



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE OCEANOGRAFIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MODELAGEM NUMÉRICA NA ESTIMATIVA DO IMPACTO
DA COROA DO QUIRIRI NA HIDRODINÂMICA DO RIO
PARÁ, BRASIL.**

Trabalho apresentado por:

GIULIAN SMITH ARAÚJO MONTEIRO

Orientador: Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário (UFPA)

Coorientadora: MSc. Thaís Angélica da Costa Borba (UFPA)

BELÉM-PARÁ

2018



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE OCEANOGRAFIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Modelagem numérica na estimativa do impacto da Coroa Do
Quiriri na hidrodinâmica do rio Pará, Brasil.**

Trabalho apresentado por:

GIULIAN SMITH ARAÚJO MONTEIRO

Orientador: Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário (UFPA)

Coorientadora: MSc. Thaís Angélica da Costa Borba (UFPA)

BELÉM-PARÁ

2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da
Universidade Federal do Pará Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

M772m Monteiro, Giulian Smith Araújo.
Modelagem numérica na estimativa do impacto da Coroa Do Quiriri na hidrodinâmica do rio Pará, Brasil.
/ Giulian Smith Araújo Monteiro. —2018.
xiv, 39 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário
Coorientador(a): Prof^a. MSc. Thaís Angélica da Costa Borba
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de Oceanografia, Instituto de
Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

1. Hidrodinâmica. 2. Modelagem. 3. Barra arenosa. 4. Rio Pará. 5. Coroa do Quiriri. I. Título.

CDD 551.46009811



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE OCEANOGRAFIA**

**Modelagem numérica na estimativa do impacto da Coroa do
Quiriri na hidrodinâmica do rio Pará, Brasil.**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR:

GIULIAN SMITH ARAÚJO MONTEIRO

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Bacharel em OCEANOGRAFIA

Data de Aprovação: 13 /12 /2018

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário – Orientador
Doutor em Geofísica Marinha – UFPA

MSc. Thaís Angélica da Costa Borba – Orientador
Mestre em Geofísica Marinha – UFPA

MSc Aderson Manoel da Silva Gregório - Membro
Mestre em Geociências - UFRGS

Prof. Dr. Marcelo Rollnic - Membro
Doutor em Oceanografia - UFPE

AGRADECIMENTOS

A Deus, Rei do Universo e a Santa Maria, que olharam com incalculável piedade para mim durante toda a minha vida.

À toda a minha família, que se espalha pelos mais diversos cantos do Brasil sem, em nenhum momento perder o amor que nos une, com destaque àqueles que me são mais próximos como meu pai (Júlio), minha mãe (Marlene), meus irmãos (Ayrton, Albene e Ivens) e meus tios (Albene e Antônio).

Aos meus orientadores, Renan e Thaís, que lançaram mão de muita paciência nessa empreitada de me orientar, ainda mais eu não sendo lá o melhor aluno quando o assunto é prazo de entrega, e a todos os professores que passaram pelo caminho da minha graduação e deixaram algum ensinamento.

Aos membros da banca, por dedicar parte de seu tempo e sabedoria para avaliar meu trabalho.

A todos os amigos da turma de Oceanografia, que depois de muitos pesadelos com biogeoquímica e muita neve achatando os pólos da Terra, finalmente chegou ao final da Caverna do Dragão, e um agradecimento especial à Luana (cabeçuda) que, com muito amor e paciência, me ajudou a corrigir muitos dos meus erros.

Aos membros do Laboratório de Oceanografia Física (LOF/Lapmar), que me influenciaram em diferentes partes da minha graduação, me ajudando a descobrir minhas áreas de interesse dentro do curso.

Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) e ao Programa de Apoio ao Doutor Pesquisador (PRODOUTOR), que financiaram o projeto que deu origem a este trabalho.

Ao meu time do coração (papão da Curuzú), que com sua performance esse ano me fez repetir várias vezes a frase: “É ... deixa eu cuidar do meu TCC porque esse time aí não tem jeito.”.

Ao Irmão Mar pela sabedoria adquirida.

*“ Até o amor mais baixo
eleva a alma que o
experimenta.”*

Louis Lavelle

RESUMO

Os estuários amazônicos são de suma importância para a região por fornecerem água e alimento para a fauna e para a população, além de serem meio de escoamento dos produtos destinados à exportação. Entretanto, a hidrodinâmica de estuários como o Rio Pará é complexa e certos pontos de seu canal, como barras arenosas submersas, representam risco para embarcações de grande porte. Neste estuário, a barra arenosa conhecida popularmente como “Coroa do Quiriri” localiza-se na sua zona de mistura e o presente estudo visa verificar os impactos, na hidrodinâmica, que a remoção da Coroa do Quiriri poderia trazer ao estuário do Rio Pará. Com este objetivo, foi realizada a modelagem bidimensional da região por meio do programa *Delft 3D*. Utilizando-se de dados batimétricos e hidrodinâmicos, foram criados dois cenários para as simulações, sendo o primeiro o estágio real e o segundo com a Coroa do Quiriri removida. Da validação, obteve-se $R^2=0.8447$, $RMSE = 0.3069$ e $\rho=0.9323$ para os dados de nível estuário acima, $R^2=0.8585$ e $\rho=0.9011$ para os dados de velocidade e $R^2=0.9353$ e $\rho=0.9451$ para os dados de vazão. Na comparação entre as simulações, foi explicitado que a remoção da coroa reduz a influência do prisma de maré no estuário, o que indicou que a Coroa do Quiriri potencializa o sinal de maré no Rio Pará ao reduzir a área do canal principal na desembocadura. A partir dos dados do modelo, pode-se supor que as significantes mudanças observadas na hidrodinâmica do Rio Pará podem também atingir outros parâmetros oceanográficos, fazendo-se, porém, necessária a adição de dados referentes a esses parâmetros no modelo a fim de que se acessem objetivamente suas variações no estuário acarretadas pela remoção da Coroa do Quiriri.

Palavras-chaves: Hidrodinâmica. Modelagem. Barra arenosa. Rio Pará. Coroa do Quiriri.

ABSTRACT

The amazon estuaries are of the utmost importance for its region for providing water and food for the fauna and population, also being a mean of flow of products destined to the exportation. However, the hydrodynamics of estuaries such as Para River is complex and some points of its channel, such as submerged sandbars, represent danger to large vessels. In this estuary, the sandbar popularly known as Quiriri Crown is located on its mixture zone and this study aims to verify the impacts, on hydrodynamics, that the removal of Quiriri Crown could bring to the Para River estuary. With this objective, the bidimensional modelling of the region was done through the software Delft 3D. Using bathymetric and hydrodynamic data, two scenarios were made for the simulations, being the first one the real stage and the second with the Quiriri Crown removed. From the validation, was obtained $R^2=0.8447$, $RMSE=0.3069$ and $\rho=0.9323$ for the water level data in the upper estuary, $R^2=0.8585$ and $\rho=0.9011$ for velocity data and $R^2=0.9353$ and $\rho=0.9451$ for instantaneous discharge data. On the comparison between simulations, it became clear that the removal of Quiriri Crown reduced the influence of the tidal prism in the estuary, indicating that the Quiriri Crown boosts the tide signal in Para River by reducing the area of the main channel in the estuary mouth. From the model data, it can be inferred that the significant changes observed on the Para River hydrodynamics may strike other oceanographic parameters, however, it's necessary the addition of data about these parameters to the model in order to fully access the changes on the estuary caused by the Quiriri Crown removal.

Keywords: Hydrodynamics. Modeling. Sandbar. Para River. Quiriri Crown.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Profundidade da Coroa do Quiriri a) no nível real, b) um metro abaixo do nível real, c) dois metros abaixo, d) três metros abaixo, e) quatro metros abaixo e f) cinco metros abaixo do nível real.....	4
Figura 2 - Localização da malha (em azul) e dos tributários principais em relação ao estuário.	7
Figura 3 - Representação das fontes dos dados batimétricos (A), localização da Coroa do Quiriri e do perfil batimétrico (B) e batimetria utilizada nas duas simulações (C).....	9
Figura 4 - Localização dos pontos de observação e das seções transversais.....	11
Figura 5 - Comparação entre dados da DHN (eixo y) com dados do modelo (eixo x).	12
Figura 6 - Distância entre a estação da DHN em Mosqueiro e o ponto P1.	12
Figura 7 - Comparação entre dados medidos e modelados em quadratura (A) e sizígia (B) para o ponto P1.	13
Figura 8 - Comparação de dados de velocidade presentes na literatura com dados do modelo.....	14
Figura 9 - Comparação entre dados de vazão medidos e modelados próximo a montante do estuário.	14
Figura 10 - Dados de nível para o ponto "estuário acima" com gráfico de diferença entre as simulações.	15
Figura 11 - Gráficos de velocidade média na coluna d'água para o ponto P1.	16
Figura 12 - Dados de nível para o ponto "estuário centro" com gráfico de diferença entre as simulações.	16
Figura 13 - Gráficos de velocidade média na coluna d'água para o ponto P2.	17
Figura 14 - Dados de nível para o ponto "coroa direito" com gráfico de diferença entre as simulações.	17
Figura 15 - Gráficos de velocidade média na coluna d'água para o ponto P3.	18
Figura 16 - Dados de nível para o ponto "coroa esquerdo" com gráfico de diferença entre as simulações.	18
Figura 17 - Gráficos de velocidade média na coluna d'água para o ponto P4.	19
Figura 18 - Dados de nível para o ponto "oceano centro" com gráfico de diferença entre as simulações.	19
Figura 19 - Gráficos de velocidade média na coluna d'água para o ponto P5.	20
Figura 20 - Dados de nível (A) e velocidade (B) para o ponto P6 com gráficos de diferença entre as simulações.	21

Figura 21 - Dados de nível (A) e velocidade (B) para o ponto P7 com gráficos de diferença entre as simulações.	21
Figura 22 - Variações da velocidade e do nível em um ciclo de maré de sizígia.....	23
Figura 23 - Dados de velocidade e nível em um ciclo de maré de quadratura.....	24
Figura 24 - Série temporal de vazão instantânea na seção "montante".	27
Figura 25 - Série temporal de vazão instantânea na seção "meio".	28
Figura 26 - Série temporal de vazão instantânea na seção "jusante".....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de vazão média para os tributários principais do Rio Pará.	6
Tabela 2 - Propriedades da malha utilizada.	8
Tabela 3 - Dados médios das simulações, discriminando valores de enchente e vazante em cada ponto.	25
Tabela 4 - Variação entre a simulação Sem Coroa e a Atual em dois estágios de maré. Valores em negrito são os valores significativos dado $p>0.05$	26
Tabela 5 - Dados médios separados de acordo com os períodos de maré.	26
Tabela 6 - Porcentagem de variação entre as simulações, valores em negrito representam as variações significativas dado $p>0.05$	27
Tabela 7 - Dados médios de vazão instantânea para as três seções, discriminando períodos e estágios de maré	29
Tabela 8 - Variação entre as simulações, dados em negrito correspondem às variações significativas dado $p>0.05$	29

LISTA DE ABREVIACÕES

ANA –	Agência Nacional de Águas
CDP –	Companhia das Docas do Pará
Conab –	Companhia Nacional de Abastecimento
DHN –	Diretoria de Hidrografia e Navegação
FAO -	Food and Agriculture Organization
FEMAR –	Fundação de Estudos do Mar
FES –	Finite Element Solution
FGV –	Fundação Getúlio Vargas
GEBCO –	General Bathymetric Chart of the Oceans
MMA –	Ministério do Meio Ambiente
PCA –	Plataforma Continental Amazônica

LISTA DE SÍMBOLOS

F_{ξ} e F_{η} =	Momento da turbulência nas direções ξ e η (m/s^2);
M_{ξ} e M_{η} =	Entrada ou saída de momento nas direções ξ e η (m/s^2);
P_{ξ} e P_{η} =	Gradiente da pressão hidrostática nas direções ξ e η ($\text{kg/m}^2\text{s}^2$);
Q_{vm} =	Vazão instantânea (m^3/s);
R^2 =	Coeficiente de determinação;
U e V =	Velocidade média vertical nas direções ξ e η (m/s);
d =	Profundidade segundo ζ (m);
f =	Parâmetro de coriolis ($1/\text{s}$);
p =	Probabilidade de significância;
ρ =	Correlação de spearman;
ρ_0 =	Densidade da água (kg/m^3);
q_{in} =	Entrada por unidade de volume ($1/\text{s}$);
q_{out} =	Saída por unidade de volume ($1/\text{s}$);
t =	Tempo (s);
u e v =	Velocidade de fluxo (m/s);
ζ =	Datum vertical (m);
$\sqrt{G_{\xi\xi}}$ e $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ =	Coeficientes de transformação de coordenadas (m);
ξ, η =	Coordenadas horizontais e curvilíneas;
σ =	Posição vertical;
ω =	Velocidade vertical (m/s);

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
EPÍGRAFE	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	viii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ABREVIACÕES	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	2
3 OBJETIVOS	5
3.1 OBJETIVO GERAL	5
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
4 METODOLOGIA	6
4.1 ÁREA DE ESTUDO	6
4.2 MODELAGEM	7
5 RESULTADOS	12
5.1 VALIDAÇÃO	12
5.2 PONTOS DE OBSERVAÇÃO	15
5.2.1 P1 – Estuário Acima	15
5.2.2 P2 – Estuário Centro	16
5.2.3 P3 – Coroa Direito	17
5.2.4 P4 – Coroa Esquerdo.....	18
5.2.5 P5 – Oceano Centro	19
5.2.6 P6 e P7 – Oceano Direito e Esquerdo	20
5.2.7 Médias Gerais	22
5.3 SEÇÕES TRANSVERSAIS	27

5.3.1 S1 – Montante	27
5.3.2 S2 – Meio	28
5.3.3 S3 – Jusante.....	28
5.3.4 S4 – Médias Gerais	29
6 DISCUSSÕES	30
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	32
REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

Os estuários são, conforme Kjerfve, 1987, ambientes costeiros com conexão restrita com o oceano adjacente, podendo essa conexão ser aberta ou intermitente, sendo eles, assim, espaços de transição entre os meios marinho e fluvial, desempenhando então o papel intermediário entre a região continental e a região oceânica. Por isso, os estuários são regiões estratégicas onde se concentram 60% das grandes cidades do mundo (Harris *et al.* 2016), que visam facilitar processos como importação e exportação por meio de portos.

Na região amazônica, destaca-se o Estuário do Rio Pará. Este estuário apresenta significativa importância para o desenvolvimento da região porque abriga os portos responsáveis pela exportação de minérios de ferro e de alumínio, que contabilizam mais da metade da renda de exportação do estado (Governo Estadual 2017). Em relação ao público geral, os estuários têm como principais finalidades o abastecimento das moradias e a pesca, visto que o estado produz por ano, 350 mil toneladas de pescado (FAO 2016). Do ponto de vista oceanográfico, o estuário do Rio Pará contribui no aporte de água doce e nutrientes para a zona costeira.

No Rio Pará, a elevada descarga fluvial associada ao regime de macro marés conferem ao estuário uma hidrodinâmica complexa (Menezes *et al.* 2013) visto que são condições raramente observadas em conjunto (Miranda *et al.* 2002). A descarga fluvial é favorecida pela conexão com os rios Amazonas e Tocantins, que são rios de alta vazão, e pelo regime pluviométrico local.

A elevada amplitude de maré não se limita à desembocadura do estuário, mesmo este apresentando elevada descarga fluvial, porque a declividade no canal do estuário é baixa, permitindo uma ampla intrusão salina neste. Associada à morfologia do canal, a amplitude de maré pode acarretar problemas para a navegação no Rio Pará em regiões como o Canal do Quiriri, que é delimitado a leste por uma barra arenosa, a Coroa do Quiriri, que pode ficar descoberta durante a baixa-mar e atua como barreira física entre o referido canal e o restante do estuário.

A divisão física causada pela Coroa do Quiriri faz com que as margens leste e oeste do Rio Pará não se encontrem entre 0°24'S até 0°52'S, cerca de 50 Km; acarretando então diferenças hidrodinâmicas entre essas regiões e limitações para a navegação (Souza 2006). Neste trabalho, pretende-se elucidar a influência da Coroa do Quiriri na hidrodinâmica do Rio Pará por meio de modelagem computacional.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os ambientes estuarinos podem ser definidos de diferentes formas, visto que, devido a sua ampla diversidade, ainda há dificuldade em elaborar um conceito suficientemente amplo capaz de abranger todos os corpos definidos como estuários (Elliott & McLusky 2002). No presente estudo, foi utilizada a definição de estuários de Kjerfve, (1987) citada anteriormente, entretanto, outras definições provenientes de diferentes autores podem ser apresentadas para caracterizar um estuário.

A definição de Prichard, (1955) descreve o estuário como um corpo d'água costeiro semifechado com livre ligação com o oceano aberto e, em seu interior, a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce de origem continental. Por sua vez, Dionne (1963) definiu o estuário como uma reentrância do mar, que atinge o vale de um rio até o limite da influência da maré, sendo geralmente subdividido em três setores: Estuário inferior, com ligação livre com o oceano aberto; estuário médio, de intensa mistura e estuário fluvial, de predominância fluvial.

Kjerfve (1987) divide o estuário em três zonas: Zona de Maré do Rio (ZR), Zona de Mistura (ZM) e Zona Costeira (ZC). Este zoneamento provém da necessidade de delimitar diferentes regiões no estuário e definir parte da plataforma continental, onde se apresenta a Zona Costeira, como parte do estuário, visto que esta pode receber água doce em situações de alta vazão fluvial (Miranda *et al.* 2002). Tal situação pôde ser verificada no estudo de Geyer *et al.* (1991) na Plataforma Continental Amazônica, indicando a necessidade de estudar a região costeira em estuários de elevada descarga fluvial, como é o caso do estuário do Rio Pará.

O estudo da Plataforma Continental Amazônica (PCA) foi intensificado por volta dos anos 80, sendo grande parte dos artigos produzidos nessa época utilizados como base para estudos posteriores na região. Em publicações mais recentes, observou-se a necessidade de considerar a influência do Rio Pará na PCA afim de acertadamente modelar a propagação de maré (Gabioux 2002) e a salinidade (Molinas *et al.* 2014) nessa região.

A caracterização do Rio Pará se intensificou com a fundação do curso de oceanografia na Universidade Federal do Pará no ano 2000, sendo assim realizada a descrição das margens (Alves *et al.* 2005, Souza Filho 2005), dos sedimentos de fundo (Corrêa 2005, Martins & Mendes 2011), da biota (Barros *et al.* 2011, Ribeiro *et al.* 2008), dos parâmetros físico-químicos da água (Costa 2014, Monteiro 2009) e da hidrodinâmica do Rio Pará (Prestes 2013, Rosário 2016).

Do ponto de vista da oceanografia física, podem-se caracterizar no estuário do Rio Pará duas principais forçantes: a descarga fluvial e a propagação de marés. A descarga fluvial é predominantemente governada por períodos chuvosos e de seca na região amazônica e a água doce é proveniente de diversos tributários, sendo os principais o Estreito de Breves, que transporta cerca de 5% da descarga média da desembocadura do Rio Amazonas para o Rio Pará (Callede *et al.* 2010).

Em relação à propagação de maré, as principais componentes harmônicas na região são a principal lunar semidiurna (M_2), principal solar semidiurna (S_2) e a lunar eclíptica semidiurna (N_2) (Beardsley *et al.* 1995). Entretanto, a propagação da componente lunar de águas rasas (M_4) associada à M_2 causa um considerável impacto na simetria da maré no estuário (Prestes *et al.* 2016). A associação entre a descarga fluvial e a propagação de marés no Rio Pará atua na dinâmica sedimentar do estuário (Martins & Mendes 2011).

De acordo com Corrêa, (2005), o lado oeste do estuário do Rio Pará, onde se encontra a Coroa do Quiriri, é caracterizado pela presença de canais delimitados por barras constituídas de areia média a fina moderadamente selecionada, sendo as correntes fluviais e de maré as principais forçantes físicas atuando nesta região. As barras e coroas nesse lado do estuário podem ficar parcialmente emersas durante o período de baixa-mar, o que se aplica à Coroa do Quiriri como pode ser observado na Figura 1.

A presença de depósitos arenosos, como a Coroa do Quiriri, na desembocadura de estuários sinaliza a dominância da energia de maré sobre a energia fluvial e de ondas na região (Dalrymple & Zaitlin 1989), sendo sua existência também associada à oferta de sedimentos, os agentes de transporte e a presença de uma zona de “aprisionamento” desses sedimentos (Mallet *et al.* 2000). Em alguns casos, o desenvolvimento das barras arenosas pode estar atrelado à ação antrópica em uma das fontes de água do estuário (Nelson *et al.* 2013).

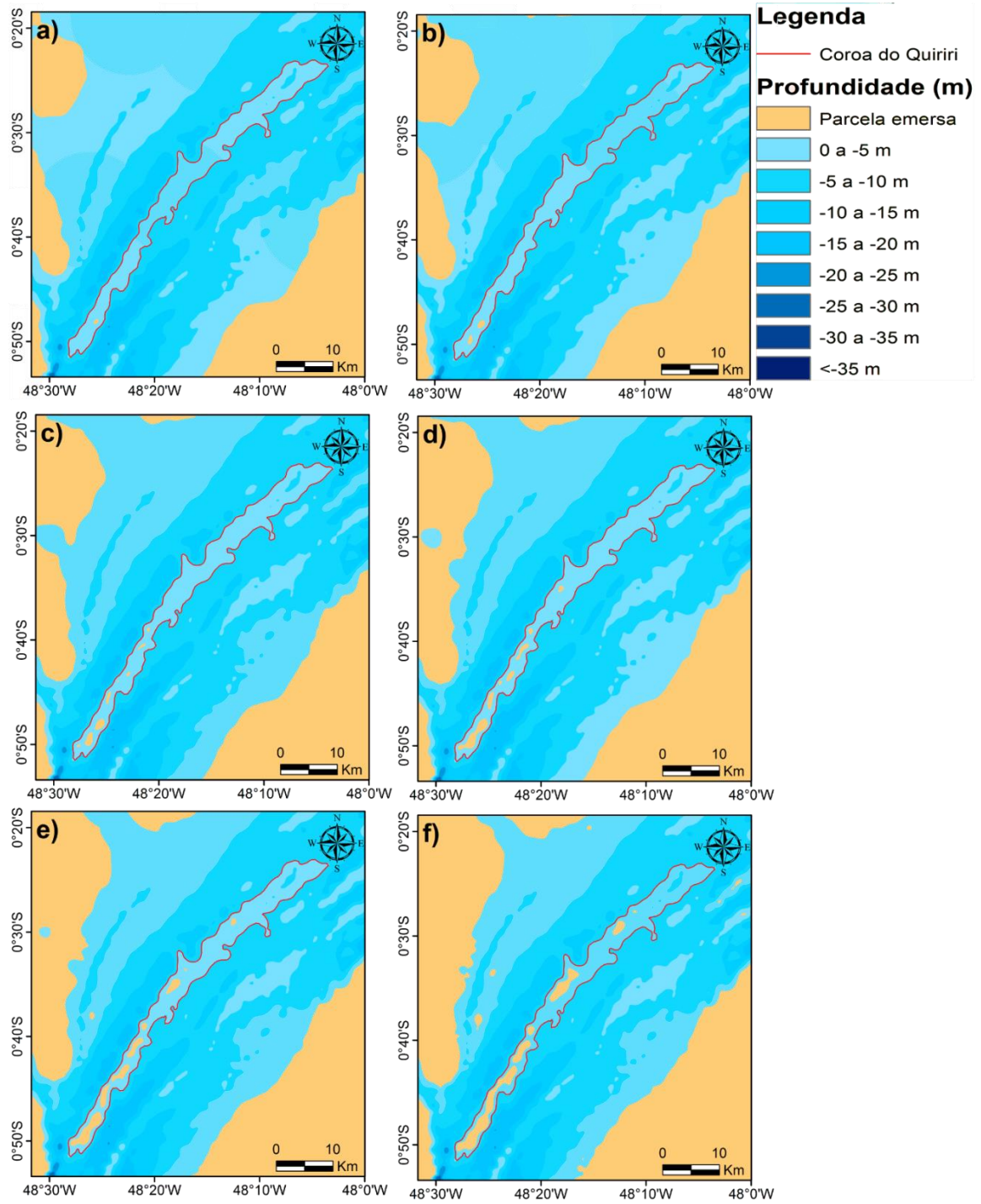


Figura 1 - Profundidade da Coroa do Quiriri a) no nível real, b) um metro abaixo do nível real, c) dois metros abaixo, d) três metros abaixo, e) quatro metros abaixo e f) cinco metros abaixo do nível real.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

- Avaliar o impacto hidrodinâmico da Coroa do Quiriri no estuário do Rio Pará.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar a modelagem hidrodinâmica bidimensional no estuário do Rio Pará;
- Avaliar os possíveis impactos da remoção da coroa para o meio, discriminando estágios e períodos de maré;
- Analisar a confiabilidade das simulações geradas.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo adotada encontra-se na Costa Norte Brasileira no estado do Pará aproximadamente entre 1°30'S, 47°0'W até 0°30'N, 49°0'W, contemplando o estuário do Rio Pará e parte da Zona Costeira do Estado do Pará. O clima nesta região é marcado por dois principais períodos: O período seco, marcado por pouca precipitação e altas temperaturas, que ocorre entre maio e setembro e o período chuvoso, marcado por muita precipitação e baixas temperaturas que inicia em outubro e termina em abril (Furtado & Silva 2006). O clima é um importante regulador da hidrologia do Rio Pará, visto que no período seco, a redução da descarga fluvial e o aumento da evaporação aumentam a concentração de sal estuário acima (Rosa Filho *et al.* 2006).

O estuário do Rio Pará é formado pelo encontro do Rio Pará com os rios Tocantins, Acará, Guamá e Moju e se estende por cerca de 300 Km até desaguar no Oceano Atlântico. A vazão média dos tributários supracitados é apresentada na Tabela 1, entretanto, a soma dos valores dessa tabela não representa o valor médio da vazão no Rio Pará, visto que os períodos de cheia e seca de seus tributários nem sempre coincidem (Nogueira 2017).

Tabela 1 - Dados de vazão média para os tributários principais do Rio Pará.

Tributário	Vazão média (m ³ /s)	Local	Fonte
Rio Pará	13000	Estreito de Breves	Souza, 2006
Rio Tocantins	12850	Foz do rio	Adaptado de Costa, (2014)
Rio Guamá	2200	Foz do rio	Bock <i>et al.</i> 2010
Rios Acará e Moju	2000	Foz do rio	Bock <i>et al.</i> 2010

O estuário do Rio Pará está inserido na Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia (Porto & Porto 2008), que cobre cerca de 10,8% do território brasileiro e apresenta descarga fluvial média de 13624 m³/s (MMA 2007). Nesta bacia, as principais atividades econômicas desenvolvidas envolvem a metalurgia, alimentos, madeira, pecuária (gado de corte e de leite), cerâmica, milho e soja (FGV 1998, Conab 2018). Com a presença dessas e outras atividades, como a extração de minérios, a atividade portuária no Rio Pará é intensa, tendo sido transportadas cerca de 18 milhões de toneladas de mercadoria nos portos situados no estuário do Rio Pará (CDP 2018).

4.2 MODELAGEM

Com a finalidade de criar um modelo bidimensional, o software *Delft 3D* foi utilizado para criar uma malha curvilínea, apresentada na Figura 2, que pudesse englobar a região de interesse no estuário. A escolha do Delft 3D baseou-se na sua extensa utilização em sistemas estuarinos (Badano *et al.* 2018, Hu *et al.* 2009) e na região amazônica (Borba 2014, Molinas *et al.* 2014) e no seu sistema de licença livre, que permite a utilização de seus recursos sem custos financeiros.

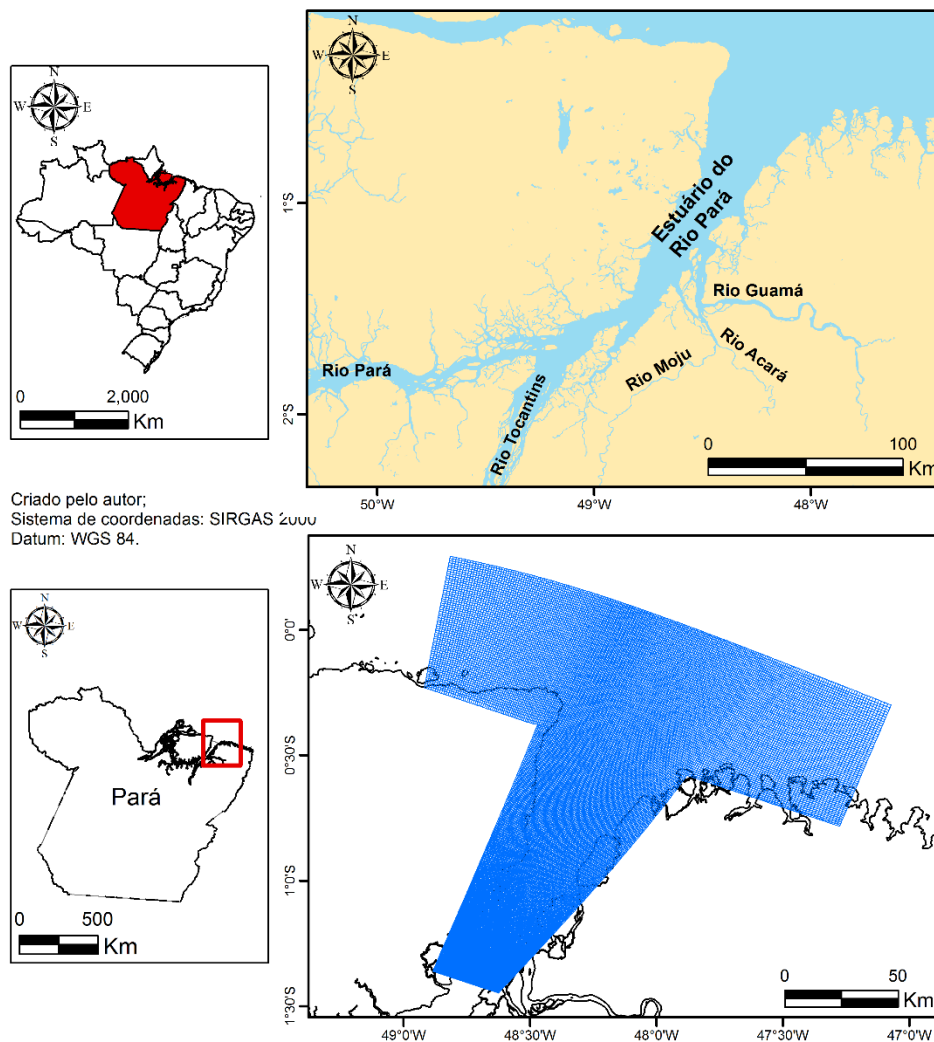


Figura 2 - Localização da malha (em azul) e dos tributários principais em relação ao estuário

A malha criada conta com 46222 elementos no total, tendo sido refinada longitudinalmente na região do canal estuarino, e abrange latitudinalmente uma região desde Barcarena até ~ 50 Km de distância da costa e longitudinalmente, uma região entre Salinópolis e o Canal das Tartarugas. As medidas da malha estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2- Propriedades da malha utilizada.

Propriedade	Valor
Largura	183 Km
Comprimento mínimo	29.4 Km
Comprimento máximo	198.8 Km
Área oceânica	9939.43 Km ²
Área estuarina	4588.46 Km ²
Área continental	3607.47 Km ²
Área Total	18135.36 Km ²
Ortogonalidade máxima	0.285

As informações referentes à batimetria da área de estudo foram acessadas por meio das cartas 302, 303 e 304 da Marinha do Brasil, disponibilizadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e dados da base de livre acesso *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO), sendo a área de abrangência dos dados explicitada na Figura 3a. Com esses dados, foi possível então localizar a Coroa do Quiriri, destacada na Figura 3b, e criar duas séries de dados de profundidade, sendo uma a representação da batimetria real e a outra com a Coroa do Quiriri ausente, feita ao substituir manualmente os valores de batimetria da coroa por valores semelhantes aos das regiões próximas, como mostra a Figura 3c.

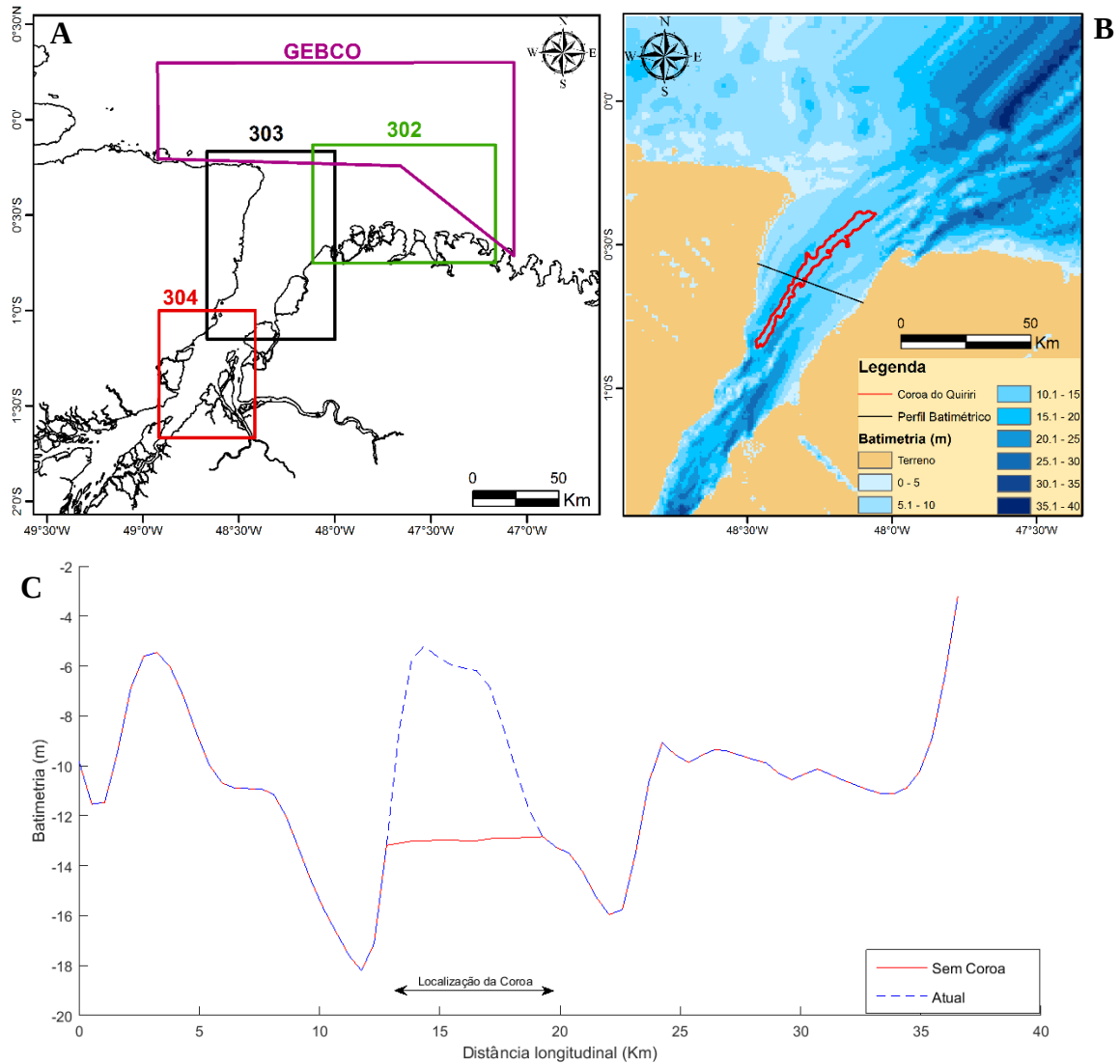


Figura 3 - Representação das fontes dos dados batimétricos (A), localização da Coroa do Quiriri e do perfil batimétrico (B) e batimetria do perfil nas duas simulações (C).

Com relação às condições adotadas no modelo, a parametrização dos dados de maré seguiu as fórmulas propostas por Egbert & Erofeeva (2002) implementadas no modelo TPXO 8.0, que é o modelo de maré padrão utilizado disponibilizado nas plataformas Delft, combinadas com dados do modelo FES 2014 (Carrere *et al.* 2016) e de fichas maregráficas (FEMAR 2003). O valor da descarga fluvial utilizado foi de 24000 m³/s, adaptado de Souza (2006) e para a rugosidade foi utilizada a formula de Manning com valor constante de 0.02 (Borba 2014). A compreensão física do modelo baseia-se nas fórmulas utilizadas pela *D-Hydraulics* (2006) para continuidade do fluido (Equação 1), velocidade nas componentes u e v (Equações 2 e 3), vazão (Equação 4) e momento (Equações 5 e 6). Dado que o modelo se localiza na região equatorial, o parâmetro de coriolis f foi tomado como igual a zero.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial ((d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial ((d+\zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}})}{\partial \eta} = (d+\zeta)Q, \quad (1)$$

$$U = \frac{1}{d+\zeta} \int_d^\zeta u \, dz = \int_{-1}^0 u \, d\sigma \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{d+\zeta} \int_d^\zeta v \, dz = \int_{-1}^0 v \, d\sigma \quad (3)$$

$$Q = \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) \, d\sigma + P - E, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \\ + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \\ - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta. \end{aligned} \quad (6)$$

Em seguida, os arquivos criados foram lançados na plataforma *Flow input* do Delft 3D, onde foram definidos o tempo inicial e final da simulação, o intervalo de tempo da simulação e a localização dos pontos de observação e das seções transversais. Foi determinado que a simulação começasse a partir do dia 1 de setembro de 2018 e durasse até 30 de outubro de 2018 por se tratar de um momento de transição do período seco para o chuvoso, onde podem ser verificadas características de ambos no clima local. O intervalo das simulações foi de 15 minutos, a fim de que as variações causadas pela maré pudessem ser captadas.

A localização dos sete pontos de observação e das três seções transversais, de onde foram extraídas as séries de dados de nível, velocidade e vazão instantânea, pode ser vista na Figura 4. Os locais dos pontos e das seções foram escolhidos com o propósito de contemplar os dois canais principais da desembocadura, diferentes porções do estuário e também regiões costeiras a fim de ver se estas sofreriam impactos significantes com a remoção da Coroa do Quiriri.

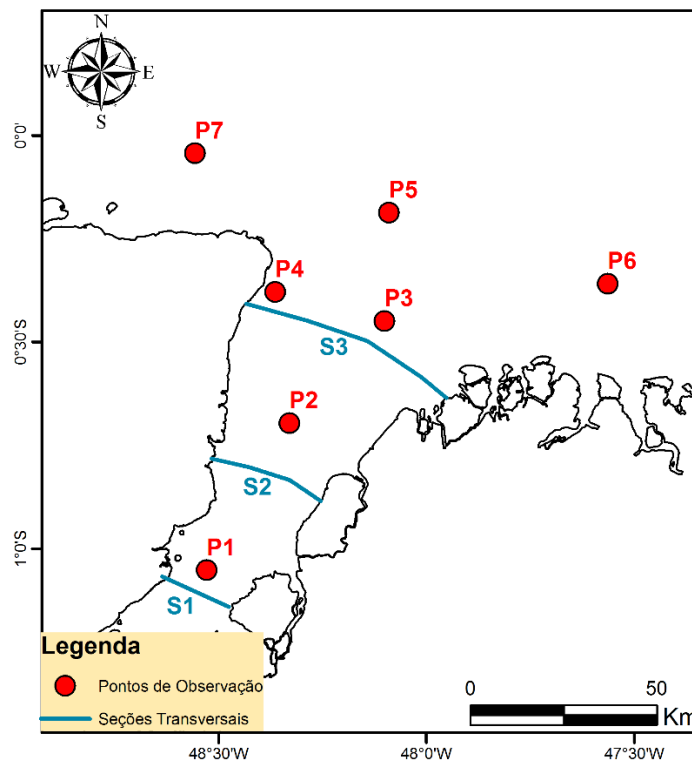


Figura 4 - Localização dos pontos de observação e das seções transversais.

Além de reunir os dados da simulação, o flow input também foi utilizado para adicionar os valores de descarga fluvial e rugosidade de fundo que seriam utilizados no modelo. O processo de simulação foi realizado para os dois cenários, denominados “Atual” e “Sem Coroa” e os dados e simulações foram observados com a ferramenta *Quickplot*, onde os dados podem ser comparados entre os dois cenários. Como a única diferença entre as simulações consiste na presença ou ausência da Coroa do Quiriri, quaisquer diferenças entre os dois cenários serão atribuídas à influência da coroa.

A validação dos dados de nível foi feita usando dados de maré da Diretoria de Hidrografia e Navegação (2018) para a Ilha de Mosqueiro e comparando com os dados de nível calculados no ponto P1. Para realizar essa comparação, foram utilizados o coeficiente de determinação, que mede a similaridade entre as duas séries de dados, o erro médio quadrado, que mede a diferença entre os dados e a correlação de *Spearman*, que mede o grau de correlação entre as duas medições.

Quanto aos dados de vazão e velocidade, estes foram comparados com a literatura disponível, sendo feitas comparações simples de dados médios entre os pontos mais próximos. Tal medida fez-se necessária devido a falta de estações fluviométricas na região de interesse (ANA 2018).

5 RESULTADOS

5.1 VALIDAÇÃO

Da comparação dos dados de nível de Mosqueiro com os dados de nível do ponto Estuário acima, foi obtido um $R^2 = 0.8447$, $RMSE = 0.3069$ e $\rho = 0.9323$ indicando uma confiabilidade satisfatória. Entretanto, a variação de nível apresentada no modelo é menor que a prevista para a região em cerca de 50 cm. Na Figura 5 é apresentado o gráfico de comparação entre os dados da DHN (eixo y) com os dados do modelo (eixo x).

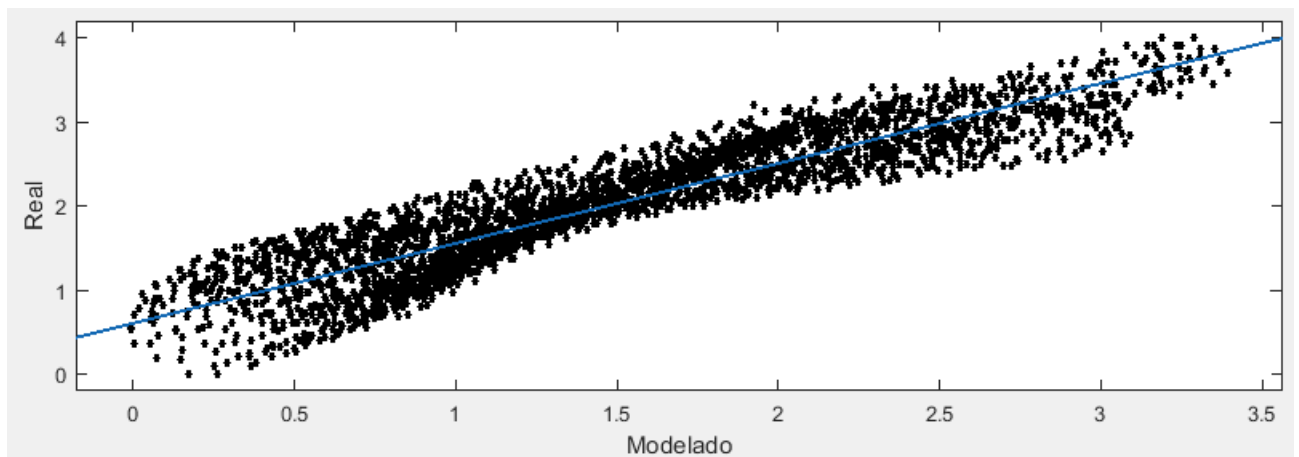


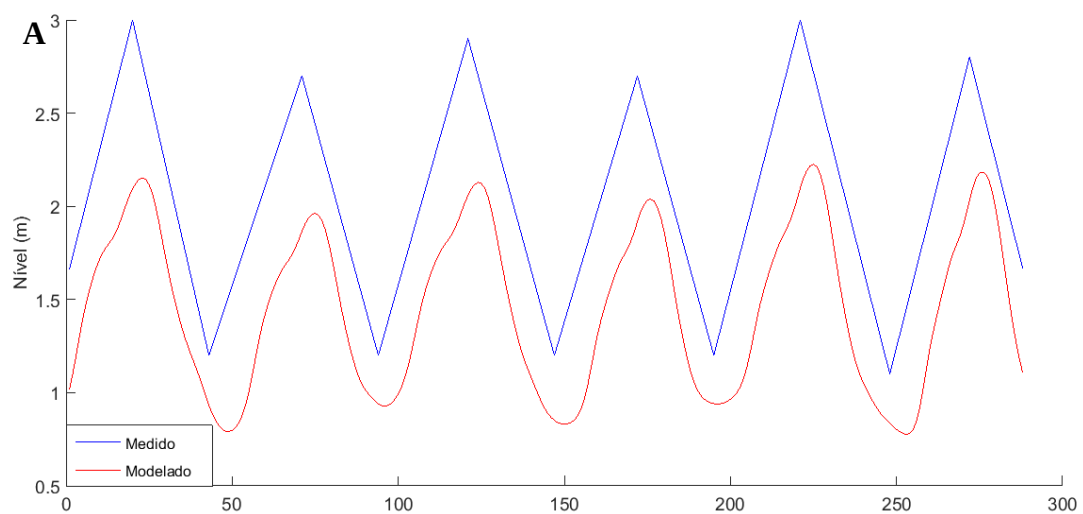
Figura 5 - Comparação entre dados da DHN (eixo y) com dados do modelo (eixo x).

O atraso médio dos dados do modelo em relação aos dados medidos é de 45 minutos, o que provavelmente se deu pela desconsideração de variáveis como o vento, tributários secundários ou ainda pela distância entre o ponto P1 e a estação da DHN, ilustrada na Figura 6.



Figura 6 - Distância entre a estação da DHN em Mosqueiro e o ponto P1 – Estuário Acima

Ao discriminar períodos de três dias de sizígia e quadratura, foram observados $R^2=0.885$, $RMSE = 0.3715$ e $\rho=0.943$ para os dados dos três dias de sizígia e $R^2=0.8934$, $RMSE=0.1575$ e $\rho=0.9457$ para os três dias de quadratura selecionados, o que indica a alta confiabilidade dos dados nos dois estágios de maré. A Figura 7 mostra os gráficos de comparação entre os dados medidos e modelados nos dias escolhidos.



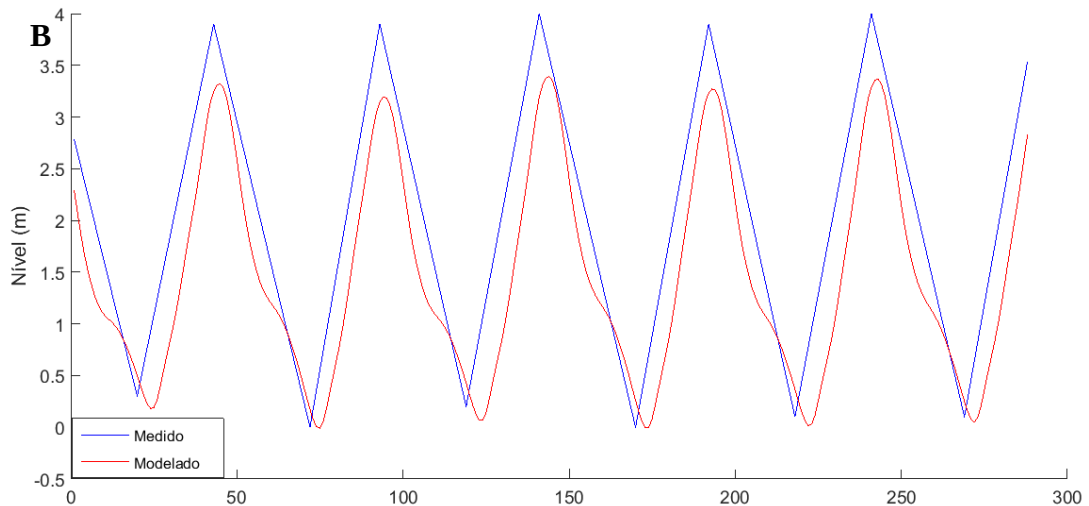


Figura 7 - Comparação entre dados medidos e modelados em quadratura (A) e sizígia (B) para o ponto P1

Para validar os dados de velocidade, foram utilizados os dados interpolados de Prestes (2013) e foi realizada a comparação com dados de velocidade em um ciclo de maré de quadratura no ponto P1. Tal comparação resultou em $R^2=0.8585$, $RMSE=0.1967$ e $\rho=0.9011$, o que indica que a confiabilidade dos dados de velocidade é relativamente alta. A Figura 8 apresenta as séries de dados medidos e modelados.

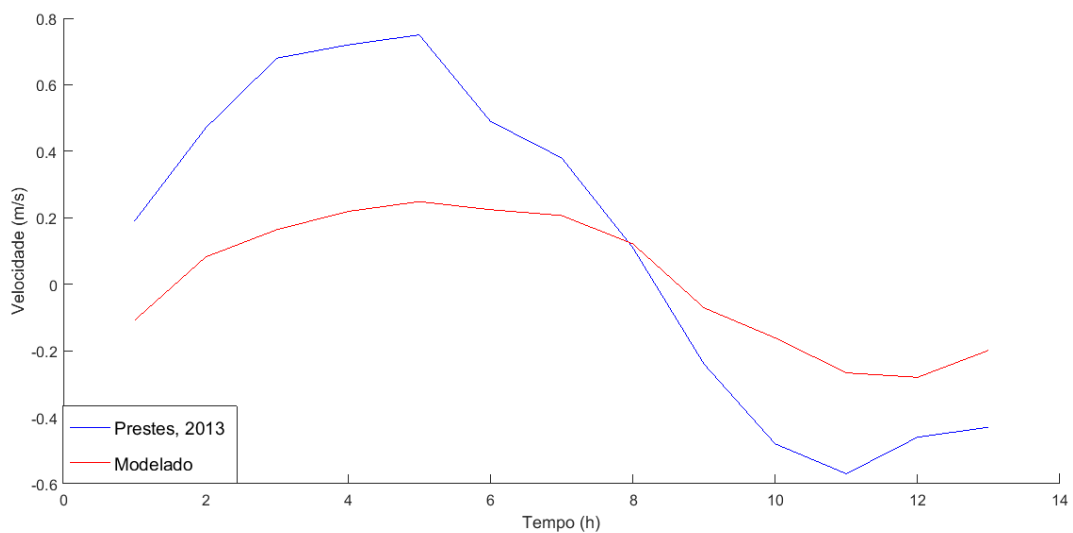


Figura 8 - Comparação de dados de velocidade presentes na literatura com dados do modelo.

No que se refere aos dados de vazão, estes foram comparados com dados da campanha de Prestes (2013). Foram tomados os dados do ciclo de maré de quadratura em setembro/2011 e comparados com 13 horas de dados de vazão calculados pelo modelo, tal comparação resultou em $R^2=0.9353$ e $\rho=0.9451$, indicando uma elevada confiabilidade dos dados obtidos.

O gráfico de comparação entre os dados citados está apresentado na Figura 9.

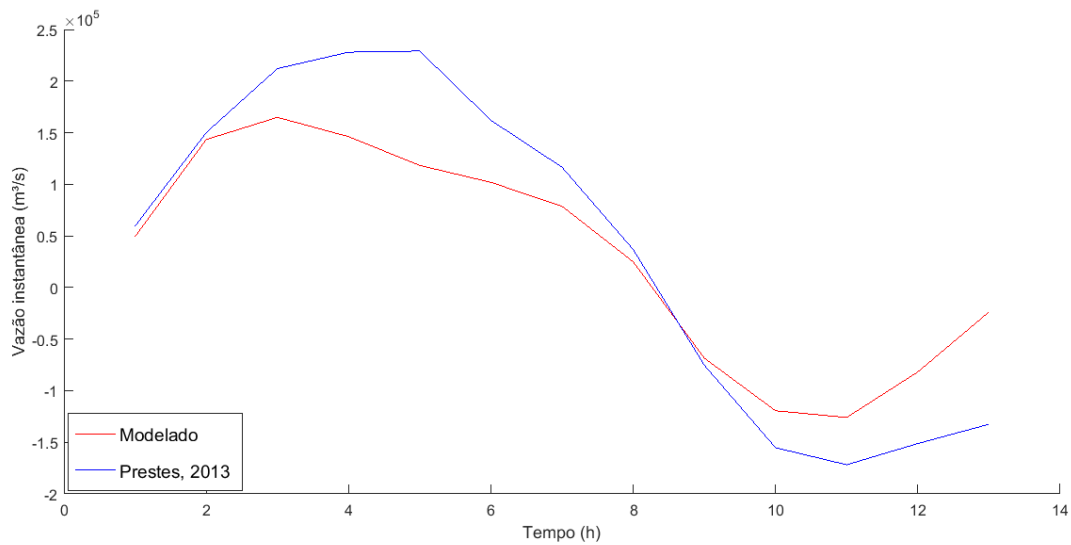


Figura 9 - Comparação entre dados de vazão medidos e modelados próximo a montante do estuário.

5.2 PONTOS DE OBSERVAÇÃO

5.2.1 P1 - Estuário acima

A remoção da Coroa do Quiriri acarretou a redução da amplitude de maré no ponto estuário acima observada na alteração do nível de vazante, representado pelos valores negativos, uma vez que os valores de enchente permaneceram próximos entre as simulações neste ponto. O atraso médio entre os picos de nível e velocidade caiu em 30 minutos, variação que só ocorreu neste ponto e no ponto Oceano centro. Os gráficos para nível e velocidade no ponto estuário acima podem ser visualizados nas Figuras 10 e 11, respectivamente. Para melhor visualização das séries de dados, optou-se por exibir apenas os dados entre 9 e 21/09, onde o período de sizígia se encontra entre 9 e 14 de setembro enquanto que o período de quadratura corresponde aos dias 15 a 21 de setembro.

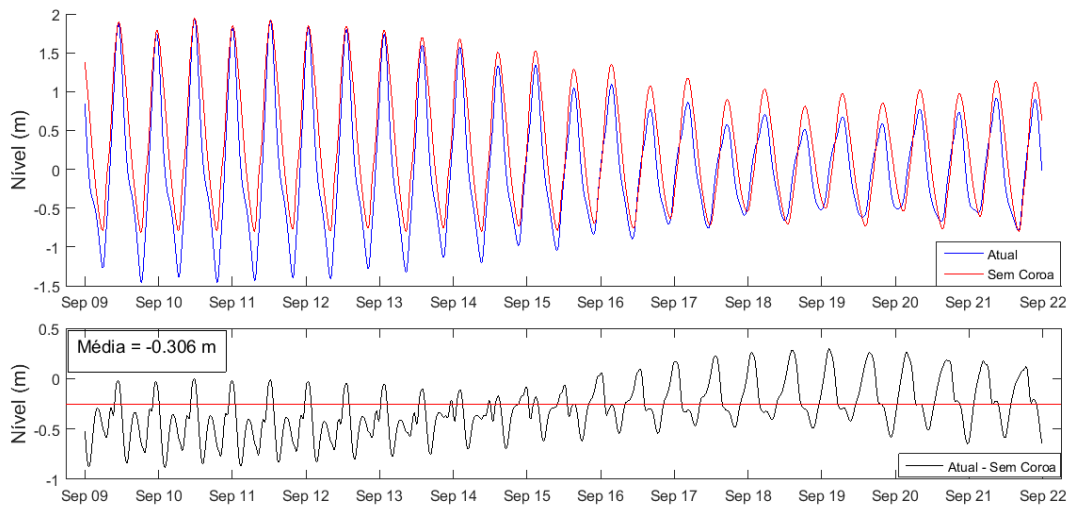


Figura 10 - Dados de nível para o ponto “estuário acima” com gráfico de diferença entre as simulações.

Nos dados de velocidade da simulação atual, observou-se a presença de dois picos de velocidade de vazante, representada pelos valores positivos, em cada ciclo de maré, o que é causado pelos períodos de virada de maré onde, nesse ponto, as velocidades de superfície e fundo apresentam, provavelmente, direções contrárias. Já no cenário Sem Coroa, a velocidade de vazante aumentou e passou a apresentar apenas um valor máximo por ciclo de maré, o que interferiu no atraso entre os dados de nível e velocidade nessa simulação.

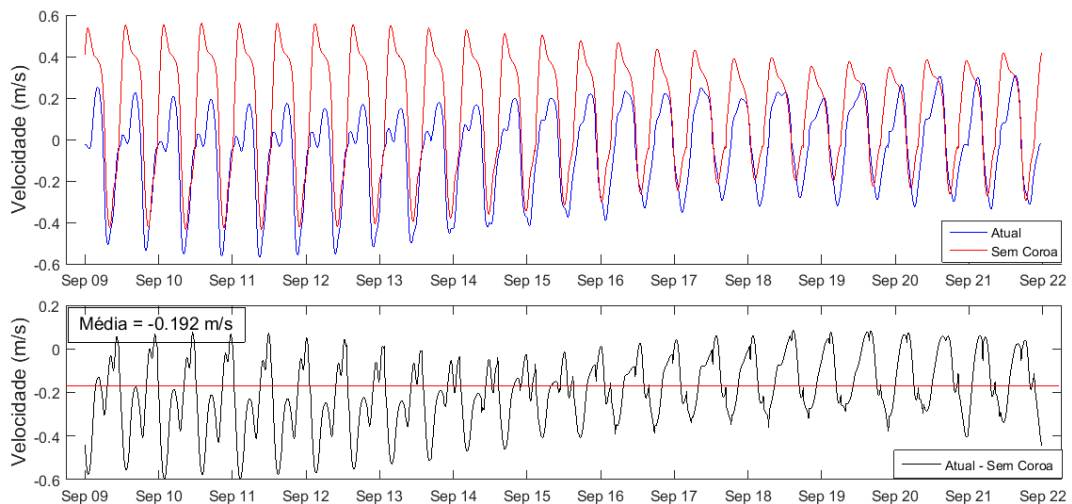


Figura 11 - Gráficos de velocidade média na coluna d'água para o ponto P1.

5.2.2 P2 - Estuário centro

Neste ponto, a variação de nível calculada pelo modelo foi menor que no ponto estuário acima, mas o comportamento das simulações foi parecido, com leve redução da amplitude de maré, com aumento no nível de enchente e diminuição no nível médio de vazante no cenário Sem Coroa. Entretanto, no ponto P1 a amplitude de nível na quadratura aumentou com a remoção da Coroa do Quiriri enquanto que neste ponto, a amplitude diminuiu tanto em sizígia quanto em quadratura. A Figura 12 mostra a comparação entre as simulações a partir dos dados de nível neste ponto.

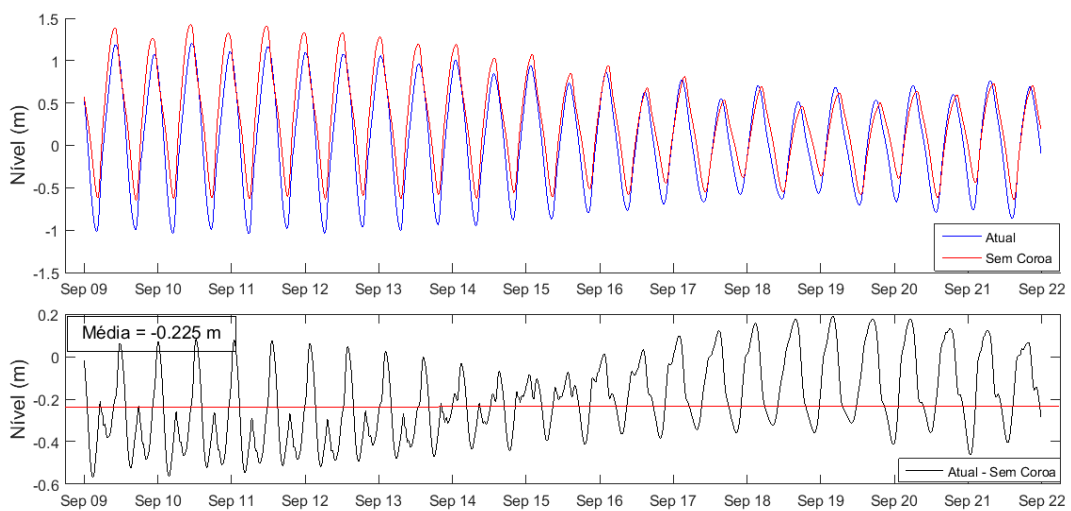


Figura 12 - Dados de nível para o ponto “estuário centro” com gráfico de diferença entre as simulações.

Assim como no ponto anterior, a velocidade aumentou neste ponto durante a enchente, mas, diferente do ponto anterior, não diminuiu durante a vazante com a remoção da Coroa do Quiriri, nem apresentou o padrão de dois picos de vazante encontrado no ponto anterior. A Figura 13 apresenta os dados de velocidade referentes ao ponto central no estuário.

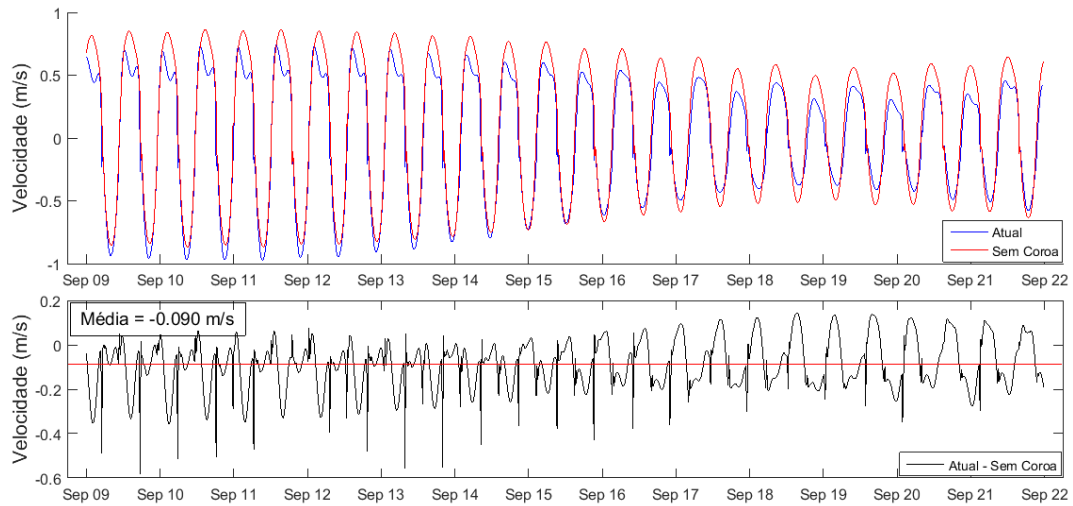


Figura 13 - Gráficos de velocidade média na coluna d'água para o ponto P2.

5.2.3 P3 - Coroa direito

Neste ponto, a amplitude de nível nas duas simulações seguiu o padrão observado no ponto P2 em relação aos períodos e estágios de maré, porém, neste ponto essas variações são muito menos pronunciadas em comparação com os pontos anteriores, a Figura 14 apresenta as variações de nível descritas.

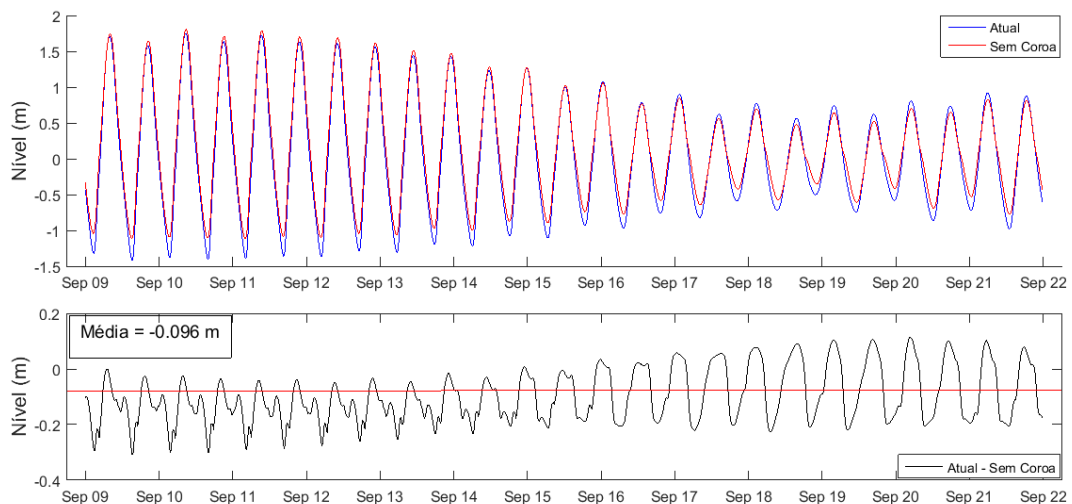


Figura 14 - Dados de nível para o ponto “coroa direito” com gráfico de diferença entre as simulações.

Em relação aos dados de velocidade, o padrão de aumento das velocidades de vazante, expressas pelos valores positivos, com a remoção da coroa segue presente, em concordância com os dados obtidos nos pontos anteriores. A Figura 15 apresenta a comparação entre as velocidades com e sem a Coroa do Quiriri no ponto P3.

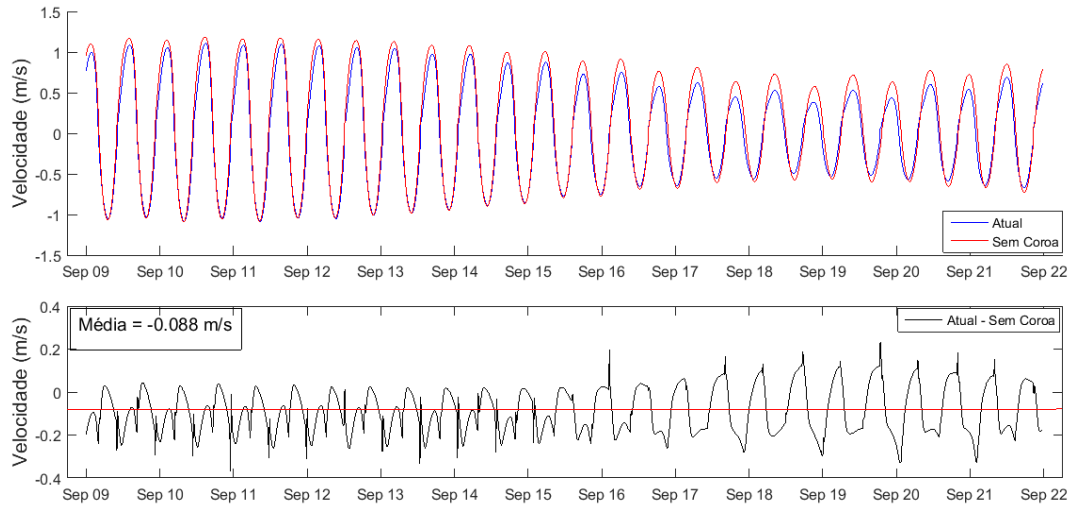


Figura 15 - Gráficos de velocidade média na coluna d'água para o ponto P3.

5.2.4 P4 - Coroa esquerdo

Neste ponto, as variações de nível entre as simulações obedeceram a um padrão semelhante ao observado nos pontos P2 e P3 para os dados de sizígia e quadratura, com a principal diferença sendo na amplitude de vazante, expressa pelos valores negativos. A Figura 16 apresenta os dados de nível das duas simulações para o período definido.

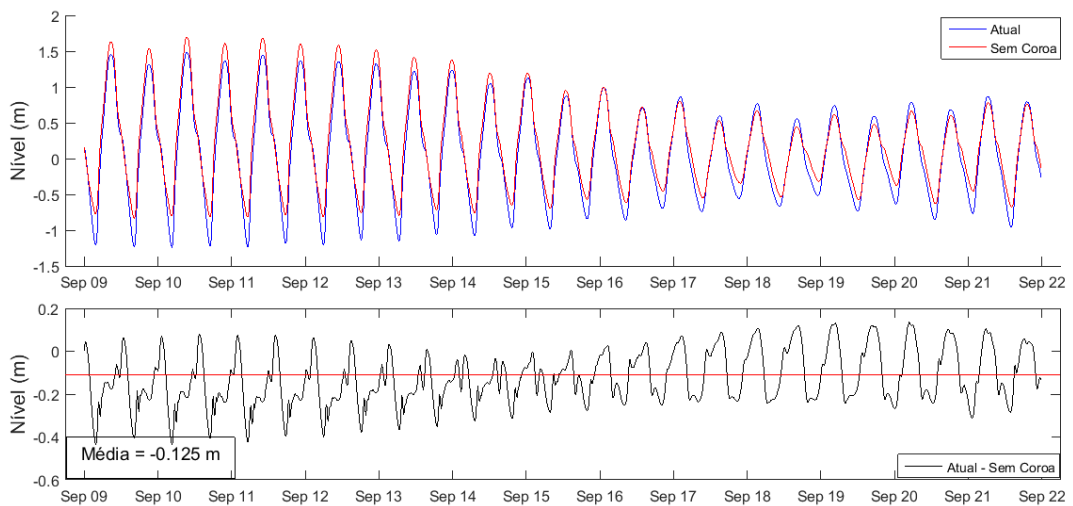


Figura 16 - Dados de nível para o ponto “coroa esquerdo” com gráfico de diferença entre as simulações.

Em relação aos valores de velocidade, a diferença média entre as simulações foi muito menor que a apresentada nos pontos anteriores durante o período selecionado, sendo a principal diferença entre as simulações o pico de velocidade de vazante. A Figura 17

apresenta os dados de velocidade do ponto P4.

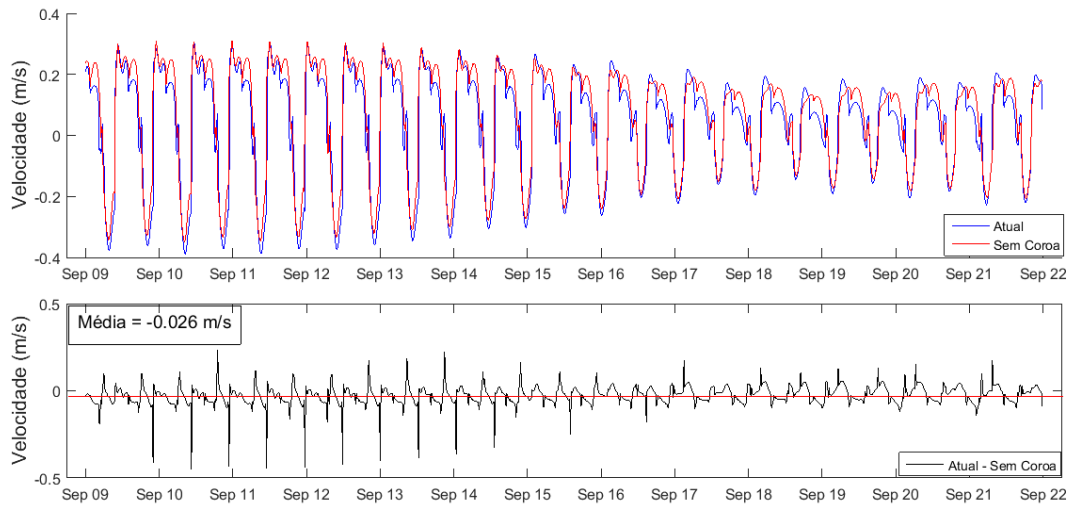


Figura 17 - Gráficos de velocidade média na coluna d'água para o ponto P4.

5.2.5 P5 - Oceano centro

Nesse ponto, os dados de nível das simulações apresentaram pouca diferença entre si no período escolhido. O atraso médio entre os sinais de nível e maré aumentou 30 minutos com a remoção da Coroa do Quiriri. A Figura 18 apresenta os gráficos referentes a estes parâmetros.

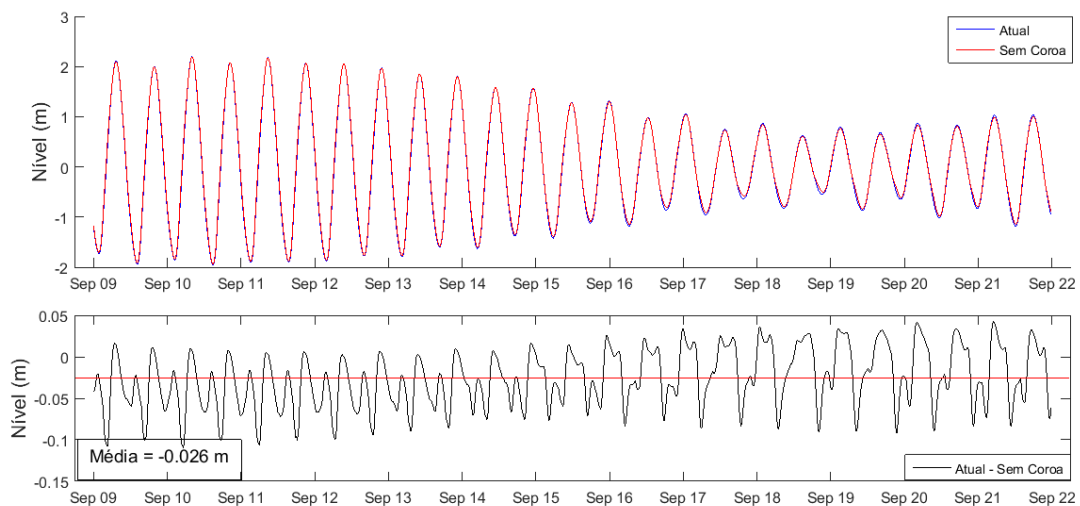


Figura 18 - Dados de nível para o ponto “oceano centro” com gráfico de diferença entre as simulações.

Os dados de velocidade, assim como os dados de nível, apresentaram pouca variação entre as duas simulações, com a principal diferença sendo um leve aumento na velocidade de vazante durante a quadratura, como mostra a Figura 19.

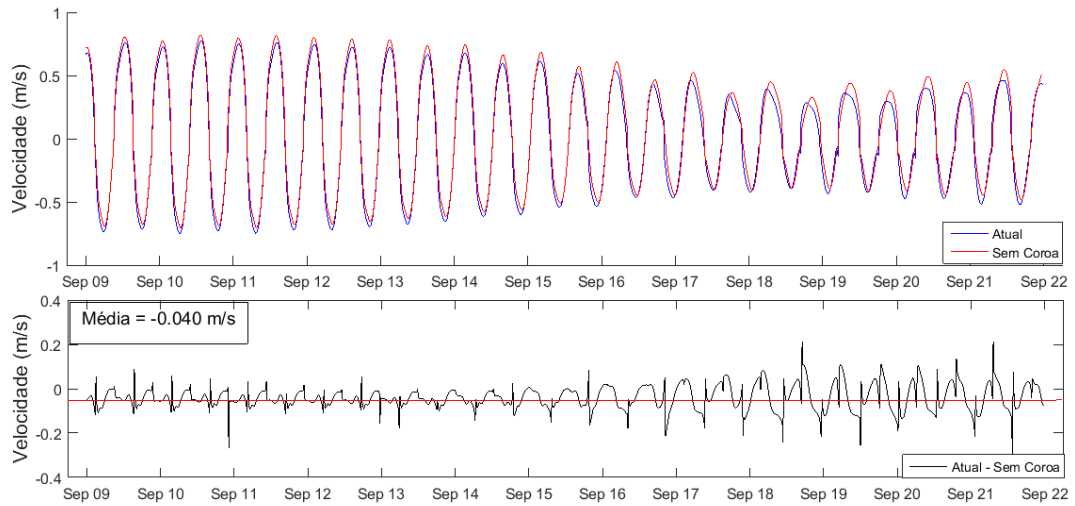
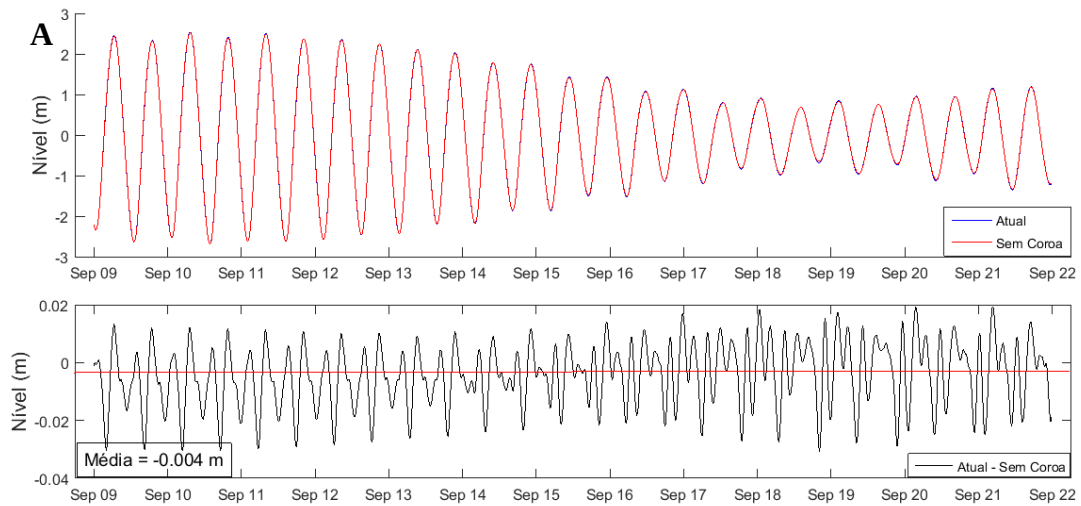


Figura 19 - Gráficos de velocidade média na coluna d'água para o ponto P5.

5.2.6 P6 E P7 - Oceano direito e Oceano esquerdo

Nestes dois pontos, as duas simulações apresentaram variações insignificantes entre si, com variações médias de nível que não atingiram 1 cm e de velocidade que não passaram de 0.02 m/s. Os gráficos de nível e velocidade nos pontos P6 e P7 podem ser visualizados nas Figuras 20 e 21, respectivamente.



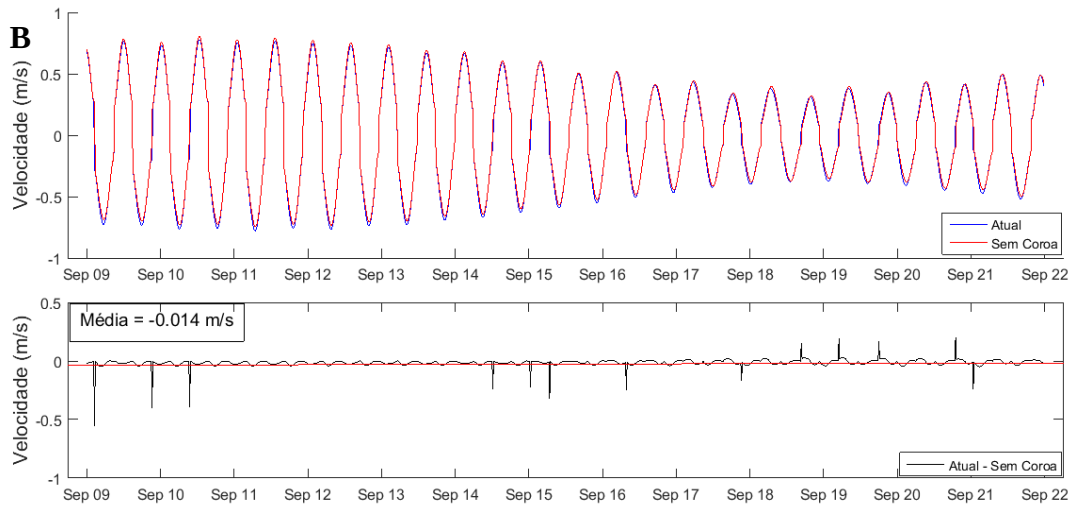


Figura 20 - Dados de nível (A) e velocidade (B) para o ponto P6 com gráficos de diferença entre as simulações.

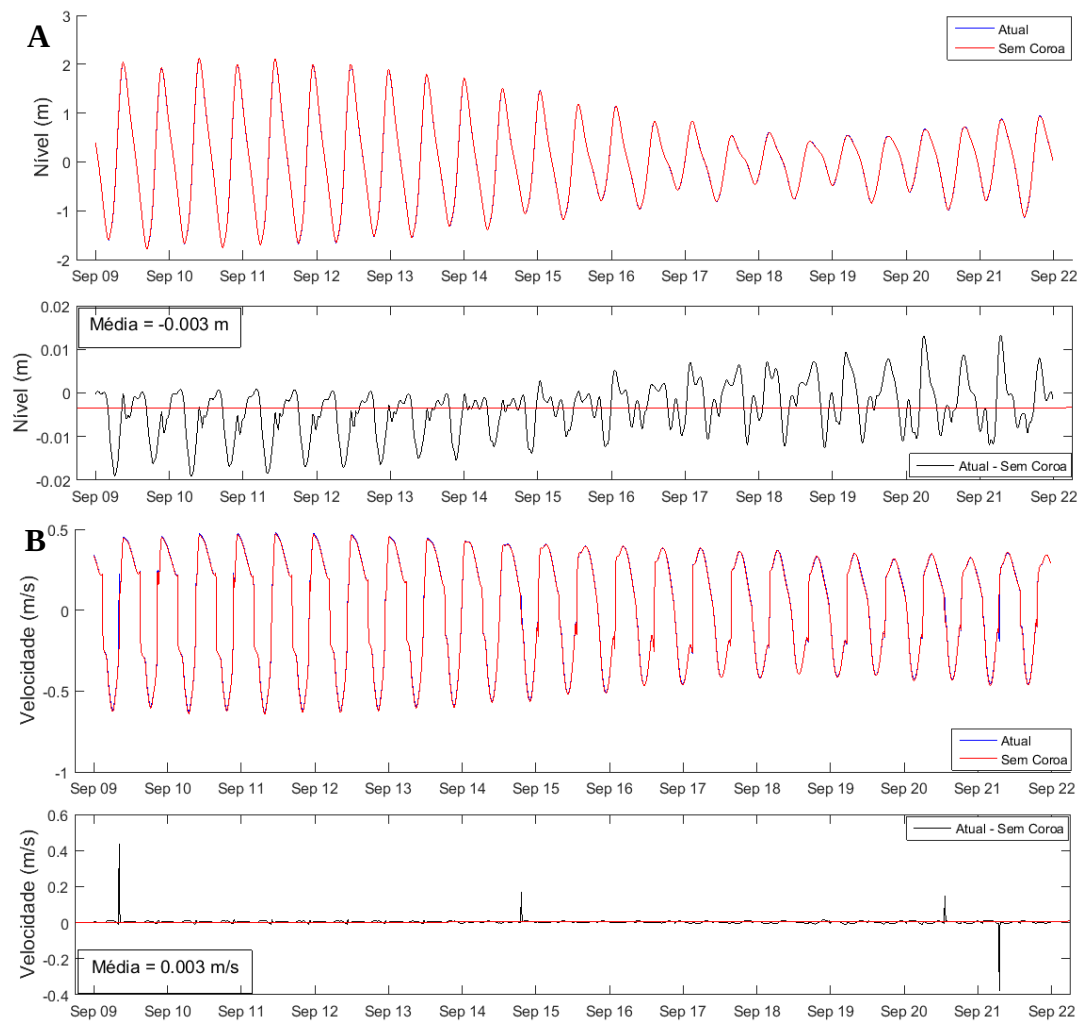


Figura 21 - Dados de nível (A) e velocidade (B) para o ponto P7 com gráficos de diferença entre as simulações.

5.2.7 Médias gerais

Dos dados de 9 a 21 de setembro apresentados acima, observou-se que as variações de velocidade foram, no geral, mais pronunciadas que as variações de nível. A fim de alcançar uma observação holística desses parâmetros dentro da área de estudo, foram escolhidos dois ciclos de maré dos dias 9 e 17 de setembro para serem apresentados em forma de imagens escaladas, a fim de observar a variação da velocidade e nível em toda a área de estudo. Os dados do dia 9/09, referentes ao período de sizígia, estão apresentados na Figura 22, com resultados das simulações Atual e Sem Coroa lado a lado, o que deixou explícito que as variações de velocidade são mais acentuadas que as variações de nível, que quase não podem ser observadas nas imagens

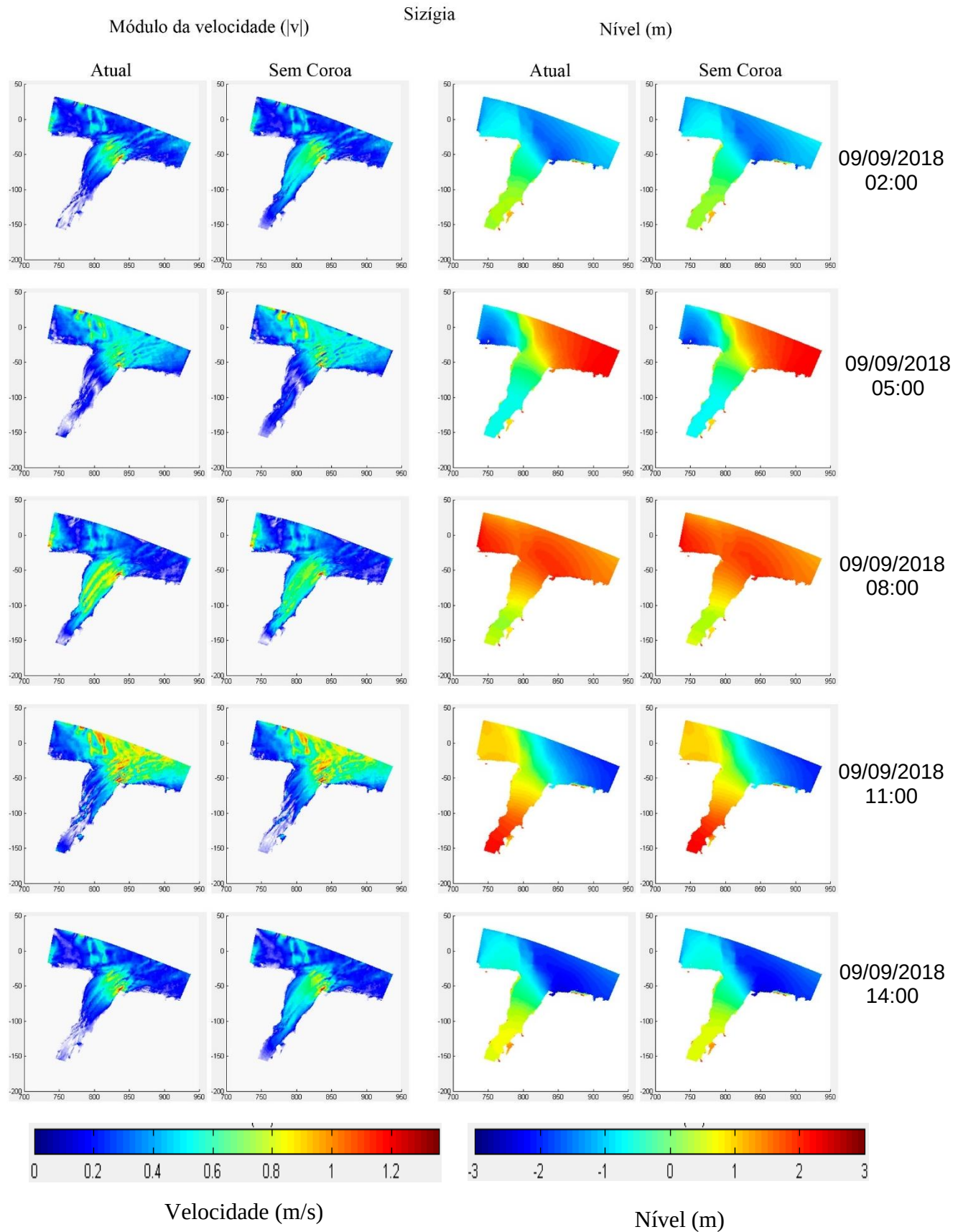


Figura 22 - Variações da velocidade e do nível em um ciclo de maré de sizígia.

Da mesma forma, os dados de quadratura, referentes ao dia 17 de setembro, apresentaram diferenças de velocidade entre as simulações mais claras que as diferenças de nível, o que pode ser observado na Figura 23.

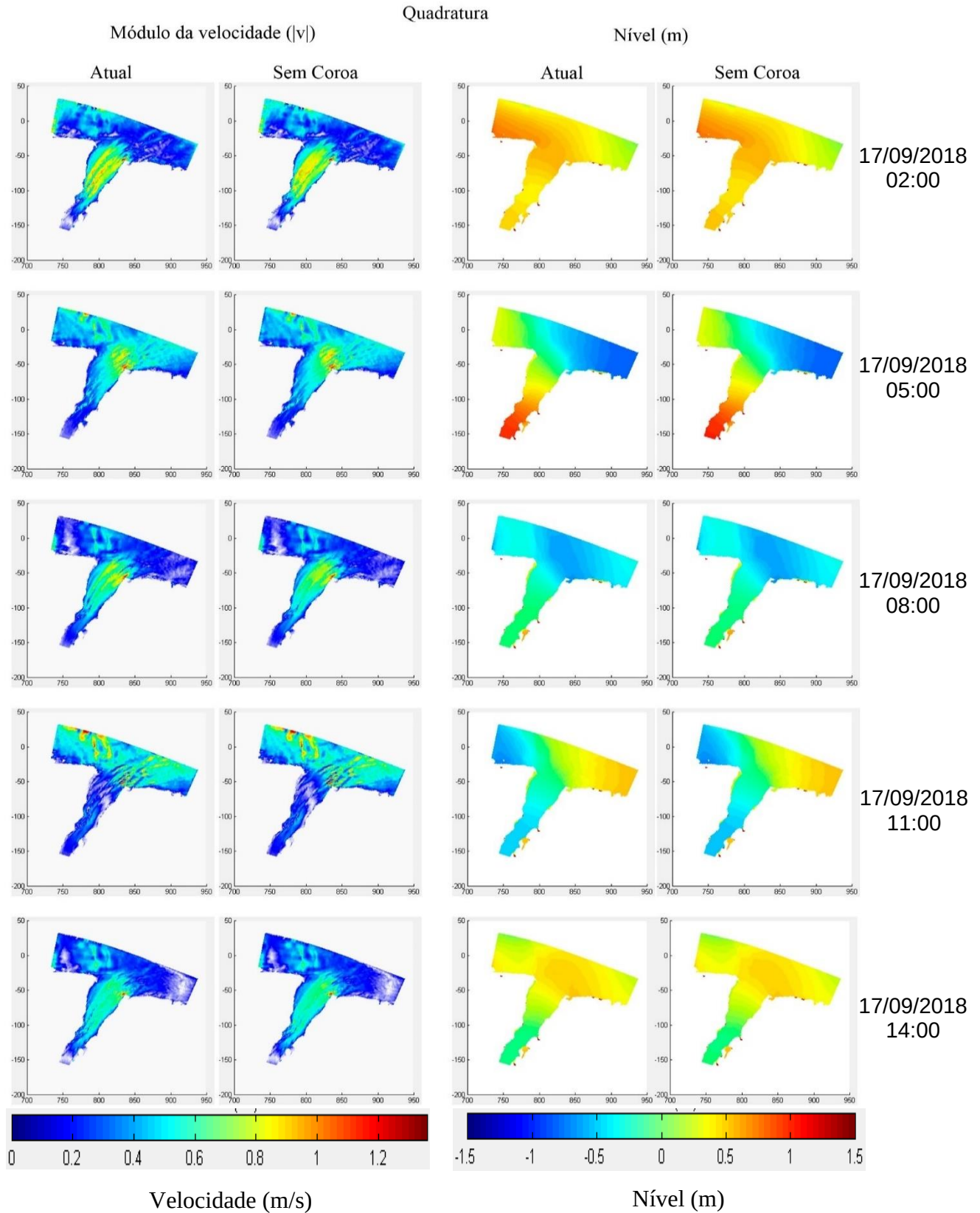


Figura 23 - Dados de velocidade e nível em um ciclo de maré de quadratura

As diferenças entre as simulações para a série temporal inteira, que vai do dia 1/09 até 29/10, são apresentadas a partir de tabelas com valores médios, segregando os dados de acordo com o ponto de observação, o período e o estágio de maré. A Tabela 3 apresenta os dados médios de velocidade obtidos nas duas simulações, segregando dados de enchente e vazante. Também são apresentados os valores máximos de amplitude de nível em cada ponto.

Tabela 3 - Dados médios das simulações, discriminando valores de enchente e vazante em cada ponto.

	Nível (máx. - mín.)		Velocidade média (m/s)		Estágio
	Atual	Sem Coroa	Atual	Sem Coroa	
P1- Estuário Acima	3.403	2.805	0.227	0.198	Enchente
			0.144	0.332	Vazante
P2 - Estuário Centro	2.257	2.312	0.488	0.499	Enchente
			0.436	0.547	Vazante
P3 - Coroa Direito	3.166	2.938	0.578	0.590	Enchente
			0.556	0.683	Vazante
P4 - Coroa Esquerdo	2.727	2.546	0.185	0.187	Enchente
			0.161	0.175	Vazante
P5 - Oceano Centro	4.148	4.121	0.407	0.381	Enchente
			0.419	0.459	Vazante
P6 - Oceano Direito	5.231	5.217	0.410	0.395	Enchente
			0.403	0.413	Vazante
P7 - Oceano Esquerdo	3.916	3.914	0.346	0.349	Enchente
			0.286	0.284	Vazante

Tomando como referência as médias obtidas na simulação atual, a Tabela 4 apresenta a porcentagem de variação dos parâmetros hidrodinâmicos entre as duas simulações, com valores negativos indicando redução no cenário sem a Coroa do Quiriri e valores positivos indicando aumento no cenário sem coroa.

Tabela 4 - Variação entre a simulação Sem Coroa e a Atual em dois estágios de maré. Valores em negrito são os valores significativos dado $p > 0.05$

Ponto	Nível	Velocidade	Estágio
P1 - Estuário Acima	-17.57%	-12.78%	Enchente
		130.56%	Vazante
P2 - Estuário Centro	2.44%	2.25%	Enchente
		25.46%	Vazante
P3 - Coroa Direito	-7.20%	2.08%	Enchente
		22.84%	Vazante
P4 - Coroa Esquerdo	-6.64%	1.08%	Enchente
		8.70%	Vazante
P5 - Oceano Centro	-0.65%	-6.39%	Enchente
		9.55%	Vazante
P6 - Oceano Direito	-0.27%	-3.66%	Enchente
		2.48%	Vazante
P7 - Oceano Esquerdo	-0.05%	0.87%	Enchente
		-0.70%	Vazante

Por sua vez, também foram discriminados os dados de sizígia e quadratura a fim de observar possíveis variações significantes entre as duas simulações. As médias por ponto de observação são apresentadas na Tabela 5.

	SIZÍGIA		QUADRATURA		
	Velocidade (m/s)		Velocidade (m/s)		
	Enchente	Vazante	Enchente	Vazante	
P1 - Estuário Acima	0.251	0.125	0.208	0.162	Atual
	0.214	0.354	0.187	0.312	Sem Coroa
P2 - Estuário Centro	0.539	0.478	0.442	0.393	Atual
	0.528	0.584	0.473	0.509	Sem Coroa
P3 - Coroa Direito	0.62	0.614	0.54	0.5	Atual
	0.626	0.737	0.556	0.629	Sem Coroa
P4 - Coroa Esquerdo	0.202	0.175	0.169	0.148	Atual
	0.204	0.189	0.172	0.162	Sem Coroa
P5 - Oceano Centro	0.437	0.452	0.378	0.386	Atual
	0.405	0.495	0.358	0.423	Sem Coroa
P6 - Oceano Direito	0.444	0.434	0.377	0.373	Atual
	0.429	0.446	0.363	0.379	Sem Coroa
P7 - Oceano Esquerdo	0.367	0.295	0.327	0.278	Atual
	0.37	0.292	0.33	0.277	Sem Coroa

Tabela 5 - Dados médios separados de acordo com os períodos de maré.

Com o intuito de verificar as variações significantes apresentadas em cada período de maré, foi montada a Tabela 6, com valores de variação, em porcentagem, entre as duas simulações. A exemplo da Tabela 4, os valores negativos representam redução com a remoção da Coroa do Quiriri e os positivos representam aumento neste cenário.

Tabela 6 - Porcentagem de variação entre as simulações, valores em negrito representam as variações significantes dado $p > 0.05$.

Pontos	SIZÍGIA Velocidade		QUADRATURA Velocidade	
	Enchente	Vazante	Enchente	Vazante
P1 - Estuário Acima	-14.74%	183.20%	-10.10%	92.59%
P2 - Estuário Centro	-2.04%	22.18%	7.01%	29.52%
P3 - Coroa Direito	0.97%	20.03%	2.96%	25.80%
P4 - Coroa Esquerdo	0.99%	8.00%	1.78%	9.46%
P5 - Oceano Centro	-7.32%	9.51%	-5.29%	9.59%
P6 - Oceano Direito	-3.38%	2.76%	-3.71%	1.61%
P7 - Oceano Esquerdo	0.82%	-1.02%	0.92%	-0.36%

5.3 SEÇÕES TRANSVERSAIS

5.3.1 S1 – Montante

Nesta seção, a vazão em direção à foz do estuário, representada pelos valores positivos, aumentou com a remoção da Coroa do Quiriri nos dois períodos de maré. A Figura 24 mostra os gráficos de vazão instantânea referentes às duas simulações.

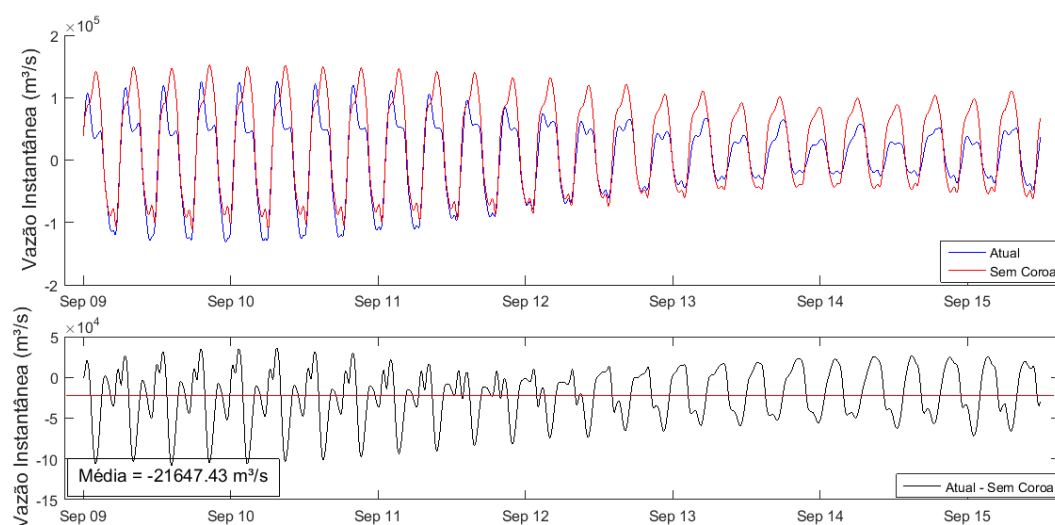


Figura 24 - Série temporal de vazão instantânea na seção “montante”.

5.3.2 S2 – Meio

Esta seção apresentou variações de vazão instantânea entre as simulações muito semelhantes àsquelas observadas na seção anterior, sendo as principais diferenças a pequena variação da vazão em direção à montante do estuário e a possível perturbação do balanço hídrico. A Figura 25 apresenta a série de dados referidos.

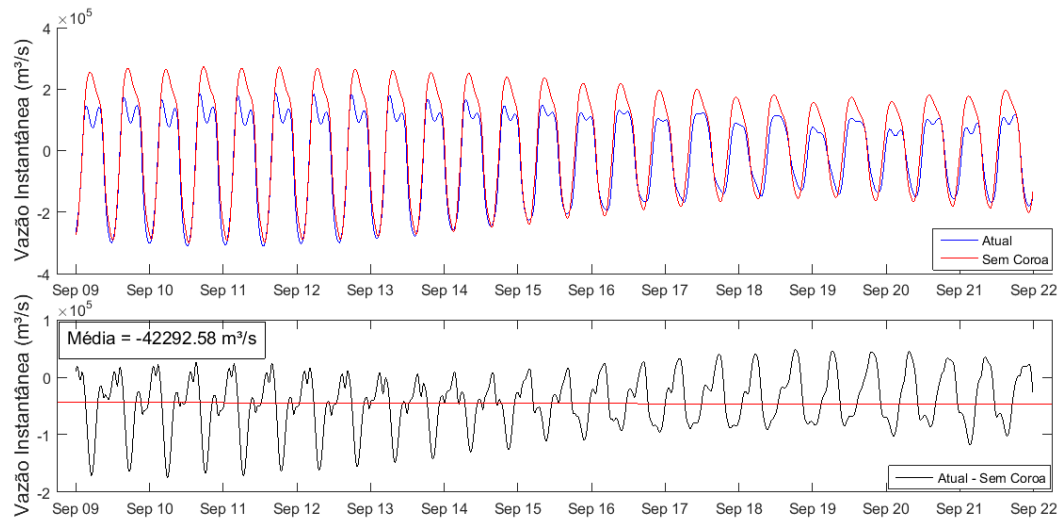


Figura 25 - Série temporal de vazão instantânea na seção “meio”

5.3.3 S3 – Jusante

Nesta seção, o padrão de aumento da vazão instantânea em direção ao oceano com a remoção da Coroa do Quiriri, já observado nas seções anteriores, se mantém como pode ser visto na Figura 26. A média da diferença manteve-se próxima da observada na seção anterior, sendo, entretanto, menos significativa devido a elevada vazão instantânea nessa seção.

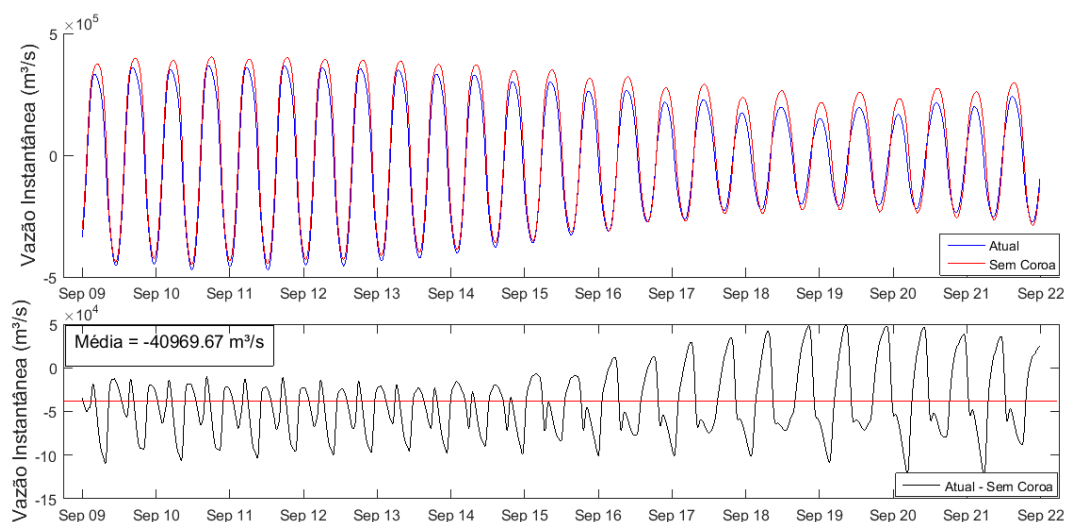


Figura 26 - Série temporal de vazão instantânea na seção “jusante”

5.3.4 Médias gerais

Assim como foi feito para os pontos de observação, foram calculados os valores médios de vazão instantânea em cada seção, separando os dados de acordo com o período e o estágio de maré. Os valores médios podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados médios de vazão instantânea para as três seções, discriminando períodos e estágios de maré.

	Qvm (m³/s)		Sizígia		Quadratura		Simulação
	Enchente	Vazante	Enchente	Vazante	Enchente	Vazante	
S1 - Montante	91806.70	73824.64	97790.84	76159.15	87364.86	71629.36	Atual
	96328.91	104229.83	102487.10	110553.98	89927.34	97004.49	Sem Coroa
S2 - Meio	159954.92	102535.25	178361.79	142211.86	111637.33	93715.23	Atual
	158040.84	158886.61	170816.78	145847.89	170629.91	147502.36	Sem Coroa
S3 - Jusante	235009.32	199603.87	259397.12	213763.14	220691.06	179852.06	Atual
	235043.18	245557.29	253665.98	219030.87	264300.14	227927.80	Sem Coroa

A variação em porcentagem da vazão instantânea na simulação Sem Coroa em relação à simulação Atual é explicitada na Tabela 8, que separa os valores entre enchente e vazante e quadratura e sizígia.

Tabela 8 - Variação entre as simulações, dados em negrito correspondem às variações significativas dado $p > 0.05$.

	Qvm		Sizígia		Quadratura	
	Enchente	Vazante	Enchente	Vazante	Enchente	Vazante
S1 - Montante	4.93%	41.19%	4.80%	45.16%	2.93%	35.43%
S2 - Meio	-1.20%	54.96%	-4.23%	2.56%	52.84%	57.39%
S3 - Jusante	0.01%	23.02%	-2.21%	2.46%	19.76%	26.73%

6 DISCUSSÕES

A confiabilidade dos dados de nível gerados pelo modelo, expressa pelo R^2 e pelo valor da correlação de Spearman (ρ), indica uma simulação confiável, porém com possibilidades de evolução, principalmente no tocante à amplitude e aos valores próximos do máximo, o que foi, em parte, expresso pelo valor moderado do erro médio quadrado, que indica uma distância considerável entre os valores e a reta de regressão linear.

Foram estudadas alterações em parâmetros como a descarga total e rugosidade de fundo a fim de obter simulações mais confiáveis, entretanto, essas simulações-teste apresentaram $R^2 \approx 0.81$ e $\rho \approx 0.90$, sendo então menos eficazes na simulação dos dados reais do que o modelo apresentado. A análise de três dias de quadratura e sizígia apontou uma confiabilidade mais alta para os dados de quadratura em comparação com os dados de sizígia, indicando que as condições extremas prejudicam a confiabilidade dos dados calculados, o que está de acordo com o observado por Rahbani (2015).

Os dados de vazão e velocidade apresentaram níveis elevados de confiabilidade, tendo, entretanto, repetido a tendência dos dados de nível de não corresponder idealmente em períodos de mínimo e máximo. A forte diferença de módulo entre os dados de velocidade medidos e modelados provavelmente se dá por diferenças entre os locais e pelos diferentes métodos de aquisição de dados, visto que os dados medidos foram obtidos a partir de transectos e os dados de velocidade do modelo são obtidos a partir de um único ponto no meio do canal, que é a região de menor velocidade (Prestes 2013).

O cenário Sem Coroa apresentou, de forma geral, aumento significativo da velocidade de vazante no estuário, o que se observa também na redução da amplitude de nível neste cenário. Isso se dá principalmente porque a Coroa do Quiriri promove o estreitamento do canal do Rio Pará na desembocadura, atuando como um “funil” ao diminuir a área principal do canal estuarino, o que impulsiona o prisma de maré estuário acima. Por ser a principal barra na desembocadura do Rio Pará em relação a extensão latitudinal, a Coroa do Quiriri, ao

ser removida, proporcionou variações na hidrodinâmica do Rio Pará que podem ser observadas em ambos os períodos e estágios de maré.

Quanto aos períodos de maré, observou-se uma variação mais pronunciada durante o período de quadratura em relação ao de sizígia em quase todo o estuário, com o ponto P1 sendo a única exceção. Tal comportamento é reflexo da atenuação do sinal de maré com a remoção da coroa e com o período de quadratura, permitindo um maior impacto das correntes fluviais sobre o estuário nesse período. Os pontos P6 e P7 não apresentaram quaisquer variações significativas entre as duas simulações, indicando que o impacto da Coroa do Quiriri na hidrodinâmica não se estende às regiões costeiras de forma pronunciada, se limitando a pequenas variações, provavelmente durante máximos de vazante.

Com relação aos estágios de maré, a tendência de enfraquecimento do sinal de maré estuário acima com a remoção da Coroa do Quiriri segue presente, com variações significativas em todos os parâmetros no ponto P1, com redução da velocidade de enchente e aumento, acima dos 90%, no período de vazante. Tal padrão se repetiu nos outros pontos, ainda que com menor intensidade, com exceção dos pontos P6 e P7 que não apresentaram quaisquer variações significativas.

A remoção da Coroa do Quiriri também ocasionou um atraso entre os sinais de nível e velocidade nos pontos P1 e P5, o que provavelmente está associado à interação hidrodinâmica entre barras arenosas e os fluxos de enchente e vazante na desembocadura (Leonardi *et al.* 2013). Já no ponto P1, esse atraso se deve às diferenças entre os máximos de velocidade de vazante entre as duas simulações.

Nos dados das seções transversais, observa-se que a região mais alterada hidrodinamicamente com a remoção da Coroa do Quiriri se encontra estuário acima, onde a vazão instantânea em direção ao oceano foi significativamente elevada, o que sustenta a conclusão proveniente da análise dos pontos de observação, que indicou a Coroa do Quiriri como “amplificadora” do sinal de maré em direção à montante do estuário.

A significativa alteração dos parâmetros hidrodinâmicos e da influência do prisma de maré dentro do estuário do Rio Pará, podem representar variações em diversos marcadores oceanográficos como na deposição sedimentar, visto que em algumas regiões do estuário a deposição é regulada pelas correntes de maré (Gregório & Mendes 2009; Martins & Mendes, 2011) ou nas produções pesqueira e primária, sendo esta última elevada no período de maior intrusão salina no Rio Pará (Alabaster & Lloyd 2013, Paiva *et al.* 2006).

Além disso, no ano de 2018, o estuário do Rio Pará foi ponto de partida ou destino de cerca de 59% da carga transportada por meio fluvial nos portos do Pará e os portos inseridos

neste estuário movimentaram 80% da receita operacional portuária do estado (CDP 2018). Isso é indicativo de intenso tráfego de navegações de grande porte no estuário, o que poderia ser favorecido pela remoção da Coroa do Quiriri, visto que o número de acidentes com grandes embarcações em trechos difíceis é quase o dobro do número de acidentes em trechos fáceis (Brolsma *et al.* 1988).

Entretanto, neste cenário a reavaliação dos dados de nível presentes em cartas náuticas seria necessária para eliminar riscos à navegação próximo às margens, geralmente realizada por pequenas embarcações (Chaves & Robert 2003) que, por sua vez, representam a maioria dos acidentes na navegação fluvial (Padovezzi 2003).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Rio Pará, apesar de seus complexos processos hidrodinâmicos, foi representado de forma satisfatória pelo modelo bidimensional, indicando que essa metodologia, já adotada em trabalhos anteriores no estuário, resulta em dados com nível aceitável de confiabilidade. A fim de melhor representar o sistema estuarino, dados de vento e a implementação de séries temporais de velocidade e vazão podem ser adotados com o intuito de obter simulações mais confiáveis. A remoção da Coroa do Quiriri acarretou variações significantes na hidrodinâmica do Rio Pará na simulação, principalmente nas regiões no alto do estuário, tendo como principal impacto a redução do prisma de maré no ambiente estuarino, observada pelo aumento significativo de velocidade de vazante, o que pode vir a alterar uma gama de fatores oceanográficos dentro do estuário, indicando a necessidade de inserção desses fatores no modelo como forma de prever sua variação numa hipotética remoção da Coroa do Quiriri.

REFERÊNCIAS

- Alabaster J. S. & Lloyd R. S. 2013. *Water quality criteria for freshwater fish* (No. 3117). Elsevier, 361p.
- Alves M. A. M. S., El-Robrini M., Sousa-Filho P. W. M., Farias D. R., França C. F. 2005. Morfodinâmica das praias de meso-macromarés da zona costeira do estado do Pará. In ABEQUA 10º Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, Guarapari, *Resumos expandidos*. 1 CD-ROM v.10, n.0258. pdf.
- Agência Nacional de Águas (ANA). 2018. *Rede hidrometeorológica nacional*. Disponível em: http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/mapa_hidroweb.jsf. Acesso em: 04 de novembro de 2018.
- Badano N., Valdés R. E., Álvarez E. Á. 2018. Tidal current energy potential of Nalón river estuary assessment using a high precision flow model. *Open Engineering*, **8**(1):118-123.
- Barros D. F., Torres M. F., Frédou F. L. 2011. Ictiofauna do estuário de São Caetano de Odivelas e Vigia (Pará, Estuário Amazônico). *Biota Neotropica*, **11**(2):367-373.
- Beardsley R. C., Candela J., Limeburner R., Geyer W. R., Lentz S. J., Castro B. M., Cacchione D., Carneiro N. 1995. The M2 tide on the Amazon shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **100**(C2): 2283-2319.
- Böck C. S., Freitas Assad L. P., Landau L. 2010. Implementação do modelo numérico hidrodinâmico POM na Baía de Guajará (Pará, Brasil). In 33º Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional-CNMAC. *Anais*. v.3, p. 605-611.
- Borba T. A. 2014. *Modelagem hidrodinâmica aplicada ao estuário amazônico: uma abordagem em malha flexível*. MSc Thesis Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 46p.
- Brolsma J. U. 1988. Six-barge pushtow trials. In: Permanent International Association of Navigation Congresses - PIANC, Den Haag. *Boletim*. n.62.
- Callède J., Cochonneau G., Alves F., Guyot J. L., Guimarães V., Oliveira E. 2010. Les apports en eau de l'Amazonie à l'Océan Atlantique. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, **23**(3):247-273.
- Carrere L., Lyard F., Cancet M., Guillot A., Picot N. 2016. FES 2014, a new tidal model-Validation results and perspectives for improvements. In: ESA Living Planet Symposium, Praga. *Proceedings...* p. 9-13.
- Chaves P. D. T. & Robert M. D. C. 2003. Embarcações, artes e procedimentos da pesca artesanal no litoral Sul do Estado do Paraná, Brasil. *Atlântica, Rio Grande*, **25**(1):53-59.
- Companhia das Docas do Pará (CDP). 2018. *Informações operacionais*. Disponível em: <https://www.cdp.com.br/estatisticas-2018>. Acesso em: 15 de dezembro de 2018.

Companhia Nacional de Abastecimento - Conab. 2018. *Acompanhamento da safra brasileira: grãos. Décimo primeiro levantamento, novembro, 2018*, 2(11).

Correa I. C. S. 2005. Aplicação do diagrama de Pejrup na interpretação da sedimentação e da dinâmica do estuário da baía de Marajó-PA. *Pesquisas em Geociências*. 32(2):109-118.

Costa M. D. S. D. 2014. Aporte hídrico e de material particulado em suspensão para a Baía do Marajó: contribuições dos rios Jacaré Grande, Pará e Tocantins. MSc Thesis Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 83p.

Dalrymple R.W & Zaitlin B.A. 1989. Tidal Sedimentation in the Macrotidal, Cobequid Bay-Salmon River Estuary, the Bay of Fundy: A Field Guide. In: 2° International Research Symposium on 'Clastic Tidal Deposits', Calgary. 84p.

Dionne J. C. 1963. Towards a more adequate definition of the St. Lawrence estuary. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 7:36-44.

Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). 2011. *Catálogo de cartas e publicações*. Disponível em: http://www.cartasnauticasbrasil.com.br/media/catalog/catalogo_completo.pdf. Acesso em: 20 de junho de 2018.

Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). 2018. *Tábuas de maré*. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>. Acesso em: 20 de junho de 2018.

Elliott M. & McLusky D. S. 2002. The need for definitions in understanding estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 55(6):815-827.

Egbert G. D. & Erofeeva S. Y. 2002. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2):183-204.

Fundação De Estudos Do Mar. 2003. *Catálogo de estações maregráficas brasileiras*, Rio de Janeiro, Brasil. 280p.

Fundação Getúlio Vargas. (FGV). 1998. Agroanalysis. *Revista de Economia Agrícola da FGV*, 18(3).80p.

Food and Agriculture Organization (FAO). 2016. *The state of World fisheries and aquaculture, contributing to food security and nutrition for all*. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i5555e.pdf>. Acesso em 27 de julho de 2018.

Furtado A. M. M. & Silva Júnior O. D. C. 2006. *Impactos ambientais do desmatamento e expansão urbana na ilha do Mosqueiro (Belém-Pará-Brasil)*. Observatório Geográfico de América Latina. Acesso em: 28 de julho de 2018. Disponível em: <http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal12/Procesosambientales/Impactoambiental/41.pdf>.

Gabioux M. 2002. *Influência da lama em suspensão sobre a propagação da maré na plataforma Amazônica*. MSc Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, Brasil. 109p.

General Bathymetric Chart of The Oceans. 2018. *Base de dados*. Disponível em :https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/ Acesso em: 27 de julho de 2018.

Geyer W. R., Beardsley R. C., Candela J., Castro B. M., Legeckis R. V., Lentz S. J., Limeburner R., Miranda L.B., Trowbridge J. H. 1991. The physical oceanography of the Amazon outflow. *Oceanography*, **4**(1): 8-14.

Governo do Pará. 2017. *Portal do Governo do Pará*. Disponível em: http://www.pa.gov.br/O_Para/economia.asp. Acesso em 27 de julho de 2018.

Gregório A. M. D. S., Mendes A. C. 2009. Batimetria e sedimentologia da baía do Guajará, Belém, estado do Pará, Brasil. *Amazônia: Ciência e Desenvolvimento*, **5**(9):53-72.

Hu K., Ding P., Wang Z., Yang S. 2009. A 2D/3D hydrodynamic and sediment transport model for the Yangtze Estuary, China. *Journal of Marine Systems*, **77**(1-2):114-136.

Kjerfve B. 1987. Estuarine Geomorphology and Physical Oceanography. In: Day Jr.; Hall, C.H.A.S.; Kemp, W.M.; Yáñez-Aranciba, A. (eds.). *Estuarine Ecology*. New York, Wiley, p. 47-78.

Harris P., Muelbert J., Muniz P., Yin K., Ahmed K., Folorunsho R., Caso M., Vale C.C., Machiwa J., Bernal P. 2016. *World Ocean Assessment*. Nações Unidas, 1758p.

Hydraulics D. 2006. *Delft3D-FLOW user manual*. Delft, Holanda, 614p.

Leonardi N., Canestrelli A., Sun T., Fagherazzi S. 2013. Effect of tides on mouth bar morphology and hydrodynamics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **118**(9):4169-4183.

Mallet C., Howa H. L., Garlan T., Sottolichio A., Le Hir P. 2000. Residual transport model in correlation with sedimentary dynamics over an elongate tidal sandbar in the Gironde Estuary (southwestern France). *Journal of Sedimentary Research*, **70**(5):1005-1016.

Menezes M. O. B., Freitas P. P., Baltazar L. R. S., Rollnic M., Pinheiro L. 2013. Estuarine processes in macro-tides of Amazon estuaries: A Study of Hydrodynamics and Hydrometeorology in the Marajó Bay (Pará-Brazil). *Journal of Coastal Research*, **65**(sp2):1176-1181.

Ministério do Meio Ambiente - MMA 2007. *Recursos hídricos: componente da série de relatórios sobre o estado e perspectivas do meio ambiente no Brasil./Ministério do Meio ambiente; agência nacional de Águas; Programa das nações unidas para o Meio ambiente*. Brasília: MMA. 264p.

Miranda L. D., Castro B. D., Kjerfve B. 2002. *Princípios de oceanografia física de estuários*. São Paulo: EDUSP, 414p.

Molinas E., Vinzon S. B., Vilela C. D. P. X., Gallo M. N. 2014. Structure and position of the bottom salinity front in the Amazon Estuary. *Ocean Dynamics*, **64**(11):1583-1599.

- Monteiro S. M. 2009. *Dinâmica dos parâmetros abióticos na zona de mistura do estuário do rio Paracauari, Ilha do Marajó-PA*. Belém, Brazil. MSc Thesis, Universidade Federal do Pará, Belém. 137p.
- Nelson S. M., Zamora-Arroyo F., Ramírez-Hernández J., Santiago-Serrano E. 2013. Geomorphology of a recurring tidal sandbar in the estuary of the Colorado River, Mexico: implications for restoration. *Ecological engineering*, **59**:121-133.
- Nogueira E. C. 2017. *Propagação da maré em canais interconectados—Estudo de caso Estreito de Breves, PA*. Doctoral dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 70p.
- Padovezi C. D. 2003. *Conceito de embarcações adaptadas à via aplicado à navegação fluvial no Brasil*. Tese (Doutorado)—Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, São Paulo, 235p.
- Paiva R. S., Eskinazi-Leça E., Passavante J. Z. D. O., Silva-Cunha M. D. G. G., Melo N. F. A. C. D. 2006. Considerações ecológicas sobre o fitoplâncton da baía do Guajará e foz do rio Guamá, Pará, Brasil. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Ciências Naturais*, **1**(2):133-146.
- Porto M. F. & Porto R. L. L. 2008. Gestão de bacias hidrográficas. *Estudos avançados*, **22**(63):43-60.
- Prestes Y. O. 2013. *Transporte de volume na zona de maré do rio Pará, Brasil*. Monograph, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 77p.
- Prestes Y. O., Silva A. C., Rollnic M., Rosário R. P. 2017. The M2 and M4 tides in the Pará river estuary. *Tropical Oceanography-ISSN*, **45**(1):1679-3013.
- Prichard D. W. 1955. Estuarine circulation patterns. *Proc. Amer. Sco. Civil Eng.*, **81**:1-11.
- Rahbani M. A. 2015. Survey on Precision of Nested Water Level Data Derived From Delft3D Model. *International Journal of Maritime Technology*, **3**:61-65.
- Ribeiro F. C. P., Senna C. S. F., Torgan L. C. 2008. Diatomáceas em sedimentos superficiais na planície de maré da praia de Itupanema, estado do Pará, Amazônia. *Rodriguésia*, **59**(2):309-324.
- Rosa Filho J. S., Busman D. V., Viana A. P., Gregório A. M., Oliveira D. M. 2006. Macrofauna bentônica de zonas entre marés não vegetadas do estuário do rio Caeté, Bragança, Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Ciências Naturais*, **1**(3):85-96.
- Rosário R. P. 2016. *Análise de processos oceanográficos no estuário do rio Pará*. Doctoral dissertation, Univerisidade Federal do Pará, Belém. 139p.
- Souza R. R. D. *Modelagem numérica da circulação de correntes de maré na Baía de Marajó e Rio Pará (PA)*. Doctoral Dissertation, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 180p.

Souza Filho P. W. M. 2005. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. *Revista Brasileira de Geofísica*, **23**(4):427-435.