



Universidade Federal do Sul da Bahia - UFSB
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia da Bahia - IFBA
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Ambientais - PPGCTA

MAURICIO DA ROCHA

INTRUSÃO SALINA NO ESTUÁRIO DO RIO BURANHÉM (SUL DA BAHIA) ATRAVÉS DE MODELAGEM NUMÉRICA

Orientador: Prof. Dr. Allison Gonçalves Silva

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Eduardo Cordeiro Bernardes

PORTO SEGURO - BA

OUTUBRO – 2019

Universidade Federal do Sul da Bahia - UFSB
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia da Bahia - IFBA
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Ambientais - PPGCTA

MAURICIO DA ROCHA

**INTRUSÃO SALINA NO ESTUÁRIO DO RIO BURANHÉM (SUL DA
BAHIA) ATRAVÉS DE MODELAGEM NUMÉRICA**

Orientador: Prof. Dr. Allison Gonçalves Silva

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Eduardo Cordeiro Bernardes

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Sul da Bahia e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências e Tecnologias Ambientais .

PORTO SEGURO - BA

OUTUBRO – 2019

Dados internacionais de catalogação na publicação (CIP)
Universidade Federal do Sul da Bahia - Sistema de Bibliotecas

R672i Rocha, Mauricio da
Intrusão salina no estuário do Rio Buranhém (Sul da Bahia)
através da modelagem numérica. / Mauricio da Rocha. – Porto
Seguro, 2019.
65 p.

Orientadora: Allison Gonçalves Silva
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Sul da Bahia.
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias
Ambientais.

1. Bacias Hidrográficas. 2. Costa do Descobrimento. 3. Delft3D. 4.
Zonas Costeiras. I. Silva, Allison Gonçalves. II. Título.

CDD: 551.483



Universidade Federal do Sul da Bahia
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Ambientais
Centro de Formação em Ciências Ambientais

Ata da Defesa Pública de Dissertação de Mestrado

Aos 31 dias do mês de outubro do ano de 2019, às 15:00h na sala Taperapuã 1, Campus Sosígenes Costa, reuniram-se os membros da banca examinadora composta pelos professores: Allison Gonçalves Silva (Orientador e Presidente da banca), Ângelo Teixeira Lemos (membro externo ao programa), Eduardo Siegle (membro externo à instituição) e Fabricio Berton Zanchi (membro interno) a fim de argüírem o mestrando **Maurício da Rocha**, cujo trabalho intitula-se "Intrusão Salina no Estuário do Rio Buranhém (Sul da Bahia) Através de Modelagem Numérica". Aberta a sessão pelo presidente da mesma, cede ao candidato, na forma regimental, expor o tema de sua dissertação, dentro do tempo regulamentar, sendo em seguida questionado pelos membros da banca examinadora, tendo dado as explicações que foram necessárias. Os membros da banca consideraram o trabalho de dissertação:

☒ aprovado

☐ aprovado com modificações

☐ não aprovado, devendo ser realizada nova qualificação no prazo de ____ meses.

Recomendações da Banca:

Acatar as sugestões da banca para melhorar.

Banca Examinadora:

Allison Gonçalves Silva (IFBA)
Orientador e presidente da banca

Ângelo Teixeira Lemos (UESB)
Membro externo ao programa

Eduardo Siegle (USP)
Membro externo à instituição

Fabricio Berton Zanchi (UESB)
Membro interno

Candidato: _____
Maurício da Rocha

Porto Seguro, 31 de outubro de 2019.

Sumário

INTRODUÇÃO GERAL.....	13
REFERÊNCIAS	15
RESUMO	17
ABSTRACT	18
1. INTRODUÇÃO.....	19
2. MATERIAIS E MÉTODOS	19
2.1 Área de Estudo.....	19
2.2 Modelo Delft3D.....	22
2.3 Grade Delft3D-Flow.....	22
2.4 Batimetria	23
2.5 Testes de Sensitividade.....	25
2.6 Calibração do Modelo.....	28
2.6.1 Avaliação Estatística do Modelo.....	29
2.6.2 Modelo 2D	29
2.6.3 Modelo 3D	30
2.7 Validação do Modelo	31
2.7.1 Decomposição de Velocidade	32
2.8 Simulação Hidrodinâmica.....	33
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
3.1 Calibração	35
3.1.1 Nível	35
3.1.2 Salinidade.....	36
3.1.3 Velocidade.....	38
3.2 Validação.....	41
3.2.1 Nível	41
3.2.2 Salinidade.....	42
3.2.3 Velocidade.....	49
3.3 Simulação hidrodinâmica sob diferentes vazões históricas mínimas ..	52
4. CONCLUSÕES.....	62
4.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	62
REFERÊNCIAS	63

RESUMO GERAL

O município de Porto Seguro, Bahia, é um conhecido destino turístico no Brasil. Contudo, sua infraestrutura urbana fica sobrecarregada, especialmente durante o verão. A população flutuante anual é aproximadamente 10 vezes maior do que sua população fixa. A combinação entre o crescimento das populações fixa e flutuante, no médio e longo prazo, pressionarão ainda mais o saneamento do município, tornando-se indispensáveis estudos que possam prever os possíveis impactos ambientais para auxílio no planejamento urbano. Até 2025, de acordo com a Agência Nacional de Águas, estima-se que o rio Buranhém também passe a ser utilizado como manancial de abastecimento para a cidade. Dados hidrológicos mais recentes indicam tendência à diminuição da vazão fluvial, principalmente pela degradação da cobertura florestal na respectiva bacia hidrográfica e influência de fenômenos como o El-Niño Southern Oscillation (ENSO). A vazão fluvial sofre grande variação anual, sendo a vazão média anual histórica de $22 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. A região é submetida a um regime de micromaré a mesomaré astronômica com variações acima de 2 m, com velocidades médias próximas a $0,4 \text{ m.s}^{-1}$ na enchente e 1m.s^{-1} na vazante. O presente trabalho tem por objetivo geral o estudo da intrusão salina no estuário do rio Buranhém em cenários de vazões mínimas registrados em séries históricas. Para isso, foi realizada a implementação do modelo numérico hidrodinâmico Delft3D, como subsídio ao planejamento do saneamento local e para contribuir com estudos relacionados ao transporte de sedimentos e qualidade da água. Foram simulados cenários sob diferentes condições de maré e vazões fluviais. O modelo foi calibrado e validado através de dados de campo de velocidade de correntes e de variação do nível de água e salinidade de superfície e fundo, observados com CTD's em três pontos fixos e ADCP em um ponto fixo fundeados no estuário. Os dados de campo e os resultados modelados foram comparados quantitativamente através do parâmetro Skill. Para efeito de análise da intrusão salina, além das marés típicas da região, o modelo foi forçado com vazões mínimas registradas em séries históricas ($2, 4, 6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) e em uma condição de vazão mínima extrema de $0,2 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Os dados observados de salinidade indicam um ambiente com tendência à estratificação vertical na maré de quadratura em comparação com a maré de sizígia, condição esta de estuário bem misturado. Já os resultados modelados só reproduziram características de um ambiente bem misturado tanto na maré de quadratura como na sizígia. Foram obtidos valores médios de Skill superiores a 0,97 para o nível de água, sob marés de quadratura e sizígia com variações de 1 m a 2,15 m, respectivamente. Os resultados de salinidade de superfície e de fundo foram de valores médios Skill superiores a 0,90, enquanto os de velocidades horizontais apresentaram valores médios Skill superiores a 0,77. Os dados de campo apresentaram uma intrusão salina de 5,1 km, sob maré de quadratura de 04/08/2016 às 12h00 e 9,4 km, sob maré de sizígia de 31/07/2016 às 18h00. Já o modelo para o mesmo período representou sob maré de quadratura uma intrusão salina de 4,1 km e sizígia de 6 km aproximadamente. Na simulação de condição de vazão mínima extrema ($0,2 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) e maré de sizígia o modelo representou uma intrusão de aproximadamente 17 km a montante da foz do estuário. Com vazões mínimas de ($2, 4, 6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) a intrusão foi diminuindo gradativamente com resultados de 13, 11 e 9,5 km, respectivamente. Confirmando-se o cenário de uso do rio Buranhém como manancial para abastecimento de água em Porto Seguro, estudos como este poderão servir como referência para se determinar uma região de captação de água doce mais segura.

Palavras-chave: interação continente-oceano, bacias hidrográficas, Costa do Descobrimento, Delft3D, zonas costeiras.

ABSTRACT

The city of Porto Seguro, Bahia, is a well-known tourist destination in Brazil. However, its urban infrastructure is overloaded, especially during the summer. The annual fluctuating population is approximately 10 times larger than its fixed population. A combination of growth of fixed and fluctuating variations, without medium and long term, further pressing the sanitation of the municipality, making them indispensable studies that can show the possible environmental impacts to aid in urban planning. By 2025, according to the National Water Agency, it is estimated that the Buranhém River will also be used as a water supply source for the city. More recent hydrological data indicate a tendency to decrease river flow, mainly due to the degradation of forest cover in the respective watershed and influence of phenomena such as El-Niño Southern Oscillation (ENSO). Fluvial flow suffers great annual variation, being the historical annual average flow of $22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. The region is subjected to an astronomical mesomare regime with variations over 2 m, with average velocities close to $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in the flood and $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in the ebb. The present work has as its general objective the study of saline intrusion in the Buranhém river estuary in minimum flow scenarios recorded in historical series. To this end, the Delft3D hydrodynamic numerical model was implemented to support local sanitation planning and to contribute to studies related to sediment transport and water quality. Scenarios were simulated under different tidal conditions and river flows. The model was calibrated and validated by field data of current velocity and surface and bottom water level variation and salinity, observed with CTD's at three fixed points and ADCP at a fixed point anchored in the estuary. Field data and modeled results were compared quantitatively using the Skill parameter. For saline intrusion analysis purposes, in addition to the typical tides of the region, the model was forced with minimum flows recorded in historical series ($2, 4, 6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) and in an extreme minimum flow condition of $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. result, average Skill values higher than 0.97 were obtained for the water level, under neap tides and spring tides with variations of 1 m to 2.15 m respectively. Surface and bottom salinity results were mean Skill values greater than 0.90, while horizontal speeds showed average Skill values greater than 0.77. The field data presented a saline intrusion of 5.1 km, under neap tide from 08/04/2016 to 12h00 and 9.4 km, under spring tide from 07/31/2016 to 18h00. Already the model for the same period represented under neap tide a saline intrusion of 4.1 km and approximately 6 km a spring tide. In extreme minimum flow condition simulation ($0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) and spring tide, the model represented an intrusion of approximately 17 km upstream of the estuary mouth. In simulations with minimum flow rates of ($2, 4, 6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) the intrusion was gradually decreasing with results of 13, 11 and 9.5 km, respectively. Confirming the scenario of using the Buranhém river as a source for water supply in Porto Seguro, studies such as this may serve as a reference to determine a safer freshwater catchment region.

Keywords: continent-ocean interaction, watersheds, Discovery Coast, Delft3D, coastal zones.

Lista de Figuras

Figura 1: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Buranhém. Em destaque, estuário do Rio Buranhém, séries modeladas, pontos de observação de dados, locais de lançamento do efluente sanitário referente a outorga da EMBASA, localização do lixão e tanques de chorume. Na boca do estuário destaca-se o banco de areia e o <i>beachrock</i> , coordenadas em UTM.....	21
Figura 2. Grade numérica com recortes aplicados na região do estuário e do rio. Células com dimensões que variam de 30 a 300m na região do estuário e de 80 a 1300m na região costeira.....	23
Figura 3. Batimetria aplicada ao modelo. Em A oceano adjacente com profundidades máximas de ~23 m e B região estuarina com característica de águas rasas com profundidade não superior a 5 m.....	24
Figura 4. Os limites abertos A,B,C no oceano adjacente forçados por maré e limite aberto D forçado por vazões ajustadas.....	25
Figura 5. Série histórica da vazão do Rio Buranhém registrada na estação fluviométrica Fazenda Limoeiro (55170000). Os períodos entre as áreas tracejadas de 1991 a 1997 e de 1999 a 2001 foram descartados. A linha em preto indica tendência de acordo com média anual de vazão. Fonte: (SILVA, 2019)	26
Figura 6. Vazão média mensal do ano de 2015 no Rio Buranhém registrada na estação fluviométrica Fazenda Limoeiro (55170000). Os meses de outubro a dezembro foram descartados pois os dados não foram consistidos pela ANA.	27
Figura 7. Variação do nível de água (m) modelado em ponto localizado na área do oceano adjacente, no período de 07/07 a 06/08/15.	27
Figura 8. Nas calibrações, os dados modelados são comparados até atingirem valores que satisfaçam a concordância entre os dados observados e modelados através do parâmetro Skill.....	28
Figura 9. Calibração do nível de água, para o período de 31/07/15 a 07/08/15 nos pontos 2 e 3, respectivamente, com variações de atrito de fundo com valores de Chézy 28, 37, 56 e $65 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$	30
Figura 10. Vazão fluvial registrada na estação fluviométrica Fazenda Limoeiro (55170000), período de 25/07/2016 a 30/08/2016. Fonte: (ANA, 2019).	32
Figura 11. Decomposição dos componentes de velocidades u (longitudinal) e v (transversal) em relação ao sistema local de coordenadas (Oxy). Fonte (MIRANDA et al., 2002).	32
Figura 12. Vazões configuradas para simulações hidrodinâmicas no período de 25/07/16 a 30/08/16. Fonte: (ANA, 2019).....	34

Figura 13. Comparação do nível de água (m) entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 1, no período de 31/07/15 12h00 a 06/08/15 08h00.	35
Figura 14. Comparação do nível de água (m) entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 2, no período de 31/07/15 12h00 a 06/08/15 08h00..	36
Figura 15. Comparação de salinidade (ups) entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 1, sendo superfície (A) e fundo (B), no período de 31/07/15 10h00 a 06/08/15 08h00.....	37
Figura 16. Comparação de salinidade (ups) entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 2, sendo superfície (A) e fundo (B), no período de 31/07/15 10h00 a 06/08/15 08h00.....	38
Figura 17. Comparação da velocidade longitudinal na coluna de água (m.s-1) entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 2, no período de 31/07/15 12h00 a 06/08/15 08h00.....	39
Figura 18. Dados de velocidade longitudinal na coluna de água no ponto 2, sendo velocidade observada (A) e modelada (B) no período de 31/07/15 12h00 a 06/08/15 08h00... ..	40
Figura 19. Comparação do nível de água (m) entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 2, no período de 18/08/16 17h00 a 24/08/16 12h00..	41
Figura 20. Comparação do nível de água (m) entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 3, no período de 18/08/16 09h00 a 25/08/16 00h00.	41
Figura 21. Comparação de salinidade entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 1, sendo superfície (A), fundo (B) e diferença entre superfície e fundo (C), no período de 18/08/16 15h00 a 24/08/16 15h00.	42
Figura 22. Perfil de salinidade observado (A) e modelado (B) no ponto 1, período de 18/08/16 15h00 a 24/08/16 15h00.....	44
Figura 23. Comparação de salinidade entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 2, sendo superfície (A), fundo (B) e diferença entre superfície e fundo (C), no período de 18/08/16 18h00 a 24/08/16 12h00.	45
Figura 24. Perfil de salinidade observado (A) e modelado (B) no ponto 2, período de 18/08/16 18h00 a 24/08/16 12h00.....	46
Figura 25. Comparação de salinidade entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 3, sendo superfície (A), fundo (B) e diferença entre superfície e fundo (C), no período de 18/08/16 12h00 a 25/08/16 12h00	47

Figura 26. Perfil de salinidade observado (A) e modelado (B) no ponto 3, período de 18/08/16 12h00 a 25/08/16 12h00.....	48
Figura 27. Comparação do componente longitudinal da velocidade (m.s^{-1}), entre dados observados, em vermelho, e modelados, em azul, no ponto 2, de 18/08/16 17h00 a 25/08/16 15h20. Na área tracejada os dados foram desconsiderados por erro de leitura dos equipamentos de campo.	49
Figura 28. Comparação do componente transversal da velocidade (m.s^{-1}), entre dados observados, em vermelho, e modelados, em azul, no ponto 2, de 18/08/16 20h00 a 25/08/16 13h00. Na área tracejada os dados foram desconsiderados por erro de leitura dos equipamentos de campo.	49
Figura 29. Perfil velocidade horizontal modelado no ponto (2) no período de 18/08/16 17h00 a 24/08/16 10h00. Na área tracejada os dados foram desconsiderados por erro de leitura.	51
Figura 30. Comparação Vazão fluvial obtida através de micro molinete (método direto), em preto e régua linimétrica (método indireto), em vermelho, no período de 17/08/16 a 25/08/16.....	52
Figura 31. Comparação de salinidade entre dados observados, em vermelho, modelados vazão método direto, em azul e modelados vazão método indireto, em preto, no ponto 1, sendo superfície (A), fundo (B) e diferença entre modelados (C), no período de 18/08/16 10h00 a 24/08/16 15h00.....	53
Figura 32. Comparação de salinidade entre dados observados, em vermelho, modelados vazão método direto, em azul e modelados vazão método indireto, em preto, no ponto 2, sendo superfície (A), fundo (B) e diferença entre modelados (C), no período de 18/08/16 10h00 a 24/08/16 15h00.....	54
Figura 33. Comparação de salinidade entre dados observados, em vermelho, modelados vazão método direto, em azul e modelados vazão método indireto, em preto, no ponto 3, sendo superfície (A), fundo (B) e diferença entre modelados (C), no período de 18/08/16 10h00 a 24/08/16 15h00.....	55
Figura 34. Comparação do componente longitudinal da velocidade (m.s^{-1}), entre dados observados, em vermelho, modelados vazão método direto, em azul e modelados vazão método indireto, em preto, no ponto 2, de 18/08/16 17h00 a 25/08/16 15h20. Na área tracejada os dados foram desconsiderados por erro de leitura dos equipamentos de campo.....	56
Figura 35. Comparação do componente transversal da velocidade (m.s^{-1}), entre dados observados, em vermelho, modelados vazão método direto, em azul e modelados vazão método indireto, em preto, no ponto 2, de 18/08/16 17h00 a 25/08/16 15h20. Na área tracejada os dados foram desconsiderados por erro de leitura dos equipamentos de campo.....	56
Figura 36. Perfil longitudinal de salinidade forçado com vazão $0,2 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, para maré de sizígia de 19/08/16 às 06h00.....	58

Figura 37. Perfil longitudinal de salinidade forçado com vazão $2 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, para maré de sizígia de 19/08/16 às 06h00.....59

Figura 38. Perfil longitudinal de salinidade forçado com vazão $4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, para maré de sizígia de 19/08/16 às 06h00.....60

Figura 39. Perfil longitudinal de salinidade forçado com vazão $6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, para maré de sizígia de 19/08/16 às 06:00h.....61

Lista de Tabelas

Tabela 1: Equipamentos utilizados nas coletas.	21
Tabela 2: Constantes harmônicas de maré na estação 40154, Latitude 16 27 2S, Longitude 039 039 W, no período de análise de 30/05/1999 a 30/06/1999, com nível médio 1,08 m. Fonte BNDO (1999).	26
Tabela 3: Parâmetros definidos na calibração 3D, para utilização na validação do modelo.	31

INTRODUÇÃO GERAL

Devido a fatores históricos de ocupação do território brasileiro e seguindo a tendência mundial das populações em ocupar regiões próximas ao litoral, o Brasil possui 26,6% de sua população em municípios da zona costeira (IBGE 2019). A cidade de Porto Seguro, localizada no extremo sul da Bahia, é um dos principais destinos turísticos do país pela beleza cênica de suas praias, que recebe anualmente mais de 1 milhão de turistas na alta temporada (PMPS/SMA, 2015). Atualmente, já se estima que a cidade receba por volta de 1,5 milhão de turistas por ano. O turismo massivo especialmente quando a infraestrutura urbana não é adequadamente projetada para atender a demanda, afeta a estrutura de abastecimento e saneamento local, o que pode significar poluição e contaminação dos ambientes costeiros, como os estuários e as praias.

Um dos principais ecossistemas das zonas costeiras são os estuários. Esses ambientes foram definidos por Cameron; Pritchard, (1963), como uma feição costeira semiaberta com livre conexão com o mar e onde a diluição da água do mar na água fluvial pode ser observada. Já Kjerve (1987) define os estuários levando em consideração, além dos aspectos geológicos, processos como forças dinâmicas, fatores climáticos e sedimentação. Para esse autor estuário é um ambiente costeiro com conexão restrita com o oceano, podendo ser dividido em três zonas: Zona de Maré do Rio (ZR) – zona fluvial com salinidade próxima de zero, mais que ainda sofre influência da maré; Zona de Mistura (ZM) – zona onde ocorre a mistura da água fluvial com a água do mar; Zona Costeira (ZC) – Região costeira adjacente que se estende até a frente da pluma estuarina.

O movimento da água no estuário, ou sua hidrodinâmica, é caracterizado por forças locais e remotas, como as marés, descarga fluvial, temperatura, vento, salinidade, morfologia, entre outros. Miranda *et al.* (2002) destacam que a vazão fluvial e o gradiente longitudinal de salinidade (densidade), gerados pela diluição da água do mar, são fundamentais para a dinâmica dos estuários.

Esses podem ser classificados, dentre outros critérios, de acordo com sua estratificação de salinidade. Essa distribuição permite estabelecer qualitativamente as principais características na zona de mistura. Estuários podem ser classificados em três tipos: cunha salina (dominado pela descarga fluvial), parcialmente estratificados ou parcialmente misturados (dominado pelos efeitos combinados da descarga fluvial e maré) e verticalmente homogêneo ou bem misturados (dominado pela maré; MIRANDA *et al.*, 2002).

Estudar a dinâmica desses ambientes através de pesquisas de campo torna-se oneroso e muitas vezes de difícil logística por serem ambientes complexos, altas variabilidades espaço temporais e de grandes dimensões, a exemplo do ocorrido no rompimento da barragem de Fundão no município de Mariana (Minas Gerais). Mesmo distante da zona costeira, esse desastre atingiu área consideráveis do oceano. Dias *et al.* (2018) destacaram que o rompimento comprometeu 632 km do rio Doce, bem como o seu estuário e região costeira no estado do Espírito Santo, deixando diversas localidades que não possuíam fontes alternativas de captação de água sem abastecimento. Marques *et al.* (2016) relataram que 16 dias após o rompimento, a lama tóxica atingiu o oceano e foi impulsionada através do regime de correntes, ventos e chuva para uma área de aproximadamente 7.000 km² pelo litoral do estado do Espírito Santo.

Pela complexidade desses ambientes, são utilizadas diferentes metodologias, como trabalhos experimentais, modelos físicos em escala reduzida e simulações

teóricas com modelos analíticos e numéricos, que possibilitam observar e prever mudanças relacionadas a circulação estuarina como diminuição da vazão fluvial, intrusão salina, níveis de maré, inundações, transporte de substâncias e sedimentos (MIRANDA *et al.*, 2002). No caso de modelos numéricos tridimensionais, são aplicadas equações hidrodinâmicas, de modo a reproduzir e prever a circulação marítima e a distribuição de propriedades. Os resultados obtidos são comparados com dados medidos em campo para calibração e validação do modelo. Uma vez validado o modelo, esse torna-se uma ferramenta de análise na qual diferentes cenários podem ser simulados em conjunto com suas variáveis (HARARI, 2015).

Sobre as zonas costeiras do Brasil existem trabalhos com foco principal na análise da hidrodinâmica associada ao transporte de sedimentos, qualidade da água e renovação das águas. Couceiro (2015) analisou o transporte de sedimentos em suspensão, exportação e deposição no estuário do rio Araranguá-SC. Batista (2017) utilizou o Delft3D na análise da qualidade da água e dispersão de poluentes na região costeira em Ubatuba-SP. Siegle *et al.* (2017) analisaram como a hidrodinâmica auxilia a compreender os processos de engenharia relacionados ao porto em São Sebastião-SP e suas implicações no gerenciamento das áreas costeiras da região. Roversi *et al.* (2016) utilizaram outro modelo numérico, o SisBahia para análise da renovação das águas do sistema estuarino em Santos SP. Seiler *et al.* (2015) utilizaram o modelo Mohid para estudo da qualidade da água na Lagoa do Patos (RS).

No sul da Bahia, no sistema estuarino dos rios Caravelas e Curuípe, Santos (2010) aplicou o modelo numérico Mohid para estudo dos padrões de hidrodinâmica e dispersão de sedimentos. Andutta (2011) utilizou o modelo Delft3D para estudos da distribuição e variabilidade de propriedades termohalinas, e da circulação tridimensional. Andutta *et al.* (2016) aplicaram os módulos Delft3d-Flow e Delft3d-Waq para estudos de tempo de residência e processos difusivos e advectivos.

Com foco na análise da hidrodinâmica e transporte de sedimentos através de monitoramento pontual outros estudos foram realizados com maior concentração no sistema estuarino tropical dos rios Caravelas e Peruípe, localizado a 120 km ao sul de Porto Seguro (PEREIRA *et al.*, 2010; ANDUTTA *et al.*, 2013; AUGUSTO *et al.*, 2013). Com base nesses estudos concluiu-se que os processos físicos de descarga fluvial e maré são as principais forçantes do sistema, sendo responsáveis pelos processos de estratificação, circulação e mistura. Já no estuário do rio Buranhém, Silva *et al.* (2018) analisaram os mecanismos dinâmicos do aporte salino e os padrões hidrodinâmicos de estratificação, concluindo que sua hidrodinâmica é influenciada principalmente pela maré e variação da descarga fluvial, classificando o estuário como bem misturado.

O presente trabalho tem por objetivo geral o estudo da intrusão salina no estuário do rio Buranhém em cenários de vazões mínimas registrados em séries históricas. Para isso, foi realizada a implementação de um modelo numérico hidrodinâmico, como subsídio ao planejamento do saneamento local e para contribuir com estudos relacionados ao transporte de sedimentos e qualidade da água.

REFERÊNCIAS

- Andutta, F. P. (2011) O Sistema Estuarino dos rios Caravelas e Peruípe (Bahia): Observações , simulações , tempo de residência e processos difusivo e advectivo. Tese de Doutorado, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.
- Andutta, F. P. *et al.* (2013) Temporal variations of temperature, salinity and circulation in the Peruípe river estuary (nova Viçosa, BA). **Continental Shelf Research**, v. 70, p. 36–45. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2013.03.013>>.
- Andutta, F. P. *et al.* (2016) An assessment of transport timescales and return coefficient in adjacent tropical estuaries. **Continental Shelf Research**, v. 124, p. 49–62. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2016.05.006>>.
- Augusto, C. *et al.* (2013) Residual fluxes of suspended sediment in a tidally dominated tropical estuary. **Continental Shelf Research**, v. 70, p. 27–35. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2013.03.006>>.
- Batista, S. S.; Harari, J. (2017) Modelagem da dispersão de coliformes termotolerantes e enterococos em duas enseadas na região costeira de Ubatuba (SP), Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 403–413. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016158594>>.
- Cameron, W.M.; Pritchard, D. W. (1963) The sea: ideas and observations on progress in the study of the seas. **Interscience**, p. p. 306–324.
- Couceiro, M. A. A.; (2015) Dinâmica de sedimentos coesivos em um estuário altamente estratificado: rio Araranguá , SC. Tese de Doutorado, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.
- Dias, C. A. *et al.* (2018) Impactos do rompimento da barragem de Mariana na qualidade da água do rio Doce. **Revista Espinhaço**, v. 7, n. 1, p. 21–35.
- Harari, J. (2015) **Fundamentos de Modelagem Numérica em Oceanografia**, Editora Sea & Limno Technology, São Paulo, 246 p.
- IBGE. (2019) **Cidades IBGE**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ba/porto-seguro/panorama>>. Acesso em: 20 abril.
- Kjferve, B. (1987) Estuarine Geomorphology and Physical Oceanography. **Estuarine Ecology**, p. 47–78.
- Marques, A.C.; Miranda, L. S. (2016) Hidden impacts of the Samarco mining waste dam collapse to Brazilian marine fauna – an example from the staurozoans (Cnidaria). **Biota Neotropica**. 16(2): e20160169. <<http://dx.doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2016-0169>>.

Miranda, L. B.; Castro, B. M.; Kjferve, B. (2002) **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 413 p.

Pereira, M. D. *et al.* (2010) Hidrodinâmica e Transporte de Material Particulado em Suspensão Sazonal em um Estuário Dominado por Maré: Estuário de Caravelas (Ba). **Revista Brasileira de Geofísica**, v.28, n.3, p.427-444.

PMPS/SMA (2015) Prefeitura Municipal de Porto Seguro/ Secretaria Municipal de Meio Ambiente. Plano de Manejo Parque Natural Municipal do Recife de Fora. p. 214.

Roversi, F.; Rosman, P. C. C.; Harari, J. (2016) Análise da renovação das águas do Sistema Estuarino de Santos usando modelagem computacional. **Revista Ambiente e Água**, v. 9, n. 3, p. 445–458. <<http://dx.doi.org/10.4136/1980-993X>>.

Siegle, E.; Dottori, M.; Villamarin, B. C. (2017) Hydrodynamics of a subtropical tidal flat: Araçá Bay, Brazil. **Ocean & Coastal Management**, n. October, p. 0–1. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.11.003>>.

Silva, A. C. R. de S. *et al.* (2018) Hydrodynamics of a tropical estuary: Buranhém River, Porto Seguro, Brazil. **RBRH**, v. 23, n. 0.<<http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.0318170141>>.

Este artigo está formatado segundo as normas da revista Revista Brasileira de Ciências Ambientais.

Disponível no site: <http://abes-dn.org.br/>

ARTIGO 1 – INTRUSÃO SALINA NO ESTUÁRIO DO RIO BURANHÉM (SUL DA BAHIA) ATRAVÉS DE MODELAGEM NUMÉRICA

RESUMO

O município de Porto Seguro, Bahia, é um conhecido destino turístico no Brasil. Contudo, sua infraestrutura urbana fica sobrecarregada, especialmente durante o verão (dezembro a março). A população flutuante anual é aproximadamente 10 vezes maior do que sua população fixa. A combinação entre o crescimento das populações fixa e flutuante, no médio e longo prazo, pressionarão ainda mais o saneamento básico do município, tornando-se indispensáveis estudos que possam prever os possíveis impactos ambientais para auxílio no planejamento urbano. Até 2025, de acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA), estima-se que o rio Buranhém também passe a ser utilizado como manancial de abastecimento para a cidade. Dados hidrológicos mais recentes indicam tendência à diminuição da vazão fluvial, principalmente pela degradação da cobertura florestal na respectiva bacia hidrográfica e influência de fenômenos climáticos como o El-Niño Southern Oscillation (ENSO). A vazão fluvial sofre grande variação anual, sendo a vazão média anual histórica de $22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. A região é submetida a um regime de micromaré a mesomaré astronômica com variações acima de 2 m, com velocidades médias próximas a $0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ na enchente e $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ na vazante. O presente trabalho tem por objetivo geral o estudo da intrusão salina no estuário do rio Buranhém em cenários de vazões mínimas registrados em séries históricas. Para isso, foi realizada a implementação do modelo numérico hidrodinâmico Delft3D, como subsídio ao planejamento do saneamento local e para contribuir com estudos relacionados ao transporte de sedimentos e qualidade da água. Foram simulados cenários sob diferentes condições de maré e vazões fluviais. O modelo foi calibrado e validado através de dados de campo de velocidade de correntes e de variação do nível de água e salinidade de superfície e fundo, observados com CTD's em três pontos fixos e ADCP em um ponto fixo fundeados no estuário. Os dados de campo e os resultados modelados foram comparados quantitativamente através do parâmetro Skill. Para efeito de análise da intrusão salina, além das marés típicas da região, o modelo foi forçado com vazões mínimas registradas em séries históricas (2, 4, 6 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e em uma condição de vazão mínima extrema de $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Os dados observados de salinidade indicam um ambiente com tendência à estratificação vertical na maré de quadratura em comparação com a maré de sizígia, condição esta de estuário bem misturado. Já os resultados modelados só reproduziram características de um ambiente bem misturado tanto na maré de quadratura como na sizígia. Foram obtidos valores médios de Skill superiores a 0,97 para o nível de água, sob marés de quadratura e sizígia com variações de 1 m a 2,15 m, respectivamente. Os resultados de salinidade de superfície e de fundo foram de valores médios Skill superiores a 0,90, enquanto os de velocidades horizontais apresentaram valores médios Skill superiores a 0,77. Os dados de campo apresentaram uma intrusão salina de 5,1 km, sob maré de quadratura de 04/08/2016 às 12h00 e 9,4 km, sob maré de sizígia de 31/07/2016 às 18h00. Já o modelo para o mesmo período representou sob maré de quadratura uma intrusão salina de 4,1 km e sizígia de 6 km aproximadamente. Na simulação de condição de vazão mínima extrema ($0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e maré de sizígia o modelo representou uma intrusão de aproximadamente 17 km a montante da foz do estuário. Nas simulações com vazões

mínimas de (2, 4, 6 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) a intrusão foi diminuindo gradativamente com resultados de 13, 11 e 9,5 km, respectivamente. Confirmando-se o cenário de uso do rio Buranhém como manancial para abastecimento de água em Porto Seguro, estudos como este poderão servir como referência para se determinar uma região de captação de água doce mais segura.

Palavras-chave: interação continente-oceano, bacias hidrográficas, Costa do Descobrimento, Delft3D, zonas costeiras.

ABSTRACT

The city of Porto Seguro, Bahia, is a well-known tourist destination in Brazil. However, its urban infrastructure is overloaded, especially during the summer. The annual fluctuating population is approximately 10 times larger than its fixed population. A combination of growth of fixed and fluctuating variations, without medium and long term, further pressing the sanitation of the municipality, making them indispensable studies that can show the possible environmental impacts to aid in urban planning. By 2025, according to the National Water Agency, it is estimated that the Buranhém River will also be used as a water supply source for the city. More recent hydrological data indicate a tendency to decrease river flow, mainly due to the degradation of forest cover in the respective watershed and influence of phenomena such as El-Niño Southern Oscillation (ENSO). Fluvial flow suffers great annual variation, being the historical annual average flow of $22 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. The region is subjected to an astronomical mesomare regime with variations over 2 m, with average velocities close to 0.4 m.s^{-1} in the flood and 1 m.s^{-1} in the ebb. The present work has as its general objective the study of saline intrusion in the Buranhém river estuary in minimum flow scenarios recorded in historical series. To this end, the Delft3D hydrodynamic numerical model was implemented to support local sanitation planning and to contribute to studies related to sediment transport and water quality. Scenarios were simulated under different tidal conditions and river flows. The model was calibrated and validated by field data of current velocity and surface and bottom water level variation and salinity, observed with CTD's at three fixed points and ADCP at a fixed point anchored in the estuary. Field data and modeled results were compared quantitatively using the Skill parameter. For saline intrusion analysis purposes, in addition to the typical tides of the region, the model was forced with minimum flows recorded in historical series (2, 4, 6 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) and in an extreme minimum flow condition of $0.2 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. result, average Skill values higher than 0.97 were obtained for the water level, under neap tides and spring tides with variations of 1 m to 2.15 m respectively. Surface and bottom salinity results were mean Skill values greater than 0.90, while horizontal speeds showed average Skill values greater than 0.77. The field data showed a saline intrusion of 9.4 km under a river discharge regime of $12 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Already the model represented a saline intrusion in the condition of extreme minimum flow and spring tide of approximately 17 km upstream of the estuary mouth. In simulations with minimum flow rates of (2, 4, 6 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) the intrusion was gradually decreasing with results of 13, 11 and 9.5 km, respectively. Confirming the scenario of using the Buranhém river as a source for water supply in Porto Seguro, studies such as this may serve as a reference to determine a safer freshwater catchment region.

Keywords: continent-ocean interaction, watersheds, Discovery Coast, Delft3D, coastal zones.

1. INTRODUÇÃO

Os estuários são uns dos principais ecossistemas costeiros, responsáveis pela drenagem das águas fluviais para o oceano adjacente (DYER, 1997; MIRANDA *et al.*, 2002). A relação da vazão fluvial com a variação de maré no estuário é determinante para a distribuição de salinidade. O aumento da descarga fluvial pode alterar as características de um estuário de bem misturado a parcialmente misturado ou estratificado. Essa variação muitas vezes é sazonal ou causada por alta precipitação em curto período de tempo na bacia de drenagem do estuário (JI, 2017).

No extremo sul da Bahia, essa relação foi estudada no sistema estuarino tropical dos rios Caravelas e Peruípe, localizado a 120 km ao sul de Porto Seguro (PEREIRA *et al.*, 2010; ANDUTTA *et al.*, 2013; AUGUSTO *et al.*, 2013). Nesses estudos concluiu-se que os processos físicos de descarga fluvial e maré são as principais forçantes do sistema, responsáveis pelos processos de estratificação, circulação e mistura.

A variação da disponibilidade hídrica influencia diretamente a intrusão salina em estuários tropicais (SCHETTINI *et al.*, 2017; VALLE-LEVINSON *et al.*, 2016). Com a utilização de modelos numéricos tridimensionais pode-se simular esses diferentes cenários de vazão fluvial representando períodos úmidos e secos, podendo assim prever possíveis efeitos em casos extremos (GUERRA-CHANIS *et al.*, 2019; AKTER *et al.*, 2019).

O presente trabalho tem por objetivo geral o estudo da intrusão salina no estuário do rio Buranhém em cenários de vazões mínimas registrados em séries históricas. Para isso, foi realizada a implementação de um modelo numérico hidrodinâmico, como subsídio ao planejamento do saneamento local e para contribuir com estudos relacionados ao transporte de sedimentos e qualidade da água.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

O estuário do rio Buranhém está localizado no município de Porto Seguro na região do Extremo Sul do Estado da Bahia, denominada como Costa do Descobrimento, com coordenadas 16°26'59"S 39°03'53"W. (NETO, 2012). Seus limites geográficos são a Leste, o Oceano Atlântico; ao Norte, o município de Santa Cruz de Cabrália; ao Sul, o município de Prado; ao Oeste, os municípios de Itabela, Itamaraju e Eunápolis. Sua população fixa é estimada em 146.625 habitantes. Silva *et al.* (2018) estimaram uma população flutuante de aproximadamente 7 vezes a população fixa, proporção que vem aumentando significativamente ano a ano. A densidade demográfica é de 52,7 hab/km² com área territorial de 2.287,085 km² (IBGE, 2019).

A Bacia Hidrográfica do Rio Buranhém (BHRB) possui suas principais nascentes no município de Santo Antônio do Jacinto, na Serra dos Aimorés, Minas Gerais, com área total de 2.504,83 km². Também conhecido como Rio do Peixe, percorre cerca de 30,5 km no território mineiro e 215,5 km na Bahia. O estuário do

rio Buranhém possui algumas características que influenciam na sua hidrodinâmica, como um *beachrock* em sua desembocadura, que direciona a entrada e saída de água paralelamente ao oceano, bancos de areia e áreas de manguezais (Figura 1).

A vazão fluvial pode ser modificada principalmente por fatores antrópicos como a degradação florestal da bacia de drenagem do rio. Azevedo *et al.* (2016) destacaram a grande degradação florestal da BHRB, pois resta aproximadamente apenas 18,5% da cobertura florestal natural. Essa situação influencia a qualidade da água e disponibilidade hídrica. Genz *et al.* (2003) analisaram as tendências de longo prazo para vazão dos rios do extremo sul da Bahia, destacando uma tendência de diminuição do valor médio da vazão fluvial no período de 1940 a 1999. Silva (2019) analisou o comportamento hidrológico e disponibilidade hídrica do rio Buranhém no período de 1971 a 2017, destacando a grande variabilidade da vazão no rio, influenciada principalmente pela precipitação e por fenômenos como o El-Niño Southern Oscillation (ENSO). Observou-se variação de até 43% de um ano a outro, com uma média histórica de $22,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, com destaque para o período de 2015/2016, com a menor vazão média anual de $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Silva *et al.* (2018) analisaram os mecanismos dinâmicos do aporte salino e os padrões hidrodinâmicos de estratificação, concluindo que sua hidrodinâmica é influenciada principalmente pela maré e variação da descarga fluvial. A região é submetida a um regime de micromaré a mesomaré astronômica, com variações do nível de água acima de 2 m sob marés de sizígia, com velocidades médias de maré de enchente de aproximadamente $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ e de maré de vazante $1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, com temperaturas médias de superfície e fundo de $25,4 \text{ }^\circ\text{C}$ classificou o estuário como bem misturado principalmente na maré de sizígia, com número de Richardson por camadas inferior a 2.

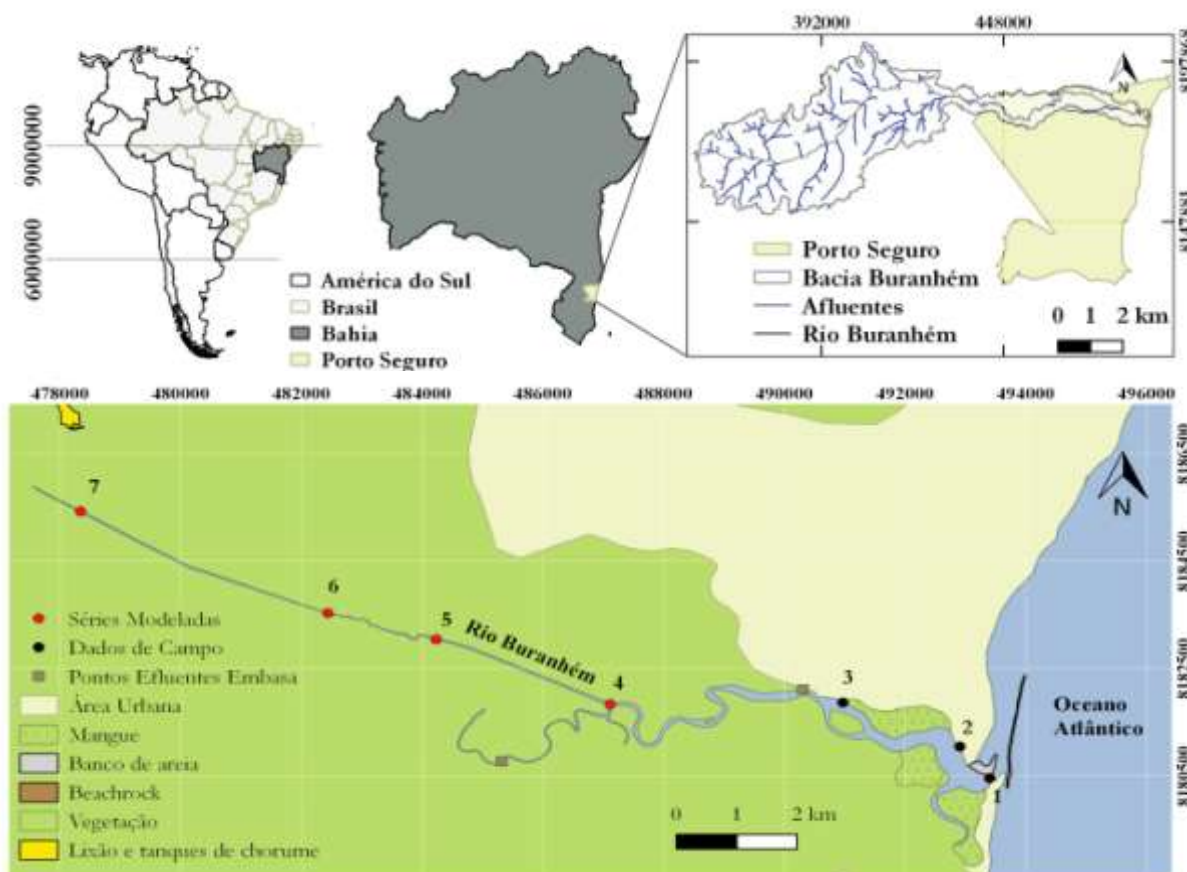


Figura 1: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Buranhém. Em destaque, estuário do Rio Buranhém, séries modeladas, pontos de observação de dados, locais de lançamento do efluente sanitário referente a outorga da EMBASA, localização do lixão e tanques de chorume. Na boca do estuário destaca-se o banco de areia e o *beachrock*, coordenadas em UTM.

Os dados de campo utilizados neste estudo fazem parte do projeto “Diagnóstico e monitoramento ambiental do estuário do Rio Buranhém, Porto Seguro, Bahia”, em duas campanhas: de 31 de julho (maré de sizígia) a 07 de agosto de 2015 (maré de quadratura) e de 18 de agosto de 2016 (maré de sizígia) a 25 de agosto de 2016 (maré de quadratura). Esses dados foram utilizados no processo de calibração e validação do modelo respectivamente, em três pontos (1) Lat.: 16° 27' 26,9" S Long.: 39° 3' 42,7" O, (2) Lat.: 16° 27' 7,8" S Long.: 39° 3' 59,3" e (3) Lat.: 16° 26' 41,1" S Long.: 39° 5' 4,7" O (Figura 1). Na Tabela 1 são apresentados os equipamentos utilizados nas campanhas, os dados observados, o período e a taxa amostral.

Tabela 1: Equipamentos utilizados nas coletas

Ponto de Coleta	Período Considerado	Dado Coletado	Equipamento Utilizado	Frequência Amostral
1	18/08 a 25/08/16	Salinidade Superfície	CT 267 - Modelo: ACTW - USB - Z - Marca: JFE Advantech	30 min
2	31/07 a 07/08/15			
3	31/07 a 07/08/15 18/08 a 25/08/16	Salinidade Superfície	DST CT – Marca Star Oddi - número de série S7508	10 min
1	31/07 a 07/08/15	Salinidade Superfície	CT 269 - Modelo ACTW - USB - Z - Marca: JFE Advantech	30 min
	18/08 a 25/08/16	Salinidade Fundo		
2	31/07 a 07/08/15	Salinidade Fundo	CTD 270 - Modelo ACTW - USB - Z - Marca: JFE Advantech	30 min
	18/08 a 25/08/16	Salinidade Superfície		
3	31/07 a 07/08/15 18/08 a 25/08/16	Salinidade Fundo	DST CTD – Marca Star Oddi - número de série S7645	10 min
1	31/07 a 07/08/15	Salinidade Fundo	CTD 268 - Modelo ACTW - USB - Z - Marca: JFE Advantech	30 min
2	18/08 a 25/08/16	Salinidade Superfície		
3	31/07 a 07/08/15 18/08 a 25/08/16	Altura coluna d'água	DST CTD – Marca Star Oddi - número de série S7645	10 min
2	31/07 a 07/08/15	Altura coluna d'água	ADP - Marca: Nortek Aquadopp Profiler e frequência: 1 MHz	30 min
2	31/07 a 07/08/15	Velocidade	ADP - Marca: Nortek Aquadopp Profiler e frequência: 1 MHz	30 min
2	18/08 a 25/08/16	Altura coluna d'água	ADP - Marca: Nortek Aquadopp Profiler e	30 min

			frequência: 2 MHz	
2	18/08 a 25/08/16	Velocidade	ADP - Marca: Nortek Aquadopp Profiler e frequência: 2 MHz	30 min

Em ambos os períodos de coletas em campo, os mesmos equipamentos foram utilizados. Porém os CTD's utilizados nos pontos 1 e 2 foram instalados em locais e profundidades diferentes. Somente no ponto 2 foi fundeado o ADCP, possibilitando a coleta de dados de correntes.

2.2 Modelo Delft3D

O Delft3d é o modelo numérico utilizado neste estudo desenvolvido pela DELTARES. Essa empresa, localizada em Delft, Holanda, possui plataforma *open source* sendo um software multidisciplinar integrado, com 07 módulos que podem ser executados em conjunto ou isoladamente, permitindo a realização de simulações de fluxo, transporte de sedimentos, ondas, qualidade da água, processos morfológicos e ecológicos (DELTARES, 2014). O Delft3d-FLOW é o módulo hidrodinâmico utilizado em conjunto com os aplicativos RGFRID e QUICKIN para construção da grade computacional e batimetria respectivamente.

O Delft3d-FLOW resolve as equações de Navier Stokes para um fluido incompressível, onde a aceleração local e advectiva é adicionada ao efeito de Coriolis, e águas rasas, multidimensional (2D e 3D), através das resultantes de forçantes meteorológicas em uma grade ajustada podendo ser retilínea ou curvilínea. (DELTARES, 2014).

2.3 Grade Delft3D-Flow

Através do módulo Delft3d-RGFRID foi construída uma grade curvilínea ortogonal, possibilitando a construção de células com resolução variável, de acordo com as áreas de maior e menor interesse para o estudo. Tal procedimento reduziu o número de células e consequentemente o tempo computacional, bem como permitiu melhor representar as curvas e contornos tanto do rio como do estuário. A grade cobre uma extensão de ~20.5 km que inclui parte do rio até a foz do estuário e ~370 km² do oceano adjacente. Sua dimensão é de 8999 células divididas em 676 células na direção M (longitudinais) e 200 células na direção N (transversais). O tamanho das células varia na região do rio e estuário de 30 a 300m e na região costeira de 80 a 1300m (Figura 2). A menor resolução está localizada no oceano adjacente, e uma maior resolução foi aplicada tanto no estuário como no rio. No sentido vertical a grade possui 10 camadas com coordenadas sigma, que tornam a dimensão vertical independente da profundidade.

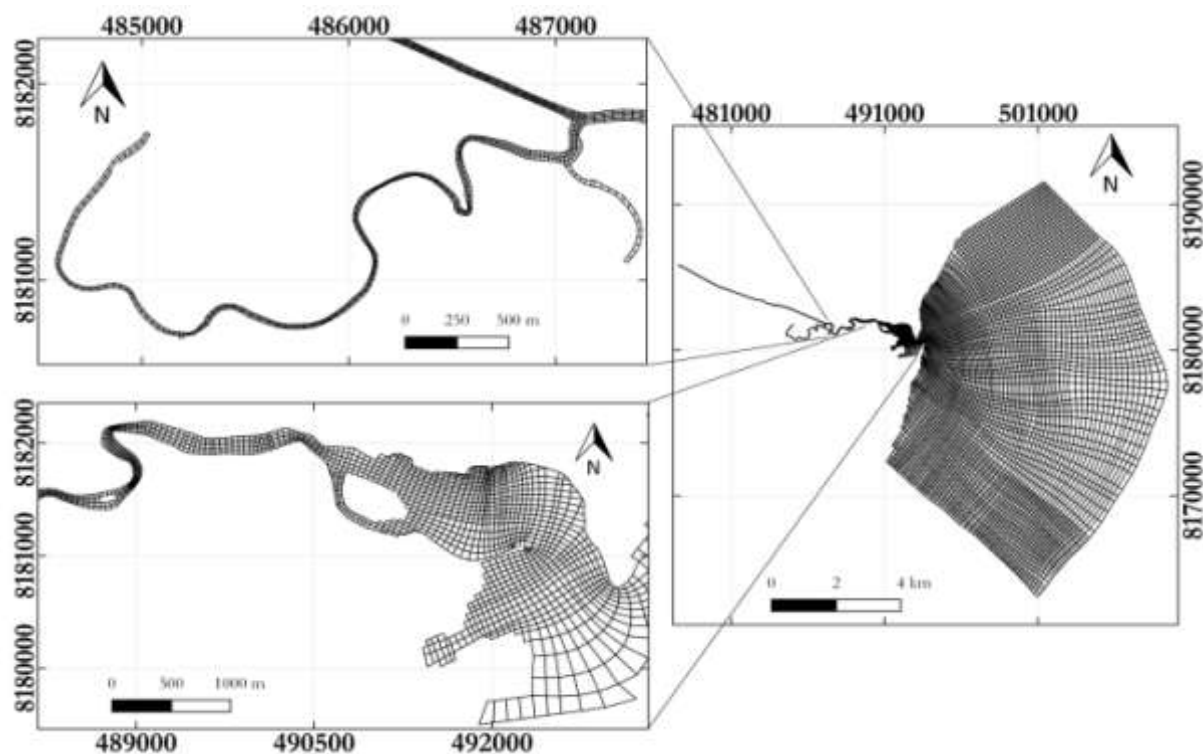


Figura 2. Grade numérica com recortes aplicados na região do estuário e do rio. Células com dimensões que variam de 30 a 300m na região do estuário e de 80 a 1300m na região costeira.

2.4 Batimetria

No módulo Delft3d-QUICKIN, a batimetria do modelo foi construída a partir de diferentes fontes. Já os dados de profundidade da região do oceano adjacente foram obtidos a partir da digitalização da carta Náutica Nº 1205, disponibilizada pelo Centro de Hidrografia da Marinha. Na campanha realizada no período de 19/08/2016 a 22/08/2016, foram observados dados de batimetria da foz do estuário até a região a montante do ponto de coleta 3. Desse ponto ao limite (ponto D na figura 4) no rio Buranhém por falta de dados observados foi considerada uma profundidade uniforme de 1 m. Esses dados foram interpolados de maneira triangular no módulo QUICKIN, o que resultou em um modelo digital (Figura 3, A e B). Esse método é indicado quando se possui uma baixa densidade de pontos em relação à resolução da grade do modelo (DELTARES, 2014). As profundidades nos pontos de coleta 1, 2 e 3 foram 3,8; 2,1; 2,7 m respectivamente, com profundidade máxima no estuário de ~5 m e no oceano adjacente de ~23 m.

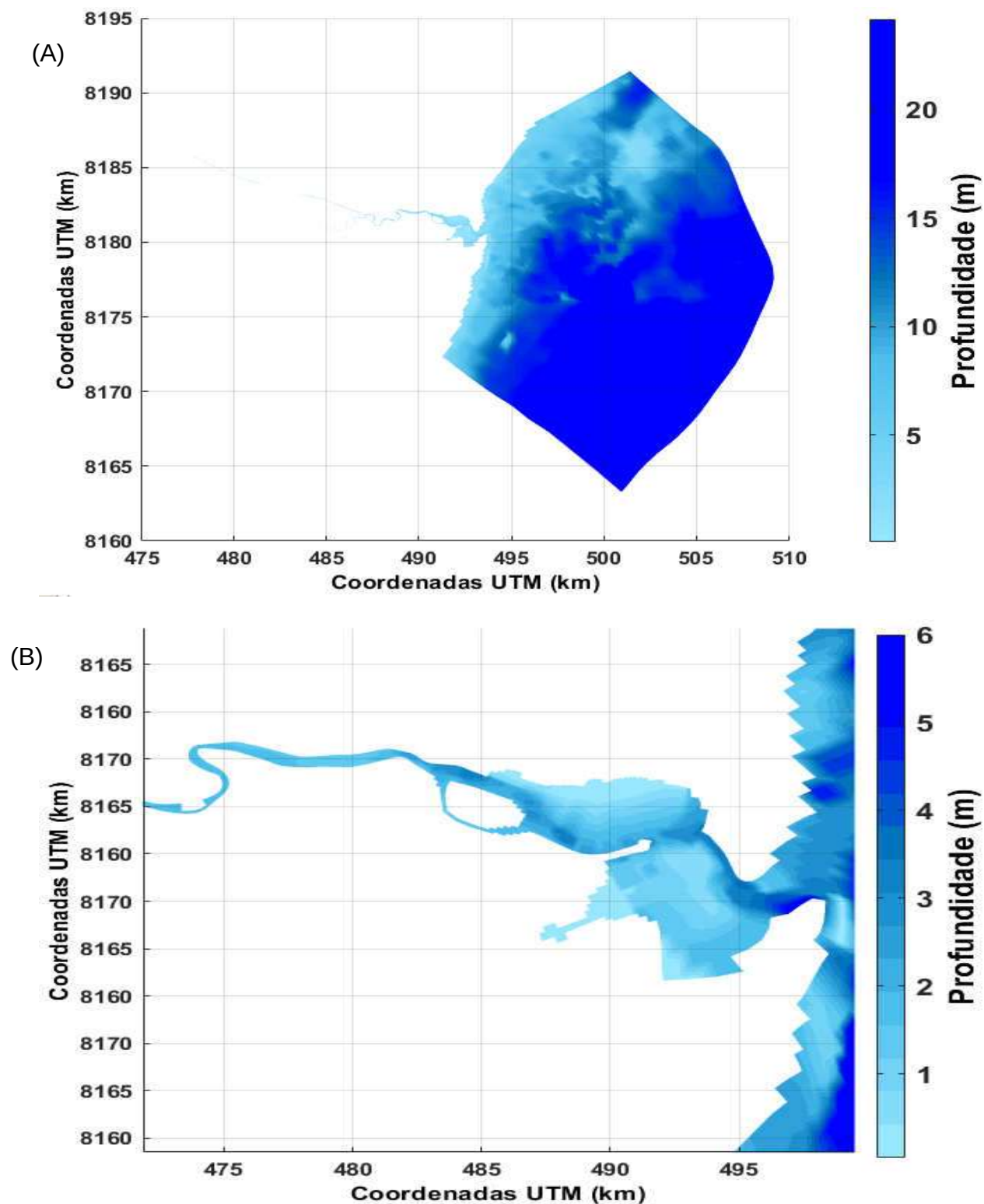


Figura 3. Batimetria aplicada ao modelo. Em A oceano adjacente com profundidades máximas de ~23 m e B região estuarina com característica de águas rasas com profundidade não superior a 5 m.

2.5 Testes de Sensitividade

Na aplicação do modelo hidrodinâmico no estuário do rio Buranhém, são necessários alguns testes de sensibilidade para definição das condições de contorno do domínio (limites abertos), das configurações iniciais e do passo de tempo. São analisados o tempo computacional e variação do nível de água em um ponto de observação na região do oceano adjacente. Rahman (2017) determina que este procedimento é adotado como primeiro passo para ajustar as condições de contorno do modelo (limites abertos). Dongeren (2009) destaca que definir as condições de contorno no modelo pode ser desafiador por gerar instabilidade nas simulações na forma de jatos de água de alta velocidade que entram no domínio do modelo.

Os parâmetros físicos constantes foram configurados com valores de aceleração da gravidade $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ e massa específica da água do mar 1024 kg.m^{-3} . As condições iniciais foram configuradas como uniformes com valores de nível de água 0 m, salinidade 31 e temperatura 23°C . O domínio do modelo possui quatro limites abertos sendo três A, B e C na região do oceano adjacente e um D que representa a vazão fluvial do rio Buranhém (Figura 4).

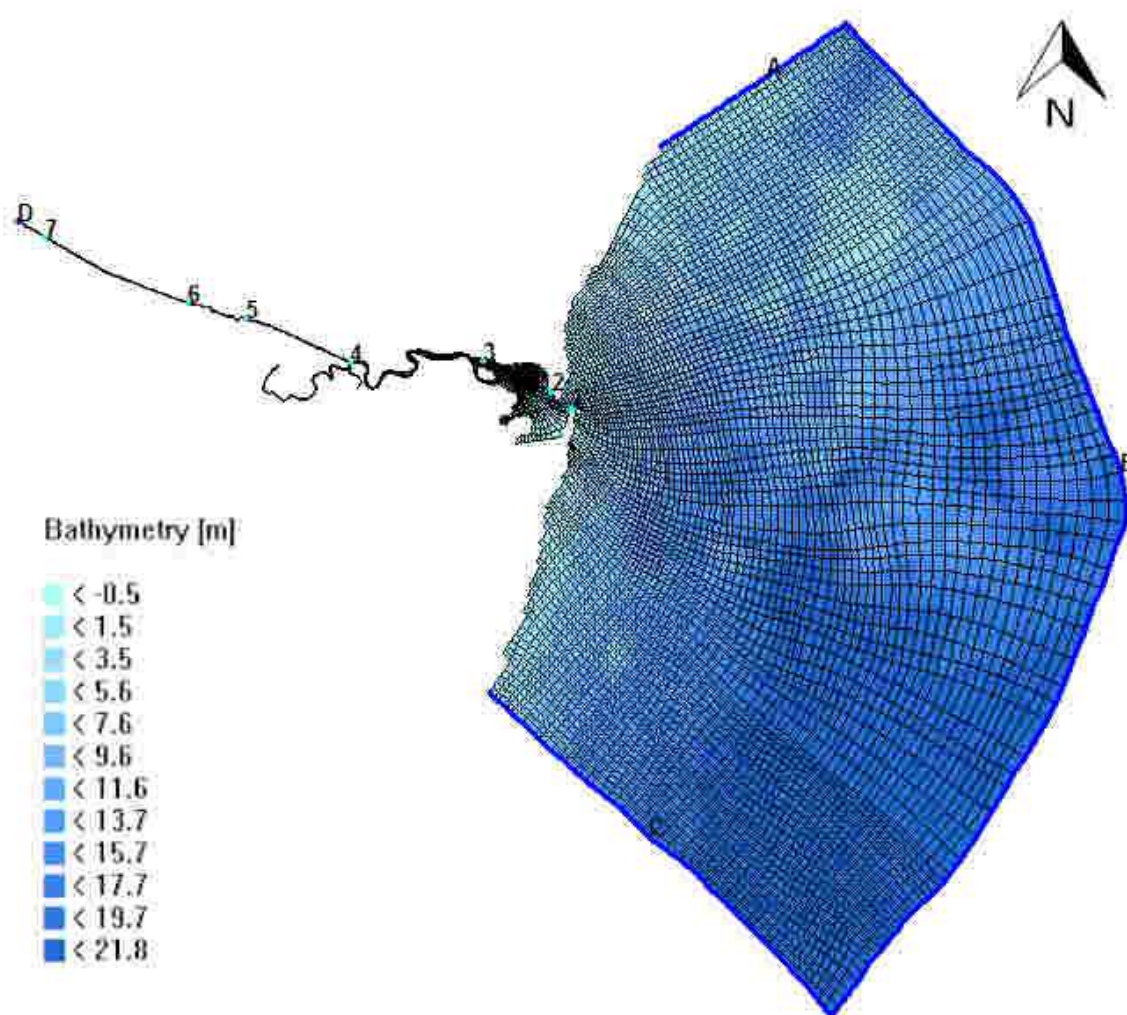


Figura 4. Os limites abertos A,B e C no oceano adjacente forçados por maré e limite aberto D forçado por vazões ajustadas (profundidade em metros).

Foram realizadas simulações variando as condições de fluxo dos limites abertos (A, B e C) forçados por maré astronômica configurada com oito constantes harmônicas de maré e salinidade de 37 (Tabela 2).

Tabela 2: Constantes harmônicas de maré na estação 40154, Latitude 16 27 2S, Longitude 039 039 W, no período de análise de 30/05/1999 a 30/06/1999, com nível médio 1,08 m. Fonte BNDO (1999)

Nome	Velocidade de fase (graus/hora)	Amplitude (m)	Fase (graus)
O ₁	13,94	0,05	114,62
P ₁	14,95	0,01	182,55
K ₁	15,04	0,04	188,06
N ₂	28,43	0,10	113,65
M ₂	28,98	0,65	112,00
L ₂	29,52	0,02	84,77
S ₂	30	0,25	128,60
K ₂	30,08	0,06	129,94

A vazão do rio Buranhém no limite aberto D foi obtida através de dados fornecidos pela Agência Nacional de Águas ANA (2019). A estação fluviométrica Fazenda Limoeiro (55170000) está localizada no rio Buranhém nas coordenadas 16° 25'30" S e 39° 21'12". Encontra-se disponível uma série histórica de 1972 a 2015, com dados consistidos. Observa-se uma tendência de diminuição na média anual conforme linha de tendência (Figura 5). Silva (2019) analisou a vazão média anual, de 1971 a 2017, e concluiu que no ano 2015/2016 foi registrada a menor vazão mínima de $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e uma vazão média anual de $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

No ano de 2015, a região sofreu severo período de seca influenciado pelo fenômeno El Niño, que foi classificado como muito forte de acordo com o índice ONI-Índice Oceânico de El Niño (NOAA, 2019). A média mensal da vazão no ano de 2015 (Figura 6) foi registrada com valor de $11,98 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, que foi ajustado no modelo para $12 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, e considerado o valor de salinidade 0 ups.

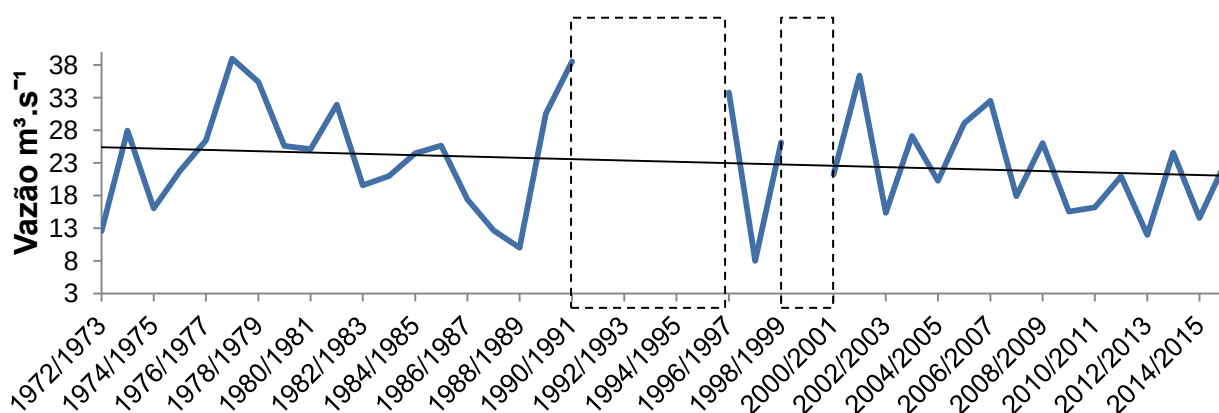


Figura 5. Série histórica da vazão do Rio Buranhém registrada na estação fluviométrica Fazenda Limoeiro (55170000). Os períodos entre as áreas tracejadas de 1991 a 1997 e de 1999 a 2001 foram descartados. A linha em preto indica tendência de acordo com média anual de vazão. Fonte: SILVA, 2019.

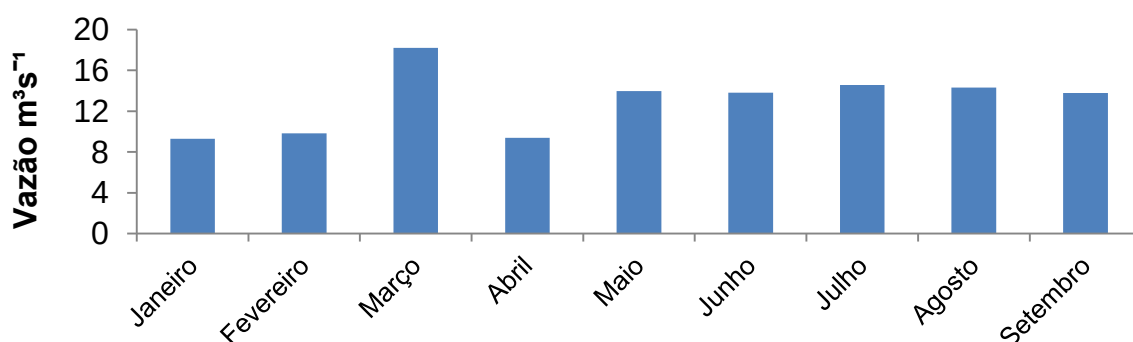


Figura 6. Vazão média mensal do ano de 2015 do Rio Buranhém registrada na estação fluviométrica Fazenda Limoeiro (55170000). Os meses de outubro a dezembro foram descartados pois os dados não foram consistidos pela ANA. Fonte: ANA, 2019.

As simulações foram realizadas com período de aproximadamente 30 dias e passo de tempo de 12 s. Após a realização de simulações com os limites abertos fornecidos pelo modelo, foi definido como condição de fluxo o tipo “*Water Level*” por manter o modelo estável e representar de forma adequada os níveis de água no oceano adjacente (Figura 7), que estima-se variar de 1m a 2,15 m em marés de quadratura e sizígia, respectivamente.

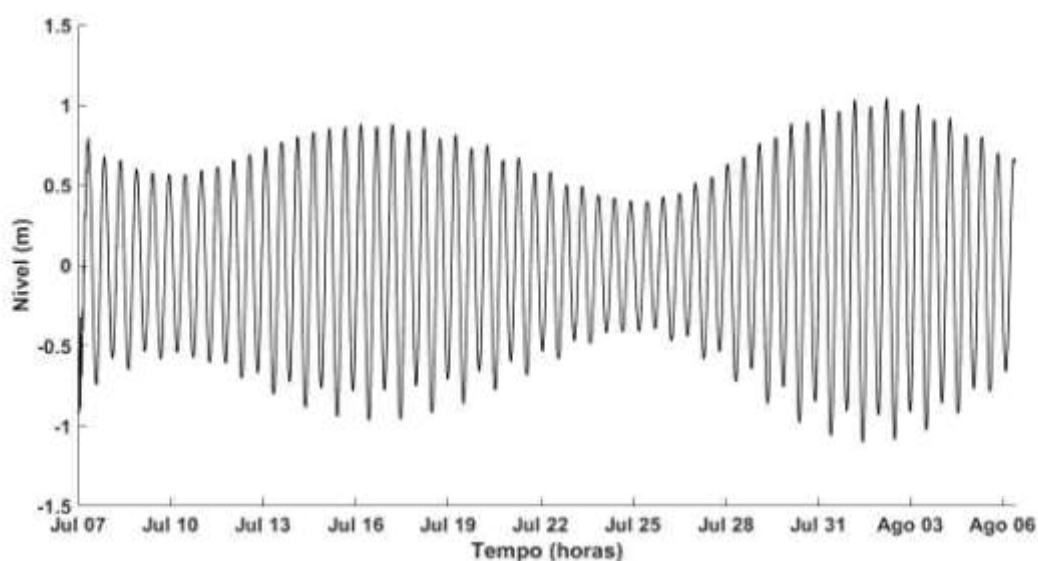


Figura 7. Variação do nível de água (m) modelado em ponto localizado na área do oceano adjacente, no período de 07/07 a 06/08/15.

As interações entre a superfície da água e o ar relacionadas à tensão de cisalhamento não foram consideradas no modelo, por se entender que os ventos na região do estuário são atenuados tanto pela proteção vegetal local como pela direção predominante dos ventos na região (SILVA, 2016). Ao se analisar a série histórica dos ventos na região do aeroporto de Porto Seguro, predominaram velocidades entre 2 e 6 m s^{-1} na direção Leste, porém com direção predominante de junho a dezembro de Nordeste, sendo a direção do canal estuarino nos pontos de coleta de dados 2 e 3 Noroeste-Sudeste.

Nas condições de limite de fundo, a formulação definida para o valor do coeficiente de rugosidade em ambas direções longitudinal e transversal (u , v) foi

Chézy. Os valores de rugosidade de fundo, viscosidade e difusividade (horizontal, vertical), são os principais fatores de calibração do modelo e estão descritos na seção a seguir. O fechamento turbulento utilizado foi o K-Epsilon, com intuito de melhorar a estratificação vertical, pois a viscosidade e difusividade verticais são calculadas a cada instante, semelhante ao utilizado em Andutta *et al.* 2016.

2.6 Calibração do Modelo

O processo de calibração é executado em ambas dimensões. No modelo 2D, foram calibrados os parâmetros físicos de rugosidade, viscosidade e difusividade horizontais e, no modelo 3D, foram calibrados os parâmetros de viscosidade e difusividade verticais. A calibração de modelos hidrodinâmicos tem como objetivo o ajuste do modelo aos principais processos estudados, feita através de comparação e análise estatística dos dados modelados em relação aos dados observados como, por exemplo, de altura da coluna d'água, salinidade de superfície e fundo e velocidade de correntes. Rahman (2017) descreve que a calibração do modelo é um exercício trabalhoso porque deve encontrar parâmetros que, combinados, reproduzam dados numéricos comparáveis com os dados de medição Ji (2017) destaca que os parâmetros utilizados devem ter valores consistentes com os dados observados ou que estejam dentro do intervalo de valores da literatura. Williams (2017) destaca que a calibração deve expressar o nível de concordância alcançado, expressar o quanto a representação dos processos é realista e os critérios pelo qual o modelo foi considerado adequado (Figura 8).

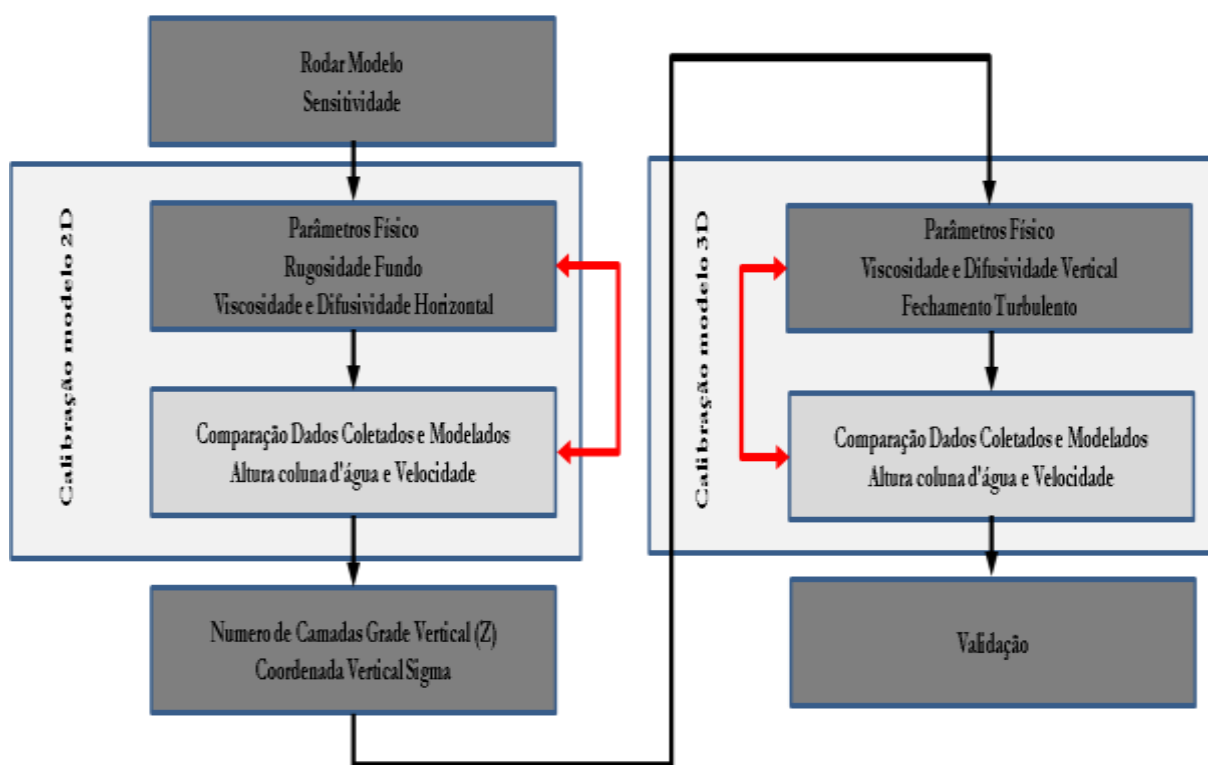


Figura 8. Nas calibrações, os dados modelados são comparados até atingirem valores que satisfaçam a concordância entre os dados observados e modelados através do parâmetro Skill

2.6.1 Avaliação Estatística do Modelo

Para avaliação quantitativa dos resultados obtidos nos testes de calibração e validação do modelo, são utilizados métodos estatísticos. Ji (2017) ressalta que existem numerosos métodos para avaliação do modelo, porém não existe um padrão. Dev *et al.* (2014) concluíram que muitas vezes uma combinação de métricas estatísticas é necessária para avaliação do desempenho do modelo.

Neste estudo, foi utilizado o RMSE (*Root Mean Square Error*) para quantificar a precisão entre os dados modelados e observados (Equação 1). Williams (2017) determina como valores satisfatórios do RMSE para comparação da variação de nível em estuários de $\pm 0,10$ m na foz e $\pm 0,30$ m a montante ou 10% e 15% da variação observada para maré de sizígia e quadratura, respectivamente. Para velocidade na coluna de água, os valores de RMSE são classificados de acordo com as seguintes faixas: $<0,05$ m.s⁻¹, “muito bom”; $<0,10$ m.s⁻¹, “bom”; $<0,20$ m.s⁻¹, “moderados” e $>0,30$ m.s⁻¹, como “pobres”. Akter *et al.* (2019) determinaram como valores aceitáveis para RMSE, em relação à salinidade em estuários, valores $<3,8$.

Na análise da concordância entre os resultados do modelo e os dados observados, foi utilizado o parâmetro Skill proposto por Willmott *et al.* (1985) (Equação 2). Esse varia de 0.0 a 1.0, com valores próximos de 1.0 indicando uma excelente concordância (LEGATES, 2005). Allen *et al.* (2007), classificaram valores Skill $>0,65$, “excelentes”; de 0,65 a 0,50, “muito bom”; de 0,5 a 0,2, “bom” e $<0,2$, como “pobres”. Williams (2017) determina como aceitáveis, para variação de nível de água, valores de concordância entre os dados modelados e observados de Skill $>0,95$ e para velocidade na coluna de água, Skill $>0,90$.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum |x_{\text{modelo}} - x_{\text{obs}}|^2}{N}} \quad (1)$$

Onde:

X é a variável de interesse, N número total de dados.

$$SKILL = 1 - \frac{\sum |x_{\text{modelo}} - x_{\text{obs}}|^2}{\sum (|x_{\text{modelo}} - \bar{x}_{\text{obs}}| + |x_{\text{obs}} - \bar{x}_{\text{obs}}|)^2} \quad (2)$$

Onde:

X é a variável de interesse, $\bar{X}$ é a média temporal.

2.6.2 Modelo 2D

No modelo 2D, são calibradas as condições do limite de fundo, através de coeficientes de rugosidade, como o de Chézy. Chatzirodou (2014) utilizou um valor constante de Chézy de $50 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$ nas direções longitudinal e transversal (u e v) e destacou que maiores valores de Chézy caracterizam um leito mais suave. Andutta *et al.* (2016) utilizaram o coeficiente de Chézy com valor de $40 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$ em ambas direções visando uma mínima fricção de fundo no sistema estuarino dos rios Caravelas e Peruípe. Baseado nesses estudos foram realizadas simulações com valores de Chézy de 28, 37, 56 e $65 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$ constantes nas direções (u e v) (Figura

9), obtidos através da equação 3 (DELTARES, 2014). Nas simulações os valores de viscosidade de $1 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ e difusividade de $10 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ foram mantidos fixos.

$$C = \frac{H^{1/6}}{n} \quad (3)$$

Onde:

H = profundidade da água;

n = coeficiente de Manning com valor típico utilizado de $0.02 \text{ s}^{-1}.\text{m}^{1/3}$.

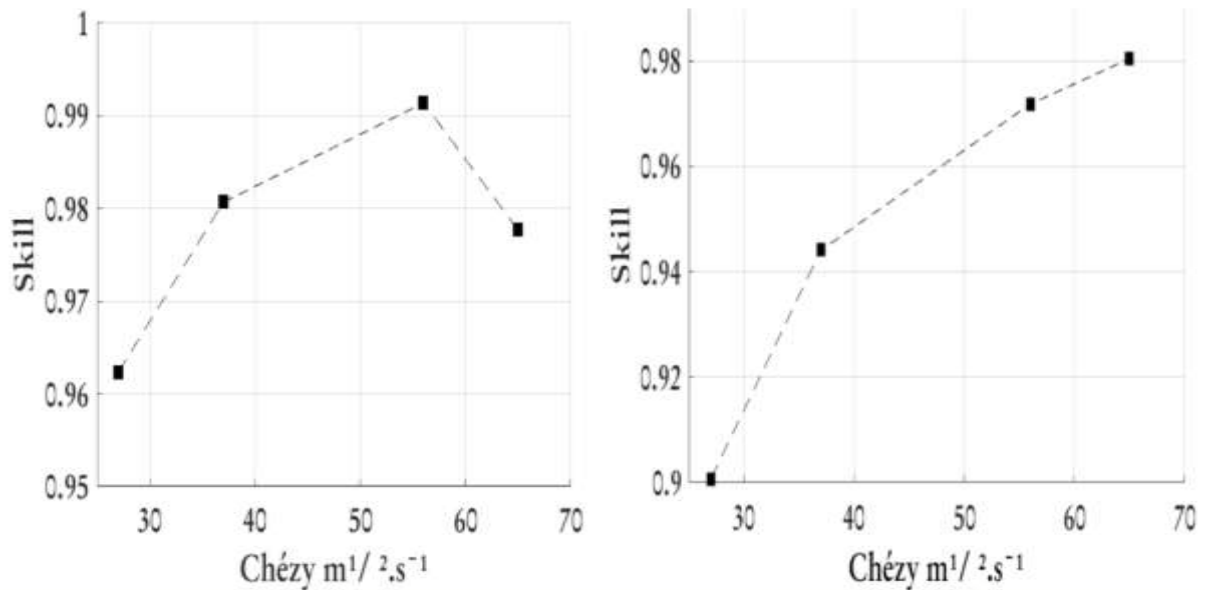


Figura 9. Calibração do nível de água, para o período de 31/07/15 a 07/08/15 nos pontos 2 e 3, respectivamente, com variações de atrito de fundo com valores de Chézy 28, 37, 56 e $65 \text{ m}^{1/2}.\text{s}^{-1}$.

Na calibração do modelo bidimensional, o coeficiente de Chézy com valor de $56 \text{ m}^{1/2}.\text{s}^{-1}$, apresentou melhor concordância através do parâmetro Skill. Com valor de rugosidade definido, foram realizadas calibrações variando valores de viscosidade e difusividade e não foram encontradas mudanças significativas nos resultados. Portanto, esses valores foram mantidos em $1 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ para viscosidade horizontal e $10 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ para difusividade horizontal.

2.6.3 Modelo 3D

No modelo 3D, foram calibrados os parâmetros referentes ao plano vertical, números de camadas, sistema de coordenadas, fechamento de turbulência do modelo e viscosidade e difusividade vertical. O Delft3D-Flow oferece dois sistemas de coordenadas verticais Z e Sigma. Neste estudo, foi configurado o sistema de coordenada sigma, por melhor representar as variações batimétricas existentes no estuário. O número de camadas verticais foi configurado em 10, baseado na profundidade máxima do estuário de aproximadamente 5 metros onde a maior dimensão por camada atinge espessuras de até 0,5 m.

Os valores de viscosidade e difusividade verticais foram definidos através de calibração em que foram utilizados valores entre 1.10^{-7} e $1.10^{-5} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ separadamente em ambos os coeficientes, sendo definido em $1.10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$. A

definição final da configuração dos valores para os parâmetros utilizados na validação e demais simulações estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros definidos na calibração 3D, para utilização na validação do modelo.

Parâmetros	Especificação
Passo tempo	12 s
Camadas Verticais	10 camadas sigma
Processos	Salinidade
Condições Iniciais	Altura coluna d'água 0m; Salinidade 31
Limites A,B,C	Condições de fluxo Tipo limite aberto: Nível da água Tipo forçante: Astronômica
Limite D	Condições de fluxo Tipo limite aberto: Total Descarga Tipo forçante: Série de tempo
Parâmetros físicos	Constantes: Gravidade $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ Densidade água 1024 Kg.m^{-3} Rugosidade fundo: formula Chézy U: $56 \text{ m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ V: $56 \text{ m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ Viscosidade horizontal: Uniforme $1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ Difusividade: $10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ Viscosidade Vertical: $10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ Difusividade Vertical: $10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ Modelo de fechamento de turbulência: K-Epsilon.
Parâmetros Numéricos	Padrão

2.7 Validação do Modelo

A validação do modelo consiste em comparar os resultados obtidos quantitativamente através da avaliação estatística por meio de parâmetros definidos na calibração para um período de coleta de dados diferente. Van Waveren *et al.* (2008) definem a validação como sendo a comparação entre os resultados obtidos no modelo com um conjunto independente de observações do sistema real e a verificação para avaliar se os resultados descrevem o sistema corretamente.

O modelo foi validado com dados observados em campanha realizada em agosto de 2016, em que todos os parâmetros definidos na calibração foram mantidos (Tabela 3), exceto os dados de vazão no limite aberto (D). Esses foram configurados com dados da média diária de vazão, registrados na estação fluviométrica da ANA (Figura 10). De modo análogo à calibração, foram analisados os dados de nível de água nos pontos 2 e 3, velocidade média de corrente no ponto 2 (por conta de problemas operacionais no ADCP do ponto 3, cujos dados foram desconsiderados) e salinidade de superfície e fundo nos pontos 1,2 e 3.

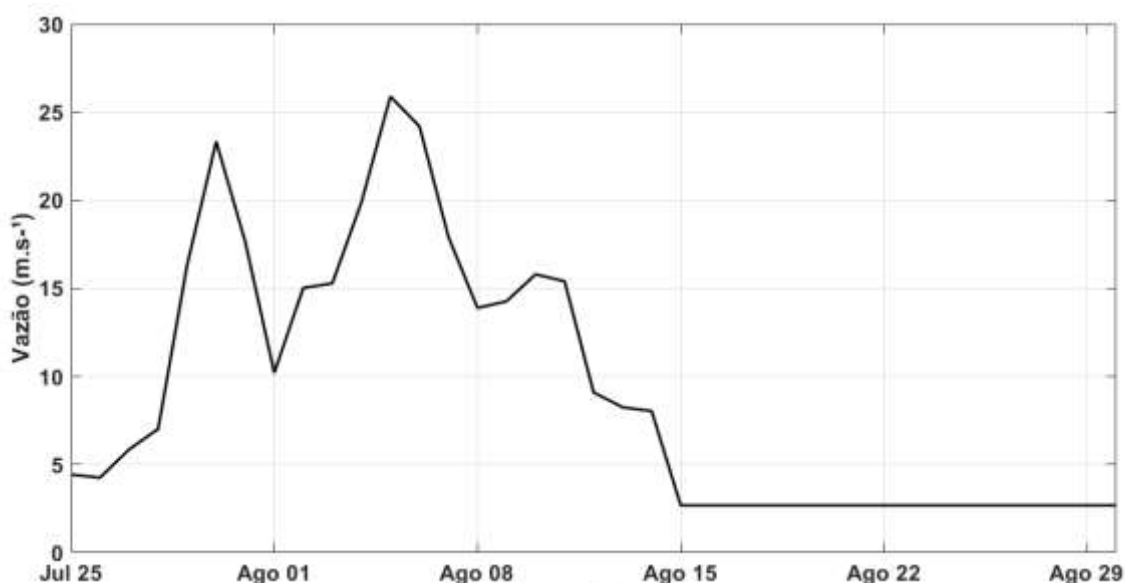


Figura 10. Vazão fluvial registrada na estação fluviométrica Fazenda Limoeiro (55170000), período de 25/07/2016 a 30/08/2016. Fonte: ANA, 2019.

2.7.1 Decomposição de Velocidade

Os dados de velocidade de corrente observados no ponto 2 foram decompostos vetorialmente em relação ao sistema local de coordenadas OXY considerando-se a orientação do estuário e a declinação magnética local (Equação 4) para determinação dos componentes de velocidade (u , v) longitudinal e transversal, respectivamente (MIRANDA *et al.*, 2002).

$$\theta = 90^\circ - (dd \pm D) \pm \gamma \quad (4)$$

Onde:

- Θ = ângulo ajustado [°];
- dd = direção da velocidade medido pelo ADP[°];
- D = declinação magnética local [°];
- γ = ângulo entre o eixo transversal do estuário e o norte verdadeiro [°](Figura 11).

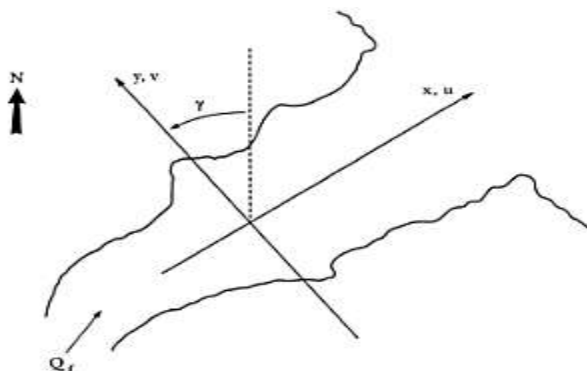


Figura 11. Decomposição dos componentes de velocidades u (longitudinal) e v (transversal) em relação ao sistema local de coordenadas (Oxy). Fonte (MIRANDA *et al.*, 2002)

Em Silva (2016), foi determinado o valor da declinação magnética local para o rio Buranhém no ano de 2015, de $24^{\circ} 30' \text{ O}$ (ou $-24,50^{\circ}$) e adotou-se para o ponto 2 um ângulo entre o eixo transversal do estuário e o norte verdadeiro γ de $+58^{\circ}$ (Equação 5).

$$\theta = 90^{\circ} - (dd - 24,5^{\circ}) + 58^{\circ} \quad (5)$$

A decomposição dos vetores de velocidades longitudinal e transversal foi realizada através das Equações 6 e 7, respectivamente.

$$u = V \cos\theta \quad (6)$$

$$v = V \sin\theta \quad (7)$$

Onde:

- u = velocidade longitudinal (m s^{-1});
- v = velocidade transversal (m s^{-1});
- V = módulo da velocidade (m s^{-1});
- θ = ângulo ajustado.

A partir da orientação do eixo longitudinal, valores positivos indicam correntes do estuário em direção ao mar (vazante), enquanto valores negativos indicam correntes de enchente.

2.8 Simulação Hidrodinâmica

Após a etapa de validação, foram executadas simulações com diferentes objetivos: para análise comparativa dos resultados obtidos na modelagem através de réguas linimétricas (método indireto) fornecidos pela ANA e através de micro molinete (método direto), em duas campanhas realizadas nos dias 18/08/2016 e 24/08/2016. Foram comparados os resultados de salinidade nos três pontos de observação e velocidade longitudinal no ponto 2.

Foi simulada a intrusão salina no rio Buranhém com vazões fluviais mínimas registradas em séries históricas ($2, 4$ e $6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) e em uma condição de vazão mínima extrema de $0,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, pelo período de 15 dias (Figura 12), sob marés de quadratura e sizígia. Exceto para a vazão fluvial, todos os dados utilizados na validação do modelo foram mantidos constantes.

As simulações foram executadas por um período de 35 dias 25/07/16 a 30/08/16. Considerou-se um período inicial de 20 dias para aquecimento do modelo, a partir dos dados de vazão fornecidos pela ANA.

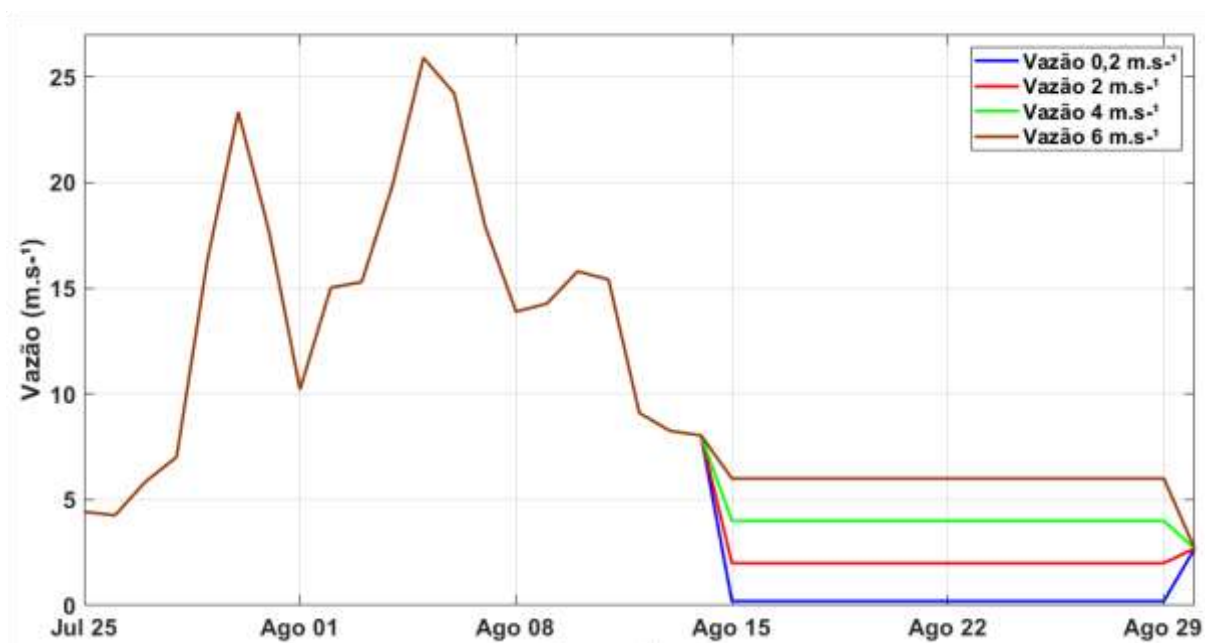


Figura 12. Vazões configuradas para simulações hidrodinâmicas no período de 25/07/16 a 30/08/16. Fonte: ANA, 2019.

Para análise do perfil longitudinal de salinidade no domínio do modelo, o limite superior foi estendido por aproximadamente 20 km (Figura 4).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados da comparação quantitativa da calibração e validação do modelo, bem como as simulações com medições de vazão *in situ*, observadas nos dias 18 e 22/08/16, além da análise da intrusão salina.

A calibração foi definida através da comparação dos resultados de nível e salinidade nos pontos 1 e 2 e velocidade longitudinal da coluna de água no ponto 2 no domínio do modelo (Figura 1), para o período de 31/07/2015 a 06/08/2015. Os dados são avaliados, quanto à concordância, pelo método Skill e, quanto à precisão, pelo RMSE.

O modelo foi validado com dados de nível observados nos pontos 2 e 3, salinidade nos pontos 1, 2 e 3, além da velocidade longitudinal na coluna de água no ponto 2 (Figura 1), no período de 18/08/2016 a 24/08/2016. Também foram estimados os valores de Skill e RMSE.

3.1 Calibração

3.1.1 Nível

O comparativo entre os resultados obtidos para variação de nível de água no ponto 1 são apresentados na Figura 13. Foi identificada uma variação máxima para os dados de campo de $2,21 \pm 0,66$ m na maré de sizígia, com máxima amplitude de 1,11 m e mínima de -1,10 m. Os dados modelados registraram variação máxima na maré de sizígia de $2,03 \pm 0,61$ m com amplitude máxima de 1,05 m e mínima de -0,98 m. Na comparação estatística, obteve-se um valor de concordância Skill de 0,99 e RMSE de 0,11 m. No gráfico, observa-se que os dados estão em fase com diferença na amplitude mínima no pico da maré vazante com média de 0,12 m em praticamente todo o período.

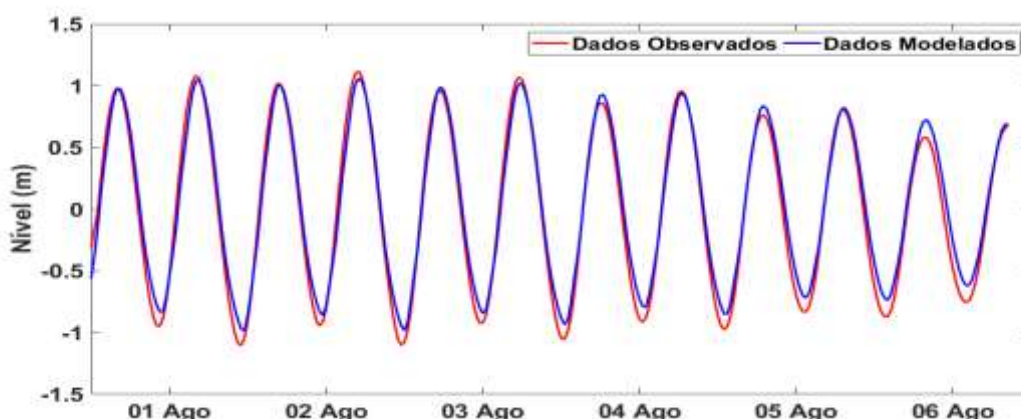


Figura 13. Comparação do nível de água (m) entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 1, no período de 31/07/15 12h00 a 06/08/15 08h00.

A diferença na amplitude máxima da maré vazante pode estar relacionada à configuração de vazão constante de $12 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, utilizada para o período de calibração. Neste ponto, o resultado obtido de variação de nível é semelhante ao encontrado no oceano adjacente, uma vez que esse está localizado próximo à foz do estuário.

Também deve-se levar em conta o fato do modelo ter sido forçado com as 8 constantes harmônicas de maré disponibilizadas pela Marinha do Brasil. Portanto, imprecisões na representação da maré também são oriundas do período restrito (30 dias) de observação com marégrafo na região.

O comparativo entre os dados observados e modelados de nível de água no ponto 2 é apresentado na Figura 14, com uma variação máxima para os dados observados de $2,00 \pm 0,60$ m na maré de sizígia, com amplitude máxima de 1,00 m e mínima de -1,00 m. Os dados modelados registraram uma variação máxima na maré de sizígia de $1,87 \pm 0,58$ m, com amplitude máxima de 1,07 m e mínima de -0,80 m. Na comparação estatística, obteve-se um valor de concordância Skill de 0,98 e RMSE 0,13 m.

O resultado obtido neste ponto é semelhante ao observado no ponto anterior com diferença na amplitude mínima no pico da maré em praticamente todo o período analisado.

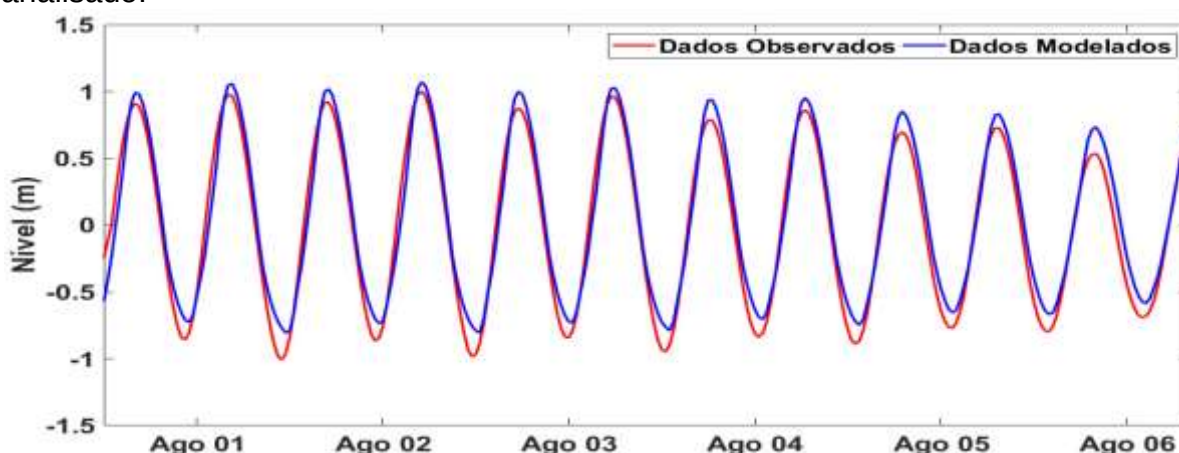


Figura 14. Comparação do nível de água (m) entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 2, no período de 31/07/15 12h00 a 06/08/15 08h00.

Os resultados modelados apresentaram concordância em relação aos observados de variação de nível nos dois pontos analisados com parâmetro Skill acima de 0,98 com um RMSE de 0,12 m. Comparando-se os resultados obtidos nos dois pontos em que não houve variação significativa da altura de maré e diante da forma alongada e com estreitamento “regular” do estuário, infere-se que o estuário seja do tipo síncrono. Nesses tipos de estuários, os efeitos da convergência são equivalentes aos da fricção, resultando em uma relativa estabilidade na variação longitudinal do nível e posterior redução mais acentuada no nível e nos campos de velocidade (MIRANDA *et al.* 2002).

3.1.2 Salinidade

O comparativo entre os dados observados e modelados de salinidade no ponto 1 é apresentado nas Figuras 15(A e B), superfície e fundo, respectivamente. Na superfície, os dados observados apresentam salinidade média de $23,45 \pm 10$, com mínimo de 5,41 e máximo de 36,15 e modelados com salinidade média de $23,20 \pm 6,93$, com mínimo de 11,35 e máximo de 33,99, com concordância entre os dados com valor Skill de 0,94 e RMSE 3,95. No gráfico observa-se concordância de fase entre os dados, com uma diferença na salinidade mínima que atinge 5,94 sob maré de quadratura.

No fundo (Figura 15B), os dados observados apresentam salinidade média de $25,69 \pm 8,87$, com mínimo de 8,77 e máximo de 36,48. Os modelados com salinidade média de $23,24 \pm 6,95$, com mínimo de 11,41 e máximo de 33,98, com concordância entre os dados com valor Skill de 0,93 e RMSE de 3,90.

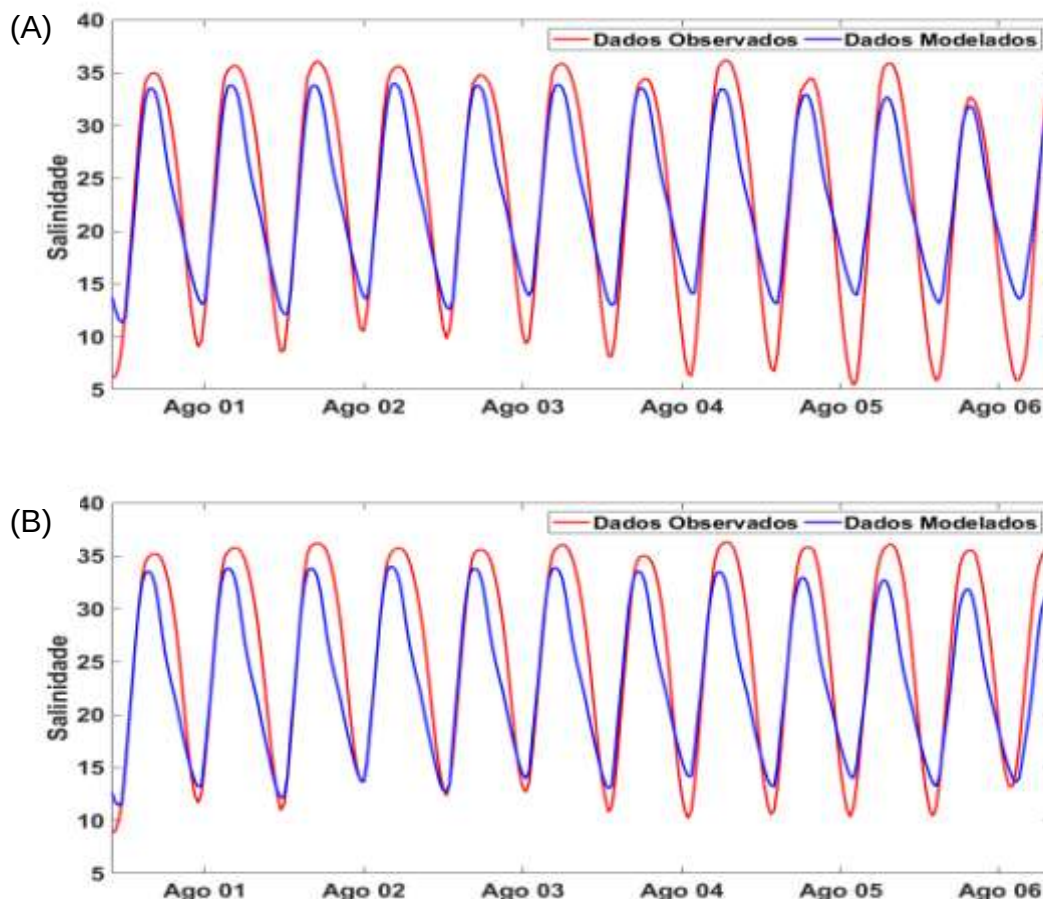


Figura 15. Comparação de salinidade entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 1, sendo superfície (A) e fundo (B), no período de 31/07/15 10h00 a 06/08/15 08h00.

Observa-se que o modelo apresenta resultados em fase com os observados, porém não atinge os níveis máximos tanto na maré enchente como na vazante, nem na superfície ou no fundo. Há uma maior diferença sendo registrada na superfície durante o período de quadratura, que pode estar relacionada à configuração de vazão fluvial constante e devido às limitações na batimetria em porções consideráveis da zona estuarina. Os dados fornecidos pela ANA e utilizados para forçar o modelo na calibração levaram em conta um valor médio mensal para o ano de 2015.

Localizado a montante no estuário, o ponto 2 tende a apresentar uma redução nos valores de salinidade de superfície e fundo, como pode ser visto na Figura 16 (A e B), respectivamente. Na superfície, os dados observados apresentaram salinidade média de $20,39 \pm 11,20$, com mínimo de 1,69 e máximo de 35,80 e modelados com salinidade média de $18,20 \pm 7,95$, com mínimo de 6,66 e máximo de 31,66, com concordância entre os dados com valor Skill de 0,93 e RMSE de 5,03.

No fundo (Figura 16B), os dados observados apresentaram salinidade média de $21,87 \pm 12,28$, com mínimo de 0,99 e máximo de 36,06 e modelados com

salinidade média de $18,16 \pm 7,98$, com mínimo de 5,99 e máximo de 31,64, com concordância entre os dados com valor Skill de 0,90 e RMSE de 6,51.

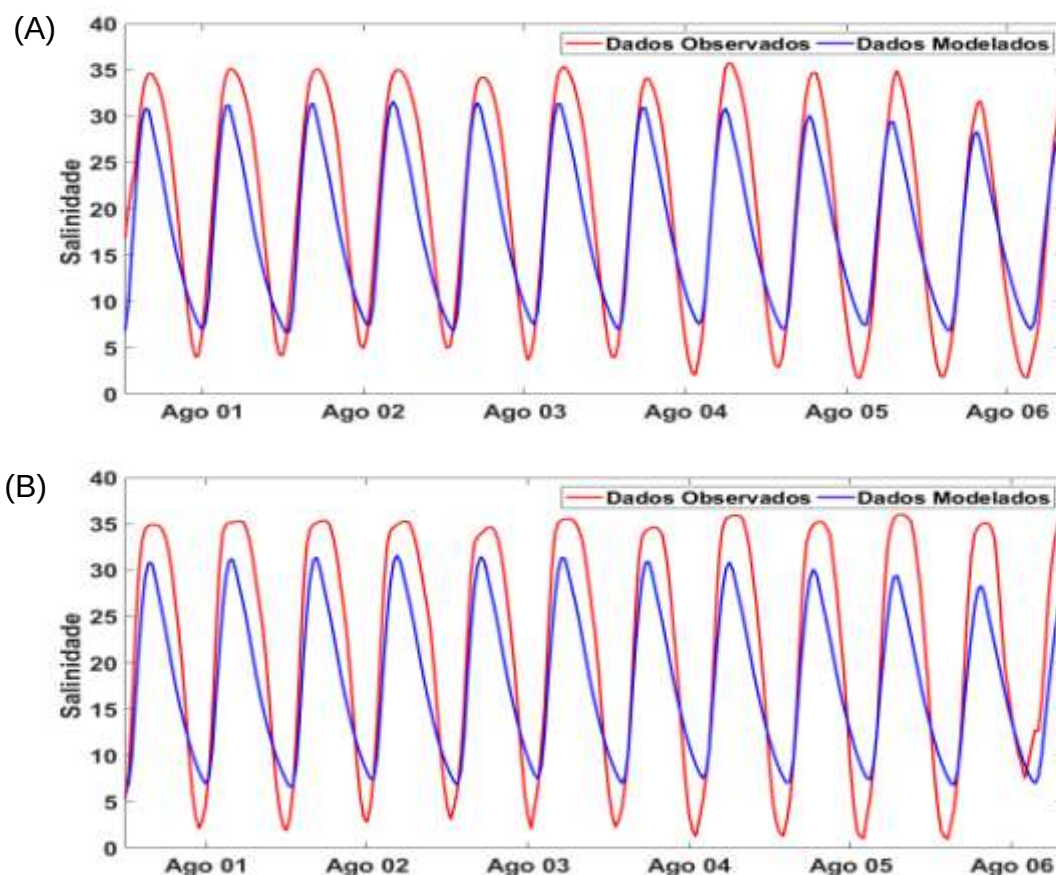


Figura 16. Comparação de salinidade entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 2, sendo superfície (A) e fundo (B), no período de 31/07/15 10h00 a 06/08/15 08h00.

Seguindo a mesma tendência apresentada nos resultados obtidos no ponto 1, os resultados estão em fase, com diferenças nos limites máximos e mínimos com maior intensidade no período da quadratura.

Em relação aos dados de salinidade analisados nos dois pontos, o modelo apresentou resultados considerados aceitáveis de concordância com um Skill acima de 0,90, mas com um RMSE considerado fora do aceitável na literatura, principalmente para o ponto 2.

3.1.3 Velocidade

Na calibração foram comparados os valores modelados e observados de velocidade na coluna de água na direção longitudinal no ponto 2, apresentados na Figura 17, com velocidade máxima observada de $-0,43 \text{ m.s}^{-1}$ na enchente e $0,87 \text{ m.s}^{-1}$ na vazante e média na coluna de água de $0,14 \text{ m.s}^{-1}$ direção vazante. Já os dados modelados apresentam $-0,60 \text{ m.s}^{-1}$ na enchente e $0,74 \text{ m.s}^{-1}$ na vazante com média na coluna de água de $0,18 \text{ m.s}^{-1}$ durante a vazante, com concordância entre os dados com valor Skill de 0,95 e erro RMSE de $0,16 \text{ m.s}^{-1}$. O gráfico apresenta concordância de fase com diferenças na amplitude da velocidade principalmente no

período de maré de quadratura, quando o modelo superestima as velocidades extremas.

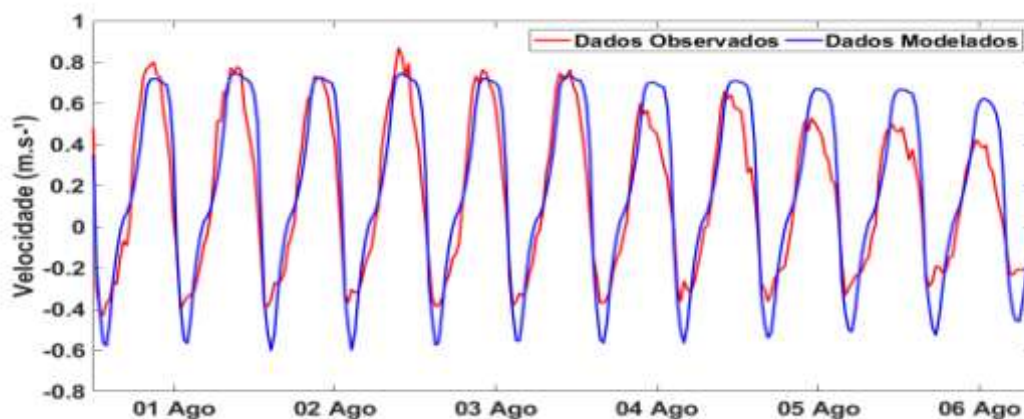
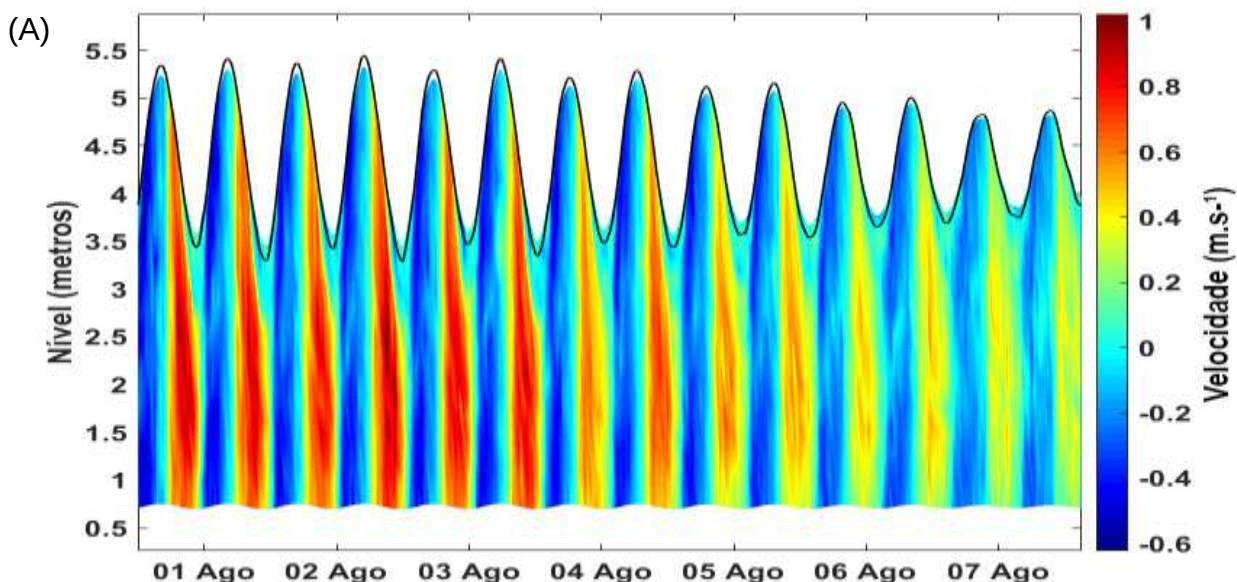


Figura 17. Comparação da velocidade longitudinal na coluna de água (m.s^{-1}) entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 2, no período de 31/07/15 12h00 a 06/08/15 08h00.

O perfil da velocidade horizontal observada e modelada no ponto 2 é apresentado nas Figuras 18(A e B), respectivamente. Nos dados observados, Figura 18A, observa-se maiores velocidades no período de maré vazante principalmente durante a maré de sizígia que justificam a média residual de $0,14 \text{ m.s}^{-1}$ no sentido vazante, sendo a velocidade quase nula nos momentos de estufa da maré. No início da maré de quadratura a partir do dia 06/08 observa-se uma tendência a menores picos de velocidade com velocidades menores em ambos os sentidos.



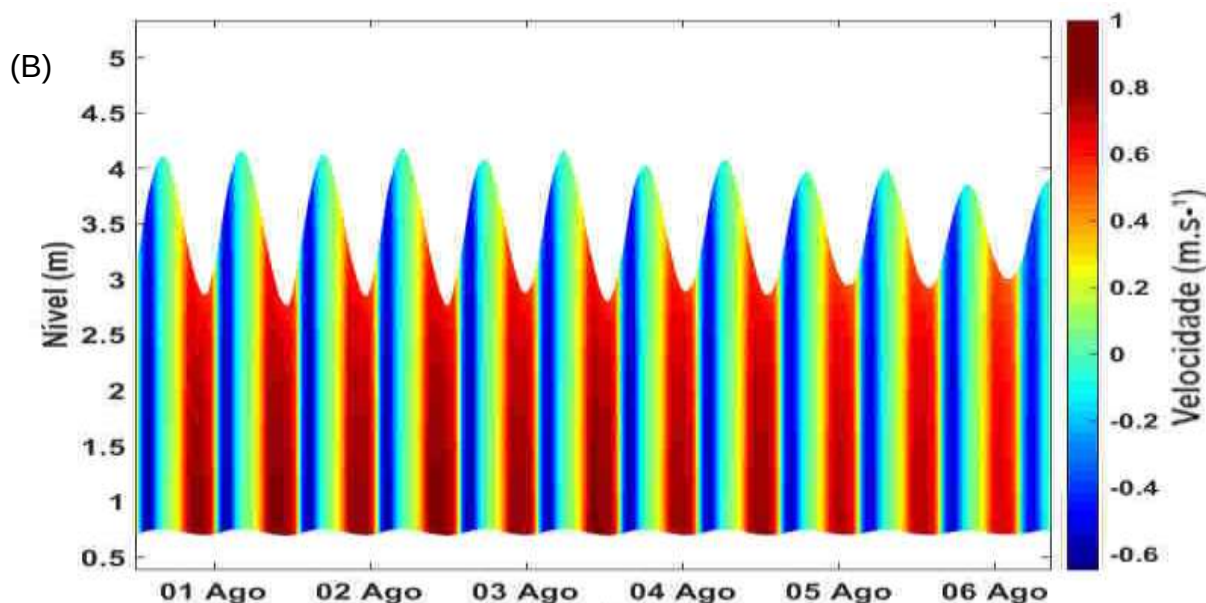


Figura 18. Dados de velocidade longitudinal na coluna de água no ponto 2, sendo velocidade observada (A) e modelada (B) no período de 31/07/15 12h00 a 06/08/15 08h00.

No perfil modelado Figura 18B, observa-se o mesmo padrão dos resultados observados, com velocidades mais intensas na maré de sizígia diminuindo gradativamente no início da maré de quadratura.

Os resultados modelados que ainda demandam maior refinamentos são os de salinidade, com uma tendência de maior degradação dos resultados a montante do estuário, que pode estar relacionada a maior influência da vazão fluvial do que aquela estimada pela ANA, além das limitações batimétricas e morfológicas inseridas no modelo. Em aspectos gerais a calibração obteve resultados satisfatórios para todos os dados nos pontos analisados, tornando o modelo apto ao processo de validação.

3.2 Validação

3.2.1 Nível

Para validação inicialmente são comparados os resultados obtidos para variação de nível de água no ponto 2, apresentados na Figura 19, com valor máximo para os dados observados de $2,31 \pm 0,67$ m, com uma amplitude máxima de 1,23 m e mínima de -1,08 m. Os dados modelados registraram variação máxima de nível de água de $1,97 \pm 0,59$ m, com amplitude máxima de 1,06 m e mínima de -0,91 m. Na comparação estatística, obteve-se uma concordância entre os dados com valor Skill de 0,98 e RMSE de 0,14 m.

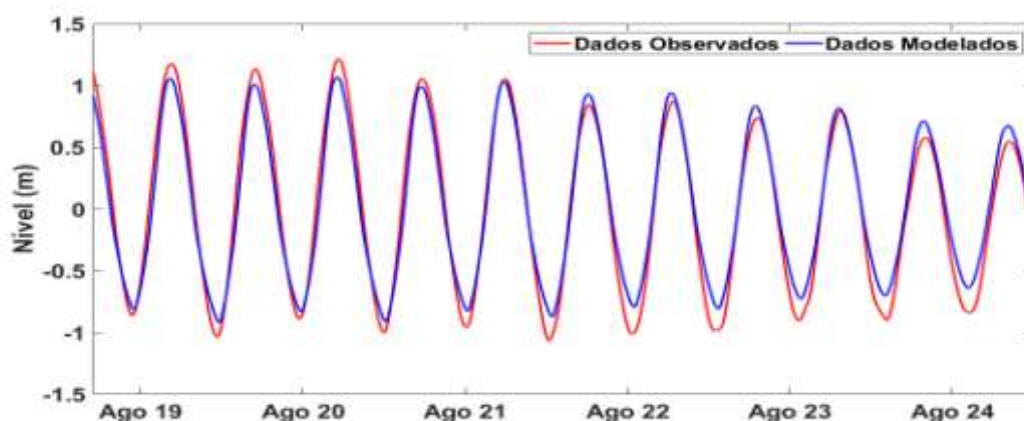


Figura 19. Comparação do nível de água (m) entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 2, no período de 18/08/16 17h00 a 24/08/16 12h00.

No comparativo dos dados de variação de nível de água no ponto 3, apresentados na Figura 20, obteve-se para os dados observados uma variação máxima de $2,03 \pm 0,56$ m, com amplitude máxima de 1,01 m e mínima de -1,02 m. Os dados modelados registraram uma variação máxima de $1,90 \pm 0,56$ m, com amplitude máxima de 1,09 e mínima de -0,81. Na comparação estatística, obteve-se uma concordância entre os dados com valor Skill de 0,98 e RMSE de 0,12 m.

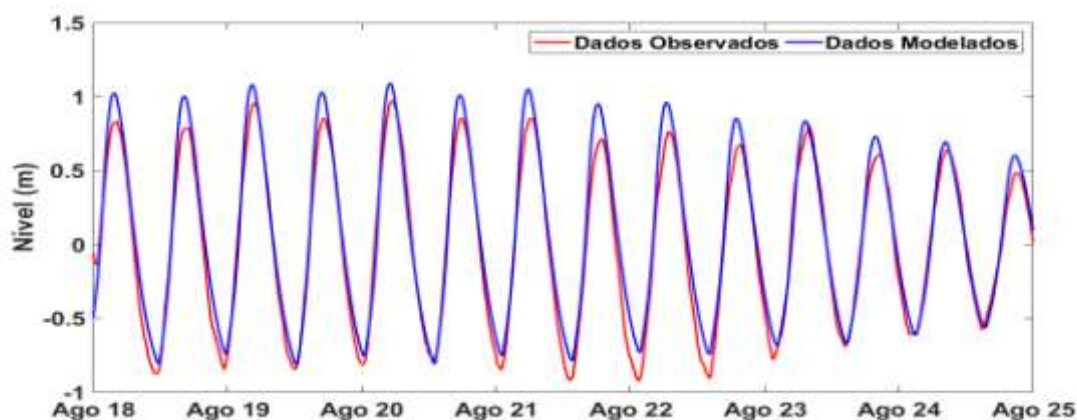


Figura 20. Comparação do nível de água (m) entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 3, no período de 18/08/16 09h00 a 25/08/16 00h00.

Nos dois pontos avaliados os dados estão em fase com diferenças nas amplitudes mínimas e máximas, no ponto 2, principalmente na amplitude mínima no período próximo ao início da maré de quadratura após o dia 22/08 e, no ponto 3, o modelo superestima os valores máximos de amplitude, principalmente no período da maré de sizígia, diferenças que podem estar associadas a falta de dados precisos de vazão fluvial para o período analisado, bem como diferenças entre a batimetria modelada e a real do sistema. Através da análise quantitativa para variação de nível os dados apresentam um ótimo desempenho, com valores de concordância Skill próximos de 1.

3.2.2 Salinidade

O comparativo entre os dados observados e modelados de salinidade no ponto 1 é apresentado nas Figuras 21(A e B) superfície e fundo, respectivamente. Na superfície, os dados observados apresentam salinidade média de $30,75 \pm 5,83$, com mínimo de 16,66 e máximo de 37,28 e modelados com salinidade média de $31,77 \pm 3,15$, com mínimo de 22,17 e máximo de 35,78, com concordância entre os dados com valor Skill de 0,86 e RMSE de 3,25.

No fundo, Figura 21B, os resultados observados apresentaram média de salinidade de $31,42 \pm 5,30$, com mínimo de 17,34 e máximo de 37,21 e modelados com salinidade média de $31,77 \pm 3,15$, com mínimo de 22,20 e máximo de 35,78, com concordância entre os dados com valor Skill de 0,90 e RMSE de 2,53.

Na Figura 21C, são apresentadas as diferenças entre superfície e fundo dos dados observados e modelados no ponto 1.

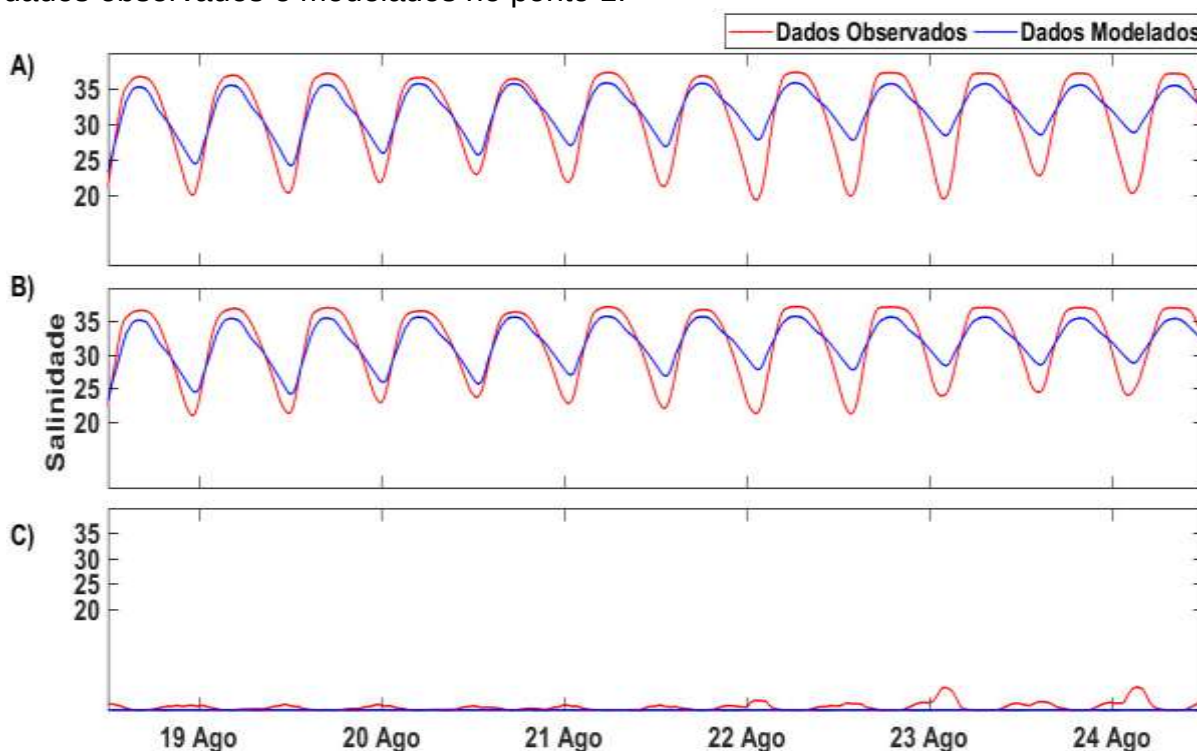


Figura 21. Comparação de salinidade entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 1, sendo superfície (A), fundo (B) e diferença entre superfície e fundo (C), no período de 18/08/16 15h00 a 24/08/16 15h00.

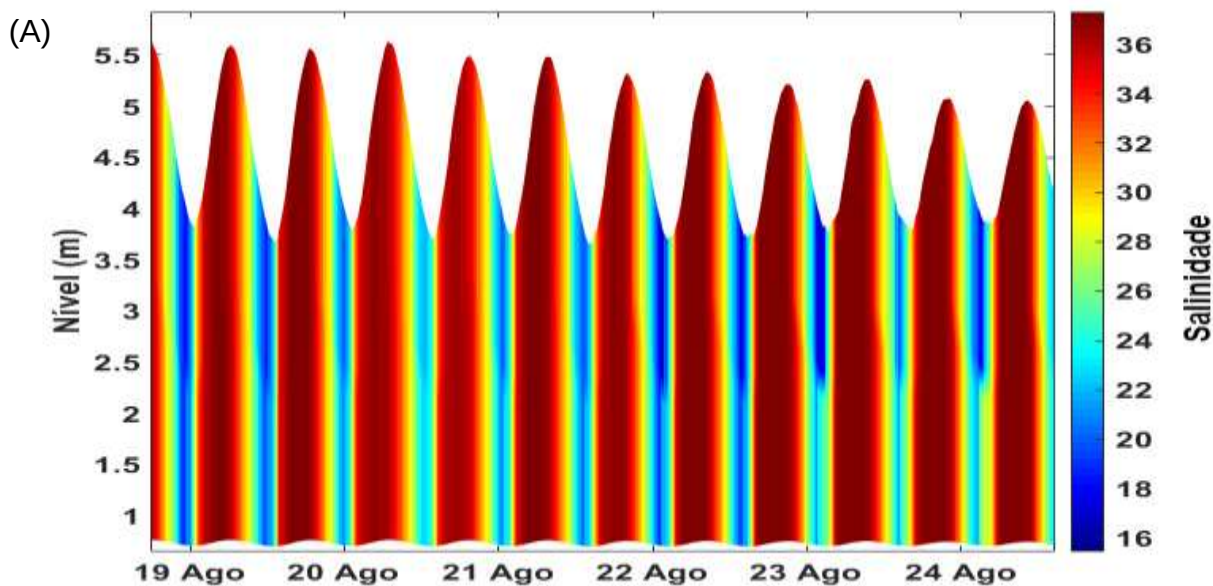
Na superfície, o comparativo entre os dados apresentam diferença na amplitude máxima de até 1,5 enquanto que, na amplitude mínima, essa diferença

aumenta para até 5,51, principalmente no início da quadratura. No fundo a diferença na amplitude máxima é de até 1,43 e a mínima atinge até 4,86. Em comparação a superfície apresenta uma leve diminuição, que pode estar relacionada a maior influência da vazão fluvial em relação à salinidade de superfície.

Na análise quantitativa os resultados apresentam uma boa concordância seguindo o padrão de avaliação do parâmetro Skill e uma precisão satisfatória com um RMSE próximo de 10% em relação a média de salinidade.

Analizando a diferença entre os dados observados de superfície e fundo observa-se durante a maré de sizígia características de um ambiente bem misturado, com uma estratificação de ~ 1 com pequeno aumento no início da quadratura. O resultado apresentado pelo modelo não apresenta diferenças entre superfície e fundo. Essa dificuldade em simular a estratificação vertical pode estar relacionada a um ajuste mais preciso nas configurações de viscosidade e difusividade vertical no modelo, assim como do refinamento da batimetria e do incremento de medições *in situ* de vazão fluvial para validação dos dados da ANA.

Para uma melhor análise da estratificação vertical são apresentados os perfis de salinidade coletado e modelado. (Figura 22 A e B). Observa-se características de um estuário bem misturado, com valores de salinidade mais baixos na maré vazante, conforme esperado. O modelo não registrou diferença entre a média de salinidade de superfície e fundo, salinidades próximas de 35 se justificam por este ponto estar próximo a foz do estuário.



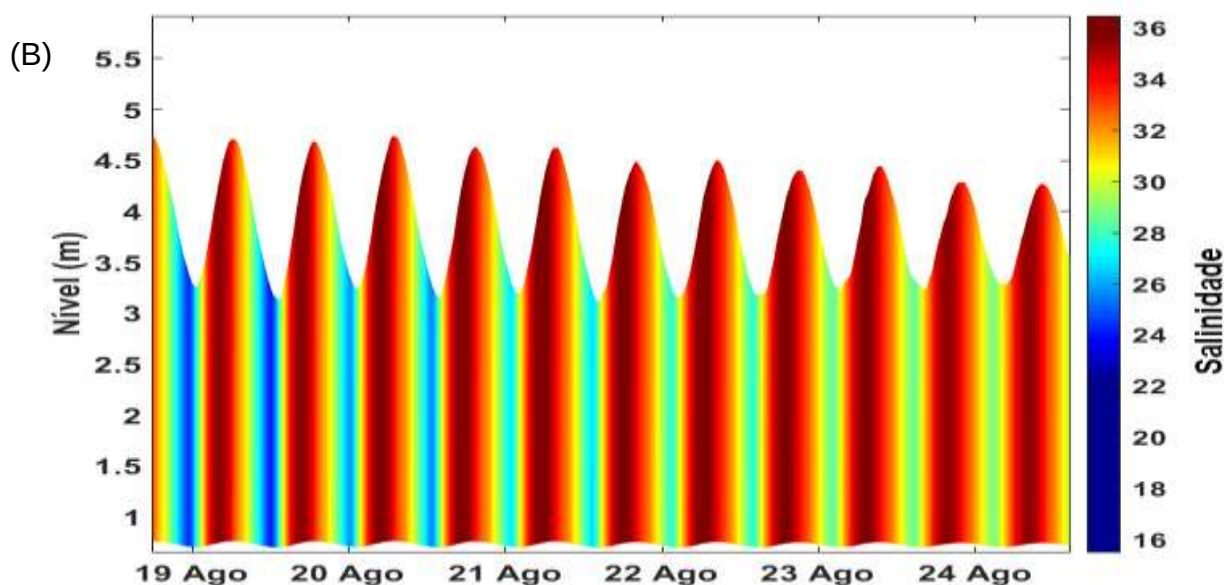


Figura 22. Perfil de salinidade observado (A) e modelado (B) no ponto 1, período de 18/08/16 15h00 a 24/08/16 15h00

O comparativo entre os dados observados e modelados de salinidade no ponto 2 é apresentado nas Figuras 23(A e B), superfície e fundo, respectivamente. Na superfície, os dados observados apresentam salinidade média de $28,50 \pm 7,56$, com mínimo de 12,69 e máximo de 36,86 e modelados com salinidade média de $29,70 \pm 4,18$, com mínimo de 19,23 e máximo de 35,13, com concordância entre os dados com valor Skill de 0,87 e RMSE de 4,10. Os dados apresentam o mesmo comportamento encontrado no ponto 1, dados em fase com diferença na amplitude, principalmente no fim do período da maré de sizígia e começo da quadratura no momento da vazante.

No fundo, Figura 23B, os resultados apresentam salinidade média observada de $28,31 \pm 6,83$, com mínimo de 14,06 e máximo de 37 e modelados com salinidade média de $29,70 \pm 4,18$, com mínimo de 19,23 e máximo de 35,12, com concordância entre os dados com valor Skill de 0,91 e RMSE de 3,13. No fundo a diferença na salinidade mínima encontrada entre os dados observados e modelados é menor que na superfície por haver uma menor influência do fluxo de água da descarga fluvial.

Na Figura 23C é apresentado o gráfico da diferença entre superfície e fundo dos dados observados e modelados no ponto 2, onde verifica-se nos dados observados picos de até 8, principalmente no início do período da maré de quadratura. Já o modelo não consegue representar adequadamente a estratificação vertical de sal entre superfície e fundo no período.

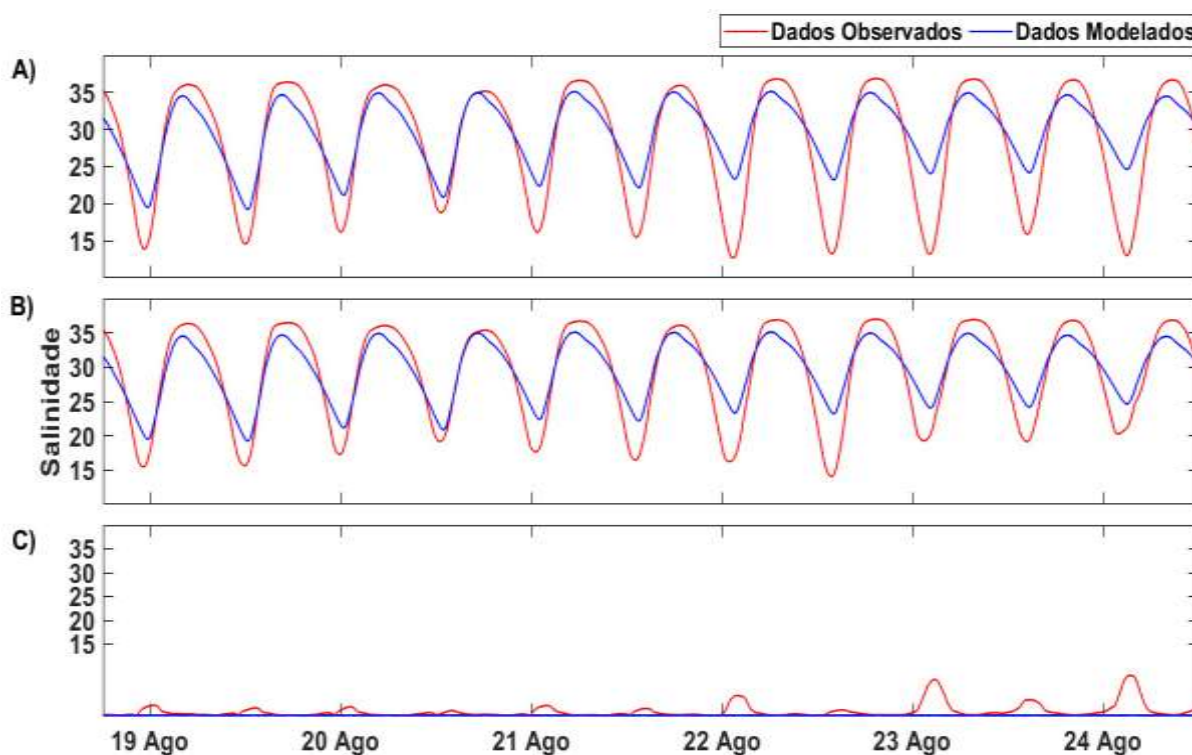


Figura 23. Comparação de salinidade entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 2, sendo superfície (A), fundo (B) e diferença entre superfície e fundo (C), no período de 18/08/16 18h00 a 24/08/16 12h00.

A diferença de salinidade entre superfície e fundo no ponto 2 foi mais intensa no início do período de quadratura do que a registrada no ponto 1, pelo fato deste ponto estar a montante no estuário e receber uma maior influência da descarga fluvial.

O perfil de salinidade observado e modelado no ponto 2 é apresentado nas Figuras 24(A e B), respectivamente. Os dados observados apresentaram características de um estuário bem misturado, principalmente no período de maré de sizígia, passando a existir uma estratificação de salinidade entre superfície e fundo a partir do dia 22/08 no início da maré de quadratura, já o modelo não conseguiu reproduzir esta estratificação no período da quadratura.

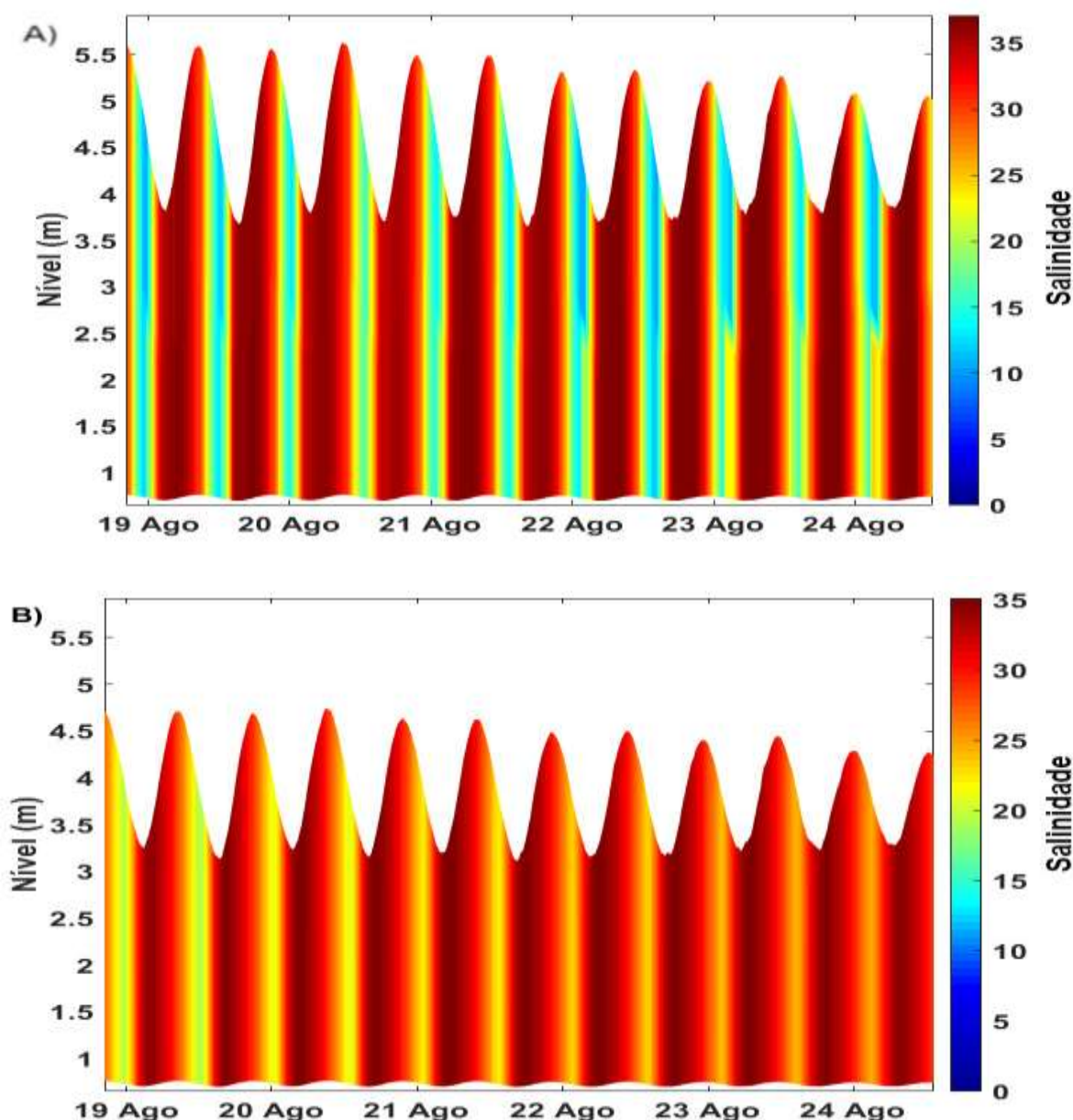


Figura 24. Perfil de salinidade observado (A) e modelado (B) no ponto 2, período de 18/08/16 18h00 a 24/08/16 12h00.

O comparativo entre os dados observados e modelados de salinidade no ponto 3 é apresentado nas Figuras 25(A e B) superfície e fundo, respectivamente. Na salinidade de superfície os dados observados apresentaram salinidade média de $13,83 \pm 7,67$, com mínimo de 1,88 e máximo de 25,31 e modelados com salinidade média de $16,22 \pm 7,54$, com mínimo de 2,98 e máximo de 28,29, com concordância entre os dados com valor Skill de 0,93 e RMSE de 3,75.

No fundo, Figura 25B, os resultados apresentaram o mesmo padrão analisado na superfície com média de salinidade observada de $13,98 \pm 7,69$, com mínimo de 1,05 e máximo de 24,95 e modelados com salinidade média de $16,27 \pm 7,56$, com mínimo de 3,01 e máximo de 28,35, com concordância entre os dados com valor Skill de 0,94 com um erro RMSE de 3,46.

Na Figura 25C, é apresentado o gráfico da diferença entre superfície e fundo dos dados observados e modelados no ponto 3, onde observa-se uma diferença dos

dados observados abaixo de 2,5 para todo período, enquanto o modelo, a exemplo dos outros pontos analisados registra uma diferença muito próxima de 0.

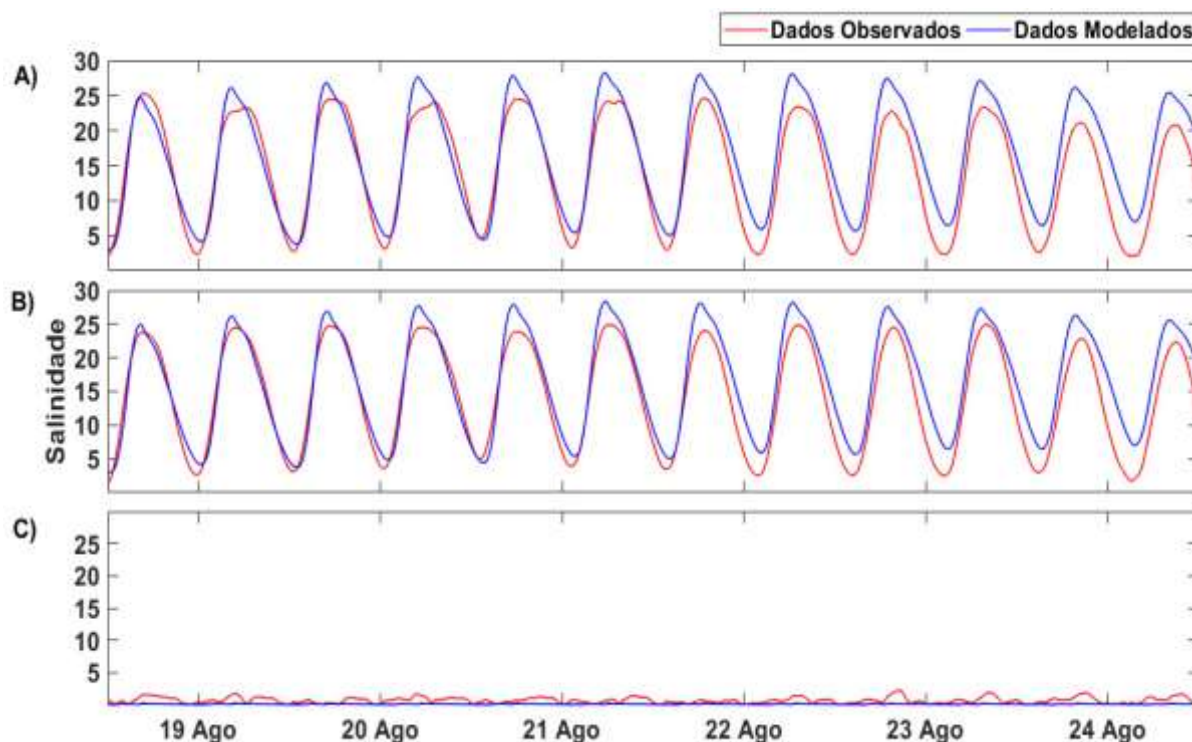


Figura 25. Comparação de salinidade entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 3, sendo superfície (A), fundo (B) e diferença entre superfície e fundo (C), no período de 18/08/16 12h00 a 24/08/16 12h00 .

No ponto 3, fica bem caracterizado um estuário bem misturado e diferente dos outros dois pontos analisados. Observa-se um sensível aumento da diferença entre as marés de sizígia e quadratura. Nesse ponto foram estimadas as menores médias de salinidade, tanto de superfície e fundo, justificado por ser o ponto analisado mais a montante do estuário.

O perfil de salinidade modelado no ponto 3 é apresentado nas Figuras 26(A e B). Observa-se características de um estuário bem misturado. Os dados observados registraram uma diferença média entre a salinidade de superfície e fundo de 0,15 enquanto que o modelo registrou uma diferença de apenas 0,05.

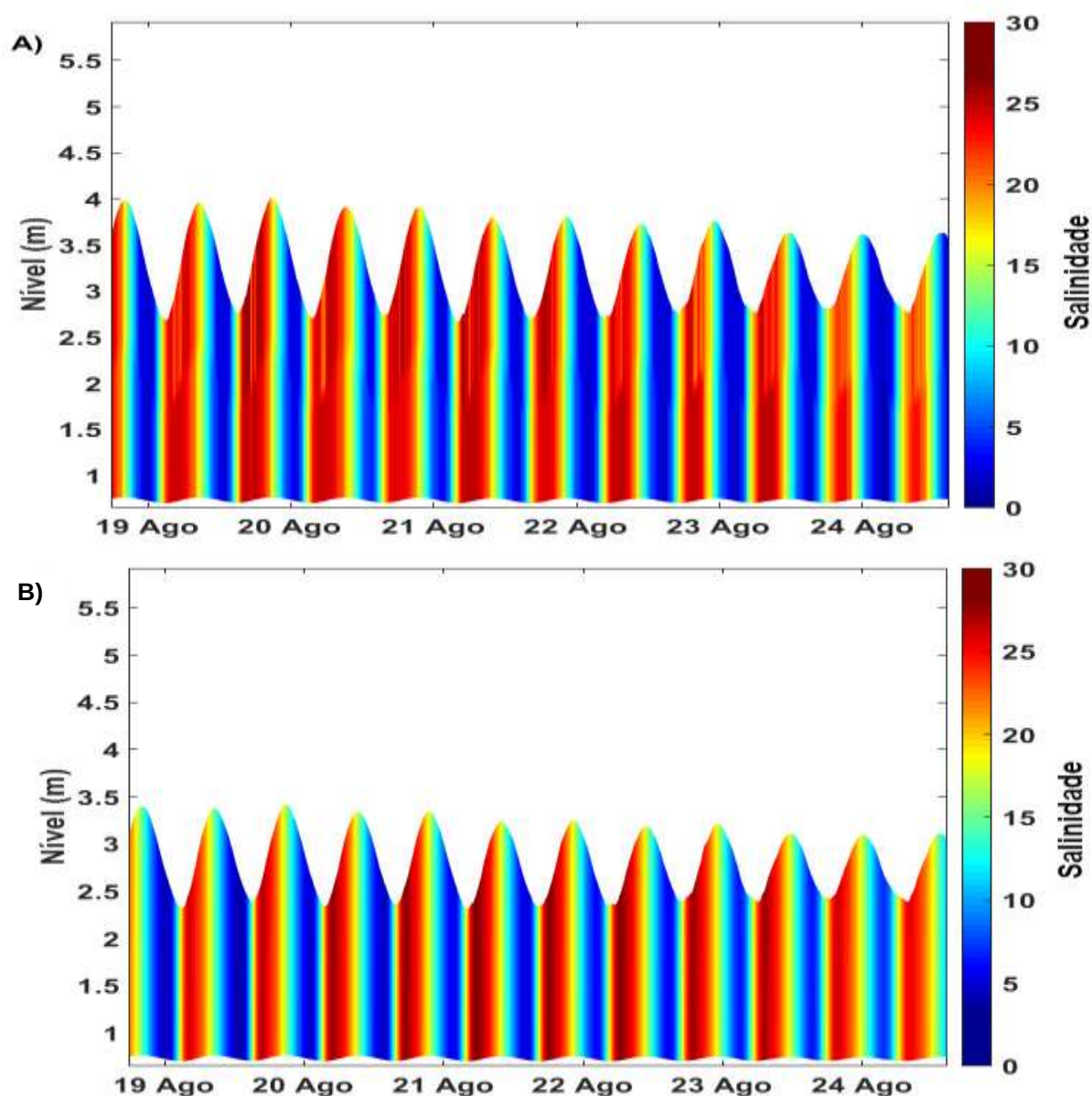


Figura 26. Perfil de salinidade observado (A) e modelado (B) no ponto 3, período de 18/08/16 12h00 a 25/08/16 12h00.

Os níveis de salinidade analisados nos três pontos de observações no estuário apresentaram o comportamento esperado, ou seja, o ponto localizado próximo a foz com níveis de salinidade mais elevados e uma diminuição gradativa nos outros dois pontos localizados a montante. Quanto à mistura, manteve-se a característica de um estuário bem misturado, principalmente na maré de sizígia.

O modelo apresentou resultados em concordância com os dados observados com valores de Skill entre 0,86 e 0,94 e uma precisão com valores de RMSE < 3,8, que Akter *et al.* (2019) determinaram como aceitáveis para salinidade em estuários.

3.2.3 Velocidade

A velocidade média da corrente na coluna de água na direção longitudinal no ponto 2, é apresentada na Figura 27, com velocidade máxima observada de $0,33 \text{ m.s}^{-1}$ na enchente e $0,54 \text{ m.s}^{-1}$ na vazante e média na coluna de água de $0,10 \text{ m.s}^{-1}$ direção vazante, enquanto os dados modelados apresentam velocidade máxima de $0,63 \text{ m.s}^{-1}$ na enchente e $0,63 \text{ m.s}^{-1}$ na vazante com média na coluna de água de $0,11 \text{ m.s}^{-1}$ direção vazante, com concordância entre os dados com valor Skill de 0,93 e RMSE de $0,16 \text{ m.s}^{-1}$.

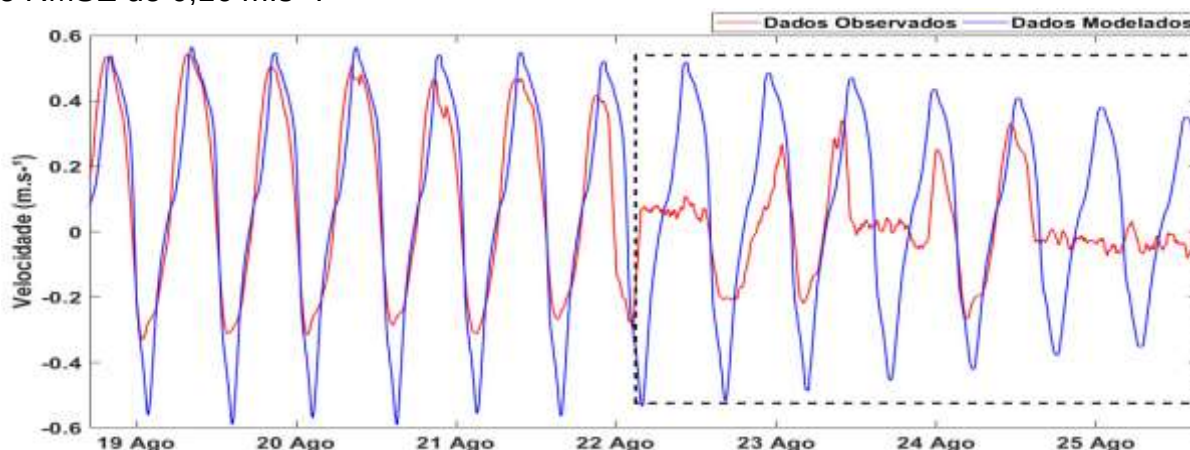


Figura 27. Comparação do componente longitudinal da velocidade (m.s^{-1}), entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 2, de 18/08/16 17h00 a 25/08/16 15h20. Na área tracejada os dados foram desconsiderados por erro de leitura dos equipamentos de campo.

Houve concordância de fase e diferença de $\sim 0,30 \text{ m.s}^{-1}$ nas amplitude das velocidades de enchente em todo período analisado, quando o modelo superestimou os valores de pico das velocidades de enchente no domínio.

A velocidade na direção transversal no ponto 2, é apresentada na Figura 28, a velocidade observada variou de $-0,35 \text{ m.s}^{-1}$ a $0,19 \text{ m.s}^{-1}$, enquanto a velocidade modelada variou de $-1,18 \text{ m.s}^{-1}$ a $1,32 \text{ m.s}^{-1}$, com concordância entre os dados com valor Skill de 0,62 e RMSE de $0,41 \text{ m.s}^{-1}$.

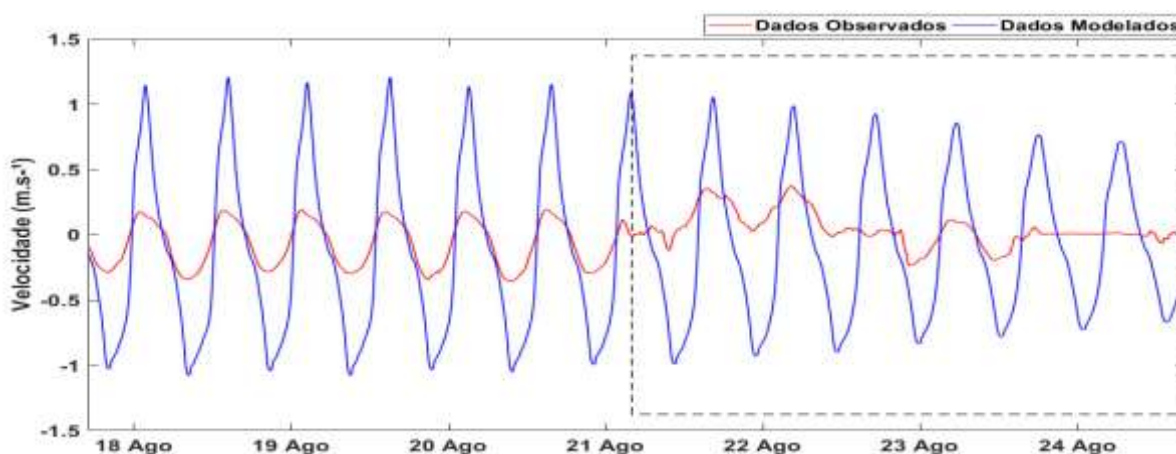
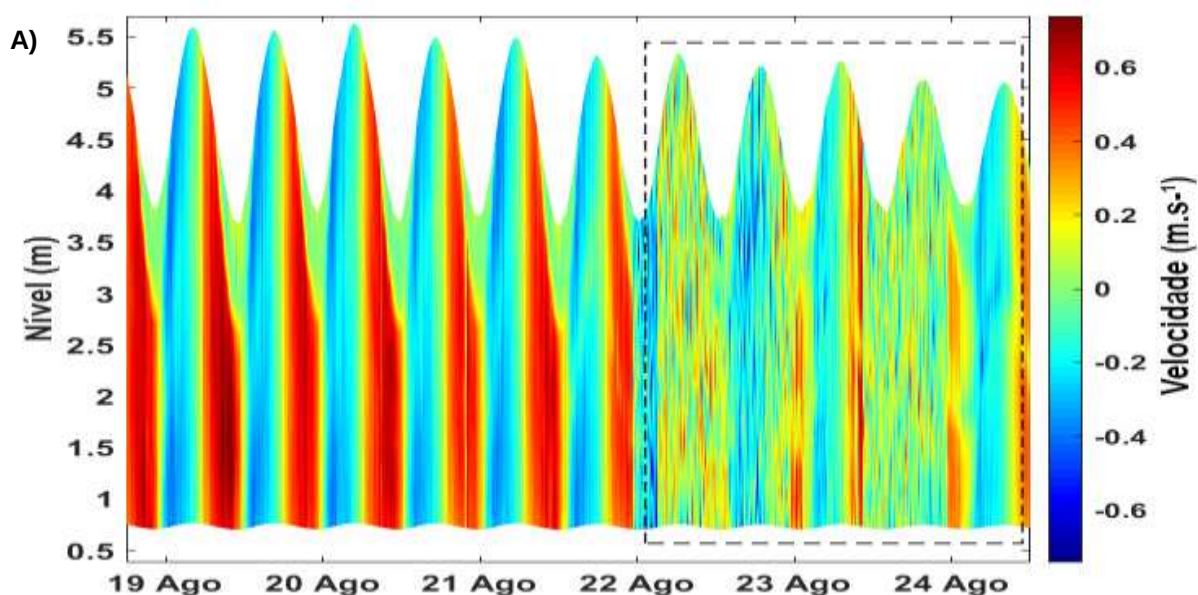


Figura 28. Comparação do componente transversal da velocidade (m.s^{-1}), entre dados observados, em vermelho e modelados, em azul, no ponto 2, de 17/08/16 20h00 a 24/08/16 13h00. Na área tracejada os dados foram desconsiderados por erro de leitura dos equipamentos de campo.

De modo geral, o modelo apresentou maior dificuldade em representar a velocidade transversal, superestimando os limites máximos e mínimos. A velocidade transversal modelada apresentou valores superiores à velocidade longitudinal modelada. Já a velocidade transversal observada apresenta valores inferiores à velocidade longitudinal observada.

O período utilizado para análise dos dados foi de 17/08/16 às 20h00 até o dia 21/08/16 às 03h00, sob maré de sizígia. Após esse período, o ADCP fundeado acusou erros de leitura demonstrado no gráfico pela caixa tracejada, provavelmente causado por uma movimentação inesperada ou outro problema operacional.

O perfil da velocidade média horizontal na direção longitudinal, observada e modelada no ponto 2 durante a maré de sizígia, é apresentado nas Figuras 29(A e B). Na velocidade observada foram considerados os dados até o dia 22/08/16 às 03h00. Observam-se maiores velocidades na maré vazante que justificam a média residual de $0,13 \text{ m.s}^{-1}$ no sentido vazante, sendo a velocidade próxima de zero nos momentos de estufa da maré. Na Figura 29B o modelo simula uma média residual menor de $0,10 \text{ m.s}^{-1}$ no sentido vazante, enquanto observam-se, no perfil modelado, maiores velocidades de enchente do que nos dados de campo.



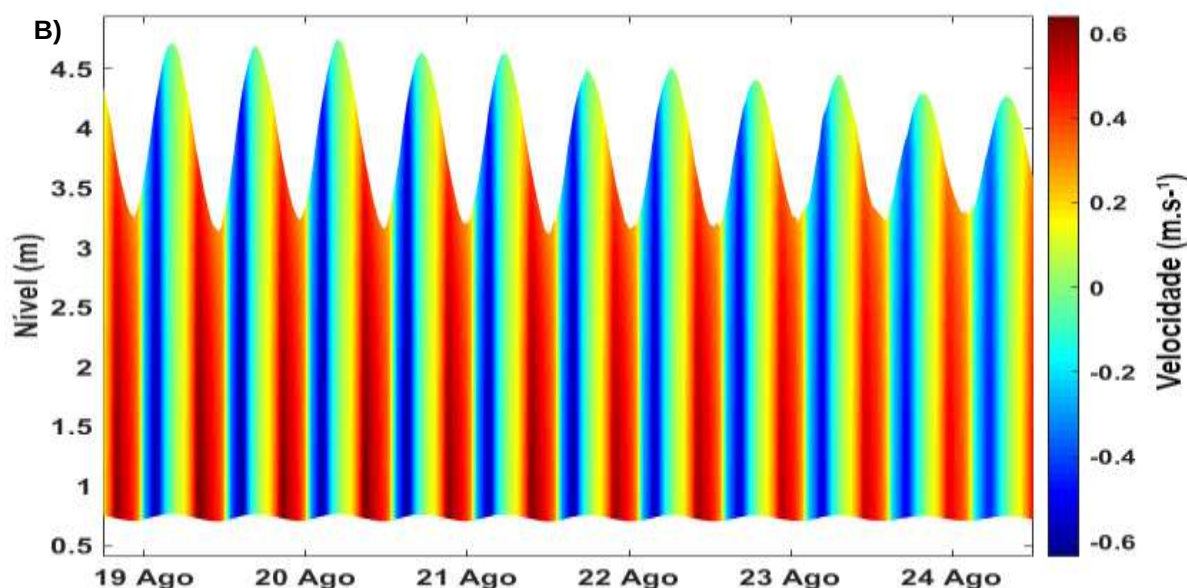


Figura 29. Perfil velocidade horizontal modelado no ponto (2), sendo velocidade observada (A) e modelada (B) no período de 18/08/16 17h00 a 24/08/16 10h00, área tracejada os dados foram desconsiderados por erro de leitura.

No perfil modelado observa-se maiores valores de velocidade tanto na vazante (velocidades positivas) como na enchente (velocidade negativas). Os resultados obtidos de concordância e precisão correspondem apenas ao período da sizígia do dia 18/08 à 22/08. No período de quadratura modelado, foram estimadas menores intensidades de correntes em ambos os sentidos, o que é uma característica de um estuário dominado pela maré.

Os resultados obtidos na validação do modelo referentes à comparação quantitativa de nível de água foram de valores médios de Skill superiores a 0,97 e RMSE 0,12 m. Os resultados de salinidade de superfície e fundo foram de valores médios Skill superiores a 0,90 e RMSE 3,37, enquanto os de velocidades médias horizontais, com valores médios Skill superiores a 0,77 e RMSE 0,28 m.s^{-1} . Esses resultados possibilitarão analisar a intrusão salina no estuário através da variação da vazão fluvial.

3.3 Simulação hidrodinâmica sob diferentes vazões históricas mínimas

Com o modelo validado, foram realizadas simulações com diferentes objetivos: para análise comparativa dos resultados obtidos na modelagem através de réguas linimétricas (método indireto) fornecidos pela ANA e através de micro molinete (método direto), em duas campanhas realizadas nos dias 18/08/2016 e 24/08/2016. Foram comparados os resultados de salinidade nos três pontos de observação e velocidade nas direções longitudinal e transversal no ponto 2. O modelo foi configurado com vazões de $3,4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ nos dias 18/08, 19/08 e 22/08/16, mantendo-se a vazão de $2,7 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ nos demais dias (Figura 30).

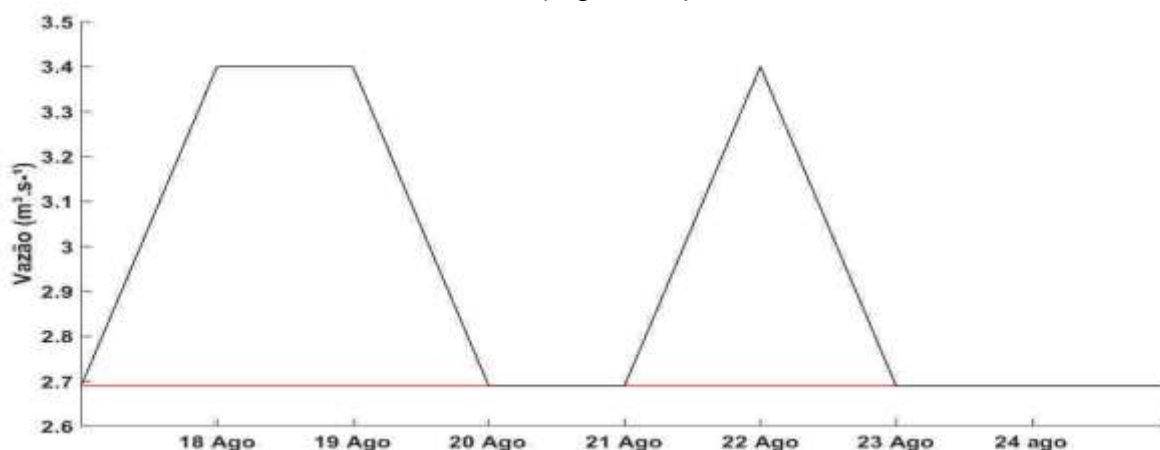


Figura 30. Comparação Vazão fluvial obtida através de micro molinete (método direto), em preto e régua linimétrica (método indireto), em vermelho, no período de 17/08/16 a 25/08/16.

Os resultados de salinidade superfície e fundo no ponto 1 são apresentados nas Figuras 31(A e B), respectivamente. Os resultados apresentam pequena diferença, tanto em superfície como fundo. Na Figura 31C, observam-se maiores diferenças no início do período de sizígia, resultado esperado pela maior vazão observada no período.

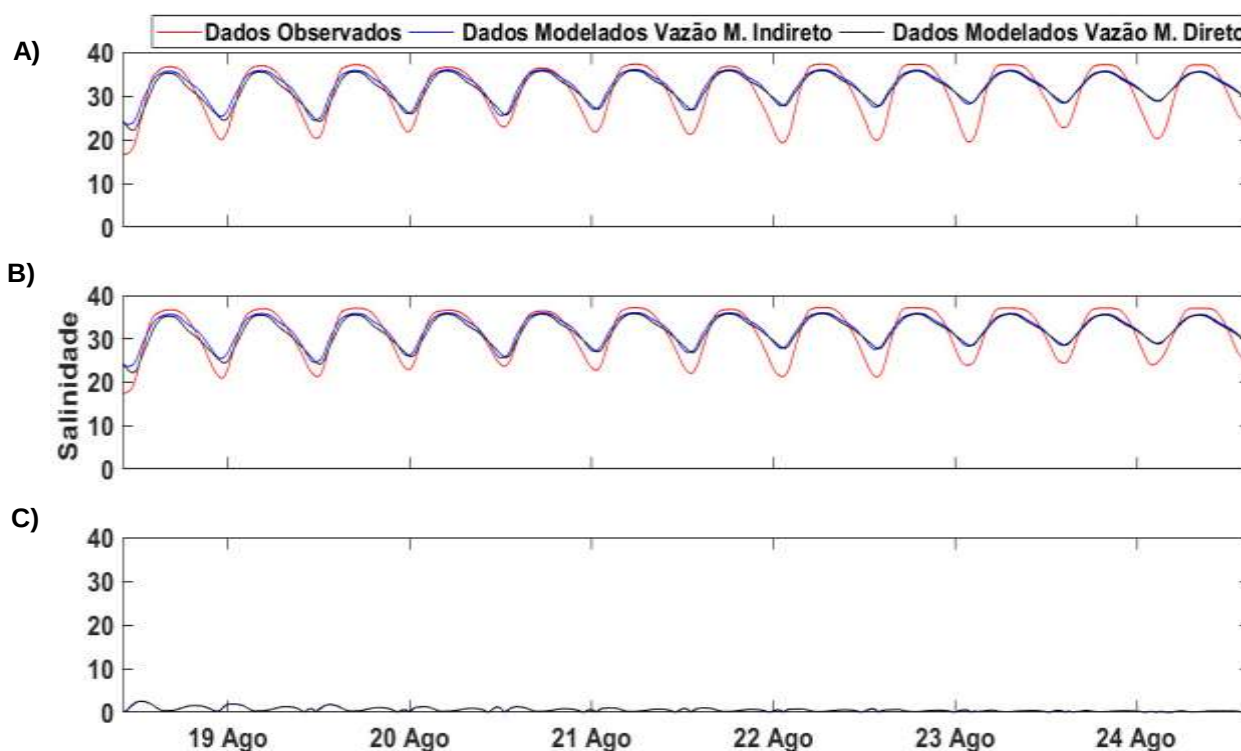


Figura 31. Comparação de salinidade entre dados observados, em vermelho, modelados vazão método indireto, em azul e modelados vazão método direto, em preto, no ponto 1, sendo superfície (A), fundo (B) e diferença entre modelados (C), no período de 18/08/16 10h00 a 24/08/16 15h00.

A pequena diferença nesse ponto de observação pode estar associada a localização mais próxima a foz do estuário, o que justifica uma menor influência da vazão fluvial nos níveis de salinidade, tanto em superfície como fundo.

Os resultados de salinidade de superfície e fundo no ponto 2 são apresentados nas Figuras 32(A e B), respectivamente. Observa-se, tanto na superfície como no fundo, significativa melhora nos resultados modelados com os dados de vazão obtidos através de medições diretas (micro molinetes) com valores de Skill 0,97 e RMSE de 2,45 superfície e Skill 0,96 e RMSE de 2,50 no fundo. Na Figura 32C, a diferença entre as modelagens é acima de 6 no período da maré vazante e muito pequena na maré enchente.

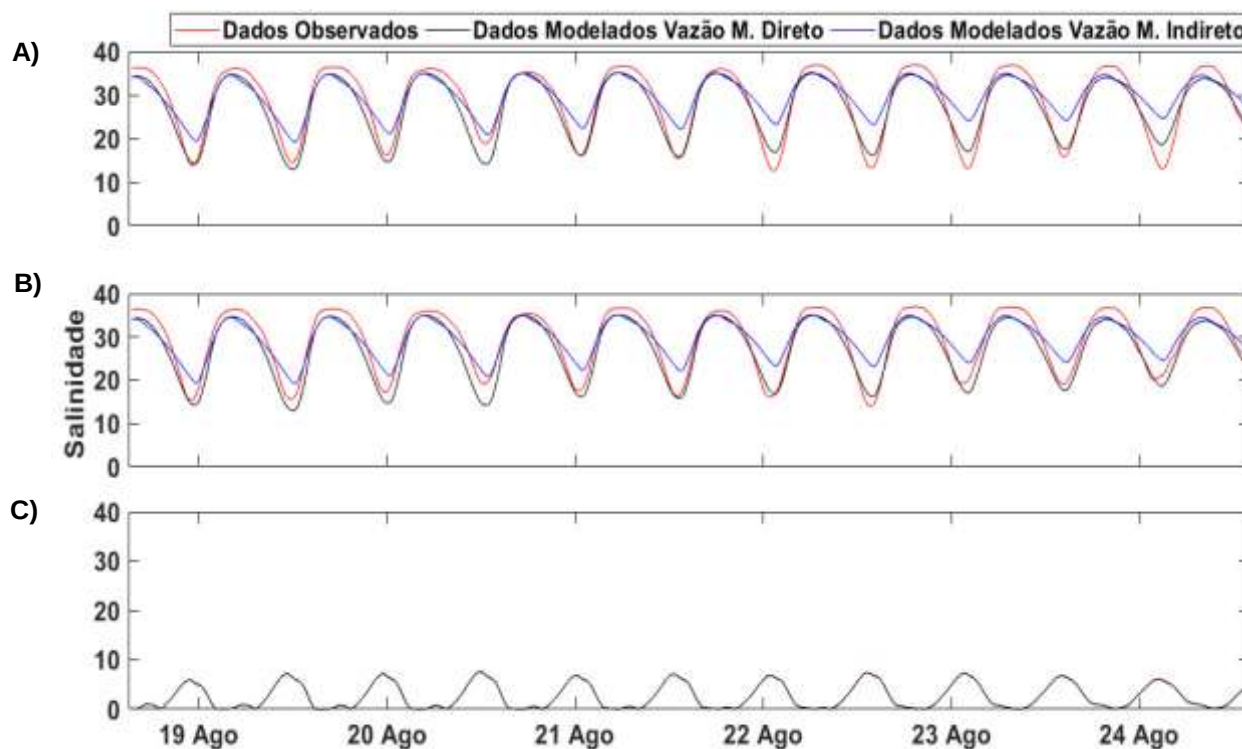


Figura 32. Comparação de salinidade entre dados observados, em vermelho, modelados vazão método indireto, em azul e modelados vazão método direto, em preto, no ponto 2, sendo superfície (A), fundo (B) e diferença entre modelados (C), no período de 18/08/16 10h00 a 24/08/16 15h00.

Na Figura 32C, observam-se diferenças somente no período da maré vazante, que pode ser explicado pelo fato de maior influência da vazão fluvial na mistura, ocasionando uma diminuição expressiva na salinidade. Observa-se a não ocorrência de diferenças entre os valores de salinidade de superfície e fundo, característica de um estuário bem misturado.

Os resultados de salinidade de superfície e fundo no ponto 3, são apresentados nas Figuras 33(A e B), respectivamente. Os resultados apresentados são semelhantes ao ponto 2, com melhora nos resultados modelados com os dados de vazão obtidos através de medições diretas (micro molinetes), com parâmetro Skill de 0,96 e RMSE de 2,93 para superfície e Skill de 0,97 e RMSE de 2,61 para o fundo.

Na Figura 33C, observam-se maiores diferenças na maré vazante com valores de salinidade acima de 4, com maiores diferenças registradas no início do período de quadratura.

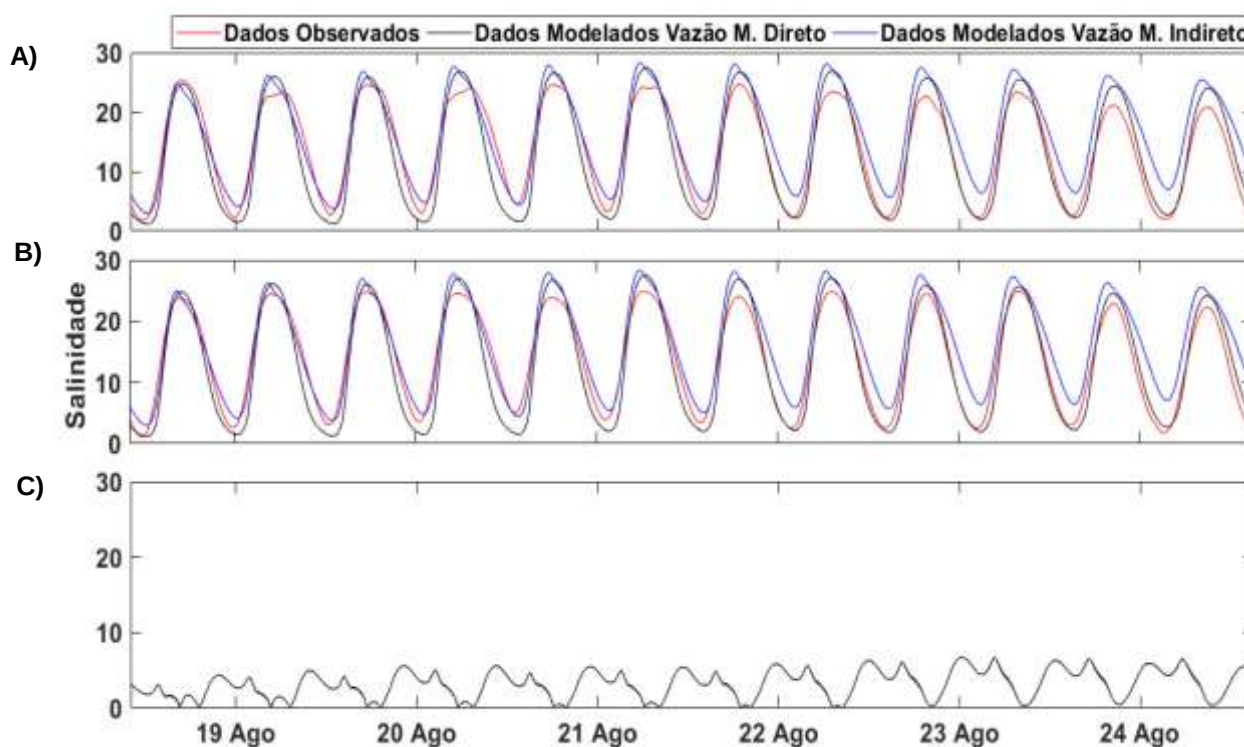


Figura 33. Comparação de salinidade entre dados observados, em vermelho, modelados vazão método indireto, em azul e modelados vazão método direto, em preto, no ponto 3, sendo superfície (A), fundo (B) e diferença entre modelados (C), no período de 18/08/16 10h00 a 24/08/16 15h00.

A velocidade da corrente na coluna de água na direção longitudinal no ponto 2, é apresentada na Figura 34. Observa-se uma redução na velocidade máxima na modelagem com os dados de vazão obtidos através de medições diretas (micro molinetes), ambos os sentidos.

Na direção transversal a velocidade da corrente na coluna de água no ponto 2, é apresentada na Figura 35. Os resultados modelados com os dados de vazão obtidos através de medições diretas apresentam significativa melhora em relação aos dados observados.

O período utilizado para análise dos dados foi de 18/08/16 às 17h00 até o dia 22/08/16 às 03h00, sob maré de sizígia. Após esse período, o ADCP fundeado acusou erros de leitura demonstrado no gráfico pela caixa tracejada, provavelmente causado por uma movimentação inesperada.

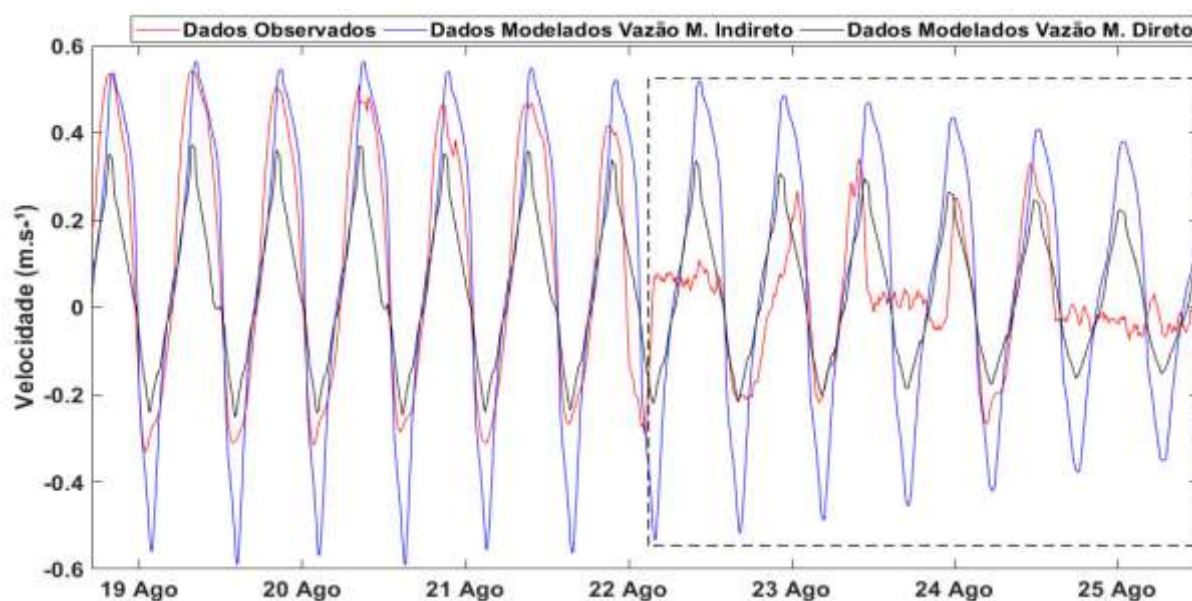


Figura 34. Comparação do componente longitudinal da velocidade (m.s^{-1}), entre dados observados, em vermelho, modelados vazão método indireto, em azul e modelados vazão método direto, em preto, no ponto 2, de 18/08/16 17h00 a 25/08/16 15h20. Na área tracejada os dados foram desconsiderados por erro de leitura dos equipamentos de campo.

Observam-se melhores resultados nos dados modelados com os dados de vazão obtidos através de medições diretas (micro molinetes) em relação aos dados observados, nas velocidades (negativas) no momento da maré enchente, podendo estar relacionados ao efeito de uma maior vazão fluvial. Já na maré vazante, (velocidades positivas) apresentam uma diferença de aproximadamente $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ em relação ao coletado.

Na comparação do componente longitudinal de velocidade, os resultados apresentaram um pequeno decréscimo no parâmetro Skill de 0,93 para 0,91 e uma pequena melhora no RMSE de $0,16 \text{ m.s}^{-1}$ para $0,14 \text{ m.s}^{-1}$.

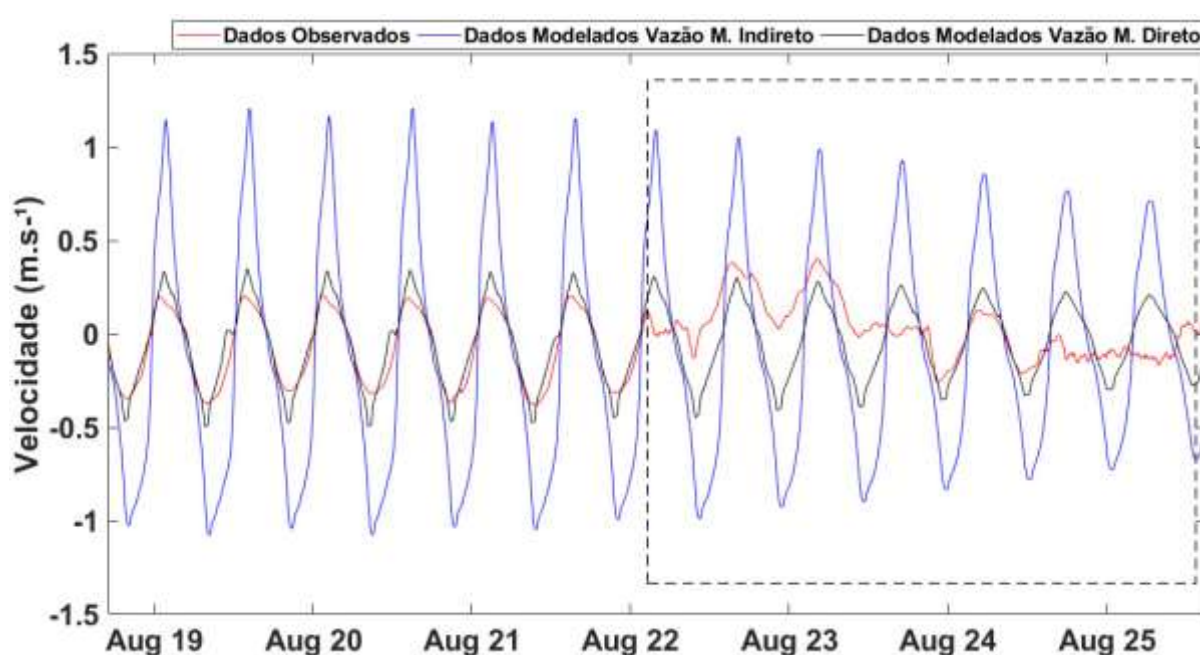


Figura 35. Comparação do componente transversal da velocidade (m.s^{-1}), entre dados observados, em vermelho, modelados vazão método indireto, em azul e modelados vazão método

direto, em preto, no ponto 2, de 18/08/16 17h00 a 25/08/16 15h20. Na área tracejada os dados foram desconsiderados por erro de leitura dos equipamentos de campo.

Observa-se significativa melhora nos resultados modelados com dados de vazão obtidos através do método direto, em ambos os sentidos. Na comparação do componente transversal de velocidade os resultados apresentam melhora com Skill de 0,62 para 0,96 e RMSE de $0,42 \text{ m.s}^{-1}$ para $0,08 \text{ m.s}^{-1}$.

Nas simulações de intrusão salina o modelo foi configurado com vazões mínimas representando períodos de seca. O modelo foi forçado com descargas de 0,2; 2; 4 e $6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, e a intrusão foi analisada no pico da maré de sizígia ocorrida no dia 19/08/2016 às 06h00.

Nas Figuras 36(A e B), é apresentado o perfil longitudinal de salinidade para vazão fluvial de $0,2 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, no qual a intrusão salina atingiu ~17 km a partir da foz do estuário, chegando a ~1,5 km do ponto 7 do modelo.

Com o aumento da vazão fluvial espera-se o recuo da intrusão salina. Nas Figuras 37(A e B), é apresentado o perfil longitudinal de salinidade para vazão fluvial de $2 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Observa-se considerável recuo na intrusão salina, atingindo ~13km a partir da foz do estuário, passando alguns metros do ponto 5 do modelo.

Nas Figuras 38(A e B), é apresentado o perfil longitudinal de salinidade para vazão fluvial de $4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, no qual a intrusão salina atingiu ~11km a partir da foz do estuário.

Nas Figuras 39(A e B), é apresentado o perfil longitudinal de salinidade para vazão fluvial de $6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, no qual a intrusão salina atingiu ~9,5 km a partir da foz do estuário.

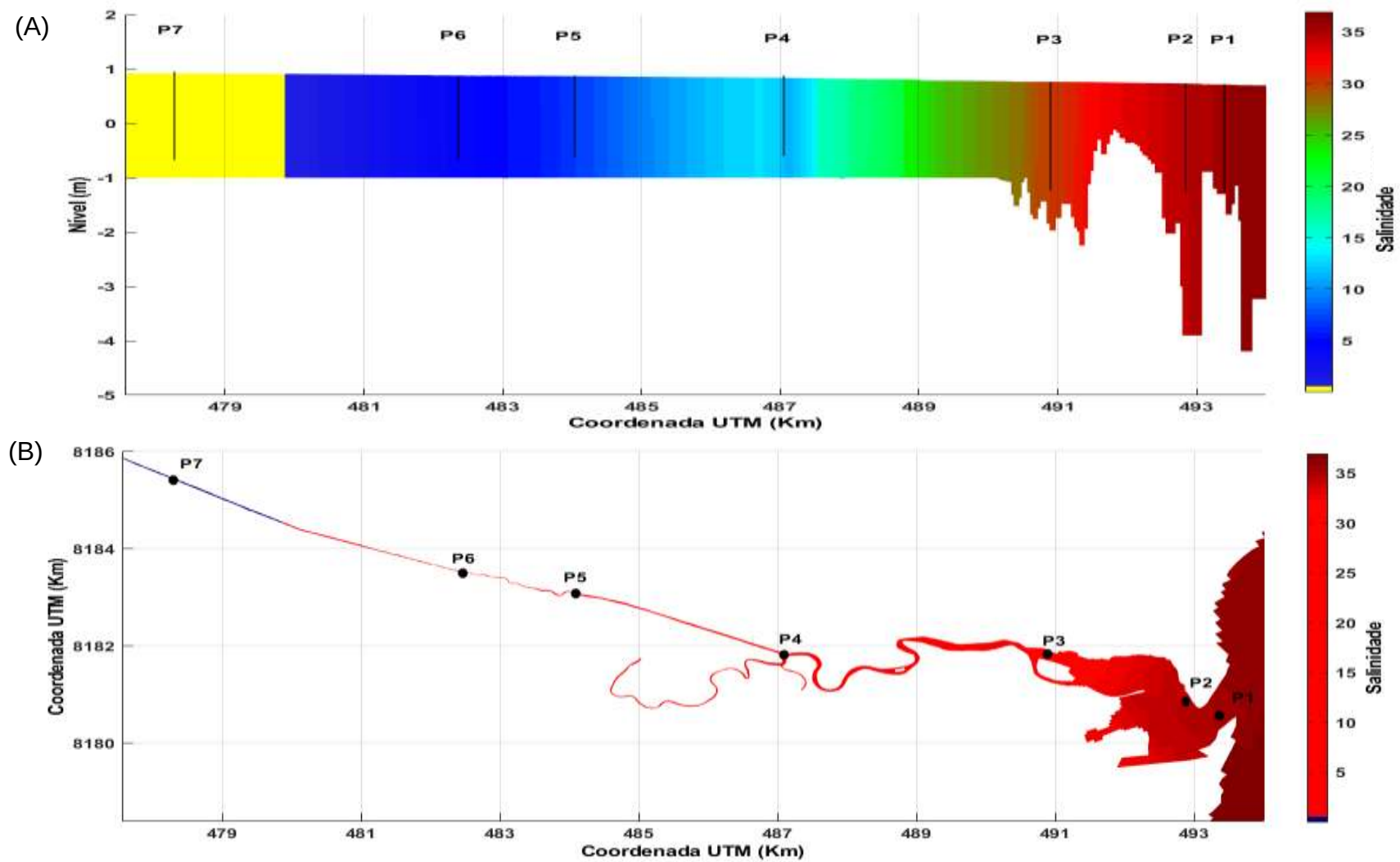


Figura 36. Perfil longitudinal de salinidade forçado com vazão $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, para maré de sizígia de 19/08/16 às 06h00.

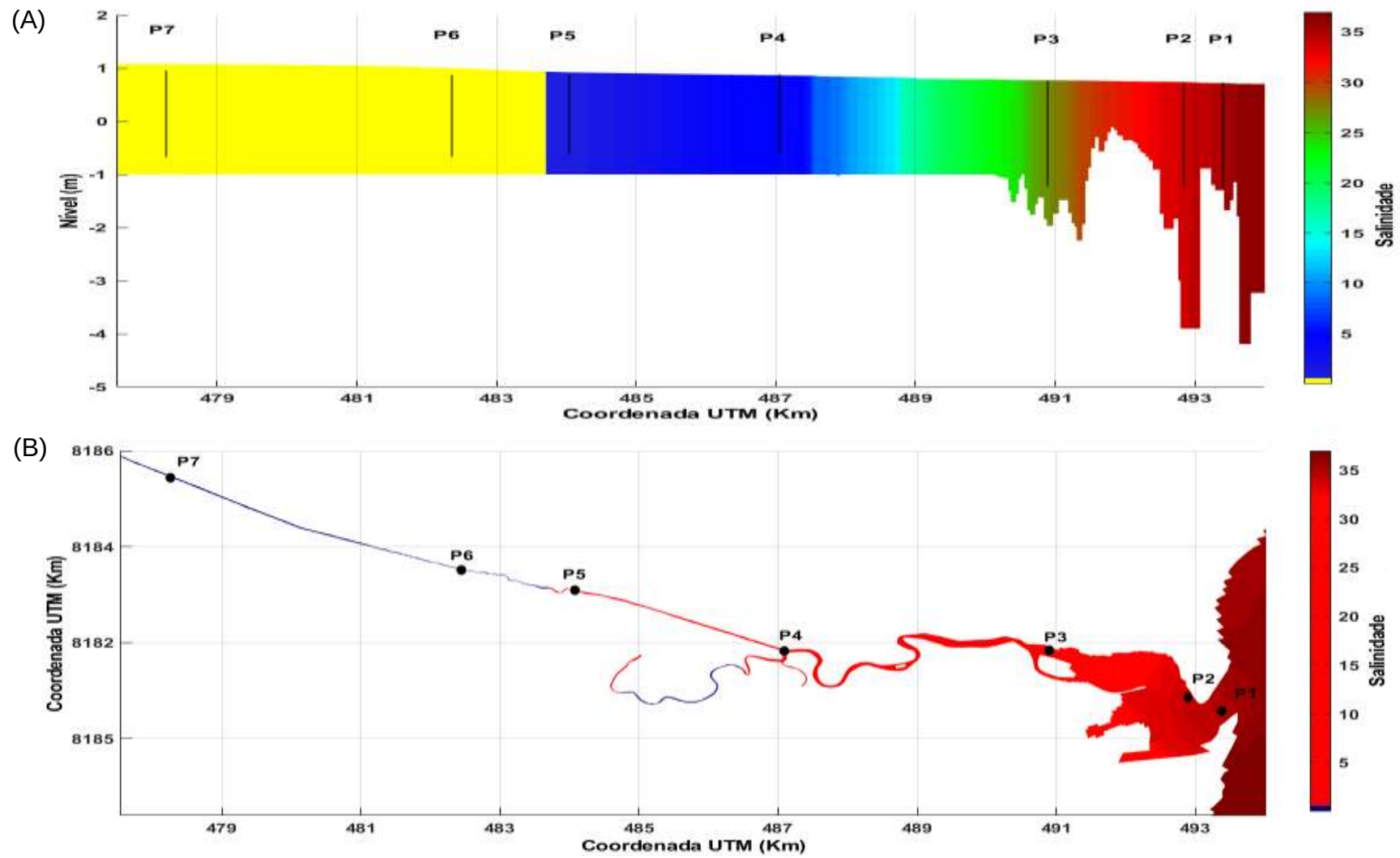


Figura 37. Perfil longitudinal de salinidade forçado com vazão $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, para maré de sizígia de 19/08/16 às 06h00.

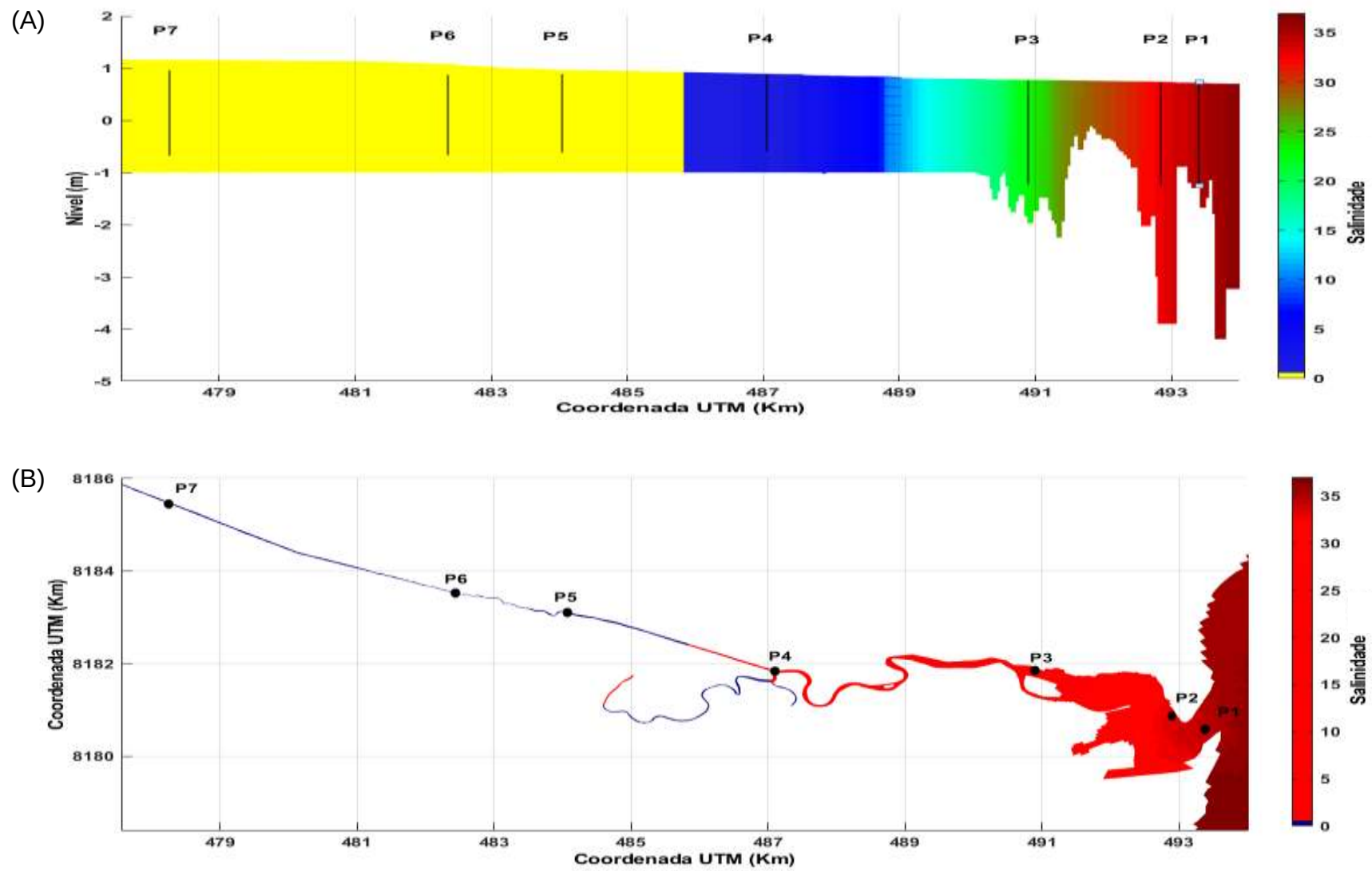


Figura 38. Perfil longitudinal de salinidade forçado com vazão $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, para maré de sizígia de 19/08/16 às 06h00.

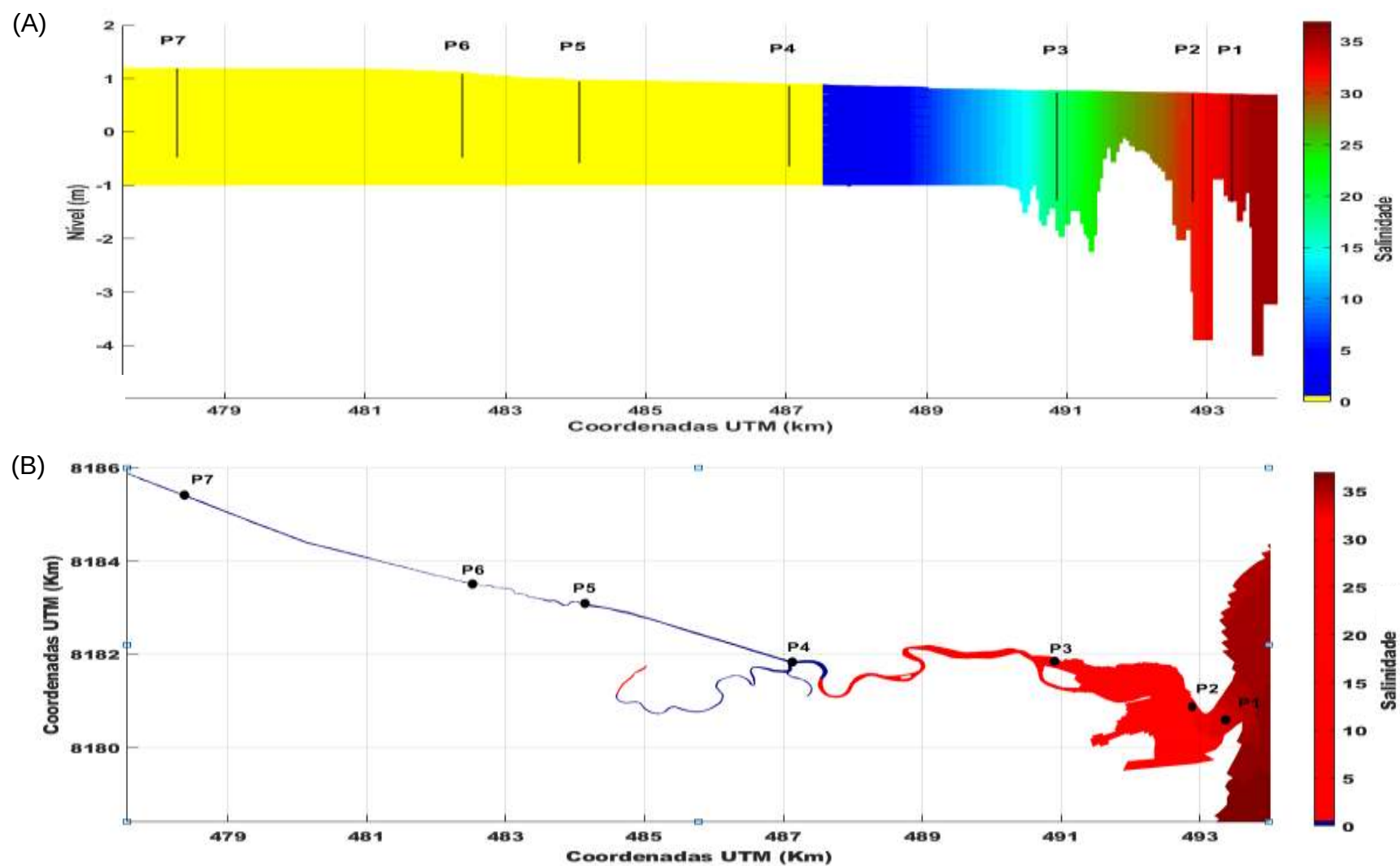


Figura 39. Perfil longitudinal de salinidade forçado com vazão $6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, para maré de sizígia de 19/08/16 às 06h00.

O modelo apresentou coerência nos resultados obtidos, simulando a diminuição da intrusão salina em virtude do aumento da vazão fluvial, características de um estuário dominado pela maré. Outra característica identificada é de um ambiente sem estratificação vertical, característica de um ambiente bem misturado.

4. CONCLUSÕES

O estudo das características hidrodinâmicas de ambientes estuarinos é uma tarefa complexa, mas o modelo demonstrou ser uma ferramenta válida e de grande auxílio, apresentando bons resultados para os testes estatísticos aplicados na calibração e validação. O modelo possibilitou simular diferentes cenários para o estuário local, principalmente com relação à vazão fluvial, sendo o estuário um ambiente controlado pela ação da maré com pequena contribuição da vazão fluvial. A seguir, seguem as principais conclusões relacionadas à aplicação da modelagem hidrodinâmica.

1. As maiores dificuldades na configuração do modelo foram relacionadas à obtenção de dados do domínio. Os dados de batimetria se limitam a uma pequena porção do estuário, o que obrigou a se utilizar de uma batimetria fixa a montante dos pontos de observação
2. O rio Buranhém possui uma única estação fluviométrica, o que limita tanto a comparação dos dados registrados como um possível preenchimento de séries defeituosas através da comparação dos dados
3. Através da simulação com vazões observadas, o modelo apresentou expressiva melhora nos resultados. Essa constatação indica uma necessidade de melhor avaliação da qualidade e fidedignidade dos dados de vazão fluvial fornecidos pela estação fluviométrica da ANA, preferencialmente por meio e comparação de dados *in situ* e via métodos diretos, como micromolinetes e similares acústicos
4. A pequena estratificação vertical, característica de um estuário bem misturado, identificada nos dados de salinidade observados, não foi representada pelo modelo, indicando a necessidade de um melhor ajuste nos parâmetros de viscosidade e difusividade tanto horizontal como vertical, assim como nos valores de vazão e na representação batimétrica e morfológica no domínio
5. Diante das circunstâncias da modelagem, espera-se que o modelo tenha subestimado a intrusão salina sob condições de vazões fluviais mínimas históricas, dadas as limitações na reprodução da estratificação vertical de sal

Conclui-se que o modelo demonstrou ser uma ferramenta válida para compreensão da hidrodinâmica no domínio do estuário do rio Buranhém. A partir de ajustes e aprimoramentos especialmente nas condições de contorno, será possível utilizar esse modelo em outros estudos relacionados à qualidade da água e transporte de sedimentos.

4.1 Sugestões para trabalhos futuros

Aprofundar na compreensão das razões que levaram o modelo a não representar bem condições de maior estratificação vertical de sal sob condições de maré de quadratura

Incluir dados de vento no modelo para estudos que levem em conta a interação entre zona estuarina e a zona costeira.

REFERÊNCIAS

- Akter, R. *et al.* (2019) The Dominant Climate Change Event for Salinity Intrusion in the GBM Delta. **Climate**, v. 7, n. 5, p. 69. <<http://dx.doi.org/10.3390/cli7050069>>.
- Allen, J. I.; Somerfield, P. J.; Gilbert, F. J. (2007) Quantifying uncertainty in high-resolution coupled hydrodynamic-ecosystem models. **Journal of Marine Systems**, v. 64, n. 1-4, p. 3–14. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2006.02.010>>.
- ANA (2019) **Agência Nacional de Águas**. Disponível em: <<http://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html>>.
- Andutta, F. P. (2011) O Sistema Estuarino dos rios Caravelas e Peruípe (Bahia): Observações , simulações , tempo de residência e processos difusivo e advectivo. Tese de Doutorado, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.
- Andutta, F. P. *et al.* (2013) Temporal variations of temperature, salinity and circulation in the Peruípe river estuary (nova Viçosa, BA). **Continental Shelf Research**, v. 70, p. 36–45. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2013.03.013>>.
- Andutta, F. P. *et al.* (2016) An assessment of transport timescales and return coefficient in adjacent tropical estuaries. **Continental Shelf Research**, v. 124, p. 49–62. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2016.05.006>>.
- Augusto, C. *et al.* (2013) Residual fluxes of suspended sediment in a tidally dominated tropical estuary. **Continental Shelf Research**, v. 70, p. 27–35. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2013.03.006>>.
- Batista, S. S.; Harari, J. (2017) Modelagem da dispersão de coliformes termotolerantes e enterococos em duas enseadas na região costeira de Ubatuba (SP), Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 403–413. <<http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016158594>>.
- Cameron, W.M.; Pritchard, D. W. (1963) The sea: ideas and observations on progress in the study of the seas. **Interscience**, p. p. 306–324.
- Chatzirodou, A.; Karunarathna, H. (2014) Impacts of Tidal Energy Extraction on Sea Bed Morphology. **Coastal Engineering Proceedings**, v. 1, n. 34, p. 33. <<http://dx.doi.org/10.9753/icce.v34.sediment.33>>.
- Couceiro, M. A. A.; (2015) Dinâmica de sedimentos coesivos em um estuário altamente estratificado: rio Araranguá , SC. Tese de Doutorado, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.
- Deltares. (2014) **3D/2D modelling suite for integral water solutions**, Editors Deltares, Delft, Netherlands, p. 710.
- Dev, M.; Chai, T.; Draxler, R. R. (2014) Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geoscientific Model Development**, v. 7, p. 1247–1250.

<<http://dx.doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>>.

Dias, C. A. *et al.* (2018) Impactos do rompimento da barragem de Mariana na qualidade da água do rio Doce. **Revista Espinhaço**, v. 7, n. 1, p. 21–35.

Dongeren, A. Van. (2009) Delft3D-Modelling of Hydrodynamic and Water Quality Processes in San Diego Bight. n. 15, p. 1–5, 2009.

Guerra-Chanis, G. *et al.* (2019) Saltwater intrusion in a subtropical estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 217, p. 28-36. <<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.10.016>>.

Harari, J. (2015) **Fundamentos de Modelagem Numérica em Oceanografia**, Editora Sea & Limno Technology, São Paulo, 246 p.

Ji, Z. G. (2017) **Hydrodynamics and water quality: Modeling rivers, lakes, and estuaries**, 2nd Edition, Editors JohnWiley and Sons, Inc, Hoboken, NJ. <http://doi.wiley.com/10.1002/9781119371946>

Kjferve, B. (1987) Estuarine Geomorphology and Physical Oceanography. **Estuarine Ecology**, p. 47–78.

Legates, D. R.; McCabe JR., G. J. (2005) Evaluating the Use of “Goodness of Fit” Measures in Hydrologic and Hydroclimatic Model Validation. **Water Resources Research**, v. 35, n. 1, p. 233–241. <<http://dx.doi.org/10.1029/1998WR900018>>.

Miranda, L. S.; Marques, A.C. (2016) Hidden impacts of the Samarco mining waste dam collapse to Brazilian marine fauna – an example from the staurozoans (Cnidaria). **Biota Neotropica**. 16(2): e20160169. <<http://dx.doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2016-0169>>.

Miranda, L. B.; Castro, B. M.; Kjferve, B. (2002) **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 413 p.

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2019) **Historical El Nino/ La Nina episodes (1950-present)**. Disponível em: <https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php>. Acesso em: 7 maio.

Pereira, M. D. *et al.* (2010) Hidrodinâmica e Transporte de Material Particulado em Suspensão Sazonal em um Estuário Dominado por Maré: Estuário de Caravelas (Ba). **Revista Brasileira de Geofísica**, v.28, n.3, p.427-444.

Rahman, A.; Venugopal, V. (2017) Parametric analysis of three dimensional flow models applied to tidal energy sites in Scotland. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 189, p. 17–32. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2017.02.027>>.

Roversi, F.; Rosman, P. C. C.; Harari, J. (2016) Análise da renovação das águas do Sistema Estuarino de Santos usando modelagem computacional. **Revista Ambiente e Água**, v. 9, n. 3, p. 445–458. <<http://dx.doi.org/10.4136/1980-993X>>.

Santos, L. (2010) Modelagem numérica da dinâmica do sistema estuarino Caravelas - Peruípe, BA, Dissertação de Mestrado, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.

Schettini, C. A. F.; Valle-Levinson, A.; Truccolo E. C. (2017) Circulation and transport in short, low-inflow estuaries under anthropogenic stresses. **Regional Studies in Marine Science**, v. 10, p. 52-64 < <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2017.01.004>>.

Seiler, L. M. N. *et al.* (2015) Evaluation of hydrologic influence on water quality variation in a coastal lagoon through numerical modeling. **Ecological Modelling**, v. 314, p. 44–61. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.07.021>>.

Siegle, E.; Dottori, M.; Villamarin, B. C. (2017) Hydrodynamics of a subtropical tidal flat: Araçá Bay, Brazil. **Ocean & Coastal Management**, n. October, p. 0–1. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.11.003>>.

Silvia, A. C. R. de S. *et al.* (2018) Hydrodynamics of a tropical estuary: Buranhém River, Porto Seguro, Brazil. **RBRH**, v. 23, n. 0. <<http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.0318170141>>.

Silvia, A. C. R. S. (2016) Hidrodinâmica do Estuário do Rio Buranhém, Porto Seguro – Bahia. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação Mestrado em meio ambiente e Recursos Hídricos, Itajubá, 107 p.

Silva, G. M. F. (2019) Influência do uso e ocupação do solo na disponibilidade hídrica da bacia do rio Buranhém. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Ambientais, UFSB e IFBA, Porto Seguro, 86 p.

PMPS/SMA, (2015) Prefeitura Municipal de Porto Seguro/ Secretaria Municipal de Meio Ambiente. Plano de Manejo Parque Natural Municipal do Recife de Fora. p. 214.

Valle-Levinson, A.; Schettini, C. A. F. (2016) Fortnightly switching of residual flow drivers in a tropical semiarid estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 169, p. 46-55. < <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.008>>.

Van Waveren, R. H. *et al.* (2008) Chapter Two Good Modelling Practice. **Developments in Integrated Environmental Assessment**, v. 3, p. 15-31. <[http://dx.doi.org/10.1016/S1574-101X\(08\)00602-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1574-101X(08)00602-9)>

Willians, J. J.; Esteves, L. S. (2017) Guidance on Setup, Calibration, and Validation of Hydrodynamic, Wave, and Sediment Models for Shelf Seas and Estuaries. **Advances in Civil Engineering**. Article ID 5251902, p. 25. <<http://dx.doi.org/10.1155/2017/5251902>>

Willmott, C. J. *et al.* (1985) Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995–9005. <<http://dx.doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>>.