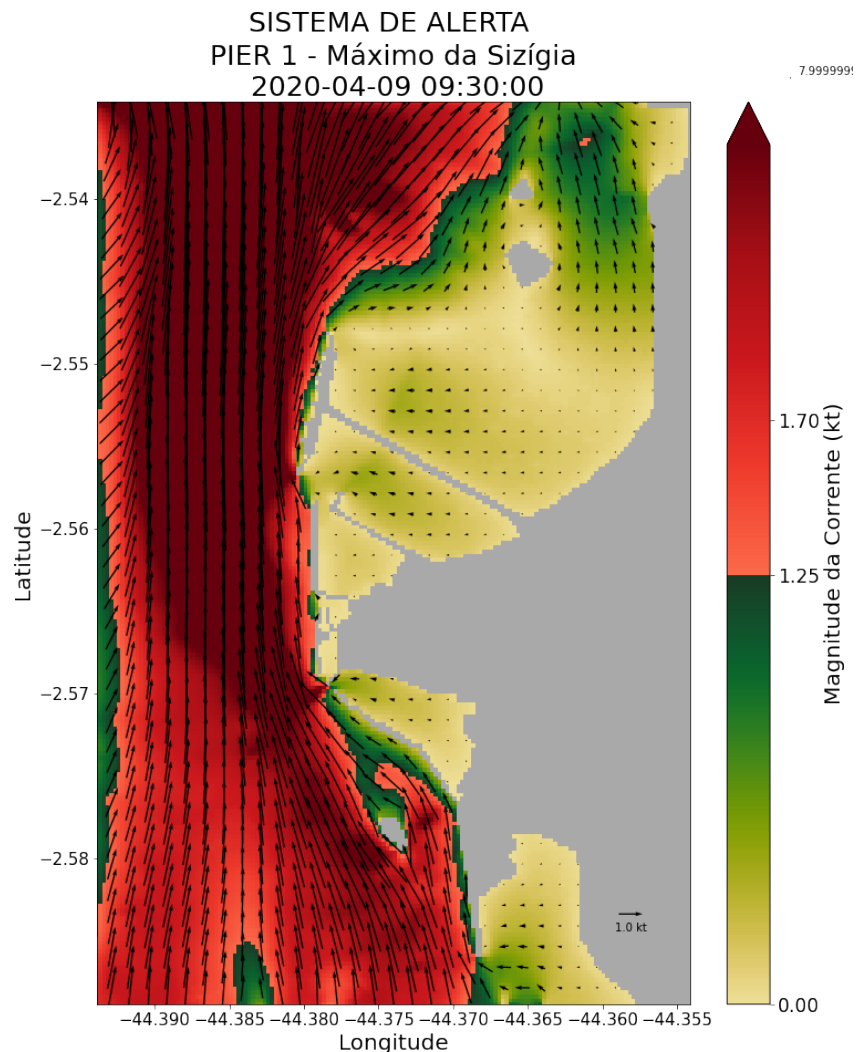


Figura 74: Sistema de alerta para o Píer 1 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, com correntes acima de 1,25 nós fora da janela operacional, na maré vazante, no máximo de sizígia, 09 de abril de 2020.

15 de abril de 2020

A corrente calculada pelo modelo foi superestimada nos períodos da janela operacional possível para o mínimo da quadratura no Píer 1 (Figura 68). Deste modo, o sistema de alerta não condiz com o observado. A Figura 75 mostra o sistema de alerta nas quatro fases da maré no tempo em que a corrente modelada é semelhante à observada:

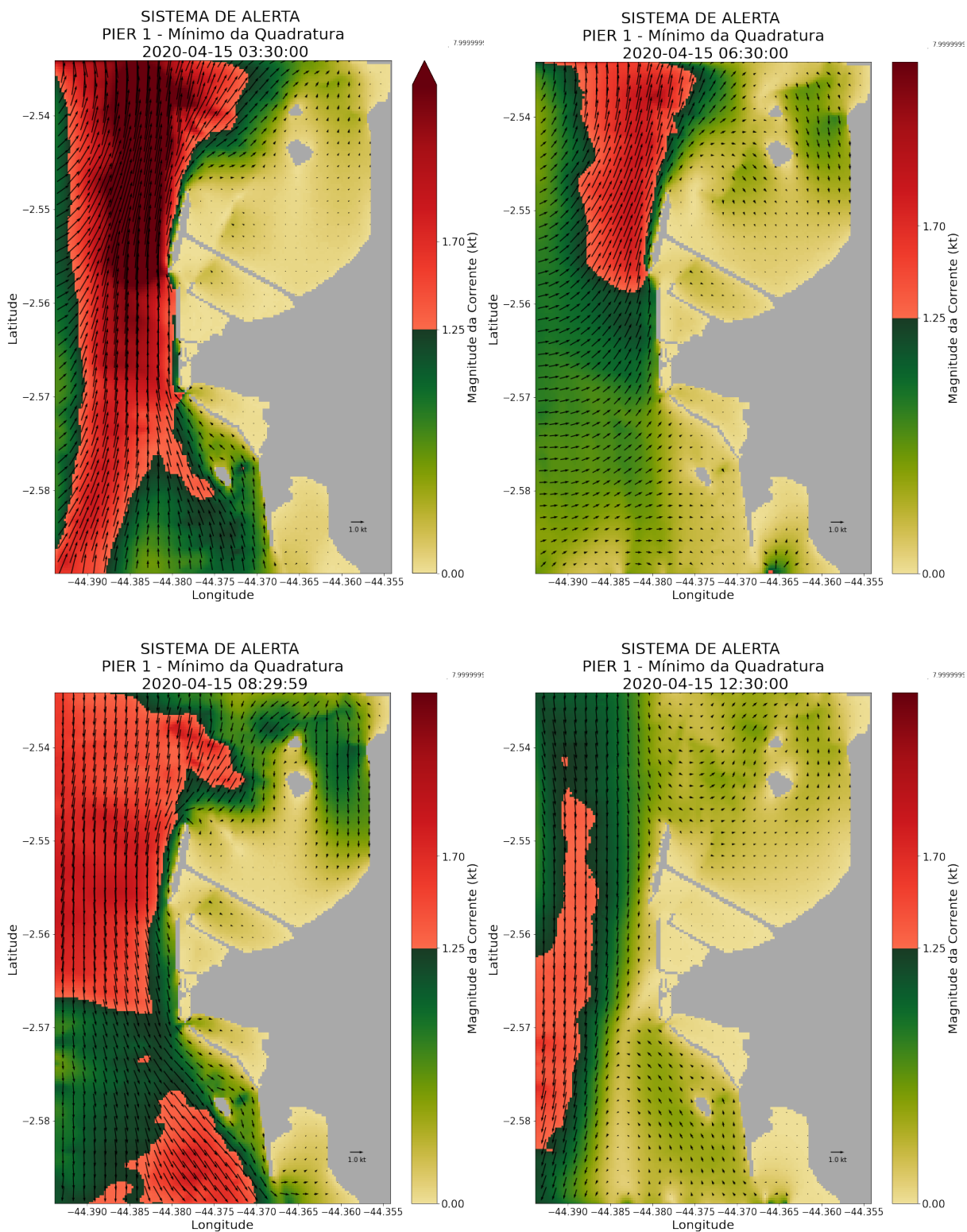


Figura 75: Sistema de alerta para o Píer 1 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, com correntes acima de 1,25 nós, para as quatro fases da maré, no mínimo da quadratura, em 15 de abril de 2020.

A regra operacional em vigor para o Píer 1, com amplitude de maré menor que 4,5m, é

abrangente, e só exclui a possibilidade de manobra na maré vazante. Pode-se observar que os 4 mapas condizem com a caracterização hidrodinâmica regional da Baía de São Marcos, com a maré vazante mais intensa do que a enchente.

4.4.4 Mapas do Sistema de Alerta - Píer 4

09 de abril de 2020

O horário escolhido para a análise do sistema de alerta para o máximo da sizígia foi das 07:00 às 11:00, que consiste na janela operacional em vigor, durante e imediatamente após a maré vazante (Figura 69). Observa-se, nas Figuras 76 e 77, que o Píer 4 é, entre os píeres do Terminal da Ponta da Madeira, o mais exposto a correntes intensas.

Segundo a Figura 77, as correntes mais intensas se deslocam para oeste à medida que se aproxima a estofa das 08:00, período em que a corrente próxima ao Píer 4 enfraquece, sem nenhum alerta nas proximidades. A condição se mantém até as 08:50, porém, nos 10 minutos seguintes, a corrente se intensifica e o alerta aproxima-se do Píer 4 novamente, no entanto, ainda existe uma espaço com correntes menores que 1,7 nós, o qual possibilita manobras. Na sequência, às 09:10, o alerta já fica muito próximo ao Píer 4, impossibilitando a operação segura. No máximo da maré vazante, o alerta prevalece e é possível observar uma corrente com bifurcação provinda de sul, na qual converge ao chegar no Terminal Marítimo Ponta da Madeira.

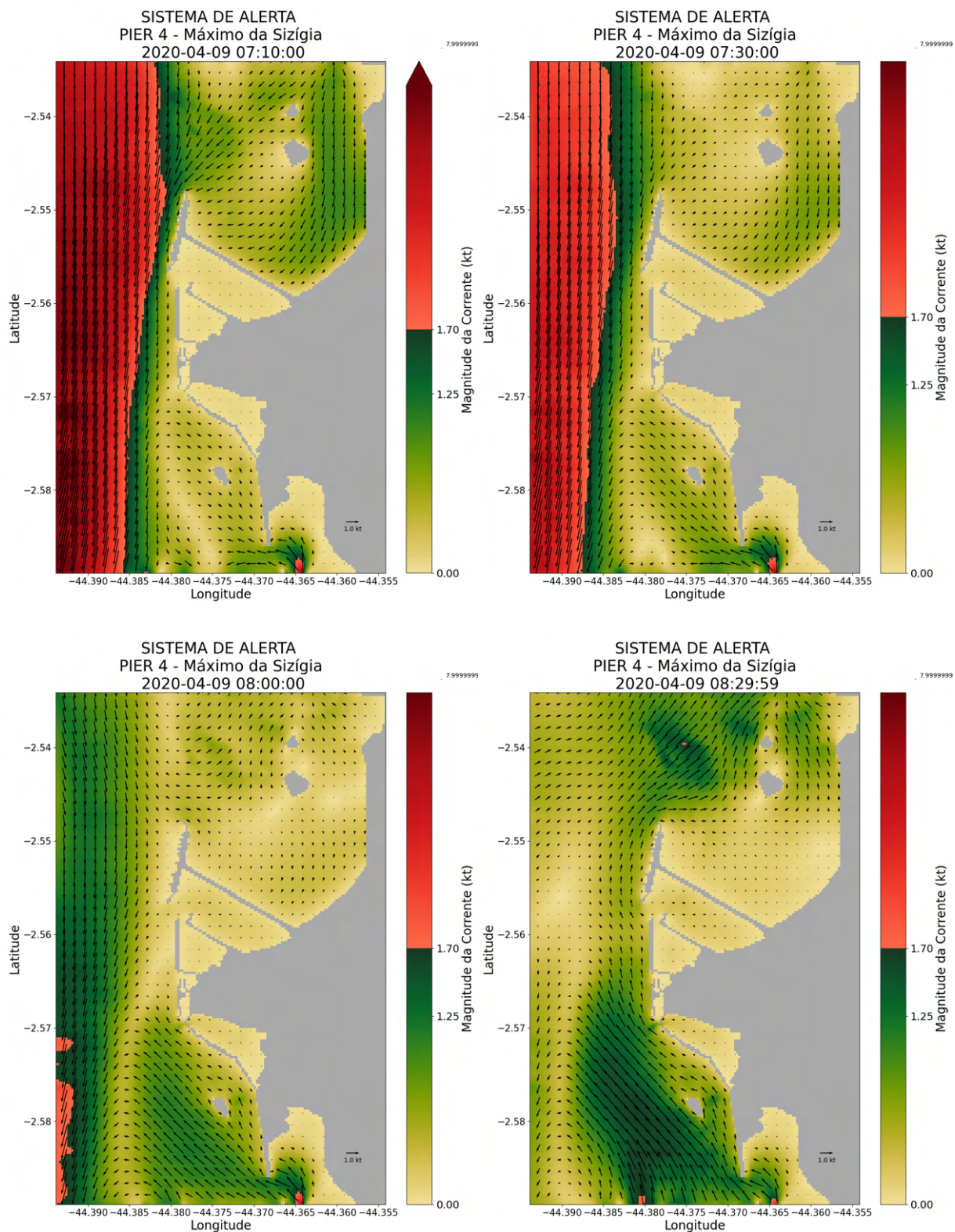


Figura 76: Sistema de alerta para o Píer 4 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, com correntes acima de 1,7 nós durante as janelas operacionais em vigor e proposta, no máximo da sizígia, em 09 de abril de 2020.

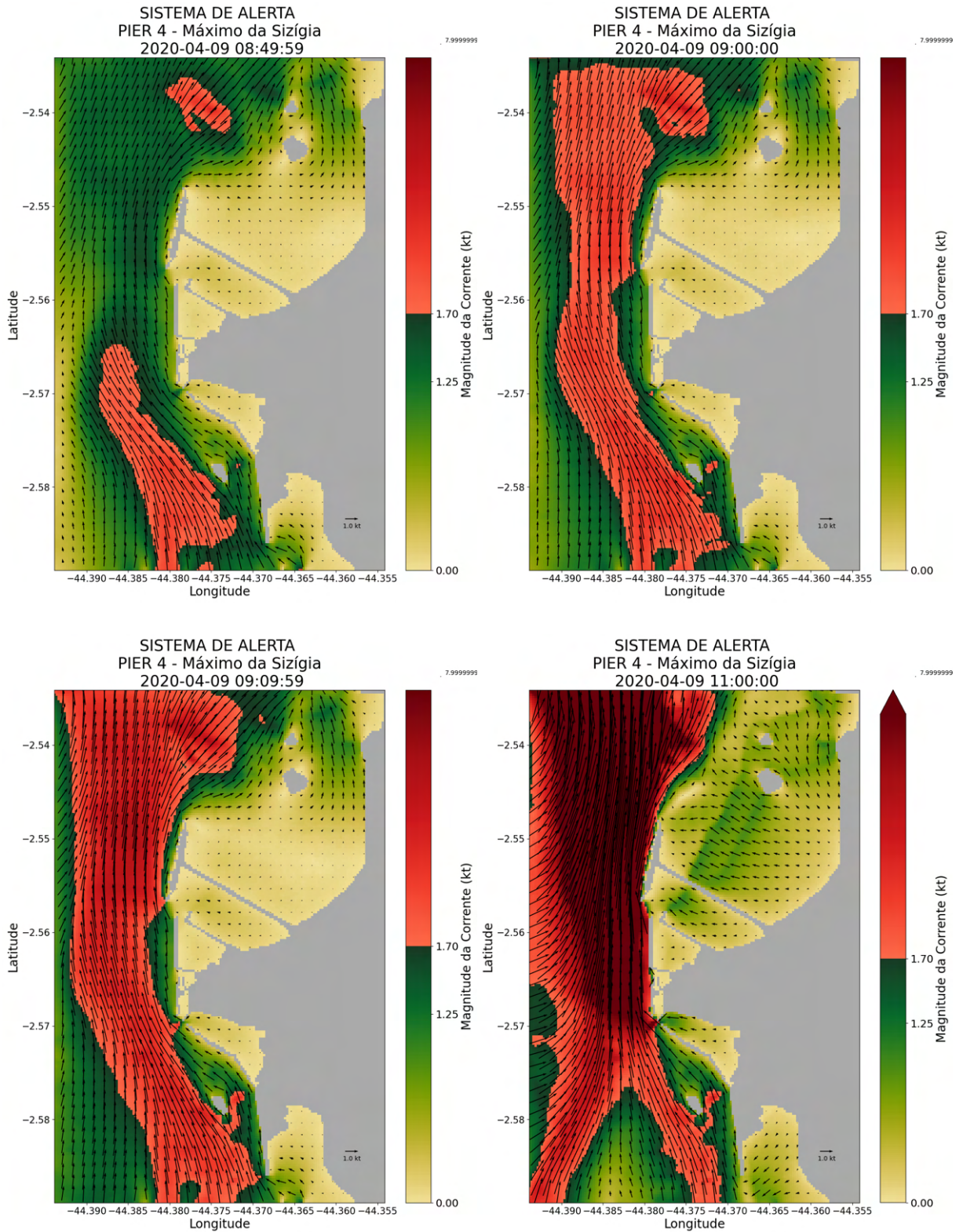


Figura 77: Sistema de alerta para o Píer 4 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, com correntes acima de 1,7 nós durante e logo após, a janela operacional possível e proposta, na maré vazante, no máximo da sizígia, em 09 de abril de 2020.

15 de abril de 2020

O período de mínimo de quadratura obteve a maior janela operacional possível. Apenas a janela estimada das 05:40 (ERRADO) as 06:40 (ERRADO) não foi contemplada nesta análise, devido à diferença entre a corrente calculada pelo modelo, mais intensa, em relação a observada (Figura 70).

Observou-se, durante a janela operacional em vigor para a estofa de baixamar, que existe uma janela possível de 1 hora antes da regra estipulada na NPCP. A Figura 78 mostra que esta janela é decorrente de uma deflexão da corrente de vazante quando a mesma se encontra ao sul do Píer 4. Portanto, a manobra continua sendo impossibilitada neste período, contrapondo-se a análise da série temporal, devido às altas intensidades de corrente no entorno, que acionaram o alerta. Segundo os mapas, a corrente só enfraquece no início da janela operacional em vigor, às 06:40.

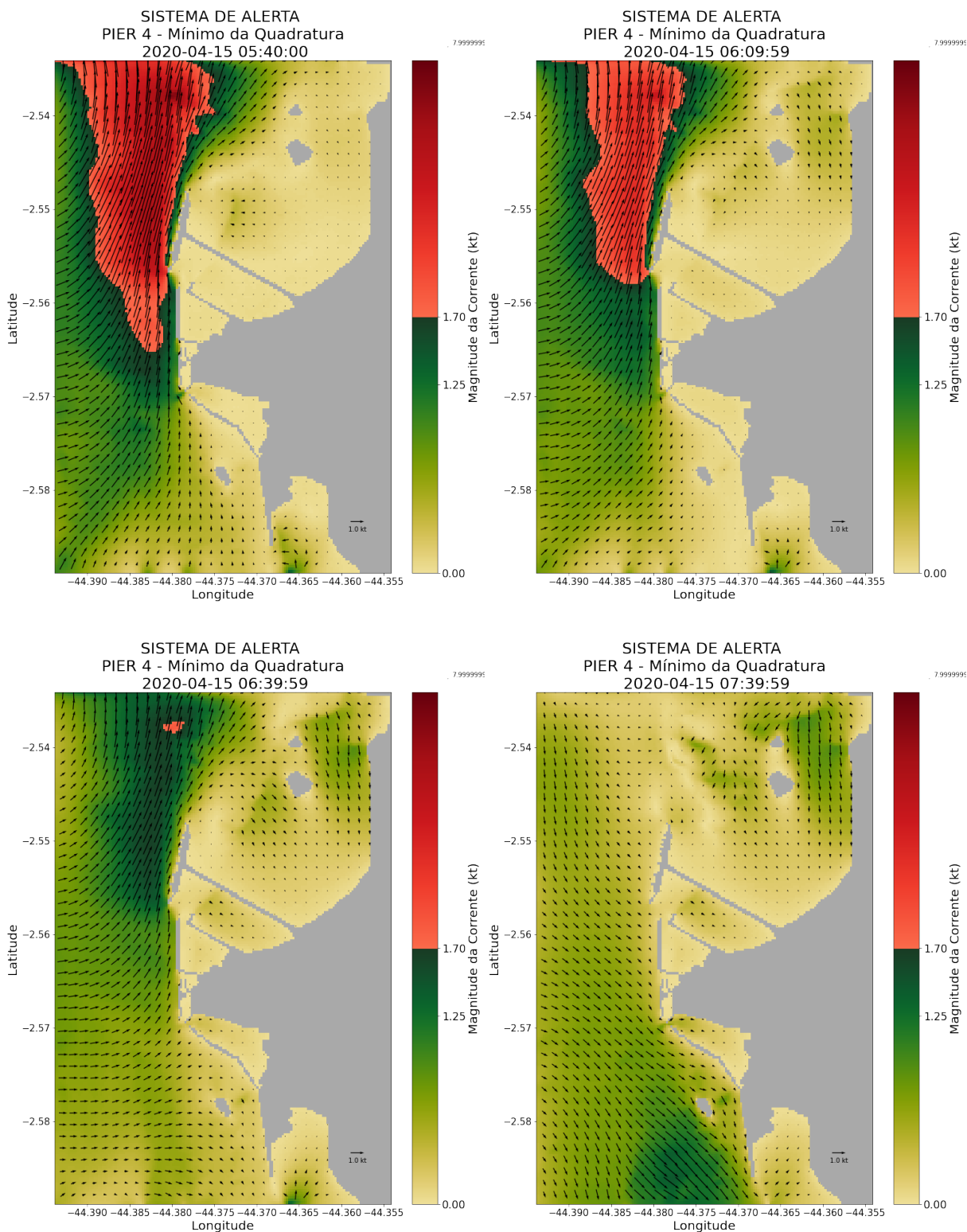


Figura 78: Sistema de alerta para o Píer 4 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, com correntes acima de 1,7 nós durante a janela operacional possível, anterior à baixamar, no mínimo da quadratura, em 15 de abril de 2020.

O período mais adequado para aumentar a janela operacional do Píer 4 se encontra após

a preamar, no cenário das 12:00 às 15 horas. No fim da janela operacional em vigor e início da possível, a mancha do alerta se encontra afastada do Píer 4 e desaparece até às 14:00, só impossibilitando a manobra a partir das 15:00 (Figura 79).

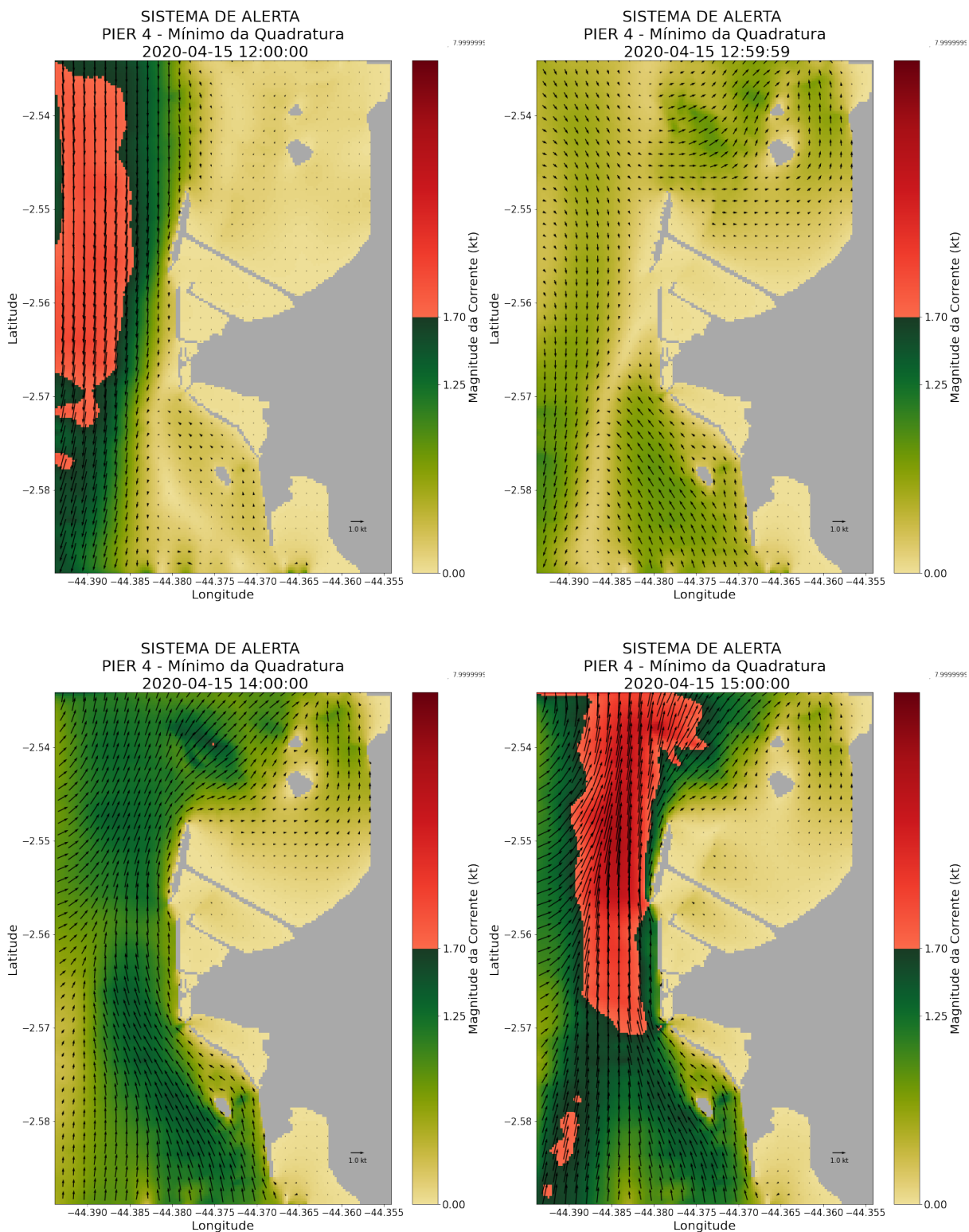


Figura 79: Sistema de alerta para o Píer 4 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, com correntes acima de 1,7 nós durante a janela operacional possível, posterior à preamar, no mínimo da quadratura, em 15 de abril de 2020.

4.5 DISTRIBUIÇÃO DE DENSIDADE

A distribuição de densidade da água na superfície, para o cenário de mínimo de quadratura, foi plotada na grade local. O cenário de estação chuvosa somada ao período de mínimo de quadratura representa, segundo o modelo, o mínimo que a densidade pode alcançar na Baía de São Marcos. O modelo do presente trabalho indicou uma densidade no dia 15 de abril por volta de $1013,75\text{kg}/\text{m}^3$ para o Píer 4 e $1013,5\text{kg}/\text{m}^3$ para o Píer 1, indicando uma diferença aproximadamente de $0,25\text{kg}/\text{m}^3$ entre os Píeres (Figura 80).

Distribuição Média da Densidade 15-04-2022

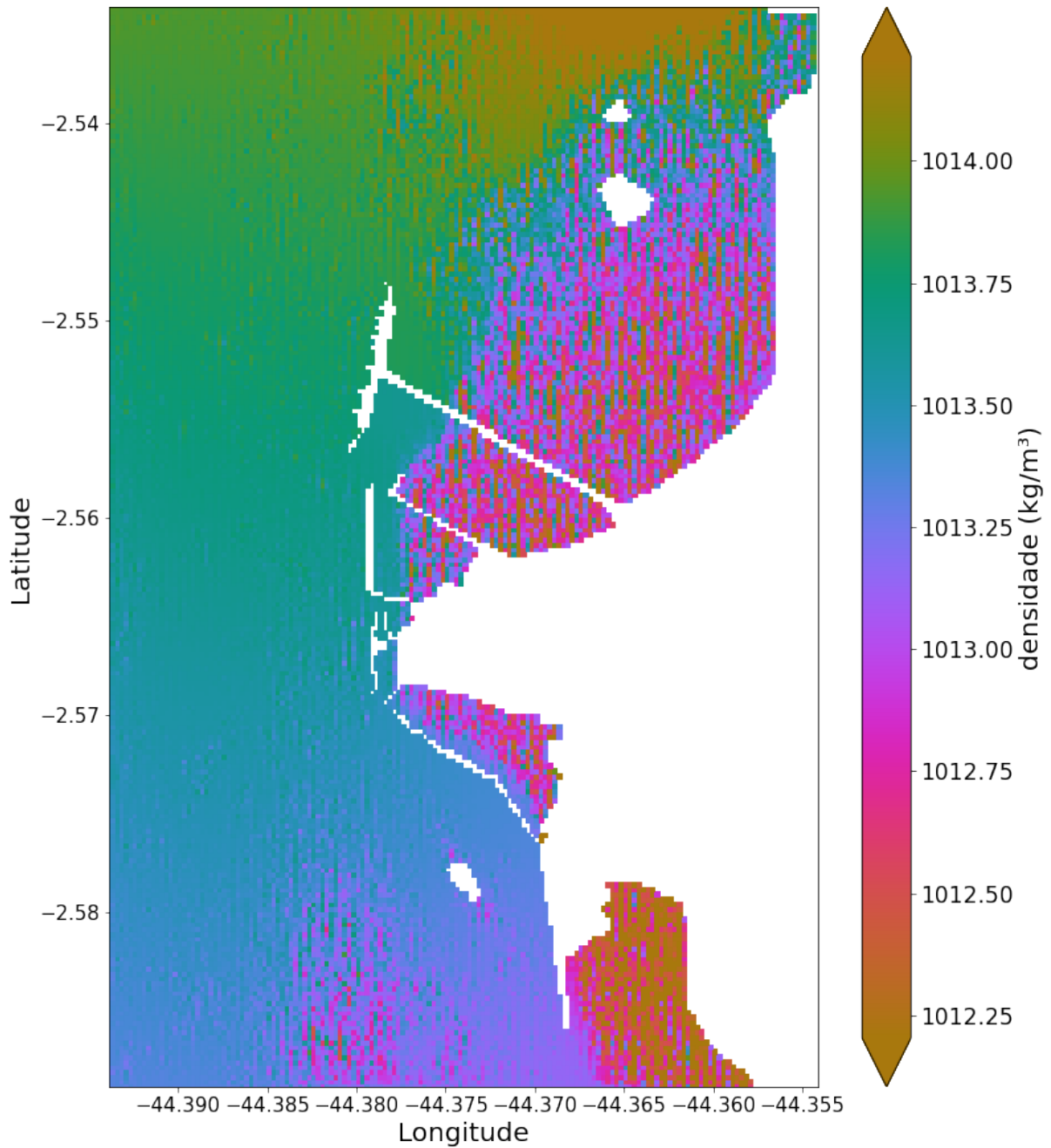


Figura 80: Mapa da distribuição da densidade da água do mar na superfície, calculada pelo modelo local, na maré de quadratura, no dia 15 de abril de 2020.

A densidade numa sessão adjacente de cada Píer é apresentada na Figura 81, para verificar a presença de estratificação nos limites de cada Píer analisado. Foi encontrada estratificação apenas no período de vazante para o mínimo da quadratura, onde o grande aporte fluvial de abril consegue romper a estratificação horizontal do regime de macro-maré. Pode-se reparar na

sessão do Píer 1 a pluma fluvial ascendendo e, após 10 minutos, no Píer 4 a estratificação se estabelecendo. Nas duas seções, a diferença de densidade entre a superfície e o fundo é em torno de $0,2\text{kg}/\text{m}^3$.

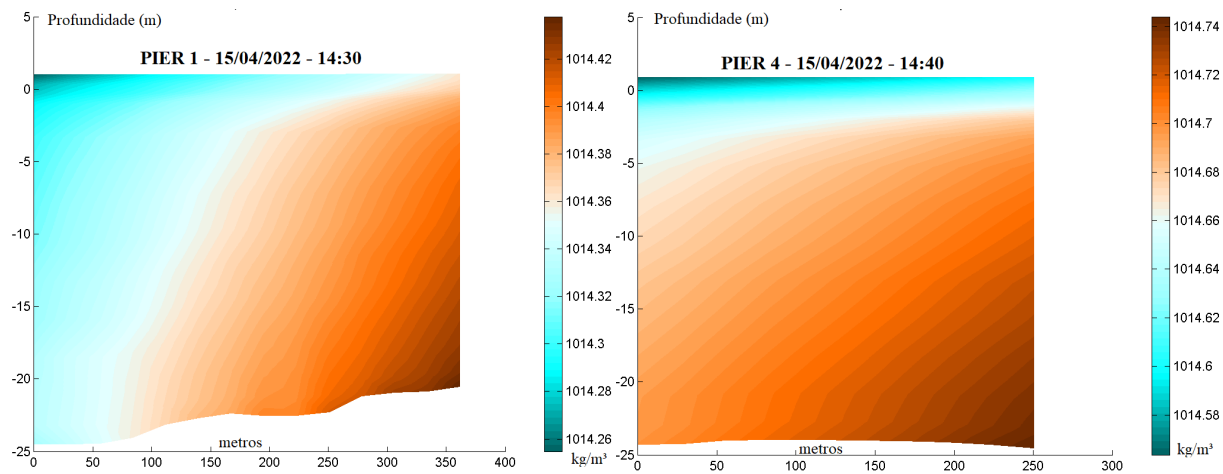


Figura 81: Seções de densidade, em kg/m^3 , adjacentes ao Píer 1 e ao Píer 4, na maré de quadratura, no dia 15 de abril de 2020.

5 DISCUSSÃO

5.1 MODELO REGIONAL

A modelagem da agitação marinha não foi considerada neste trabalho, desprezando-se portanto a influência das ondas geradas pelo vento na hidrodinâmica da região de interesse. De fato, a altura significativa média das ondas que incidem próximo à costa, fora da baía, é de 1m (Feitosa, 1989; Finkl, 2008), podendo alcançar maiores alturas em casos de ciclones extratropicais no hemisfério norte (Innocentini et al., 2000). Contudo, as ondas mais energéticas que adentram a Baía de São Marcos, ao enfrentar os inúmeros bancos de areia presentes na região, são continuamente atenuadas pelos processos de refração e difração no decorrer de sua propagação baía adentro, perdendo energia e, conseqüentemente, altura (Finkl, 2008). No trabalho de Santos (2018), no qual foram analisados dados de ondas medidos *in loco*, observou-se que a altura média das ondas que incidem no Píer 4, dolfin 15, são menores que 0,5m. No caso do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, a Ilha do Medo, localizada ao norte do Terminal, funciona como um quebra mar natural contra a ação das ondas. Deste modo, as ondas têm pouca influência na janela de operação do complexo portuário, não chegando a ser mencionadas na NPCP como um fator que possa interromper a operação dos Terminais e Portos do complexo (NPCP, 2022). Esta análise justifica portanto a exclusão da modelagem das ondas no presente estudo.

As variáveis do modelo atmosférico global *CFRS*, utilizadas como forçantes, apresentaram dois cenários bem distintos para a Baía de São Marcos no decorrer do ano de 2020. A região sofre grande influência da variação anual da ZCIT (Cavalcanti, 2016; Rodríguez et al., 2016). Existem outros sistemas meteorológicos importantes atuantes, tais como as linhas de instabilidade e ondas de leste, mas o deslocamento da ZCIT, para a latitude que se situa a baía, define novas condições meteorológicas de um clima originalmente equatorial (Marengo, 1995; Pereira et al., 2002; Rodríguez et al., 2016; Nascimento et al., 2017). Estudos de Waliser & Gautier (1993) e Kalnay et al. (1996) mostram que a ZCIT, em anos considerados normais, é deslocada o mais distante da costa entre os meses de agosto e setembro, o que corrobora com a variação abrupta apresentada por todas as variáveis atmosféricas durante o mês de agosto neste estudo. O retorno da presença da ZCIT na costa, no mês de janeiro, traz consigo um aumento da pressão atmosférica, da umidade relativa do ar e maiores índices pluviométricos, em contrapartida, uma

diminuição da temperatura do ar e da intensidade dos ventos (Cavalcanti, 2016).

As climatologias confirmaram os resultados de estudos anteriores para todas as variáveis atmosféricas (Marengo, 1995; Pereira et al., 2002; Guedes et al., 2006; Rodríguez et al., 2016). Em relação ao vento, o *CFRS* apresentou, na média, maiores intensidades ao longo do tempo quando comparado aos dados do INMET. Estudos indicam que nos meses secos (segundo semestre do ano), onde a diferença foi mais acentuada, a intensidade típica é maior que 4,5 m/s (Pereira et al., 2002; Rodríguez et al., 2016), corroborando com os dados extraídos do *CFRS*. No entanto, não se pode dizer que os dados do INMET estão errados: a diferença é justificada pelo fato dos dados obtidos pela estação de monitoramento se encontrarem no interior da cidade de São Luís do Maranhão, sofrendo forte influência da orografia, de modo que o vento é atenuado quanto mais adentra no continente. Portanto, os dados atmosféricos impostos no modelo podem ser considerados como de qualidade satisfatória, pois são concordantes tanto com os dados observados pelo INMET, quanto com a bibliografia.

O trabalho de Pereira & Harari (1995) mostra que os principais sistemas meteorológicos que afetam a plataforma adjacente a Baía de São Marcos influenciam muito pouco na hidrodinâmica da baía, sendo responsáveis por elevar apenas 5cm o nível do mar e induzir correntes máximas de 0,28m/s. No presente estudo não se observou uma influência significativa dos ventos nas simulações hidrodinâmicas. Muitos trabalhos sequer consideraram as condições atmosféricas como uma forçante de modelos hidrodinâmicos (Chagas, 2013; Samaritano et al., 2013; González-Gorbeña et al., 2015; Silva, 2016b; Czizewski, 2019; Ribeiro Junior, 2019). Embora a influência direta seja pouco expressiva para o foco deste trabalho, as forçantes atmosféricas são importantes por induzir outros processos que podem vir a alterar as condições hidrodinâmicas, como por exemplo as correntes de densidade. Este poderia ser o caso de uma condição hidrodinâmica não apresentada neste trabalho, num período mínimo de quadratura para o mês de setembro⁵.

A componente que rege a hidrodinâmica da Baía de São Marcos é a maré, em regime semidiurno, cuja maior constituinte harmônica é a M2 (principal lunar semidiurna) (Pereira & Harari, 1995; Amaral, 2006; Chagas, 2013; Samaritano et al., 2013; González-Gorbeña et al., 2015; Pereira et al., 2016; Silva, 2016b; Vasconcelos et al., 2018; Czizewski, 2019; Ribeiro Junior, 2019; Costa, 2022). A baía é elencada como uma das regiões de maior potencial maremotriz do mundo, devido à grande magnitude das correntes. (González-Gorbeña et al., 2015;

⁵Cenários de menor intensidade de correntes de maré e maior intensidade dos ventos.

Czizewski, 2019; Costa, 2022). Isto se deve ao distanciamento de pontos anfidrômicos ⁶ em relação a baía, e à ressonância da onda de maré com a geomorfologia local (Wright et al., 1999).

Os resultados da validação do nível do mar, quando comparados com os dados *in loco* medidos pelos *ADCPs*, atingiram excelentes índices estatísticos. O erro médio ficou em 4% na série de abril e 3% na de setembro. Dados da tabua de maré do Terminal Marítimo Ponta da Madeira confirmaram a boa correlação das séries. Observou-se uma defasagem na altura da preamar em relação ao *ADCP* para o mês de abril, entre a transição da fase de quadratura para sizígia (Figura 25). Resultados do nível do mar obtidos pelo modelo de Silva (2016b) também apresentaram a mesma defasagem em comparação com os dados do marégrafo do Píer 4 no Terminal da VALE, próximo ao *ADCP*. Logo, é possível que esta condição esteja relacionada a alguma peculiaridade do local não contemplada pelos modelos numéricos. Também foram validados, por dados do modelo global *CMEMS*, pontos de monitoramento extraídos na plataforma adjacente a baía, tendo esses pontos índices estatísticos plenamente satisfatórios. Como os dados observados *in loco* são mais representativos das condições hidrodinâmicas realísticas, pode-se considerar que o modelo hidrodinâmico obteve pleno êxito na representatividade da variação do nível do mar para a região.

Os valores da máxima e mínima amplitude de maré obtidos pela simulação alcançaram os níveis acima de 6m, na sizígia, e abaixo de 4m, na quadratura. Resultados que corroboram com modelos já estabelecidos na literatura (Amaral, 2006; Chagas, 2013; Silva, 2016b; Vasconcelos et al., 2018). Os mapas temáticos de variação do nível do mar representaram bem a dinâmica da região para as quatro fases do ciclo de maré, nos períodos de maior amplitude registrada nos dois meses. Uma grande similaridade nos resultados foi encontrada quando comparados os resultados de nível do mar nos meses de abril e setembro, embora seja perceptível uma ligeira diferença devido a uma maior amplitude obtida em setembro. O equinócio de primavera, responsável por gerar as maiores amplitudes de maré do ano, ocorreu dois dias depois do período exposto pelos mapas temáticos, dia 22 de setembro de 2020, justificando assim as maiores amplitudes alcançadas em comparação com o mês de abril (Pereira et al., 2016). A disposição das isolinhas de amplitude da maré que adentram a Baía de São Marcos, é inclinada na direção sudeste - noroeste. Resultado exposto nos mapas temáticos, que sugere a chegada das ondas de maré pela costa leste do Maranhão. Os trabalhos de Pereira & Harari (1995) e Czizewski et al. (2020a) também apresentaram esta disposição nas linhas cotidianais das constituintes harmôni-

⁶Ponto em que a variação de maré é igual a zero, diferente para cada constituinte harmônica.

cas M2 e M2 + S2, respectivamente.

A assimetria da maré nos diferentes pontos da grade regional também foi explorada: a Figura 42, a qual foi confeccionada para este propósito, representou bem esse aspecto para todo o canal de acesso ao complexo portuário. A amplitude da maré aumentou gradualmente em direção ao centro da baía até a região em que a foi afetada pelo fundo, ao sul do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, quando começa a ser deformada, perdendo o seu formato senoidal, e diminuindo a amplitude gradualmente. Esta deformação também foi apresentada pelo modelo de Vasconcelos et al. (2018) para a série de nível do mar da região sul da Ilha do Caranguejo. A assimetria é responsável pela maré vazante ser predominantemente mais intensa do que a de enchente (Chagas, 2013; Samaritano et al., 2013; González-Gorbeña et al., 2015), salvo em locais da baía situados na zona de sombra da maré vazante, como é o caso no canal do boqueirão, logo ao Norte do Terminal Marítimo Ponta da Madeira (Chagas, 2013; Samaritano et al., 2013; Costa, 2022).

Os resultados da validação das correntes no modelo regional, quando comparados com os dados *in loco* medidos pelos *ADCPs*, atingiram bons índices estatísticos, sendo que o erro médio foi em torno de 11% para os dois meses analisados. Este erro está associado à subestimação da corrente de enchente e à superestimação da vazante obtidas pelo modelo, o qual representa uma assimetria de maré praticamente constante ao longo do tempo. Essa constância não foi observada pelos dados do correntômetro. O trabalho desenvolvido por Chagas (2013), com o modelo *Delft3D*, apresentou o mesmo problema em comparação com dados de *ADCP* fundeado a oeste da Ilha do Medo, próximo ao canal de acesso do complexo portuário. O ajuste fino da corrente é muito difícil em trabalhos de modelagem numérica, pois esta variável está sujeita a diferentes processos hidrodinâmicos em escalas de tempo e espaço muito reduzidas. O presente trabalho obteve uma defasagem de 1 hora no padrão de corrente comparado ao observado, o qual foi ajustado. A batimetria e a rugosidade do fundo são parâmetros importante para se obter uma boa acurácia do modelo, principalmente para intensidade e direção das correntes (Harari, 2015). O modelo numérico desenvolvido por Samaritano et al. (2013), para a Baía de São Marcos, apresentou alta acurácia na reprodução de dados de corrente, com valores extremos bem correlacionados com dados locais coletados com *ADCP*; o êxito desta modelagem provavelmente está relacionado com a inserção de dados de batimetria de alta resolução, com rugosidade de fundo variável conforme a profundidade; ademais, foram utilizados valores variáveis de viscosidade vertical e a modelagem permitiu a inundação de células secas e a expo-

sição do fundo de células úmidas, conforme a flutuação do nível do mar. O modelo do presente trabalho também considerou uma variação da rugosidade de fundo conforme a profundidade, obtida após diversas simulações testes para um ajuste ótimo; no entanto, a resolução horizontal, definida apenas pelas cartas náuticas, não possibilitou o nível de detalhamento necessário para a obtenção de resultados de corrente finamente ajustados. Vários trabalhos científicos de modelagem também efetuaram simulações teste e, mesmo assim, apresentaram algum tipo de defasagem entre as correntes calculadas pela modelagem e as correntes observadas (Chagas, 2013; Amaral, 2006; Vasconcelos et al., 2018; Costa, 2022).

Os pontos de observação situados na plataforma foram validados por dados de modelos globais. Excelentes índices estatísticos foram atingidos para as componentes meridional e zonal da corrente no mês de setembro e zonal no mês de abril. A componente meridional da corrente (norte/sul) de abril obteve bons resultados, mas aumentou em torno de 10% o erro em relação a componente zonal do mesmo mês, é possível atribuir esta piora dos índices ao aumento da vazão fluvial que ocorre nessa época do ano (Rodríguez et al., 2016), pois a influência desta vazão no campo de correntes da plataforma não é contemplado pelos dados do modelo global utilizado na validação. A Figura 29 reforça esta hipótese, comparando a série temporal de corrente na plataforma entre os meses de abril e setembro: identifica-se, em abril, após o período de sizígia, um desvio da corrente em relação às oscilações da maré, provavelmente associado ao avanço da pluma fluvial, que será discutido mais a frente.

As máximas magnitudes da corrente obtidas na simulação para a Baía de São Marcos, alcançaram valores acima de 2,5m/s. Resultados que corroboram com os produzidos por modelos já estabelecidos na literatura (Amaral, 2006; Chagas, 2013; Samaritano et al., 2013; Pereira et al., 2016; Silva, 2016b; Vasconcelos et al., 2018; Czizewski et al., 2020a). Os mapas temáticos de magnitude da corrente confirmam a presença da assimetria de maré na região: correntes de vazante mais intensas que de enchente. Observa-se que os mínimos da corrente não coincidem com exatidão nas estofas e nem os máximos com a meia maré: os mesmos ocorrem alguns instantes depois, como se a corrente estivesse sempre um pouco atrasada em relação ao nível do mar, para o centro da baía (Vasconcelos et al., 2018). A direção das correntes, no período de maré vazante, centraliza os vetores de toda a grade em uma única direção, para o mar. Em contrapartida, no período de maré enchente, há uma convergência de vetores, a jusante da Ilha do Caranguejos, pois a montante a baía ainda está na fase de maré vazante. Novamente, o motivo desta confluência é a assimetria da maré, na qual aumenta o tempo da maré vazante e diminui

o de enchente; conseqüentemente, a baía pode apresentar cenários de mare vazante e enchente ao mesmo tempo.

Os dois períodos simulados neste trabalho apresentaram uma alta similaridade nos resultados para a distribuição das correntes na superfície, meio e fundo. Ainda que a maior amplitude de maré tenha sido alcançada em setembro, o mês de abril apresentou um pequeno aumento nos valores da intensidade das correntes, que pode estar associadas à maior vazão fluvial. Nos mapas de distribuição da corrente de vazante, para as camadas de meio e fundo, verificou-se uma atenuação da corrente conforme a profundidade. No entanto, mesmo na última camada do modelo, foram encontrados valores de corrente acima de 2,5m/s, localizados em uma área mais restrita, indicando que a corrente de maré se comporta como um fluido barotrópico. Ainda nos mapas de distribuição da magnitude das correntes, fica muito evidente que a mesma está altamente correlacionada com a profundidade: é possível localizar nos resultados os bancos de areia já mapeados (Figura 5) que oferecem riscos a navegação, como o Banco das Almas, Banco da Cerca e o Banco do Meio, confirmando a importância de uma batimetria bem resolvida para se obter bons resultados no modelo.

A dinâmica da plataforma é fundamental para se entender a distribuição de temperatura e salinidade na Baía de São Marcos, a qual sofre influencia da Corrente Norte do Brasil (CNB), que transporta águas quentes e salinas provindas de Sul (Silva et al., 2007). Segundo estudos de Silva et al. (2007) e Assad et al. (2020) há uma predominância da corrente de sudeste para noroeste na plataforma continental do Maranhão. Não foi o objetivo do estudo caracterizar a influência da CNB na baía, porém o modelo nos mostra alguns indícios deste sistema na apresentação dos resultados: em setembro, na sizígia, a direção das correntes na borda leste do modelo se mantem em padrão unidirecional, para dentro da grade, e só muda de direção na condição de maré vazante; em abril, a pluma fluvial, representada pela distribuição de temperatura e salinidade, foi advectada para noroeste. Embora os resultados concordem com a influência da CNB, outras forçantes podem estar atuando na plataforma, como é o caso dos Ventos Alíseos que, segundo Pereira & Harari (1995), induzem correntes também na direção noroeste. Estudo mais aprofundados são necessários para entender a proporção de influencia da CNB e dos Ventos Alíseos na região.

Os valores de salinidade para o mês de abril são menores do que de setembro, como esperado devido ao aumento do aporte fluvial no período chuvoso. Para a plataforma adjacente à baía, esta diferença entre os meses é mais acentuada no período de quadratura, quando o regime

de maré perde a força, e na estação chuvosa, quando a pluma fluvial vence a forte estratificação horizontal normalmente estabelecida para a região, alcançando a borda norte do modelo (Figura 60). Em nenhum outro momento analisado neste trabalho a cunha salina foi observada para dados de salinidade e temperatura. O estudo de Lima et al. (2021) corrobora com os resultados supracitados, no qual foram coletados dados ao Norte e ao Sul do Terminal Ponta da Madeira, para os meses de fevereiro, junho e novembro, sendo que foi constatado o perfil de cunha salina apenas no mês de junho.

Estudos de Silva et al. (2007) e El-Robrini & Kampel (2008), os quais analisaram dados da campanha do Navio Oceanográfico *ANTARES*, em junho de 1999, no período chuvoso, ao longo da plataforma maranhense, constataram valores de salinidade entre 31 a 35,8psu até a isóbata de 60m. A variação da salinidade na superfície obtida pela seção da latitude 2,1°S até a borda norte do modelo, no mês de abril, foi de 32 a 35,5psu, na sizígia, e 29 a 36psu, na quadratura. Campanha similar, do *NOC ANTARES*, foi realizada para o período seco, em novembro de 1997, quando foi constatada uma menor variação da salinidade, entre 36,3 e 37,3psu. O modelo deste estudo também acompanhou esta tendência, variando na mesma seção supracitada, para o mês de setembro, entre 36 a 37psu. Já os valores de salinidade no centro da baía apresentaram uma grande variação entre os meses de abril e setembro: a diferença chega a alcançar 10psu, Valores de 25 a 28psu, no período chuvoso, e de 33 a 35psu, no período seco. Os trabalhos de coleta, entre as estações secas e chuvosas, de Lefèvre et al. (2017) e Lima et al. (2021), confirmam esta mesma variação entre os períodos e constataram valores próximos aos obtidos pelo modelado deste estudo. Portanto, segundo a literatura, os valores de salinidade produzidos pelo modelo acompanharam a climatologia da Baía de São Marcos e da plataforma adjacente.

Os valores de temperatura da superfície do mar na plataforma continental, para o mês de abril, são maiores do que os obtidos no mês de setembro, mês seco de alta temperatura atmosférica (Silva et al., 2007; El-Robrini & Kampel, 2008; Assad et al., 2020). A hipótese levantada por Silva et al. (2007) explica que, durante a estação chuvosa, o maior aporte fluvial carrega um grande volume de material em suspensão, tal processo inibe a penetração da radiação ao longo da coluna d'água, aumentando a concentração de calor nas camadas superficiais, consequentemente, aumentando a temperatura da superfície. Em contraste, no mês de setembro, a intrusão de águas oceânicas diminuem a temperatura da superfície (Silva et al., 2007; Lefèvre et al., 2017). O mapa temático confeccionado a partir dos resultados do modelo expôs para a plataforma: em abril, temperaturas por volta de 29°C, enquanto em setembro, 27-28°C. A

diferença, em torno de 2°C entre os meses, não foi encontrada nas coletas do *NOc ANTARES*, para o trabalho de Silva et al. (2007), onde a distinção entre as coletas de junho e novembro não ultrapassou 1°C e, para os dois períodos, a plataforma ficou com temperatura da superfície do mar no intervalo 27-28°C. Já os valores de temperatura da superfície do mar no centro da baía apresentaram uma pequena variação entre os meses de abril e setembro: 29,4°-29,9°C e 28,5-29,5°C, respectivamente. O trabalho de coleta de dados, entre as estações secas e chuvosas, de Lefèvre et al. (2017), confirmam esta variação entre os períodos e constata valores próximos aos produzidos pelo modelo neste estudo para a baía. Já o trabalho de Lima et al. (2021) apresenta valores mais variados entre as estações: em junho, média de 29,9°C e, em novembro, 27,9°C. Embora haja certas discordâncias com alguns estudos, a temperatura de superfície do mar simulada reproduziu bem a climatologia fornecida pela literatura para a Baía de São Marcos e a plataforma adjacente.

Os resultados acima expostos para as variáveis temperatura e salinidade demonstram a qualidade obtida pelo modelo desenvolvido neste trabalho e como ele representa melhor a realidade do que os modelos globais, quando comparado à bibliografia. Portanto, pode-se dizer que os índices estatísticos obtidos na comparação com os dados do *HYCOM* tiveram resultados de baixa qualidade devido ao fato do modelo global não representar corretamente os campos de temperatura e salinidade na região costeira. Isto ressalta a importância de se estabelecer modelos regionais para estudos costeiros.

5.2 MODELO LOCAL

A Baía de São Marcos tem um enorme potencial para operação portuária: grandes profundidades, área abrigada de ondas mais energéticas e posição geográfica estratégica para escoamento de carga para Europa e América do Norte. A região abrange o segundo maior complexo portuário da América Latina (Amaral & Alfredini, 2010). O Terminal Marítimo Ponta da Madeira, em específico, é responsável pela maior movimentação de carga nacional e, em 2019, movimentou sozinho 17% de toda carga do Brasil (ANTAQ, 2019). Entretanto, esta enorme movimentação de carga é realizada em uma janela de manobra estreita, devido às fortes correntes de maré enfrentadas durante as operações (Magalhães, 2018). Em resposta às condições limitantes, a Capitania dos Portos do Maranhão estabeleceu, pelo Manual de Manobras para o Complexo Portuário da Baía de São Marcos (NPCP), regras muito restritivas. No entanto, o NPCP é

muito restritivo em relação às variáveis hidrodinâmicas e às janelas operacionais contempladas (Gerent, 2010; Bernardino, 2015; Magalhães, 2018; NPCP, 2022). O presente estudo analisa estas lacunas e sugere um sistema de alerta para se visualizar a hidrodinâmica local durante as manobras.

Uma grade aninhada com o modelo regional foi confeccionada, a qual contempla o Terminal Marítimo Ponta da Madeira e o Porto do Itaqui. Os dados locais, medidos pelo *ADCP*, foram utilizados para validação do modelo local: não houve alteração nos índices estatísticos da variável nível do mar para a grade local comparado com o modelo regional, ambos foram excelentes. A resolução espacial do sistema de alerta, de 25m, se aproxima do espaçamento configurado entre as células de medição do *ADCP*, de 20m; deste modo, foi possível validar cada célula do sensor com um ponto da grade, perfazendo 12 pontos, 6 para cada correntômetro. Constatou-se, na média, uma piora nos parâmetros estatísticos de corrente em relação ao modelo regional, possivelmente relacionado ao fato das células de medição individuais do equipamento estarem mais sujeitas a variações de alta frequência, não contempladas pelo modelo numérico. Na validação do modelo regional este efeito foi atenuado pelo cálculo da média das células. No Píer 4, dolphin 15, se obteve boa concordância dos dados modelados e observados nos pontos de 30m até 70m do píer; a corrente calculada pelo modelo para a célula adjacente ao píer apresentou uma atenuação acentuada, não medida pelo sensor, e os dados observados a 90m e a 110m sofreram algum tipo de interferência, pois não corresponderam ao aumento da intensidade esperado e os ruídos aumentaram. Já no Píer 1, bons resultados foram obtidos a 30m e a 110m do píer, enquanto que a célula do modelo mais próxima do píer sofreu o mesmo problema do dolphin 15, e os dados medidos de 50m a 90m foram atenuados em relação aos produzidos pelo modelado. Por conseguinte, foram escolhidos, para efetuar a análise da NPCP, os pontos que obtiveram boa correlação com os dados medidos e mais longínquos do píer: a 70m do Píer 4 e a 110m do Píer 1.

Com o objetivo de se obter uma corrente limite, a ser empregada posteriormente no sistema de alerta, o NPCP foi avaliado neste estudo, quanto as regras dos Píeres 1 e 4. O manual leva em consideração a amplitude da maré e as especificações do navio, *Dead Weight Tonnage*⁷ e da própria manobra, a ser realizada de bombordo ou boreste. O presente estudo considerou conjuntamente todas as restrições das diferentes especificações.

Para contemplar o limite de todas as possibilidades de um ciclo lunar, foram analisadas

⁷Peso, em toneladas, que o navio consegue carregar

as janelas operacionais em vigor no dia de máximo da sizígia e de mínimo da quadratura. Os resultados estimaram correntes limite impostas de 1,7 nós para o Píer 4 e de 1,25 nós para o Píer 1. Nestas condições, a janela operacional possível, segundo a análise da NPCP, prevê aumento para o Píer 1 de 2 horas e 15 minutos, na sizígia, e 2 horas e 5 minutos, na quadratura. Já para o Píer 4, os aumentos são de 2 horas e 5 minutos, na sizígia, e 5 horas e 25 minutos, na quadratura. Vale lembrar que o Píer 1 apresenta uma extensa janela de operação para valores de amplitude menores que 4,5m, por isso não foi observado um acréscimo tão expressivo quanto para o Píer 4. O trabalho de Magalhães (2018), que também analisou dados de *ADCP* referentes ao Sistema de Monitoramento em Tempo Real (De Caroli et al., 2017), propôs um aumento de 2 horas e 30 minutos no período da quadratura para o Píer 4, para o dia de 10 de fevereiro de 2018.

O sistema de alerta apresenta portanto a hidrodinâmica para a grade local nos momentos de janela operacional em vigor e proposta, e possibilita entender como a corrente se comporta nos momentos em que foi apontado o acréscimo da janela operacional, podendo até mesmo invalidar uma possível janela obtida pela análise pontual das células de grade, como foi o caso da janela estimada entre os horários da 05:40 a 06:40 para o cenário de quadratura no Píer 4, onde é possível verificar correntes acima do limite proposto em todo o entorno do Píer 4, indicando uma situação insegura para manobras. Se forem consideradas apenas as janelas operacionais estimadas pela análise da NPCP que concordaram com o sistema de alerta, se tem o acréscimo da janela para o Píer 1 de apenas 1 hora e 50 minutos, na sizígia, e não há nenhum acréscimo na quadratura. Já para o Píer 4 o acréscimo se mantém em 2 horas e 5 minutos, na sizígia, e se passa para 3 horas, na quadratura. Esses valores são próximos aos do aumento de janela proposto por (Magalhães, 2018), de 2 horas e 30 minutos.

Antes de 2007, a regra de manobra estipulada para o Píer 1 era similar à do Píer 4, que permitia manobras apenas em horários de estofa, totalizando 6 horas diárias de janela operacional (Gerent, 2010). Após estudos com simuladores analógicos de manobra, a janela, hoje vigente, foi ampliada para todo o período da maré enchente, somando mais 10 horas de operação por dia para amplitudes de maré menores que 4,5m (Bernardino, 2015). O alerta de corrente de 1,25 nós estimado neste trabalho para o Píer 1 concorda com esta ampliação, pois a corrente não ultrapassa este limite em nenhum momento da maré enchente Figura 68, indicando uma boa estimativa da corrente de alerta estimada para o Píer 1.

Devido ao grau de incertezas referente as análises da NPCP para definir a corrente limite,

optou-se, como regra, subestimar os resultados de aumento da janela de manobra: soma de todas restrições das regras da NPCP para os diferentes portes de navio e exclusão de janelas operacionais menores que 1 hora. Em contrapartida, o fato de ter limitado o tempo de manobra para 1 hora pode ter superestimado o período da janela, podendo este ser um pouco maior na prática. Todavia, este estudo expõem a gama de possibilidades de janelas operacionais possíveis para os Píeres 1 e 4 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira em seus limites, mas as possibilidades aumentam se forem analisados as diferentes faixas de amplitude e os diferentes portes de navios. Segundo Relatório Anual da Associação de Terminais Portuários Privados de 2020, o Terminal Marítimo Ponta da Madeira obteve produtividade média de 6.684 Toneladas de Minério/hora (ATP, 2020). O preço da tonelada em abril de 2020 estava em 84,73 dólares (WorldBank, 2022). Com estas informações, é possível calcular uma estimativa do ganho potencial do Terminal para cada hora a mais de operação para abril de 2020: considerando que todos os Píeres (1, 3 Sul, 3 Norte, 4 Sul e 4 Norte) tem o mesmo peso, cada hora equivaleria por volta de 114 mil dólares. Devido ao fato do carregamento total dos navios que atracam no Terminal ocorrerem entre 1 a 3 dias, o ganho em horas estimado por este trabalho não pode ser feito pela somatória da janela operacional estimada.

O aumento já consolidado na janela de manobras, de 6 horas para 16 horas para o Píer 1, resultou em um ganho de 10 milhões de toneladas anuais para o Terminal (Gerent, 2010; Magalhães, 2018). Assumindo que o ganho de 3 horas obtidos por este trabalho para o Píer 4 na maré de quadratura seria proporcional a este valor, se pode estimar um aumento de 6 milhões de toneladas para o Píer 4 sul e norte, que equivaleria a um ganho potencial de 500 milhões de dólares anuais, com o valor fixado 84,73 dólares por tonelada de minério de ferro. Este valor pode estar subestimado, sabendo que o preço da tonelada já alcançou 200 dólares em 2021 e o Píer 4 é responsável por atracar os maiores navios do Terminal (EMAP, 2019; WorldBank, 2022). Estudo mais aprofundados são necessários para validar estes ganhos, mas o presente estudo confirma que existem lacunas na janela de manobra do Terminal ainda não contempladas, onde a modelagem numérica se torna uma ferramenta adequada para este propósito.

Embora a densidade não seja o foco deste estudo, a mesma possui grande importância para o Terminal Marítimo Ponta da Madeira no método de arqueação de navios mercantes, no qual calcula a quantidade de carga que pode ser embarcada. A densidade não foi validada por dados medidos *in loco*, mas o modelo regional apresentou variações de salinidade e temperatura concordantes com a literatura para região. Portanto, se pode analisar as variações de densidade

nas seções adjacentes para cada píer. O modelo indicou que, em momentos de quadratura, para o mês de abril, a densidade variou $0,2kg/m^3$ da superfície em relação ao fundo. O trabalho de Oliveira (2022) analisou dados medidos por densímetros instalados a 1m e 8m nos Píeres 1 e 4 do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, durante o ano de 2021, e obteve diferenças médias entre os sensores de 0,38 e $0,13kg/m^3$, respectivamente. Esta diferença são próximas às obtidas pelo modelo, embora para o mês de abril aquele estudo tenha apresentado maiores diferenças, com $0,4kg/m^3$, para o Píer 1, e $0,9kg/m^3$, para o Píer 4. Tudo indica que o modelo subestima a estratificação da coluna de água e precisa ser aprimorado para ser utilizado no método de arqueação. De fato, um modelo acurado para o parâmetro de densidade pode otimizar a operação portuária. Oliveira (2022) estimou, para o ano de 2021, que a utilização de valores obtidos por densímetros digitais, ao invés dos analógicos convencionais, acrescentariam 1,1 milhão de toneladas de minério de ferro, com um ganho potencial de 143 milhões de dólares para o Terminal naquele ano.

5.3 MODELO FUTURO

O modelo numérico hidrodinâmico para a Baía de São Marcos implantado neste estudo foi representativo da realidade, mas melhorias devem ser evidenciadas e serão elencadas a seguir, para utilização em futuros trabalhos: 1) Utilização de dados de batimetria de alta resolução, em especial para a grade local próximo aos Terminais Portuários, 2) Dados do coeficiente de rugosidade do fundo variando conforme granulometria, 3) Variação espacial do coeficiente de viscosidade vertical e horizontal, 4) Implementação de células secas e molhadas conforme a variação da maré, 5) Uso de células secas apenas nas pilastras que sustentam os píeres dos Terminais, 6) Mais pontos representativos de aporte fluvial, em especial, maior resolução temporal da vazão dos rios Mearim e Pindaré, 7) Modelo hidrodinâmico com influência das ondas, 8) Maior aninhamento da grade e ajuste das equações hidrodinâmicas conforme as escalas temporais e espaciais de cada grade.

A variável direção de corrente não foi inserida na análise para definição dos limites de corrente do sistema de alerta no presente estudo. Entretanto, é uma variável de suma importância para assegurar condições seguras de operação nos períodos, aqui propostos, de dilatação da janela operacional do Terminal. Determinados ângulos de incidência das correntes sob os navios podem, tão como diminuir, como aumentar, a intensidade da corrente limite segura para

as atividades de atracação e desatracação das embarcações. Mais estudos são necessários acerca deste tema, sendo que, a inclusão desta variável no sistema de alerta pode se tornar a peça-chave para obtenção de um ganho real para o Terminal Marítimo Ponta da Madeira.

Um modelo hidrodinâmico robusto pode gerar ganhos ao complexo portuário por si só, como discutido neste estudo em relação à janela de manobra e ao método de arqueação. Ademais, novos modelos podem ser acoplados ao mesmo e trazer novas aplicações, em destaque, o modelo hidrossedimentológico. O Terminal Marítimo Ponta da Madeira realiza dragagens diárias, sendo esse o seu maior custo operacional (Figueiredo, 2018). Um modelo de dispersão de sedimentos acoplado a um hidrodinâmico robusto pode informar com precisão a dinâmica sedimentar e, conseqüentemente, diminuir custos com a redução de levantamentos batimétricos, bem como servir de base para projetos que diminuam o assoreamento em certos locais, diminuindo os volumes dragados (Amaral et al., 2007; Figueiredo, 2018).

O presente estudo serve de base para a implantação de um modelo operacional em tempo real e preditivo para a Baía de São Marcos. Supõe-se que, com o sistema de alerta acurado e acessível ao setor operacional dos Portos e Terminais do complexo, haverá mais segurança nas atividades do Porto e ganhos em operações. Uma interfase interligada com os resultados do modelo a um simulador de manobra pode vir a ser de grande utilidade para a praticagem do Maranhão. Um modelo com índice *Skill* maior que 0,95 para as correntes em relação a observações deve ser alcançado, levando à implementação de um modelo operacional robusto e de alta confiança para a atividade portuária do complexo (Costa, 2019).

6 CONCLUSÃO

A implantação do modelo numérico hidrodinâmico para a Baía de São Marcos obteve êxito na simulação da variabilidade espaço-temporal para as variáveis hidrodinâmicas contempladas. pode-se constatar que a hidrodinâmica é regida pelo regime de macro-mare, com amplitude máxima registrada para o Terminal Marítimo Ponta da Madeira de 6,87m em setembro, ficando em segundo plano a influência de ventos e ondas. O modelo global atmosféricos *CFRS*, utilizado como forçante, apresentou valores fidedignos a realidade para a região de estudo. O nível do mar foi a variável oceanográfica que mais se aproximou dos dados observados. A assimetria da maré, característica da baía, foi bem representada no modelo, com correntes de vazante mais intensas do que as de enchente, obtendo-se alguns cenários interessantes como: ao mesmo tempo, a baía pode estar na fase de maré vazante e enchente. A distribuição de temperatura e salinidade, com resultados semelhantes a bibliografia, demonstra a qualidade do modelo regional implantado em comparação com modelos globais, os quais não contemplam os aportes fluviais, determinante para obtenção de resultados fidedignos para estas variáveis.

O sistema de alerta desenvolvido demonstrou a enorme utilidade da modelagem numérica hidrodinâmica para a otimização das operações portuárias do complexo da Baía de São Marcos. O acréscimo da janela de manobras estipulada neste estudo, principalmente para o Píer 4, no qual as regras ainda são as mais restritas, pode trazer ganhos enormes para o Terminal, da ordem de 500 milhões de dólares anuais, caso a janela proposta seja implantada. Ademais, este acréscimo diz respeito a otimização da operação de apenas um píer, pode-se especular que os ganhos podem ser ainda maiores se o trabalho contemplar todo o complexo portuário e levar em conta os diferentes cenários de amplitude de maré de cada píer. Destaca-se, para os próximos trabalhos, a inclusão da variável direção de corrente na análise do sistema de alerta. Outra aplicação do modelo numérico hidrodinâmica com grande potencial para se obter ganhos na operação é pela contribuição no processo de arqueação de navios a partir de valores realísticos distribuição da densidade nas adjacências dos píeres. Contudo, no quesito densidade, este modelo ainda precisa ser aprimorado.

Mais estudos são necessários para aprimorar o modelo numérico hidrodinâmico e, posteriormente, transformá-lo em um sistema operacional em tempo real e preditivo de alta confiabilidade, para ser utilizado na otimização das atividades portuárias do complexo da Baía de São Marcos. Após o modelo hidrodinâmico estar bem estabelecido, novos modelos podem ser

acoplados ao mesmo, sejam eles hidrossedimentológicos, biogeoquímicos ou ecológicos, atingindo patamares de aplicabilidade maiores do que somente a atividade portuária, possibilitando a solução de problemas complexos no âmbito do gerenciamento costeiro nacional, até mesmo para questões socioambientais emergentes.

Portanto, se conclui que a hipótese proposta para este trabalho foi confirmada: modelos numéricos hidrodinâmicos podem ser usados para aumentar a eficiência e segurança das operações do complexo portuário da Baía de São Marcos.

Referências

- Alfredini P, Arasaki E. Engenharia Portuária. 1 ed. São Paulo: Blucher; 2014.
- Amante C, Eakins B. Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA 2009;.
- Amaral RF. Caracterização hidrossedimentológica do Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão. PhD thesis, Universidade de São Paulo; 2006.
- Amaral RF, Alfredini P. Modelação hidrossedimentológica no canal de acesso do complexo portuário do Maranhão. Diretoria da ABRH 2010;p. 5.
- Amaral RF, Alfredini P, Arasaki E. As Conformações de Fundo do Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão 2007;.
- ANA. Hidroweb.(Agência Nacional das Águas) 2017;<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>.
- Andrade MMN, de Souza-Filho PWM, Szlafsztein CF. Imagens de Alta Resolução para Reconhecimento da Susceptibilidade dos Recursos Socioeconômicos à Ameaça de Derrame de Petróleo no Complexo Portuário Itaqui-Bacanga, Maranhão, Brasil. Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management 2009;9(2):127–133.
- Andrade MMN, Szlafsztein CF, Souza-Filho PWM, dos Reis Araújo A, Gomes MKT. A socio-economic and natural vulnerability index for oil spills in an Amazonian harbor: a case study using GIS and remote sensing. Journal of environmental management 2010;91(10):1972–1980.
- ANTAQ. Agência Nacional de Transportes Aquaviários 2019;<http://portal.antaq.gov.br/>.
- Araújo MEd, Ramalho CWN, Melo PwD. Artisanal fishers, consumers and the environment: immediate consequences of the oil spill in Pernambuco, Northeast Brazil. Cadernos de Saúde Pública 2020;36.
- Arcement GJ, Schneider VR. Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains 1989;.

- Assad FLP, Toste R, Böck CS, Nehme DM, Sancho L, Soares AE, et al. Ocean climatology at Brazilian Equatorial Margin: a numerical approach. *Journal of Computational Science* 2020;44:101159.
- ATP. Relatório Anual de Atividades da Associação de Terminais Portuário Privados 2020;<https://www.portosprivados.org.br/publicacoes/relatorios>.
- Bernardino JCM. Abordagem experimental para avaliação de manobras de navios em modelos físicos de espaços náuticos. PhD thesis, Universidade de São Paulo; 2015.
- Brasil. Constituição da Republica Federativa do Brasil 1988;.
- Carvalho AB. Economia do mar: conceito, valor e importância para o Brasil. Doutorado (tese), Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul; 2018.
- Cavalcanti IF. Tempo e clima no Brasil. Oficina de textos; 2016.
- Chagas FM. Dinâmica de ondas de areia na Baía de São Marcos (Ponta da Madeira/MA) observações e modelagem numérica. Mestrado (dissertação), Universidade de São Paulo; 2013.
- CIRM. Guia de Diretrizes de Prevenção e Proteção à Erosão Costeira. Comissão de Integração do Gerenciamento Costeiro, Brasília; 2018.
- CMEMS. Global ocean 1/12 physics analysis and forecast updated daily product. EU Copernicus Marine Service Information [Data set] 2019;<https://marine.copernicus.eu>.
- Costa AMS. Modelagem Computacional para Avaliação Preliminar do Potencial de Correntes de Maré no Canal do Boqueirão. Mestrado (dissertação), Universidade Federal do Maranhão; 2022.
- Costa CGR. Physical processes in the Santos - São Vicente - Bertioga Estuarine System from observations to forecast. Doctor (thesis), Oceanographic Institute of the University of São Paulo; 2019.
- Coutinho P, Morais J. Distribuição de Sedimento da Baía de São José, Estado do Maranhão, Brasil. *Arquivos de ciências do mar* 1975;15:123.

- Czizeweski A, Pimenta FM, Saavedra OR. Modelagem numérica do Maranhãoãa circulação das marés do Golfo e distribuição de densidade de potência. *Ocean Dynamics* 2020;70(5):667–682.
- Czizeweski A, Pimenta FM, Saavedra OR. Numerical modeling of Maranhão Gulf tidal circulation and power density distribution. *Ocean Dynamics* 2020;p. 1–16.
- Czizeweski AC. Correntes e energia de marés no Golfão Maranhense, Brasil. Mestrado (dissertação), Universidade Federal de Santa Catarina; 2019.
- De Caroli A, Pereira AF, Paschoal GA, Delpupo D. Sistema de Informações Meteorológicas em tempo real (SISMO®) Porto de Ponta da Madeira. *Revista de Ciência & Tecnologia* 2017;21(41):15–29.
- Deltares D. Delft3D-FLOW user manual. Deltares Delft, The Netherlands 2021;330.
- DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha 2018;<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/cartas-raster>.
- Dias JA, do Carmo JA, Polette M. As zonas costeiras no contexto dos recursos marinhos. *Revista de Gestão Costeira Integrada* 2009;9(1):3–5.
- Dominguez JML, Da Silva Pinto Bittencourt AC. Regional assessment of long-term trends of coastal erosion in northeastern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 1996;68(3):355–372.
- Egbert GD, Erofeeva SY. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic technology* 2002;19(2):183–204.
- El-Robrini M, Kampel M. Ocorrência sazonal de massas d’água na plataforma continental do Maranhão 2008;.
- EMAP. Plano de desenvolvimento e zoneamento do Porto Organizado do Itaqui 2019;<https://www.portodoitaqui.ma.gov.br/pdf/pdz-itaqui.pdf>.
- EMAP. Plano de desenvolvimento e zoneamento do Porto Organizado do Itaqui 2021;.
- Escobar H, Mystery oil spill threatens marine sanctuary in Brazil. *American Association for the Advancement of Science*; 2019.

- Feitosa AC. Evolução Morfogenética do Litoral Norte da Ilha do Maranhão. Mestrado (dissertação), UNESP Rio Claro; 1989.
- Fernandes GW, Goulart FF, Ranieri BD, Coelho MS, Dales K, Boesche N, et al. Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. *Natureza & Conservação* 2016;14(2):35–45.
- Ferreira V. Estatística Básica. 1 ed. Rio de Janeiro: SESES; 2015.
- Figueiredo AR. Análise da influência da corrente marítima na remoção dos sedimentos no Terminal Marítimo Ponta da Madeira em São Luís–MA. Mestrado (dissertação), Universidade Federal do Maranhão; 2018.
- Finkl C. Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro. *Journal of Coastal Research* 2008;24(4):1088.
- FTG. Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundao em Mariana-MG. Belo Horizonte: Secretaria de Desenvolvimento Regional, Política Urbana e Gestão Metropolitana, Governo do Estado de Minas Gerais 2016;.
- Garcia LC, Ribeiro DB, de Oliveira Roque F, Ochoa-Quintero JM, Laurance WF. Brazil's worst mining disaster: Corporations must be compelled to pay the actual environmental costs. *Ecological Applications* 2017;27(1):5–9.
- Garcia PD. Caracterização hidrossedimentológica das correntes de maré e do transporte de sedimentos associado à área portuária do Maranhão. Doutorado (tese), Universidade de São Paulo; 2007.
- Gerent JP. A simulação analógica de manobras não tripuladas de navios na otimização de projetos e operações portuárias. PhD thesis, Universidade de São Paulo; 2010.
- González-Gorbeña E, Rosman PC, Qassim RY. Assessment of the tidal current energy resource in São Marcos Bay, Brazil. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy* 2015;1(4):421–433.
- Guedes R, Oyama MD, Andreoli RV. Modulação do ciclo anual de variáveis de superfície em São Luís (Maranhão) por oscilações de baixa frequência. *Revista Brasileira de Meteorologia* 2006;21(2):245–255.

- Harari J. Fundamentos de modelagem numérica em Oceanografia. São Paulo: Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo 2015;.
- Hatje V, Pedreira RM, de Rezende CE, Schettini CAF, de Souza GC, Marin DC, et al. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. *Scientific reports* 2017;7(1):1–13.
- INMET. BDMEP-Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa 2014;<https://bdmep.inmet.gov.br/>.
- Innocentini V, Prado C, Pereira F, Brandão N. Marulhos no litoral norte do Brasil gerados por furacões: Caso de 24 de outubro de 1999. *Rev Bras Meteorol* 2000;16(2):177–186.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American meteorological Society* 1996;77(3):437–472.
- Lefèvre N, da Silva Dias FJ, de Torres Jr AR, Noriega C, Araujo M, de Castro ACL, et al. A source of CO₂ to the atmosphere throughout the year in the Maranhense continental shelf (2° 30' S, Brazil). *Continental Shelf Research* 2017;141:38–50.
- Lima H, Dias F, Teixeira C, Godoi V, Torres Jr A, Araújo R. Implications of turbulence in a macrotidal estuary in northeastern Brazil—The São Marcos Estuarine Complex. *Regional Studies in Marine Science* 2021;47:101947.
- Lourenço RA, Combi T, da Rosa Alexandre M, Sasaki ST, Zanardi-Lamardo E, Yogui GT. Mysterious oil spill along Brazil's northeast and southeast seaboard (2019–2020): Trying to find answers and filling data gaps. *Marine Pollution Bulletin* 2020;156:111219.
- Magalhães ACR. Marés e correntes na otimização de manobras de navios na Baía de São Marcos, São Luís - MA. Mestrado (dissertação), Universidade Federal do Maranhão; 2018.
- Magris RA, Giarrizzo T. Mysterious oil spill in the Atlantic Ocean threatens marine biodiversity and local people in Brazil. *Marine Pollution Bulletin* 2020;153:110961.
- Marengo JA. Interannual variability of deep convection over the tropical South American sector as deduced from ISCCP C2 data. *International Journal of Climatology* 1995;15(9):995–1010.

- Marta-Almeida M, Mendes R, Amorim FN, Cirano M, Dias JM. Fundão Dam collapse: Oceanic dispersion of River Doce after the greatest Brazilian environmental accident. *Marine Pollution Bulletin* 2016;112(1-2):359–364.
- Metzger E, Smedstad O, Carroll S. User's Manual for the Global Ocean Forecast System (GOFS) Version 3.0. Naval Research Lab Stennis Space Center Ms Ocean Dynamics and Prediction Branch; 2009.
- Miranda LS, Marques AC. Hidden impacts of the Samarco mining waste dam collapse to Brazilian marine fauna-an example from the staurozoans (Cnidaria). *Biota Neotropica* 2016;16(2).
- Monahan D, Vogt PR, Cormier MH. A Proposal to Complete Mapping of the World Ocean Floors 2008;.
- Morais JO. Processos de sedimentação na baía de São Marcos, estado do Maranhão, Brasil. *Arquivos de Ciências do Mar* 1977;17(2):153–164.
- Nascimento FCA, Braga CC, Araújo FRCD. Análise estatística dos eventos secos e chuvosos de precipitação do Estado do Maranhão. *Revista Brasileira de Meteorologia* 2017;32:375–386.
- NPCP. Normas para Manobra do Complexo Portuário da Baía de São Marcos. Capitania dos Portos do Maranhão, Maranhão; 2022.
- Oliveira RF. Influência da variação temporal da densidade da água nas operações portuárias do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira. Mestrado (dissertação), Universidade Federal do Maranhão; 2022.
- Paschoal GA. Benefícios do SISMO® 2020;<https://www.youtube.com/watch?v=-UokoSONkrI>:HidroMares.
- PBMC. Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. PBMC, COPPE-UFRJ Rio de Janeiro, Brasil 2016;.
- Pereira EI, de Miranda I, Fisch GF, Machado LAT, Alves MAS. Atlas climatológica do Centro de Lançamento de Alcântara-MA. São José dos Campos: CTA/IAE-Divisão de Ciências Atmosféricas 2002;.

- Pereira FC, Oliveira MRL. MMA, Ministério do Meio Ambiente: Plano nacional de gerenciamento costeiro: 25 anos do gerenciamento costeiro no Brasil. Ministério do Meio Ambiente, Brasília; 2015.
- Pereira LCC, Trindade WN, da Silva IR, Vila-Concejo A, Short AD. Maranhão beach systems, including the human impact on São Luís Beaches. In: *Brazilian Beach Systems* Springer; 2016.p. 125–152.
- Pereira RJ, Harari J. Modelo numérico tri-dimensional linear da plataforma continental do Estado do Maranhão. *Boletim do Instituto oceanográfico* 1995;43(1):11–26.
- Reich NG, Lessler J, Sakrejda K, Lauer SA, Iamsirithaworn S, Cummings DA. Case study in evaluating time series prediction models using the relative mean absolute error. *The American Statistician* 2016;70(3):285–292.
- Ribeiro Junior JCMR. Desenvolvimento de um modelo hidráulico computacional para o Complexo Estuarino de São Marcos (CESM)-Maranhão. Mestrado (dissertação), Universidade Federal do Maranhão; 2019.
- Rodríguez MG, Nicolodi JL, Gutiérrez OQ, Losada VC, Hermosa AE. Brazilian coastal processes: wind, wave climate and sea level. In: *Brazilian Beach Systems* Springer; 2016.p. 37–66.
- Saha S, Moorthi S, Wu X, Wang J, Nadiga S, Tripp P, et al., Updated monthly. NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) Selected Hourly Time-Series Products. Research data archive at the national center for atmospheric research, computational and information systems laboratory; 2017.
- Samaritano L, Chagas F, Bernardino J, Siegle E, Tessler M, Uemura S. Modelagem hidrodinâmica sobre um campo de ondas de areia na Baía de São Marcos, Brasil. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Marine and River Dune Dynamics (MARID IV)*; 2013. .
- Santos EDV. Caracterização do padrão de ondas superficiais de gravidade geradas pelo vento no Complexo Estuarino de São Marcos (MA). Mestrado (dissertação), Universidade Federal do Maranhão; 2018.

- Silva AC, Araujo M, Pinheiro LdS. Caracterização hidrográfica da plataforma continental do maranhão a partir de dados oceanográficos medidos, remotos e modelados. *Revista Brasileira de Geofísica* 2007;25:281–293.
- Silva IR, Pereira LCC, Trindade WN, Magalhães A, da Costa RM. Natural and anthropogenic processes on the recreational activities in urban Amazon beaches. *Ocean & Coastal Management* 2013;76:75–84.
- Silva PJ. A logística da Vale, para a movimentação de massa econômica, Terminal Portuário de Ponta da Madeira 2016;.
- Silva VG. Modelagem dos padrões de circulação local e transporte de sedimentos dragados no Complexo Estuarino de São Marcos, São Luís, MA. Mestrado (dissertação), Universidade Federal do Maranhão; 2016.
- Solari G, Repetto MP, Burlando M, De Gaetano P, Pizzo M, Tizzi M, et al. The wind forecast for safety management of port areas. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2012;104:266–277.
- Torma LF. Boas práticas de gerenciamento costeiro integrado: um modelo de avaliação como base para a gestão. Mestrado (dissertação), Universidade Federal do Rio Grande; 2018.
- Vasconcelos KS, Rosman PA, Rosman PCC, Nzualo TdNM, Andrade VS. Projeto Baías do Brasil, Baía de São Marcos - MA. COPPE 2018;.
- Vincent M, Hess K, Kelley J. NOS Procedures for Developing and Implementing Operational Nowcast and Forecast Hydrodynamic Model Systems. 2003;.
- Waliser D, Gautier C. Uma climatologia derivada de satélite da ITCZ. *Jornal do clima* 1993;6(11):2162–2174.
- Walstra D, Van Rijn L, Blogg H, Van Ormondt M. Evaluation of a hydrodynamic area model based on the COAST3D data at Teignmouth 1999. In: *Proceedings of coastal dynamics 2001 conference*, Lund D, vol. 4; 2001. p. 1–D4.
- Willmott C, On the validation of models physical geography. 2: 184–194; 1981.

WorldBank. Minério de ferro Preço Mensal - Dólares americanos por tonelada métrica seca 2022;<https://www.indexmundi.com/pt/pre%C7os-de-mercado/?mercadoria=min%C3%A9rio-de-ferro&meses=60>.

Wright J, Colling A, Park D. Waves, tides and shallow-water processes, vol. 4. Gulf Professional Publishing; 1999.