



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
CURSO DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

FELIPE CONRADO FREITAS DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DA CIRCULAÇÃO DO ESTUÁRIO DO RIO PIRANGI (CE) COM O
MODELO DELFT3D**

FORTALEZA

2022

FELIPE CONRADO FREITAS DE OLIVEIRA

ANÁLISE DA CIRCULAÇÃO DO ESTUÁRIO DO RIO PIRANGI (CE)
COM O MODELO DELFT3D

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O47a Oliveira, Felipe Conrado Freitas de.
Análise da circulação do estuário do Rio Pirangi (CE) com o modelo Delft3D / Felipe Conrado Freitas de Oliveira. – 2022.
49 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso de Oceanografia, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.
1. Modelagem hidrodinâmica. 2. Estuário hipersalino. 3. Delft3D. 4. Oceanografia física. I. Título.
CDD 551.46
-

FELIPE CONRADO FREITAS DE OLIVEIRA

ANÁLISE DA CIRCULAÇÃO DO ESTUÁRIO DO RIO PIRANGI (CE)
COM O MODELO DELFT3D

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Oceanografia.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Bárbara Oliveira Paiva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Pedro Paulo de Freitas
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a mim, por ter conseguido continuar e finalizar essa etapa em uma época tão conturbada como a pandemia de COVID.

À minha família, em especial aos meus pais e meus avós, por terem acolhido as minhas escolhas e me apoiarem e incentivarem o meu melhor.

Ao professor Carlos Teixeira, por ter sido sempre solícito quanto às minhas dúvidas e indagações e por ter me aconselhado e me orientado para a realização deste projeto. Sou imensamente grato pelo suporte que ele me deu durante a graduação.

Ao Derley, por ter sido o meu principal suporte nos momentos finais do trabalho e por me fazer acreditar em meu potencial em períodos de desânimo.

À Mariana e Thays, amigas que estão ao meu lado desde o início da graduação. É gratificante ver o amadurecimento acadêmico que tivemos ao longo do curso e saber que eu pude contar com o auxílio delas sempre que precisasse.

À Marina, por todos os anos de amparo mútuo na vida acadêmica. Seja em uma tarde no laboratório tomando café e reclamando da validação da maré ou em frente ao espelho nos arrumando para alguma festa ruim, ela me apoiou em meus momentos ruins e confraternizou nas minhas conquistas.

Aos meus amigos e colegas de turma, Monique, Dávila, Camille, Letícia, Caio, Ruama, Débora, Hélio, Ben, Eduarda e todos os outros, pelo apoio coletivo, confraternizações, grupos de estudo, conversas, enfim, “por terem tornado a graduação mais humana” (MELO, 2019).

Aos companheiros de laboratório, Rafael, Marina, Bárbara, Gustavo e Vitória, pela troca de experiências e pelas conversas durante o café.

Ao Laboratório de Dinâmica Costeira/UFC e ao Prof. Dr. Carlos Augusto França Schettini, por fornecerem os dados para a realização deste trabalho.

E um agradecimento especial ao Prof. Tristan Rousseau, ao qual fui monitor por mais de 3 anos e que me possibilitou uma ótima vivência para o ensino.

RESUMO

O estuário do Rio Pirangi, localizado no litoral Leste do Ceará, é classificado como um estuário raso e de barra arenosa, estando sob influência de clima semiárido. Durante o período seco, a redução da vazão transforma o Pirangi em um estuário hipersalino. O objetivo deste trabalho é analisar a circulação do estuário do Rio Pirangi utilizando um modelo hidrodinâmico. Para isto, fez-se uma simulação usando o modelo Delft3D de dois cenários da circulação do estuário e da região costeira adjacente para o ano de 2010 entre os meses de Fevereiro-Março e Outubro-Novembro, representando respectivamente os períodos seco e chuvoso na região. Como forçante, foram usados dados meteorológicos locais de vento uniformemente em toda a área de domínio. Nos contornos abertos da região costeira, o modelo foi forçado com os principais constituintes harmônicos de maré da região e na extensão superior do estuário foi adicionada uma descarga com valores de vazão e salinidade diferentes para cada simulação. O estuário mostrou uma assimetria de maré com dominância de enchente. Os valores máximos de velocidade longitudinal para enchente e vazante foram de 0,7 m/s e 0,6 m/s, respectivamente. A velocidade residual do estuário apresentou pouca variação vertical no período seco, com valores menores que 2 cm/s. No período chuvoso, a variação foi de aproximadamente 11 cm/s na superfície e -1,5 cm/s no fundo. O estuário mostrou um perfil bem misturado verticalmente nas duas simulações, exceto por um pequeno gradiente na costa durante o período chuvoso. Houve diferença do gradiente longitudinal de salinidade entre as simulações, onde no período seco o estuário apresentou valores maiores de salinidade em relação ao oceano, e valores menores de salinidade que o oceano no período chuvoso.

Palavras-chave: Modelagem Hidrodinâmica; Estuário Hipersalino; Delft3D; Oceanografia Física.

ABSTRACT

The estuary of the Pirangi River, located on the east coast of Ceará, is classified as a shallow estuary with a sandy bar, being under the influence of a semi-arid climate. During the dry period, the reduced flow transforms the Pirangi into a hypersaline estuary. The objective of this work is to analyze the circulation of the Pirangi River estuary using a hydrodynamic model. For this, a simulation was made using the Delft3D model of two scenarios of the circulation of the estuary and the adjacent coastal region for the year 2010 between the months of February-March and October-November, representing respectively the dry and wet periods in the region. As a forcing, local wind meteorological data were used uniformly across the domain area. In the open boundaries of the coastal region, the model was forced with the main tidal harmonic constituents of the region and in the upper extension of the estuary, a discharge with different flow and salinity values was added for each simulation. The estuary showed a flood-dominant tidal asymmetry. The maximum values of longitudinal velocity were 0.7 m/s for the flood and 0.6 m/s for the ebb. The residual velocity of the estuary didn't vary a lot in the dry period with values lower than 2 cm/s. In the wet season, the variation was approximately 11 cm/s at the surface and -1.5 cm/s at the bottom. The estuary showed a well-mixed profile vertically in both simulations, except for a small gradient along the coast during the wet season. There was a difference in the longitudinal salinity gradient between the simulations, the dry period values of salinity were higher in the estuary in relation to the ocean, and lower salinity values than the ocean in the wet season.

Keywords: Hydrodynamic Modeling; Hypersaline Estuary; Delft3D; Physical Oceanography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Relação entre valores de salinidade, temperatura e densidade da água estuarina comparada a água marinha.....	15
Figura 2	–	Localização da área de estudo.....	18
Figura 3	–	Distribuição da pluviometria anual total em mm na bacia hidrográfica do Rio Pirangi.....	19
Figura 4	–	Precipitação climatológica do estado do Ceará entre 1981 a 2010.....	20
Figura 5	–	Hidrograma diário da estação fluviométrica Cristais entre Janeiro de 1973 a Dezembro de 1979.....	20
Figura 6	–	Vazão média mensal do posto fluviométrico Itapeim entre Janeiro de 2000 e Junho de 2021.....	21
Figura 7	–	Batimetria dos grids costa e estuário.....	24
Figura 8	–	Batimetria do grid estuário.....	24
Figura 9	–	Localização do posto meteorológico de Jaguaruana e do marégrafo do posto de Jaguaribe.....	26
Figura 10	–	Tendência dos ventos de Jaguaruana com dados horários para o ano de 2010.....	26
Figura 11	–	Localização dos pontos de observação do grid estuário.....	28
Figura 12	–	Elevação do nível do mar extraída da simulação do período seco para o estuário do Rio Pirangi.....	29
Figura 13	–	Comparação de altura do nível do mar bruta entre dados observados e dados de saída do modelo para o dia 08/11/10.....	31
Figura 14	–	Comparação de magnitude da corrente longitudinal entre dados observados e dados de saída do modelo para o dia 08/11/10.....	31
Figura 15	–	Variação temporal do perfil vertical de velocidade longitudinal no ponto P2 no período seco.....	32
Figura 16	–	Variação temporal do perfil vertical de velocidade longitudinal no ponto P2 no período chuvoso.....	33
Figura 17	–	Residual da velocidade longitudinal do estuário no ponto P2.....	34
Figura 18	–	Transecto do grid estuário para os perfis longitudinais.....	34
Figura 19	–	Perfil longitudinal de salinidade do estuário no período seco e com maré de baixamar de sizígia.....	35
Figura 21	–	Perfil longitudinal de salinidade do estuário no período seco e com maré de preamar de sizígia.....	36

Figura 22	–	Mapa de salinidade superficial do estuário no período seco e com maré de baixamar de sizígia.....	36
Figura 23	–	Perfil longitudinal de salinidade do estuário no período chuvoso e com maré de baixamar de sizígia.....	37
Figura 24	–	Mapa de salinidade superficial do estuário no período chuvoso e com maré de baixamar de sizígia.....	38
Figura 25	–	Perfil longitudinal de salinidade do estuário no período chuvoso e durante a maré de preamar de sizígia.....	38
Figura 26	–	Mapa de salinidade superficial do estuário no período chuvoso e com maré de preamar de sizígia.....	39
Figura 27	–	Transecto do grid costa para os perfis longitudinais ao longo da pluma do estuário.....	39
Figura 28	–	Mapa de salinidade superficial da costa no período chuvoso e com maré de baixamar de sizígia.....	40
Figura 29	–	Perfil lateral de salinidade da costa no período chuvoso e com maré de baixamar de sizígia.....	40
Figura 30	–	Mapa de salinidade superficial da costa no período chuvoso e com maré de preamar de sizígia.....	41
Figura 31	–	Perfil lateral de salinidade da costa no período chuvoso e com maré de baixamar de sizígia.....	41
Figura 32	–	Variação temporal do perfil vertical de salinidade no ponto P2 durante o período seco.....	42
Figura 33	–	Variação temporal do perfil vertical de salinidade no ponto P3 durante o período seco.....	43
Figura 34	–	Variação temporal do perfil vertical de salinidade no ponto P2 durante o período chuvoso.....	43
Figura 35	–	Variação temporal do perfil vertical de salinidade no ponto P3 durante o período chuvoso.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Valores mensais de vazão e salinidade aplicados no limite aberto do estuário.....	25
Tabela 2	– Parâmetros dos principais constituintes harmônicos de maré aplicados no limite aberto da costa.....	27
Tabela 3	– Comparação entre os constituintes harmônicos de maré obtidos pela FEMAR e calculados a partir dos resultados do modelo.....	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
FEMAR	Fundação de Estudos do Mar
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LabDic	Laboratório de Dinâmica Costeira
UFC	Universidade Federal do Ceará
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	ÁREA DE ESTUDO	17
4	METODOLOGIA	22
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1	Validação do modelo	28
5.2	Resultado das simulações	31
5.3	Discussão	46
6	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

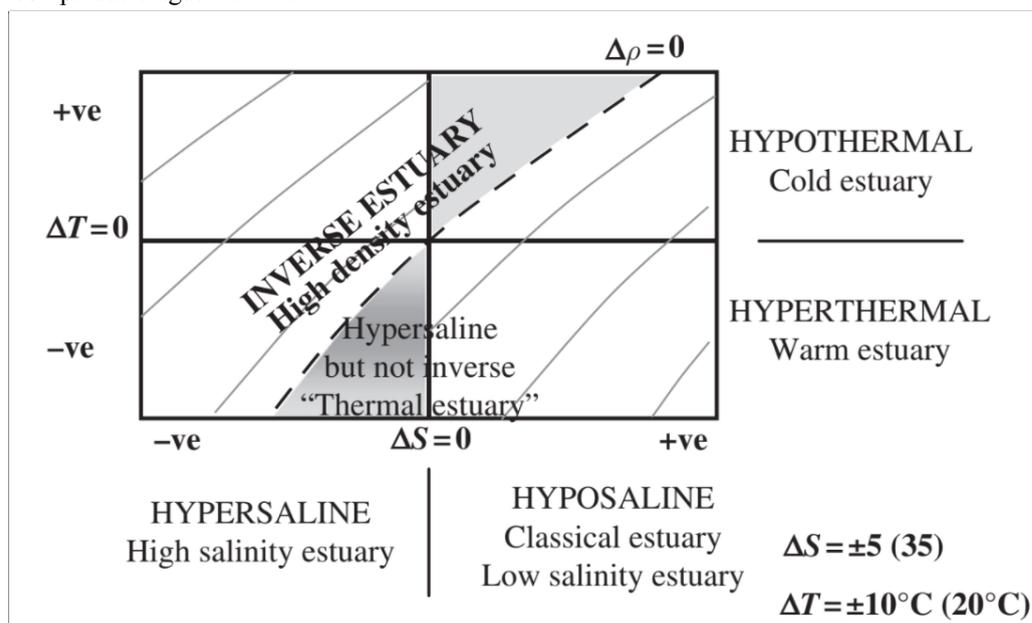
No âmbito da Oceanografia Física, Pritchard (1967) definiu estuário como um corpo d'água costeiro semifechado com uma livre conexão com o oceano, onde a água do mar é mensuravelmente diluída com a água doce oriunda da drenagem continental. Entretanto, essa definição não leva em consideração a maré como uma forçante de mistura e não acolhe estuários que ficam fechados, parcial ou periodicamente. Perillo (1989) propõe uma outra definição, onde um estuário seria um corpo d'água costeiro semifechado que se estende até o limite superior da influência da maré, onde a água do mar entra por uma ou mais conexões com o mar e é significativamente diluída com água doce de origem continental. Essa proposta considera outros aspectos importantes na classificação de estuários, como a existência de sistemas estuarinos mais complexos e da influência da maré no processo de mistura e na intrusão salina. Porém, essa definição ainda não consegue englobar ambientes que apresentam características hipersalinas.

De tal forma, o conceito mais abrangente de estuário é o de Potter (2010), que diz:

Um estuário é um corpo d'água costeiro parcialmente fechado que é permanente ou periodicamente aberto para o mar e que recebe pelo menos uma descarga periódica de um(s) rio(s) e, portanto, embora sua salinidade seja tipicamente menor do que a da água do mar natural e variar temporalmente e ao longo de seu comprimento, pode se tornar hipersalino em regiões onde a perda de água por evaporação é alta e as entradas de água doce e marés são insignificantes.

Os estuários estão amplamente distribuídos ao longo do planeta, sofrendo diferentes influências de fatores climatológicos, geomorfológicos e oceanográficos (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002). Eles podem ser classificados com base na relação de densidade entre a água estuarina e a água marinha, divisão esta que é influenciada pela salinidade e temperatura (Figura 1). Um estuário clássico ou positivo é assim denominado quando a densidade da água estuarina é menor do que a água marinha, fazendo com ocorra uma circulação gravitacional devido a esse gradiente, onde a água estuarina se desloca superficialmente e a água marinha penetra o estuário pelo fundo. Um estuário negativo ou inverso ocorre quando a água estuarina possui maior densidade em relação à água marinha e flui para fora do estuário pelo fundo, enquanto a água marinha avança pela superfície (LARGIER, 1996).

Figura 1 - Relação entre valores de salinidade, temperatura e densidade da água estuarina comparada a água marinha



Fonte: LARGIER, 2010. A variação de salinidade é de 5 e a variação de temperatura é de 10 °C. A linha tracejada indica a divisão entre um estuário clássico e um estuário inverso.

Com relação à salinidade, um estuário pode ser dividido em hipossalino ou hipersalino, quando o estuário apresenta uma salinidade menor ou maior que a plataforma, respectivamente. Estuários inversos apresentam uma maior densidade em relação a água marinha devido a altas salinidades e/ou baixas temperaturas, porém em alguns casos mesmo que o estuário apresente essas características a diferença de densidade não é alta o suficiente para formar uma estratificação vertical. Dessa forma, alguns estuários hipersalinos não apresentam uma característica inversa de densidade, mesmo possuindo altos valores de salinidade.

Conceitualmente, Largier (1996) definiu um estuário hipersalino como:

Um estuário em que a salinidade da água é maior do que a salinidade das águas adjacentes (oceânicas), onde um estuário clássico pode ser referido como hipossalino; para a hipersalinidade ser estatisticamente significativa, consideramos momentos em que a salinidade do estuário $S_e - S_0 > \sigma$, onde σ é o desvio padrão da salinidade do oceano S_0 .

Portanto, mesmo que haja variações de salinidade na água oceânica adjacente, um estuário será classificado como hipersalino se a sua salinidade sempre for maior que essas variações.

O balanço hídrico em um estuário se dá, sumariamente, por variações nos valores

de evaporação (E), precipitação (P) e vazão fluvial (Q). Caso a entrada de água no estuário seja maior que a saída ($Q + P > E$), este passa a aumentar o seu volume de água e diminuir a salinidade, caracterizando um estuário clássico. Já quando a entrada de água é menor que a saída ($Q + P < E$), ocorre a redução do volume de água e o aumento da salinidade, característica de um estuário hipersalino (SAVENIJE, 1988; LARGIER, 2010).

O aumento da demanda hídrica causada por um maior processo de urbanização em regiões costeiras, juntamente com seu uso para a agropecuária pode acarretar uma drástica redução no volume dos aquíferos e rios. Por isso, faz-se necessário o gerenciamento como forma de evitar a escassez desse recurso para a segurança da população. Uma das medidas adotadas para tal é a implantação de reservatórios com barramentos ao longo do curso de rios (TUCCI, 2001; BAHTIA; BAHTIA, 2006).

Esses reservatórios podem alterar a hidrodinâmica à jusante do barramento, modificando as características hidroquímicas da água, impedindo o transporte de sedimentos e nutrientes para o oceano, além de aumentar o tempo de residência e permitir uma maior intrusão salina devido à menores vazões na zona estuarina (CHIEN, 1985; COLLIER, WEBB e SCHMIDT, 2000; DIAS *et al.*, 2016). Em regiões onde há uma sazonalidade na precipitação, essa intrusão salina pode ainda ocasionar a formação de um ambiente transicional hipersalino (VALENTIM *et al.*, 2018).

O estuário é um ecossistema vulnerável aos impactos antrópicos no que se refere aos processos que regem a sua hidrodinâmica, portanto é necessário compreender tanto a intensidade como a duração desse impacto para a sua resiliência. Uma das ferramentas que pode ser empregada para isso é a modelagem numérica, que nos ajuda a entender os processos de forma integrada ou isoladamente, prever possíveis modificações e assim realizar um gerenciamento sustentável do uso desse recurso hídrico.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar a circulação do estuário do Rio Pirangi utilizando o modelo hidrodinâmico Delft3D;

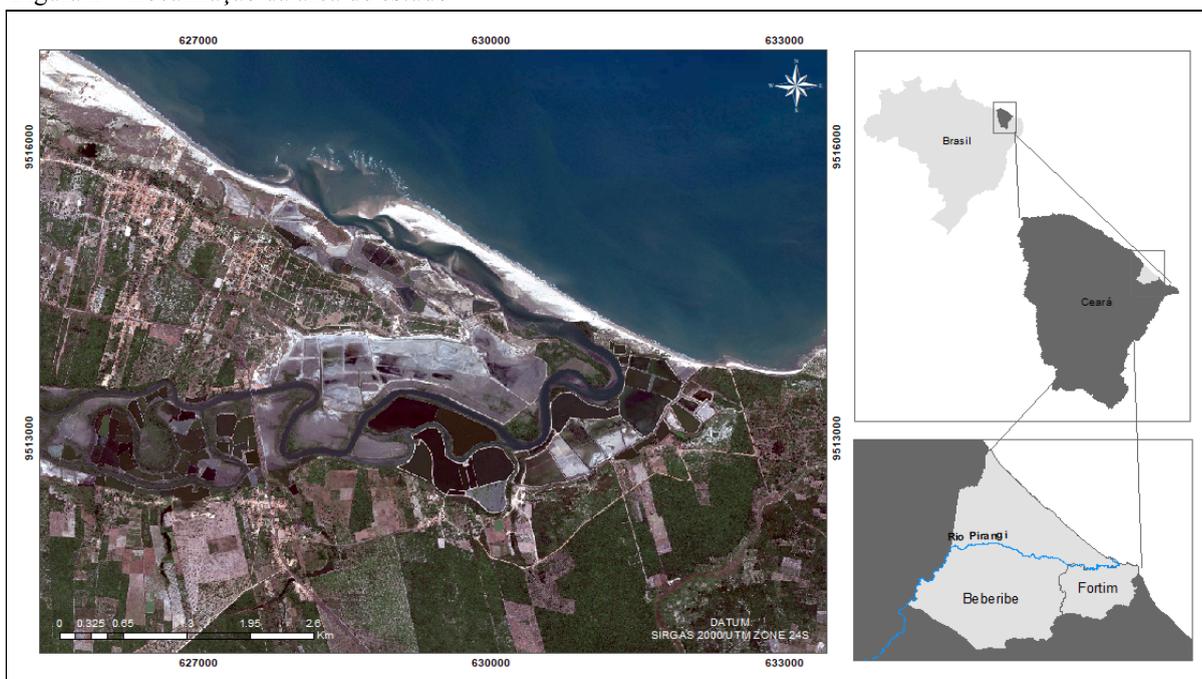
2.2 Objetivos específicos

- Implementar e validar um modelo numérico tridimensional para o estuário do Rio Pirangi;
- Analisar a variação espacial da velocidade longitudinal com o ciclo de maré;
- Quantificar a velocidade residual da coluna d'água nos períodos seco e chuvoso;
- Investigar a variabilidade sazonal da estratificação longitudinal e vertical da salinidade do estuário.

3 ÁREA DE ESTUDO

O estuário do Rio Pirangi está localizado na divisa entre os municípios de Beberibe e Fortim, no litoral leste do estado do Ceará (Figura 2). De acordo com a classificação de Pritchard (1952), o Pirangi se enquadra como um estuário de frente de barreira arenosa. Esse tipo de estuário possui maior ocorrência em regiões com deposição ativa de sedimentos costeiros e com um regime de mesomaré. Sua barra é constantemente modelada pela corrente longitudinal costeira e pela forçante hidráulica fluvial (Pritchard, 1967 *apud* PINHEIRO, 2003), o que, com a redução da vazão, pode ocasionar o fechamento da foz e comprometer as trocas entre oceano e estuário.

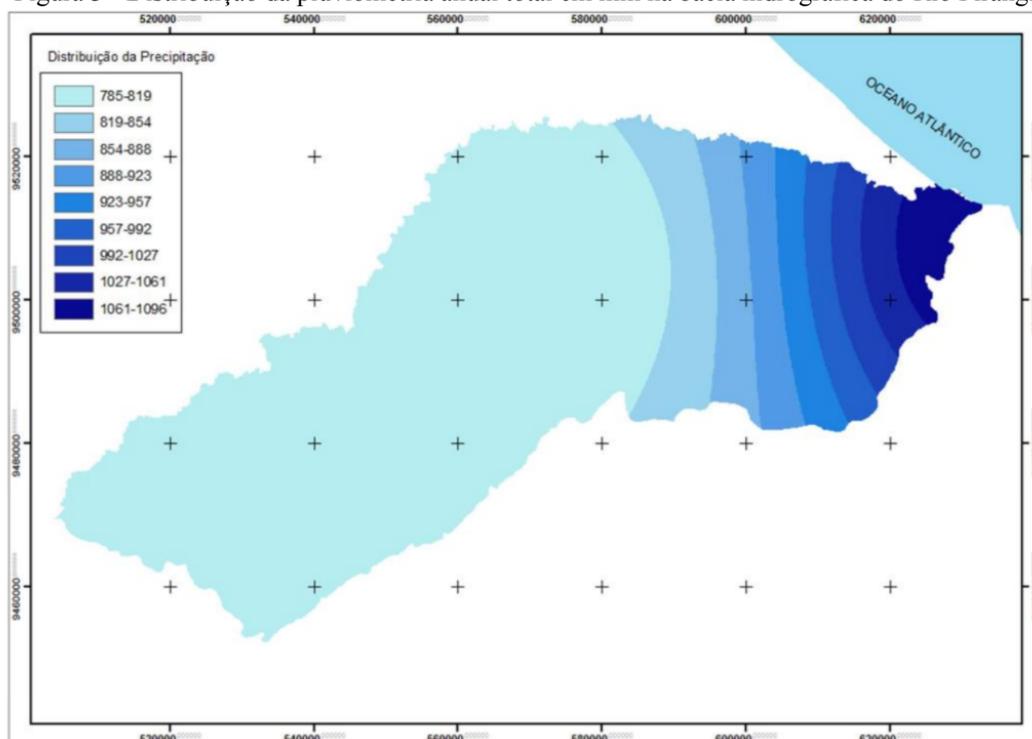
Figura 2 – Localização da área de estudo



Fonte: Imagem do Google Earth PRO.

Sua bacia hidrográfica possui 4367 km² de área de drenagem (CAMPOS; MORAIS, 2007) e está inserida em um clima tropical equatorial com sete meses de seca, subclassificado como semiárido (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007). A distribuição anual da precipitação ao longo da bacia possui variações com valores de até 750 mm no alto e médio curso do rio e de 1.055 mm no baixo Pirangi (Figura 3). Essa zonação se deve à proximidade com o oceano, que pode influenciar no volume de precipitação (SILVA; DA SILVA, 2012).

Figura 3 - Distribuição da pluviometria anual total em mm na bacia hidrográfica do Rio Pirangi

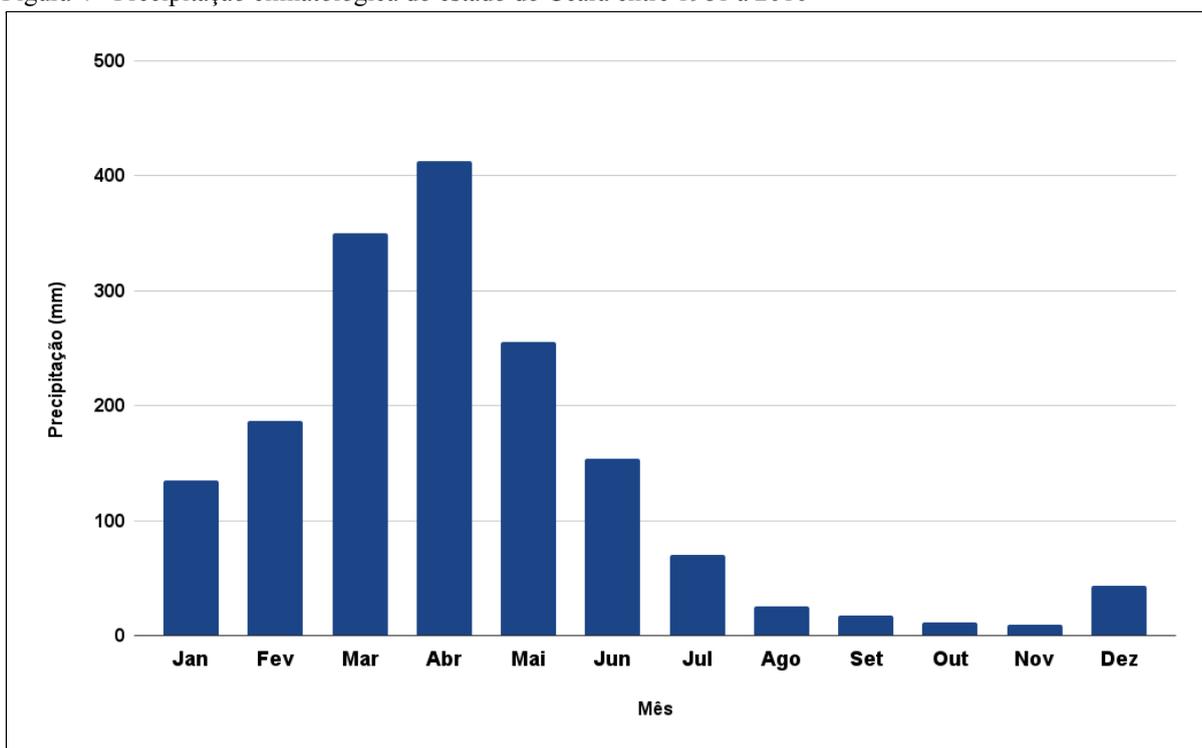


Fonte: Silva e Da Silva (2012).

Os sistemas atmosféricos com maior influência na região são os vórtices troposféricos de altos níveis, frentes de nuvens e a Zona de Convergência Intertropical, esta última sendo a mais importante para o regime pluviométrico local. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é uma banda de nuvens formada próximo ao Equador devido à confluência dos ventos alísios de Nordeste e dos alísios de Sudeste. No verão do Hemisfério Norte, o aquecimento da superfície do mar provoca um deslocamento da ZCIT para o norte, o que ocasiona um déficit na taxa de precipitação na Região Nordeste do Brasil. Já no verão do Hemisfério Sul, a ZCIT se posiciona mais ao sul entre as latitudes de 2° a 4°S, gerando um aumento significativo das taxas de precipitação nesta região (FERREIRA; MELLO, 2005). Portanto há uma sazonalidade bem demarcada, com o primeiro semestre caracterizado com ocorrência de precipitações e ventos menos intensos, enquanto o segundo semestre está sujeito a seca e a incidência de ventos fortes.

Segundo a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), os meses entre Fevereiro e Maio, correspondente a quadra chuvosa da região da bacia do Rio Pirangi, representam entre 65 a 72% da precipitação anual e as médias do primeiro semestre somam mais de 90% da precipitação anual (Figura 4). Os ventos apresentam velocidade entre 3 e 4 m.s⁻¹ no segundo semestre e reduzem drasticamente sua intensidade no começo do ano.

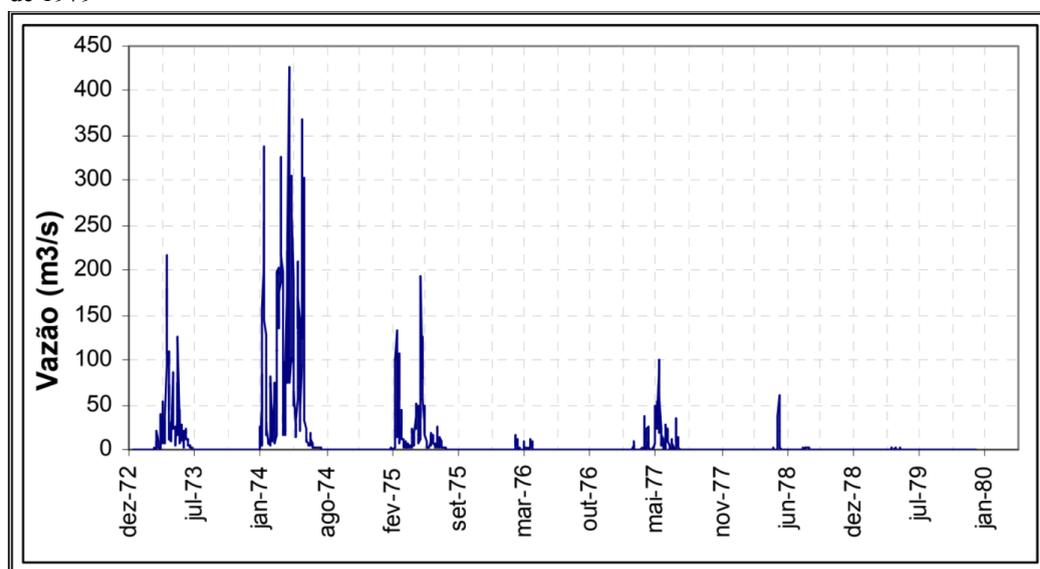
Figura 4 - Precipitação climatológica do estado do Ceará entre 1981 a 2010



Fonte: Adaptado de INMET.

Historicamente, houve uma redução nos valores de vazão do estuário do Rio Pirangi. De acordo com os dados do posto fluviométrico de Cristais (Figura 5), localizado a aproximadamente 60 km a montante da foz, a vazão diária na primeira metade da década de 70 conseguia alcançar valores acima de 100 m³/s. Na quadra chuvosa do ano de 1974 houve um pico de quase 450 m³/s, indicando um grande potencial hídrico deste estuário.

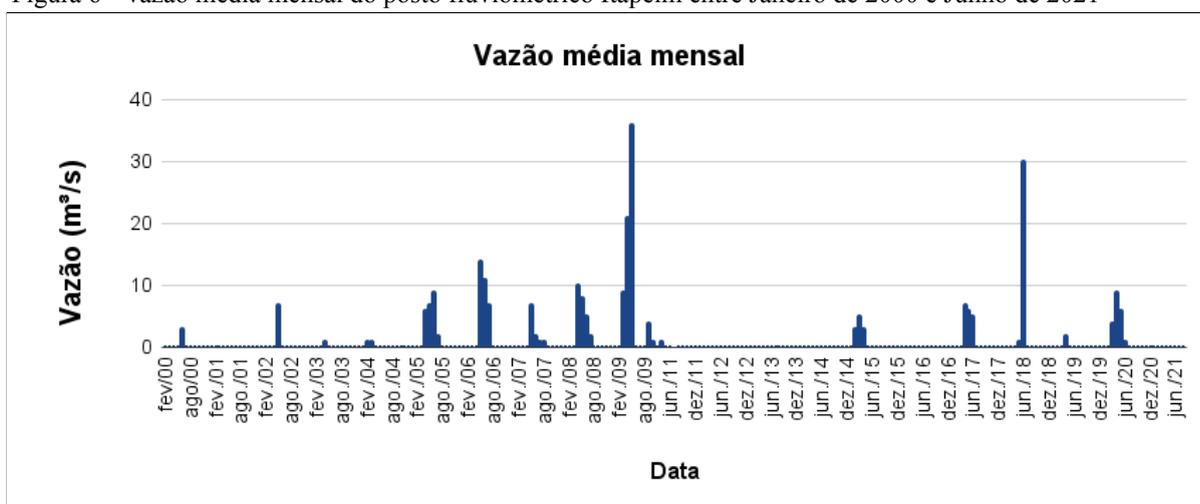
Figura 5 - Hidrograma diário da estação fluviométrica Cristais entre Janeiro de 1973 a Dezembro de 1979



Fonte: Campos e Medeiros, 2007.

Dados mais recentes da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) mostram que no posto fluviométrico de Itapeim, localizado a 35 km da foz, a vazão média mensal nos últimos 20 anos se manteve em quase sua totalidade abaixo de 10 m³/s (Figura 6). Nota-se que há picos de maiores vazões em alguns anos, como 2009 e 2018, mas que a maioria das médias mensais apresentaram valores extremamente baixos, mesmo durante a quadra chuvosa.

Figura 6 - Vazão média mensal do posto fluviométrico Itapeim entre Janeiro de 2000 e Junho de 2021



Fonte: Adaptado de ANA.

As barragens de maior porte da bacia como Medeiro, Macacos e o Açude Batente foram construídas a partir dos anos 2000, porém constata-se a existência de vários barramentos de pequeno porte ao longo de todo o curso do rio principal e seus afluentes, relacionados a pequenas propriedades rurais. Infelizmente não há bibliografia para a identificação e datação desses pequenos reservatórios, tampouco para mensurar a influência que eles exercem para a redução da vazão na região estuarina.

Molisani *et al.* (2006) estimam que no período chuvoso o estuário do Pirangi apresenta uma vazão de 15 m³/s e no período seco essa vazão tende a valores próximos a zero. Apesar dessa variação, o estuário é classificado como bem misturado durante todo o ano, sem variações de salinidade entre a superfície e o fundo, apresentando apenas uma suave estratificação no canal paralelo à barra, próximo à foz (CAMPOS; MORAIS, 2007).

Durante o período chuvoso, o Pirangi pode apresentar características de um estuário clássico em momentos de picos de precipitação acima da média, onde a água consegue transpassar os barramentos ao longo do rio (SCHETTINI *et al.*, 2017). No período

seco, a redução da vazão e o aumento da evaporação fazem com ocorra uma hipersalinidade no estuário. Schettini *et al.*, (2014) encontraram valores de salinidade no período seco próximos a 50 em uma distância de mais de 20 km da costa e salinidade 20 nessa mesma região no período chuvoso. Em Dezembro de 2015, foram encontrados no estuário valores de salinidade superiores a 60 em uma distância de 9 km a montante da foz (MELO, 2017).

Segundo Schettini *et al.*, (2017), o Pirangi apresenta uma assimetria de maré causada por mudanças morfológicas nas zonas intermareais. A altura de maré é de 1,84 m e o tempo de maré é dividido em aproximadamente 8 h para a vazante e 4,4 h para a enchente. Os valores máximos observados para os módulos de velocidades longitudinais de vazante e enchente foram de 0,62 e 0,81 m/s, respectivamente, caracterizando assim o estuário como dominância de enchente.

Além das barragens, o Pirangi também sofre outros impactos antrópicos em sua região estuarina. Até a década de 80, as atividades consistiam na retirada de árvores, na pesca predatória e na implantação de salinas nas regiões de mangues. Devido a um investimento governamental, após a década de 80 houve o abandono das salinas e a construção de fazendas de carcinicultura nas laterais do estuário, atividade essa que perdura até hoje e que é considerada o principal impacto nessa região (MESQUITA, 2012).

Segundo Campos e Morais (2007), devido à retirada da vegetação de mangue para o cultivo da carcinicultura, o estuário aumentou sua área de exposição à incidência solar e ventos, o que incrementou a taxa de evaporação e acelerou o processo de hipersalinidade. Até 2017, estima-se que mais de 80% da vegetação nativa de mangue foi substituída por fazendas de camarão, o que reduziu a mistura causada pela maré e conseqüentemente aumentou o tempo de residência do estuário (SCHETTINI *et al.*, 2017).

4 METODOLOGIA

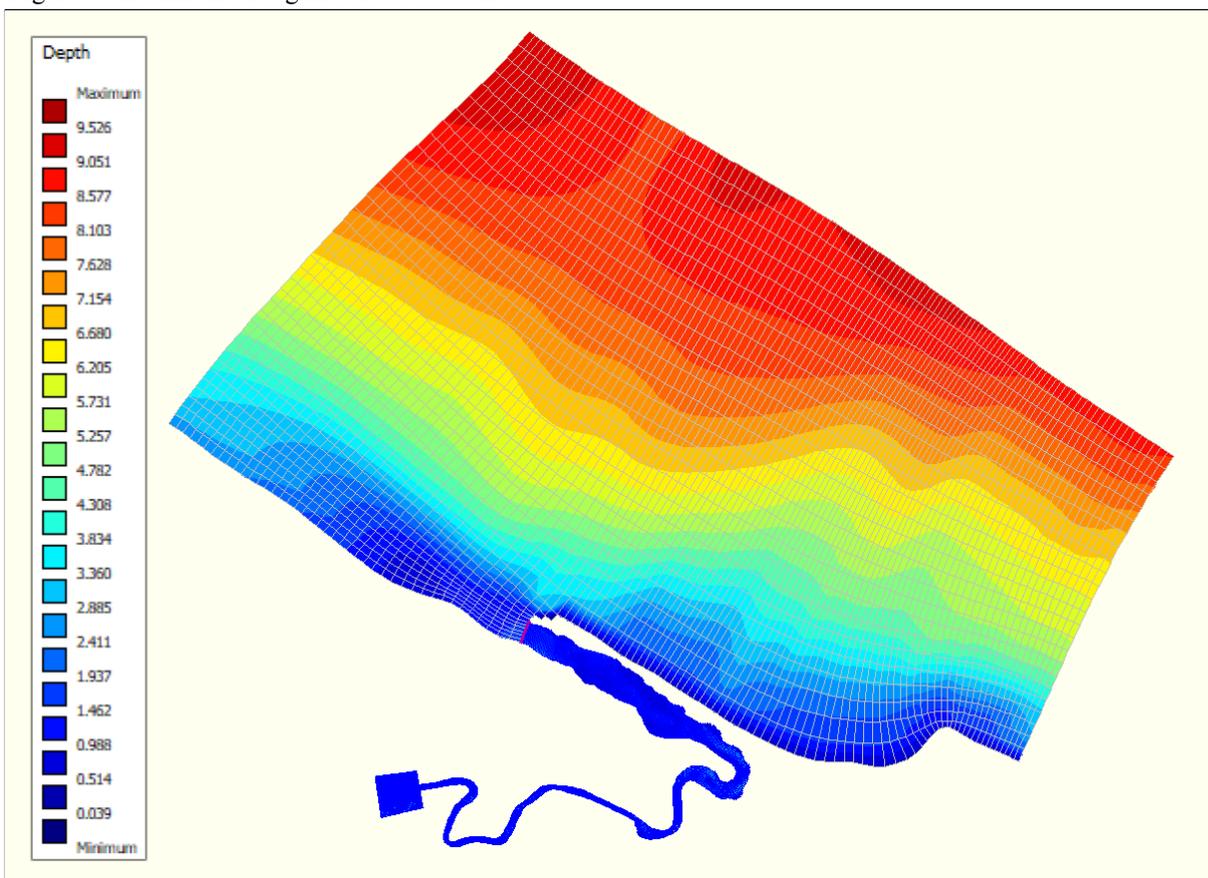
Com o uso do modelo hidrodinâmico Delft3D-FLOW, foram implementadas duas simulações do estuário do Rio Pirangi para o ano de 2010, com duração de 2 meses cada. Esse ano foi escolhido devido a carência de dados em anos posteriores. A primeira simulação foi feita entre de 1º de Fevereiro e 31 de Março, representando o período chuvoso na região, e a segunda simulação sendo feita entre 1º de Outubro e 30 de Novembro, representando o período seco. O passo de tempo foi ajustado para 0,5 min em ambas as simulações.

Para a criação da área de domínio da simulação, foi utilizada uma imagem do Google Earth PRO de Outubro de 2010, georreferenciada usando a projeção UTM no software livre QGis e feita uma delimitação dos limites laterais do estuário e da linha de costa. Com o uso da ferramenta de decomposição de domínio do Delft3D, foram criados dois grids: um da área do estuário e da região costeira adjacente, denominados estuário e costa respectivamente, e um limite de domínio entre eles.

O grid do estuário foi configurado com 10 camadas verticais do tipo sigma, com 705 x 37 células e uma resolução média de 20 metros. Já o grid da costa foi configurado com 5 camadas verticais do tipo sigma, um tamanho de 117 x 36 células e uma resolução média de 150 metros. No estuário foi adicionada uma área lateral intermareal em algumas regiões, utilizando como base a imagem georreferenciada, para simular o efeito das zonas alagadas para a circulação. Além disso, foi adicionado um quadrado com área de $2,3 \times 10^5 \text{ m}^2$ e profundidade fixa de 3 m na região inicial do estuário para recuperar o volume de água perdido pela delimitação do grid.

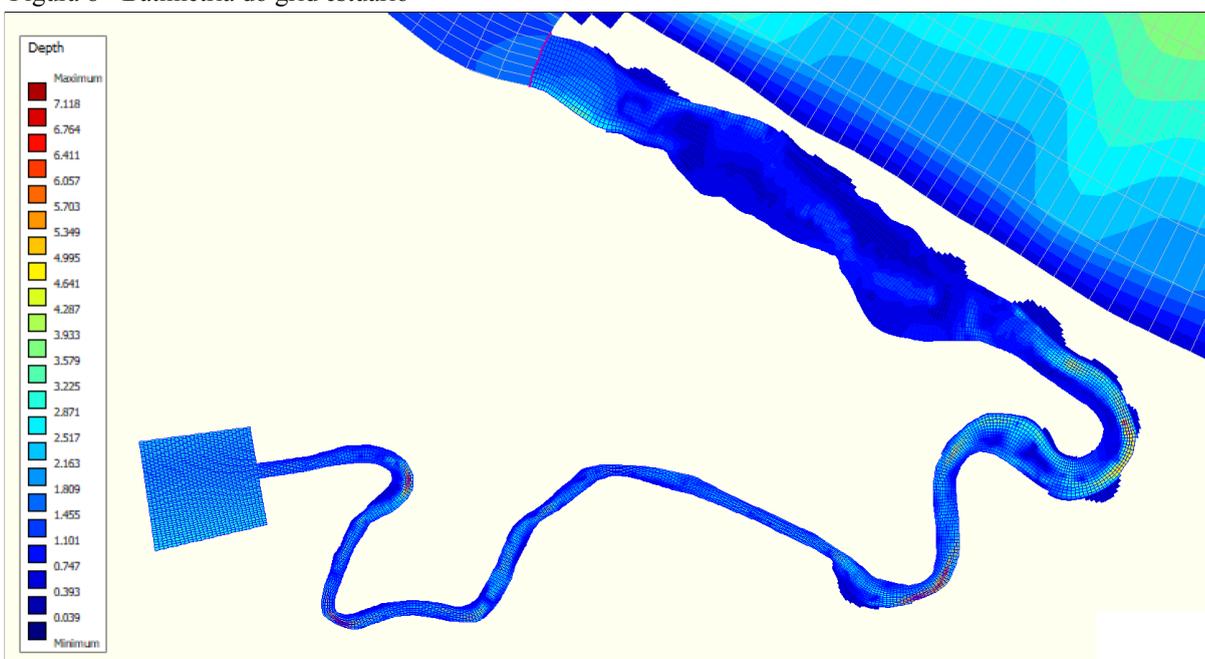
A batimetria das simulações se baseou na interpolação de dados do satélite ETOPO1 para a região costeira e nos dados *in situ* coletados em Fevereiro de 2011 pelo Laboratório de Dinâmica Costeira (LabDic) - UFC para a região do estuário (Figuras 7 e 8). Nas áreas intermareais adicionadas as laterais do estuário, foi fixado um valor de 10 centímetros abaixo do nível médio do mar. A maior profundidade da região do estuário foi de 6,8 metros e as menores profundidades foram entre 0,2 e 0,3 metros devido à presença de bancos arenosos em quase toda a sua extensão.

Figura 7 - Batimetria dos grids costa e estuário



Fonte: O Autor.

Figura 8 - Batimetria do grid estuário



Fonte: O Autor.

No início do grid do estuário, na região a montante, foi adicionado um limite aberto do tipo Descarga Total para simular o efeito da vazão fluvial. Os valores de vazão e de salinidade desse limite foram feitos com base em adaptações de Molisani *et al.*, (2006) e Campos e Morais (2007). A tabela 1 apresenta os valores que foram aplicados em cada mês para as simulações.

Tabela 1 - Valores mensais de vazão e salinidade aplicados no limite aberto do estuário

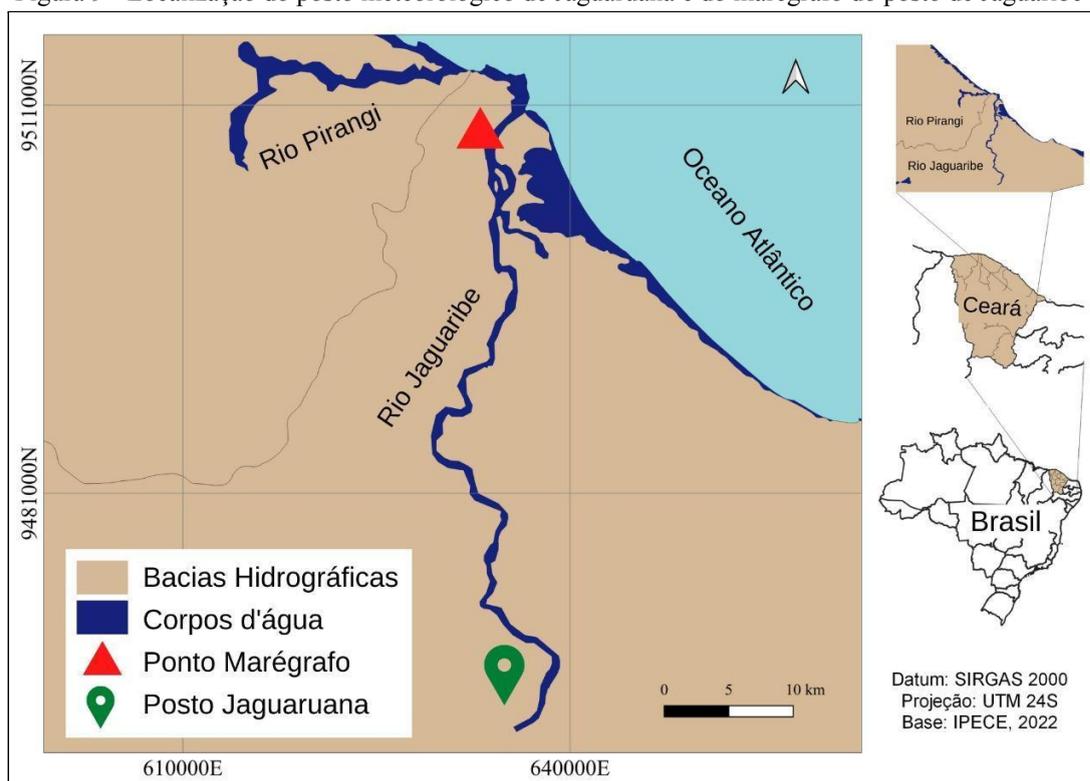
Mês	Vazão (m³/s)	Salinidade
Fevereiro	4	0
Março	12	0
Outubro	0,01	49
Novembro	0,01	49

Fonte: O Autor.

Para os dados de vento, foi aplicado um vento uniforme no domínio utilizando os valores horários de direção e intensidade para o ano de 2010 observados na estação meteorológica da FUNCEME, localizada em Jaguaruana (Figura 9). Apesar de sua distância da costa, esta foi a estação mais próxima da área de estudo devido à carência de dados meteorológicos locais.

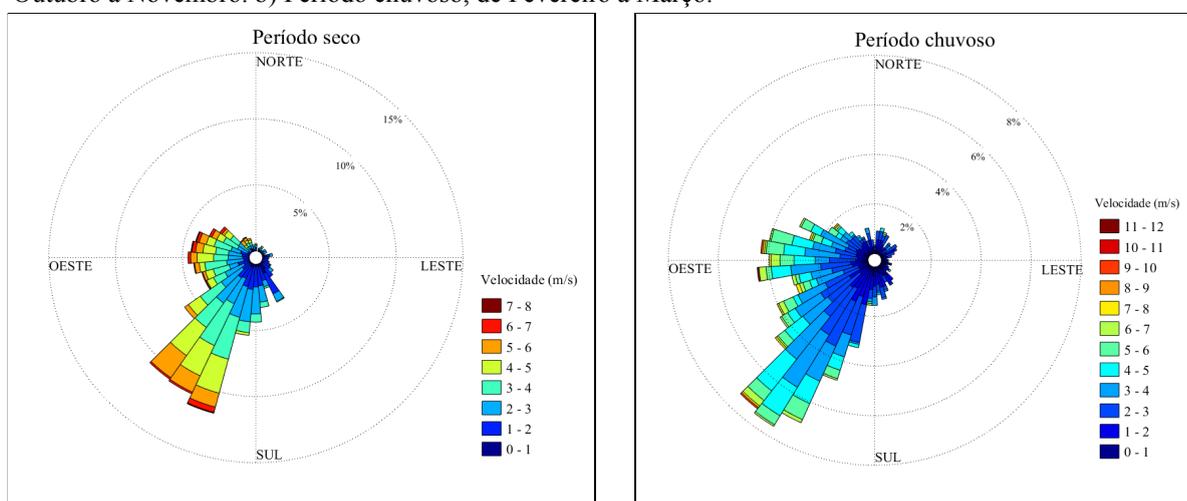
Os dados de intensidade e direção do vento para o período seco e chuvoso estão apresentados a seguir (Figura 10). No período seco, a velocidade do vento alcançou valores de 8 m/s e com ventos de intensidade predominante entre 3 e 5 m/s. Para o período chuvoso, ocorreram picos de intensidade maior que 10 m/s, porém a velocidade predominante foi entre 1 e 3 m/s. Não houve diferença significativa na direção dos ventos entre o período seco e chuvoso, havendo em ambos a predominância de ventos no setor SO - SSO.

Figura 9 - Localização do posto meteorológico de Jaguaruana e do marégrafo do posto de Jaguaribe



Fonte: O Autor.

Figura 10 - Tendência dos ventos de Jaguaruana com dados horários para o ano de 2010. a) Período seco, de Outubro a Novembro. b) Período chuvoso, de Fevereiro a Março.



Fonte: Adaptado de FUNCEME.

No grid da costa, foi adicionado a condição de contorno tipo Neumann com uma forçante astronômica no limite aberto.. Os valores de amplitude e fase dos principais constituintes harmônicos de maré locais (Tabela 2) foram retirados do Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR) para a estação do Rio Jaguaribe (Figura 9).

Tabela 2 - Parâmetros dos principais constituintes harmônicos de maré aplicadas no limite aberto da costa

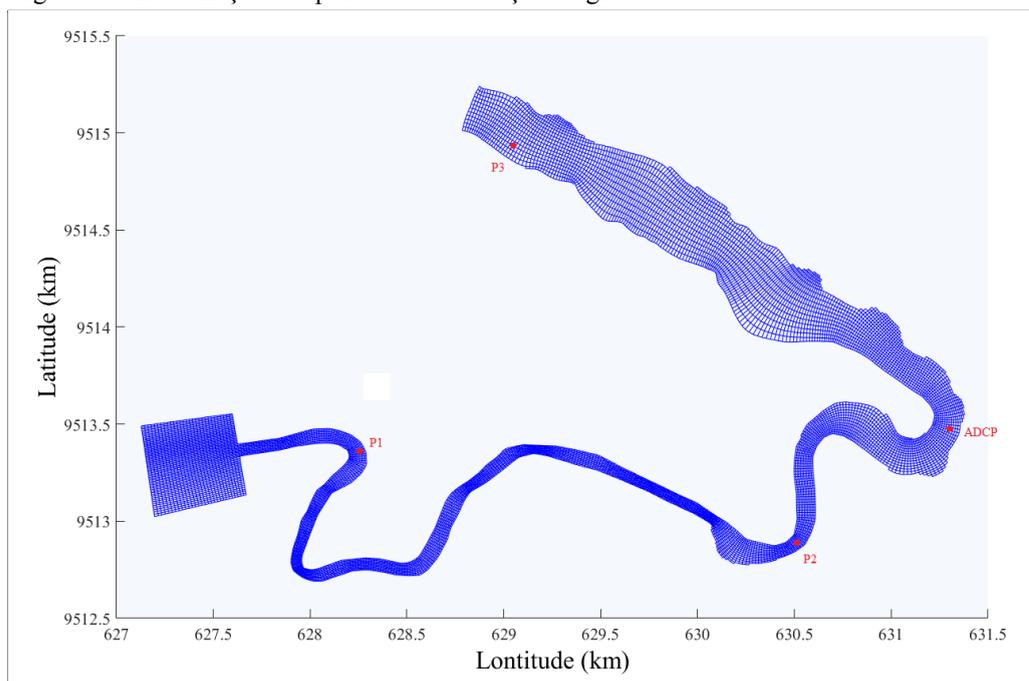
Componente	Amplitude (cm)	Fase (°)
M2	93,9	137
S2	29,4	158
N2	2,8	177
O1	5,7	193
K1	7,2	230
MSf	13,7	227

Fonte: Adaptado de FEMAR.

A validação dos resultados das marés simuladas ocorreu com a extração dos resultados de nível do mar da simulação, onde foi feita uma análise harmônica e os resultados comparados aos valores de amplitude e fase da Estação Maregráfica de Jaguaribe. Para a validação das correntes simuladas, foram comparados os valores de velocidade longitudinal do estuário extraídos do modelo, com os dados de correntes observados durante um ciclo de maré. Estes dados foram coletados com um ADCP por Schettini *et al.*, (2017) em 8 de Novembro de 2010. Foram adicionados 4 pontos de observação no grid estuário (Figura 11), sendo o ponto nomeado como ADCP utilizado para a validação com os dados *in situ* e os pontos P1, P2 e P3 para analisar a distribuição das características físicas ao longo do estuário.

Com relação às configurações do modelo, foi selecionada a opção Salinidade no perfil de constituintes, como uma forma de analisar as variações de salinidade nas duas simulações. Para a condição inicial, o nível do mar foi de 0 metros e a salinidade foi de 35 nos dois grids. A densidade da água foi definida em 1025 kg/m³ e sua temperatura em 25 °C. Todas as outras configurações foram mantidas conforme os valores padrões do Delft3D.

Figura 11 - Localização dos pontos de observação do grid estuário.



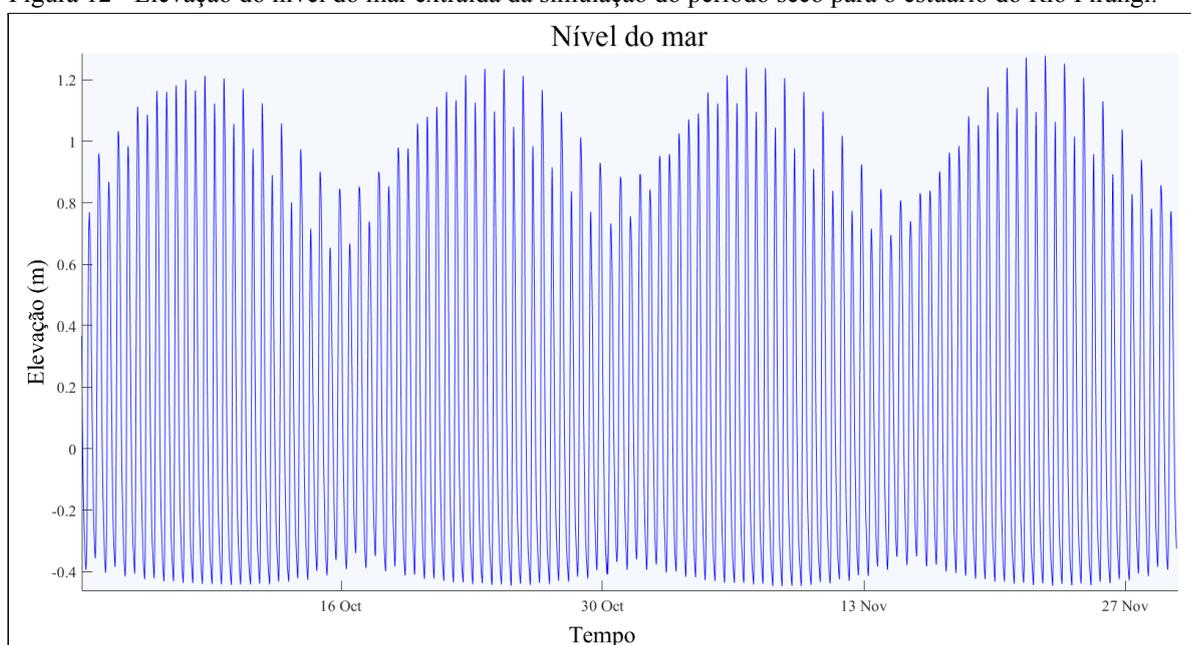
Fonte: O Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Validação do modelo

Os resultados de validação da variação de nível do mar (Figura 12) indicaram que o modelo conseguiu simular bem as variações devido às marés em suas diferentes frequências. Os dados de nível do mar passaram por uma análise harmônica e os constituintes harmônicos foram comparados com os valores da FEMAR. Os resultados de amplitude e de fase para cada harmônico estão apresentados na Tabela 3. Para a amplitude, os harmônicos M2 e S2 (estes sendo os que possuem maior influência na região) apresentaram um erro menor que 0,5%, enquanto os outros conseguiram simular perfeitamente os valores de observação. Para a fase, apenas o componente K1 apresentou erro, também menor que 0,5% nos demais harmônicos as diferenças foram nulas. De forma geral, a validação foi considerada muito boa, visto que todos os valores de amplitude e fase apresentaram uma ótima similaridade e tiveram um erro menor que 1%.

Figura 12 - Elevação do nível do mar extraída da simulação do período seco para o estuário do Rio Pirangi.



Fonte: O Autor.

Tabela 3 - Comparação entre os constituintes harmônicos de maré obtidos pela FEMAR e calculados a partir dos resultados do modelo.

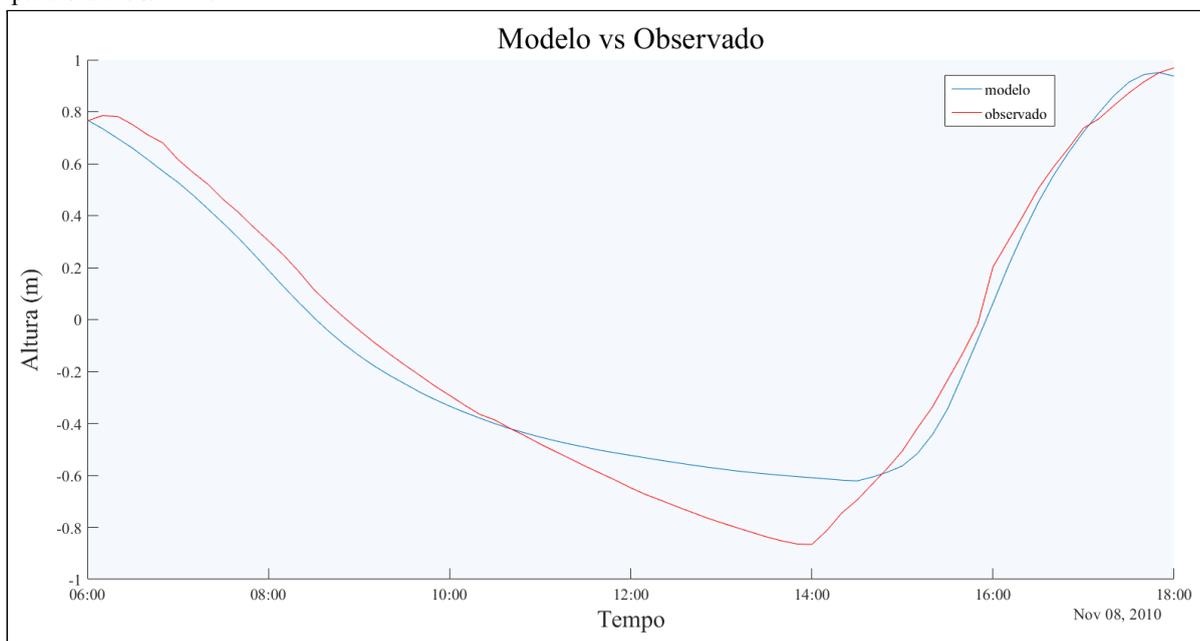
Constituinte Harmônico	Amplitude (cm) observado	Amplitude (cm) modelo	Erro de amplitude (%)	Fase (°) observado	Fase (°) modelo	Erro de fase (%)
M2	93,9	94,3	0,43	137	137	0
S2	29,4	29,5	0,34	158	158	0
N2	2,8	2,8	0	177	177	0
O1	5,7	5,7	0	193	193	0
K1	7,2	7,2	0	230	231	0,43
MSf	13,7	13,7	0	227	227	0

Fonte: O Autor.

A comparação entre os dados de altura de maré simulados pelo modelo e dos dados coletados por Schettini *et al.* (2017), ambos no dia 08 de Novembro de 2010, é apresentada na Figura 13. É observada uma boa correlação entre os valores, porém o modelo subestimou as variações no período de baixamar em relação aos dados observados. Apesar disso, o modelo conseguiu fazer uma boa simulação do efeito de assimetria de maré do estuário. O RMSE para esses valores foi de 0,11 metros.

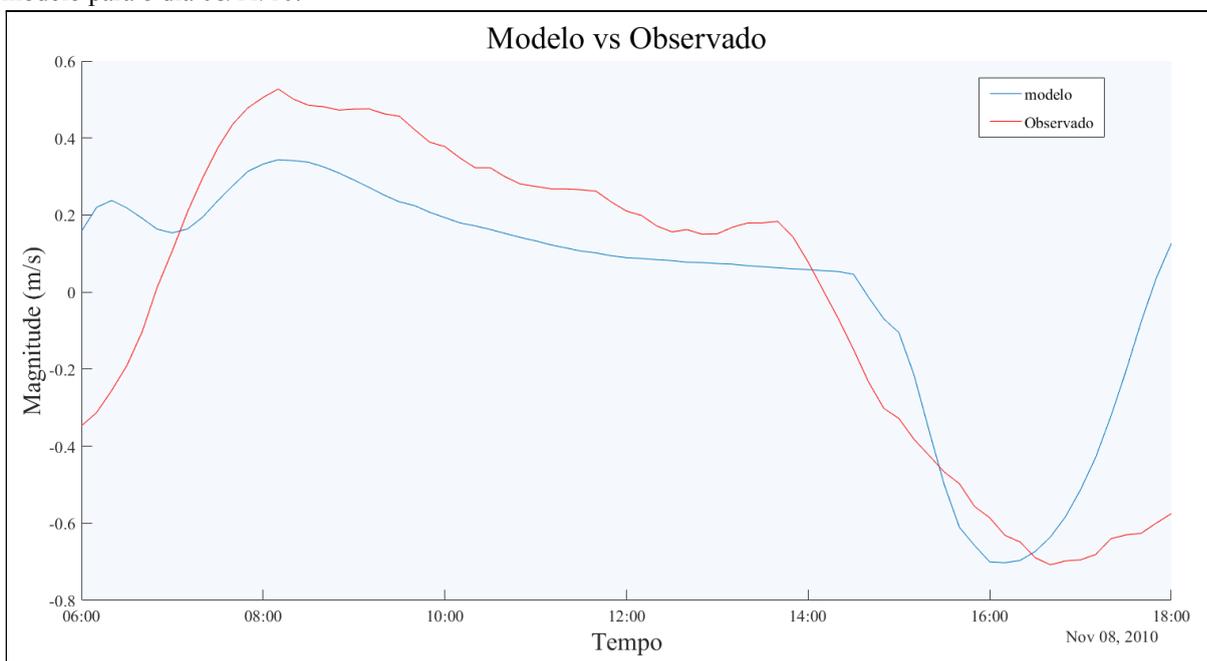
Com relação à validação da corrente, foram analisados os valores de magnitude da corrente longitudinal do estuário extraídos da simulação, com os valores de magnitude dos vetores longitudinais rotacionados de dados observados por Schettini *et al.* (2017), os dois na mesma data de 08 de Novembro de 2010 (Figura 14). Por convenção, as velocidades de vazante apresentam valores positivos e as de enchente, valores negativos. O modelo subestimou os dados observados na vazante e não conseguiu alcançar a velocidade máxima de 0,56 m/s de corrente de vazante, porém conseguiu alcançar o valor de -0,74 m/s para a maré de enchente. Nota-se que os valores de enchente foram maiores, mas houve a dominância de correntes de vazante por mais tempo, característica marcante de estuários com marés assimétricas. O RMSE para esses dados foi de 0,23 m/s.

Figura 13 - Comparação de altura do nível do mar bruta entre dados observados e dados de saída do modelo para o dia 08/11/10.



Fonte: O Autor.

Figura 14 - Comparação de magnitude da corrente longitudinal entre dados observados e dados de saída do modelo para o dia 08/11/10.



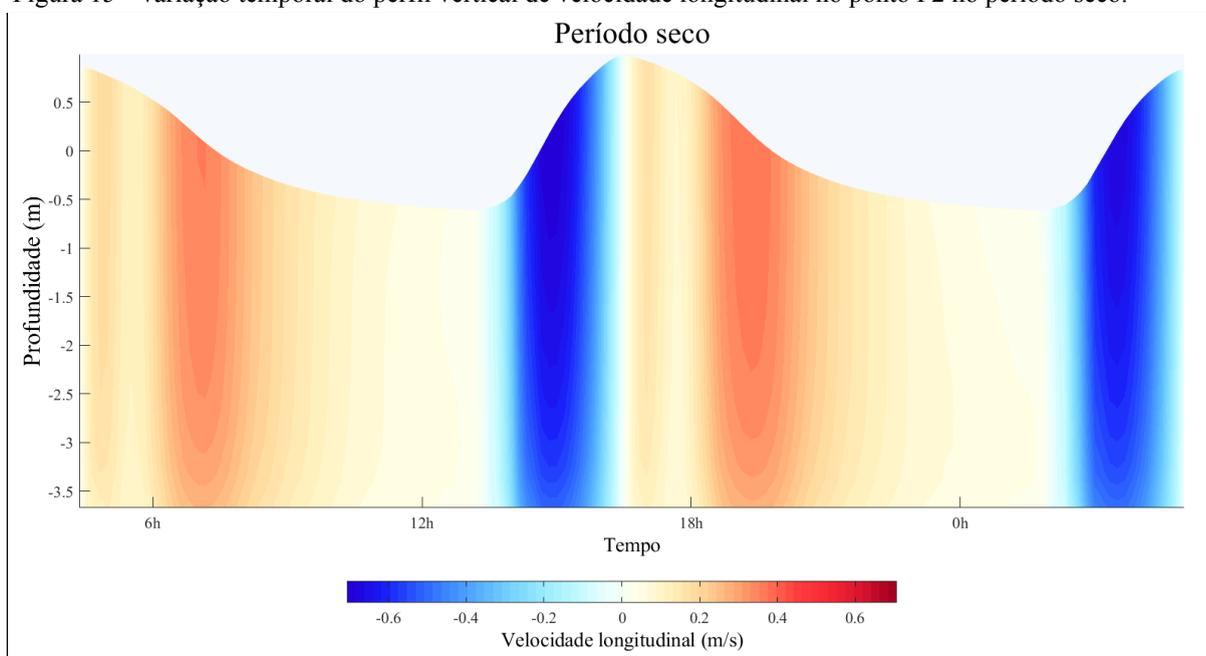
Fonte: O Autor. Valores negativos indicam correntes em direção ao interior do estuário.

5.2 Resultados das simulações

Após a validação dos resultados com os dados coletados disponíveis, partiu-se para a análise das condições hidrodinâmicas representadas nas simulações.

Para analisar um possível cisalhamento vertical das velocidades longitudinais do estuário, foram feitos gráficos da variação temporal do perfil vertical de velocidade longitudinal do estuário no ponto P2 nos períodos seco e chuvoso. No período seco, a coluna d'água não apresentou valores discrepantes de velocidade entre as profundidades (Figura 15). Os valores de maior módulo foram observados na maré de enchente, próximos de 0,7 m/s, além desse período apresentar um gradiente temporal bem demarcado, indicando uma maior aceleração em um curto período de tempo. Os maiores valores para as correntes de vazante foram na ordem de 0,4 m/s e nesse período pode ser notada uma pequena discrepância entre um ciclo de maré e outro.

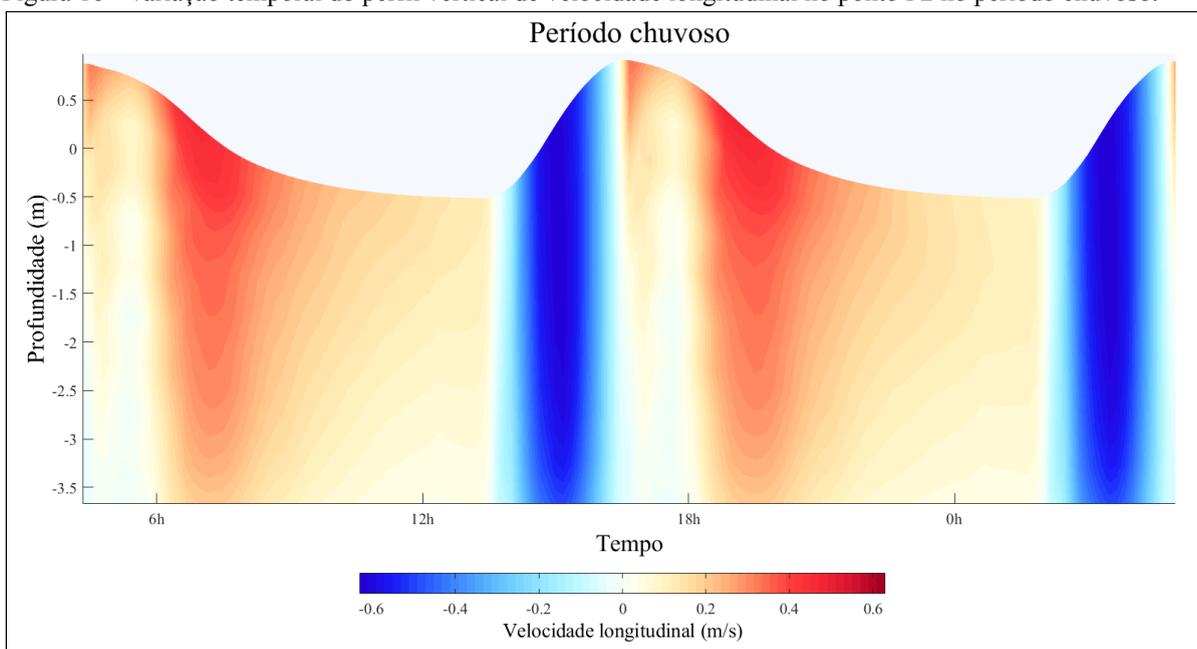
Figura 15 - Variação temporal do perfil vertical de velocidade longitudinal no ponto P2 no período seco.



Fonte: O Autor.

Para o período chuvoso (Figura 16), observa-se a mesma estrutura de circulação na maré enchente, com pouca diferença nas velocidades de superfície e fundo e uma leve redução nos valores se comparado ao período seco. Porém a maré de vazante apresenta valores maiores de velocidade, chegando a 0,6 m/s. Isso denota o efeito da vazão fluvial como uma forçante hidrodinâmica importante para a circulação do sistema. Além disso, há um gradiente vertical de velocidade na maré de vazante, indicando que há um cisalhamento de velocidade nesse período.

Figura 16 - Variação temporal do perfil vertical de velocidade longitudinal no ponto P2 no período chuvoso.

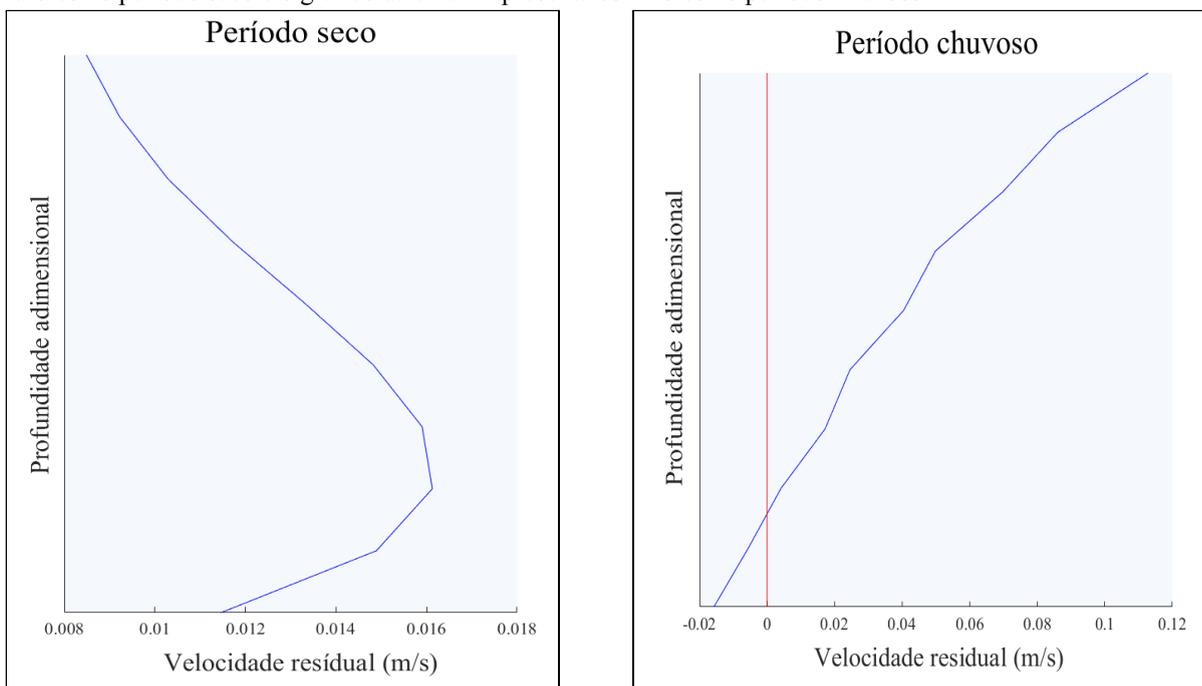


Fonte: O Autor.

Em relação ao residual da velocidade longitudinal, que representa a circulação do estuário descontado o efeito da maré, o período seco apresentou uma leve variação entre as velocidades de superfície e fundo, todas com valores positivos (Figura 17 - gráfico da esquerda). Esses valores de velocidade são muito pequenos, o que pode significar que essa circulação residual não seja uma variável relevante para a hidrodinâmica do estuário e que a circulação mareal seja predominante no período seco.

Já no período chuvoso (Figura 17 - gráfico da direita) ocorre uma variação bem delimitada, com velocidades residuais superiores a 0,1 m/s na superfície e com valores negativos no fundo. Isso está ligado à circulação gravitacional clássica, já que no período chuvoso existe vazão suficiente para diminuir os valores de salinidade no estuário, fazendo com que haja uma penetração de água marinha salgada no fundo e causando um cisalhamento nos vetores residuais.

Figura 17 - Residual da velocidade longitudinal do estuário no ponto P2. O gráfico da esquerda apresenta os valores no período seco e o gráfico da direita apresenta os valores no período chuvoso



Fonte: O Autor.

Para a análise da variabilidade longitudinal e vertical de salinidade, foram feitos mapas de salinidade superficial e perfis longitudinais obtidos a partir de um transecto (Figura 18) para os períodos seco e chuvoso. O transecto foi posicionado de modo a abranger as regiões de maior profundidade do estuário. Os gráficos foram feitos durante a maré de sizígia, onde ocorre a máxima influência continental (baixamar) e marinha (preamar) para o estuário.

No período seco o estuário apresentou uma caracterização hipersalina, com variação de salinidade entre 35 na foz e 46 no seu limite superior. Para essa simulação, o modelo apresentou pequenas falhas na região superior do grid devido a valores maiores de salinidade, mas que não interferiram de forma significativa nos resultados.

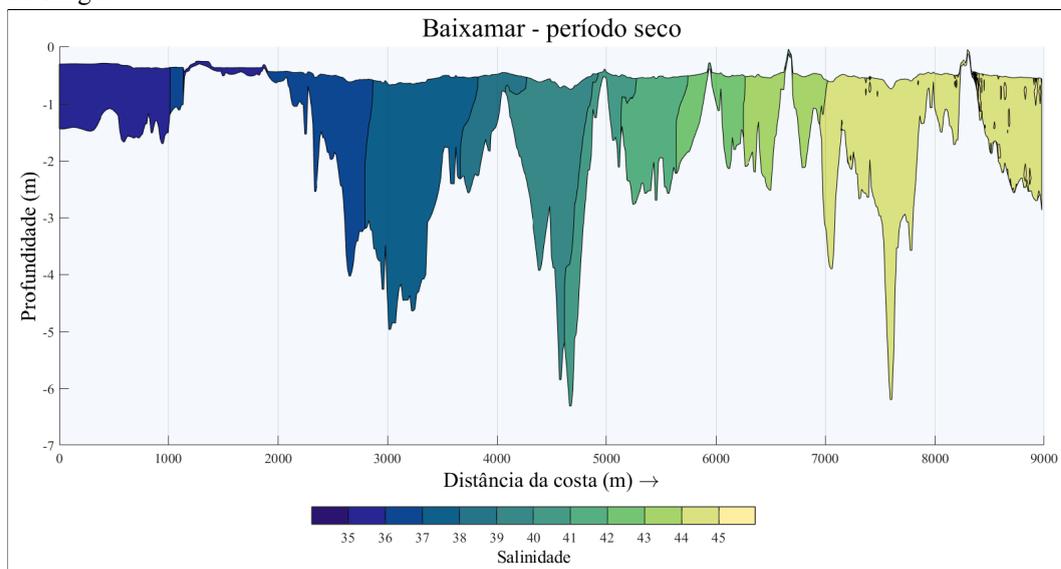
Figura 18 - Transecto do grid estuário para os perfis longitudinais



Fonte: O Autor.

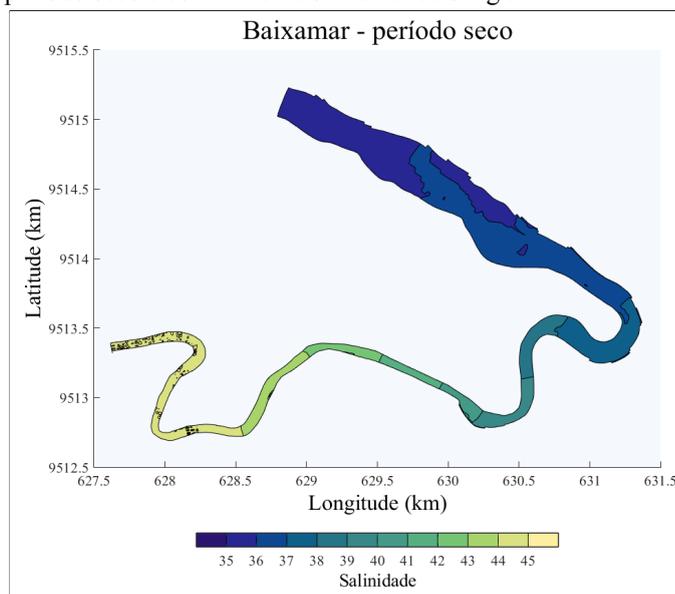
Durante a baixamar (Figura 19), o perfil se mostrou bem misturado verticalmente e com a influência direta de água da plataforma alcançando 1.000 m da foz do estuário. Longitudinalmente, houve a mistura gradual entre a água marinha e a água estuarina, portanto sem um gradiente localizado. Na zona adjacente à barra há uma variação lateral de salinidade (Figura 20), o que pode estar relacionado com as barras arenosas nesta região, que causam o confinamento de uma parcela de água e reduzem as trocas com o restante do estuário.

Figura 19 - Perfil longitudinal de salinidade do estuário no período seco e com maré de baixamar de sizígia



Fonte: O Autor.

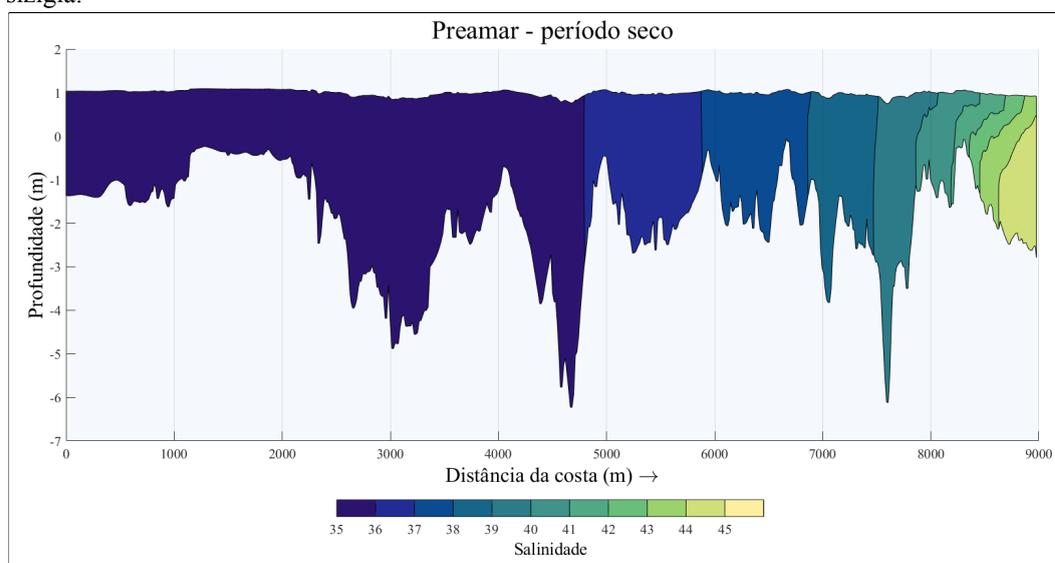
Figura 20 - Mapa de salinidade superficial do estuário no período seco e com maré de baixamar de sizígia.



Fonte: O Autor.

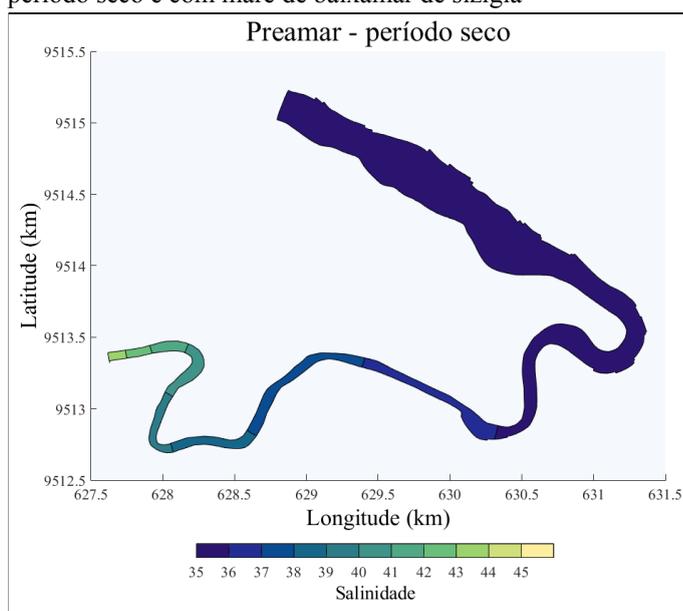
Na preamar também não houve estratificação vertical de salinidade durante o período seco ao longo do estuário (Figura 21). A massa de água marinha conseguiu penetrar até 4.600 m da foz do estuário sem variação de salinidade e, a partir dessa distância, sofreu mistura com a água hipersalina do estuário. Não houve variação lateral de salinidade (Figura 22), o que pode indicar que na preamar a batimetria não é um fator de obstrução para a circulação.

Figura 21 - Perfil longitudinal de salinidade do estuário no período seco e com maré de preamar de sizígia.



Fonte: O Autor

Figura 22 - Mapa de salinidade superficial do estuário no período seco e com maré de baixamar de sizígia

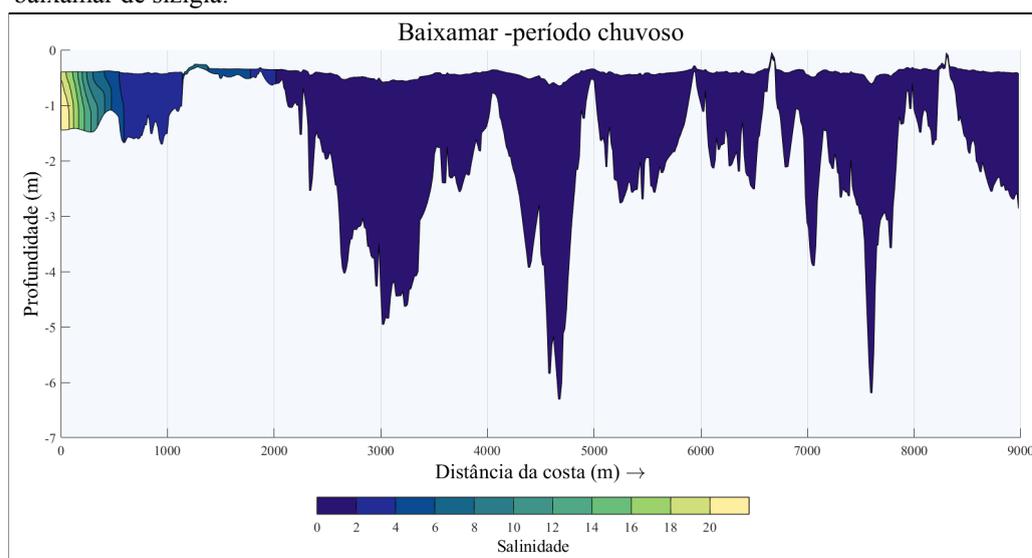


Fonte: O autor

Para o período chuvoso, houve discrepância dos valores de salinidade entre a preamar e a baixamar. O estuário se comportou como um estuário clássico, com valores de salinidade próximos a zero na sua porção superior e um aumento de salinidade em direção a foz.

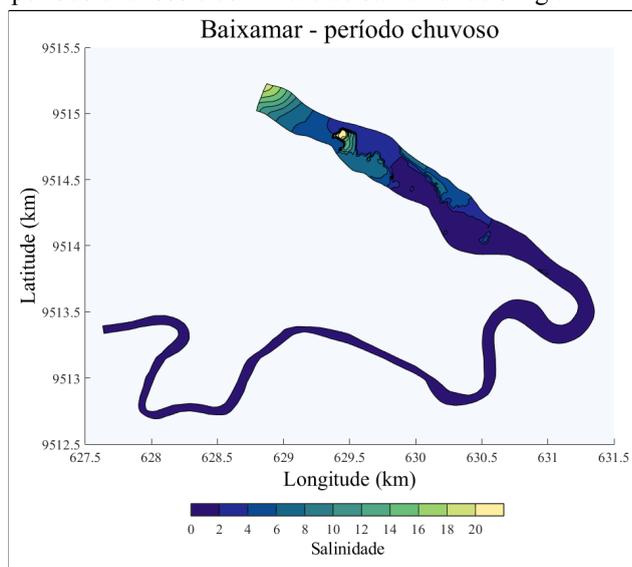
Durante a baixamar (Figura 23), a salinidade do estuário variou entre zero na região superior e 22 na foz, sem estratificação vertical. O dinamismo da vazão fluvial resultou na redução da salinidade em quase toda a extensão do estuário, gerando um forte gradiente longitudinal de 11 de salinidade/km na região da foz e reduzindo o alcance da água marinha a apenas 2.000 m estuário acima. Houve uma variação lateral de salinidade na região adjacente à barra (Figura 24). Assim como no período seco, durante a baixamar ocorre o isolamento da água pelas barras arenosas, o que pode comprometer a circulação nessa região.

Figura 23 - Perfil longitudinal de salinidade do estuário no período chuvoso e com maré de baixamar de sizígia.



Fonte: O Autor.

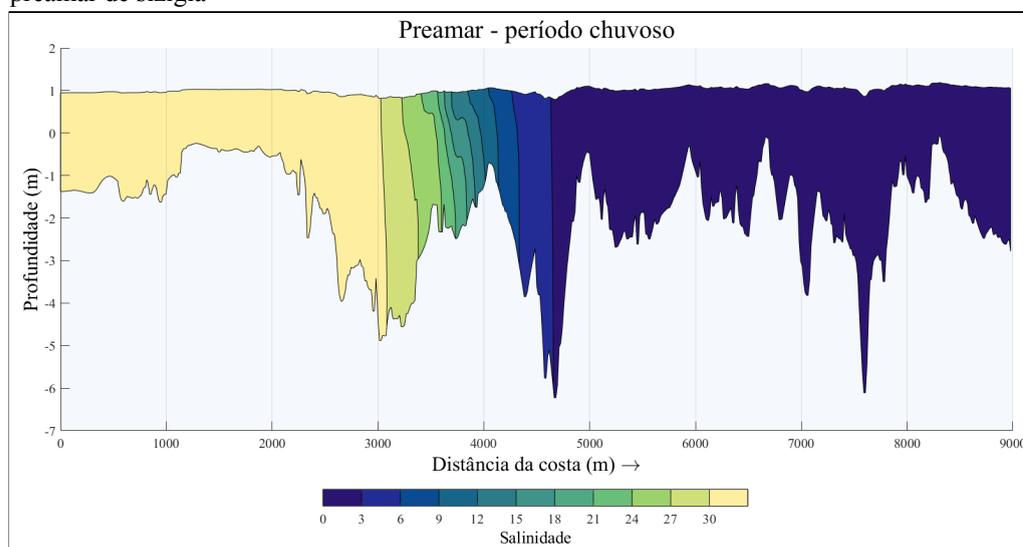
Figura 24 - Mapa de salinidade superficial do estuário no período chuvoso e com maré de baixamar de sizígia



Fonte: O Autor.

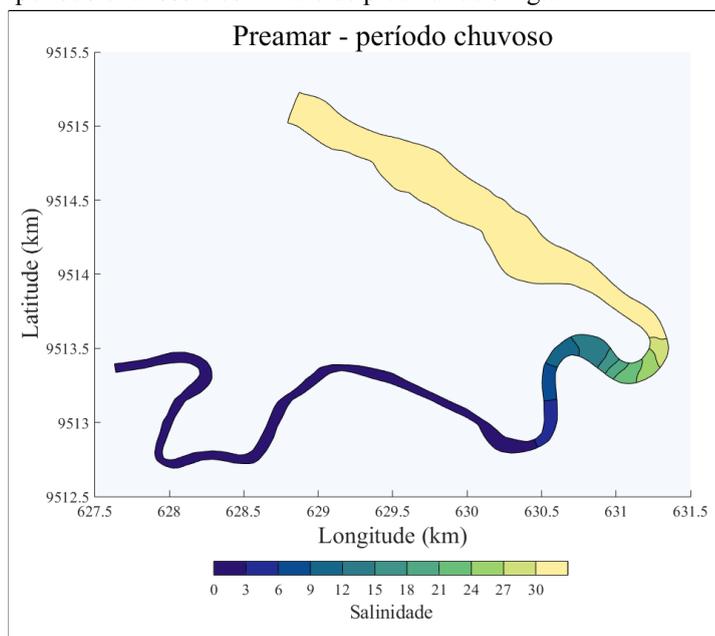
Na preamar (Figura 25) houve uma variação de salinidade entre zero na região superior e 33 na foz. O perfil vertical de salinidade se apresentou homogêneo em toda a extensão do estuário. Houve a penetração direta da água marinha até 3.000 m da foz do estuário e a mistura com a água estuarina a partir desse ponto. Percebe-se ainda um alto gradiente longitudinal de 27 de salinidade por quilômetro entre 3.000 e 4.000 metros da foz do estuário. Assim como no período seco, não houve variação lateral de salinidade na foz do estuário (Figura 26), evidenciando a importância da batimetria apenas durante os menores valores de elevação do nível do mar.

Figura 25 - Perfil longitudinal de salinidade do estuário no período chuvoso e durante a maré de preamar de sizígia



Fonte: O Autor.

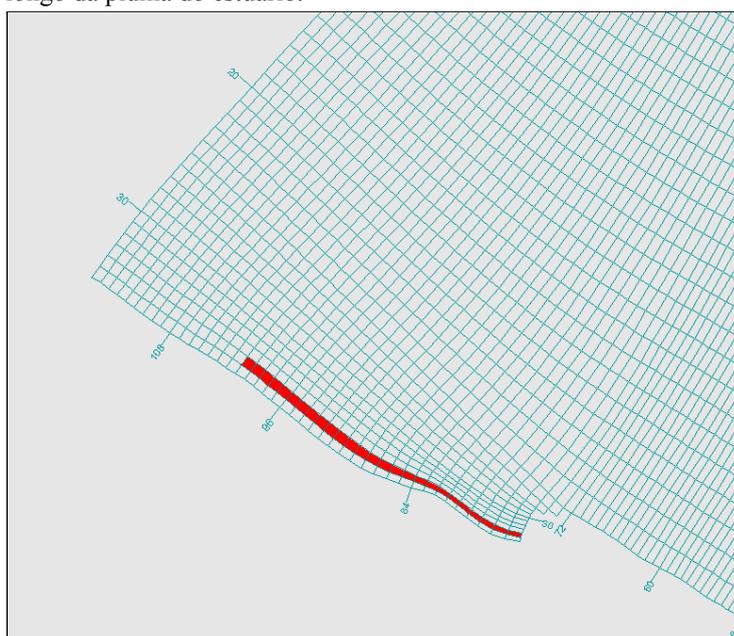
Figura 26 - Mapa de salinidade superficial do estuário no período chuvoso e com maré de preamar de sizígia



Fonte: O Autor.

Durante o período chuvoso, ocorreu a formação de uma pequena pluma estuarina na região costeira adjacente ao estuário do Rio Pirangi e foram feitos mapas superficiais de salinidade e um transecto paralelo à costa (Figura 27) para analisar como ocorre a dispersão desta pluma.

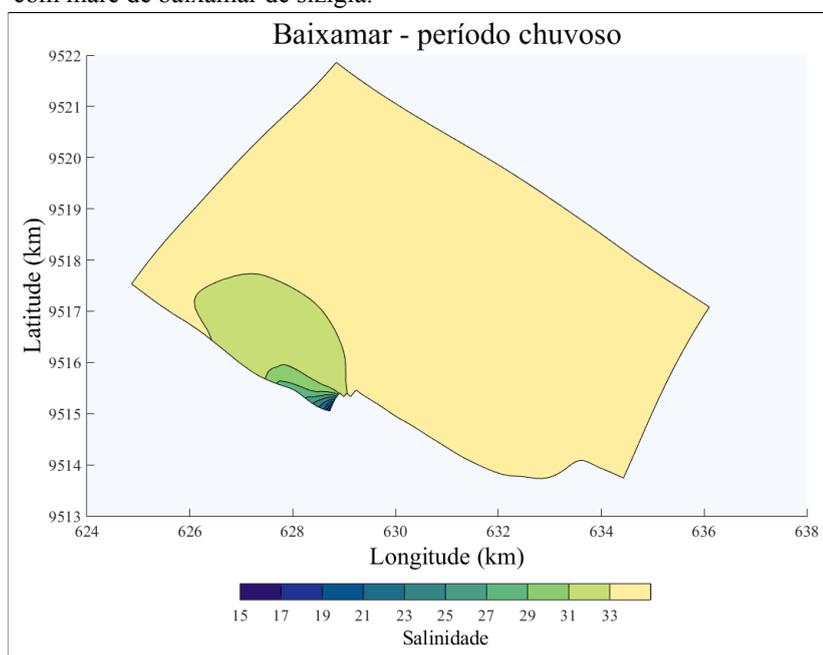
Figura 27- Transecto do grid costa para os perfis longitudinais ao longo da pluma do estuário.



Fonte: O Autor.

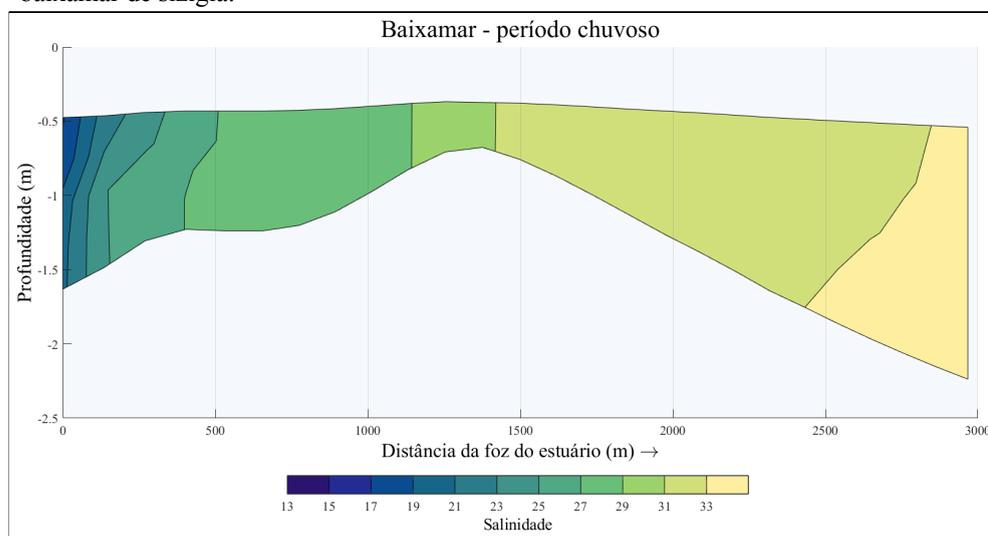
Durante a baixamar (Figura 28), a pluma alcançou um raio de aproximadamente 3.000 metros da região da foz, porém só houve uma variação significativa nos valores de salinidade em um raio de 1.000 m. Pode ser observado um gradiente superficial na região mais próxima à foz, com 14 de salinidade por quilômetro. Com relação ao perfil vertical (Figura 29), nota-se com mais facilidade o gradiente lateral de salinidade próximo à foz. Não foi observada nenhuma estratificação vertical na pluma nesse período.

Figura 28 - Mapa de salinidade superficial da costa no período chuvoso e com maré de baixamar de sizígia.



Fonte: O Autor.

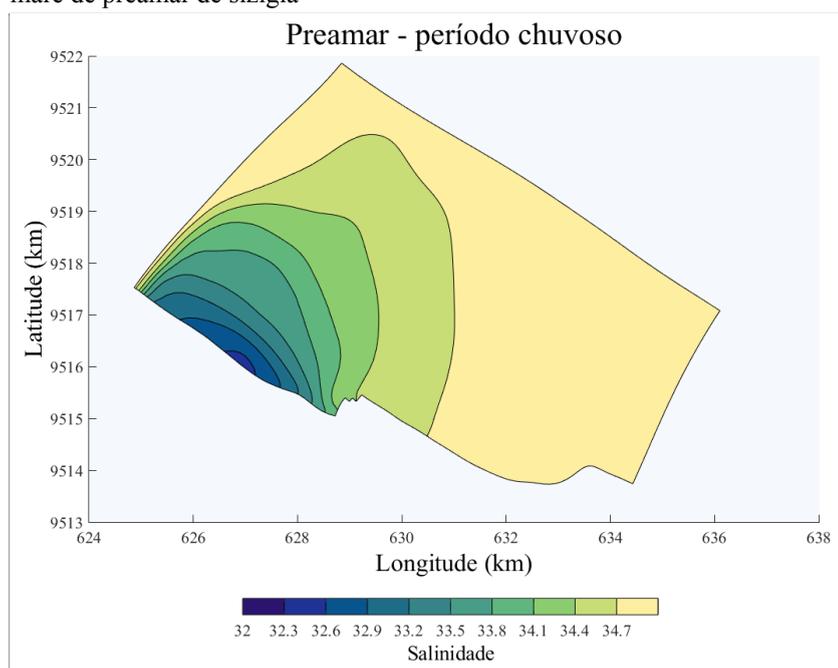
Figura 29 - Perfil lateral de salinidade da costa no período chuvoso e com maré de baixamar de sizígia.



Fonte: O Autor.

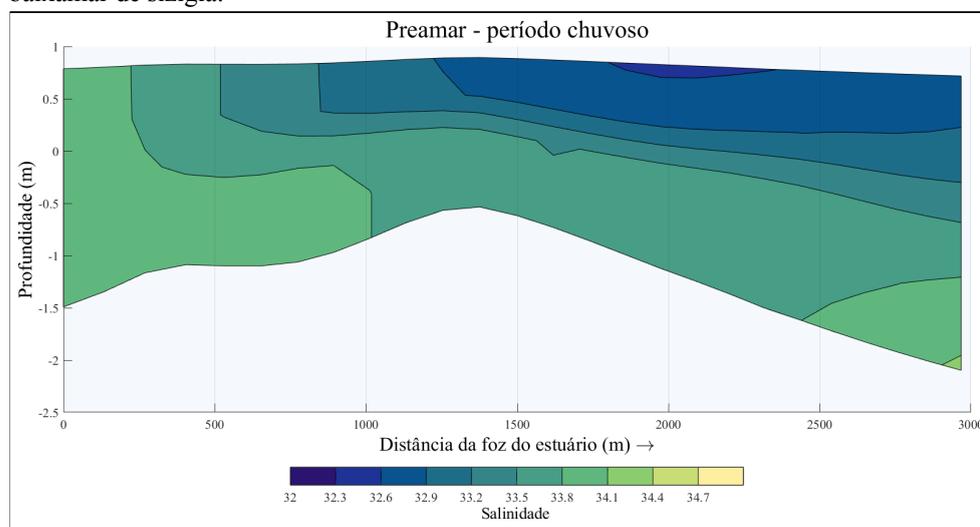
Na preamar (Figura 30), a pluma de salinidade teve um alcance de 7.000 metros de distância da foz, porém com um baixo gradiente superficial de salinidade. O menor valor de salinidade foi de 32, na região mais próxima à costa. Analisando o perfil vertical (Figura 31), é possível observar uma leve estratificação da coluna d'água, com variação de 3 de salinidade por metro.

Figura 30 - Mapa de salinidade superficial da costa no período chuvoso e com maré de preamar de sizigia



Fonte: O Autor.

Figura 31 - Perfil lateral de salinidade da costa no período chuvoso e com maré de baixamar de sizigia.

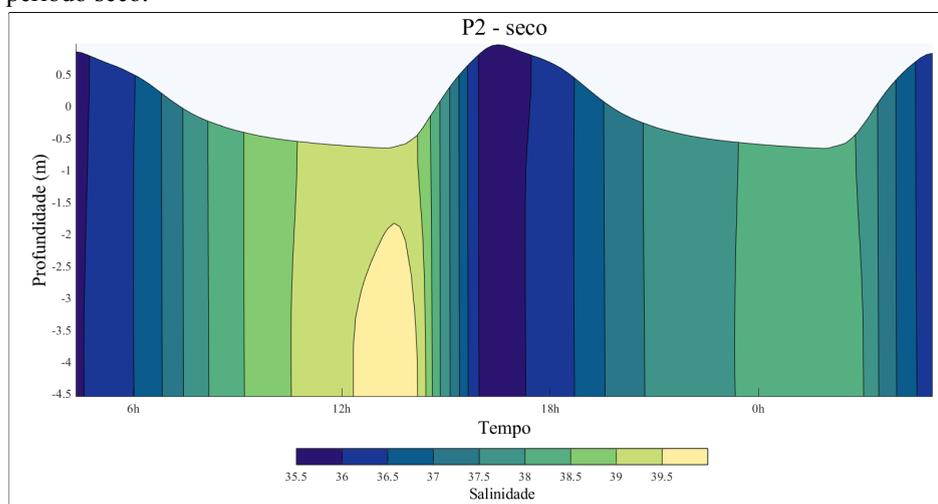


Fonte: O Autor.

Para analisar a dispersão e mistura pontual de salinidade no estuário, foram feitos gráficos da variação espaço-temporal em dois ciclos de maré de sizígia dos pontos P2 e P3 nos períodos seco e chuvoso. O ponto P1 não apresentou qualquer variação de salinidade em um ciclo de maré no período chuvoso e portanto não foi considerado importante para esta análise.

Durante o período seco, o ponto P2 (Figura 32) apresentou uma variação de salinidade de 35,5 a 40, com um perfil homogêneo em todo o ciclo de maré. Houve um aumento de salinidade no fundo durante a baixamar, porém com pouca variação em relação à superfície. Uma das características apresentadas é o efeito da hipersalinidade do estuário em relação às ondulações da maré: na vazante, a água marinha diminui a sua influência dentro do estuário e o valor de salinidade aumenta até chegar ao seu máximo na baixamar. O inverso ocorre na maré de enchente, onde a água marinha penetra estuário adentro, dilui gradativamente a água hipersalina e alcança os menores valores de salinidade no ciclo de maré.

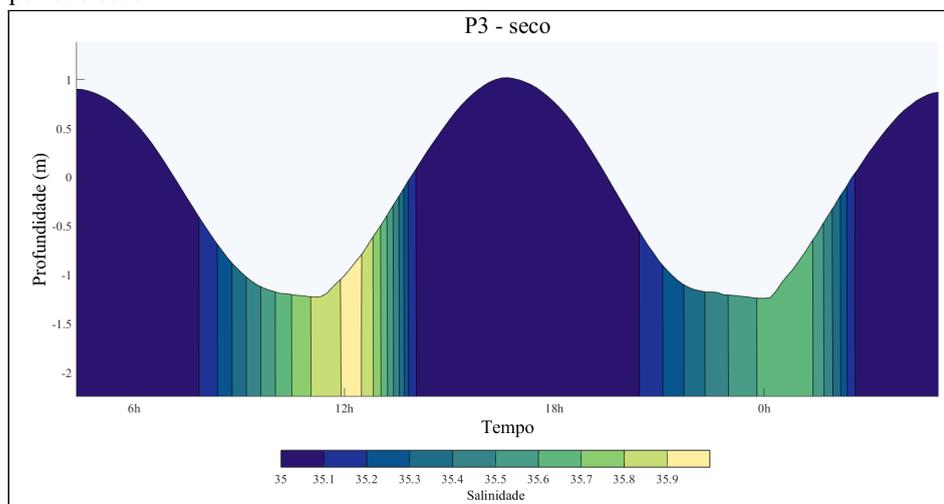
Figura 32 - Variação temporal do perfil vertical de salinidade no ponto P2 durante o período seco.



Fonte: O Autor.

O ponto P3 (Figura 33) apresentou uma pequena variação de salinidade de 35 a 36 no período seco, o que indicou que a hipersalinidade do estuário não consegue alterar de maneira significativa a região próxima a foz. Não houve qualquer estratificação vertical da salinidade durante o ciclo de maré. Pode ser constatada a mesma característica de salinidade que ocorre no ponto P2, com valores menores de salinidade na preamar e com um aumento gradual com a maré de vazante até chegar a um máximo na baixamar.

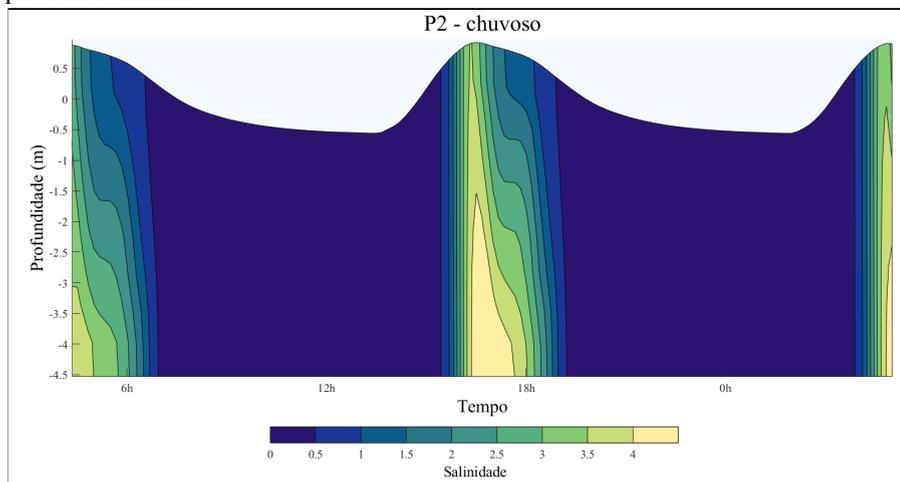
Figura 33 - Variação temporal do perfil vertical de salinidade no ponto P3 durante o período seco.



Fonte: O Autor.

No período chuvoso, o ponto P2 (Figura 34) apresentou variação de salinidade entre 0 e 4,5 e uma leve estratificação na preamar com valores próximos de 1 na superfície e 4 no fundo. Em níveis mais baixos, como a maré de vazante e a baixamar, ocorre a ausência da água costeira e o estuário apresenta valor zero de salinidade em todo o perfil. No gráfico observa-se uma característica inversa daquelas apresentadas pelos perfis do período seco, com valor zero de salinidade na baixamar, resultado do efeito hidráulico da vazão fluvial, e o aumento da salinidade com a maré de enchente, indicando a intrusão da água marinha para a mistura estuarina. Esse é um atributo bem definido em estuários clássicos, onde o rio apresenta uma baixa salinidade que é gradualmente misturada com a água salgada de origem oceânica.

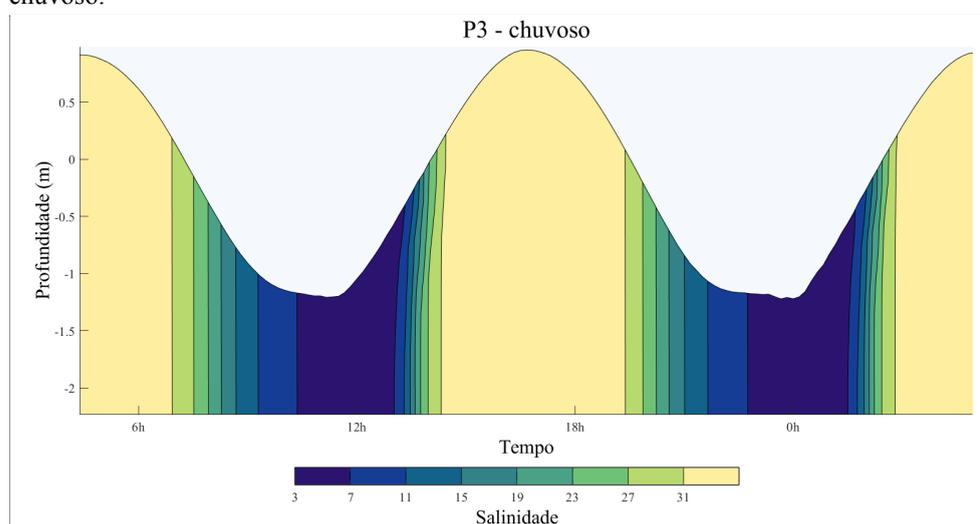
Figura 34 - Variação temporal do perfil vertical de salinidade no ponto P2 durante o período chuvoso.



Fonte: O Autor.

O ponto P3 (Figura 35) na simulação do período chuvoso apresentou a maior variação de salinidade observada nos resultados do modelo. Essa grande variação é explicada porque no período chuvoso a água doce continental conseguir alcançar a região da foz durante a baixamar e a água salgada marinha penetra toda a extensão lateral da barra arenosa, causando uma alternância entre o domínio marinho e continental pelas oscilações de maré. A salinidade não apresentou estratificação vertical em nenhum instante do ciclo de maré. Assim como no ponto P2, o perfil de salinidade apresentou uma característica de um estuário clássico, com valores menores na baixamar e um aumento gradual pelo efeito da intrusão salina da água marinha.

Figura 35 - Variação temporal do perfil vertical de salinidade no ponto P3 durante o período chuvoso.



Fonte: O Autor.

5.3 Discussão

O estuário do Rio Pirangi mostrou uma assimetria de maré com uma dominância de enchente nas duas simulações, conforme caracterizado por Schettini *et al.*, (2017). Segundo Dronkers (1986), a principal influência para um estuário assimétrico é o relevo, onde ocorre o atrito com o fundo em áreas rasas, provocando variações nos vetores de velocidade. O relevo está atrelado aos padrões de sedimentação que dependem da circulação estuarina para o remodelamento dos sedimentos, formando uma retroalimentação desse sistema.

Um dos processos que alteram a morfologia do estuário é a construção de obras de engenharia ao longo do curso do rio. O Pirangi possui vários barramentos de pequeno e médio

porte, causando uma retenção de sedimentos que chegariam para a região estuarina, o que pode provocar mudanças a longo prazo na assimetria de maré. No contexto de mudanças climáticas, Valentim *et al.* (2013) afirmam que o aumento do nível do mar pode ocasionar um maior prisma de maré para o estuário e intensificar a assimetria em estuários que já apresentam essa característica.

O estuário apresentou uma hipersalinidade durante o período seco e características de um estuário clássico durante o período chuvoso. Essas mudanças nas propriedades físicas do estuário são bem comuns em regiões de sazonalidade na precipitação, como o semiárido. Valentim *et al.*, (2018) mensuraram valores de salinidade para o Rio Coreaú, localizado no estado do Ceará. No período seco a salinidade estava em 37 na região da foz e 44 em 20 km a montante, indicando um perfil hipersalino. Já para o período chuvoso, a salinidade na foz era de 37 e a 20 km era de 13. O Rio Apodi/Mossoró no Rio Grande do Norte apresenta valores baixos de salinidade durante o período chuvoso, porém sofre uma alta mudança de salinidade no período seco, chegando a valores superiores a 70 (MEDEIROS *et al.*, 2018).

Não foi observada nenhuma estratificação vertical na foz no período seco ou chuvoso, diferente do que foi mencionado por Campos e Morais (2007), mas o estuário mostrou um perfil bem misturado com relação à salinidade em todas as simulações como foi apontado pelos autores. Estuários pequenos (rasos e estreitos) podem apresentar um perfil vertical homogêneo devido ao efeito contínuo do atrito com o fundo e com as laterais e zonas intermareais, a fricção do vento que consegue alcançar as camadas inferiores e a vazão fluvial pela mistura turbulenta dentro do sistema (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

Durante o período seco, os valores de velocidade residual no Pirangi foram inexpressivos para a circulação total, o que indica que a circulação gravitacional não é dominante para a mistura, mesmo se tratando de um estuário hipersalino. Largier (2010) afirma que estuários de baixo fluxo tendem a ter um fraco gradiente longitudinal de densidade e que o processo de mistura longitudinal é dominado pelo efeito da maré. Em alguns casos específicos onde o gradiente longitudinal é maior, o autor cita que 3 termos dominam a circulação: o aquecimento superficial, a evaporação e os fluxos causados por diferenças de densidade.

Para Savenije (1988), em estuários do tipo bem misturado a intrusão salina é governada pelo equilíbrio entre o transporte advectivo formado pelo gradiente longitudinal do estuário e o transporte difusivo da água salgada. Ainda segundo o autor, a evaporação e a

precipitação local, muitas vezes negligenciadas em modelos estuarinos, possuem uma grande influência para a intrusão salina e para a mistura longitudinal. Utilizando um modelo teórico para o estuário da Gâmbia, ele observou que a inclusão da evaporação na equação geral do modelo resultou em valores mais próximos das medições *in situ* de salinidade do estuário.

Tendo em vista as informações supracitadas, pode-se concluir que a evaporação é um fator importante para a circulação de estuários rasos e bem misturados e deve ser levada em consideração na modelagem. O Delft3D possui uma opção para adicionar um balanço evaporação/precipitação ao modelo hidrodinâmico, o que poderia dar mais fidelidade aos processos que atuam no estuário, principalmente no período seco onde a taxa de evaporação é maior. Entretanto, não há postos meteorológicos na região que utilizem a medição *in situ* com tanque evaporimétrico, o que restringe a obtenção de dados ao sensoriamento remoto ou a valores teóricos de evaporação.

6 CONCLUSÃO

O estudo em questão dissertou sobre as variações na circulação e na dispersão de salinidade entre os períodos seco e chuvoso no estuário do Rio Pirangi. O modelo tridimensional do estuário foi implementado e validado com êxito e pode ser usado como ferramenta para uma melhor gestão ambiental desse ecossistema. Os constituintes harmônicos de maré apresentaram um erro de amplitude e de fase menor que 0,5% entre os dados observados e modelados. O modelo subestimou o nível do mar na baixamar e subestimou as velocidades longitudinais durante a vazante.

O estuário apresentou assimetria de maré, com aproximadamente 8h de vazante e 4,4h de enchente. As correntes longitudinais máximas de enchente apresentaram valores semelhantes para ambos os períodos, entre 0,6 e 0,7 m/s. No período seco, o valor máximo de vazante foi de 0,4 m/s e no período chuvoso, de 0,6 m/s. No período chuvoso, houve cisalhamento da velocidade na maré de vazante. A velocidade residual apresentou valores positivos em todo o perfil no período seco, entre 0,8 e 1,6 cm/s. No período chuvoso houve uma variação no perfil de velocidade residual, com valores de 11,3 cm/s na superfície e -1,5 cm/s no fundo.

O Pirangi se comportou como um estuário hipersalino no período seco e como um estuário clássico no período chuvoso. No período seco, a porção superior alcançou um valor de salinidade de 49 e a máxima influência do estuário chegou a 1 km a montante da foz. Para o período chuvoso, a salinidade na porção superior foi de zero, a pluma estuarina conseguiu ultrapassar a foz formando uma leve estratificação vertical no litoral e com máxima influência a 7 km da costa. O estuário apresentou um perfil bem misturado verticalmente em ambas as simulações, porém com variações laterais na região da barra durante a preamar devido a presença de bancos arenosos.

São necessários mais estudos que analisem a circulação do Pirangi, que identifiquem os barramentos ao longo do rio e quantifiquem a sua influência para o estuário. Além disso são necessários mais dados *in situ* para a calibração do modelo e para uma simulação mais fidedigna da realidade.

REFERÊNCIAS

- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH)**. Portal HIDROWEB. Disponível em: www.snirh.gov.br/hidroweb. Acesso em: 13 fev. 2022.
- BHATIA, R; BHATIA, M. **Water and poverty alleviation**: the role of investments and policy interventions. *In: Water crisis: Myth or reality?*. Londres: Taylor & Francis, 2006. cap. 12, p. 197-220. ISBN 9-78-0-415-36438-6.
- CAMPOS, J.N.B.; MORAIS, J.O. Avaliação do uso potencial de áreas estuarinas a partir da identificação e caracterização do comportamento de variáveis hidro-climáticas, oceanográficas e ambientais – estudo de caso: Rio Pirangi-CE. FUNCEME, Fortaleza, 2007.
- CHIEN, N. Changes in river regime after the construction of upstream reservoirs. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 10, n. 2, p. 143–159, 1985.
- COGERH - Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Evolução do volume d'água armazenado por região hidrográfica**. Disponível em: www.portal.cogerh.com.br. Acesso em: 20 set. 2020.
- COLLIER M.; WEBB R.; SCHMIDT J.C. **Dams and Rivers**: A Primer on the downstream Effects of Dams. Arizona: US Geological Survey. 94p, 1996.
- Delft Hydraulics. **Delft3D-FLOW user manual**. Tech. Rep. Version 3.13, 2006.
- DIAS, F. J. ; CASTRO, B. M. ; LACERDA, L.D. ; MIRANDA, L. B. ; MARINS, R. V. Physical characteristics and discharges of suspended particulate matter at the continent-ocean interface in an estuary located in a semiarid region in northeastern Brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 180, p. 258-274, 2016.
- DRONKERS, J. Tidal asymmetry and estuarine morphology. **Netherlands Journal of Sea Research**, v. 20, n. 2, p. 117–131, 1986.
- FERREIRA, A.G.; MELLO, N.G.S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 1, n. 1, p. 15–28, 2005.
- FISCHER, H. B. Mixing and dispersion in estuaries. **Annual review of fluid mechanics**, v. 8, n. 1, p. 107-133, 1976.
- FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Base de dados pluviométricos**. Fortaleza: FUNCEME. Disponível em: www.funceme.br. Acesso em: 21 set. 2020.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 13 fev. 2022.

LARGIER, J. L.; HEARN, C. J.; CHADWICK, D. B. Density structures in “low inflow estuaries”. **Coastal and Estuarine Studies**, v. 53, p. 227–241, 1996.

LARGIER, J. Low-inflow estuaries: hypersaline, inverse, and thermal scenarios. **Contemporary issues in estuarine physics**, p. 247-272, 2010.

MEDEIROS, D. H. M. D.; CAVALCANTE, A. A.; PINHEIRO, L. D. S.; ROCHA, R. D. M. Variação longitudinal da salinidade do estuário hipersalino do Rio Apodi/Mossoró (Rio Grande do Norte, Brasil). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 3, p. 850 -863, 2018.

MELO, B. R. **Como nutrientes e sólidos dissolvidos variam em um estuário hipersalino?**. Orientador: Marcelo de Oliveira Soares. 2017. 55 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Ciências ambientais) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

MENDONÇA, F. A.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia**: Noções básicas e climas do Brasil. 1. ed. São Paulo: Editora Oficina de Textos. v. 1. 208 p., 2007.

MESQUITA, E. A.; FROTA, P. V.; SOARES, V. L. Carcinicultura no litoral do Ceará: análise das modificações impressas no estuário do rio Pirangi – CE. **Revista GeoNorte**, v. 1, n 4, p. 540–551, 2012.

MIRANDA, L.B.; CASTRO, B.M.; KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. 2. ed. São Paulo: EDUSP, 411p, 2002.

MOLISANI, M.M.; CRUZ, A.L.V.; MAIA, L.P. Estimativa da descarga fluvial para os estuários do Estado do Ceará. **Arquivos de Ciências do Mar**. v. 39, p. 53–60, 2006.

PERILLO, G.M.E. New geodynamic definition of estuaries. **Rev. Geophysics**, v. 31, p. 281-287, 1989.

PINHEIRO, R. D. **Análise do comportamento hidrodinâmico e sedimentológico do estuário do Rio Piranji - CE (NE/Brasil)**. Orientador: Iran Carlos Stalliviere Corrêa. 2003. 176 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

POTTER, I. C.; CHUWEN, B. M.; HOEKSEMA, S. D.; ELLIOTT, M. The concept of an estuary: A definition that incorporates systems which can become closed to the ocean and hypersaline. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 87, n. 3, p. 497–500, 2010.

PRITCHARD, D.W. Estuarine Hydrography. **Advances in Geophysics**, Cambridge, v.1, p.243-280, 1952.

PRITCHARD, D. W. What is an estuary: physical viewpoint. In: G.H. Lauff, **Estuaries**. Washington, v. 83, p. 3-5, 1967.

SAVENIJE, H. H. G. Influence of rain and evaporation on salt intrusion in estuaries. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 114, n. 12, p. 1509-1524, 1988.

SCHETTINI, C.; BEZERRA, L.; TRUCCOLO, E. Distribuição longitudinal da salinidade em estuários de baixo influxo no Ceará. **XII Simpósio de recursos hídricos do nordeste**. Natal, 2014.

SCHETTINI C.A.F.; VALLE-LEVINSON A.; TRUCCOLO E.C. Circulation and transport in short, low-inflow estuaries under anthropogenic stresses. **Regional Studies in Marine Science**, v. 10, p. 52-64, 2017.

SILVA, J. M. O.; DA SILVA, E. V. Análise Hidroclimática da Bacia Hidrográfica do Rio Pirangi/Ce. **Revista Geonorte**, v. 3, n. 8, p. 346–358, 2012.

TUCCI, C. E. M. Manejo Integrado dos Recursos Hídricos. *In*: Gestão da água no Brasil. Brasília: UNESCO, 2001. v. 1, p. 27-84. ISBN 85-87853-26-0.

VALENTIM, J. M.; VAZ, L.; VAZ, N.; SILVA, H.; DUARTE, B.; CAÇADOR, I.; *et al.* Sea level rise impact in residual circulation in Tagus estuary and Ria de Aveiro lagoon. **Journal Coastal Research**, Florida v. 65, p. 1981-1987, 2013.

VALENTIM, S. S.; MENEZES, M. O. B.; TEIXEIRA, C. E. P. Seasonally Hypersaline Estuaries in Semiarid Climate Regions: an Example from the Northeast Brazil. **Journal of Coastal Research**, Florida, v. 85, p. 6–10, 2018.