



## **1040 - ANÁLISES HIDRODINÂMICA E DE IDADE DA ÁGUA NO ESTUÁRIO DO RIO PARICATUBA, BELÉM DO PARÁ**

**Monica Frickmann Young Buckmann** <sup>(1)</sup>

Engenheira Civil - Recursos Hídricos e Meio Ambiente (POLI/UFRJ)

M.Sc. em Engenharia Civil - Recursos Hídricos e Meio Ambiente (PEC-COPPE/UFRJ)

D.Sc. em Engenharia Oceânica/Costeira (PENOCOPPE/UFRJ)

Pesquisadora na Universidade de São Paulo (USP), Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA)

Engenheira Consultora na Associados Baías do Brasil (ABdoB).

**Verônica Silveira de Andrade** <sup>(2)</sup>

Engenheira Ambiental e Sanitarista (UFJF)

M.Sc. em Engenharia Civil - Recursos Hídricos e Meio Ambiente (PEC-COPPE/UFRJ)

Doutoranda em Engenharia Civil - Recursos Hídricos e Meio Ambiente (PEC-COPPE/UFRJ)

Engenheira Consultora na Associados Baías do Brasil (ABdoB).

**Josué da Costa Rocha** <sup>(3)</sup>

Engenheiro Sanitarista (UFPA).

Pós-Graduado em Gestão, Perícia e Auditoria Ambiental (IESAM).

Especialista em Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto.

Diretor Executivo do Grupo SAMNIT, sediado em Belém-PA.

**Endereço**<sup>(1)</sup>: Av. Atlântica, 3102/502 - Copacabana – Rio de Janeiro - RJ - CEP: 22070-000 – Brasil - Tel: +55 (21) 2543-4528 - e-mail: [myoung@oceanica.ufrj.br](mailto:myoung@oceanica.ufrj.br).

### **RESUMO**

Entender como os processos naturais afetam a hidrodinâmica e a qualidade da água em corpos hídricos como rios, lagoas e estuários é crucial para a gestão responsável dos recursos hídricos. Estuários são particularmente desafiadores porque a circulação da água é influenciada por forças locais e remotas, incluindo fatores climáticos, geológicos, atmosféricos, oceanográficos, hidrológicos, químicos e biológicos (MIRANDA, 2002). Esses sistemas apresentam biodiversidade animal e vegetal rica e altos níveis de nutrientes disponíveis, mas também são suscetíveis a mudanças frequentes devido a fatores naturais e atividades humanas. Para gerenciar efetivamente a qualidade da água em corpos hídricos, é essencial monitorá-los e adotar ferramentas para auxiliar na tomada de decisões. A modelagem computacional validada, calibrada e aferida por especialistas é uma dessas ferramentas indispensáveis no gerenciamento de sistemas ambientais. O estuário do rio Paricatuba, localizado na baía de Guajará, no norte do Brasil, é explorado neste estudo através do uso de modelagem computacional. Para entender os padrões de circulação hidrodinâmica e a idade da água (IA) no rio Paricatuba, foram implementados, por meio do SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), um modelo de hidrodinâmico e um modelo de transporte Euleriano. O estudo da circulação hidrodinâmica é importante para compreender as variações causadas pela influência da maré. A análise da renovação da água na área, por meio de modelagem de IA, pode contribuir para identificação de zonas mais sensíveis à poluição acumulada. Regiões com idade média da água elevada, possuem menor renovação das águas conseqüentemente e ser mais suscetíveis a processos de eutrofização.

**PALAVRAS-CHAVE:** hidrodinâmica, modelagem de circulação, idade da água, SisBaHiA

### **INTRODUÇÃO**

Compreender os processos que influenciam a hidrodinâmica e os parâmetros de qualidade da água em corpos hídricos naturais, como rios, lagoas e estuários é essencial para gestão dos recursos hídricos. Sistemas estuarinos são complexos já que a hidrodinâmica estuarina resulta de um processo de interação entre forçantes remotas e locais, cuja magnitude depende de processos climáticos, geológicos, atmosféricos, oceanográficos, hidrológicos, químicos e biológicos (MIRANDA, 2002). Tais sistemas possuem grandes quantidades de nutrientes disponíveis com rica biodiversidade animal e vegetal. Por outro lado, são sujeitos a constantes mudanças em resposta às forçantes naturais, bem como são vulneráveis às atividades antrópicas.

Por definição um estuário é um corpo de água costeiro com ligação livre com o mar, dentro do qual ocorre mistura mensurável da água doce da bacia hidrográfica com a água salgada do mar e que se estende para montante nos rios até o limite de influência das marés (DYER, 1997).

O monitoramento e a adoção de ferramentas que auxiliem na tomada de decisões são fundamentais para a boa gestão da qualidade das águas de um corpo hídrico. Modelos computacionais validados, calibrados e aferidos com dados de campo e analisados por especialistas, são ferramentas indispensáveis ao gerenciamento de sistemas ambientais. A confiabilidade dos resultados de modelagens depende fortemente da validade dos dados de entrada.

A rede hidrográfica da região metropolitana de Belém é formada por furos, baías, rios, e igarapés, que drenam os centros urbanos de Belém, Ananindeua, Benevides, Marituba, Santa Bárbara e Santa Izabel, no qual se destacam as baías do Guajará, do Sol, os furos da Marinha, do Maguari, e os rios Guamá, Benfica, Benfica, Paricatuba, além de inúmeros igarapés de menor porte que deságuam nas drenagens principais. Estes sistemas hídricos estão inseridos na Macrorregião Hidrográfica Estadual denominada Costa Atlântica – Nordeste, e sub-região hidrográfica Guamá.

Este artigo explora os padrões de circulação hidrodinâmica através do uso de modelagem computacional para ampliar o conhecimento no estuário do rio Paricatuba, localizado no sistema estuarino da baía de Guajará, no Estado do Pará no norte do Brasil.

A bacia hidrográfica do rio Paricatuba está inserida dentro dos limites dos municípios de Benevides e Santa Bárbara, e desemboca no Furo das Marinhas, que se liga à baía do Sol e baía do Guajará, v. Figura 1. Sua bacia hidrográfica está inserida no contexto de classificação de Ottobacias da Agência Nacional de Águas como Bacia de classe 6 (ANA, 2017).

O rio Guamá, a baía de Guajará, bem como os furos e canais de maré que separam as ilhas do continente (Mosqueiro, Outeiro, entre outras), incluindo o rio Paricatuba, tem seus regimes condicionados ao movimento das marés. Isto confere especial atenção ao estudo da modelagem hidrodinâmica e de idade da água do rio Paricatuba para avaliação da viabilidade de implantação de lançamento de efluentes.



**Figura 1: Mapa de localização do rio Paricatuba em imagem do Google Earth.**



Utilizando a modelagem computacional, busca-se a compreensão da circulação hidrodinâmica no sistema estuarino, identificando as variações oriundas da influência da maré em um trecho do rio onde existe o interesse de instalação de um ponto de lançamento de efluentes, ilustrado no mapa de detalhe da Figura 2.

A análise da renovação da água na área de estudo, através de modelagem de Idade da Água (IA), permitirá destacar nos mapas as zonas mais sensíveis a efeitos de poluição acumulada, pois tem menos renovação de água. Regiões com menor renovação das águas e consequente idade média da água elevada, são regiões onde as reações cinéticas são muito importantes e podem envolver processos de eutrofização.

## METODOLOGIA

As simulações computacionais foram realizadas no SisBaHiA. Este é um sistema profissional de modelos computacionais desenvolvido no Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ. O SisBaHiA encontra-se continuamente sendo ampliado e aperfeiçoado na COPPE/ UFRJ desde 1987, através de várias teses de mestrado e doutorado, além de projetos de pesquisa. O sistema tem sido adotado em dezenas de estudos e projetos contratados à Fundação Coppetec, envolvendo modelagem de corpos de água naturais. Maiores detalhes sobre o SisBaHiA podem ser obtidos no site [www.sisbahia.coppe.ufrj](http://www.sisbahia.coppe.ufrj).

O SisBaHiA pode ser aplicado em simulações de cenários em águas costeiras, baías, estuários, rios, canais, reservatórios, lagos ou lagoas, visando o estudo da dinâmica de processos nestes complexos sistemas ambientais (ROSMAN, 2022). Foram desenvolvidos neste estudo modelos promediados na vertical, 2DH, otimizados para corpos de água naturais nos quais efeitos de densidade variável possam ser desprezados. Utilizou-se os módulos de Modelos Hidrodinâmico (MH) e Transporte Euleriano (TE).

### • Concepção do Modelo Hidrodinâmico (MH)

O MH é a base fundamental de um sistema de modelos que tem como principal objetivo simular a circulação hidrodinâmica. A mecânica do movimento para escoamentos em regime turbulento é governada pelas equações de Navier-Stokes, que são baseadas no princípio de conservação da quantidade de movimento. Essa equação juntamente com as equações da continuidade, de estado e do transporte para cada constituinte da equação de estado resultam no modelo matemático fundamental para qualquer corpo de água.

O MH do SisBaHiA é da linhagem FIST (*filtered in space and time*), descrito pelas equações de Navier-Stokes, filtradas no espaço e no tempo. Esse é um modelo numérico hidrodinâmico, tridimensional, para escoamentos homogêneos, de grande escala e é composto pelos módulos 2DH e 3D.

O FIST3D do SisBaHiA considera que os escoamentos na natureza podem ser tratados como o de um fluido incompressível devido a compressibilidade da água ser desprezível. A equação da continuidade do volume exprime que se o fluido é incompressível, o campo de velocidades do escoamento tem que ter divergente nulo. De fato, se o divergente fosse  $> 0$ , indicaria que o volume estaria expandindo e, se o divergente fosse  $< 0$  o volume estaria contraindo.

Assumindo a massa específica com valor constante, a conservação do volume é equivalente a conservação da massa. Além disso, o FIST resolve as equações completas de Navier-Stokes considerando as aproximações de pressão hidrostática, de águas rasas e a de Boussinesq (ROVERSI et al., 2016).

O modelo hidrodinâmico bidimensional integrado na vertical, 2DH, calcula a cada intervalo de tempo as componentes das velocidades médias na vertical, na direção  $x$  e  $y$ ,  $U(x,y,t)$  e  $V(x,y,t)$  respectivamente, e as elevações da superfície livre,  $z = \zeta(x,y,t)$ , sendo necessárias as equações da quantidade de movimento nas direções  $x$  e  $y$  (ROSMAN, 2022). A equação 1 mostra as equações governantes do MH 2DH na direção  $x$ , e a equação 2 mostra a equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção  $y$ . A equação 3 é a da continuidade do volume integrada ao longo da vertical.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - g \frac{H}{2} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial(H \hat{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H \hat{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^s - \tau_x^b) + 2\Phi \sin\theta V - \frac{U}{H} \Sigma q$$

equação (1)

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - g \frac{H}{2} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial(H \hat{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(H \hat{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^s - \tau_y^b) - 2\Phi \sin\theta U - \frac{V}{H} \Sigma q$$

equação (2)

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \Sigma q$$

equação (3)

Onde  $U$  e  $V$  são as velocidades médias na vertical das direções  $x$  e  $y$ , respectivamente. O  $H$  é a profundidade instantânea equivalente ao valor de  $\zeta+h$ , ou seja, é a altura da coluna de água. As tensões de atrito na superfície livre estão representadas por  $\tau_x^s$  e  $\tau_y^s$  e as tensões de fundo por  $\tau_x^b$  e  $\tau_y^b$ , nas direções  $x$  e  $y$ .  $\Sigma q$  representa os fluxos de precipitação, evaporação e infiltração, por unidade de área.

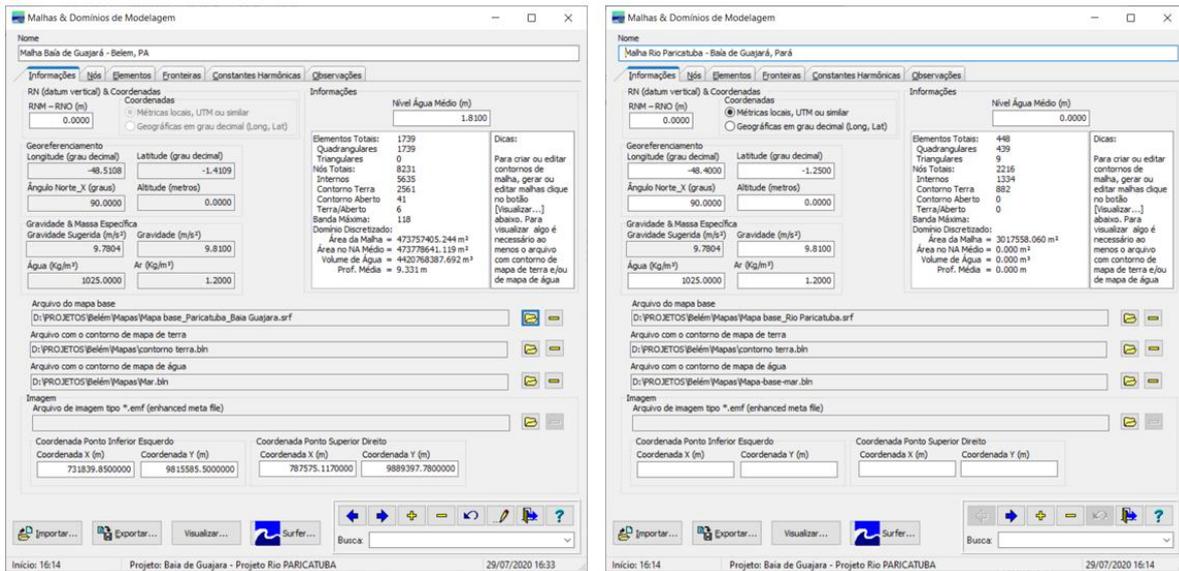
- **Modelagem digital dos domínios de interesse**

Na modelagem o primeiro passo após o cadastro de projeto em uma base de dados é a criação do modelo digital do terreno. Neste estudo foram desenvolvidos dois modelos, um expandido e outro mais detalhado do rio Paricatuba, conforme mostra a Figura 2. O expandido, que engloba a baía de Guajará, fornece os dados de elevações e velocidades que foram utilizados como condições de contorno para o modelo detalhado. O detalhado do rio Paricatuba baseia-se nas condições de contorno fornecidas pelo modelo expandido nas fronteiras localizadas no furo das Marinhas.

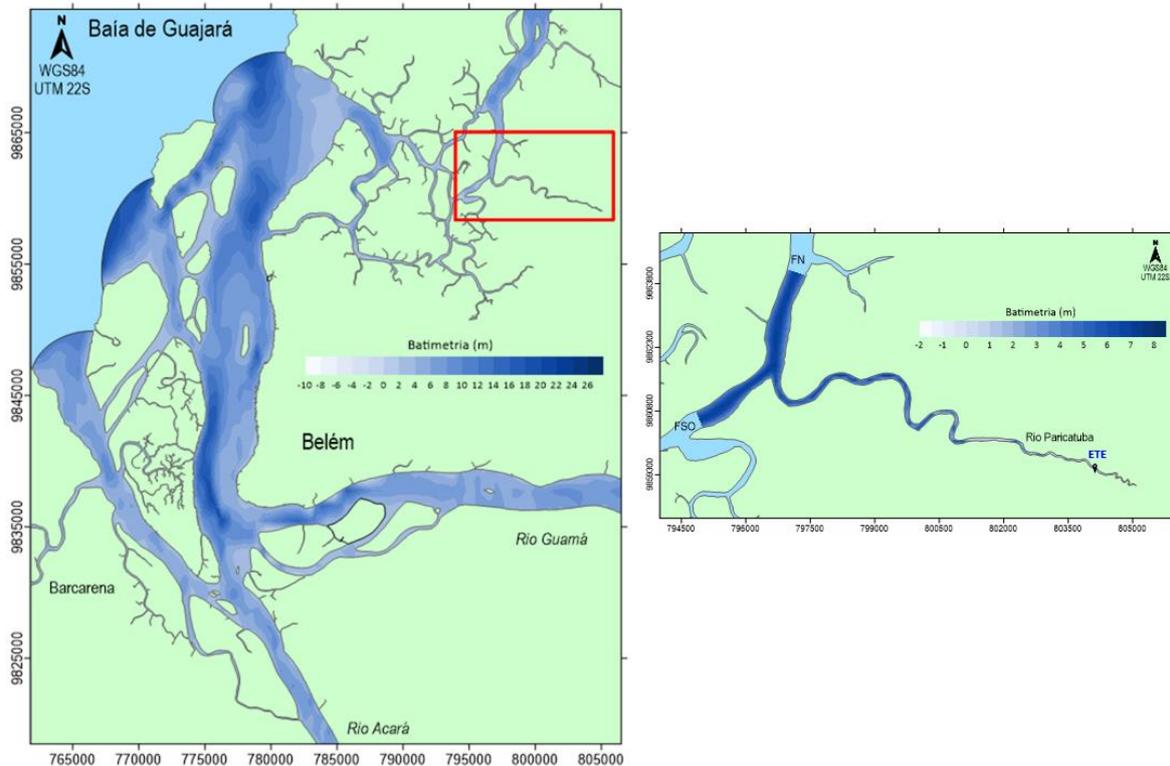
Esta estratégia foi desenvolvida para propiciar uma análise detalhada do rio Paricatuba com maior ganho computacional devido ao tamanho do modelo expandido e a proporção entre a região de interesse e o resto do domínio.

Os contornos do domínio de modelagem com precisão adequada foram digitalizados das mais recentes imagens georreferenciadas do Google Earth acessadas em março de 2020.

A discretização espacial do domínio de modelagem foi realizada por meio de uma malha de elementos finitos quadrangulares e triangulares, representando as principais feições da baía de Guajará e do rio Paricatuba. A Figura 3 apresenta os quadros com os dados básicos das malhas dos dois modelos. Para discretização do domínio expandido utilizou-se 1739 elementos, sendo todos elementos quadrangulares, contendo um total de 8231 nós de cálculo. Para discretização do domínio detalhado utilizou-se 448 elementos, sendo 439 quadrangulares e 9 triangulares, contendo um total de 2216 nós de cálculo.



**Figura 3: Dados básicos da malha de discretização em elementos finitos no mapa da esquerda para o modelo expandido e na direita para o modelo detalhado.**



**Figura 4: Mapa do domínio de modelagem dos modelos expandido e detalhado do rio Paricatuba. A batimetria nestes mapas, vistas pelos modelos, resultam da modelagem digital do terreno feita com as malhas de elementos finitos da Figura 4.**

A batimetria e tipo de material de fundo do modelo expandido foram extraídos da Carta Náutica 304 da DHN – Marinha do Brasil 304. Para garantir atualidade, as cartas georeferenciadas em formato GEOTIFF foram baixadas em março de 2020 do endereço <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/cartas-raster>. A batimetria e tipo de material de fundo do modelo detalhado se basearam em levantamento de campo realizado pelo Grupo SAMNIT, de Belém do Pará, em 2020. Observa-se a batimetria como vistas pelos modelos na Figura 4.

- **Dados Ambientais dos modelos expandido e detalhado.**

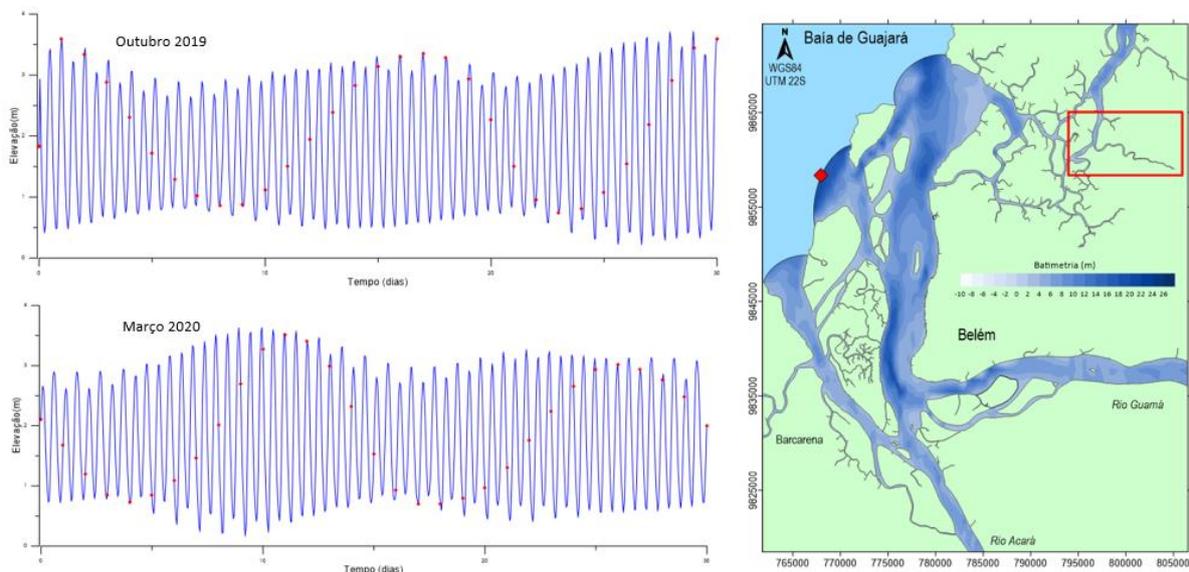
Os modelos consideram efeitos de marés astronômicas, ventos variados no espaço e variáveis no tempo e vazões fluviais nos rios afluentes, principalmente nos rios Guamá e Acará.

O nível do mar na região de interesse varia principalmente com dois agentes que, em ordem de relevância e magnitude, são: marés astronômicas, que são determinísticas e previsíveis, gerando variações oscilatórias de níveis e correntes com períodos típicos no entorno de 12 horas; marés meteorológicas, geralmente geradas por propagação de ondas na plataforma, que causam níveis médios variáveis (NMV) no espaço e no tempo além de correntes de deriva não relacionadas às marés astronômicas.

Há outros agentes que causam variações mais localizados, como a sobrelevação do nível na linha de costa por empilhamento devido à ação dos ventos, efeitos de sub e sobre elevação de nível médio na zona de arrebentação das ondas e efeitos de Coriolis que podem elevar ou abaixar o nível médio na linha de costa dependendo se as correntes são para o norte e leste ou para o sul e oeste. Estes efeitos mais localizados são computados pelo modelo a partir do campo de ventos dado e das correntes geradas. Porém, é necessário condicionar as fronteiras de mar do domínio de modelagem com dados de marés astronômicas e dados de marés meteorológicas. No caso da baía de Guajará considera-se somente os efeitos de marés astronômicas, pois os meteorológicos são desprezíveis.

Os dados de marés astronômicas, i.e., constantes harmônicas ao longo da plataforma no domínio de interesse, foram obtidas do DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação - Marinha do Brasil (Estação de Mosqueiro (10525) e Porto de Barcarena (10566)).

A Figura 5 mostra, através de gráficos de séries temporais de níveis de maré, o resultado dos condicionantes de marés astronômicas na fronteira aberta do modelo expandido nos cenários de outubro de 2019 e março de 2020. Os dados foram extraídos no ponto vermelho, na Baía de Guajará, indicado no mapa.



**Figura 5: Mapa do domínio de modelagem e séries de maré astronômica do modelo expandido na Baía de Guajará. O ponto vermelho no mapa indica o local da fronteira aberta onde foram extraídas as séries temporais de níveis de maré calibrados para outubro de 2019 e março de 2020.**

As séries temporais de vento em diferentes pontos na região de interesse provêm de modelos globais de reanálise do ECMWF – *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, com valores a cada hora para outubro de 2019 e março de 2020. A localização das estações é apresentada na Figura 6 junto com Rosa dos Ventos das estações P1 e P5.

A vazão média mensal adotada para o rio Guamá foi de 2200 m<sup>3</sup>/s, distribuídos ao longo de sua seção transversal numa razão proporcional a profundidade na seção. De forma semelhante adotou-se a vazão média mensal do rio Acará de 2000 m<sup>3</sup>/s. Os canais contribuintes ao modelo tiveram suas vazões estimadas entre 0.5 e 1 m<sup>3</sup>/s de acordo com o tamanho das suas bacias contribuintes.

Para o modelo detalhado, os dados utilizados nas condições de contorno foram séries temporais de níveis d'água e vazão nas fronteiras abertas. O modelo possui duas fronteiras abertas no Furo das Marinhas, fronteira norte (FN) e fronteira sudoeste (FSO), c. Figura 7. As séries são provenientes dos resultados do modelo expandido nessas mesmas seções. O modelo detalhado absorve, então, os resultados de níveis d'água e vazão do modelo expandido nas fronteiras para cada cenário, outubro de 2019 (Figura 8) e março de 2020 (Figura 9).

Na região de montante do modelo detalhado, a única vazão afluente é do rio Paricatuba. As vazões consideradas foram de 13 m<sup>3</sup>/s para o cenário de estiagem, correspondente a outubro de 2019, e 25 m<sup>3</sup>/s para o período chuvoso, de março de 2020.

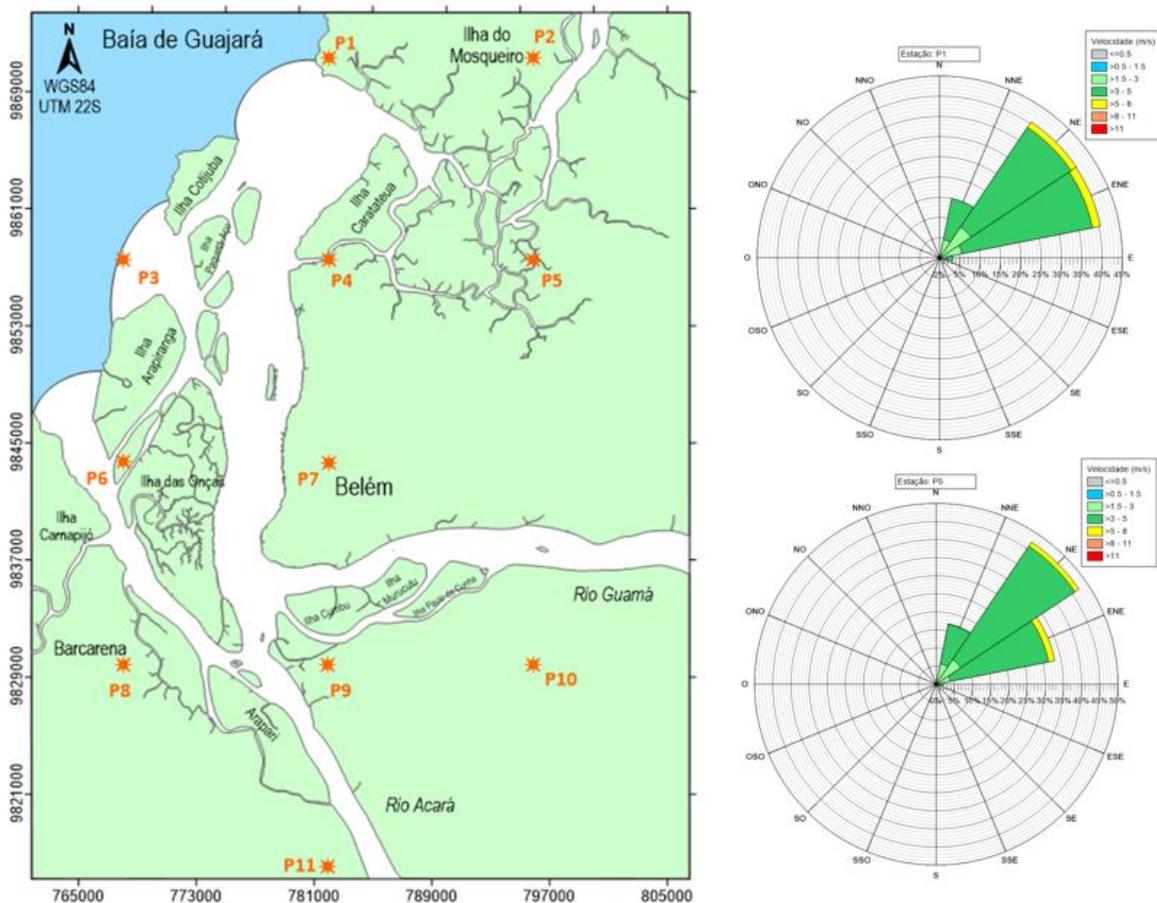
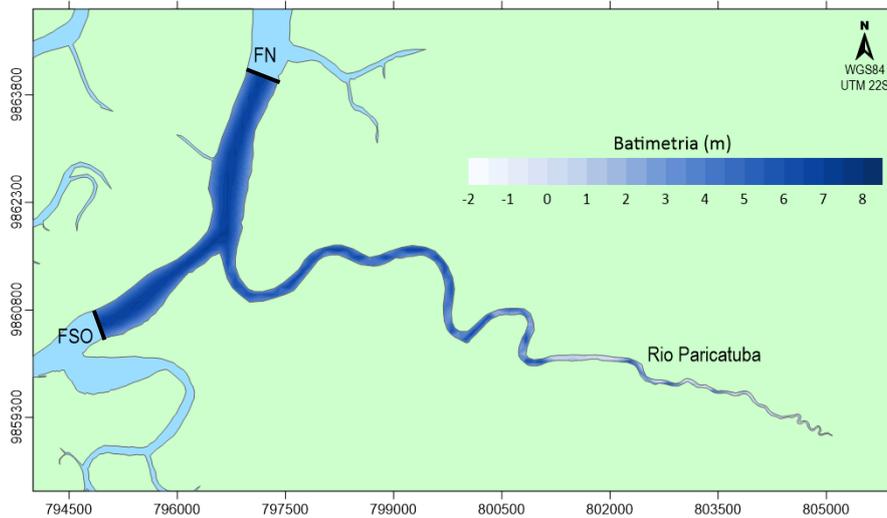
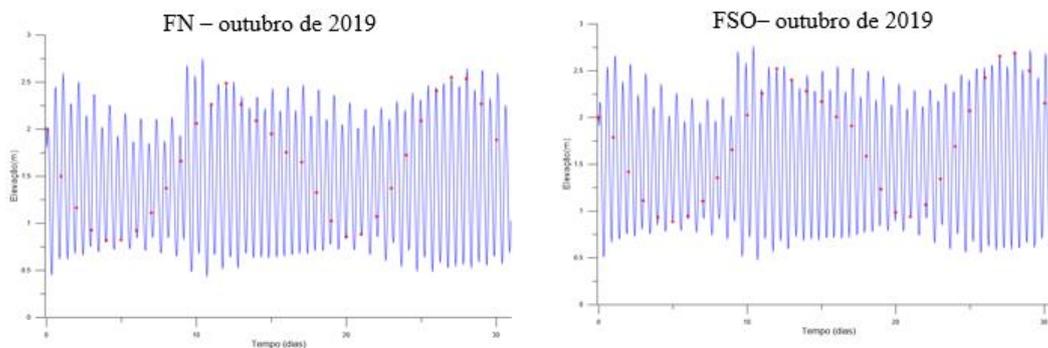


Figura 6: Localização das estações de vento do modelo expandido da baía de Guajará e Rosas dos Vento das estações P1 e P5.

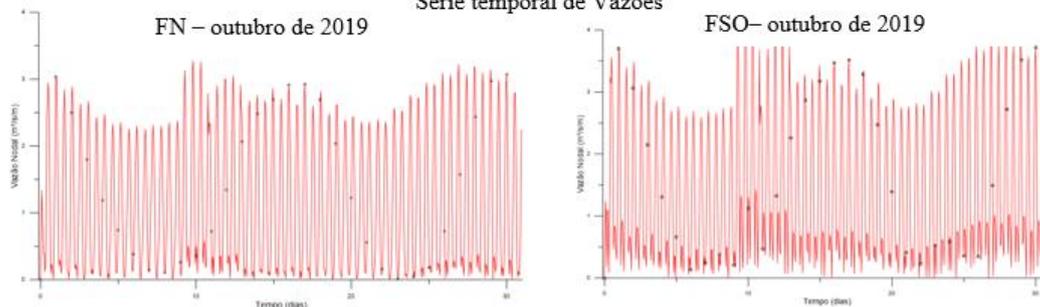


**Figura 7:** Localização das fronteiras norte (FN) e sudoeste (FSO) onde foram extraídos os resultados de séries de níveis d'água e vazão do modelo expandido e que são as condições de contorno, absorvidas pelo modelo detalhado.

Série temporal de Elevações

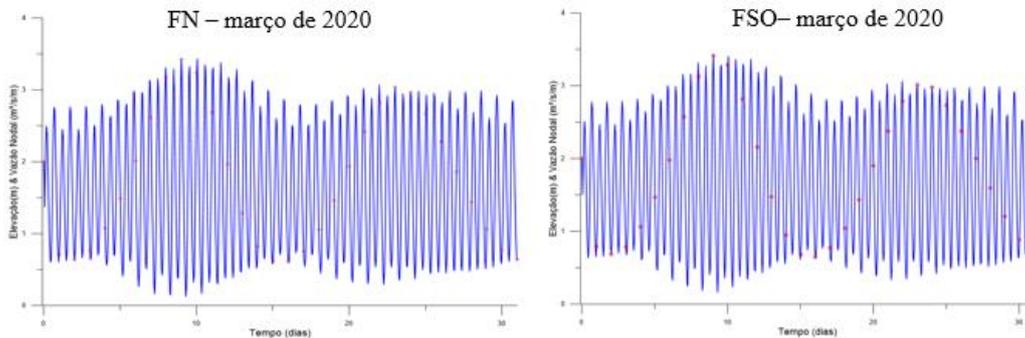


Série temporal de Vazões

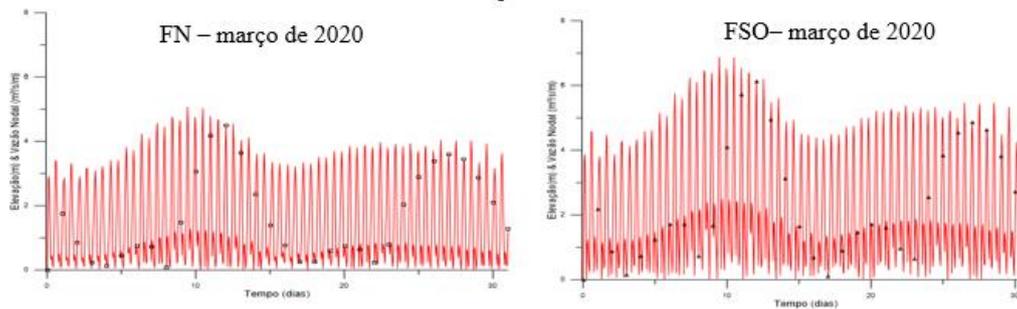


**Figura 8:** Séries de níveis d'água e vazão do modelo expandido e que são as condições de contorno, absorvidas pelo modelo detalhado. Séries temporais de elevações e vazões na FN e FSO para outubro de 2019.

Série temporal de Elevações



Série temporal de Vazões



**Figura 9:** Séries de níveis d'água e vazão do modelo expandido e que são as condições de contorno, absorvidas pelo modelo detalhado. Séries temporais de elevações e vazões na FN e FSO para março de 2020.

A Tabela 1 resume os dados ambientais adotados em cada modelo e suas origens.

**Tabela 1: Dados Ambientais dos modelos expandido e detalhado.**

Modelo	Expandido	Detalhado
Maré astronômica	Séries de nível geradas a partir de constantes harmônicas da DHN nas estações Mosqueiro (10525) e Porto de Barcarena (10566).	Séries de nível e vazão na fronteira norte (FN) e fronteira sudoeste (FSO) provenientes dos resultados do modelo expandido.
Vento	Séries obtidas de modelos globais de reanálise do <i>ECMWF</i> .	Séries obtidas de modelos globais de reanálise do <i>ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i> .
Vazão m <sup>3</sup> /s	Guamá = 2200 Acará = 2000 Afluentes = 0.5 a 1	Paricatuba estiagem = 13 (out/19) Paricatuba cheia = 25 (mar/20).

• **Concepção do Modelo de Idade da Água (IA)**

O nome Idade da Água tem sido usado na literatura, por vezes, para definir o tempo de percurso da água desde que saiu de uma origem até chegar a um destino e, por vezes, para definir algo similar a tempo de residência, ou tempo de retenção hidráulica. No entanto, a análise de IA considera a complexidade da geometria do corpo hídrico e variações temporais e espaciais. Trata-se, de fato, de estimar o tempo de decaimento de uma substância passiva marcadora de idade presente na água. Para se poder estimar o tempo de decaimento, é obrigatório que a substância marcadora de idade tenha reação cinética de decaimento de primeira ordem, com taxa de decaimento constante  $K_d > 0$ , sem outros efeitos de perdas ou ganhos de massa, tais como sedimentação e ressuspensão.

Parâmetros como IA são adotados para análises de persistência de efluentes lançados. Regiões com IA menores tem renovação mais rápida e regiões com águas menos dinâmicas apresentam IA maior.

A IA retrata o tempo que uma parcela de água permanece dentro do domínio de modelagem. Em um corpo de água natural, a IA varia em função do espaço e do tempo, podendo ter concentrações variadas em diferentes pontos do domínio. No entanto, seu valor tende à estacionaridade estatística em cada local, após um tempo de simulação suficiente.

Os cálculos de IA foram realizados no Modelo de Transporte Euleriano (TE) do SisBaHiA. Rosman (2022) e Aguilera, Santos e Rosman (2020) detalham os conceitos desses parâmetros.

Os modelos de transporte Euleriano utilizam os dados do modelo digital do terreno e do modelo hidrodinâmico aos quais está vinculado para calcular Idade de Água.

Para modelagem de Idade da Água no SisBaHiA, a ideia de corpo de água homogêneo deve ser presumida de início. Assim, admite-se que no instante inicial a condição primária de  $IA = 0$  em todos os locais. As novas águas que entram no domínio de modelagem pelos principais afluentes, com vazões mais relevantes, têm idade zero. Desse modo, o ponto de afluência fica com  $IA = 0$ . Em média, a idade da água do volume circundante do ponto de afluência depende da vazão afluente no ponto. Nestes locais de vazões afluentes mais fortes, o valor médio de IA nas cercanias da afluência tende a variar mais em função dos fluxos de entrada do que do processo de decaimento.

Na medida em que as águas iniciais e as águas novas com  $IA = 0$ , vão se misturando no domínio de interesse e sendo transportadas, o valor de concentração diminui gradativamente em cada local em função do processo de decaimento. O valor de IA torna-se diferente em cada ponto, pois depende da magnitude das correntes e da turbulência no local.

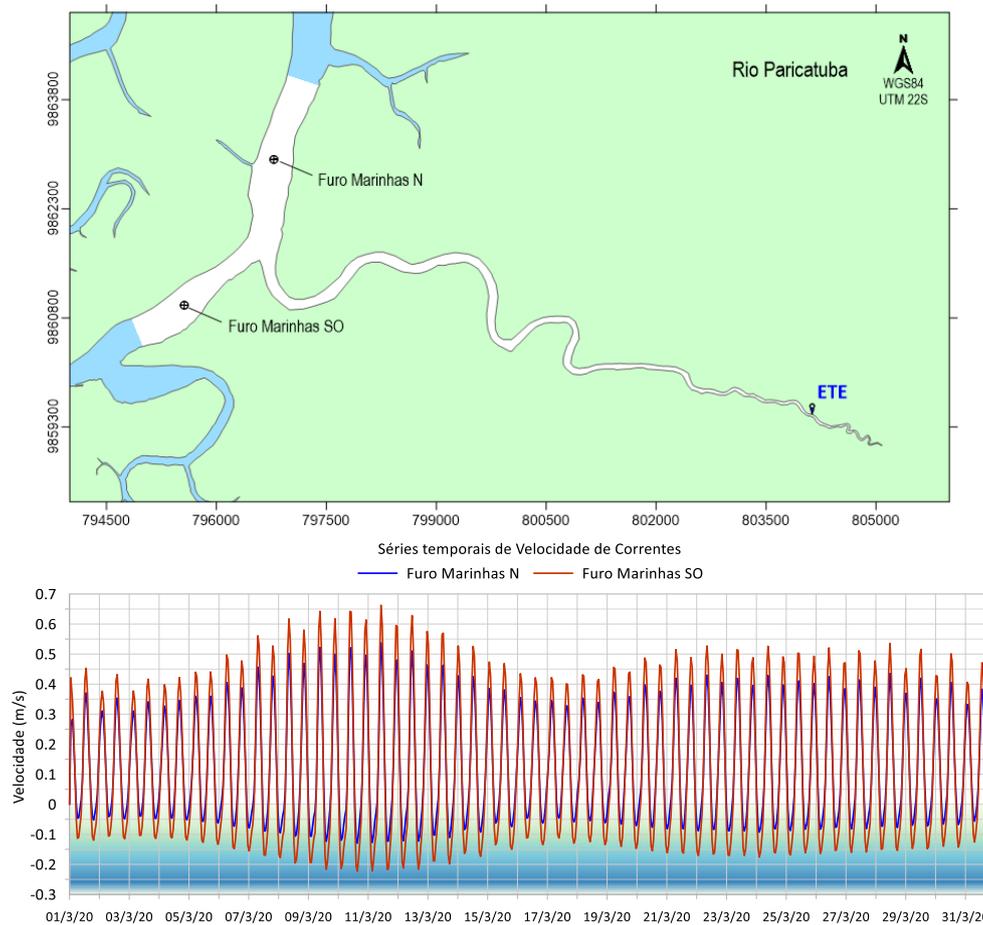
Os resultados de IA podem ser apresentados por meio de séries temporais e mapas de isolinhas. Pode-se interpretar um mapa de isolinhas de IA como isolinhas de tempo de permanência. Tal tempo também indica a duração típica para renovação das águas de cada local, pois regiões com maior IA tendem a ter menor renovação.

Com base na distribuição de valores da Idade da Água, e.g. um mapa de isolinhas de IA, após um intervalo de tempo característico para processos cinéticos de interesse, pode-se avaliar a relevância ou não de considerar determinados efeitos. Por exemplo, se em um determinado corpo de água, após 30 dias, a máxima Idade da Água for inferior a uma semana, é improvável que efeitos de eutrofização sejam relevantes.

## RESULTADOS OBTIDOS OU ESPERADOS

Os resultados obtidos para caracterização de correntes e variações de nível na região modelada incluem mapas de isolinhas de variações espaciais, bem como séries temporais de velocidade e variação de nível.

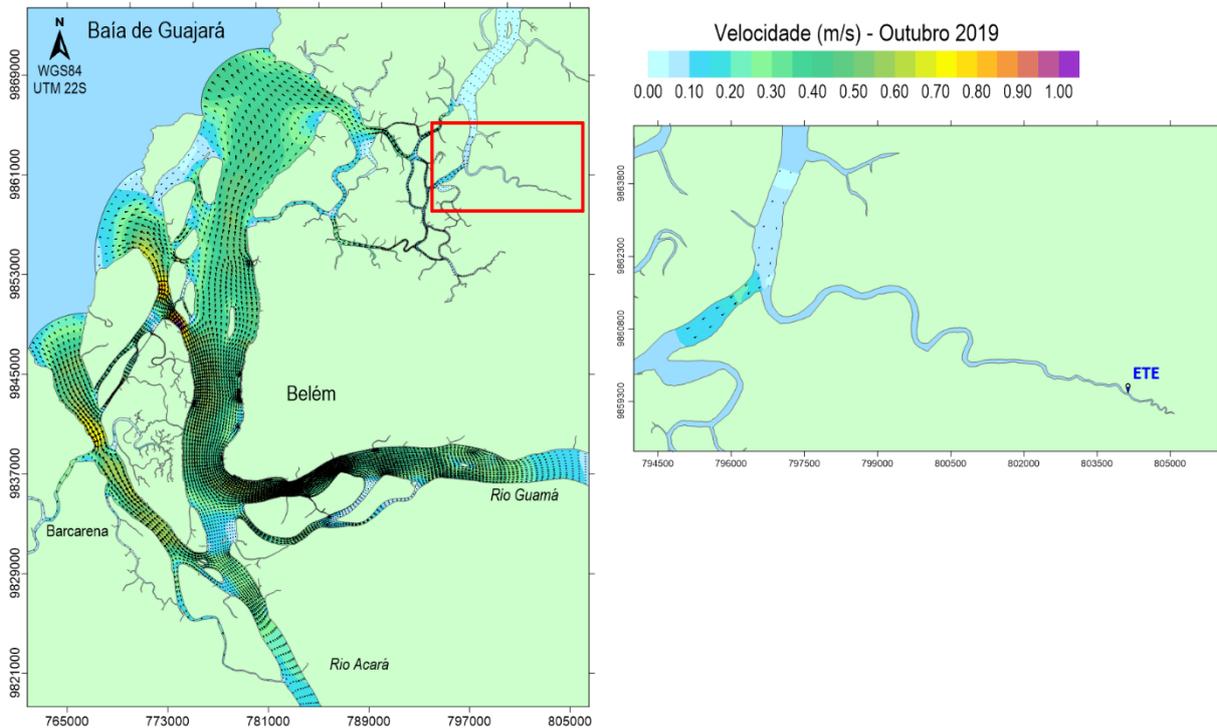
De modo a caracterizar as correntes no Furo das Marinhas, onde desagua o rio Paricatuba, a Figura 10 mostra séries temporais de velocidades de correntes próximo da foz do rio Paricatuba. No gráfico as correntes para sul têm sinal negativo e ocupam a faixa colorida. As correntes para norte têm valor positivo e estão na faixa branca. Fica claro a maior ocorrência de correntes para norte. As oscilações com períodos de aproximadamente 12 h são efeitos de marés astronômicas.



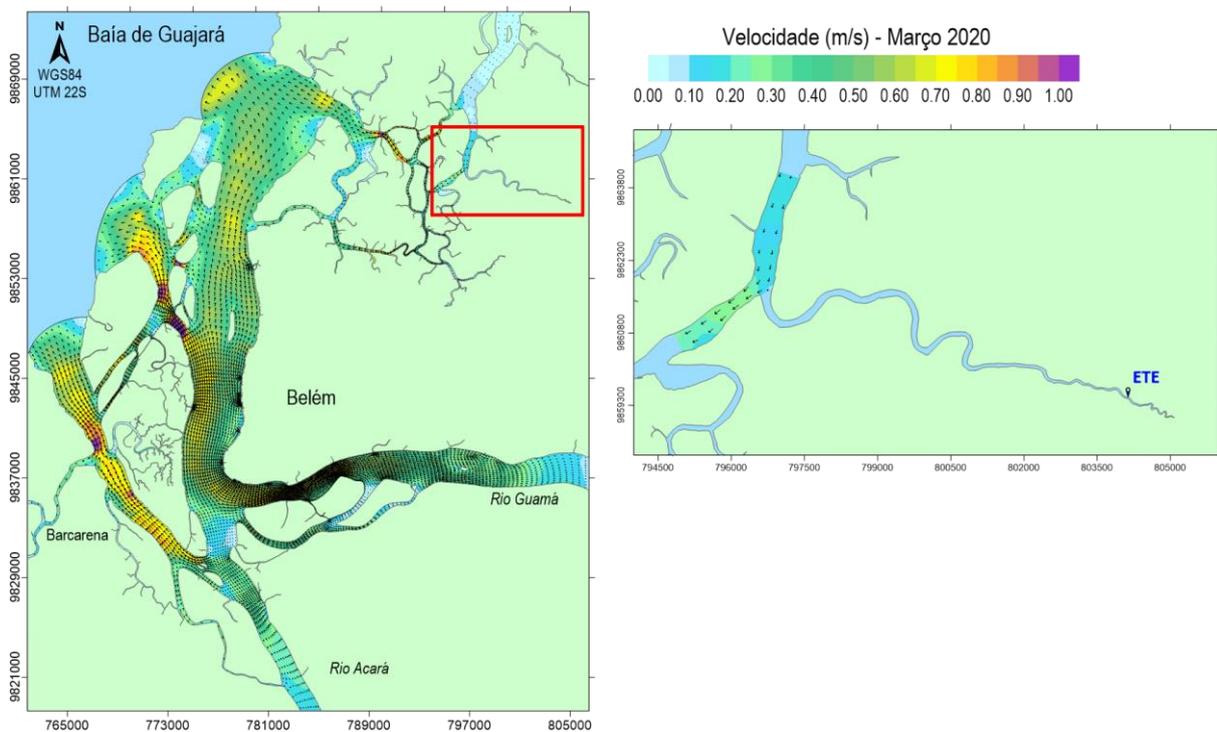
**Figura 10:** Acima o mapa indica a posição das estações cuja séries temporais de velocidades de correntes estão representadas no gráfico. Correntes para sul estão com sinal negativo e ocupam a faixa colorida. Correntes para norte têm valor positivo e estão na faixa branca.

A Figura 11 mostra o campo de correntes na baía de Guajará durante no mês de outubro de 2019, retratando um momento de maré vazante na estação Furo Marinhas N, com correntes para noroeste nas fronteiras abertas da baía, e para sudoeste no Furo das Marinhas. O instante retratado corresponde ao tempo 30/10/2019 5:00. O mapa da Figura 13 ilustra o campo de correntes no modelo de detalhe no rio Paricatuba no mesmo instante, e os gráficos mostram a variação de nível de água e velocidades de correntes na seção de lançamento da ETE ao longo do mês de outubro de 2019.

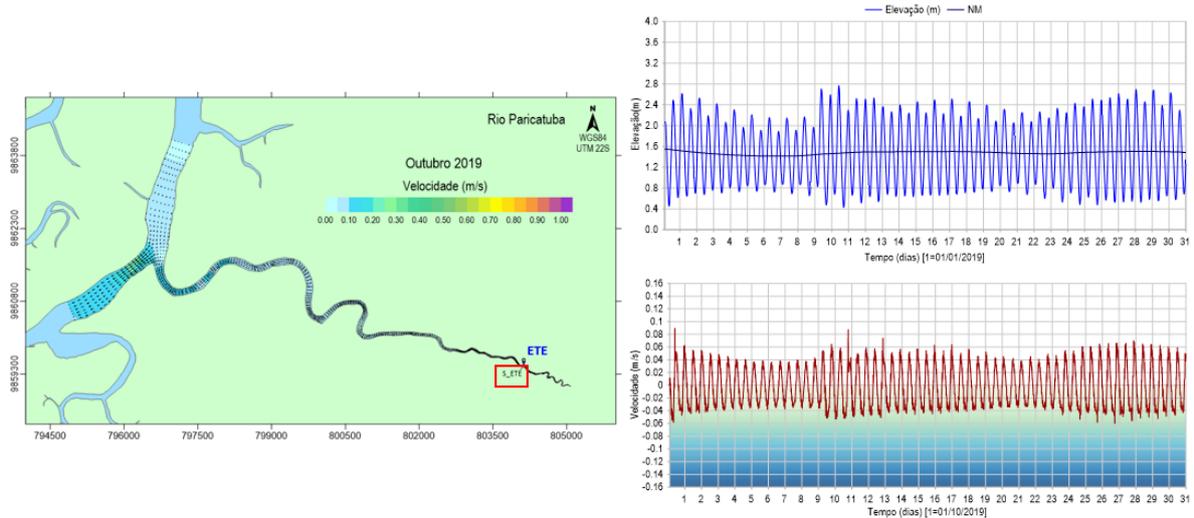
Por sua vez, a Figura 12 ilustra o campo de correntes na baía de Guajará durante no mês de março de 2020, retratando um momento de maré vazante na estação Furo Marinhas N, com correntes para noroeste nas fronteiras abertas da baía, e para sudoeste no Furo das Marinhas. O instante retratado corresponde ao tempo 10/03/2020 3:00. O mapa da Figura 14 ilustra o campo de correntes no modelo de detalhe no rio Paricatuba no mesmo instante, e os gráficos da mostram a variação de nível de água e velocidades de correntes na seção de lançamento da ETE ao longo do mês de março de 2020.



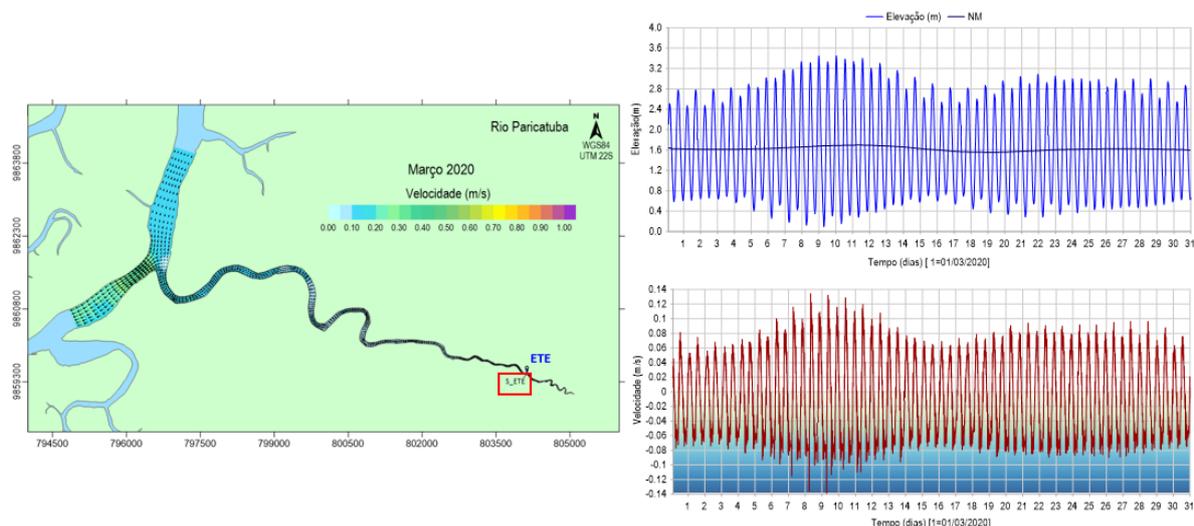
**Figura 11: Campo de correntes retratando momento de maré vazante na Estação Furo Marinhas N, em outubro 2019. Na direita vê-se um zoom na área de interesse de geração de condições de contorno para o modelo de detalhe do rio Paricatuba. A escala de cores representa intensidade de velocidades, e as setas o sentido das correntes.**



**Figura 12: Campo de correntes retratando momento de maré vazante na estação Furo Marinhas N, em março 2020. Na direita vê-se um zoom na área de interesse de geração de condições de contorno para o modelo de detalhe do rio Paricatuba. A escala de cores representa intensidade de velocidades, e as setas o sentido das correntes.**



**Figura 13:** Campo de correntes em um instante do mês de outubro de 2019 no rio Paricatuba, retratando momento de maré vazante na estação Furo Marinhas N. A escala de cores representa intensidade de velocidades e as setas o sentido das correntes. Acima gráfico de elevação na estação S\_ETE destacada. Abaixo, gráfico de velocidade na mesma estação, para o mês de outubro de 2019. Nota-se que a seção de lançamento da ETE ainda se encontra sob forte influência da maré, com inversões no sentido da corrente periódicas.

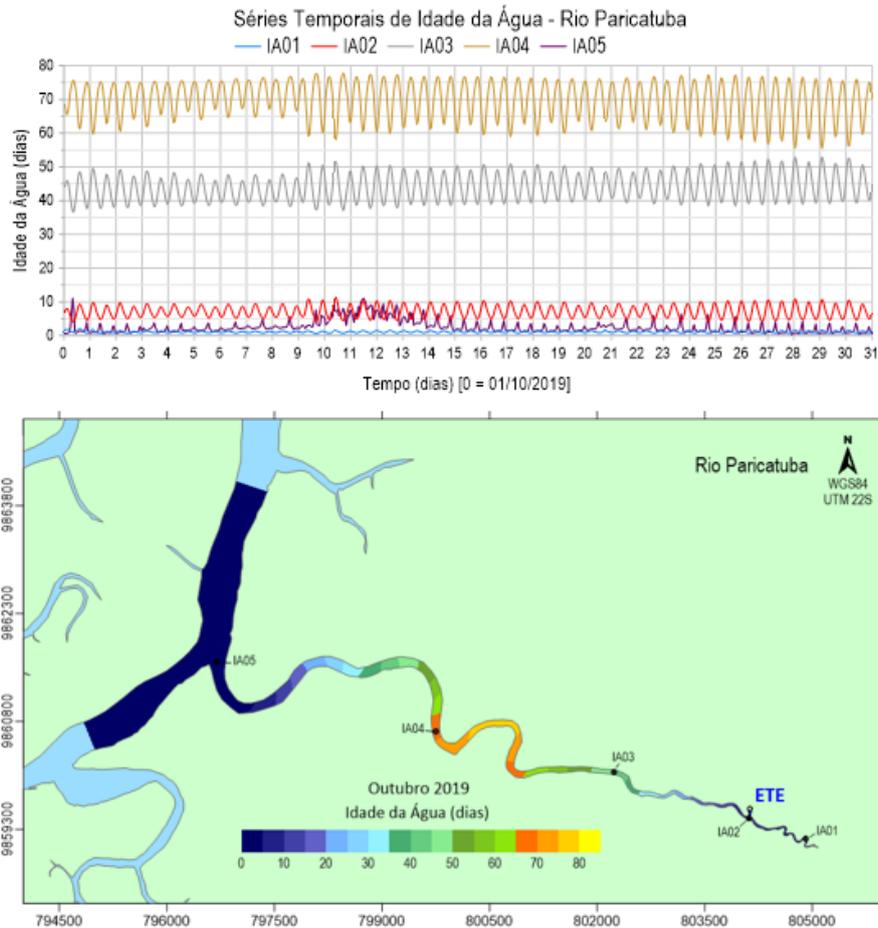


**Figura 14:** Campo de correntes em um instante do mês de março de 2020 no Rio Paricatuba, retratando momento de maré vazante na estação Furo Marinhas N. A escala de cores representa intensidade de velocidades, e as setas o sentido das correntes. Acima gráfico de elevação na estação S\_ETE destacada no mapa. Abaixo, gráfico de velocidade na mesma estação, para o mês de março de 2020. Nota-se que a seção de lançamento da ETE ainda se encontra sob forte influência da maré, com inversões no sentido da corrente periódicas.

Os resultados de Idade da Água incluem mapas de isolinhas e séries temporais de idade da água, dada em dias.

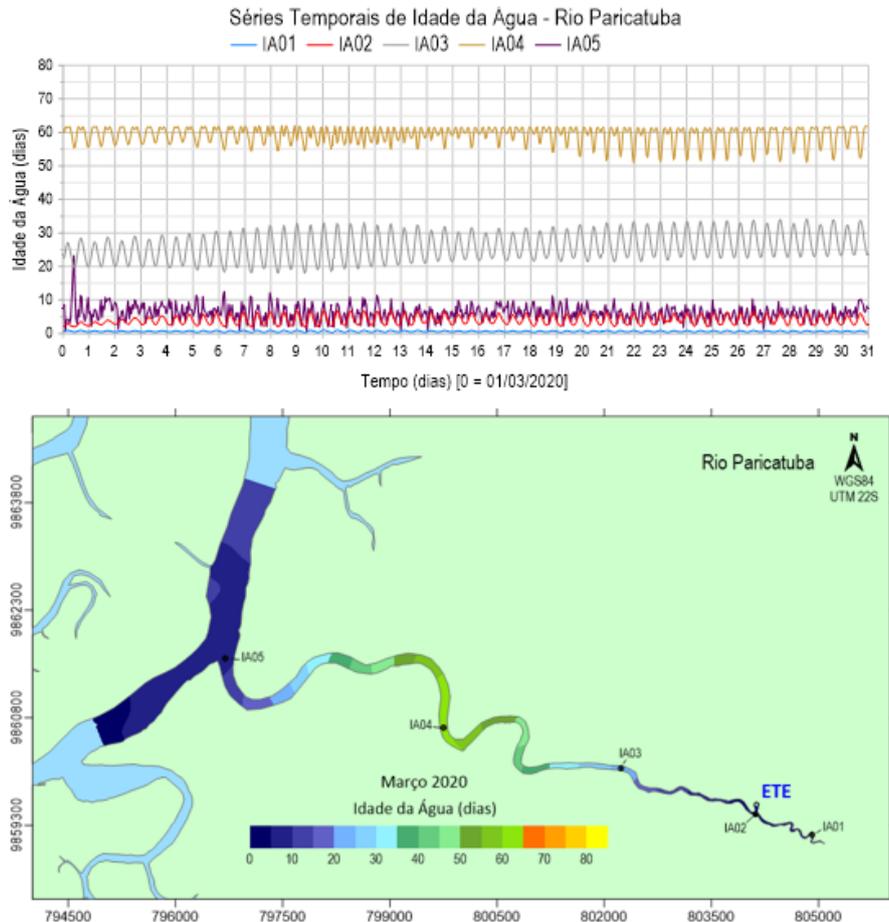
Na Figura 15 tem-se séries temporais de Idade da Água em diferentes pontos do Rio Paricatuba e o mapa de isolinhas de Idade da Água no mês de outubro de 2019. A Idade da Água permaneceu em torno de 1 dia no Furo das Marinhas, enquanto na região mais a montante do Rio Paricatuba, a Idade da Água ficou entre 1 e 2 dias. Os maiores valores de Idade da Água foram observados na região que dista aproximadamente 4 km para

jusante do ponto de lançamento, com Idade da Água em torno de 76 dias, como mostra o gráfico da Figura 15. Na seção de lançamento a Idade da Água média para o mês de março foi em torno de 6,5 dias.



**Figura 15: Acima gráfico de séries temporais de Idade da Água Outubro de 2019 e, abaixo, mapa de isolinhas de Idade da Água no mesmo mês. O gráfico evidencia o a variação da idade das águas devido ao ciclo de maré. Destaca-se a rápida renovação das águas nas afluências fluviais na região mais a montante do Rio Paricatuba e próximo da foz devido à grande circulação no Furo das Marinhas.**

Na Figura 16 tem-se séries temporais de Idade da Água em diferentes pontos do Rio Paricatuba e o mapa de isolinhas de Idade da Água média no mês de março de 2020. A Idade da Água variou entre de 2 a 10 dias no Furo das Marinhas. Na região mais a montante do rio Paricatuba no domínio de modelagem, a Idade da Água é inferior a 1 dia nesse mesmo período. Os maiores valores de Idade da Água foram observados na região que dista aproximadamente 6 km para jusante do ponto de lançamento, com Idade da Água em torno de 60 dias, vide gráfico da Figura 16. Na seção de lançamento a Idade da Água média para o mês de março foi em torno de 2,5 dias.



**Figura 16:** Acima gráficos de séries temporais de Idade da Água de março de 2020 e, abaixo, mapa de isolinhas de Idade da Água no mesmo mês. O gráfico evidencia o a variação da idade das águas devido ao ciclo de maré. Destaca-se a rápida renovação das águas nas aflúncias fluviais na região mais a montante do rio Paricatuba e próximo da foz devido à grande circulação no Furo das Marinhas.

## ANÁLISES E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Na Figura 10. As pequenas oscilações com períodos de aproximadamente 12 horas são efeitos de marés astronômicas, que dominam o escoamento na região.

A circulação das águas do rio Paricatuba é afetada principalmente pela influência da maré e pelas vazões fluviais a montante. Como pode-se ver o local onde se deseja realizar o lançamento da ETE encontra-se sob forte influência da maré. As variações de nível no ponto analisado é de até 3,2m no período chuvoso (março) e 2,4m no período de estiagem (outubro).

Nos gráficos de correntes é nítida a inversão de correntes, que tem seu sentido invertido periodicamente por influência da maré. Nos gráficos, valores acima de zero indicam sentido de corrente para dentro do rio, ou seja, de jusante para montante, que ocorre durante a maré enchente. Valores abaixo de zero indicam sentido de correntes de montante para jusante, ou seja, são velocidades durante a vazante da maré.

Essa maior variação de níveis e velocidades observada durante o período chuvoso é explicada pela maior vazão fluvial no Rio Paricatuba, que foi considerada 25m<sup>3</sup>/s nas simulações. No período de estiagem a vazão considerada foi de 13m<sup>3</sup>/s, com menor vazão o nível na seção analisada é menor e as velocidades máximas também são menores.

Através das análises aqui apresentadas percebe-se que o modelo representou bem as características de circulação hidrodinâmica na baía de Guajará e no rio Paricatuba, mostrando os efeitos na maré no ponto de interesse para lançamento dos efluentes da ETE. Uma boa representação da hidrodinâmica local é fundamental para caracterização de qualidade da água posterior, uma vez que zonas estuarinas são sensíveis ao lançamento de efluentes por sua complexa hidrodinâmica e maior tempo que as águas permanecem circulando dentro do domínio do rio.

As fontes de renovação das águas do rio Paricatuba são a vazão fluvial a montante e a influência da maré que leva águas do Furo das Marinhas para dentro do rio. Analisando os mapas da Figura 15 e da Figura 16 verifica-se que a maior renovação das águas na extremidade mais a montante do rio Paricatuba e próximo a sua foz, o que condiz com o esperado dada as fontes de águas novas mencionadas.

As diferenças observadas nos valores de Idade da Água, entre os dois períodos modelados, devem-se, principalmente, a variação sazonal do aporte fluvial do Rio Paricatuba, que é significativamente maior no período chuvoso. Por consequência da maior vazão, no mês de março observa-se maior renovação das águas do Rio Paricatuba.

Destaca-se que zonas com maior Idade de Água são mais sensíveis a efeitos de poluição acumulada, pois tem menos renovação de água. Por seu lado, zonas com menor Idade de Água, embora tenham renovação de água mais rápida, indicam que a qualidade da água em tais locais estará fortemente ligada à qualidade das águas novas afluentes.

## **CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

Através de análises abrangentes de hidrodinâmica ambiental, cobrindo os cenários representativos de período de estiagem (outubro 2019) e período chuvoso (março de 2020), pode-se concluir com as análises que a seção onde se localiza o ponto de lançamento da ETE proposto está sob influência da maré. Nessa seção do rio existe variação de nível d'água da ordem de até cerca de 2,4m, no período de estiagem, e até 3,2m no período chuvoso. E ocorre inversão do sentido da corrente periodicamente.

Como mostrado nos resultados, as principais fontes de águas novas responsáveis pela renovação das águas no Rio Paricatuba são sua vazão fluvial e por águas advindas do Furo das Marinhas devido a maré. A Idade da Água pode chegar em média de 60 a 76 dias em alguns trechos, os quais requerem maior atenção em análises de qualidade da água.

É importante ressaltar o uso de estudos de modelagem computacional como ferramenta de reanálise dos dados de monitoramento. A reanálise dos dados obtidos nas estações de monitoramento, através de modelagem computacional, permite extrapolar os resultados para todo o domínio de modelagem e áreas de interesse. Desta forma, a partir de pontos de medição, pode-se avaliar as condições ambientais e de qualidade da água em toda extensão do rio.

## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (2020/08666-1).

"As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do(s) autor(es) e não necessariamente refletem a visão da FAPESP".

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. ANA. Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos (SNIRH), 2017. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/>
2. AGUILERA, L; SANTOS, A.L.F e ROSMAN, P.C.C. *On characteristic hydraulic times through hydrodynamic modelling: discussion and application in Patos Lagoon (RS). Ambiente e Água*, Feb. 2020.
3. DYER, K. R. *Estuaries: A Physical Introduction*. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltda. 1977.
4. MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. 411 p., Edusp, 2002.



5. ROSMAN, P. C. C. Referência Técnica do SisBaHiA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. Rio de Janeiro, RJ: Coppe/UFRJ, 2022. ([http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA\\_RefTec\\_V10c.pdf](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V10c.pdf))
6. ROVERSI, F., ROSMAN, P. C. C., & HARARI, J. *Análise da renovação das águas do Sistema Estuarino de Santos usando modelagem computacional*. Revista Ambiente & Água, 11(Rev. Ambiente e Água, 2016. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1770>