



Relatório Técnico

Modelagens Hidrodinâmica e
Morfodinâmica do Porto Guará,
Baía de Paranaguá, PR

Cliente: **TPN-USP**

RT OD 2020-183 | Dez 2020

OceanoDigital 



PORTOGUARA



**Tanque de
Provas Numérico**
Numerical Offshore Tank
TPN-USP



RELATÓRIO TÉCNICO:

Modelagens Hidrodinâmica e Morfodinâmica do Porto Guará,
Baía de Paranaguá, PR

CLIENTE:

TPN-USP

RESPONSÁVEIS TÉCNICOS MODELAGEM NUMÉRICA

Alexandre Braga Coli
[Oceanógrafo, PhD em Engenharia Costeira]

Sandra Fachin
[Oceanógrafa, MSc em Geologia Marinha]

OceanoDigital

INDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Objetivos e Escopo | 1 |
| 1.2 Porto Guará | 2 |
| 1.3 Área de Estudo | 4 |
| 2. ESTRATÉGIA DA MODELAGEM | 8 |
| 2.1 Modelo Hidrodinâmico | 8 |
| 2.2 Modelo Morfodinâmico | 9 |
| 2.3 Estratégia Hidrodinâmica | 9 |
| 2.4 Estratégia Morfodinâmica | 11 |
| 3. MODELAGEM HIDRODINÂMICA | 13 |
| 3.1 Padrão de Correntes no Porto Guará | 13 |
| 3.2 Alterações na Circulação Estuarina | 22 |
| 3.3 Dispersão das Correntes no Porto Guará | 28 |
| 4. MODELAGEM MORFODINÂMICA | 31 |
| 4.1 Sedimentação Histórica | 31 |
| 4.2 Calibração do Modelo Morfodinâmico | 35 |
| 4.3 Transporte de Sedimentos no Porto Guará | 35 |
| 4.4 Evolução Morfodinâmica e Sedimentação Portuária | 42 |
| 5. CONCLUSÕES | 48 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 50 |
| ANEXO A. DADOS E DOMÍNIO COMPUTACIONAL | 53 |
| ANEXO B. CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO | 72 |

1 INTRODUÇÃO

O presente relatório técnico apresenta os estudos de modelagem numérica executadas pela Oceano Digital, para avaliar o comportamento hidrodinâmico e estimar as taxas de sedimentação após a implantação do Terminal de Uso Privativo (TUP) do Porto Guará, no Complexo Estuarino de Paranaguá, município de Paranaguá, Paraná.

Este relatório faz parte dos estudos conduzidos pelo Tanque de Provas Numérico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (TPN-USP) para o Porto Guará.

As simulações hidrodinâmicas e morfodinâmicas foram realizadas englobando todo o Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) e sua região marinha adjacente e consideraram o projeto da configuração portuária da Fase 3 de implementação do Porto Guará (Figura 1-1.).



Figura 1-1. Projeto do Porto Guará no interior do Complexo Estuarino de Paranaguá.

Os resultados deste estudo incluem os padrões de circulação e transporte de sedimentos e a quantificação da variação das correntes e depósitos sedimentares na região de entorno do terminal portuário. A simulação da evolução morfodinâmica em 5 anos, após a implantação do Porto Guará, indica as zonas de sedimentação preferencial na bacia portuária e possibilita o cálculo da taxa de sedimentação anual esperada.

1.1 Objetivos e Escopo

O objetivo deste estudo é avaliar o impacto previsto no padrão da circulação estuarina local após a implantação do TUP Porto Guará e estimar as taxas de sedimentação anual da sua bacia portuária, a partir da evolução morfológica de fundo considerando um período de 5 anos.

Para alcançar este objetivo a modelagem numérica foi realizada a partir da caracterização do meio físico do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) para a determinação dos padrões de circulação e transporte de sedimentos na área de interesse.

Os dados utilizados envolveram a definição da morfologia de fundo (batimetria), linha de costa, caracterização dos sedimentos que compõem o fundo das baías e dos sedimentos em suspensão, ventos, marés, vazão e descarga sólida dos principais rios afluentes ao CEP.

As simulações morfodinâmicas envolveram a circulação hidrodinâmica devido à ação das marés, ventos e vazões de rios tributários do Complexo Estuarino de Paranaguá, o transporte de sedimentos tanto em suspensão, como carga de fundo e a evolução morfológica (fundo móvel) decorrente resultante dos padrões de erosão e sedimentação na bacia portuária do Porto Guará.

As ondas não foram consideradas nos cenários simulados pelo fato do Porto Guará estar localizado numa área bem abrigada no interior da Baía de Paranaguá.

Atividades que fizeram parte do escopo deste estudo:

1. **Análise das informações e processamento dos dados** disponíveis de batimetria, correntes, maré, vazão fluvial, ventos e sedimentos presentes na área de estudo para a definição do domínio do modelo e dos cenários a serem simulados.
2. **Definição dos cenários hidrodinâmicos representativos**, considerando ventos, marés, vazões dos rios e sedimentos de fundo e em suspensão.
3. **Implementação dos modelos numéricos hidrodinâmico e morfodinâmico** com a criação dos domínios computacionais para as configurações sem e com a presença do Porto Guará (Fase 3).
4. **Calibração do modelo hidrodinâmico** de acordo com as medições obtidas *in situ* disponibilizadas pelo cliente.
5. **Simulação da circulação hidrodinâmica** devido à ação das marés, ventos e vazões de rios para as configurações com e sem a presença do Porto Guará.
6. **Simulação do transporte de sedimentos** devido à ação das marés, ventos e vazões de rios para as configurações com e sem a presença do Porto Guará.
7. **Calibração do modelo morfodinâmico** de acordo com as taxas de sedimentação históricas.
8. **Simulação de evolução morfodinâmica do fundo ao longo de 5 anos** após a implantação do Porto Guará para a obtenção da taxa de sedimentação anual e áreas deposicionais preferenciais.

1.2 Porto Guará

O Porto Guará será um Terminal de Uso Privativo (TUP), composto por uma estrutura em píer e cais acostáveis interligados, cujo acesso será realizado por meio de uma ponte ligada ao continente (Figura 1.2-1). O projeto prevê terminais de **Granel Sólido**, **Granel Líquido** e **Contêineres**, num total de sete berços:

- **Terminal de Granel Sólido** - píer externo Leste com 2 berços e píer interno Leste com 1 berço.
- **Terminal de Granel Líquido** - píer externo Leste com 2 berços
- **Terminal de Contêiner** - píer externo Oeste com 2 berços.

O projeto do Porto Guará prevê sua construção em três fases distintas. Nas Fases 1 e 2, serão implantados os cais de granéis sólidos e granéis líquidos, que ficam do lado leste do píer de

acesso (Figura 1.2-1). Na Fase 3, será construído o terminal de contêineres, que está situado do lado oeste do píer de acesso. Ambas as fases são acompanhadas de obras de dragagem para definir a morfologia de fundo para o canal de acesso, bacias de manobra e berços de acostagem (Figura 1.2-1).

Os estudos de modelagem contemplam a configuração de fundo após a implementação de todas as 3 fases de dragagem, aqui denominada configuração COM PORTO, com as profundidades previstas para os berços, bacia de evolução e canal de acesso de 16 m ZH-DHN.

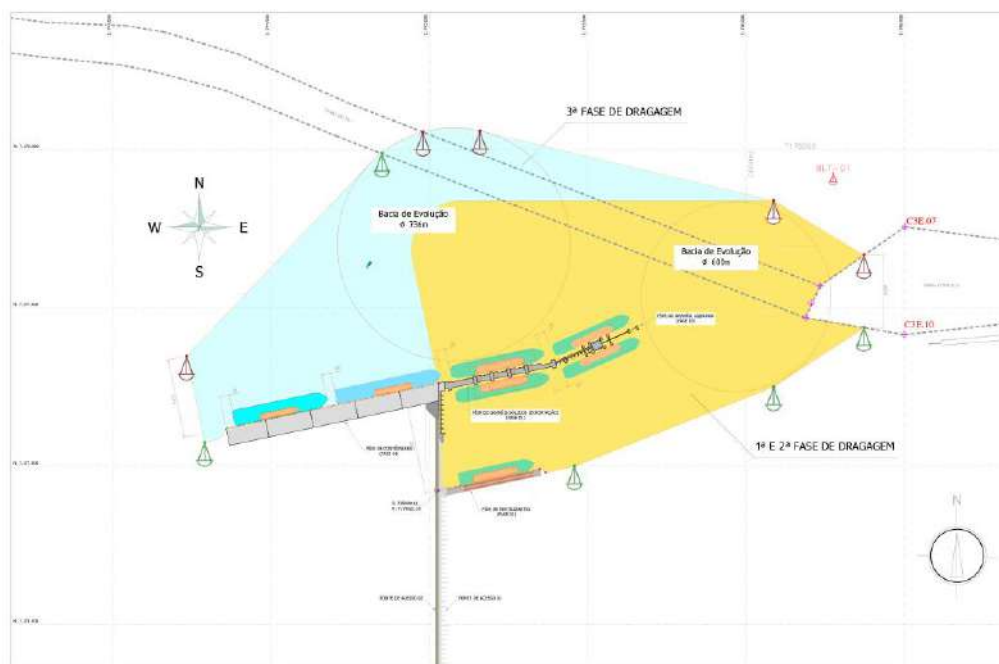


Figura 1.2-1. Configuração do projeto do Porto Guará de acordo com as Fases 1 e 2 (a leste) e Fase 3 (a oeste) de dragagem de aprofundamento (16m ZH-DHN). Fonte: Porto Guará (Belov Engenharia).

O acesso ao TUP Porto Guará será realizado pelos canais de navegação e áreas de manobras dos Portos de Antonina e Paranaguá, que são divididos em 3 grandes trechos: Alfa, Bravo, Charlie (Figura 1.2-2). O TUP do Porto Guará se localiza na posição final do canal Charlie Três e no início do canal Delta Uno, cerca de 26 km à montante da barra, cujo canais de acesso e navegação serão compartilhados (Figura 1.2-2 e 1.2-3

O canal **Alfa** é área mais externa (marinha) do canal de acesso, com uma extensão total de 8,63 km. O canal **Bravo** (Uno e Dois) está na área interna do canal de acesso, no interior da baía de Paranaguá e tem uma extensão de 20,5 km.

O canal **Charlie** atual tem uma extensão total de 5,3 km, em que o trecho Uno consiste na bacia de evolução do Porto de Paranaguá e o trecho Três é a bacia de evolução dos píeres.

À oeste do projeto do TUP Guará, o canal **Delta** dá acesso aos terminais portuários localizados no Porto Organizado de Antonina (13,7 km de extensão) e o canal **Echo** aos terminais portuários Barão de Teffé e Matarazzo.

Conforme solicitado pelo Porto Guará, neste estudo foi considerada a configuração do canal Charlie 1, 2 e 3 com as alterações de projeto previstas pelo Porto de Paranaguá para essas áreas. O projeto contempla um alargamento dos canais e aprofundamento uniforme para 16 m (ZH-DHN) conforme a planta D-015.6293-201-05-005-R01-B.dwg, fornecida pelo Porto Guará (Figura 1.2-3).

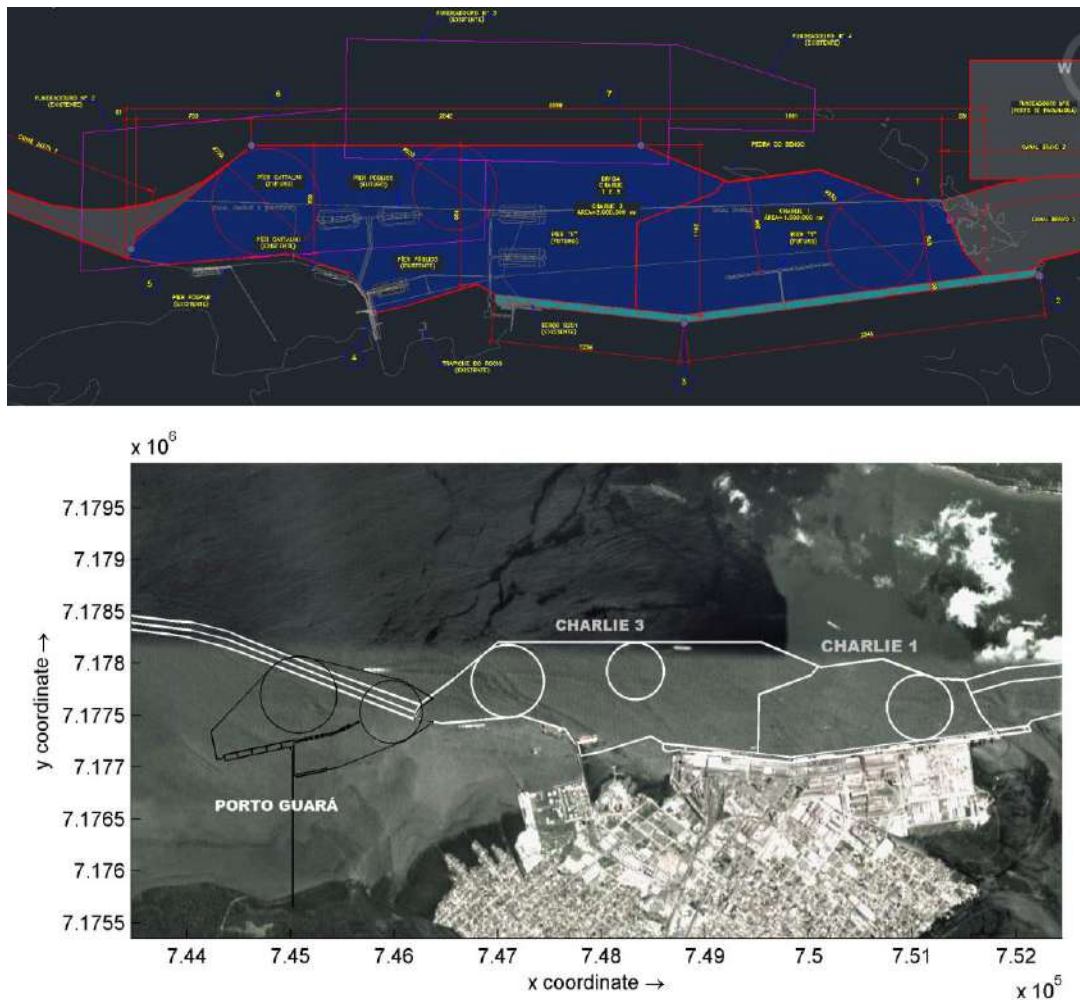


Figura 1.2-3. Projeto do canal Charlie previsto pelo Porto de Paranaguá e a configuração do Porto Guará inserida no canal de acesso, indicando os canais Charlie 1 e 3 e Delta.

1.3 rea de Estudo

O TUP do Porto Guará está projetado para ser implantado na margem sul da Baía de Paranaguá (Figura 1.3-1) que tem o seu eixo principal na direção E-W. O conjunto das baías de Paranaguá, Antonina, Laranjeiras, Guaraqueçaba e Pinheiros formam o Complexo Estuarino de Paranaguá.

O Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) está localizado na região da planície costeira do Paraná, entre a Serra do Mar e o Oceano Atlântico (Figuras 1.2-1 e 1.3-1). A configuração do CEP é bastante complexa, apresentando uma linha de margem recortada por vários rios, ribeirões e cursos de vazantes de maré, além de conter costões rochosos, ilhas, estruturas portuárias e

possuir uma grande diversidade de ambientes estuarinos, como canais, baixios, planícies de maré e áreas inundáveis de mangue.



Figura 1.2-1. Complexo Estuarino de Paranaguá com as baías de Paranaguá, Antonina, Laranjeiras, Guaraqueçaba e Pinheiros.

O CEP é composto por dois corpos de água principais, um no sentido Norte-Sul, que engloba as baías de Laranjeiras, Guaraqueçaba e Pinheiros, com 200 km², aproximadamente, e outro corpo de água no sentido Leste-Oeste que contém as baías de Paranaguá e Antonina, com 260 km², aproximadamente (Lopes, 2010, Figura 1.3-1).



Figura 1.3-1. Complexo Estuarino de Paranaguá e destaque para os dois grandes eixos estuarinos Leste-Oeste e Norte-Sul.

O CEP é caracterizado geomorfologicamente como um estuário de planície costeira, com presença de deltas de maré em sua desembocadura (Angulo, 1992). Ao estudarem as propriedades físico-químicas das massas de água do CEP, Marone *et al.* (1997, in Mantovanelli, 1999) classificaram-no como estuário parcialmente misturado tipo 2 com heterogeneidades laterais. Nesse tipo de estuário, a salinidade geralmente aumenta de montante para jusante e o transporte de sal é totalmente dependente das intensidades das correntes. O tempo de renovação da água doce para a baía de Paranaguá, que equivale ao tempo de fluxo ou descarga, esteve entre 3 e 10 dias, dependendo da situação de maré de sizígia ou quadratura (Mantovanelli, 1999).

A dominância das marés na circulação estuarina é notória no CEP, sendo uma conclusão presente em diversos estudos na região (Knoppers *et al.*, 1987, Mantovanelli, 1999, Souza, 2015; Miranda, 2016, CBI, 2015; INPH, 2014).

No interior do CEP, as velocidades das correntes de enchente são menores que a de vazante, existe uma assimetria da maré, i.e., o período de maré de enchente é maior do que o período de vazante e são comuns as duplicações de preamar e baixamar diárias, resultantes da interação das ondas de maré, principalmente na maré de quadratura. Além disso, o corpo de água das baías de Paranaguá e Antonina se comporta como um estuário hipersíncrono, no qual há uma amplificação das alturas de maré na porção interior do estuário em relação à sua desembocadura. Marone e Jamyianaa (1997) quantificaram este efeito encontrando variações de nível de água (altura da maré) de 1.7 m na Ponta da Galheta e valores alcançando 2.7 m no Porto de Antonina.

As velocidades das correntes de maré no interior do estuário podem variar de 1.2 m/s na Ilha do Mel e 0.6 m/s no interior até o Porto de Paranaguá (INPH, 2015). Mantovanelli (1999) mediu perfis de velocidade na região próxima ao Porto de Paranaguá e registrou velocidades máximas de vazante entre 0,9 e 1,3 m/s (marés de sizígia) e entre 0,5 e 0,9 m/s (marés de quadratura). Estas velocidades foram geralmente superiores às máximas de enchente, que variaram entre 0,7 a 1,1 m/s (marés de sizígia) e entre 0,3 e 0,6 m/s (marés de quadratura).

A hidrodinâmica do complexo estuarino e as diferenças geomorfológicas fazem com que a distribuição de sedimentos de fundo ao longo da baía seja heterogênea, com sedimentos variando desde silte fino, associado às margens da baía de Antonina, até areia grossa e muito grossa nas desembocaduras sul e norte, respectivamente (Lamour *et al.*, 2004). A sedimentação na Baía de Paranaguá depende diretamente da disponibilidade de sedimentos da bacia hidrográfica dos rios que deságuam no estuário, assim como dos processos de erosão e sedimentação que distribuem estes sedimentos no estuário.

O conjunto das baías de Paranaguá e Antonina foi dividido em 3 setores principais segundo Noernberg *et al.* (2006): Antonina, Zona de Máxima Turbidez (ZMT) e Zona de Mistura, como mostra a Figura 1.3-2. A ZMT ocorre numa faixa dinâmica, e está diretamente relacionada a geometria do corpo do estuário, intensidade das correntes de maré e a estratificação da coluna d'água. A Zona de Máxima Turbidez é definida por apresentar intensa floculação de sedimentos finos e e alta concentração de sedimentos em suspensão que, em longo prazo, causam uma maior sedimentação nesta região do estuário.

O Porto Guará está projetado para ser implantado, a oeste do Porto de Paranaguá, na região da ZMT.

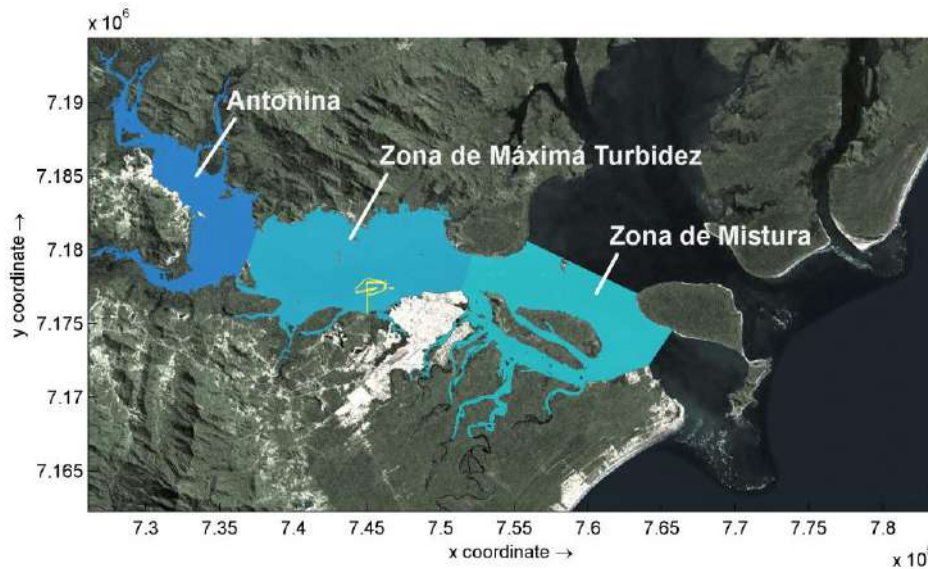


Figura 1.3-2. Setores do Complexo Estuarino de Paranaguá. Modificado de Noernberg *et al.* (2006).

As fácies sedimentares das Baías de Antonina e Paranaguá, segundo Soares *et al.* (1997), podem ser divididas em três setores: (1) um setor a montante do estuário (Baía de Antonina), composto pela mistura de sedimentos grosseiros e finos, muito mal selecionados, com porcentagem de finos (silte e argila) maior que nas outras regiões, influenciado principalmente pela descarga dos rios; (2) um setor intermediário, a oeste do Porto de Paranaguá até início da Baía de Antonina, também formado por sedimentos mistos, mas com relativamente menor percentual de finos, com influência da ação fluvial e das correntes de maré e; (3) uma porção inferior, próxima a desembocadura do estuário, a jusante da Ilha da Cotonga, constituída principalmente por areia fina a muito fina, moderadamente a bem selecionadas, onde predomina a ação marinha.

2 ESTRATÉGIA DA MODELAGEM

Neste capítulo, são apresentadas as características gerais dos modelos numéricos e a estratégia empregada nas simulações da hidrodinâmica e de evolução morfodinâmica, acompanhada de uma síntese dos dados disponíveis para a região de estudo e utilizados na elaboração dos cenários de modelagem.

Em estudos de evolução morfodinâmica, a modelagem numérica tem que ser abrangente, considerando os principais fenômenos meteoceanográficos em escalas compatíveis com os objetivos definidos e deve ser capaz de incluir tanto efeitos hidrodinâmicos como o transporte de sedimentos e alterações morfológicas na sua formulação numérica. Além disto, uma boa calibração dos coeficientes dos modelos numéricos garante a qualidade dos resultados.

2.1 Modelo Hidrodinâmico

A simulação do campo de correntes no Complexo Estuarino de Paranaguá e região costeira adjacente foi realizada utilizando-se o pacote de modelos numéricos Delft3D, desenvolvido pela Deltares (Deltares, 2014). O Delft3D é um modelo capaz de modelar diversos processos ambientais em corpos d'água costeiros, estuarinos e fluviais, que contém vários modelos numéricos integrados e interativos entre si, com ampla aplicação no campo de dinâmica costeira e aceitação pela comunidade científica nacional e internacional.

Para gerar a base das simulações numéricas, foi utilizado o módulo hidrodinâmico FLOW, que é um modelo baseado em processos e resolve as equações de Navier-Stokes e Reynolds para um fluido incompressível em duas (2DH) ou três dimensões (3D).

O sistema de equações consiste na equação do momento horizontal, equação da continuidade, equação do transporte e modelo de turbulência fechado. A equação do momento vertical é reduzida à relação da pressão hidrostática, ou seja, assume-se que as acelerações verticais são pequenas comparadas à aceleração gravitacional e são desconsideradas. Essas equações são aplicáveis a águas rasas onde as escalas de comprimento são muito maiores que as escalas de profundidades.

Baseado num esquema de diferenças finitas, esse modelo numérico simula escoamentos de superfície livre em condições não estacionárias e fenômenos de transporte resultante da maré e forçantes meteorológicas em grades curvilíneas ajustadas às fronteiras.

O Delft3D pode incorporar os efeitos da maré astronômica e meteorológica, influência de ondas, ventos e pressão atmosférica, variações de densidade (obtida a partir dos campos de temperatura e salinidade), turbulência (constante ou variável) e o aparecimento de terraços de maré (partes secas e úmidas do domínio computacional).

Uma descrição mais detalhada de todos os modelos que compõem o pacote Delft3D e das formulações utilizadas pode ser encontrada em Boogaard et al. (1993) e nos manuais do Delft3D (Deltares, 2014).

2.2 Modelo Morfodinâmico

As simulações do transporte de sedimentos, os efeitos de erosão e deposição e a evolução morfológica do fundo do Complexo Estuarino de Paranaguá foram realizadas utilizando-se o modelo numérico Delft3D-MOR.

O modelo morfodinâmico DELFT3D-MOR calcula os gradientes de transporte de sedimentos e, em conjunto com as condições de fronteira impostas, efetua modificações na morfologia de fundo (batimetria). Este modelo possui várias fórmulas de transporte de sedimento que consideram a ação de ondas e dos fluxos resultantes do módulo hidrodinâmico. A característica essencial deste módulo é a realimentação (online feedback) do modelo hidrodinâmico, o que permite que os cálculos de fluxo sejam sempre efetuados sobre a batimetria atualizada a cada passo de tempo. Essa propriedade de transferência de resultados entre os modelos permite a reconstituição de situações pretéritas ou a previsão da evolução morfodinâmica de uma área definida em qualquer escala de tempo. As fórmulas de transporte de sedimentos consideram sedimentos coesivos e não coesivos em diferentes frações ou combinações, calculam o transporte em suspensão e de carga de fundo e incluem a ressuspensão por influência das ondas.

Uma descrição mais detalhada de todos os modelos que compõem o pacote Delft3D e das formulações utilizadas pode ser encontrada em Boogaard et al. (1993), Lesser et al. (2000), Lesser et al. (2004), Roelvink and Walstra, (2004), Ruessink and Roelvink, (2000) e no manual do Delft3D (Deltares, 2014).

2.3 Estratégia Hidrodinâmica

As simulações tiveram como foco principal a região de entorno do Porto Guará, no entanto, a grade numérica abrange todo o Complexo Estuarino de Paranaguá, incluindo os seus rios afluentes e a região marinha próxima à sua foz.

A estratégia adotada na modelagem numérica envolveu a geração de cenários representativos considerando ventos, marés e vazão dos principais afluentes, além da batimetria de detalhe e a distribuição sedimentar em todo o Complexo Estuarino de Paranaguá. Estes cenários serviram como condições de entrada e de contorno dos modelos numéricos do campo de correntes (Delft3D-FLOW) e para as simulações do transporte de sedimentos e evolução do fundo (Delft3D-MOR).

A estratégia do estudo de modelagem numérica levou em consideração a necessidade de se ter elementos de grade com boa resolução na região do empreendimento e nos canais de navegação adjacentes, a disponibilidade de dados medidos em campo e o fato da modelagem morfodinâmica ser bastante exigente em termos de esforço computacional. Uma síntese das principais etapas deste estudo pode ser vista no fluxograma da Figura 2.3-1.



Figura 2.3-1 Etapas do estudo de modelagem numérica para avaliação do impacto nos processos costeiros.

Todos os dados e informações referentes à definição das grades numéricas, compilação dos dados de batimetria da região, a distribuição dos sedimentos de fundo, as condições de contorno aberto e os cenários meteoceanográficos utilizados nas simulações numéricas estão descritos em detalhe no ANEXO A.

Uma síntese desses dados utilizados nas simulações é apresentada a seguir para introduzir e compor a estratégia utilizada no estudo de modelagem.

Os dados batimétricos do Complexo Estuarino de Paranaguá e região marinha próxima foram obtidos a partir de cartas náuticas da DHN-Marinha do Brasil e de levantamentos batimétricos dos canais de navegação e bacias portuárias fornecidos pelo TPN-USP, além do banco de dados da Oceano Digital.

As condições de contorno aberto para a modelagem hidrodinâmica resultaram da definição das componentes de maré nas fronteiras das grades hidrodinâmica e morfodinâmica obtidas através dos estudos de maré da FEMAR para a região norte do Paraná e sul de São Paulo.

Os ventos utilizados na modelagem hidrodinâmica e na calibração foram obtidos a partir da velocidade e direção dos ventos estimadas pelo modelo IFS (Integrated Forecast System) do ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast), cujo local de extração dos dados corresponde a um ponto posicionado no porto de Paranaguá.

As vazões e descargas sólidas dos principais rios afluentes ao Complexo Estuarino de Paranaguá foram retiradas de relatórios da Agência Nacional de Águas (ANA) e da agência estadual Águas do Paraná e atualizados para inserir as medições mais recentes disponíveis.

Os dados de sedimentos utilizados para compor a granulometria e a distribuição sedimentar do fundo estuarino foram obtidos a partir de dados secundários de relatórios técnicos e da bibliografia científica para a região.

As condições de contorno utilizadas e a configuração dos modelos foram ajustadas na etapa da calibração hidrodinâmica do modelo e estão presentes no ANEXO B. Nesta etapa, a modelagem numérica dos processos oceanográficos considerados no estudo é comparada a dados medidos in situ no Porto Guará e às marés do Porto de Paranaguá e da Ponta da Galheta. Somente após atingir bons resultados, traduzidos por baixos valores dos erros relativos, o estudo de modelagem numérica foi executado.

Para a configuração do domínio morfológico, as simulações numéricas utilizaram três configurações de fundo distintas da baía de Paranaguá, para poder adequar as simulações às solicitações do Porto Guará:

- (1) A **configuração ATUAL** se refere à morfologia de fundo (batimetria) do CEP com os canais atuais de acesso aos Portos de Paranaguá e Antonina e batimetrias existentes. Essa configuração foi utilizada para a calibração do modelo.
- (2) A **configuração SEM PORTO** possui a batimetria atual do CEP com o canal Charlie alargado e modificado para a profundidade de 16 m (ZH). Essa configuração foi utilizada nas simulações hidrodinâmicas, de transporte de sedimentos e morfodinâmica.
- (3) A **configuração COM PORTO** é a configuração que contém o canal Charlie alargado e aprofundado e a morfologia de fundo da bacia portuária do Porto Guará, que também terá profundidade de 16 m (ZH). Essa configuração foi utilizada nas simulações hidrodinâmicas, de transporte de sedimentos e morfodinâmica.

2.4 Estratégia Morfodinâmica

A caracterização dos teores e da composição dos sedimentos de fundo e em suspensão da região é fundamental para uma correta simulação do transporte de sedimentos e das mudanças morfológicas que ocorrem no fundo do Complexo Estuarino de Paranaguá. A sedimentação em bacias portuárias ocorre principalmente devido à baixa dinâmica local que permite que as partículas finas (siltes e argilas) em suspensão se depositem.

O modelo Delft3D-MOR permite considerar mais de um tipo de fração granulométrica de sedimentos distribuído espacialmente dentro do domínio computacional. No entanto, quanto maior a quantidade de frações, maior o tempo computacional requerido para executar as simulações. Por causa disso, a distribuição espacial e as proporções nas camadas de fundo foram baseadas numa simplificação das classificações das amostras e nos percentuais de ocorrência de cada fração determinadas para a região que será modelada.

No modelo morfodinâmico, a taxa de aporte de sedimentos foi considerada nula na fronteira oceânica aberta e foi aplicado um atraso temporal (time lag) de Thatcher-Harleman de 2 horas, em acordo com Deltares (2014). Adicionalmente, foi aplicado um intervalo de execução prévia (spin-up) para que os sedimentos em suspensão entrassem em equilíbrio.

O modelo de transporte de sedimentos utilizado foi o TRANSPOR2004 (Van Rijn et al, 2004), que inclui o transporte de carga de fundo e em suspensão (e ressuspensão). O transporte de carga

em suspensão é calculado resolvendo a equação de advecção-difusão para sedimentos em suspensão. O transporte de carga de fundo se refere ao transporte que ocorre próximo ao fundo, sendo modelado através de termos de fonte e sumidouro abaixo da altura de referência de Van Rijn, que é baseada na rugosidade do fundo. O transporte de fundo responde às mudanças nas condições de fluxo de acordo com as formulações presentes em Lesser *et al.* (2004).

A erosão e a deposição de sedimentos coesivos estão contempladas no modelo a partir da utilização das formulações de PARTHENIADES-KRONE (Partheniades, 1965 in Deltares, 2014). Em cada passo de tempo (*time-step*), os termos de fonte e sumidouro do modelo consideram a quantidade de massa de sedimento entrando no escoamento devido à difusão e uma quantidade saindo do escoamento devido à deposição.

Essas alterações de massas sedimentares coesivas e não-coesivas são calculadas como modificações no fundo em cada passo de tempo, sendo cada fração do sedimento tratada separadamente. Desse modo, durante as simulações do transporte de sedimentos, a morfologia (que inclui a batimetria e a espessura da camada de sedimentos) é atualizada automaticamente a cada passo de tempo do modelo hidrodinâmico, num ciclo morfodinâmico em tempo real (*online updating*).

A diferença entre as escalas de tempo nas mudanças morfológicas e hidrodinâmicas requer uma estratégia de modelagem de modo a reduzir o longo tempo de simulação necessário para as mudanças morfodinâmicas. A execução de simulações de longo prazo tipo "força-bruta", isto é, utilizando o tempo real de alterações morfológicas, pode ser bastante demorada e inviabilizar um estudo devido ao prazo de resposta computacional. Para evitar isso, algumas técnicas de aceleração morfológica são empregadas para fornecer a capacidade de execução destas análises em um tempo computacionalmente menor. Esta metodologia para a modelagem morfodinâmica incluiu definição de um fator de aceleração morfológica (Latteux, 1995). Este fator é imposto durante a execução da modelagem morfodinâmica a cada passo de tempo utilizado.

Estas técnicas de utilização de um fator de aceleração morfológica (Morfac) são similares à técnica proposta por Latteux (1995) e implicam uma simulação numérica de um fenômeno de longo prazo utilizando apenas uma fração do tempo requerido para toda a simulação morfológica que ocorre no período considerado. Neste estudo, o Morfac aplicado foi relativo à execução da morfodinâmica em 6 meses, por causa dos ciclos de vazão fluvial de cheia e seca, de modo que cada conjunto de simulações morfodinâmicas sequenciais corresponderam a 1 ano de alterações morfológicas.

Todos os cenários das condições meteoceanográficas, morfológicas e sedimentológicas representativas anuais tiveram como objetivos a análise da hidrodinâmica e a estimativa da evolução morfodinâmica do fundo em médio prazo (5 anos) para a identificação do padrão de deposição na bacia portuária do Porto Guará, bem como as taxas anuais de sedimentação.

■ Convenções e Definições

O sistema de coordenadas utilizado nas simulações dos modelos numéricos é referido ao Datum WGS84 em projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 22 J. O posicionamento do eixo-x aponta a direção Leste (E) e o eixo-y aponta a direção Norte (N). Para a referência vertical, eixo-z, as profundidades estão em metros e se referem ao Nível Médio do Mar (NMM), que está a +0,98 m do ZH da DHN local.

3 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Esta etapa do estudo de modelagem teve por objetivo comparar os campos de correntes resultantes das simulações hidrodinâmicas para a configuração com e sem a presença do Porto Guará.

As simulações numéricas da hidrodinâmica foram realizadas considerando as configurações de fundo da Baía de Paranaguá na configuração (1) SEM PORTO, isto é, com a batimetria atual e o canal de navegação do Porto de Paranaguá alargado e aprofundado para 16 m (ZH) e para a configuração (2) COM PORTO, na qual a morfologia de fundo inclui a implantação do Porto Guará.

Uma vez que as correntes de maré são o principal fenômeno de controle dos processos de erosão e deposição na região interna da Baía de Paranaguá, as modificações verificadas no seu comportamento induzem alterações no transporte de sedimentos, que alteram o padrão e os locais preferências de sedimentação. Este capítulo está relacionado com o Capítulo 4, que trata dos padrões de transporte de sedimentos e apresenta a evolução morfológica de fundo na região de entorno do Porto Guará e Porto de Paranaguá.

As simulações hidrodinâmicas foram realizadas para um ciclo de marés de sizígia e quadratura, definido a partir da calibração (Anexo B), executado em regimes de cheia e seca dos rios afluentes. A Figura 3-1 apresenta a variação do nível de água neste ciclo de maré relativo ao período da modelagem hidrodinâmica, que foi de 12/5/2020 a 16/06/2020.



Figura 3-1. Variação do nível de água da modelagem morfodinâmica considerando as marés de sizígia e quadratura.

3.1 Padrão de Correntes no Porto Guará

Os resultados apresentados representam os campos de correntes em condições de maré de sizígia (6/6/2020) ou quadratura (31/5/2020), nos instantes de preamar, baixamar e meias marés de enchente e vazante. Nas Figuras 3.1-1 a 3.1-8, os vetores indicam a direção das correntes e as cores indicam a magnitude das velocidades em metros por segundo (m/s).

Os resultados da modelagem hidrodinâmica confirmam alguns padrões no campo de correntes existente na porção da Baía de Paranaguá onde será instalado o Porto Guará. Na configuração SEM PORTO, de modo geral, pode-se verificar uma região ao sul, próxima da margem, onde estão presentes correntes de baixa intensidade justamente por se tratar de baixios e terraços de maré e ocorrência de manguezal. Este padrão de correntes é mais evidente nas condições de meias marés (Figuras 3.1-1, 3.1-2, 3.1-5 e 3.1-6). Nestes locais, em qualquer situação de maré, as velocidades são baixas, com máximos entre 0.4 e 0.5 m/s e médias entre 0.15 e 0.20 m/s.

Numa faixa um pouco mais a norte dessa região de baixios, mas ainda relativamente próxima e paralela aos contornos dos terraços de maré, há um fluxo de água que apresenta as maiores velocidades dessa região da Baía de Paranaguá, cujas magnitudes atingem, na maré de sizígia, valores máximos de 1.6 m/s na maré de vazante e 1.2 m/s na maré de enchente. Este padrão de circulação forma uma faixa com fluxo na orientação leste-oeste mais evidente nas situações das meias-maré de sizígia (Figuras 3.1-1 e 3.1-2), embora também ocorra em quadratura (Figuras 3.1-5 e 3.1-6).

A implantação do Porto Guará na Baía de Paranaguá (configuração COM PORTO) causará uma diminuição das velocidades de corrente na região da sua bacia portuária, uma vez que haverá um aprofundamento do leito estuarino devido à dragagem para a formação das bacias de manobra e acostagem (Figuras 3.1-1, 3.1-2, 3.1-5 e 3.1-6). Na região da bacia portuária do Porto Guará, as estimativas apontam para uma redução média de 25% das velocidades.

Essa diminuição das correntes na região da bacia portuária do Porto Guará causa uma diminuição da competência do transporte de sedimentos, tanto em suspensão como carga de fundo, o que torna essa região da bacia portuária um local propenso à deposição dos sedimentos que, anteriormente, atravessavam esta área. Estes resultados com relação à sedimentação são apresentados e discutidos no Capítulo 4.

Por outro lado, essa alteração na morfologia também induz um aumento das correntes em pequenas áreas nos limites leste e oeste da área dragada, em resposta à mudança abrupta das profundidades. Este aumento é bastante restrito e localizado às partes mais rasas vizinhas à bacia portuária do Porto Guará e pode chegar a 20% de acréscimo da velocidade das correntes, em situação de vazante e 10% de acréscimo da velocidade, em situações de enchente, em comparação com os resultados da configuração SEM PORTO.

Este efeito desse aumento de velocidade é mais evidente na maré de enchente, na qual verifica-se um aumento das correntes nas bordas OESTE da bacia portuária, que está a favor da corrente, como pode ser visto nas Figuras 3.1-1 e 3.1-5. Na borda LESTE, este efeito é minimizado por causa da comunicação do Porto Guará com o canal do Porto de Paranaguá. No entanto, deve-se levar em consideração que a passagem dos canais de navegação de Antonina e do Porto Guará para o canal do Porto de Paranaguá (setor Charlie) possui um estreitamento, que acarreta um aumento na velocidade do fluxo de água neste local de entroncamento. Este comportamento das correntes devido ao estreitamento dos canais pode ser mais bem identificado nas Figuras 3.1-2 e 3.1-6, que correspondem aos períodos de vazante de maré.

Todos estes efeitos no padrão das correntes e da circulação na região de implantação do Porto Guará são consequência da alteração da morfologia do leito estuarino promovida pela delimitação e dragagem da bacia portuária do Porto Guará. A Seção 3.2, a seguir, apresenta a distribuição específica dessas diferenças para melhor visualização das alterações que deverão ocorrer na hidrodinâmica local.

- Maré de Sizígia: dia 06/06/2020

As Figuras 3.1-1 a 3.1-4 apresentam os campos de correntes médias em profundidade relativos aos instantes de maré enchente, vazante, preamar e baixa-mar do dia 06/06/2020, uma situação de maré de sizígia. Os campos de velocidade de correntes foram escolhidos para apresentar os períodos de velocidades médias de enchente e vazante e os instantes de velocidades mínimas de estofas de maré. Nas figuras estão presentes as configurações SEM PORTO e COM PORTO para comparação dos resultados.

SIZÍGIA - ENCHENTE

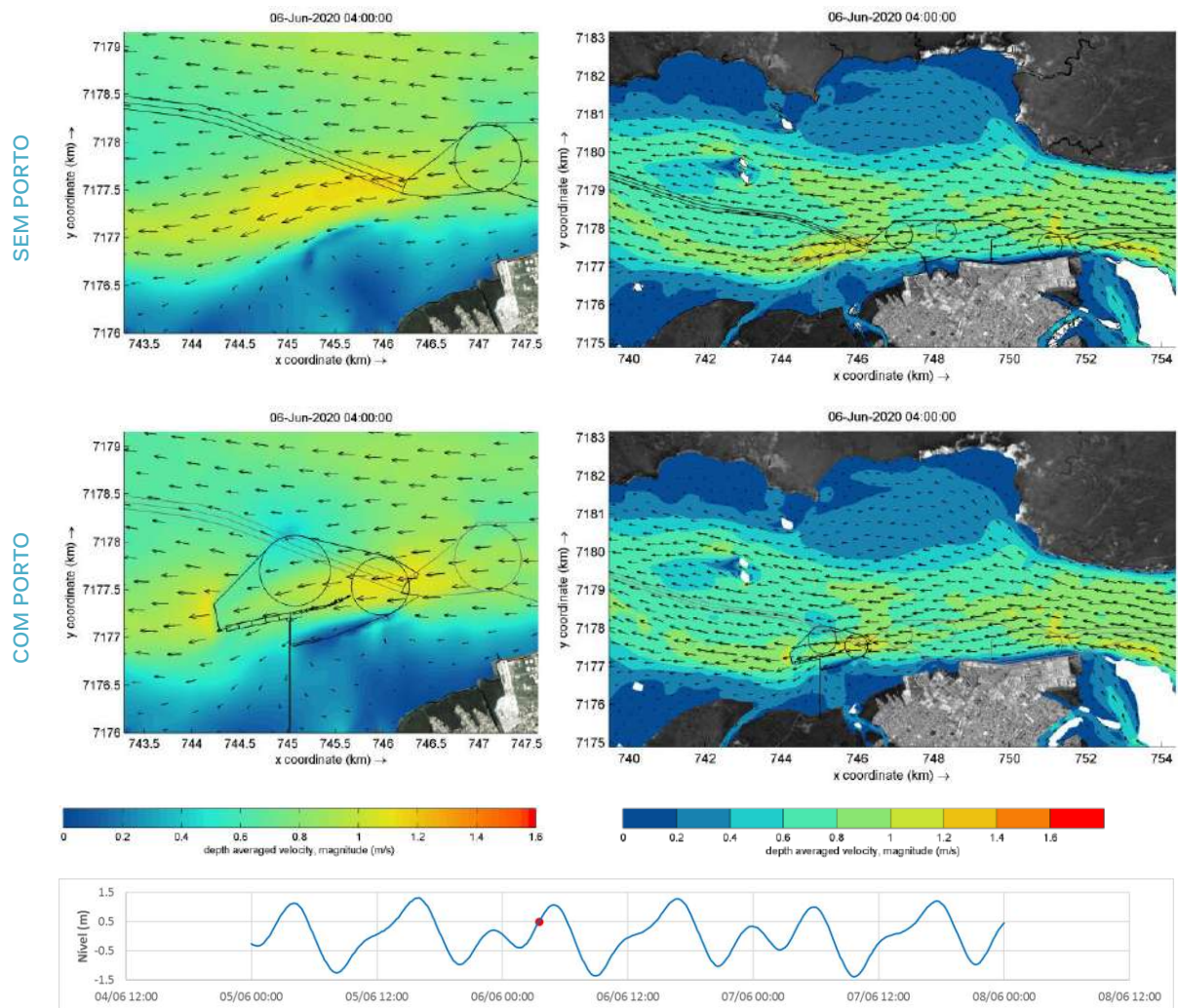


Figura 3.1-1. Campos de velocidades de corrente em situação de ENCHENTE de SIZÍGIA para as configurações COM e SEM PORTO GUARÁ. Os vetores representam a direção média e as cores a magnitude da velocidade (em m/s).

SIZÍGIA - VAZANTE

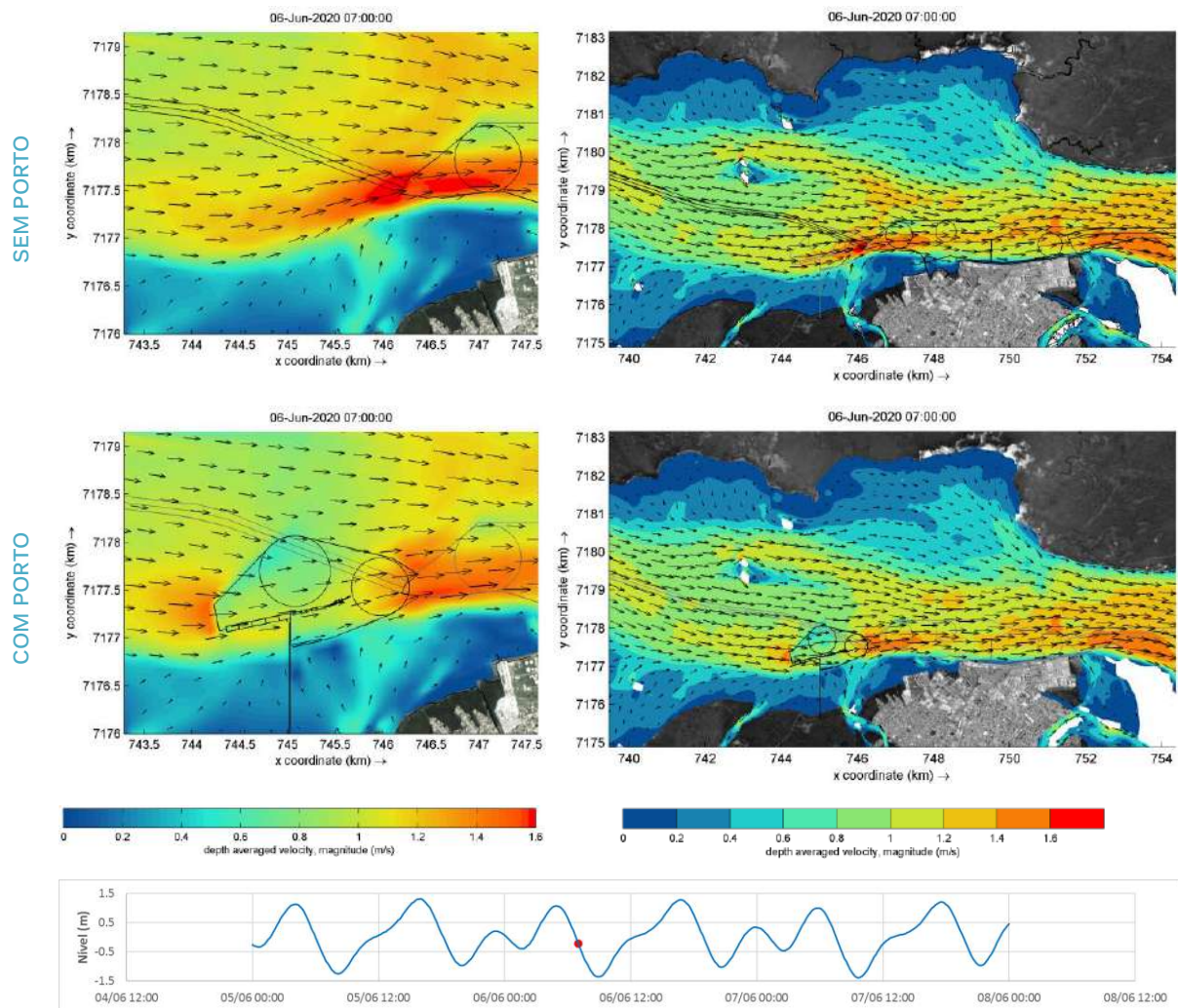


Figura 3.1-2. Campos de velocidades de corrente em situação de VAZANTE de SIZÍGIA para as configurações COM e SEM PORTO GUARÁ. Os vetores representam a direção média e as cores a magnitude da velocidade (em m/s).

SIZÍGIA - PREAMAR

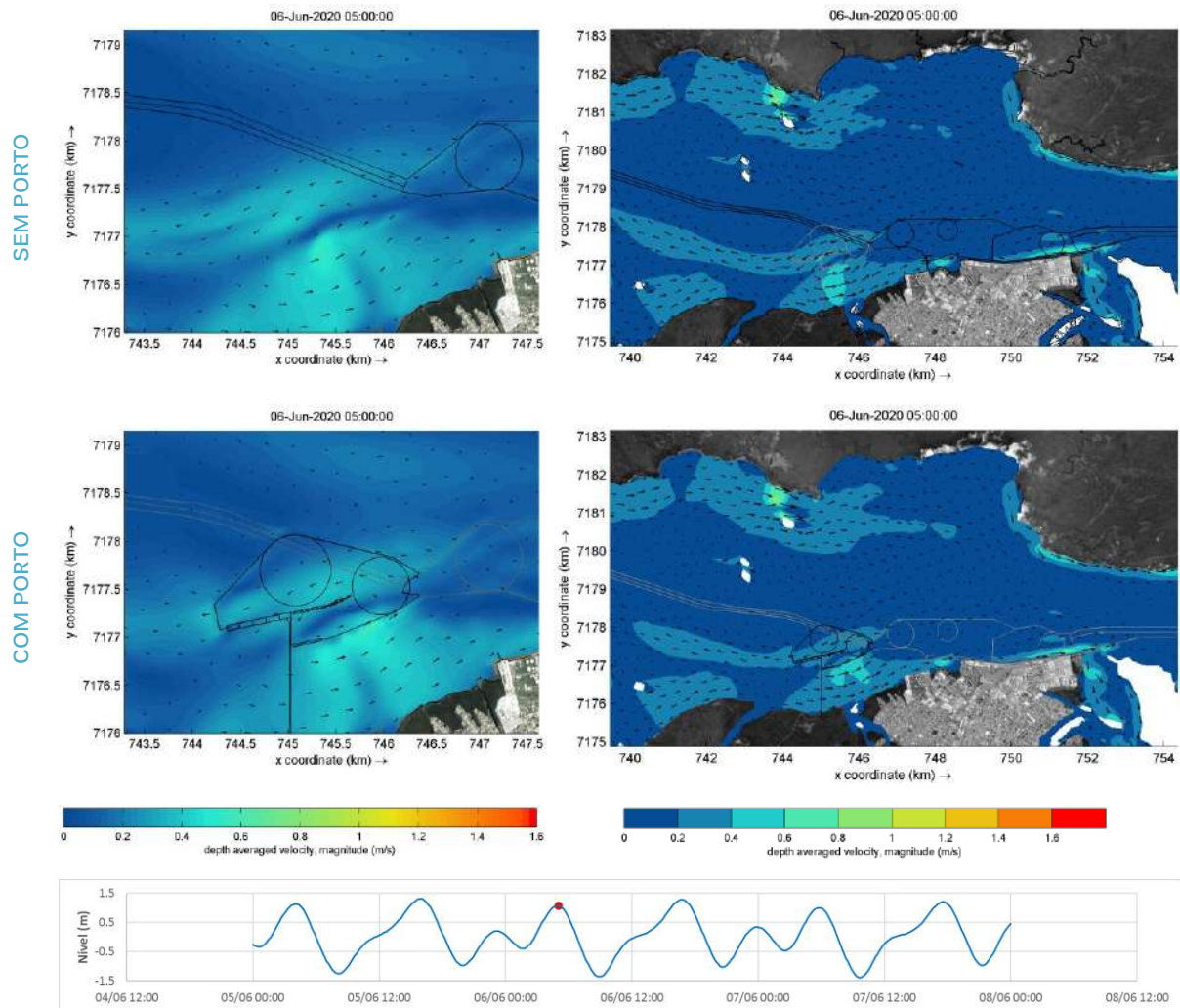


Figura 3.1-3. Campos de velocidades de corrente em situação de PREAMAR de SIZÍGIA para as configurações COM e SEM PORTO GUARÁ. Os vetores representam a direção média e as cores a magnitude da velocidade (em m/s).

SIZÍGIA - BAIXAMAR

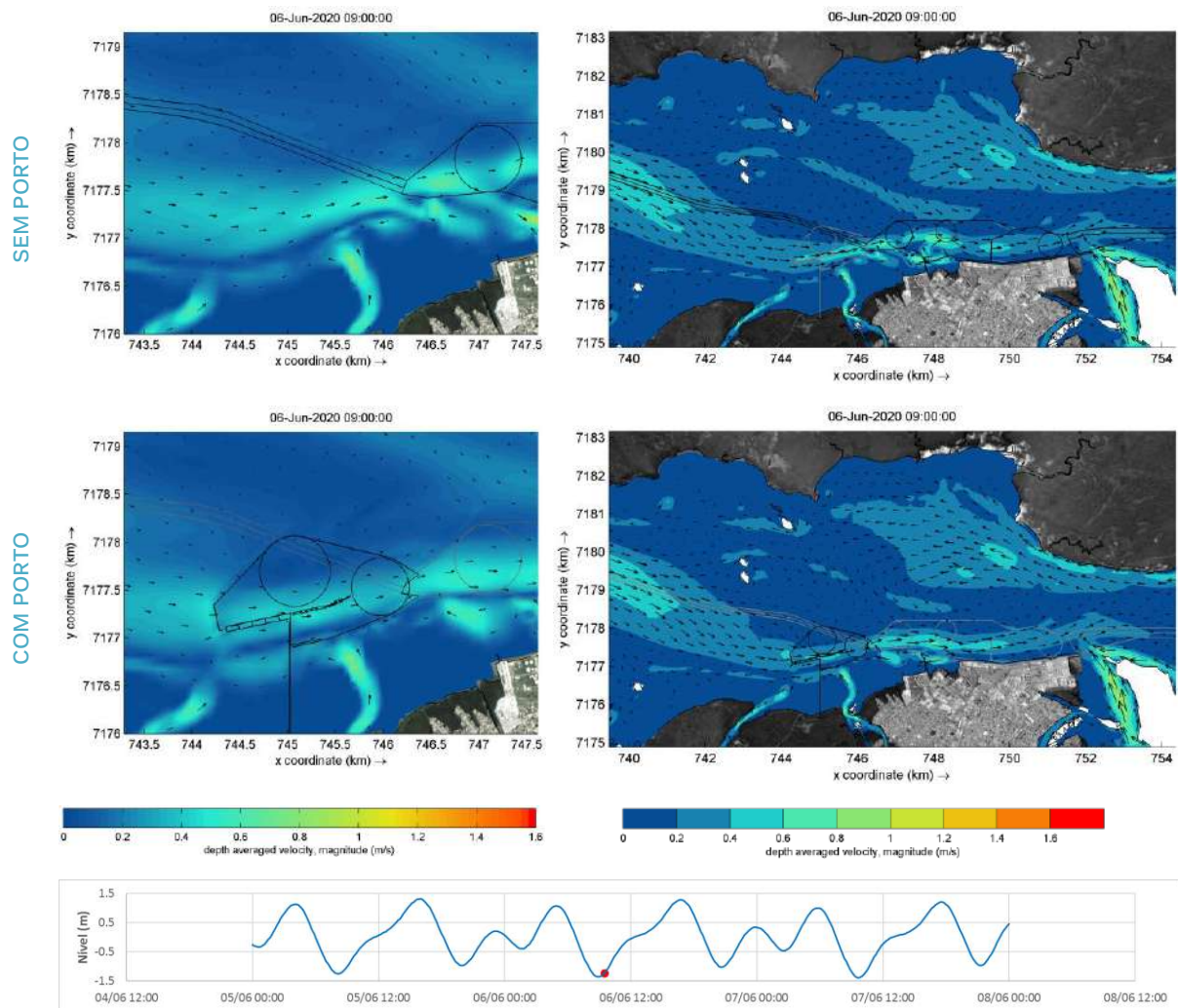


Figura 3.1-4. Campos de velocidades de corrente em situação de BAIXAMAR de SIZÍGIA para as configurações COM e SEM PORTO GUARÁ. Os vetores representam a direo média e as cores a magnitude da velocidade (em m/s).

- Maré de Quadratura: dia 31/05/2020

As Figuras 3.2-5 a 3.2-8 apresentam os campos de correntes médias em profundidade relativos aos instantes de maré enchente, vazante, preamar e baixa-mar do dia 31/05/2020, uma situação de maré de quadratura. Os campos de velocidade de correntes foram escolhidos para apresentar os períodos de velocidades médias de enchente e vazante e os instantes de velocidades mínimas de estofas de maré. Nas figuras estão presentes a configuração sem o Porto Guará e a presença da configuração final da Fase 3 para comparação dos resultados.

QUADRATURA - ENCHENTE

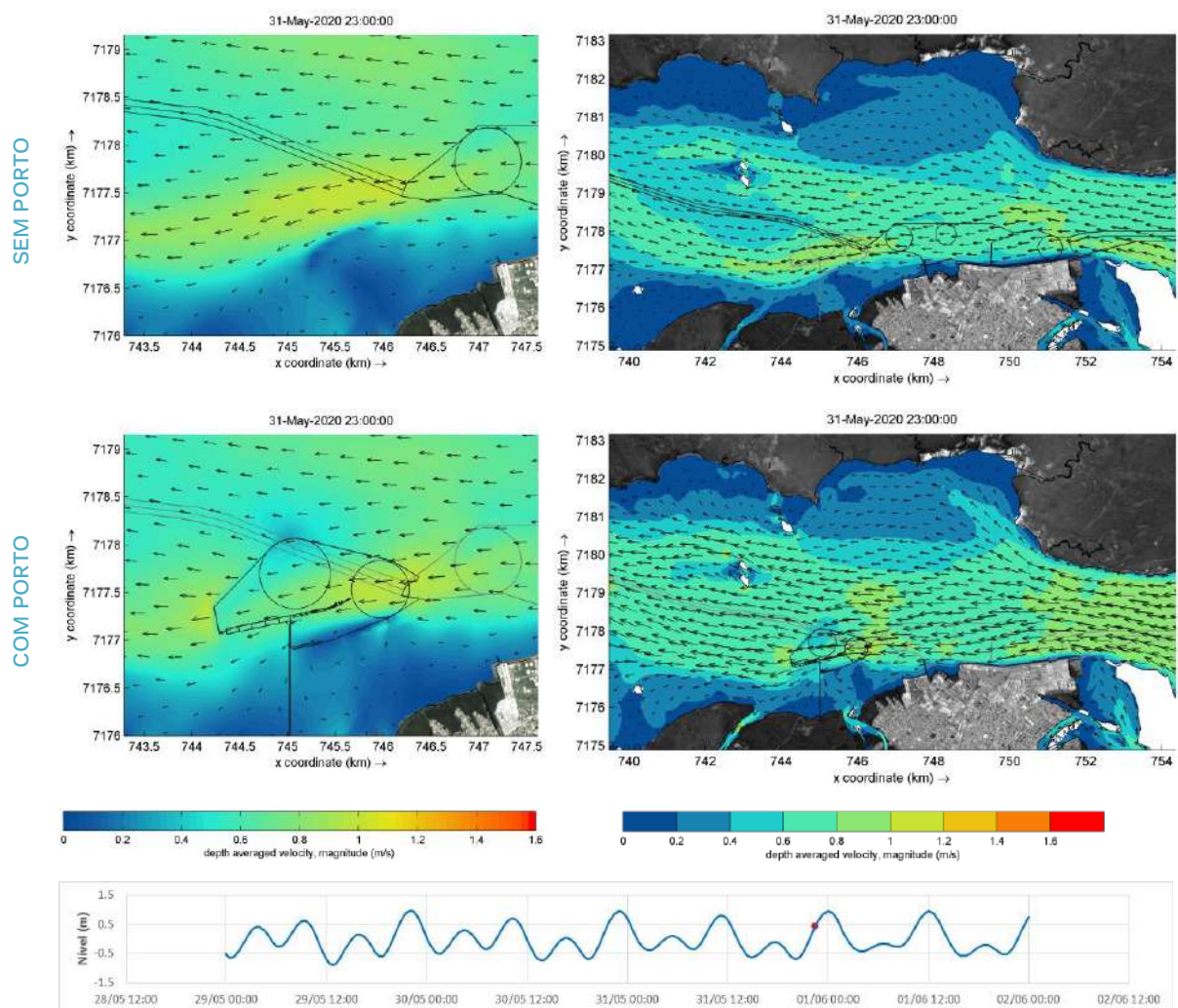


Figura 3.1-5. Campos de velocidades de corrente em situação de ENCHENTE de QUADRATURA para as configurações COM e SEM PORTO GUARÁ. Os vetores representam a direção média e as cores a magnitude da velocidade (em m/s).

QUADRATURA - VAZANTE

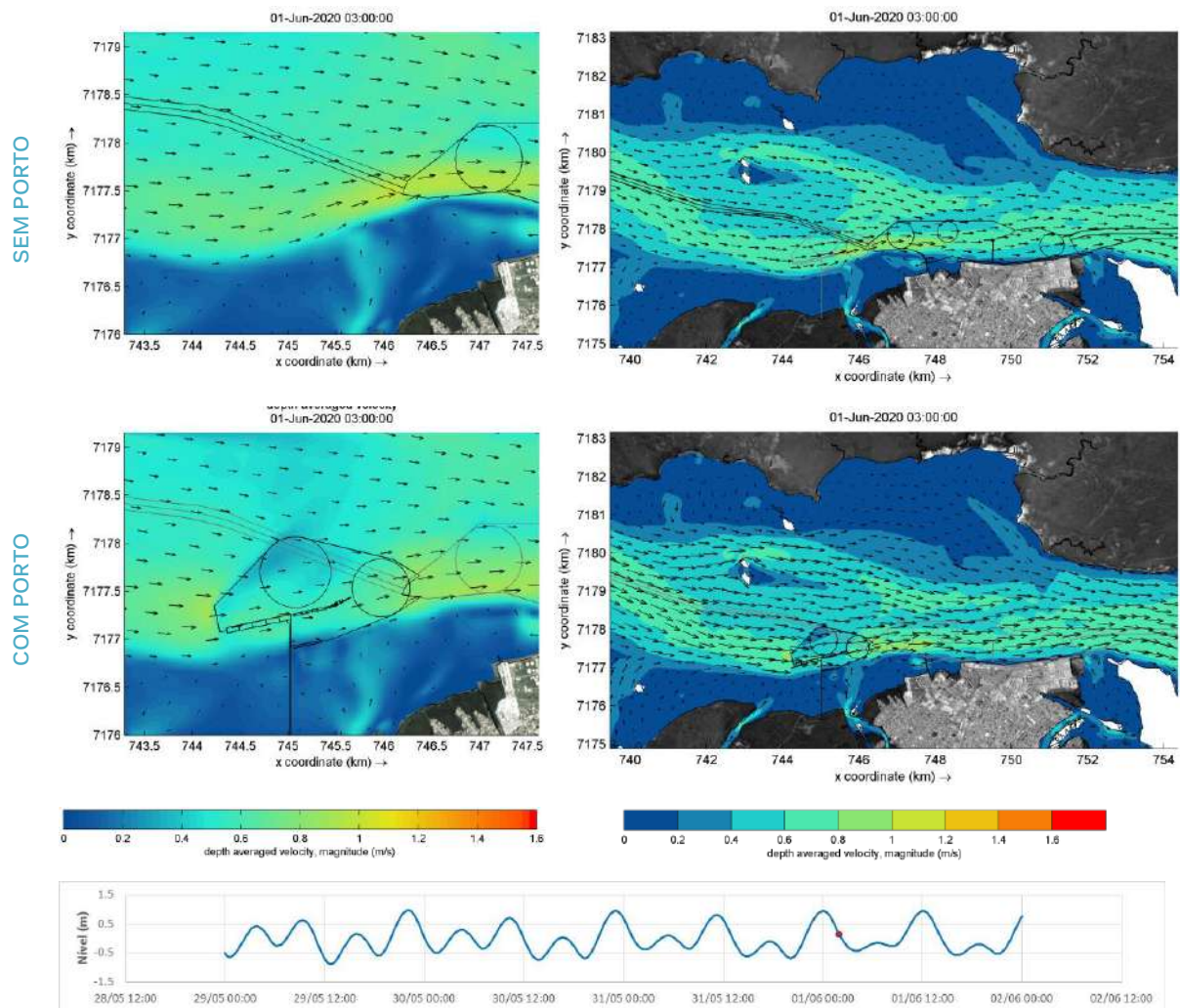


Figura 3.1-6. Campos de velocidades de corrente em situação de VAZANTE de QUADRATURA para as configurações COM e SEM PORTO GUARÁ. Os vetores representam a direção média e as cores a magnitude da velocidade (em m/s).

QUADRATURA - PREAMAR

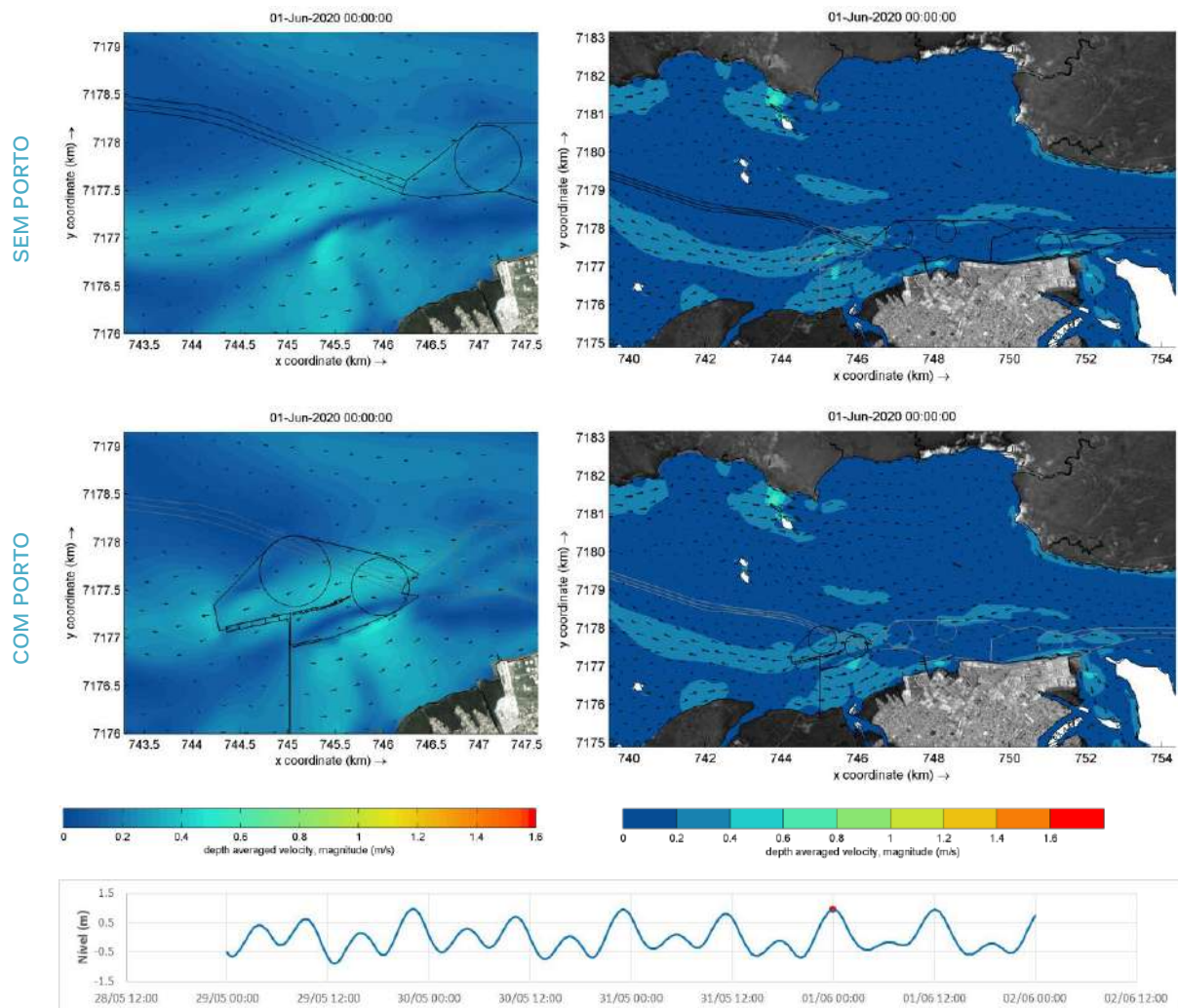


Figura 3.1-7. Campos de velocidades de corrente em situação de PREAMAR de QUADRATURA para as configurações COM e SEM PORTO GUARÁ. Os vetores representam a direo mdia e as cores a magnitude da velocidade (em m/s).

QUADRATURA - BAIXAMAR

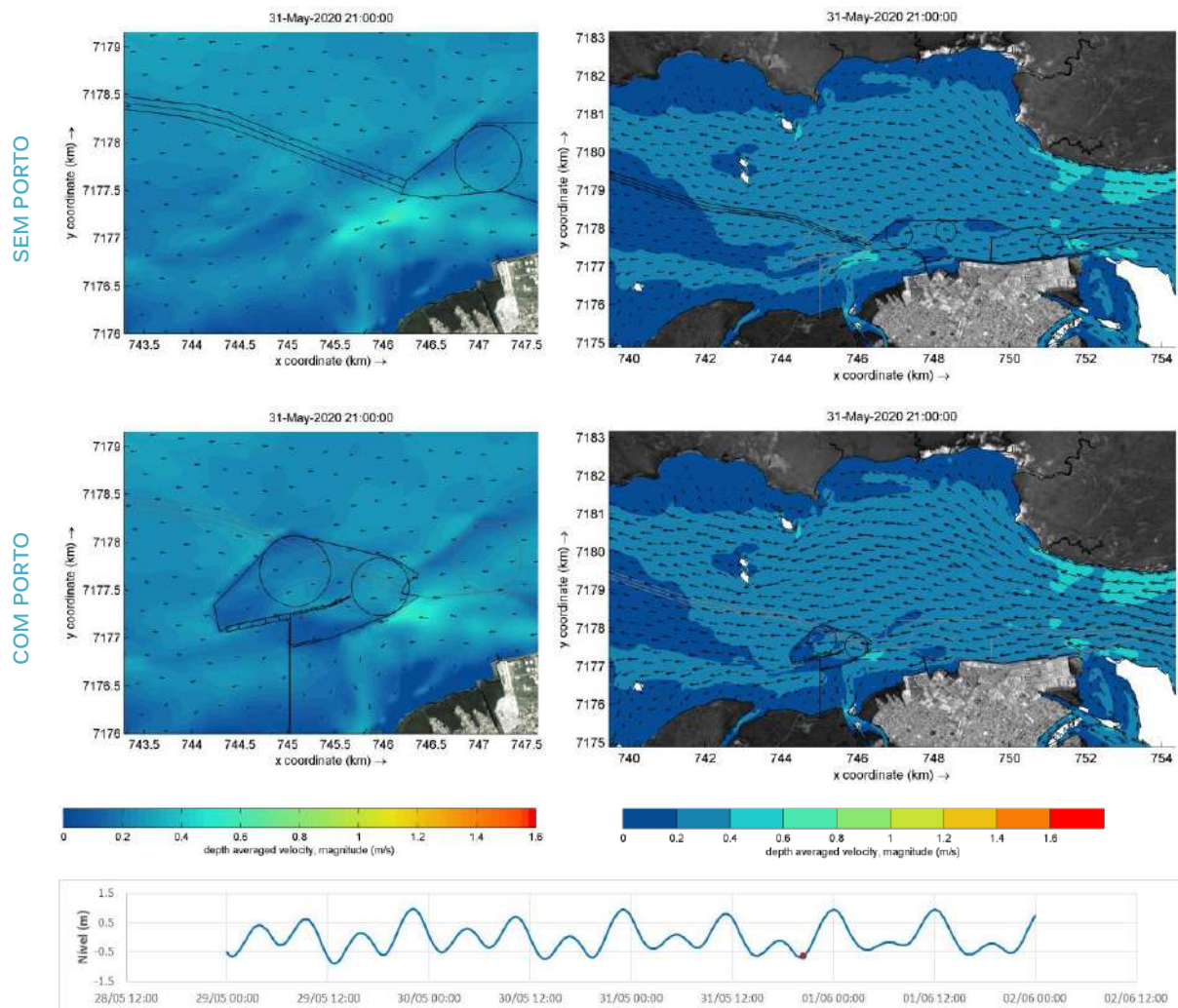


Figura 3.1-8. Campos de velocidades de corrente em situação de BAIXAMAR de QUADRATURA para as configurações COM e SEM PORTO GUARÁ. Os vetores representam a direção média e as cores a magnitude da velocidade (em m/s).

3.2 Alterações na Circulação Estuarina

Para analisar numericamente as alterações hidrodinâmicas resultantes das simulações com e sem a presença do Porto Guará, os campos de correntes estuarinas foram comparados entre si através da diferença simples nos nós da grade numérica.

As alterações encontradas a partir dos resultados representativos das situações de preamar, baixamar e meias-marés de enchente e vazante são apresentados nesta seção, na forma de diferenças dos campos de velocidade de corrente em disposição horizontal (em planta), nos quais as cores indicam a magnitude dessas diferenças em metros por segundo (m/s). As diferenças positivas representam um decréscimo na velocidade e as diferenças negativas, o contrário.

As Figuras 3.2-1 a 3.2-4 reproduzem os mapas resultantes de diferenças entre as simulações COM PORTO e SEM PORTO.

Os resultados, em geral, apresentam diminuições da magnitude das velocidades de corrente na região interna da bacia portuária em função do aprofundamento resultante da dragagem de projeto. Esta redução está na faixa de 5 a 10 cm/s (15 a 25%) em estofas de maré, 20 cm/s (21%) em quadratura e 35 cm/s (32%) em sizígia. (Figuras 3.2-1 a 3.2-4).

Por outro lado, os resultados indicaram que as velocidades nas regiões rasas externas e próximas aos taludes das bacias e canais do Porto Guará tendem a aumentar em magnitude.

Na região externa à bacia portuária do Porto Guará, em sua borda oeste, deverá ocorrer um aumento das intensidades de corrente (Figuras 3.2-1 a 3.2-8). Este acréscimo é mais evidente nas condições de vazante, por efeito da variação abrupta das profundidades, alcançando valores máximos de 31 cm/s (17%) em maré de sizígia e 15 cm/s (13%) em maré de quadratura (Figuras 3.2-1 e 3.2-3). Na situação de enchente, as diferenças de velocidade alcançam valores máximos de 14 cm/s (13%), em ambas as marés de sizígia e quadratura (Figura 3.2-1 e Figura 3.2-3).

Na borda leste, em direção ao Porto de Paranaguá, os resultados mostraram que também deverá haver um aumento da velocidade das correntes. Essa magnificação das correntes ocorre numa região única nas situações de enchente (Figuras 3.2-1 e 3.2-3) e se divide em duas regiões sobre a porção mais rasa na borda dos canais na situação de vazante (Figuras 3.2-1 e 3.2-3).

Na região externa a norte do terminal portuário, o prognóstico é um decréscimo médio das velocidades de corrente da ordem de 10 a 15 cm/s (15 a 20%) devido à implementação do porto e sua bacia portuária. Esse padrão aparece nos cálculos realizados utilizando as condições de enchente e vazante (Figuras 3.2-1 e 3.2-3), mas não é muito evidente nas situações de estofa de maré (Figuras 3.2-2 e 3.2-4).

MARÉ DE SIZÍGIA

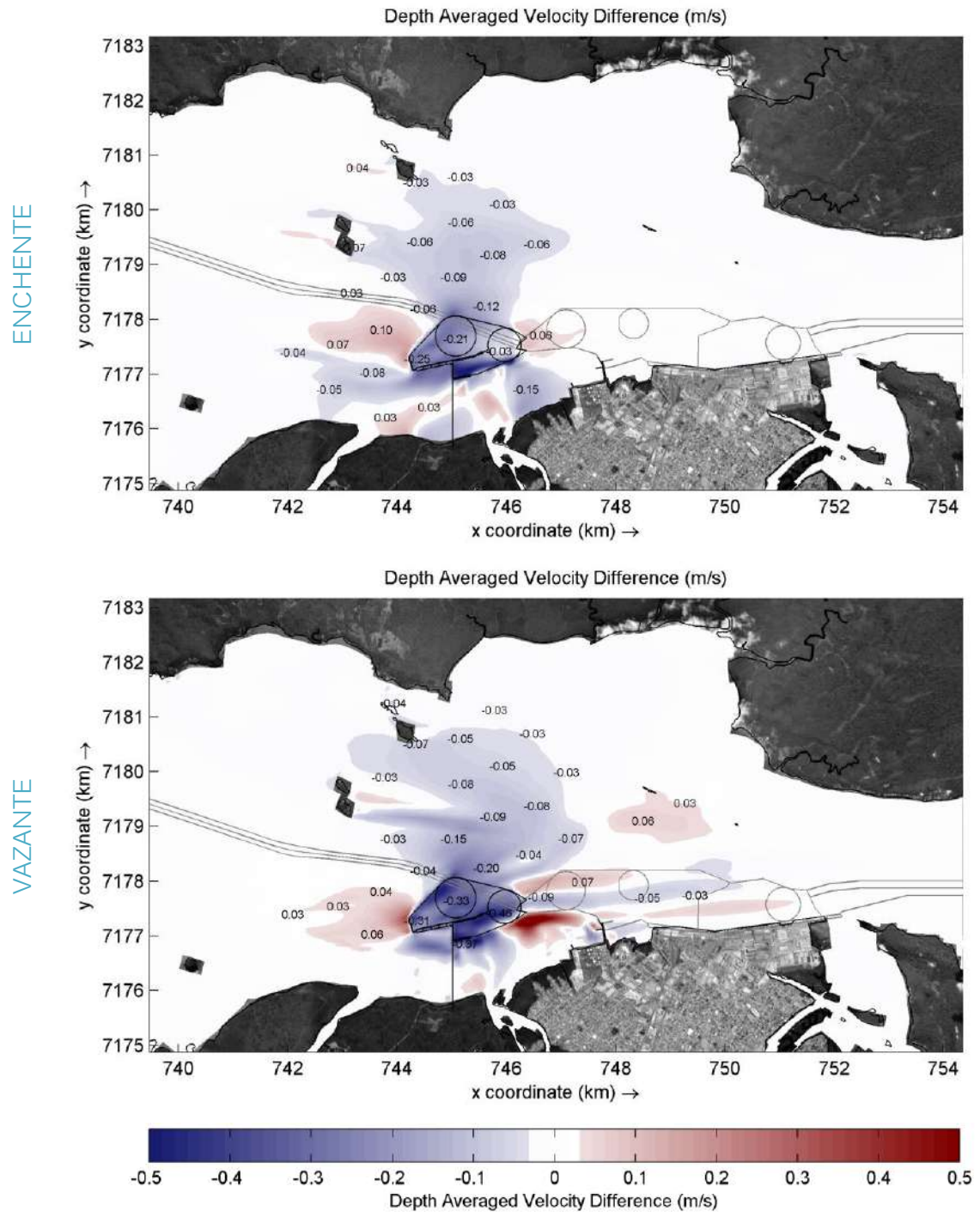


Figura 3.2-1. Mapa das diferenças de magnitude das velocidades das correntes entre as configurações COM e SEM PORTO GUARÁ em marés de ENCHENTE e VAZANTE de SIZÍGIA.

MARÉ DE SIZÍGIA

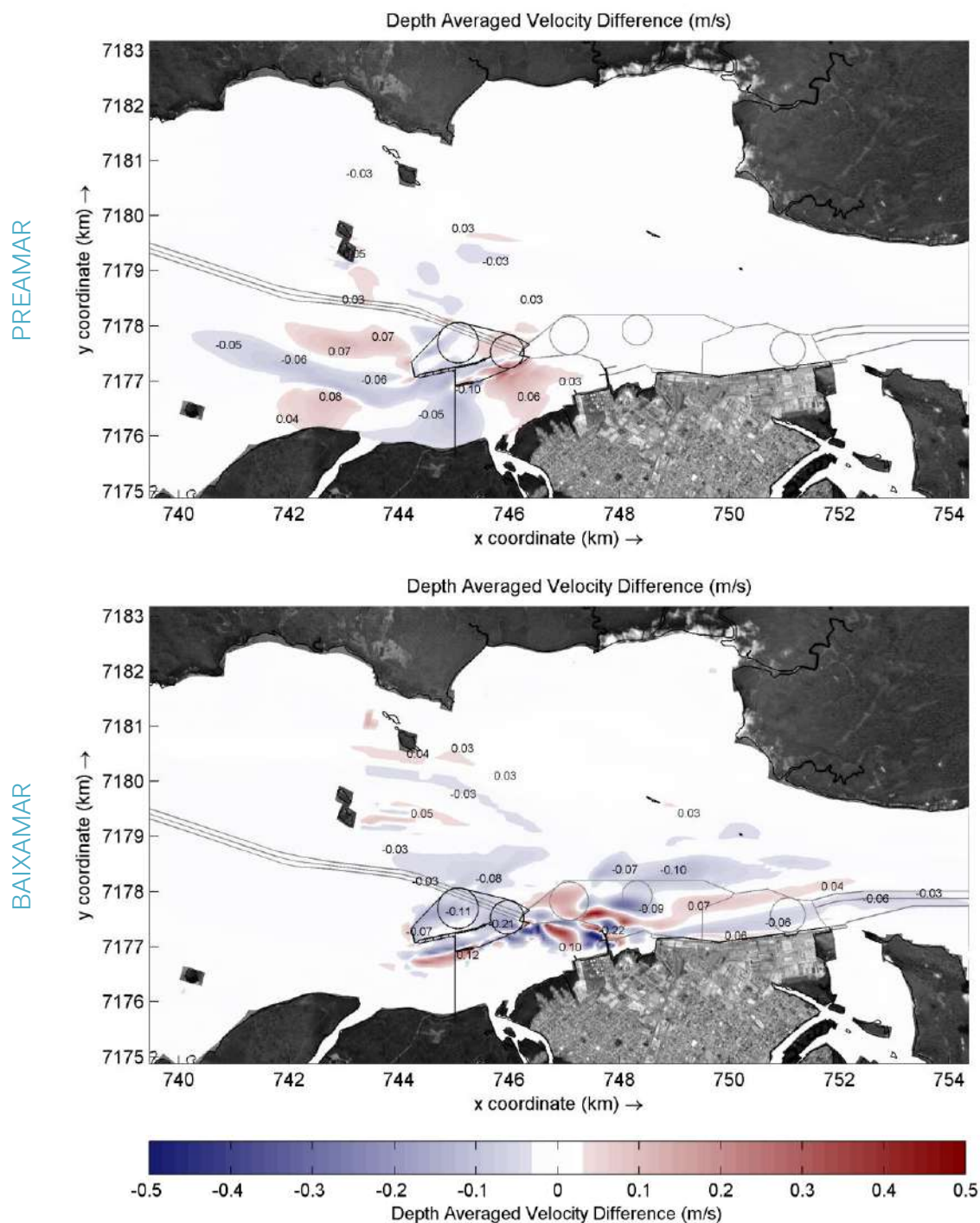


Figura 3.2-2. Mapa das diferenças de magnitude das velocidades das correntes entre as configurações COM e SEM PORTO GUARÁ em marés de PREAMAR e BAIXAMAR de SIZÍGIA.

MARÉ DE QUADRATURA

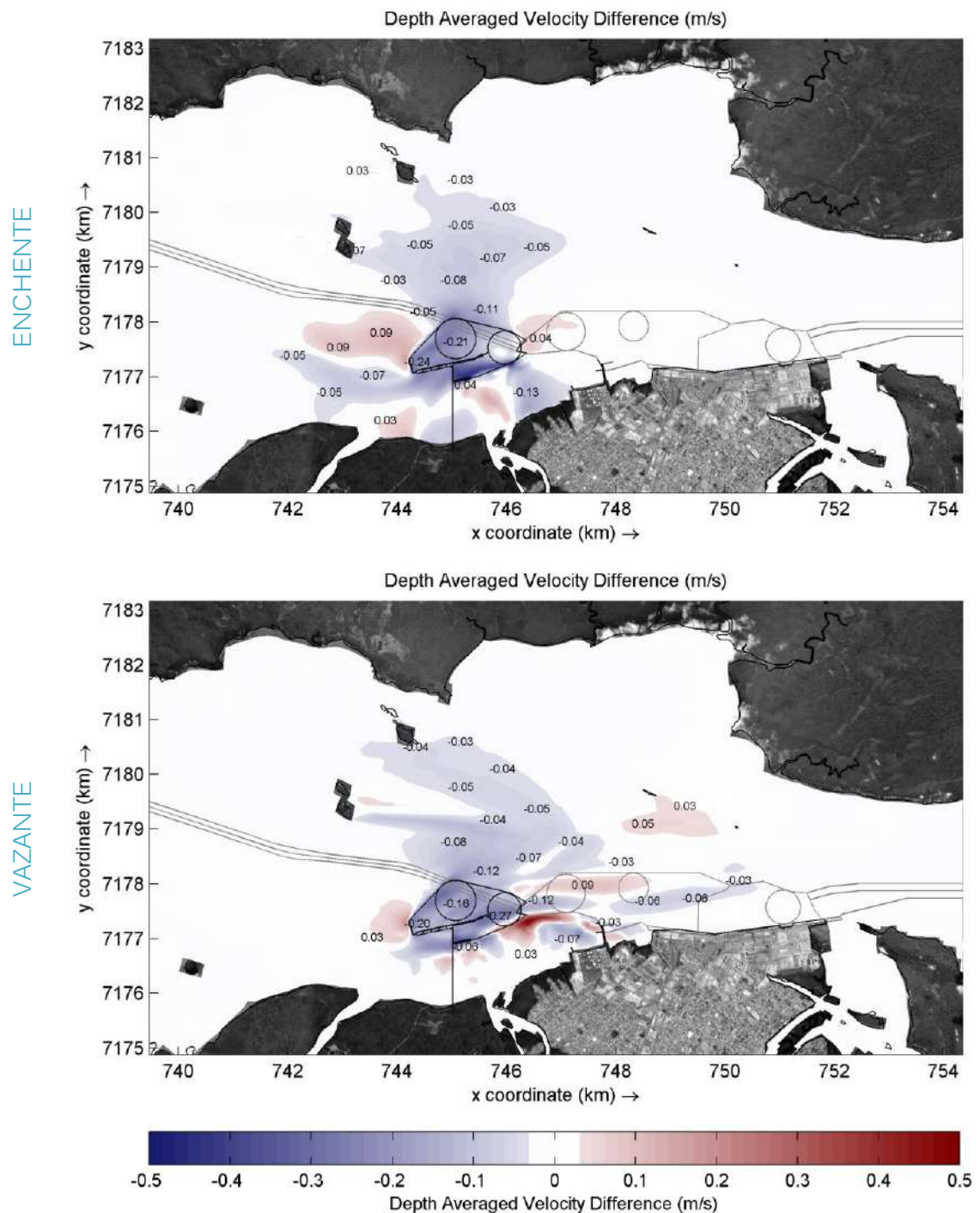


Figura 3.2-3. Mapa das diferenças de magnitude das velocidades das correntes entre as configurações COM e SEM PORTO GUARÁ em marés de ENCHENTE e VAZANTE de QUADRATURA.

MARÉ DE QUADRATURA

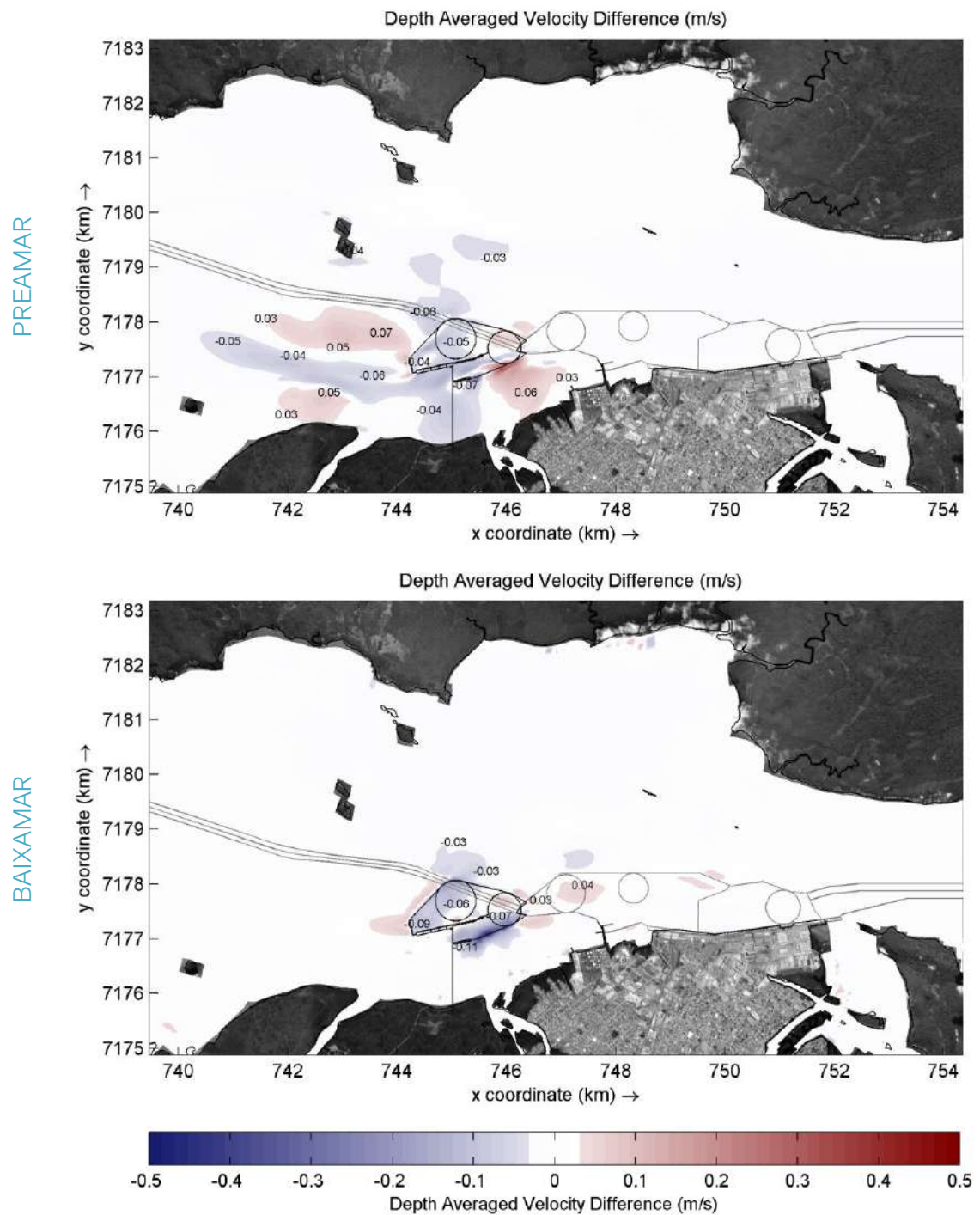


Figura 3.2-4. Mapa das diferenças de magnitude das velocidades das correntes entre as configurações COM e SEM PORTO GUARÁ em marés de PREAMAR e BAIXAMAR de QUADRATURA.

3.3 Dispersão das Correntes no Porto Guará

As dispersões direcionais das velocidades das correntes medidas pelo ADCP (configuração atual da morfologia de fundo) e das correntes calculadas pelo modelo para a configuração ainda sem a implementação do Porto Guará (SEM PORTO), estão representadas na Figura 3.3-1.

Os resultados mostram que deverá ocorrer uma maior dispersão direcional das correntes estuarinas locais de enchente na configuração SEM PORTO, além de um pequeno giro da direção principal. A diferença média estimada para este desvio direcional das correntes do modelo é de 2.0° em relação aos dados de ADCP (Figura 3.3-1).

Do mesmo modo, as dispersões direcionais das velocidades das correntes medidas por um ADCP em 2020 (configuração atual da morfologia de fundo) foram comparadas com as correntes calculadas pelo modelo para configuração com o Porto Guará (COM PORTO), cujos dados estão representados na Figura 3.3-1. Com a implementação do Porto Guará, os resultados mostraram que deverá ocorrer uma maior dispersão direcional das correntes estuarinas no local do ADCP, em enchente e vazante e um giro da direção principal no sentido horário. A diferença média estimada para este desvio direcional das correntes do modelo é de 6.5° em relação aos dados de ADCP (Figura 3.3-1).

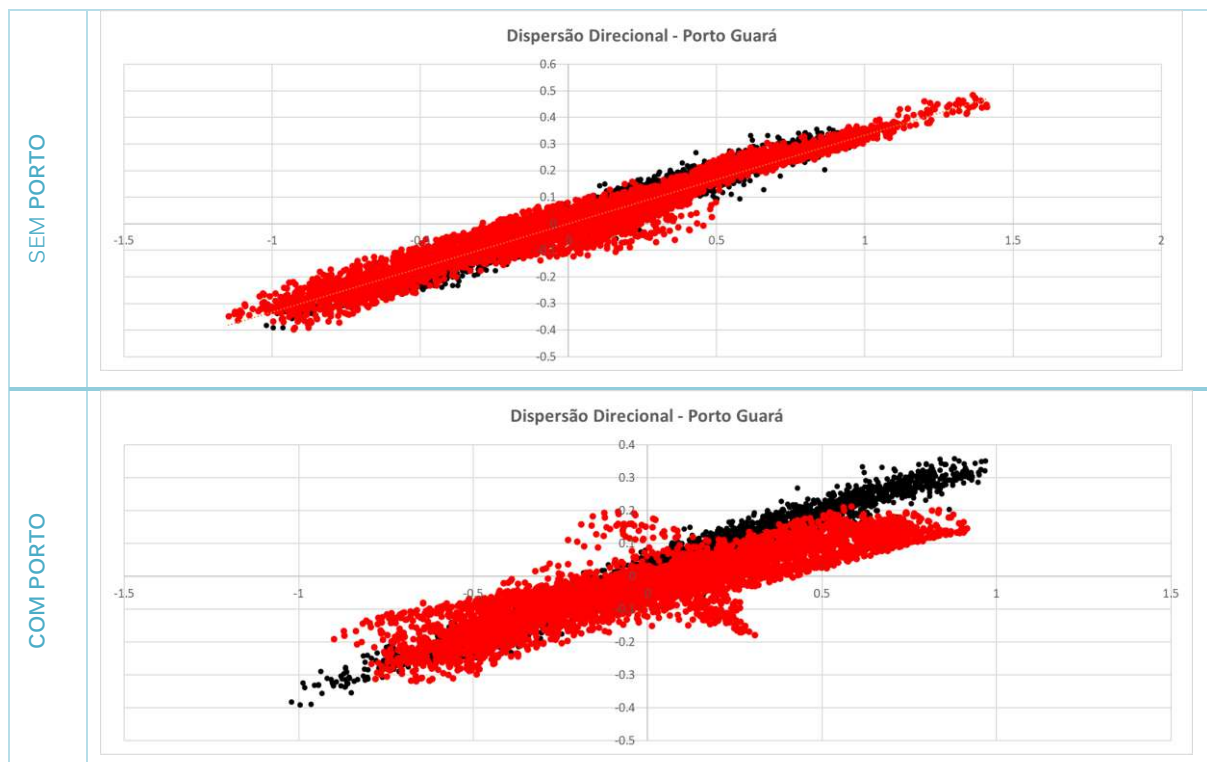


Figura 3.3-1. Dispersão direcional das correntes obtidas pelo modelo numérico Delft3D na configuração da Baía de Paranaguá SEM PORTO e COM PORTO (vermelho) em comparação com as correntes medidas pelo ADCP (preto).

Os histogramas polares das correntes próximas aos cais de Granéis Líquidos, Granéis Sólidos e Contêineres, obtidas a partir dos resultados das simulações numéricas considerando as 2 configurações de fundo, COM e SEM PORTO, estão ilustrados na Figura 3.3-3.

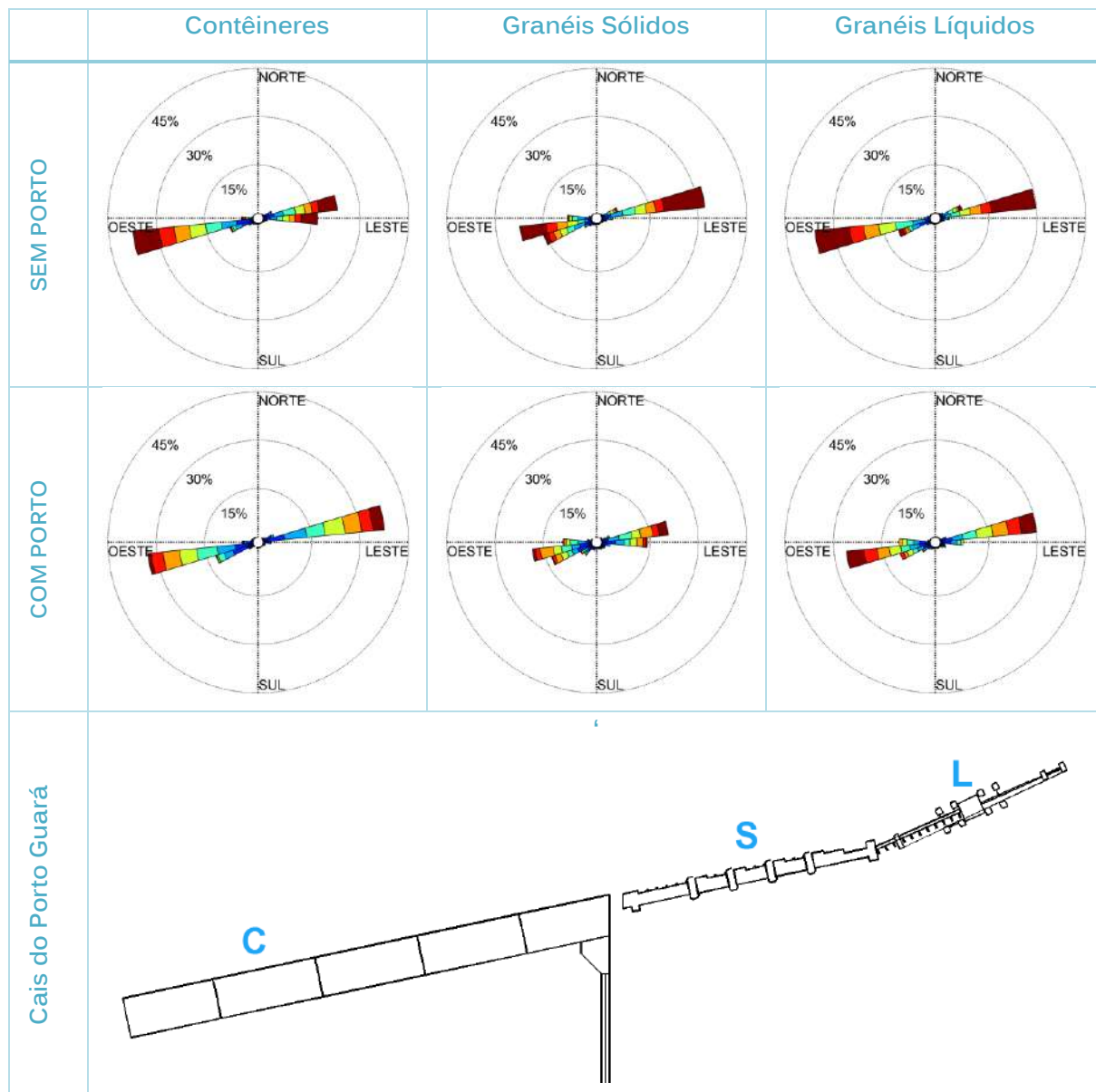


Figura 3.3-3. Histogramas polares das correntes obtidas nos pontos C, S e L dos cais do PORTO GUARÁ para as configurações COM e SEM PORTO.

As intensidades médias de corrente e respectivas direções nos pontos próximos aos cais do Porto Guarά (Figura 3.3-3) estão presentes na Tabela 4.3-1 para as configurações COM e SEM PORTO.

As magnitudes das velocidades médias possuem a mesma ordem de grandeza durante a enchente ou vazante, mas, na vazante, a velocidade é sempre um pouco maior em quase todas as situações consideradas. Em termos de velocidade média, os valores de corrente nas posições

dos cais de Porto Guará atingem um máximo de 0.54 m/s (1.0 n) na situação SEM PORTO e 0.38 m/s (0.7 nós) após a implantação do porto.

Os resultados demonstraram que a implantação do Porto Guará tornar as correntes menos intensas considerando um mesmo local de referência, isto é, num ponto próximo ao cais de granéis líquidos, ao cais de granéis sólidos ou ao cais de contêineres. A redução das velocidades de corrente, após a implantação do Porto Guará, deverá ser em torno de 25% dos valores encontrados para a situação SEM PORTO.

Tabela 3.3-1. Velocidades e direções médias na posição do cais de granéis líquidos do Porto Guará para as configurações COM e SEM PORTO GUARÁ.

| CAIS GRANÉIS LÍQUIDOS | ENCHENTE | | VAZANTE | |
|--------------------------|------------------|-------------|------------------|-------------|
| | Velocidade (m/s) | Direção () | Velocidade (m/s) | Direção () |
| SEM PORTO | 0.45 | 257.3 | 0.54 | 77.7 |
| COM PORTO | 0.38 | 255.1 | 0.37 | 84.0 |

Tabela 3.3-2. Velocidades e direções médias na posição do cais de granéis sólidos do Porto Guará para as configurações COM e SEM PORTO GUARÁ.

| CAIS GRANÉIS SÓLIDOS | ENCHENTE | | VAZANTE | |
|-------------------------|------------------|-------------|------------------|-------------|
| | Velocidade (m/s) | Direção () | Velocidade (m/s) | Direção () |
| SEM PORTO | 0.42 | 253.8 | 0.49 | 80.8 |
| COM PORTO | 0.32 | 251.9 | 0.34 | 89.8 |

Tabela 3.3-3. Velocidades e direções médias na posição do cais de contêineres do Porto Guará para as configurações COM e SEM PORTO GUARÁ.

| CAIS CONTÊINERES | ENCHENTE | | VAZANTE | |
|---------------------|------------------|-------------|------------------|-------------|
| | Velocidade (m/s) | Direção () | Velocidade (m/s) | Direção () |
| SEM PORTO | 0.41 | 255.5 | 0.46 | 85.4 |
| COM PORTO | 0.30 | 256.3 | 0.34 | 80.2 |

4. MODELAGEM MORFODINÂMICA

Nesta etapa do estudo, o objetivo é estimar as taxas de sedimentação anuais para a área do Porto Guará, considerando a configuração da sua bacia portuária e do alargamento e aprofundamento do canal Charlie (configuração COM PORTO).

Os estudos de modelagem morfodinâmica realizaram a simulação da evolução do fundo do Complexo Estuarino de Paranaguá durante 5 anos, considerando a presença de ventos, marés e vazão dos rios afluentes em épocas de cheia e seca e as características sedimentológicas sobre um domínio morfológico móvel. Neste tipo de simulação, a batimetria é ajustada a cada passo de tempo de acordo com a ocorrência dos processos de erosão, sedimentação e transporte de sedimentos.

A modelagem morfodinâmica requer o conhecimento da morfologia do fundo (batimetria), as classes e características granulométricas dos sedimentos que constituem o fundo estuarino, a concentração média de sedimentos em suspensão (background) e as descargas sólidas de sedimentos que aportam no estuário no CEP. Estes dados e suas origens são apresentados em detalhe no ANEXO A. As simulações numéricas consideraram todos estes parâmetros e os principais processos hidrodinâmicos que potencialmente possam influenciar as variações nas taxas de sedimentação portuária.

O material de fundo do CEP é composto de diferentes frações granulométricas de sedimentos coesivos e não-coesivos. Foram consideradas 4 classes de sedimentos nas simulações numéricas, areia média ($D_{50}=0.29$ mm), areia fina ($D_{50}=0.17$ mm), areia muito fina ($D_{50}=0.09$ mm) e silte fino ($D_{50}=0.008$ mm), distribuídas espacialmente de acordo com os dados disponíveis e misturadas uniformemente.

Os teores médios representativos de cada fração granulométrica considerada resultaram na composição do fundo da Baía de Paranaguá com 53 % de areia fina, 17% de areia muito fina, 1% de areia média e 29% de lama.

O valor médio de 25 mg/l foi considerado como a concentração de sedimentos que representa o valor ambiental (background) de material em suspensão no estuário. Os aportes sedimentares relacionados a descarga fluvial dos principais rios foram impostos como condições de fronteira conforme a Tabela A1.7-1, do Anexo A.

4.1 Sedimentação Histórica

A calibração da modelagem morfodinâmica foi efetuada com base nas taxas de assoreamento de dados históricos existentes para os canais de navegação dos portos de Paranaguá.

A região do Complexo Estuarino de Paranaguá abriga os Portos de Paranaguá e Antonina, que possuem um histórico das dragagens efetuadas desde 1975 (APPA e FEESC, 2012) e tem diversos estudos relacionados à estimação dos volumes e taxas de sedimentação, principalmente nos canais de navegação e berços.

Carrilho (2003) e Odreski (2002) fizeram uma análise das áreas de sedimentação e erosão através da utilização de cartas náuticas. Carrilho (2003) analisou as cartas de 1959 e 2001 e identificou áreas com alternância de deposição e erosão no fundo da Baía de Paranaguá (Figura 4.1-1A). Este estudo também analisou dois levantamentos batimétricos de 2001, com intervalo de 6 meses entre eles, cujo resultado indicou variações de -30 a +30 cm ao longo do canal do Porto de Paranaguá, com um acréscimo de volume de 153.200 m³ (Figura 4.1-1-A). Odreski (2002) verificou a ocorrência de processos erosionais nas bordas dos bancos marginais na porção interna do CEP e deposição dos sedimentos nos canais estuarinos. A Figura 4.1-1-B ilustra a comparação realizada entre batimetrias de 1901 e 1979, indicando uma erosão de 0.5 m/ano nos bancos rasos do estuário.

Cattani (2009) fez um cálculo das taxas de sedimentação na região da Baía de Paranaguá com base sondagens batimétricas efetuadas entre 1999 e 2008 e identificou a ocorrência de maior sedimentação nas porções norte e sul do canal Charlie, cuja parte central apresentou pequenas alterações na profundidade. Na área dos berços do Porto de Paranaguá, o autor encontrou até 1 m de assoreamento entre 2003 e 2007 (25 cm/ano).

Um estudo para realizar o cálculo da sedimentação em toda a extensão do canal do Porto de Paranaguá foi conduzido pelo INPH (2014), através de modelagem numérica com apenas a classe de areia fina para o cálculo dos transportes por advecção e remobilização de fundo. Os resultados indicaram áreas esparsas na região interna do canal de navegação com deposição aproximada de 10 cm, no máximo (Figura 4.1-1-C). A sedimentação dos sedimentos finos (lama), que deriva do transporte de sedimentos em suspensão, foi estimada empiricamente, como sendo 10 cm/ano e uniforme sobre todo o canal de navegação, inclusive o trecho costeiro (setor Alfa). A estimativa dos volumes de dragagem sobre o setor Charlie 3 do canal foi de 100.664 m³/ano, o que resulta numa taxa de 10 cm/ano e significa que os depósitos de areia não alteraram o valor arbitrado para a sedimentação de lama neste setor.

Estudos anteriores de modelagem numérica na área do Porto Guará (TERLIP) realizados em 2015 para outros layouts portuários (CBI, 2015) utilizaram as taxas de sedimentação do INPH como referência para calcular as taxas de sedimentação Figura 4.1-1-D. Os volumes de sedimentação estimados para o primeiro ano estiveram entre 33.000 a 62.000, dependendo da alternativa escolhida. Em termos de depósito, esses valores significam um assoreamento médio das respectivas bacias portuárias de 4.2 cm a 7.9 cm.

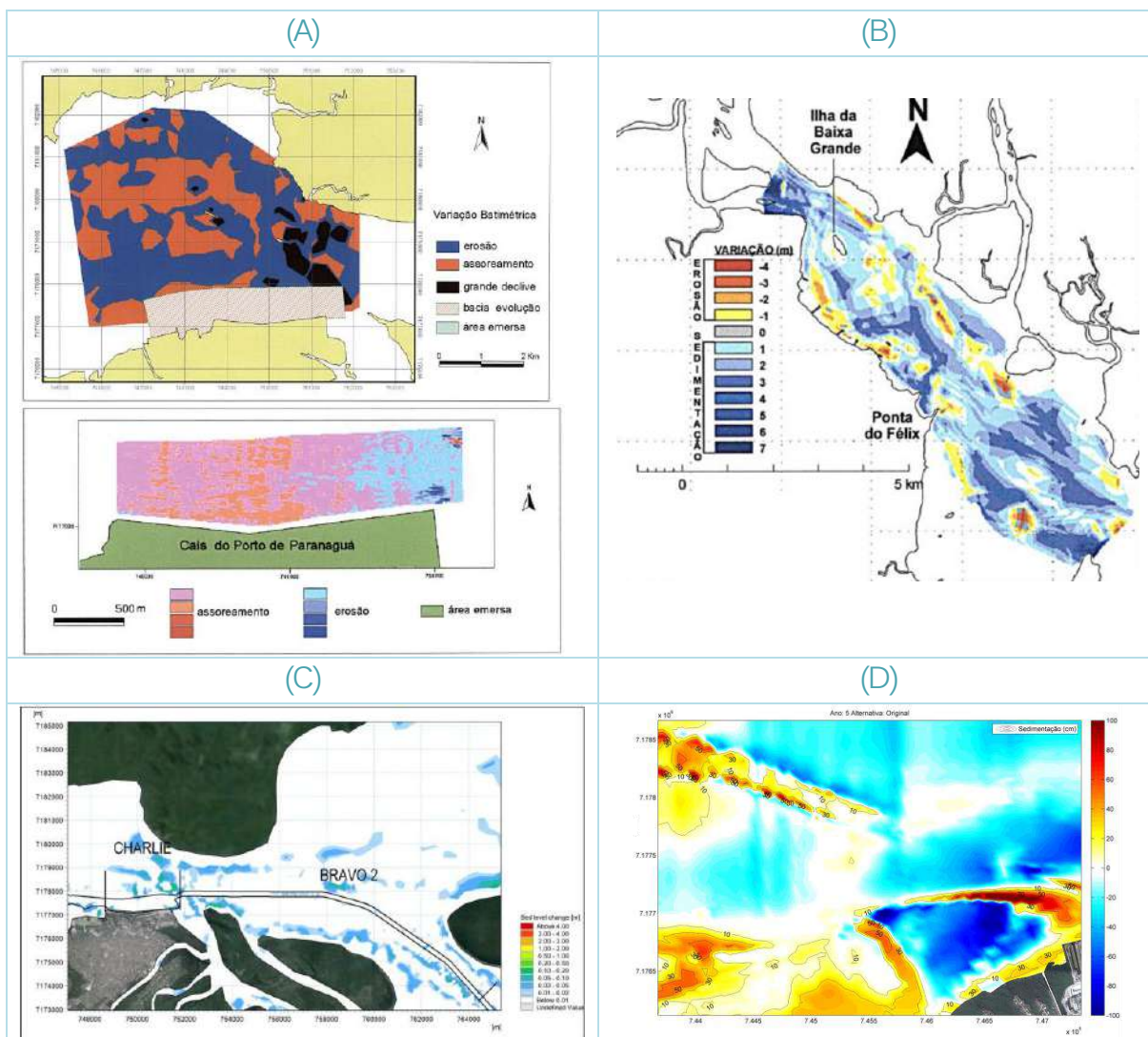


Figura 4.1-1. Mapas de erosão e acreção em estudos de sedimentação no CEP: (A) análise de cartas náuticas entre 1959 e 1998 e levantamentos batimétricos no porto (Carrilho, 2003). (B) erosão e sedimentação entre 1901 e 1979 na Baía de Antonina em Odreski (2002); (C) nas áreas Bravo 2 e Charlie (INPH 2014); (D) na área do porto guará (CBI, 2015);

Os volumes de assoreamento anual adotados para os canais de navegação de acesso aos portos da Baía de Paranaguá, fornecidos pela APPA ao Porto Guará e confirmados no relatório de “Planejamento Estratégico da Infraestrutura Marítima dos Portos do Paraná” de 2017 (PEIM-PR), são apresentados na Tabela 4.1-2. Nesta tabela pode ser vista a distribuição total da sedimentação anual por cada setor do canal de navegação.

Segundo o PEIM-PR/2017, esses valores foram estimados com base no histórico das dragagens realizadas pela APPA e nos estudos realizados ao longo da última década. Para o setor Charlie 3 do canal de navegação, o volume total de dragagem entre 1999 e 2016 foi de 500.550,77 m³.

Tabela 4.1-2. Volumes de assoreamento anual distribuídos pelos setores do canal de navegação segundo o PEIM de 2017. Fonte: APPA, 2017

| CANAL | ÁREA (m ²) | VOLUME (m ³ /ano) |
|--------------------|------------------------|------------------------------|
| Alfa | 1105600 | 1200000 |
| Bravo 1 | 876384 | 75000 |
| Bravo 2 | 2164923 | 75000 |
| Charlie 1 500/550m | 1389843 | 200000 |
| Charlie 1 leste | - | sem efeito |
| Charlie 3 - 12m | 621534 | 50000 |
| Charlie 3 - 11m | 77508 | sem efeito |
| Charlie 2 (berços) | 154000 | 100000 |
| Delta 1 E 2 | 1256000 | 1000000 |
| Echo | 141768 | 20000 |

Segundo a APPA, o volume de assoreamento anual do canal Charlie 3 é de 50.000 m³/ano, o que representa uma taxa de assoreamento média de 8 cm/ano (Figura 4.1-2). Estes foram os valores de referência utilizados na calibração dos parâmetros do modelo morfodinâmico.

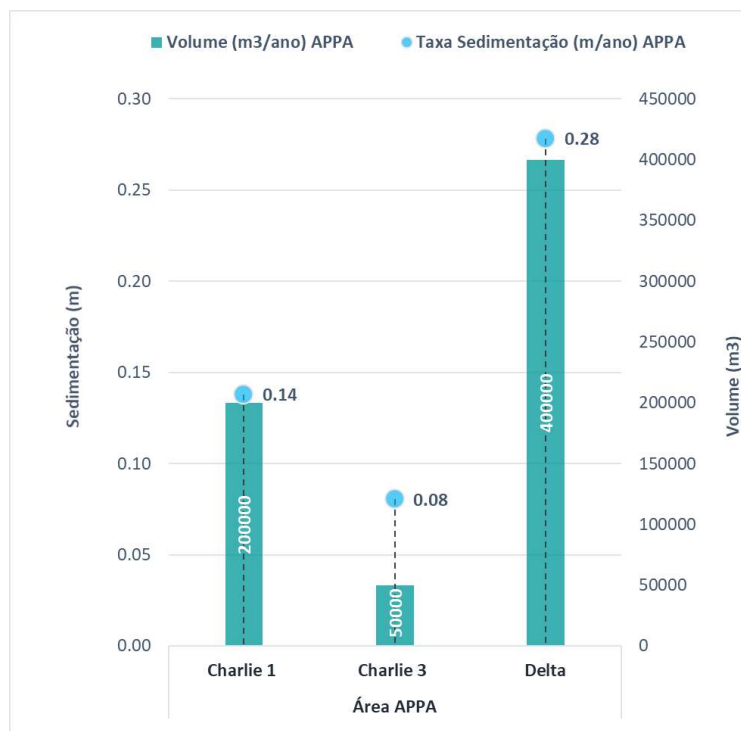


Figura 4.1-2. Volumes e taxas de assoreamento anual por setor do canal de navegação. Fonte: APPA, 2017.

4.2 Calibração do Modelo Morfodinâmico

Para realizar a calibração do modelo morfodinâmico, considerou-se o volume de 50.000 m³/ano de assoreamento para a área Charlie 3, fornecido pela APPA, como o volume de referência (Tabela 4.1-2).

Foram realizados testes de sensibilidade para os principais parâmetros de calibração de transporte de sedimentos, que incluem as tensões críticas de cisalhamento de fundo de erosão e de deposição, parâmetro de erosão e a velocidade de sedimentação de partículas. A calibração dos parâmetros dos modelos hidrodinâmico e morfodinâmico foi efetuada com a simulação da **configuração ATUAL** do fundo estuarino pelo período de 1 ano, ou seja, com a configuração e profundidades atuais dos setores Charlie 1, 2 e 3 do canal de navegação, sem ampliação e aprofundamento para 16 m e sem a inclusão do Porto Guará.

As várias simulações morfodinâmicas incluindo todo o Complexo Estuarino de Paranaguá foram conduzidas para se atingir um desvio mínimo com relação ao volume de sedimentação anual no setor Charlie 3. Este valor correspondeu ao volume de 51260 m³/ano, o que resulta numa superestimação de 2.5% do volume de referência.

Após a etapa de calibração, o modelo morfodinâmico contendo os ajustes dos parâmetros de calibração dos processos de erosão, deposição e transporte de sedimentos foi aplicado à região do CEP com a inclusão do Porto Guará e dos canais Charlie ampliados e aprofundados para 16 m (ZH).

4.3 Transporte de Sedimentos no Porto Guará

O transporte de sedimentos em suspensão ou como carga de fundo depende, basicamente, da ação hidrodinâmica exercida pelas ondas e correntes e das propriedades físicas e granulométricas dos sedimentos. A evolução morfológica ocorre quando há uma variação no transporte de sedimentos tal que o fluxo de massa líquido, num determinado local, seja negativo e resulte em erosão, ou seja positivo, gerando acreção ou assoreamento.

Nesta etapa de simulação, o fundo foi considerado fixo, para evitar o feedback entre o escoamento e as alterações do nível do fundo, isolando o papel da alteração dos fluxos nos padrões de transporte de sedimentos que resultam da interação com as características morfológicas do fundo.

As simulações do transporte de sedimentos foram realizadas considerando o Complexo Estuarino de Paranaguá **na configuração SEM PORTO**, isto é, com a batimetria atual e o canal de navegação do Porto de Paranaguá alargado e aprofundado para 16 m (ZH) e a **configuração COM PORTO**, na qual a morfologia de fundo inclui a implantação das 3 fases do Porto Guará.

As simulações da dinâmica sedimentar na região do Porto Guará são apresentadas na forma de mapas de Transporte Total de Sedimentos. O transporte total é a soma do transporte de sedimentos em suspensão e do transporte de carga de fundo de todas as 4 frações granulométricas consideradas (areia média, areia fina, areia muito fina e lama).

Os resultados são apresentados na forma de mapas (em planta) e contém as taxas de transporte total, nos quais as cores representam a magnitude (em $m^3/s/m$) e os vetores são indicativos da direção média do transporte total.

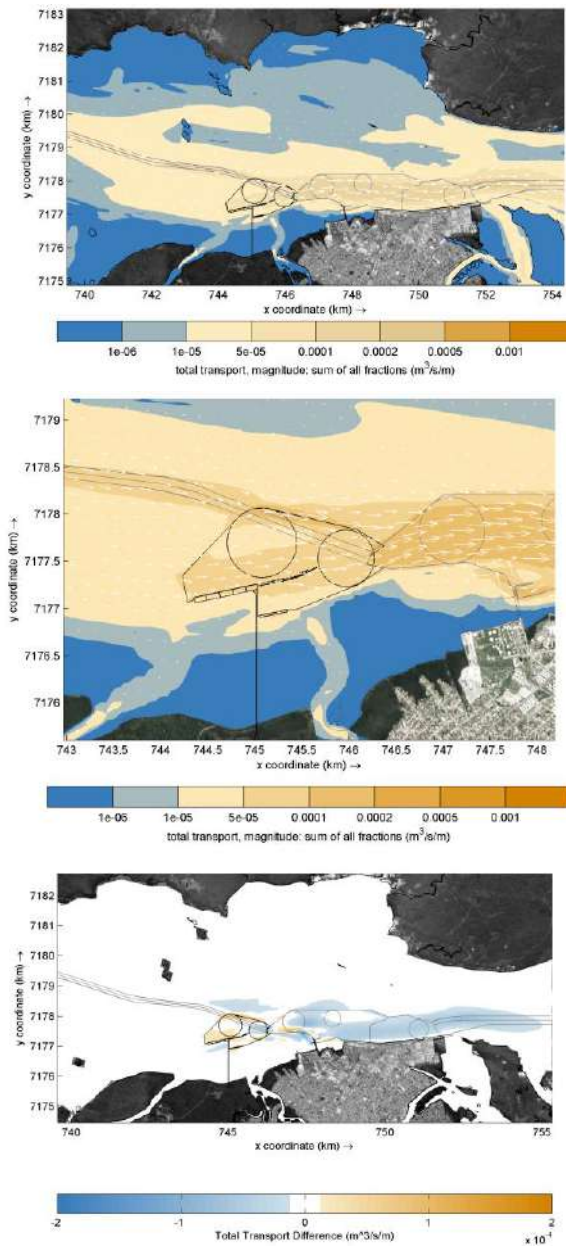
Estes mapas mostram o transporte total de sedimentos nos instantes de meia-maré de enchente e vazante, que são os períodos de maior velocidade de correntes e em períodos de estofas de baixamar e preamar, nas quais as velocidades de correntes são mínimas.

Os resultados do Transporte Total de Sedimentos ($m^3/s/m$) para a configuração COM PORTO relativos aos instantes de meias-marés de enchente e vazante e nas estofas de preamar e baixamar, são apresentados nas Figuras 4.3-1 e 4.3-2 para uma situação de maré de sizígia e nas Figuras 4.3-3 a 4.3-4 para uma situação de maré de quadratura.

Para auxiliar a compreensão da dinâmica sedimentar após a instalação do Porto Guará, foram realizados mapas de diferenças das taxas de transporte total entre a situação com e sem o Porto Guará, que são apresentados junto com os mapas de Transporte Total (Figuras 4.3-1 a 4.3-4).

Nestes gráficos de diferenças, os valores positivos (cor laranja) indicam que houve um aumento na magnitude do transporte de sedimentos, após a instalação do Porto Guará e os valores negativos (cor azul) indicam o contrário, que houve uma diminuição desse transporte

Baixamar - Sizígia



Preamar - Sizígia

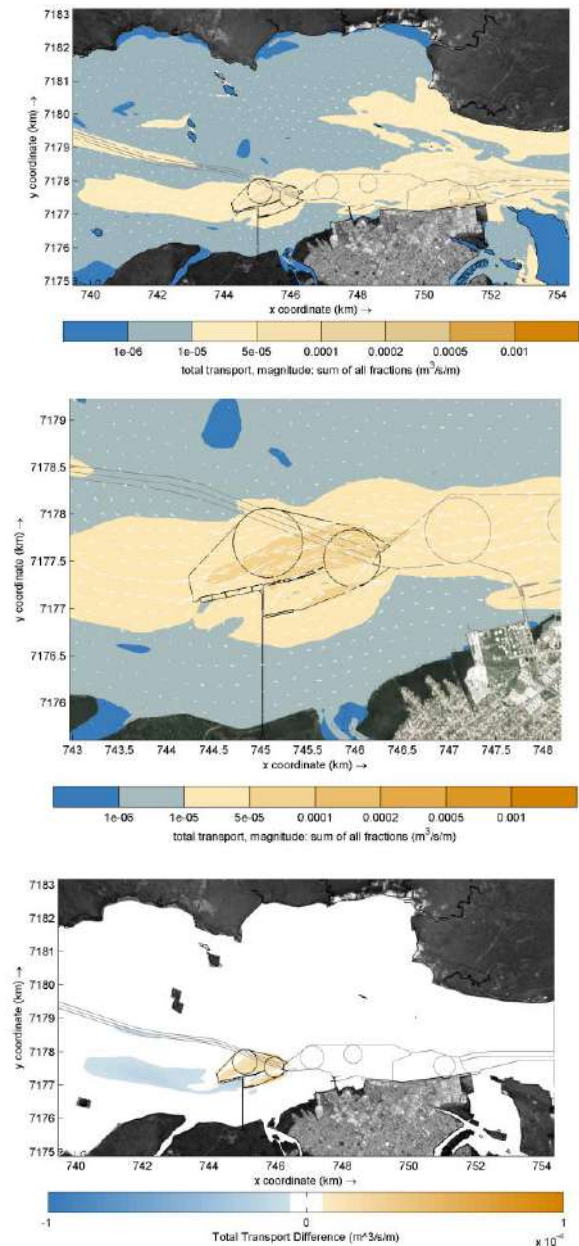
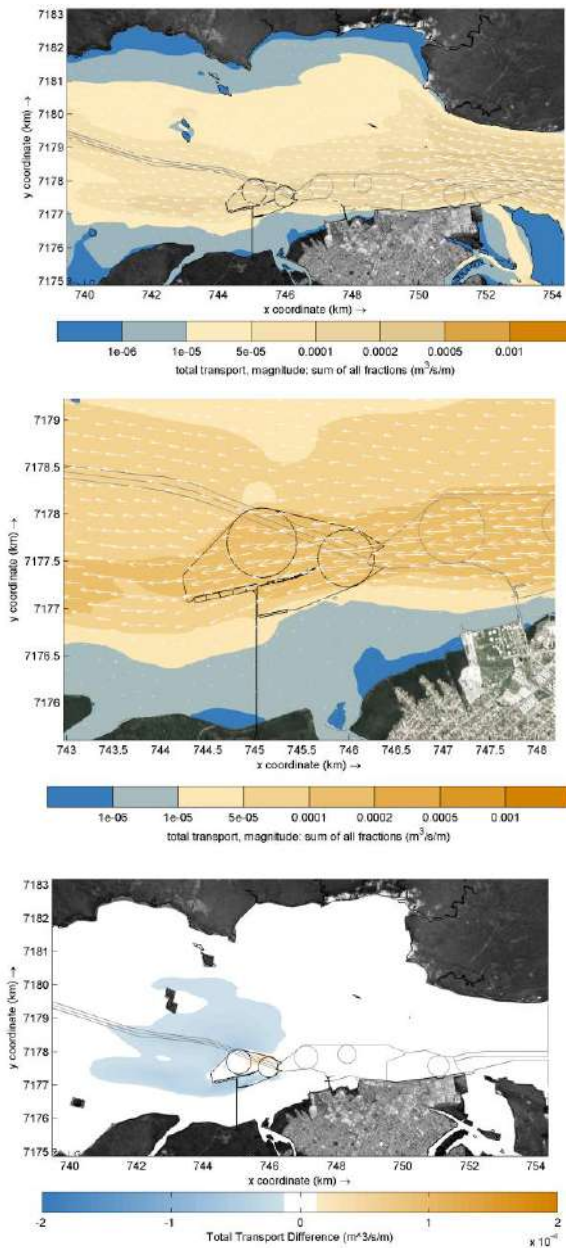


Figura 4.3-1. Transporte Total de Sedimentos ($m^3/s/m$) em maré de SIZÍGIA em períodos de BAIXAMAR e PREAMAR para a configuração COM o Porto Guará e mapa de diferenças na magnitude do Transporte Total de Sedimentos entre a situação SEM e COM o Porto Guará.

Enchente - Sizígia



Vazante - Sízigia

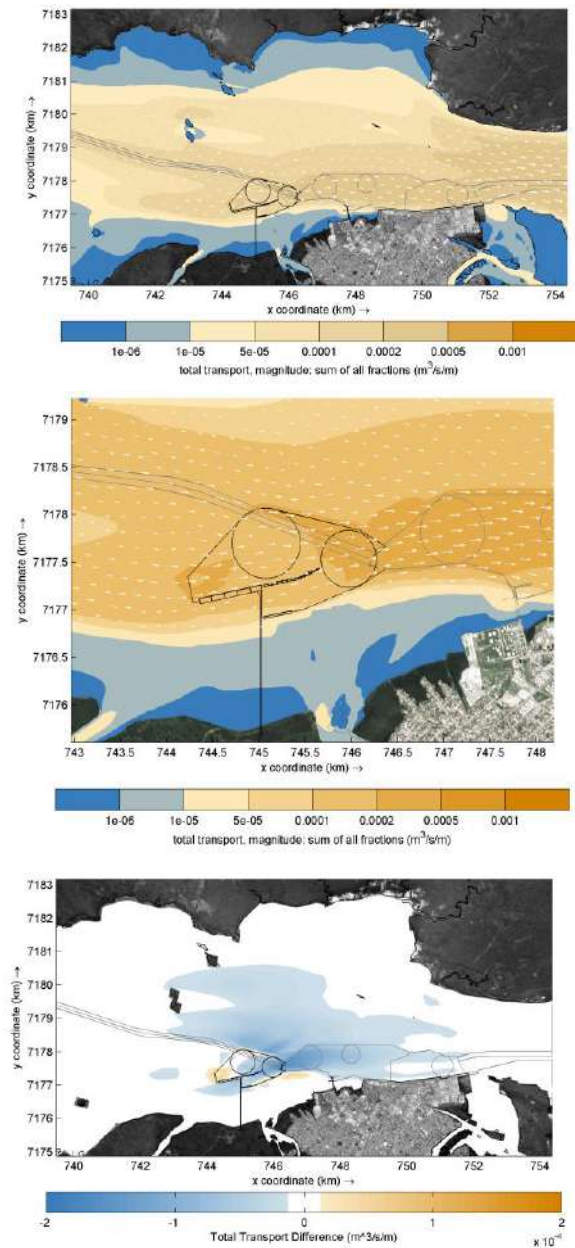
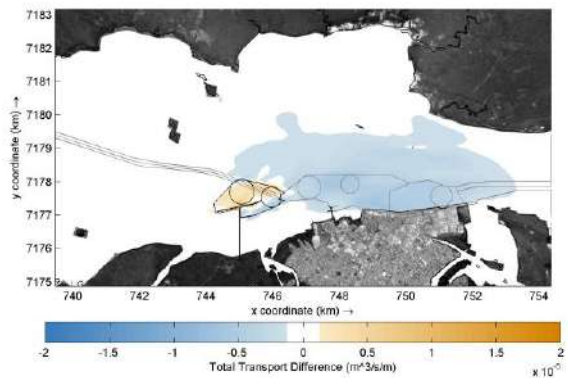
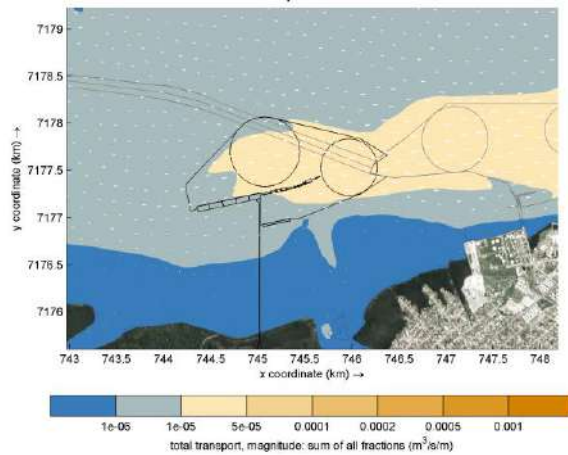
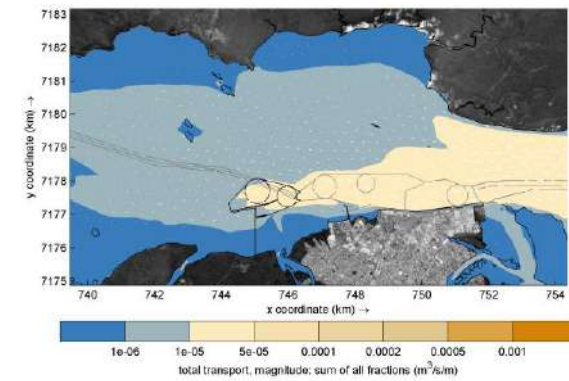


Figura 4.3-2. Transporte Total de Sedimentos ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) em maré de SIZÍGIA em períodos de ENCHENTE e VAZANTE, para a configuração COM o Porto Guará e mapa de diferenças na magnitude do Transporte Total de Sedimentos entre a situação SEM e COM o Porto Guará

Baixamar - Quadratura



Preamar - Quadratura

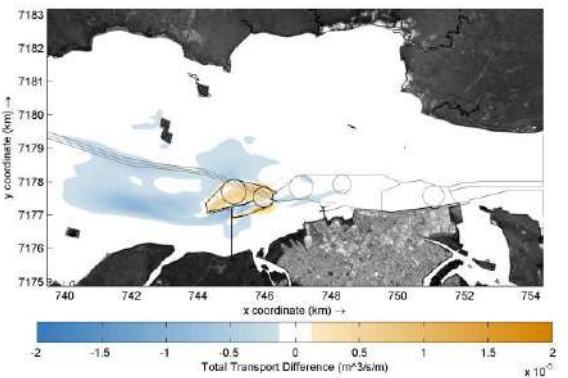
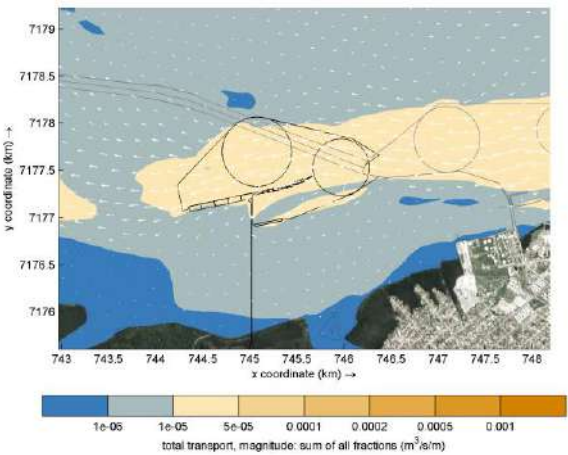
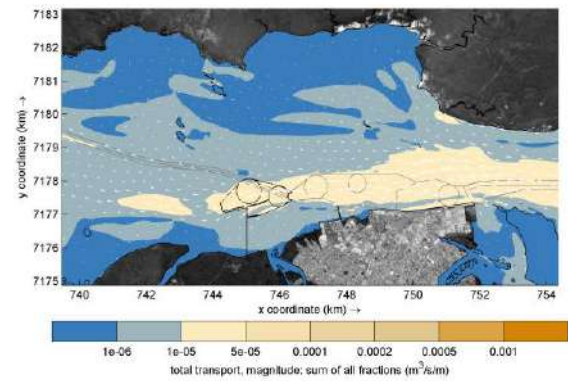
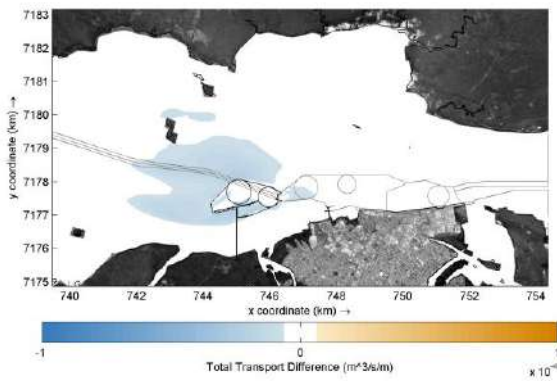
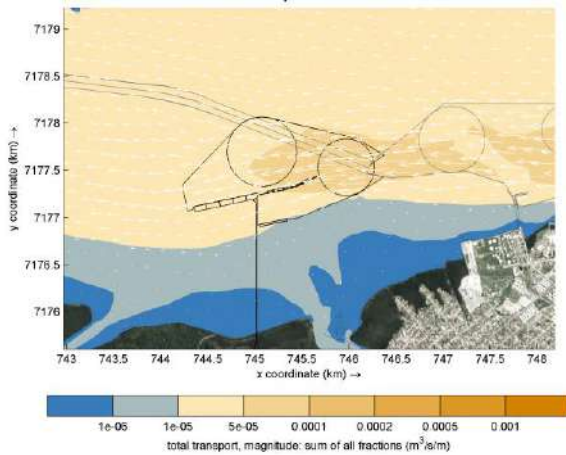
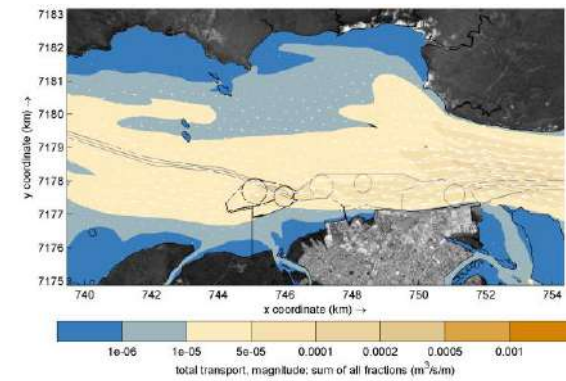


Figura 4.3-3. Transporte Total de Sedimentos ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) em maré de QUADRATURA em períodos de BAIXAMAR e PREAMAR, para a configuração COM o Porto Guará e mapa de diferenças na magnitude do Transporte Total de Sedimentos entre a situação SEM e COM o Porto Guará.

Enchente - Quadratura



Vazante - Quadratura

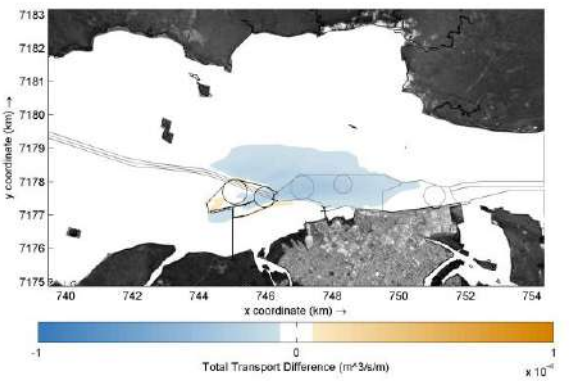
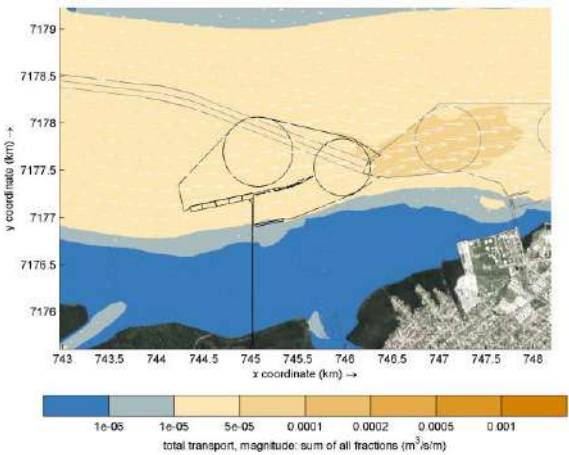
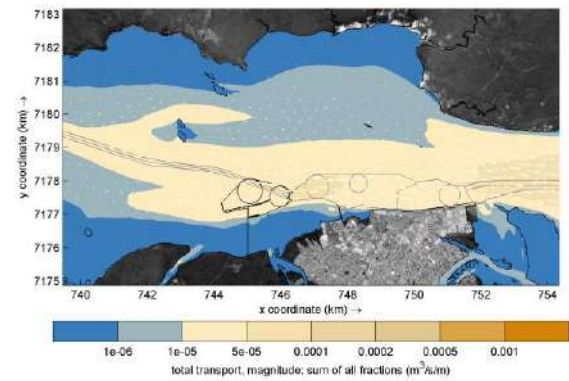


Figura 4.3-4. Transporte Total de Sedimentos (m³/s/m) em maré de QUADRATURA em períodos de ENCHENTE e VAZANTE, para a configuração COM o Porto Guará e mapa de diferenças na magnitude do Transporte Total de Sedimentos entre a situação SEM e COM o Porto Guará.

Os resultados das taxas de transporte total de sedimentos ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) na região do Porto Guará, para o período simulado, mostram que o fluxo sedimentar tem seu escoamento preferencial pelo eixo dos canais de navegação, passando pela área do Porto Guará.

O transporte total de sedimentos é mais intenso nas marés de sizígia, em comparação com a quadratura, alcançando magnitudes até 10x maiores nesse período. Também foi observado que ocorre um maior transporte de sedimentos em períodos de maré enchente do que em períodos de maré de vazante. As menores magnitudes ocorreram em períodos de estofa de preamar e baixamar, tanto em quadratura como em sizígia.

As taxas de transporte total em períodos de sizígia apresentaram valores médios na ordem de $0.87 \cdot 10^{-4}$ a $1.34 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ com máximos de cerca de $3.35 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Em quadratura, as taxas de transporte médio foram da ordem de $0.21 \cdot 10^{-4}$ a $0.33 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, com máximos na ordem de $1.18 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Os resultados mostraram uma variação de 30% nos valores médios e 20% nos valores máximos das taxas de transporte total entre as regiões leste da bacia portuária (mais próxima do canal Charlie) e a região oeste da bacia portuária (mais próxima da saída para o canal de Antonina), tanto em maré de sizígia como em quadratura.

Nos períodos de estofa de maré de enchente (Figuras 4.3-1 e 4.3-3), ocorre um transporte residual de sedimentos que segue pelo canal de navegação, em direção ao interior do estuário (oeste). Na estofa de vazante esse transporte residual é em direção leste, no sentido da desembocadura do estuário.

A distribuição de CSS em pontos de monitoramento no interior da bacia portuária do Porto Guará ao longo de uma série temporal de dois períodos consecutivos de maré de quadratura e sizígia pode ser vista na Figura 4.3-5.

Na área da bacia portuária do Porto Guará, a concentração de sedimentos em suspensão variou de 6.4 mg/ até 30 mg/l, com uma média de 13.1 mg/L. Em período de maré de sizígia a concentração de sedimentos em suspensão variou de 18.9 mg/L a 74.3 mg/L, com uma média de 42.3 mg/L.

As máximas concentrações de sedimentos em suspensão foram observadas nas marés de enchente e em período de sizígia. Nas marés de quadratura, as concentrações de sedimentos apresentaram as menores magnitudes.

Os resultados indicam que os modelos de transporte de sedimentos e morfodinâmica reproduziram bem a concentração média de sedimentos na coluna de água do local de implantação do Porto Guará, estando bem próximos da faixa de 20 mg/L a 40 mg/L (com picos de 60 mg/L) que foram medidos em através de coletas de água no local do Porto Guará (CBI, 2015). Estes resultados também estão dentro da faixa de valores de 15 mg/L a 69 mg/L, medidos nas proximidades da ilha do Gererês (Zem, 2008) e dos valores médios de material em suspensão na coluna de água entre 10 a 80 mg/L, encontrados por Mantovanelli (1999), na região próxima ao Porto de Paranaguá.

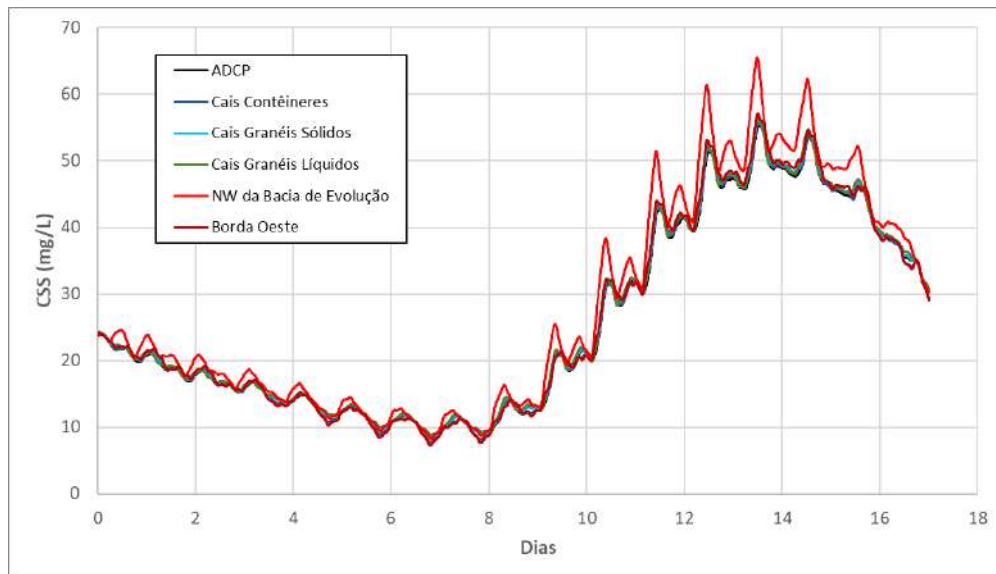


Figura 4.3-5. Concentração de material em suspensão em pontos localizados na bacia portuária do porto Guará para a configuração COM PORTO.

4.4 Evolução Morfodinâmica e Sedimentação Portuária

Os resultados da evolução morfodinâmica, após 5 anos, estão representados na Figura 4.4-1 para ambas as configurações de fundo estuarino com e sem a implantação do Porto Guará.

A sedimentação média estimada em toda a bacia portuária foi de 0.42 m. Na região dos cais do Porto Guará, a sedimentação foi estimada como sendo 0.50 m no cais de Contêineres (10 cm/ano), 0.53 m no Cais de Granéis Sólidos (11 cm/ano) e 0.45 m no Cais de Graneis Líquidos (9 cm/ano).

A evolução morfodinâmica mostra, no entanto, uma sedimentação irregular na região da bacia portuária do Porto Guará, com uma maior tendência deposicional na sua porção oeste, com valores que atingem até 3.7 m junto ao talude definido pela dragagem, do que na porção leste da bacia portuária (junto do canal do Porto de Paranaguá) que apresentou valores mínimos, devido à maior magnitude das velocidades de correntes neste local (Figura 4.4-1).

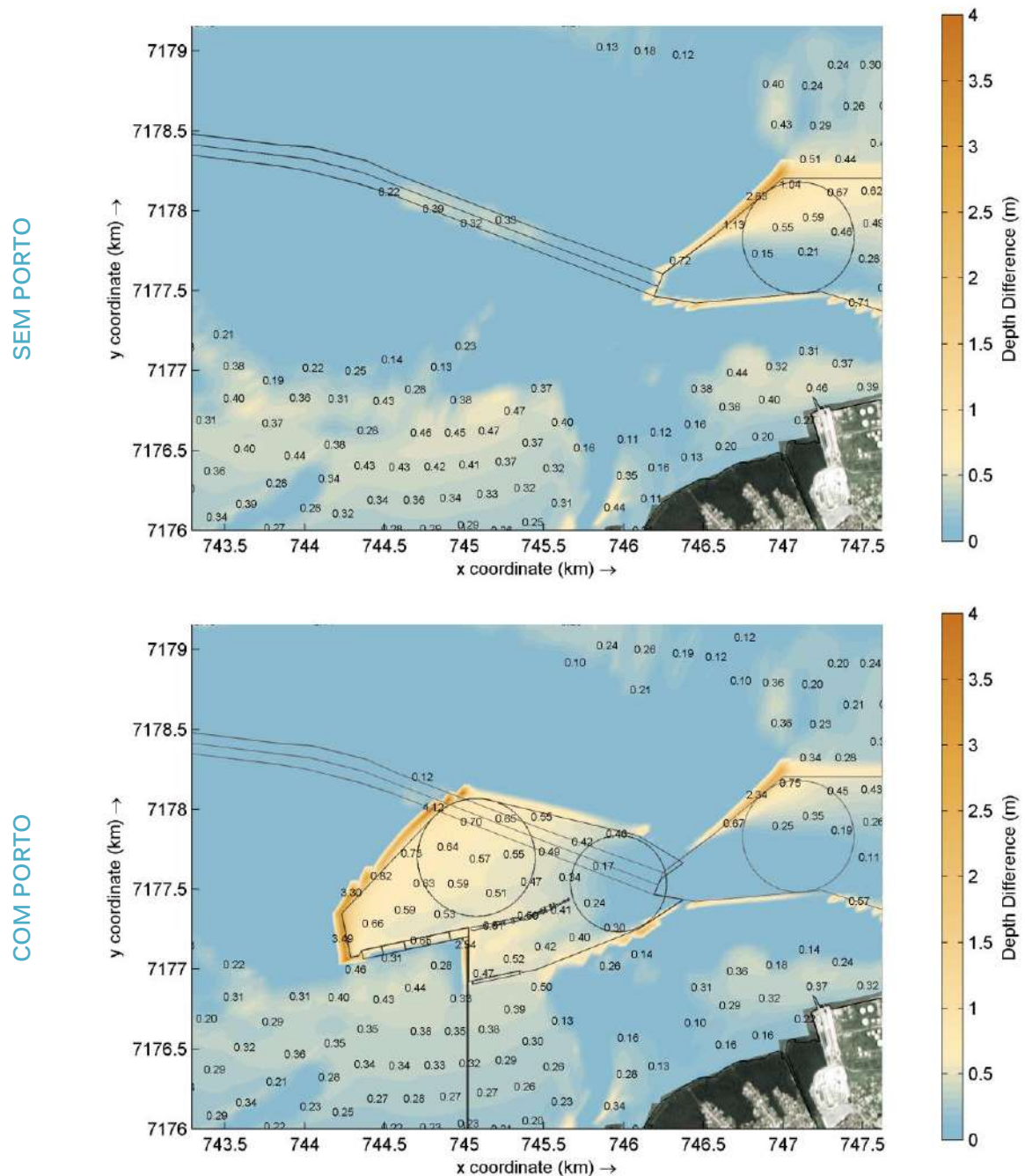


Figura 4.4-1. Sedimentação na Baía de Paranaguá, com destaque para a região do Porto Guará, após 5 anos nas configurações de fundo SEM e COM PORTO.

A Figura 4.4-2 apresenta a diferença entre os resultados da evolução de fundo da Baía de Paranaguá, com e sem a presença do Porto Guará, após 5 anos de evolução. Nesta figura é possível avaliar as alterações previstas nas taxas de sedimentação local decorrentes exclusivamente da instalação do Porto Guará, para o período de 5 anos.

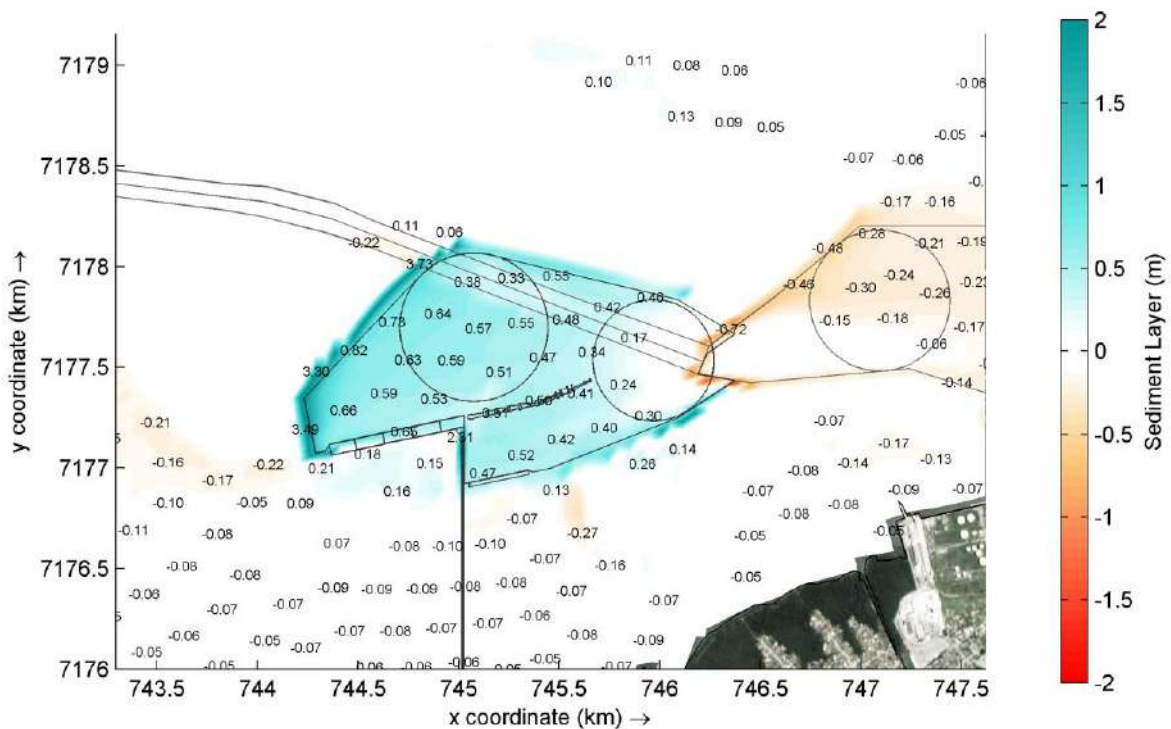


Figura 4.4-2. Variação da sedimentação de fundo na Baía de Paranaguá, após 5 anos, decorrente da implantação do Porto Guará.

Na Figura 4.4-2, os valores negativos representam uma menor sedimentação com relação a situação original (sem porto) e valores positivos significam que a taxa de sedimentação será maior que a que ocorria antes, sem o porto.

Na região do Porto Guará, verifica-se que as diferenças possuem valores positivos, indicando que ocorre um aumento na sedimentação dessa área, em relação às condições sem porto, devido ao aprofundamento da bacia portuária do Porto Guará.

Na região do canal de navegação Charlie 3, que é o canal de acesso ao Porto Guará, as diferenças resultaram em valores negativos de taxas de sedimentação, o que significa que, com a instalação do Porto Guará, deverá ocorrer uma diminuição na sedimentação dessa área (Figura 4.4-1).

Esses resultados indicam que parte do material que seria depositado nessa região do canal Charlie 3, se depositou preferencialmente na bacia portuária do Porto Guará.

Os volumes calculados para a bacia portuária do Porto Guará estão presentes na Tabela 4.3-2 e são representados de forma acumulativa no gráfico da Figura 4.4-2. O volume médio anual estimado a partir das simulações de 5 anos foi de 132.876 m³/ano, resultando numa taxa de sedimentação média de 8.5 cm/ano.

Os volumes anuais não tiveram uma variação significativa dos valores ao longo dos anos simulados, como pode ser visto na Tabela 4.4-2. Entretanto, deve-se considerar que não houve variações nas condições meteoceanográficas e de aporte sedimentar ao longo desses 5 anos de simulação, portanto, estes valores devem ser considerados com parcimônia e deverão ser revistos e recalibrados com mais dados de campo futuramente.

Tabela 4.4-2. Volumes de sedimentação e taxas de assoreamento médio estimados para a bacia portuária de Porto Guará após a implementação da Fase 3.

| ANO | Volume Anual (m ³ /ano) | Sedimentação Média (m/ano) |
|-----|------------------------------------|----------------------------|
| 1 | 137367 | 0.088 |
| 2 | 134718 | 0.086 |
| 3 | 132528 | 0.085 |
| 4 | 130694 | 0.084 |
| 5 | 129072 | 0.082 |

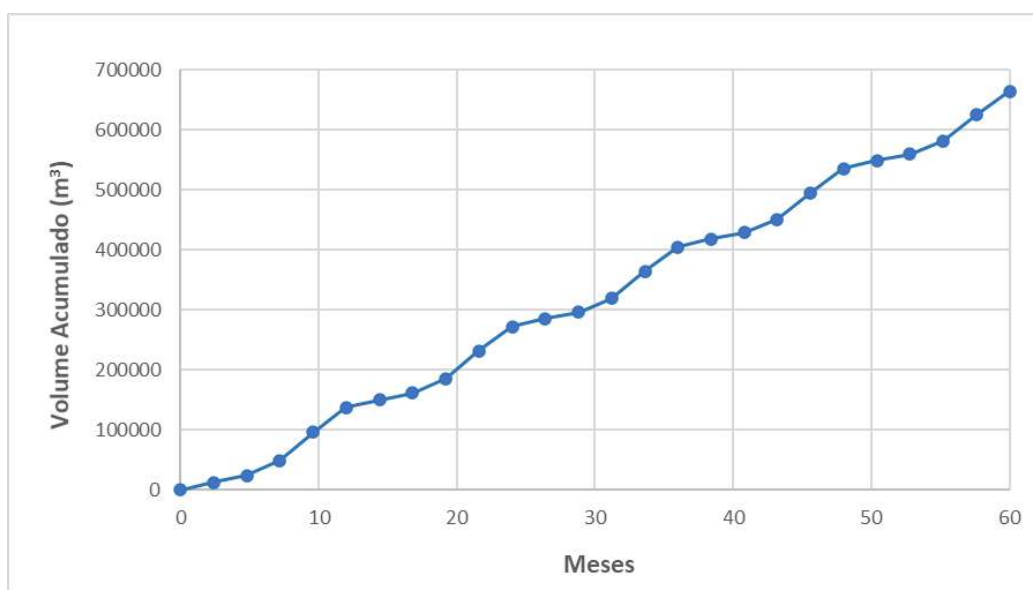


Figura 4.3-3. Volume acumulado previsto para a bacia portuária de Porto Guará após a implementação da Fase 3.

Em decorrência do processo de sedimentação não ser uniforme em toda a bacia portuária do Porto Guará, conforme apresentado na Figura 4.3-2, o assoreamento foi avaliado separadamente em pontos ao longo do cais do Porto Guará (Contêineres, Granéis Sólidos e granéis Líquidos) e na região da bacia portuária (borda oeste e bacia de evolução), localizados na Figura 4.3-4. Estes últimos pontos possuem localização próxima aos respectivos taludes formados pela dragagem do porto.



Figura 4.4-4. Localização dos pontos de monitoramento da concentração de sedimentos em suspensão na bacia portuária do Porto Guará.

Os resultados comparativos estão presentes na Figura 4.4-5, na qual se pode verificar que o assoreamento dos cais do porto, atingem o acréscimo de 0.5 m do fundo quase ao final dos 5 anos, enquanto os pontos com maior sedimentação ultrapassam esse valor em menos de 3 anos. Na borda noroeste da bacia de evolução, a sedimentação ultrapassa 50 cm em 2 anos e 11 meses enquanto na borda oeste a deposição o ultrapassa em 1 ano e 8 meses.

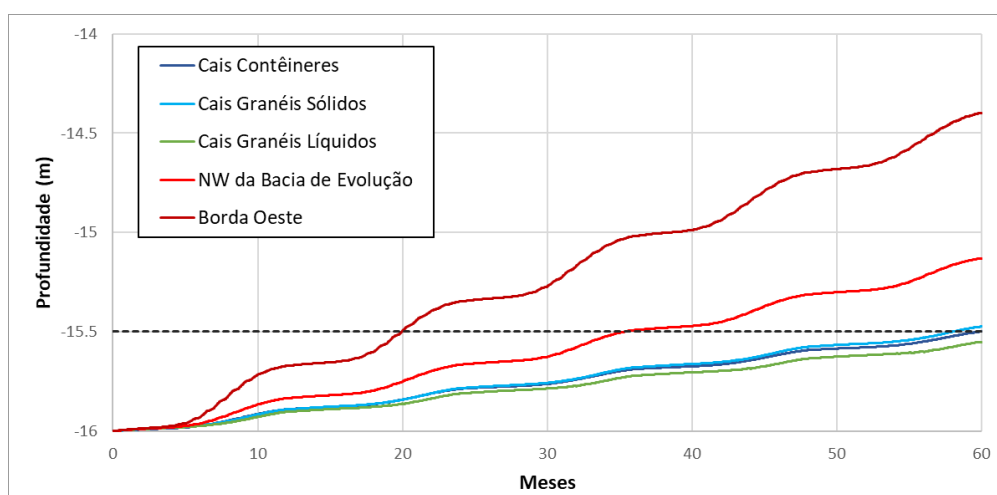


Figura 4.4-5. Evolução estimada da profundidade em pontos da bacia portuária de Porto Guará ao longo de 5 anos e linha de referência de 0.5 m.

Em resumo, a implementação do Porto Guará, com o seu aprofundamento resultante da dragagem para a delimitação da sua bacia portuária, criará uma área (bacia) de deposição de sedimentos, cujo valor estimado é próximo de 133.000 m³/ano.

Essa sedimentação na bacia portuária do Porto Guará não deverá ocorrer de forma uniforme, o que implica na necessidade de um monitoramento das profundidades principalmente nas regiões dos cais e próximo aos taludes de dragagem do setor oeste da bacia portuária. A região na entrada de acesso ao Porto Guará, após a saída do canal Charlie não deverá necessitar de dragagens neste período.

5. CONCLUSÕES

O presente relatório técnico apresentou os estudos de modelagem numérica executadas pela Oceano Digital para avaliar o comportamento hidrodinâmico e estimar as taxas de sedimentação da implantação do Terminal de Uso Privativo (TUP) do Porto Guará, no Complexo Estuarino de Paranaguá, município de Paranaguá, Paraná.

A estratégia de modelagem envolveu as simulações do campo de correntes (hidrodinâmica), o transporte de sedimentos e a evolução de fundo (morfodinâmica), englobando todo o Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) e região marinha adjacente.

As simulações foram realizadas utilizando-se o pacote de modelos numéricos Delft3D (Deltares, 2014). Os parâmetros e ajustes dos modelos hidrodinâmico e morfodinâmico foram configurados nas respectivas etapas de calibração, cujos resultados apresentaram boa aderência do modelo aos dados medidos in situ. A calibração da modelagem morfodinâmica foi efetuada com base no volume de referência de 50.000 m³/ano de assoreamento para a área Charlie 3, fornecido pelo Porto Guará.

Os dados meteoceanográficos, sedimentológicos e os levantamentos batimétricos disponíveis foram utilizados na definição da morfologia de fundo, linha de costa e margem do estuário, caracterização dos sedimentos que compõem o fundo das baías e dos sedimentos em suspensão e na definição de cenários de ventos, marés, vazão e descarga sólida dos principais rios afluentes ao CEP. Nas simulações numéricas, o fundo do CEP foi composto por 4 classes de sedimentos (areia média, areia fina, areia muito fina e silte fino).

Os resultados deste estudo permitiram a análise da influência da implantação do Porto Guará nos padrões de circulação e transporte local de sedimentos e a quantificação do volume anual esperado de deposição sedimentar na região da sua bacia portuária.

Os resultados da modelagem hidrodinâmica sem a presença do Porto Guará confirmam alguns padrões no campo de correntes existentes na Baía de Paranaguá, como as baixas velocidades nas regiões dos terraços de maré (médias entre 0.15 e 0.20 m/s) e um fluxo leste-oeste mais intenso e paralelo aos contornos desses terraços, presente desde o Porto de Paranaguá até o local onde será instalado o Porto Guará. As magnitudes das velocidades nesta faixa atingem valores máximos de 1.6 m/s na maré de vazante e 1.2 m/s na maré de enchente, ambos em maré de sizígia.

A implantação do Porto Guará causará uma diminuição das velocidades de corrente na região da sua bacia portuária, uma vez que haverá um aprofundamento do leito estuarino devido à dragagem para a formação das bacias de manobra e acostagem, principalmente nesta faixa de maiores velocidades de corrente. As estimativas apontam para uma redução média em torno de 25% das magnitudes das velocidades.

Essa diminuição das correntes na região da bacia portuária do Porto Guará causa uma diminuição da competência do transporte de sedimentos, tanto em suspensão como carga de fundo, o que torna essa região da bacia portuária um local propenso à deposição dos sedimentos que, anteriormente, atravessavam esta área.

O transporte total de sedimentos foi mais intenso nas marés de sizígia, em comparação com a quadratura, alcançando valores até 10 vezes maiores. Também foi observado que ocorre um maior transporte de sedimentos em períodos de maré enchente em relação aos períodos de marés de vazante.

A concentração de sedimentos em suspensão na área da bacia portuária do Porto Guará resultante dos modelos variou de 6 a 74 mg/L nas marés de quadratura e sizígia, ficando bem próximos dos valores efetivamente medidos no CEP e descritos na bibliografia consultada.

A evolução morfodinâmica simulada resultou numa sedimentação anual média estimada em 8.5 cm/ano em toda a bacia portuária. Na região dos cais do Porto Guará, a sedimentação foi estimada como sendo de 10 cm/ano no cais de Contêineres 11 cm/ano no Cais de Granéis Sólidos e 9 cm/ano no Cais de Graneis Líquidos.

O volume médio de sedimentação anual estimado a partir dos estudos morfodinâmicos efetuados foi 132.876 m³/ano, considerando toda a área da bacia portuária do Porto Guará.

Considerações Finais

O modelo morfodinâmico foi implementado e calibrado com o valor da taxa de sedimentação histórica do setor Charlie 3, que fica numa área adjacente ao local de implantação do Porto Guará. As modelagens reproduziram razoavelmente bem as dinâmicas essenciais dos sedimentos e da evolução morfodinâmica na área do Porto Guará., apesar das simplificações matemáticas inerentes aos estudos de modelagem numérica e da pequena cobertura espacial e temporal dos dados disponíveis.

Em geral, as próprias estimativas de assoreamento através de dados medidos in situ possuem algumas incertezas, que podem estar relacionadas tanto à falta de pares adequados de levantamentos batimétricos para o seu cálculo, como a precisão das informações batimétricas para as estimativas das taxas de assoreamento dos canais.

Desse modo, recomenda-se que, logo após a finalização das dragagens efetuadas para a instalação do Porto Guará, seja efetuada uma batimetria multifeixe dessa área, seguida de outra após 6 meses para se verificar ajustes de equilíbrio dos taludes e um terceiro levantamento, após 1 ano, para que as taxas locais de sedimentação possam ser estimadas a partir desses dados medidos em campo e também sirvam de base para a calibração de futuras simulações visando a ampliação do terminal ou outras obras de adequação portuária.

A Oceano Digital também recomenda que seja efetuado um levantamento batimétrico das margens e foz do rio Emboguaçu, juntamente com a obtenção de séries temporais de vazão e descarga de sólidos em suspensão, principalmente em períodos de chuva, para se avaliar a ocorrência de aportes significativos de material para a bacia portuária do Porto Guará, uma vez que não existem estações de monitoramento da ANA ou da AGUASPARANA neste local.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁGUASPARANÁ. Geodados. Instituto das Águas do Paraná. Disponível em: www.aguasparana.pr.gov.br. Acesso em março de 2020.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Rede Hidrometeorológica Nacional. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria>. Acesso em março de 2020.
- ANGULO, R. J. 1992. Geologia da planície costeira do estado do Paraná. Tese de Doutorado em Geologia Sedimentar. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. 334 pp.
- APPA e FEESC, 2012. Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto de Paranaguá, PDZPO, Volume 2. Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina (APPA) e Fundação de Ensino de Engenharia de Santa Catarina (FEESC). 322 pp.
- APPA, 2017. Planejamento Estratégico da Infraestrutura Marítima dos Portos do Paraná. PEIM-PR Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina, APPA. 186 P.
- ACQUAPLAN 2011. EIA da Dragagem de Aprofundamento dos Canais de Navegação, Berço de Atracação e Bacias de Evolução do Sistema Aquaviário dos Portos de Antonina e Paranaguá.
- BOOGAARD H.F.P., VAN DEN, M.J.J., HOOGKAMER and HEEMINK, A.W. 1993. Parameter identification in particle models, Stochastic Hydrology & Hydraulics, Vol. 7, 109-130.
- CARNEIRO, J. C. 2013. Dinâmica sedimentar das baías de antonina e paranaguá (paraná, brasil) com base nas tendências de transporte de sedimentos. Dissertação de Mestrado. Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná. Pontal do Paraná. 91 pags.
- CARRILHO, J. C. 2003. Dinâmica sedimentar do fundo estuarino adjacente ao porto de Paranaguá, PR. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná, 106 pp.
- CATTANI, P. E. 2009. Estimativa do Assoreamento Sedimentar ao Longo da Baía de Paranaguá, PR. Monografia de Conclusão de Curso, Centro de Estudos do Mar da Universidade Federal do Paraná, 100 pp.
- CBI, 2015. Levantamento Batimétrico e Modelagem Hidrodinâmica e Morfodinâmica. Terminal Logístico Integrado do Paraná (TERLIP). Relatório Técnico 5270153-420-O-RL-00001. 114pp.
- DELTARES 2014. Delft3D-FLOW: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual, WL | Delft Hydraulics, Delft, Holanda.
- DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Disponível em: https://www.mar.mil.br/dhn/chm/cartas/download/cartasbsb/cartas_eletronicas_Internet.htm.
- FEMAR, 2000. Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras. Publicação da Fundação Estudos do Mar, 281pp.
- HIDROMARES, 2020. Relatório de Desinstalação da Coleta Porto Guará, versão 1.0. Relatório Técnico, 15pp.

- INPH 2014. Estudo de Sedimentação no Canal de Acesso ao Porto de Paranaguá, PR. Relatório Técnico 007-2014. Rio de Janeiro, 41 pp.
- KNOPPERS, B. A.; BRANDINI, F. P.; THAMM, C. A. Ecological studies in the Paranaguá Bay II. Some physical and chemical characteristics. *Nerítica*, Curitiba, v. 2, p. 1-36.
- LAMOUR, M.R.; SOARES, C.R. & CARRILHO, J.C. 2004. Mapas de parâmetros texturais de sedimentos de fundo do Complexo Estuarino de Paranaguá – PR Boletim Paranaense de Geociências, n 55, 77-82.
- LAMOUR, M. R. 2007. Morfodinâmica Sedimentar da Desembocadura do Complexo Estuarino de Paranaguá, PR. Tese de Doutorado da Universidade Federal do Paraná.
- LATTEUX, B. 1995. Techniques for long-term morphological simulation under tidal action. *Marine Geology* 126.
- LESSER, G., J. VAN KESTER AND J.A. ROELVINK, 2000. ON-line sediment transport within Delft3D-FLOW, Report Z2899, WL | Delft Hydraulics.
- LESSER, G.R., ROELVINK, J.A., VAN KESTER, J.A.T.M. AND STELLING, G.S. 2004. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51(2004): 883-915. OCEANWEATHER, 2006. Global Reanalysis of Ocean Waves (GROW). Project Description. 31 pp.
- LOPES, G. M. 2010. Aplicação de um Modelo Numérico Hidrodinâmico para as Baías de Paranaguá e Antonina, PR. Dissertação de Mestrado no Centro de Estudos do Mar da Universidade Federal do Paraná. 137 pp.
- MANTOVANELLI, A. 1999. Caracterização da Dinâmica Hídrica e do Material Particulado em Suspensão na Baía de Paranaguá e em sua Bacia de Drenagem. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná, 169 p.
- MARONE, E.; JAMIYANAA, D. 1997. Tidal characteristics and a variable boundary numerical model for the M2 tide for the Estuarine Complex of the Bay of Paranaguá, PR, Brazil. *Nerítica*, v. 11 (1-2), p. 95-107.
- MIRANDA, T. F. V. B. 2016. Resposta da Hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranaguá-PR a Sistemas Frontais. Dissertação de Mestrado no Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Paraná, 130 pp.
- NOERNBERG, M.A. (2001). Processos morfodinâmicos no complexo estuarino de Paranaguá: um estudo a partir de dados in situ e LandSat TM. Curitiba. 180 f. Tese (Doutorado) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.
- NOERNBERG, M.A.; LAUTERT, L.F.C.; ARAÚJO, A.D; MARONE, E.; ANGELOTTI, R., NETTO JR., J.P.B.; KRUG, L.A., 2006. Remote Sensing and GIS Integration for Modelling the Paranaguá Estuarine Complex - Brazil. *J. Coast. Res.* 39, 1627–1631.
- OCEANO DIGITAL, 2020. Modelagem Hidrodinâmica e de Sedimentação do Porto Guará, Paranaguá (PR). Relatório Técnico RT OD 2020-183 B. Nov. 2020.
- ODRESKI, L. L. R. 2002. Evolução Sedimentar e Batimétrica da Baía de Antonina, PR. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná, 90 pp.

- PLANAVE, 2015 EIA de Ampliação do Porto de Paranaguá. Relatório Técnico RL-B00-H01-1001. Administração do Porto de Paranaguá e Antonina - APPA
- ROELVINK, J.A. and D.J. WALSTRA, 2004. **Keeping it simple by using complex models**. 6th International Conference on Hydrosience and Engineering, Advances in Hydro-Science and -Engineering, Brisbane, Australia.
- RUBINSTEIN, R., 1981. Simulation and the Monte Carlo Method. Wiley, New York.
- RUJESSINK, G. and J. A. Roelvink, 2000. Validation of On-line Mud Transport within Delft3D-FLOW. Tech. rep. 390.
- SOARES C.R.; LESSA G.C.; NETO A.G.; RISENBERG C.E.; SILVA C.B. 1996. Caracterização da distribuição dos sedimentos de fundo das baías de Paranaguá e Antonina, Estado do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 39, SBG, Salvador. Anais, SBG, Salvador. 3:390-393.
- SOUZA, M. M. 2015. Modelagem Computacional do Complexo Estuarino de Paranaguá sob a Influência de Ondas, Marés e Descarga Fluvial. Dissertação de Mestrado, Centro de Estudos do Mar da Universidade Federal do Paraná, 41 pp.
- UFPR. **Observatório do Litoral Paranaense**. Geodados. <http://www.litoral.ufpr.br/>
- VAN RIJN, L.C., WALSTRA, D.J. AND VAN ORMONDT, M., 2004. Description of TRANSPOR2004 and implementation in Delft3D-ONLINE, WL | delft hydraulics, Delft.
- ZEM, R.C. 2008. Hidrodinâmica e fluxo de Material Particulado em Suspensão na região estuarina da Baía de Paranaguá-PR. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade Federal Fluminense. 155 pp.

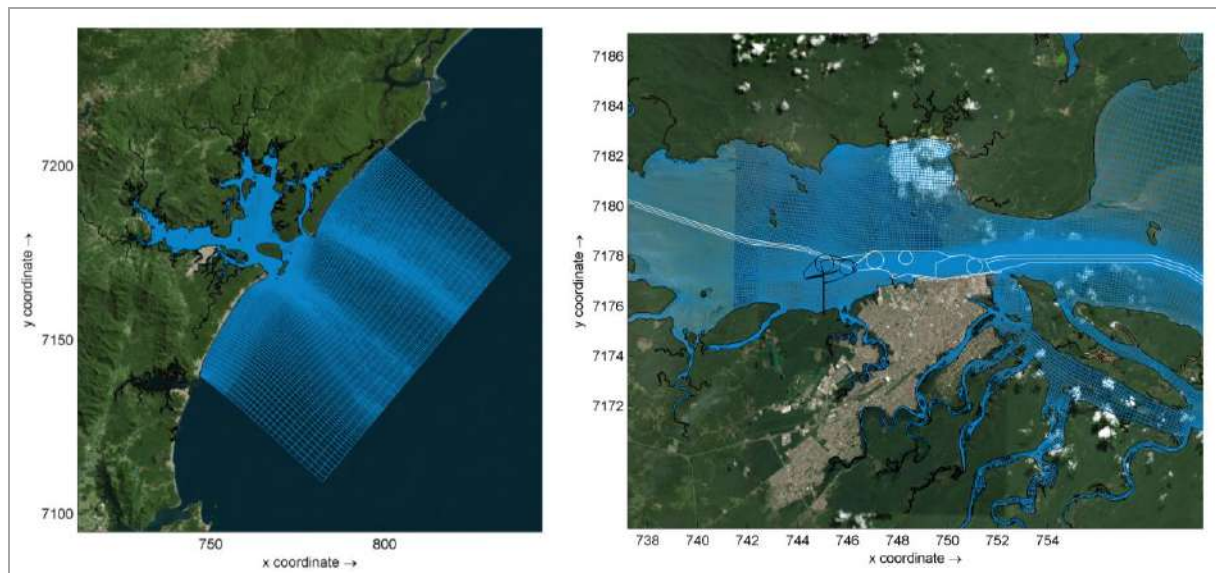
ANEXO A. Dados e Configuração do Modelo Hidrodinâmico

A.1 Domínio Computacional

As simulações hidrodinâmicas do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) abrangem as baías de Paranaguá, Antonina, Laranjeiras Guaraqueçaba e Pinheiros, com seus principais rios afluentes e a região marinha adjacente.

O domínio computacional utilizado nas simulações numéricas foi definido por uma grade curvilinear contendo elementos de tamanho variável. A vantagem deste tipo de discretização é a possibilidade de um maior ajuste das fronteiras aos contornos da região a ser modelada, principalmente quanto à morfologia recortada da linha de costa, curvatura das margens das baías e o meandramento dos rios. Na construção dessas grades, foram obedecidos todos os critérios de ortogonalidade, gradiente e número de Courant indicados em DELTARES (2014).

O domínio de cálculo apresenta uma extensão aproximada de 100 km por 84 km (Figura A.1.1-1) e a grade computacional possui 580 x 438 células nas direções (m,n), resultando um total de 57996 elementos horizontais. Os elementos da grade curvilinear variam de 25 a 50 m, na região portuária, até 2.8 km na fronteira oceânica (offshore) e cerca de 5 m na região dos rios e canais fluviais. Nas simulações da circulação morfodinâmica a estratégia seguida foi a preparação das simulações do escoamento em 2DH.



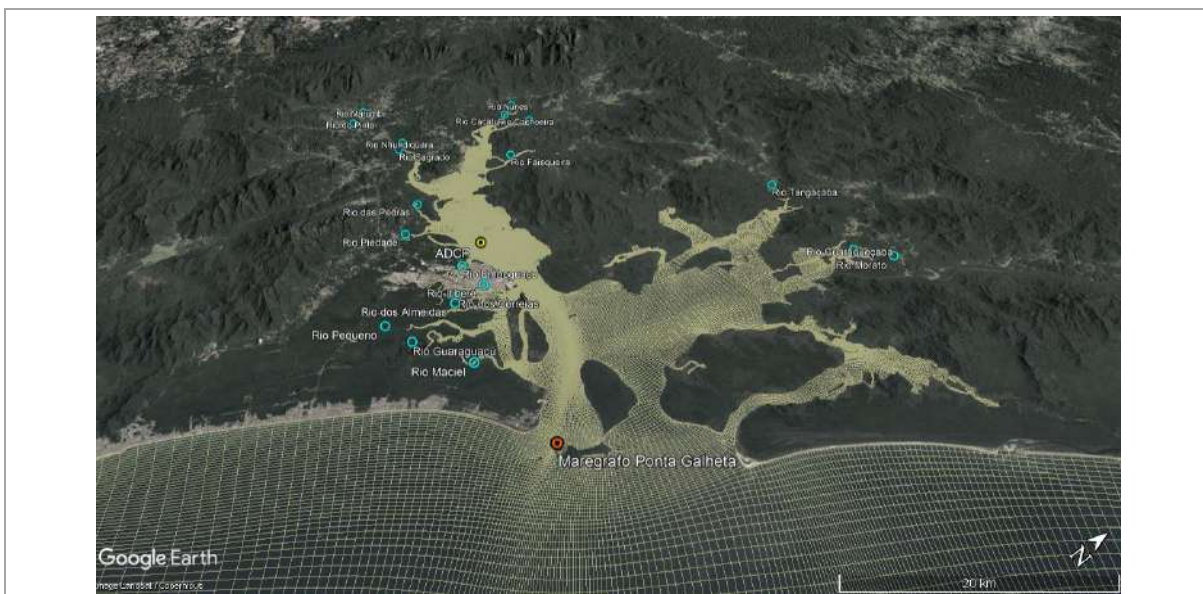


Figura A.1-1. Grade do domínio de cálculo utilizado nas simulações numéricas e detalhe da grade na região do futuro Porto Guará.

A.2 Batimetria do Domínio Computacional

Para a definição do domínio numérico computacional, foram utilizados os dados batimétricos da região portuária e canal de acesso fornecidos pelo TPN/USP (Tanque de Provas Numérico da Universidade de São Paulo), complementados com a digitalização de cartas náuticas e folhas de bordo da DHN/MB (Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil) para a região estuarina e marinha. Nas áreas não contempladas por estes dados, foram utilizadas informações do GeoDados do Observatório do Litoral Paranaense da UFPR (Universidade Federal do Paraná). Os dados utilizados para este estudo estão listados na Tabela A.2-1 e são apresentados na Figura A.2-1.

Embora os dados batimétricos disponíveis variem de escala e origem, todos foram transformados previamente para uma base comum em Datum WGS84, coordenadas UTM e as profundidades foram referidas ao nível médio do mar para sua utilização neste estudo.

A Figura A.2-2 mostra a batimetria interpolada para a área estuarina e marinha e detalhes dos contornos batimétricos na região entorno do terminal portuário previsto.

Tabela A.2-1. Fontes dos dados batimétricos.

| Dados | Data | Fonte |
|---|------|---------|
| Carta nº 1820 Proximidades da Barra de Paranaguá. E 1:100 000 | 2016 | DHN |
| Carta nº 1821 Barra de Paranaguá. E 1:25 000 | 2015 | DHN |
| Carta nº 1822 Portos de Paranaguá e Antonina E 1:25 000 | 2016 | DHN |
| Levantamento Batimétrico da área prevista para o Porto Guará | 2017 | TPN/USP |
| Levantamento Batimétrico do Porto de Paranaguá | | TPN/USP |

| | | |
|--|------------|-------------|
| Levantamento Batimétrico Canal Alfa | | TPN/USP-DTA |
| Levantamento Batimétrico Canal Bravo 1 e 2 | 15-08-2016 | TPN/USP |
| Levantamento Batimétrico Canal Bravo 1 | 30-11-2016 | TPN/USP |
| Levantamento Batimétrico Canal Charlie 3 (interno) | 22-06-2016 | TPN/USP |
| Levantamento Batimétrico Canal Charlie 3 (externo) | 30-06-2016 | TPN/USP |
| Levantamento Batimétrico Baía Antonina até Porto Paranaguá | 2009 | TPN/USP |
| SHP isolinhas de profundidade da baía de laranjeiras e baixios | Aces. 2020 | OLP/UFPR |

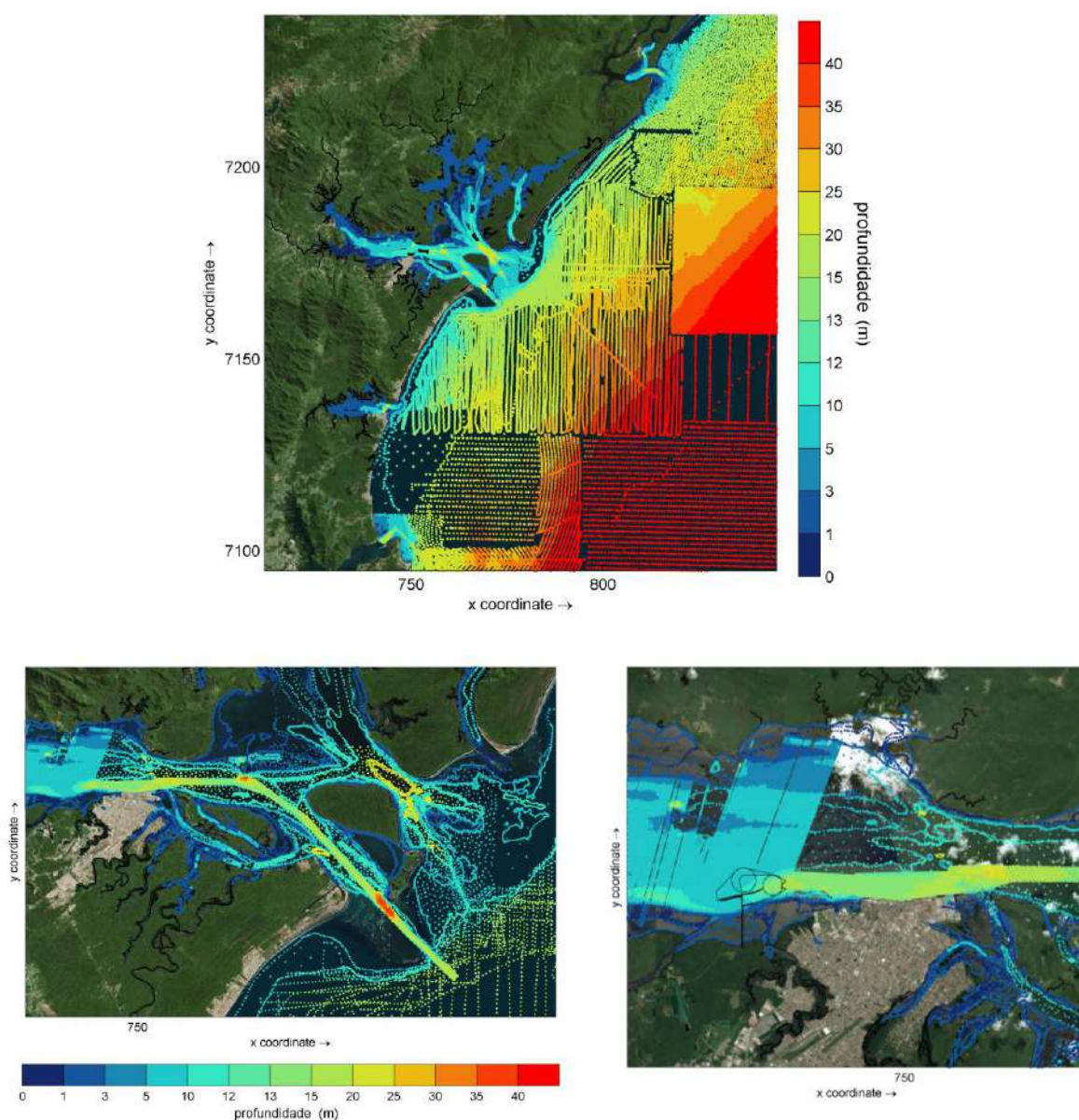


Figura A.2-1. Dados de batimetria utilizados neste estudo. Escala de cores das profundidades em metros. Datum WGS-84/NMM.

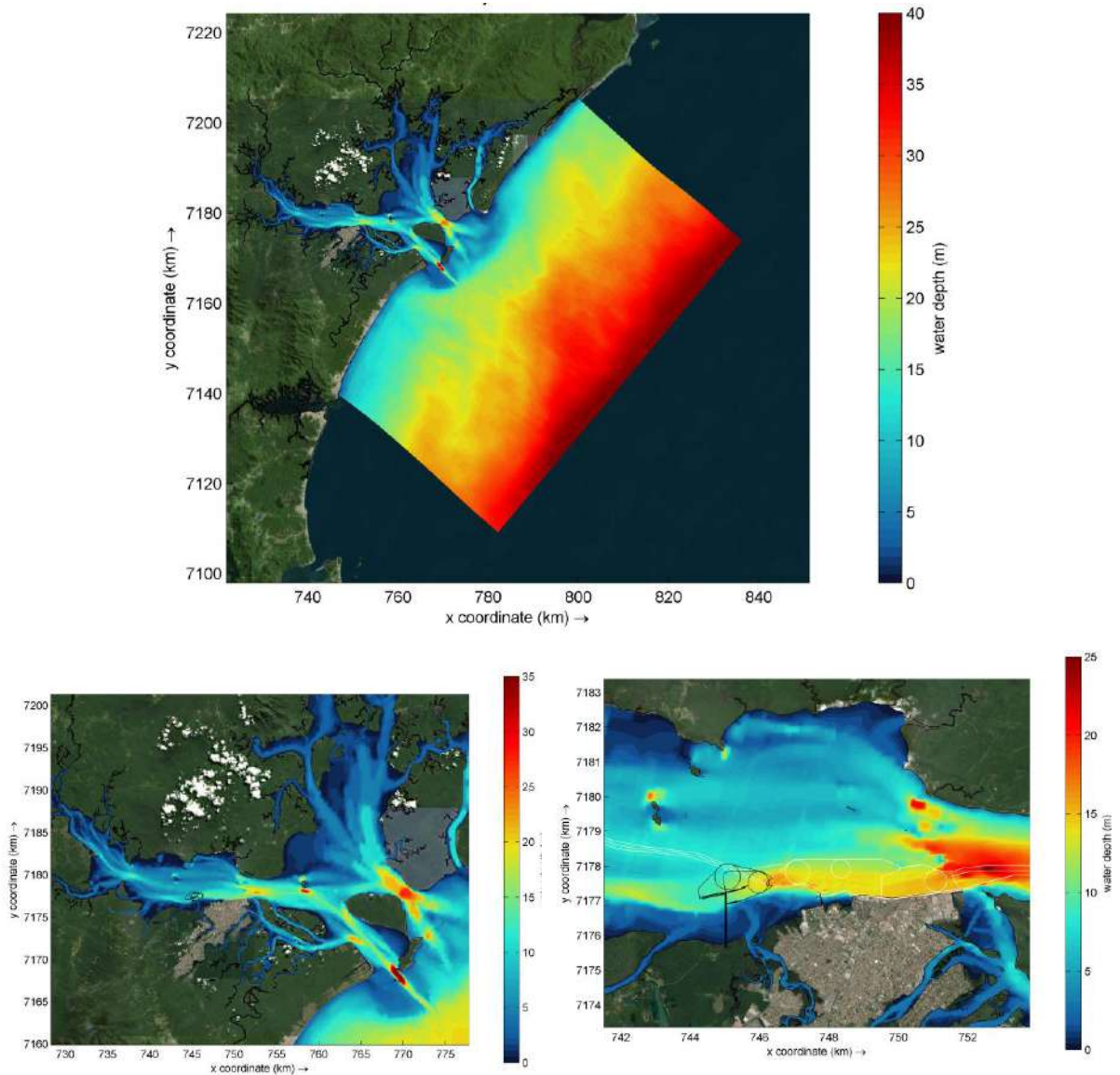


Figura A.2-2. Mapa batimétrico do Complexo Estuarino de Paranaguá e região marinha, com detalhe na região do futuro Porto Guará. Escala de cores das profundidades em metros, DATUM WGS-84/NMM.

A.3 Composição Sedimentar do Fundo Marinho

A caracterização do fundo do Complexo Estuarino de Paranaguá e dos canais de navegação, que fez parte da composição do domínio computacional, foi baseada a partir da análise de dados secundários de sedimentos superficiais e subsuperficiais, que foram extraídos de estudos executados na região (Carneiro, 2013; Aquaplan, 2016; Planave, 2015).

Segundo o estudo de Carneiro (2013), baseado na análise de um total de 484 amostras coletadas em 2012, a distribuição granulométrica das amostras superficiais de fundo indicou que 17% das amostras foram compostas de areia muito finas, distribuídas principalmente na região de Antonina, na região de mistura do estuário próximo a Paranaguá e próximo a desembocadura do estuário. A classe areia fina compôs 53% das amostras e está distribuída junto à desembocadura do estuário e foz de rios próximos a Antonina e ao canal da Cotinga. O grupo de silte fino compôs 29% das amostras e estão localizadas principalmente na região de Antonina próximas a planícies de maré da região e na margem norte (Figura A1.3-1).

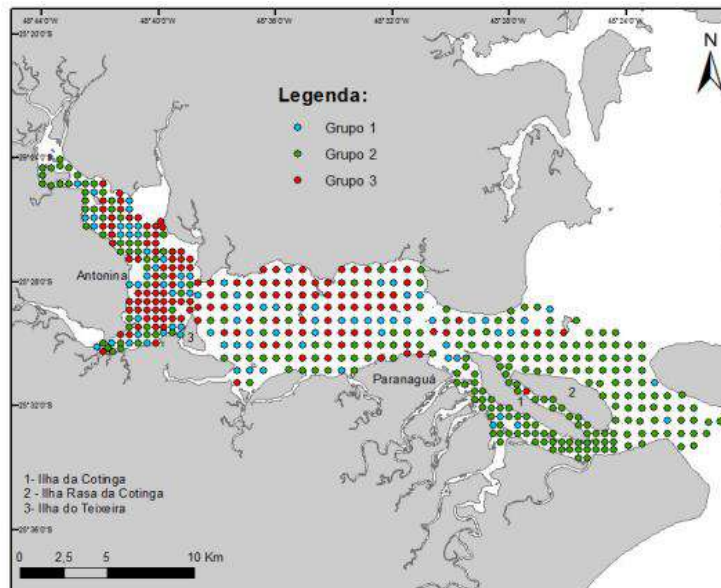


Figura A.3-1 Distribuição granulométrica das amostras superficiais de fundo segundo Carneiro (2013). Grupo 1= Areia Muito Fina; Grupo 2= Areia Fina; Grupo 3= Silte Fino.

Para o canal de navegação, foram analisados os dados de sedimentos superficiais e de subsuperfície obtidos em Aquaplan (2011), os quais foram coletados ao longo de todo o canal de acesso, desde o canal Alfa, na região marinha, até o canal Delta, no Porto de Antonina. Os gráficos da Figura A.3-2 apresentam a compilação da caracterização granulométrica das amostras com os percentuais granulométricos por canal.

Para a região do canal CHARLIE, os dados granulométricos dos estudos do EIA Ampliação do Porto de Paranaguá (Planave, 2015), indicam que nesta área a ocorrência de areias muito finas a finas teve um percentual de 66%, com 23% de siltes médios e grossos, siltes muito finos e finos em 7% e areias médias com 5% do total de sedimentos. As distribuições dos sedimentos mais finos (siltes) ocorrem em forma de manchas esparsas no fundo arenoso, principalmente ao longo do limite norte e sul do canal e a oeste do cais, junto aos berços de atracação.



Figura A.3-2. Percentuais das frações granulométricas das amostras superficiais e de subsuperfície dos canais de navegação do CEP (AMG=areia muito grossa; AG=areia grossa; AM= areia média; AF=areia fina; AMF=areia muito fina, Lama).

A partir da compilação destas informações, as frações granulométricas predominantes foram definidas e agrupadas em 4 classes de sedimentos visando a modelagem morfodinâmica, com um D50 representativo de cada classe de areia média (D50=0.29 mm), areia fina (D50=0.17mm), areia muito fina (D50=0.09 mm) e silte fino (D50=0.008mm)

A.4 Marés e Nível de Água

As componentes de maré utilizadas nas modelagens hidrodinâmicas foram obtidas a partir das publicações da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR). As componentes impostas nas fronteiras abertas referem-se às estações maregráficas Caiobá (PR) e Bom abrigo (SP), cujas localizações estão presentes na Figura A.4-1. As marés foram definidas nas fronteiras oceânicas da grade do modelo hidrodinâmico, isto é, as fronteiras Leste (offshore), Norte e Sul (Figura A.4-1).

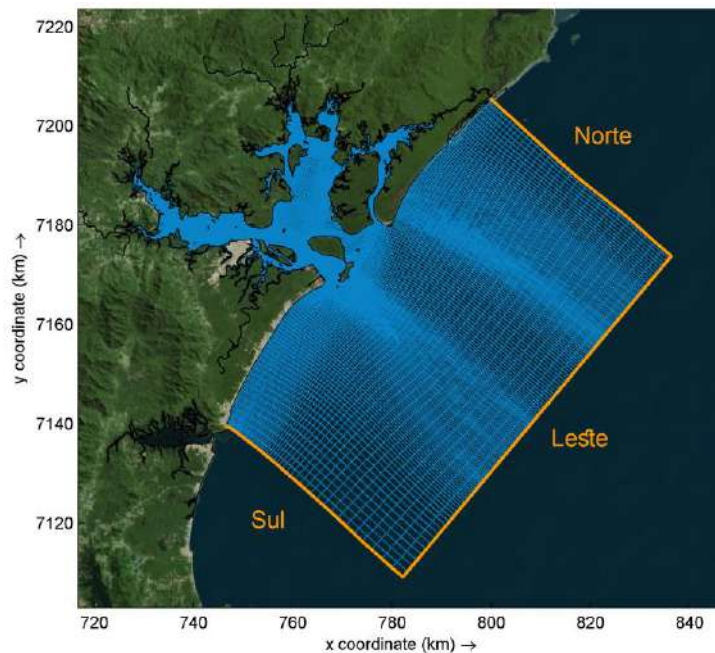


Figura A.4-1. Fronteiras oceânicas abertas do modelo hidrodinâmico.

A maré foi definida a partir das amplitudes e fases da elevação do nível do mar para as principais constituintes harmônicas de maré presentes nas respectivas tabelas apresentadas nas Figuras A.4-2 e A.4-3. Desse modo, não foram consideradas variações do nível de água devido às marés meteorológicas ou efeitos de pressão atmosférica.

| | | | | | | | | | | | |
|---|--|---|--|-----------------------|--|---|--|--------------------------|--|-----------------------|--|
| FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR | | | | | | Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras | | | | | |
| Nome da Estação : | | CAIOBÁ – PR | | | | | | | | | |
| Localização : | | Na Enseada ao lado da Estação do Ferry Boat | | | | | | | | | |
| Organ. Responsável : | | DHN. | | | | | | | | | |
| Latitude : | | 25° 51,4' S | | | | Longitude : | | 48 ° 34,1' W | | | |
| Período Analisado : | | 19/11/95 a 17/12/95 | | | | Nº de Componentes : | | 28 | | | |
| Análise Harmônica : | | Método Almirante Santos Franco | | | | | | | | | |
| Classificação : | | Maré de Desigualdades Diurnas | | | | | | | | | |
| Estabelecimento do Porto: (HWF&C) | | II H 47 min | | | | Nível Médio (Zo): | | 73 cm acima do NR. | | | |
| Média das Preamares Superiores (MHHW) : | | 140cm acima do NR. | | | | Média das Preamares Inferiores (MLHW) : | | 118 cm acima do NR. | | | |
| Média das Baixa-mares Superiores (MHLW) : | | 17 cm acima do NR. | | | | Média das Baixa-mares Inferiores (MLLW) : | | 17 cm acima do NR. | | | |
| CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS | | | | | | | | | | | |
| Componentes | | Semi-amplitude (H) cm | | Fase (g) graus (°) | | Componentes | | Semi-amplitude (H) cm | | Fase (g) graus (°) | |
| Sa | | - | | - | | MU ₂ | | 5,1 | | 107 | |
| Ssa | | - | | - | | N ₂ | | 5,0 | | 146 | |
| Mm | | - | | - | | NU ₂ | | 1,0 | | 137 | |
| Mf | | - | | - | | M ₂ | | 36,0 | | 079 | |
| MTM | | 19,4 | | 317 | | L ₂ | | 2,2 | | 108 | |
| Msf | | - | | - | | T ₂ | | 1,2 | | 084 | |
| Q ₁ | | 3,5 | | 058 | | S ₂ | | 19,9 | | 084 | |
| O ₁ | | 11,2 | | 080 | | K ₂ | | 5,4 | | 084 | |
| M ₁ | | - | | - | | MO ₃ | | 6,2 | | 006 | |
| P ₁ | | 1,5 | | 150 | | M ₃ | | 8,9 | | 206 | |
| K ₁ | | 4,4 | | 156 | | MK ₃ | | 4,0 | | 108 | |
| J ₁ | | - | | - | | MN ₄ | | 5,2 | | 130 | |
| OO ₁ | | - | | - | | M ₄ | | 11,2 | | 171 | |
| MNS ₂ | | - | | - | | SN ₄ | | 1,2 | | 128 | |
| 2N ₂ | | 0,7 | | 213 | | MS ₄ | | 4,6 | | 270 | |
| Referências de Nível: RN-1 no início do Pier. | | | | | | | | | | | |
| Obs: Não há referências a outros períodos | | | | | | | | | | | |
| Código BNDO 60105 | | | | | | | | | | | |

Figura A.4-2. Componentes de maré para a estação maregráfica Caiobá (PR). Fonte: FEMAR

| | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|-----------------------|--|---|--|--------------------------|--|-----------------------|--|
| FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR | | | | | | Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras | | | | | |
| Nome da Estação : | | BOM ABRIGO – SP | | | | | | | | | |
| Localização : | | Ilha de Bom Abrigo – Lado Norte – Praia da Enseada | | | | | | | | | |
| Organ. Responsável : | | DHN / IOUSP | | | | | | | | | |
| Latitude : | | 25° 07,3' S | | | | Longitude : | | 47° 52,0' W | | | |
| Período Analisado : | | 12/12/61 a 12/01/62 | | | | Nº de Componentes : | | 36 | | | |
| Análise Harmônica : | | Método Tidal Liverpool Institute. | | | | | | | | | |
| Classificação : | | Maré de Desigualdades Diurnas. | | | | | | | | | |
| Estabelecimento do Porto: (HWF&C) | | 1 H 50 min | | | | Nível Médio (Zo): | | 69 cm acima do NR. | | | |
| Média das Preamares Superiores (MHHW) : | | 126 cm acima do NR. | | | | Média das Preamares Inferiores (MLHW) : | | 112 cm acima do NR. | | | |
| Média das Baixa-mares Superiores (MHLW) : | | 27 cm acima do NR. | | | | Média das Baixa-mares Inferiores (MLLW) : | | 10 cm acima do NR. | | | |
| CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS | | | | | | | | | | | |
| Componentes | | Semi-amplitude (H) cm | | Fase (g) graus (°) | | Componentes | | Semi-amplitude (H) cm | | Fase (g) graus (°) | |
| Sa | | - | | - | | MU ₂ | | 3,9 | | 090 | |
| Ssa | | - | | - | | N ₂ | | 11,3 | | 108 | |
| Mm | | 3,5 | | 219 | | NU ₂ | | 2,2 | | 108 | |
| Mf | | - | | - | | M ₂ | | 32,4 | | 055 | |
| MTM | | - | | - | | L ₂ | | 6,6 | | 026 | |
| Msf | | 9,1 | | 067 | | T ₂ | | 1,1 | | 071 | |
| Q ₁ | | 3,4 | | 038 | | S ₂ | | 18,0 | | 071 | |
| O ₁ | | 10,6 | | 073 | | K ₂ | | 4,9 | | 071 | |
| M ₁ | | 0,3 | | 337 | | MO ₃ | | 6,2 | | 341 | |
| P ₁ | | 1,8 | | 131 | | M ₃ | | 8,1 | | 192 | |
| K ₁ | | 5,5 | | 131 | | MK ₃ | | 5,1 | | 087 | |
| J ₁ | | 1,5 | | 245 | | MN ₄ | | 6,6 | | 114 | |
| OO ₁ | | 1,5 | | 303 | | M ₄ | | 7,4 | | 128 | |
| MNS ₂ | | - | | - | | SN ₄ | | 2,8 | | 351 | |
| 2N ₂ | | 1,5 | | 161 | | MS ₄ | | 7,1 | | 210 | |
| Referências de Nível: RN-1, RN-2 e RN SPH instaladas em pedras existentes na Praia da Enseada da Ilha do Bom Abrigo. | | | | | | | | | | | |
| Obs: Outros Períodos: 07/10/68 a 07/11/68, 22/01/83 a 04/03/83 | | | | | | | | | | | |
| Código BNDO: 50255 | | | | | | | | | | | |

Figura A.4-3. Componentes de maré para a estação maregráfica Bom Abrigo (SP). Fonte: FEMAR

A Figura A.4-4 apresenta, como exemplo, a variação das marés de sizígia e quadratura relativas a maio e junho de 2020, meses referentes à calibração (Capítulo 3), cujos dados correspondem às fronteiras oceânicas Norte e Sul da grade hidrodinâmica.

Os resultados das simulações numéricas confirmam a maré presente na costa do Paraná classificada como micromaré, predominantemente semidiurna, apresentando desigualdades diurnas e amplitudes médias de 1.4 m e 1.7 m em períodos de quadratura e sizígia, respectivamente (Marone e Jamiyanaa, 1997).

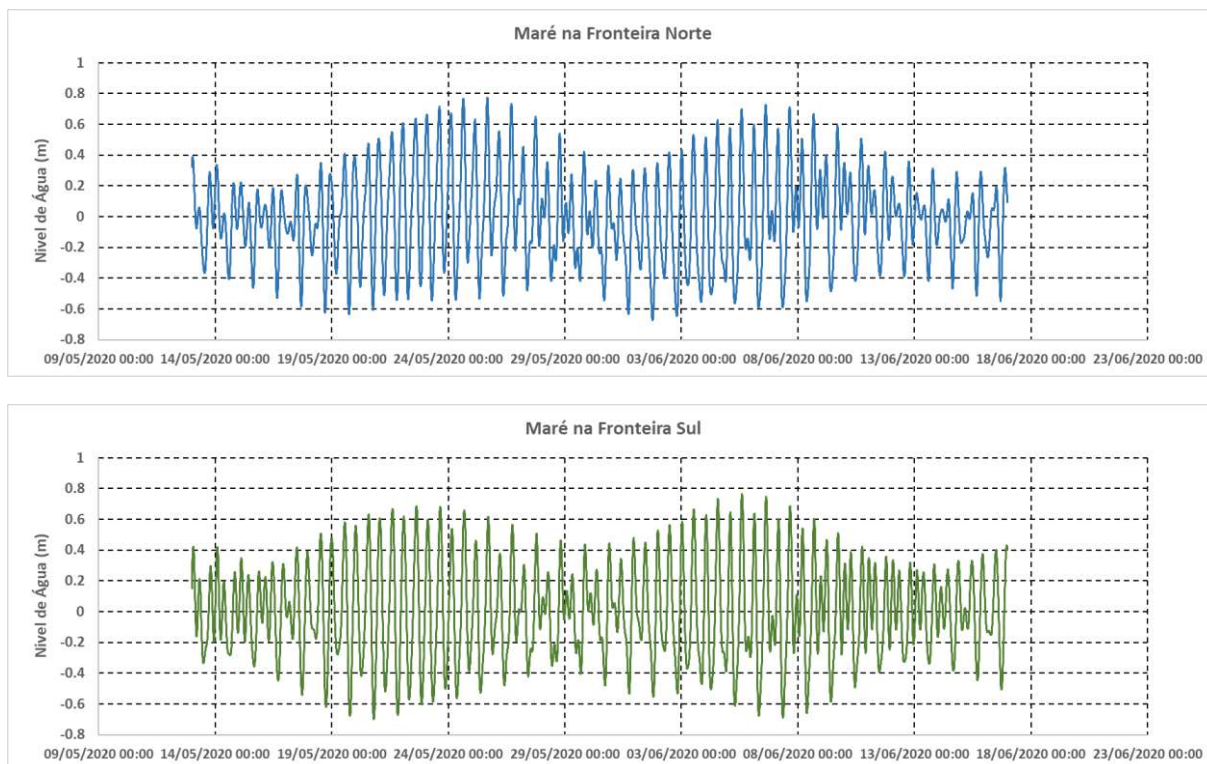


Figura A.4-4 Variação do nível de água nas fronteiras norte e sul do modelo hidrodinâmico devido às marés astronômicas.

Na região interna do estuário, a forma convergente das baías de Paranaguá e Antonina (condição hipersíncrona) induz a uma amplificação das amplitudes de maré, o que resulta numa classificação mista de micromarés com episódios de mesomarés em situações de sizígia (Mantovanelli, 1999). A Figura A.4-5 apresenta um exemplo de amplificação da amplitude das marés entre o marégrafo da Galheta (foz) e a posição do ADCP, local do Porto Guará (interior do estuário), mostrando que o modelo hidrodinâmico representa este fenômeno.

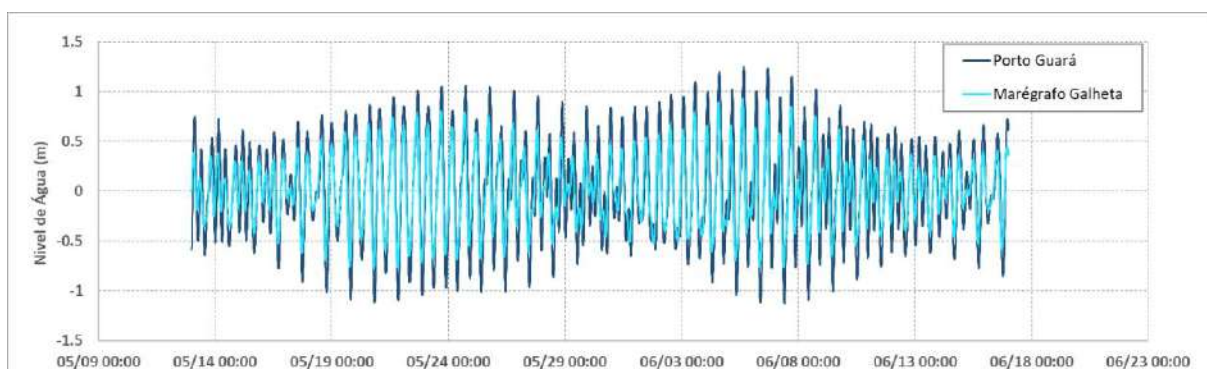


Figura A.4-5. Níveis de água nos marégrafos da Galheta e Porto Guará (posição do ADCP).

Devido à extensão do estuário de Paranaguá, a propagação da onda de maré gera uma defasagem entre os níveis presentes na foz e nas porções mais internas do estuário de

Paranaguá. A Figura A.4-6 apresenta um detalhe da Figura A.4-5, mostrando defasagens temporais de 1:00 hora entre dois picos consecutivos de maré alta e maré baixa, obtidas dos resultados do modelo hidrodinâmico nos pontos do marégrafo da Galheta e no Porto Guará (local do ADCP), durante uma maré de sizígia. Esta defasagem de fase está em acordo com os valores de Marone e Jamiyanaa (1997), que estimaram o intervalo de 1:00 a 1:10 entre a Galheta e Antonina para a mesma situação de maré.

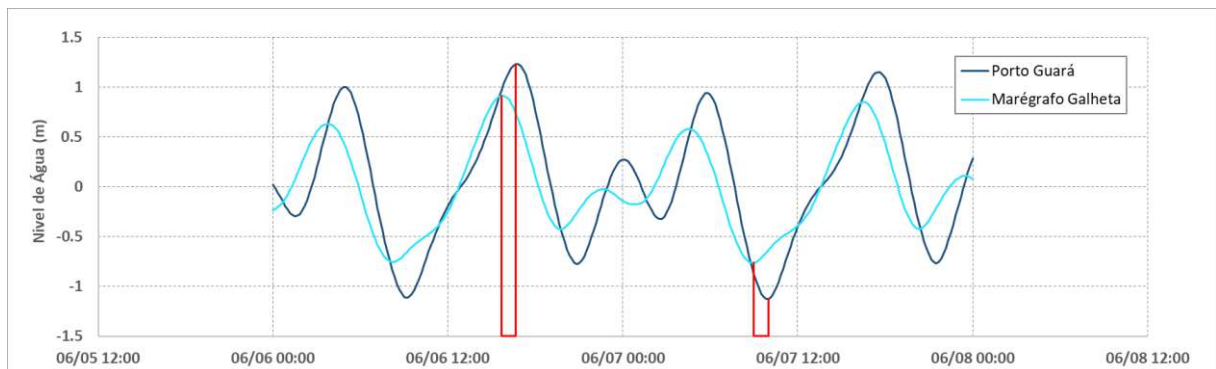


Figura A.4-6. Níveis de água e defasagem temporal (linhas em vermelho) entre os níveis de água no marégrafo da Galheta e no Porto Guará (posição do ADCP).

A.5 Ventos

Para o estudo hidrodinâmico do Complexo Estuarino de Paranaguá, foram analisados e utilizados os dados de ventos provenientes do modelo atmosférico IFS (*Integrated Forecast System*) do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecast*), cujo local dos dados corresponde a um ponto posicionado próximo ao Porto de Paranaguá (Figura A.5-1, Tabela A.5-1). Os ventos deste conjunto de dados estão disponibilizados numa taxa tri-horária e abrangem o intervalo de 1990 a 2019 (30 anos completos).



Figura A.5-1. Localização do ponto de obtenção do conjunto de ventos ECMWF analisados neste estudo e o local de instalação do ADCP. Imagem Google Earth.

Tabela A.5-1. Coordenadas do local de obtenção do conjunto de ventos do ECMWF.

| LOCAL | UTM-X | UTM-Y | LATITUDE | LONGITUDE |
|--------------|----------|-----------|-------------|-------------|
| Ventos ECMWF | 751294.3 | 7177324.9 | 25° 30.0' S | 48° 30.0' S |

O processamento dos 30 anos de dados de ventos (1990 a 2019) está resumido na forma de rosa dos ventos (Figura A.5-2) e pelo seu diagrama de dispersão direcional (Figura A.5-3). Ambos os resultados apresentam graficamente as várias direções dos ventos, medidos próximos ao Porto de Paranaguá, em relação à ocorrência das classes de intensidade (velocidade).

Nas rosas dos ventos, as direções são representadas por setores radiais, com ocorrências em porcentagem e valores dispostos em cores (Figura A.5-2). Na dispersão direcional, há um maior detalhamento do conjunto de dados de ventos dado pelos valores numéricos de ocorrência em função de classes de intensidade e direção (Figura A.5-3).

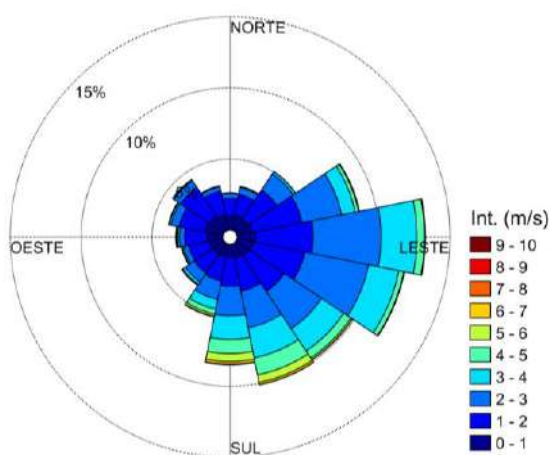


Figura A.5-2. Rosa dos ventos resultante do processamento dos 30 anos de dados do ECMWF.

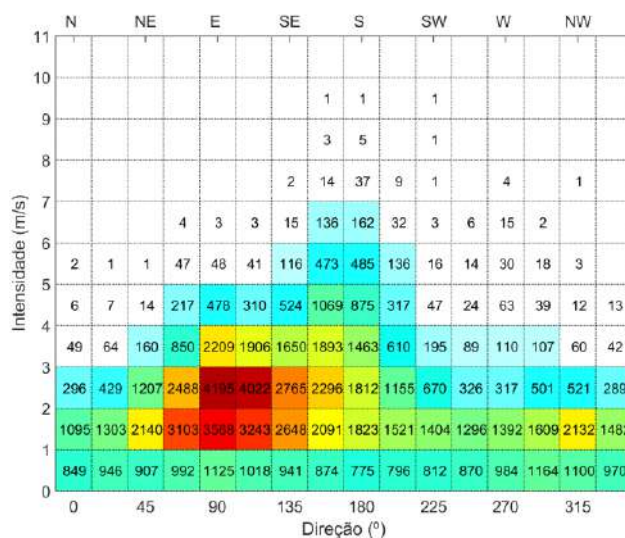


Figura A.5-2. Diagrama de dispersão dos ventos de 1990 a 2019 no ponto ECMWF. Os valores indicam o número de ocorrências.

Do conjunto de dados de ventos analisado, verifica-se que há uma dominância dos setores Leste (24.6%) e Sudeste (20.5%), seguido dos setores Sul (16.5%) e Nordeste (10.7%), Tabela A.5-2. Os demais setores NW, SW, W e N alcançaram, respectivamente, 8.2%, 7.3%, 6.8% e 5.4% do total de ventos.

Na região da Baía de Paranaguá, os ventos provenientes dos setores NE e E são predominantes durante todo o ano e essa característica resulta na sua frequência conjunta próxima de um terço do total de ventos medidos (35.3%). Os ventos dos setores SE, S e SW, geralmente associados à formação de sistemas frontais, somaram 44.3% do total de ventos, indicando as instabilidades presentes na região.

As velocidades médias dos ventos são baixas, menores que 3 m/s, e as velocidades máximas não ultrapassaram 10 m/s (Tabela A.5-2). De qualquer forma, os ventos provenientes de S, SE e E foram aqueles que apresentaram os maiores valores de intensidade.

A influência dos ventos na hidrodinâmica da Baía de Paranaguá e, em especial, a região de entorno do Porto Guará, foi verificada por meio de simulações considerando os cenários dos ventos representativos mais críticos dos 8 setores de direção presentes na Tabela A.5-2. Estes testes de sensibilidade mostraram que os padrões de circulação hidrodinâmica resultantes no interior da Baía de Paranaguá são bastante semelhantes, independentemente da direção do vento.

Tabela A.5-2. Resumo dos ventos ECMWF por setores de direção.

| Setor | Velocidade Média (m/s) | Direção Média (°) | Velocidade Máxima (m/s) | Frequência (%) |
|-------|------------------------|-------------------|-------------------------|----------------|
| N | 1.30 | 0.0 | 5.78 | 5.4 |
| NE | 1.72 | 50.5 | 6.58 | 10.7 |
| E | 2.25 | 91.7 | 6.74 | 24.6 |
| SE | 2.39 | 135.4 | 8.49 | 20.5 |
| S | 2.74 | 176.7 | 9.26 | 16.5 |
| SW | 1.71 | 220.9 | 9.17 | 7.3 |
| W | 1.47 | 271.0 | 7.95 | 6.8 |
| NW | 1.38 | 313.7 | 7.25 | 8.2 |

A Figura A.5-3 ilustra os resultados dos ventos críticos de Sul (9.3 m/s) e Leste (6.7 m/s) em comparação com os resultados das simulações sem ventos, onde se pode verificar que os ventos possuem influência mínima nas correntes na região do Porto Guará. As diferenças máximas encontradas para as componentes U e V foram de 1.2 cm/s, no máximo, o que corresponde a 1.1% e, para o nível de água, a diferença foi de 3.6 cm, o que corresponde a 1.8%.

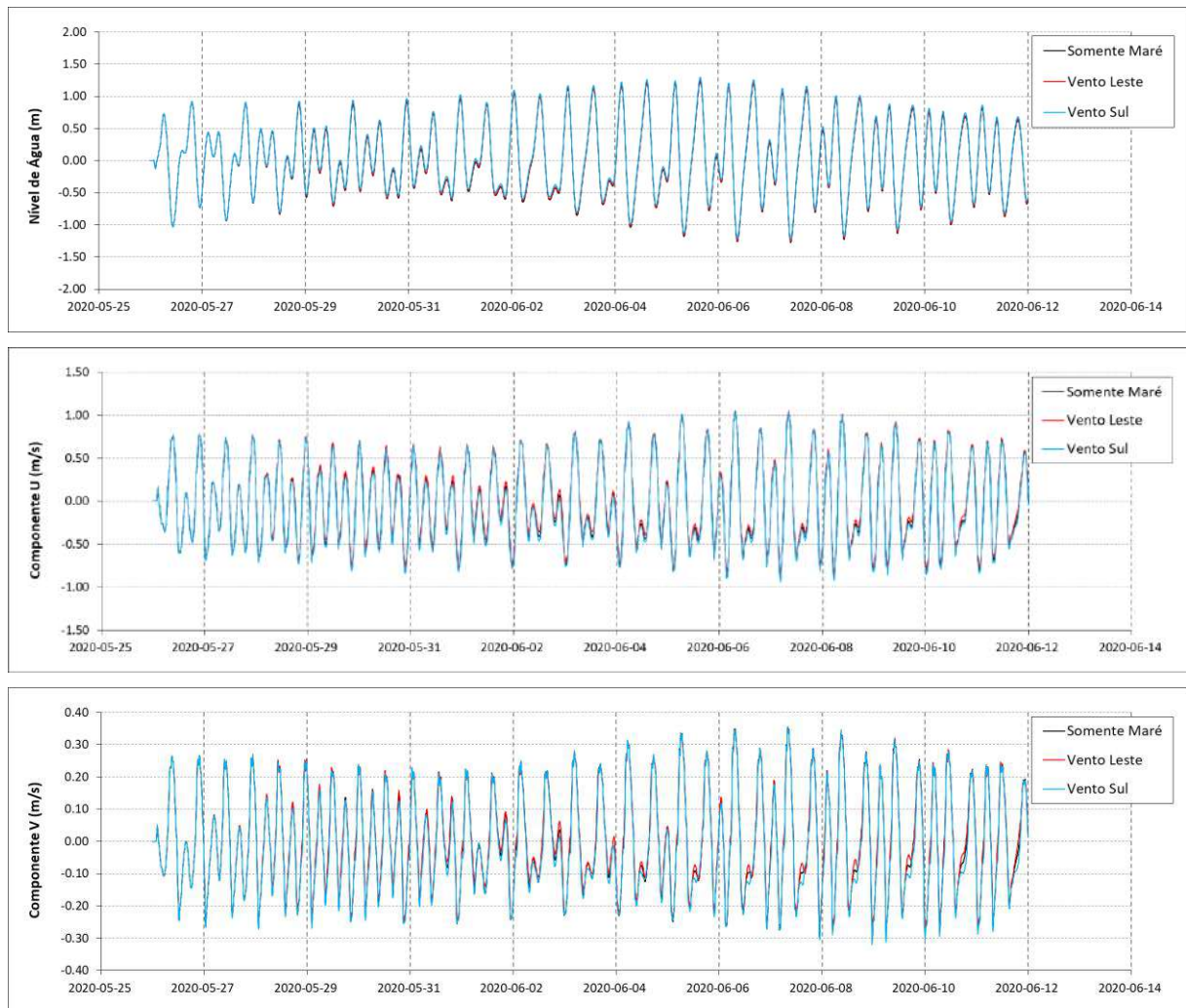


Figura A.5-3. Comparação dos níveis de água e componentes U e V das correntes resultantes no ponto do ADCP para as simulações considerando somente a maré e com a ação dos ventos críticos de Leste e Sul.

A.6 Vazão dos Rios Tributários

Os valores de vazão dos principais rios tributários do Complexo Estuarino de Paranaguá, presente em Mantovanelli (1999), foram atualizados para sua inclusão nas condições de fronteira das modelagens hidrodinâmica e morfodinâmica.

A Tabela A.6-1 resume os períodos dos dados de vazão utilizados neste estudo e a Figura A.6-1 apresenta o posicionamento das estações fluviométricas que contêm dados disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) e pela agência estadual Águas do Paraná.

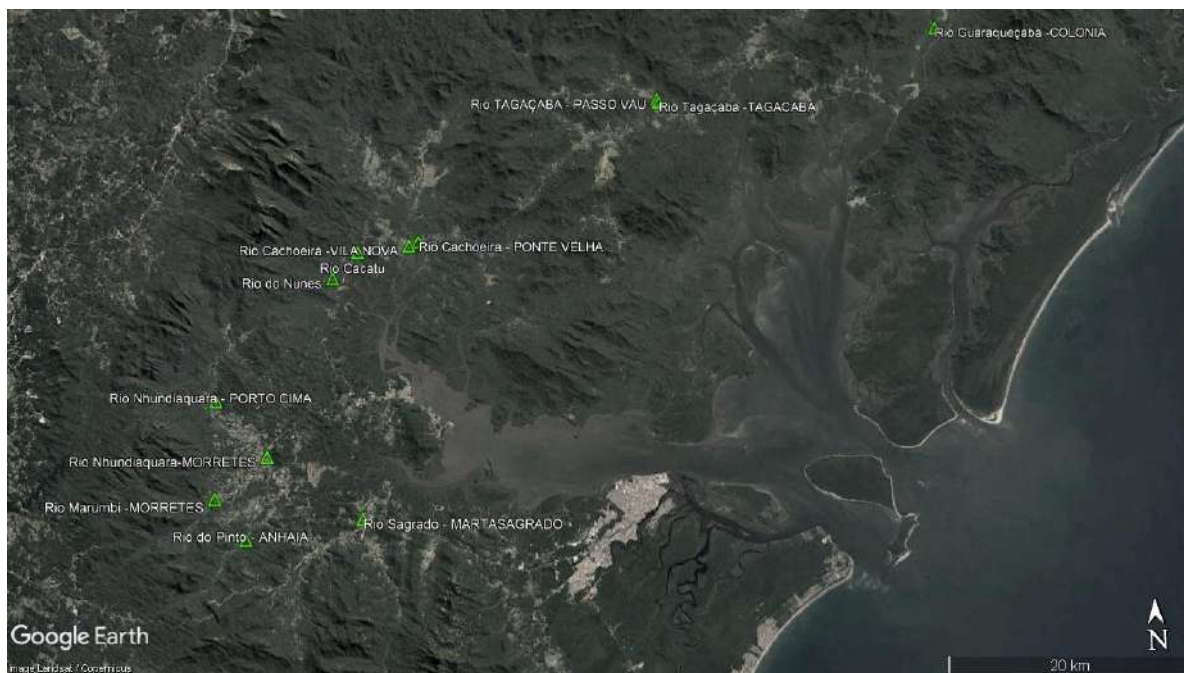


Figura A.6-1. Localização das Estações Fluviométricas com dados de vazão disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) e pela agência estadual Águas do Paraná.

A Figura A.6-2 apresenta graficamente os valores de vazão em épocas de cheia e seca dos rios afluentes, com destaque para o Rio Cachoeira como o principal contribuinte de água doce deste sistema estuarino.

Tabela 1.1-1. Vazões do período de calibração, das épocas de seca e cheia e os respectivos períodos de medição dos principais rios afluentes do Complexo Estuarino de Paranaguá.

| Rio | Início | Fim | SECA (m ³ /s) | CALIBRAÇÃO (m ³ /s) | CHEIA (m ³ /s) |
|--------------|--------|------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Cachoeira | 2006 | 2015 | 38.5 | 45.4 | 66.9 |
| Nhundiaquara | 2000 | 2019 | 7.8 | 10.6 | 20.0 |
| Tangaçaba | 2000 | 2019 | 6.5 | 9.6 | 17.8 |
| Marumbi | 2000 | 2009 | 4.1 | 5.8 | 13.7 |
| Guaraqueçaba | 2000 | 2019 | 3.3 | 5.0 | 10.4 |
| Cacatú | 2006 | 2008 | 1.6 | 6.6 | 7.1 |
| Pinto | 2000 | 2019 | 2.7 | 3.6 | 7.2 |
| Sagrado | 2006 | 2019 | 2.2 | 3.4 | 6.7 |
| Nunes | 2006 | 2015 | 2.6 | 3.0 | 4.9 |

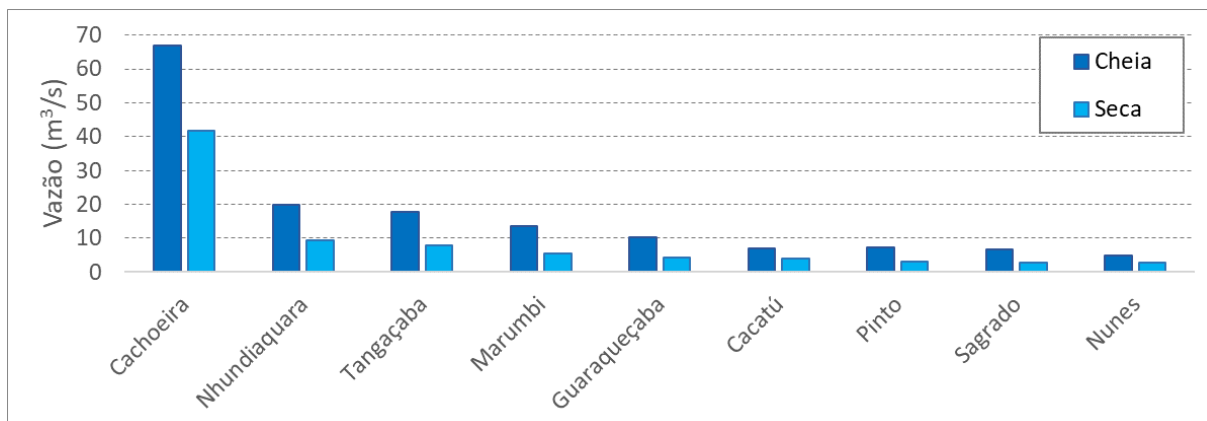


Figura A.6-2. Comparação entre as vazões das épocas de cheia e seca dos principais rios afluentes do Complexo Estuarino de Paranaguá.

A Figura A.6-3 apresenta as curvas médias, máximas e mínimas das vazões dos principais rios do Complexo Estuarino de Paranaguá em relação aos meses do ano. Estes valores estão relacionados a intervalos anuais diferentes (Tabela A.6-2), conforme a disponibilidade dos dados hidrológicos, existindo 7 séries com mais de 10 anos e 4 séries com 20 anos de medições fluviais de vazão.



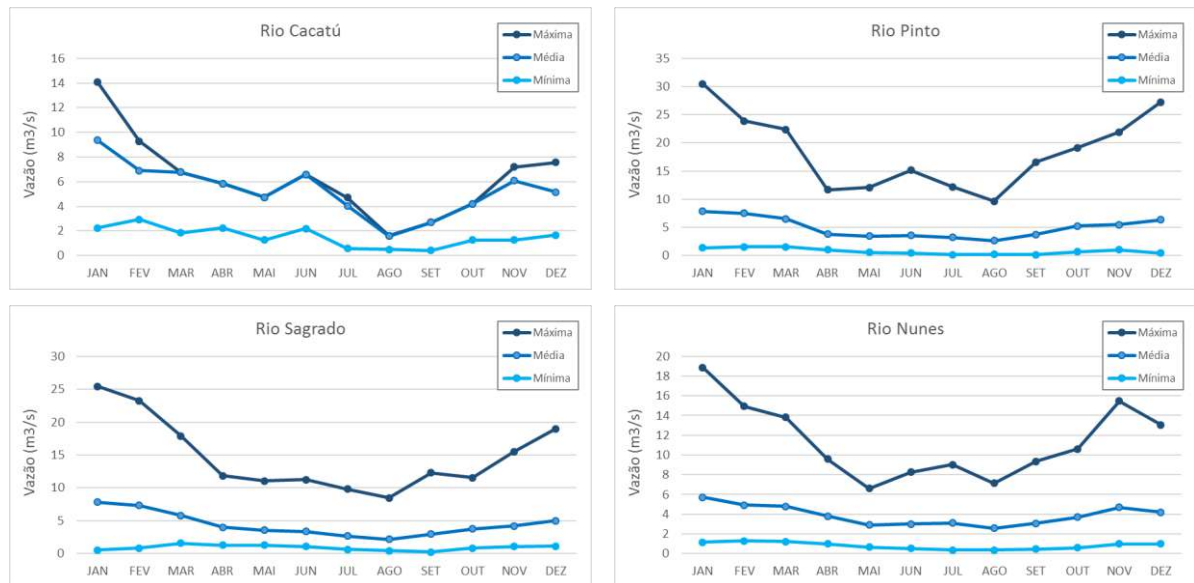


Figura A.6-3. Curvas de vazão mínima, média e máxima dos principais rios afluentes do Complexo Estuarino de Paranaguá.

A.7 Concentração de Sedimentos em suspensão

▪ Baía de Paranaguá

Os aportes de descarga sólida e sua influência na circulação do estuário de Paranaguá ainda não são bem quantificados. Algumas das principais referências bibliográficas são relativas as concentrações de sedimentos em suspensão no estuário (Mantovanelli, 1999; Noernberg, 2001; Zem, 2008; Soares & Noernberg, 2007).

Noernberg (2001) encontrou valores de concentração de sedimentos em suspensão (CSS) de 65,9 mg/L na região de Antonina e em torno de 20 a 30 mg/L na região mais para leste. Segundo Mantovanelli (1999) os valores médios de material em suspensão na coluna de água mediram entre 10 a 80 mg/L, com concentrações de 5 mg/L a 120 mg/L (fundo) na região próxima do Porto de Paranaguá. As concentrações de sedimento em suspensão (CSS) medidos na área prevista para o Porto Guará (CBI, 2015) variaram entre 20 a 40 mg/L com picos de 60 mg/L.

Baseado nestes estudos, foi considerado o valor médio de 25 mg/l como a concentração ambiental de sedimentos, que representa o background de material em suspensão no estuário.

▪ Rios Afluentes

As concentrações de sedimentos em suspensão dos principais rios afluentes ao Complexo Estuarino de Paranaguá, que fazem parte da Bacia Hidrográfica Litorânea do Paraná, foram obtidos no Sistema de Informações Hidrológicas (SIH) da Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos no Instituto das Águas do Paraná (AGUASPARANÁ) nas Estações de Monitoramento da Figura A.6-1.

Esses dados consistem em médias diárias de concentração de sedimentos em suspensão nas estações sedimentométricas e não são séries temporais contínuas, o que resulta em poucos dados por ano Figura A.7-1.

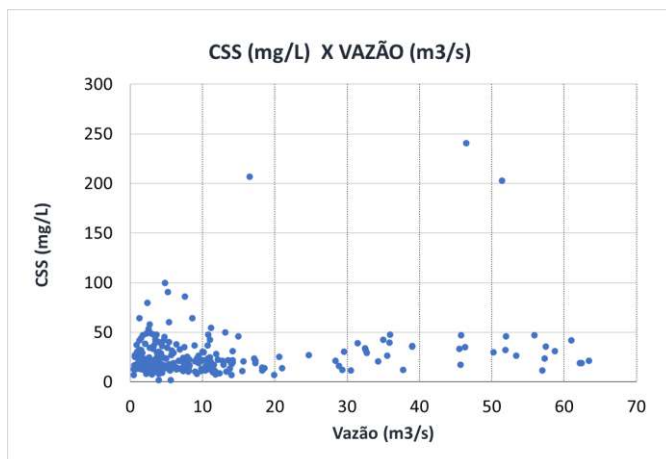


Figura A.7-1. Médias diárias de concentração de sedimentos em suspensão e vazão média das estações sedimentométricas entre os anos de 2000 e 2020 (Fonte dados: ÁGUASPARANA).

Os valores médios anuais de concentração de sedimentos em suspensão dos rios afluentes, considerados neste estudo, foram obtidos para os últimos 20 anos (2000 a 2020), como mostra a Tabela A.7-1, Figura A.7-2.

Tabela A.7-1 Valor médio de concentração de sedimentos em suspensão (mg/l) para o período de 2000 a 2020 dos principais rios afluentes do CEP (Fonte dados: ÁGUAS PARANÁ).

| Rios | CSS médio 2000-2020 (mg/l) |
|------------------|----------------------------|
| Rio Guaraqueçaba | 29.4 |
| Rio Tagaçaba | 23.1 |
| Rio Cachoeira | 41.2 |
| Rio Cacatu | 21.7 |
| Rio do Nunes | 20.0 |
| Rio Nhundiaquara | 21.4 |
| Rio Marumbi | 22.9 |
| Rio do Pinto | 25.5 |
| Rio Sagrado | 53.1 |

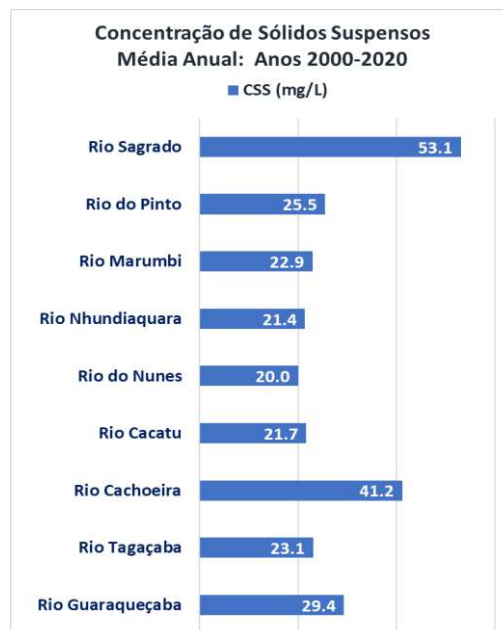


Figura A.7-2. Valor médio de concentração de sedimentos em suspensão (mg/l) para o período de 2000 a 2020 dos principais rios afluentes considerados neste estudo (Fonte dos dados: ÁGUAS PARANÁ).

A.8 Convenções e Definições

O sistema de coordenadas utilizado nas simulações dos modelos numéricos é referido ao Datum WGS84 em projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 22 J. O posicionamento do eixo-x aponta a direção Leste (E) e o eixo-y aponta a direção Norte (N). Para a referência vertical, eixo-z, as profundidades estão em metros e se referem ao Nível Médio do Mar (NMM), que está a +0,98 m do ZH da DHN local.

ANEXO B. Calibração do Modelo Hidrodinâmico

A calibração do modelo hidrodinâmico tem por objetivo ajustar alguns coeficientes do modelo numérico tal que ele represente, em termos físicos, o mais próximo possível da realidade. O produto da calibração, portanto, é o grau de confiança que se deve ter em consideração nas análises dos demais resultados das modelagens realizadas no âmbito deste estudo.

A partir das comparações dos resultados das simulações hidrodinâmicas com dados medidos *in situ* por instrumentos oceanográficos, a etapa da calibração é considerada finalizada no momento que os resultados apresentam a melhor aderência às medições disponíveis.

Em termos práticos, faz-se o ajuste dos coeficientes do modelo Delft3D-FLOW que são dependentes das rugosidades de fundo e lateral para se obter o menor erro global. A rugosidade de fundo é uma característica particular do ambiente que se está a modelar e varia consoante o tipo de cobertura sedimentar, presença de rochas, vegetação, formas de fundo e do contorno lateral do domínio geográfico.

Como os modelos são aproximações numéricas da realidade e, por outro lado, as medições normalmente não estão disponíveis com representatividade espacial e simultaneidade temporal, sempre há um desvio entre os resultados obtidos a partir da modelagem numérica e os dados oceanográficos medidos *in situ*. O sucesso dos ajustes no modelo Delft3D realizados na etapa de calibração podem ser identificados na forma dos desvios relativos (ou erros relativos) de nível de água (maré) e velocidade das correntes, cujos valores numéricos absolutos e percentuais fornecem o grau de confiança no modelo e na estratégia de modelagem executada.

Nos estudos de modelagem do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), a etapa de calibração é um procedimento importante principalmente por causa da deformação da onda de maré no interior das baías de Paranaguá e Antonina, cuja interação reforça as frequências ter-diurnas e quarto-diurnas. Além disso, o CEP é um estuário hipsíncrono, ou seja, há uma magnificação das amplitudes de maré na região interna do estuário em comparação à maré da região costeira.

B.1 Medições Instrumentais

A calibração dos coeficientes do modelo Delft3D foi realizada comparando-se as correntes e a variação do nível de água (marés) estimados pelas simulações numéricas com os respectivos valores medidos por um ADCP instalado na Baía de Paranaguá (Hidromares, 2020). O intervalo de tempo para a execução da calibração do modelo foi considerado o mesmo das medições e corresponde ao outono, entre os dias 12 de maio a 16 de junho de 2020.

A variação do nível de água (marés) e as correntes foram medidos por um ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) da SonTek, modelo Argonaut-XR, de 750 kHz, fundeados na porção mediana das baías de Paranaguá e Antonina, no local previsto para a implantação do Porto Guará (Figura B.1-1 e Tabela B.1-1), cuja profundidade local é de 12.1 m (NMM). Os dados referentes às medições realizadas por este instrumento foram fornecidos já pré-processados pela Hidromares.

Para a calibração do modelo hidrodinâmico, além dos dados de nível de água medidos pelo ADCP, foram utilizadas as componentes derivadas das análises harmônicas das medições realizadas pela FEMAR para dois marégrafos instalados temporariamente na região do Complexo Estuarino de Paranaguá, um na Ponta da Galheta e outro no Porto de Paranaguá (Figura B.1-1 e Tabela B.1-1). Nestes locais, somente os resultados relativos à maré astronômica foram utilizados durante a realização da calibração.

Tabela B.1-1. Coordenadas dos locais de instalação do ADCP e dos marégrafos da FEMAR (WGS-84).

| LOCAL | UTM-X | UTM-Y | LATITUDE | LONGITUDE |
|--------------------|----------|-----------|--------------|--------------|
| ADCP | 745403.3 | 7177338.2 | 25° 30.05' S | 48° 33.51' S |
| Porto de Paranaguá | 748776.9 | 7177187.2 | 25° 30.1' S | 48° 31.5' S |
| Ponta da Galheta | 769402.8 | 7169027.3 | 25° 34.3' S | 48° 19.1' S |
| Ventos ECMWF | 751294.3 | 7177324.9 | 25° 30.0' S | 48° 30.0' S |

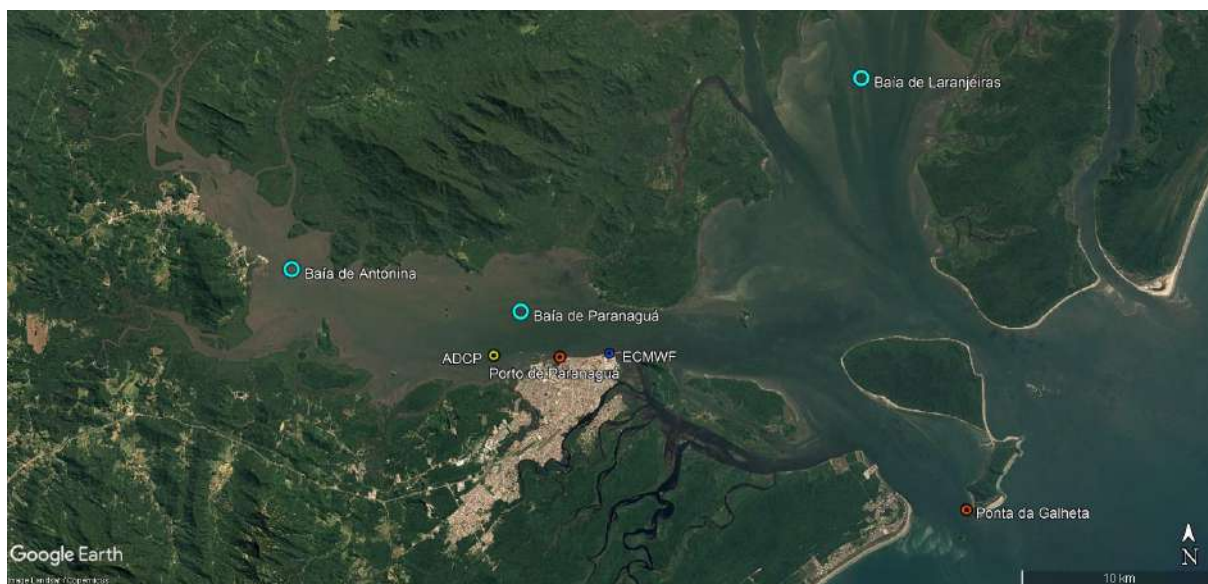


Figura B.1-1. Localização do fundeio do ADCP, dos marégrafos da FEMAR e dos ventos do ECMWF no Complexo Estuarino de Paranaguá.

B.2 Condições de Ventos para Calibração

Os ventos utilizados na calibração foram obtidos a partir da velocidade e direção dos ventos estimadas pelo modelo IFS (Integrated Forecast System) do ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast), cujo local de extração dos dados corresponde a um ponto posicionado no porto de Paranaguá (Figura B.1-1).

Os dados de ventos foram extraídos para o mesmo período de maio e junho de 2020, garantindo a simultaneidade de medições de corrente na Baía de Paranaguá. A Figura B.2-1 apresenta os parâmetros dos ventos considerados na calibração e pode-se observar tanto uma pequena dominância de ventos dos setores Noroeste/Norte/Nordeste como os efeitos da formação de frentes frias na região (ventos de Sudoeste/Sul/Sudeste). A intensidade dos ventos na Baía de Paranaguá é baixa, apresentando média de 2.0 m/s e máxima de 7.1 m/s (sul) durante o período de calibração. Os ventos estiveram abaixo de 5 nós (2.57 m/s) em 78.3% do tempo e abaixo de 10 nós (5.14 m/s) em 99.2% do período de calibração.

Nas simulações, os ventos foram considerados uniformes sobre todo o domínio e os parâmetros tiveram uma taxa tri-horária de entrada no domínio computacional.

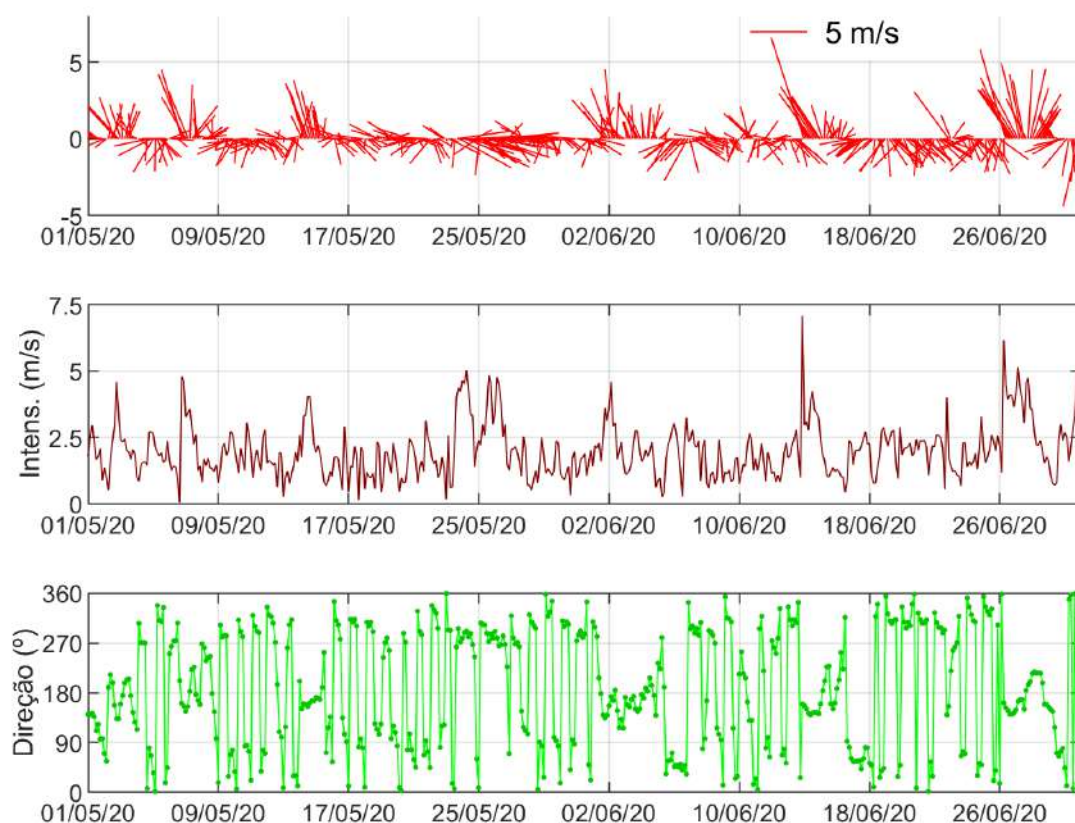


Figura B.2-1. Séries temporais de vetores (stickplot), intensidades e direções dos ventos utilizados na etapa de calibração do modelo numérico.

B.3 Resultados da Calibração

A calibração da modelagem hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranaguá foi realizada com foco na região do futuro Porto Guará, local onde um ADCP foi instalado especialmente para este estudo. A calibração dos níveis de água nos marégrafos do Porto de Paranaguá e na Ponta da Galheta foram incluídos nesta etapa por serem indicadores da dinâmica de marés dessa região.

B.3.1 Marés no Local do ADCP (Porto Guará)

A Figura B.3.1-1 apresenta a comparação dos níveis de água medidos no local do ADCP e os valores calculados pelo modelo Delft3D-FLOW calibrado e a Tabela B.3.1-1 resume estes resultados em termos dos desvios (erros).

A comparação numérica dos valores de nível de água medidos pelo marégrafo e estimados pelo modelo Delft3D-FLOW apresentou desvios abaixo de 13 cm. Os erros normalizados ficaram abaixo de 6.4% (Tabela B.3.1-1).

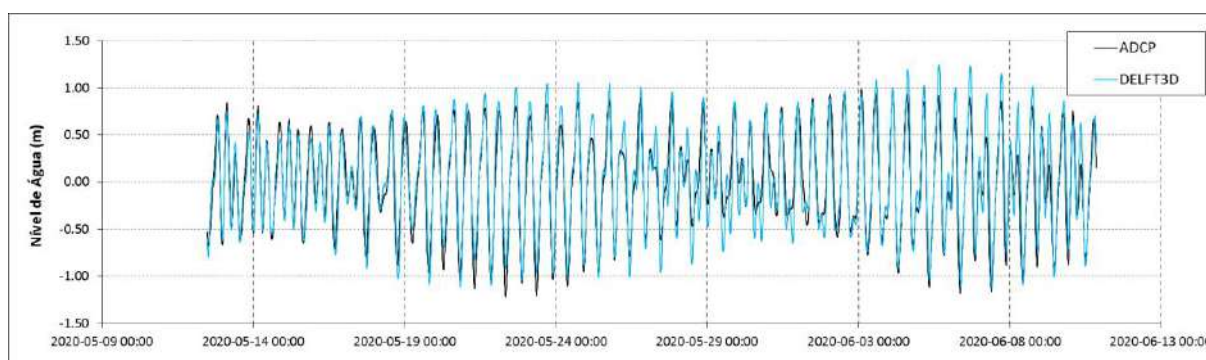


Figura B.3.1-1. Comparação entre os níveis de água medidos pelo ADCP e os valores estimados pelo modelo numérico Delft3D-FLOW.

Tabela B.3.1-1. Desvios entre os níveis de água medidos pelo ADCP e os valores obtidos pelo modelo numérico.

| Nível de Água | Nível |
|---------------------------------------|-------|
| Desvio Médio Absoluto (m) | 0.101 |
| Erro Quadrático Médio (m) | 0.126 |
| Erro Quadrático Médio Normalizado (%) | 0.064 |
| Erro Relativo Normalizado (%) | 0.051 |

B.3.2 Correntes no Local do ADCP (Porto Guará)

A Figura B.3.2-1 apresenta as séries temporais de U e V resultantes do modelo Delft3D-FLOW calibrado em relação às medições realizadas pelo ADCP instalado próximo ao Porto Guará e a Tabela B.3.2-1 resume os resultados numéricos da comparação entre ambos os conjuntos de dados de correntes.

Os resultados da comparação entre os resultados das simulações numéricas e das medições pelo ADCP ficaram, em relação aos erros normalizados, abaixo de 8.2% para as ambas as componentes U e V. Estes resultados indicam que as correntes simuladas possuem uma variação, na média, abaixo de 0.16 m/s em U (eixo oeste-leste) e abaixo de 0.06 m/s em V (eixo sul-norte). Em termos relativos à intensidade de corrente, este resultado significa uma variação média das velocidades de 6% em relação às medições efetuadas.

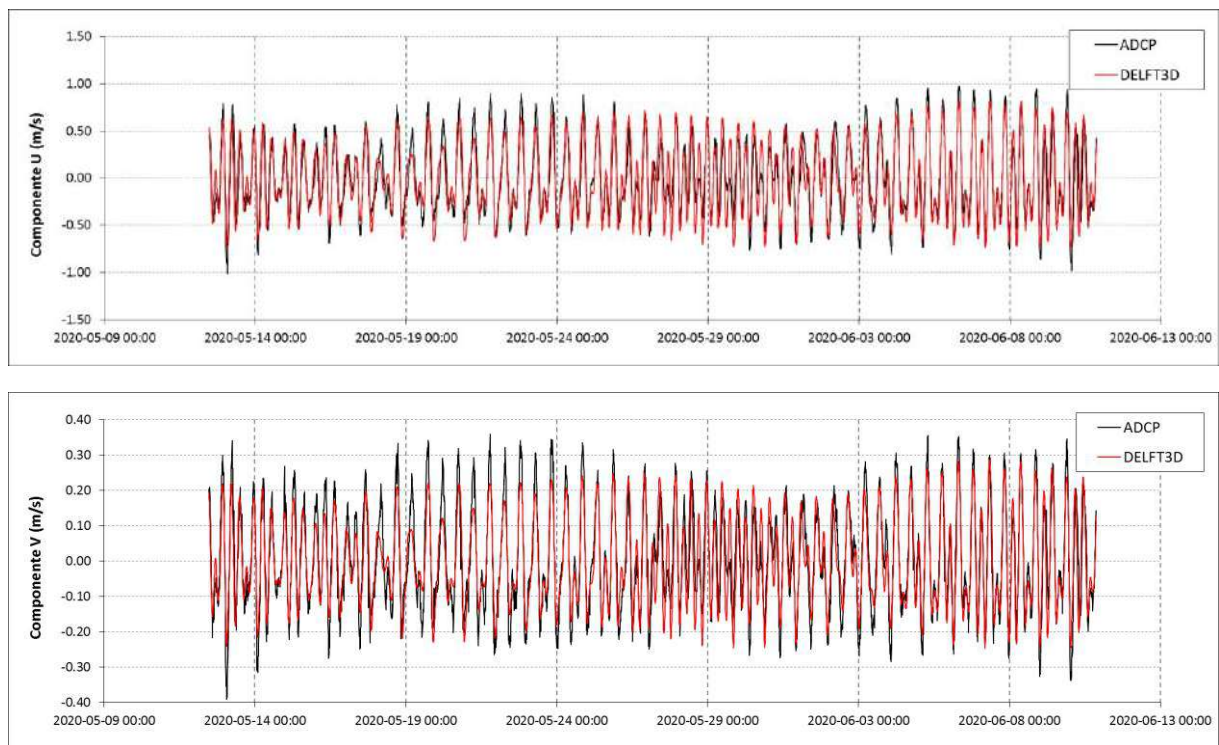


Figura B.3.2-1: Comparação entre as componentes U e V das correntes medidas pelo ADCP e calculadas pelo modelo numérico Delft3D-FLOW.

Tabela B.3.2-1 Desvios entre as componentes de velocidade medidas pelo ADCP e calculadas pelo modelo numérico.

| Correntes | Componente U | Componente V |
|---------------------------------------|--------------|--------------|
| Desvio Médio Absoluto (m/s) | 0.127 | 0.048 |
| Erro Quadrático Médio (m/s) | 0.163 | 0.061 |
| Erro Quadrático Médio Normalizado (%) | 0.082 | 0.081 |
| Erro Relativo Normalizado (%) | 0.064 | 0.064 |

As dispersões direcionais das correntes medidas pelo ADCP e estimadas pelo modelo hidrodinâmico estão representadas na Figura B.3.2-2 que mostra, principalmente, a existência de um eixo direcional das correntes estuarinas de vazante (valores positivos) e de enchente (valores negativos) com orientação NE-SW. Além disso, este gráfico mostra a faixa de variação das correntes em torno desse eixo principal para os dados medidos e para os resultados do modelo.

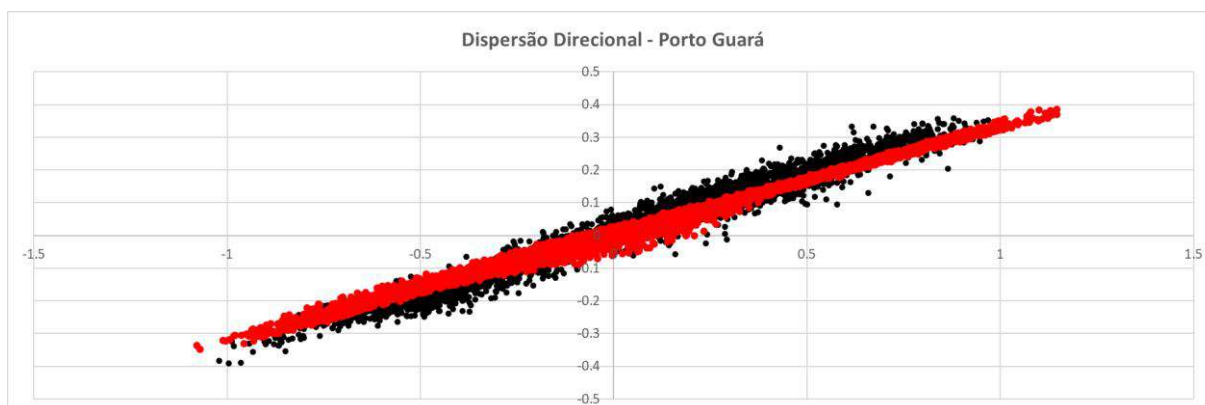


Figura B.3.2-2. Dispersão direcional das correntes obtidas pelo modelo numérico Delft3D na configuração atual (vermelho) e as correntes medidas pelo ADCP (preto).

Os resultados mostram que as correntes estuarinas resultantes da modelagem atingem as velocidades máximas medidas pelo ADCP nas marés de sizígia (valores das extremidades do gráfico), embora possuam menor dispersão direcional (faixa mais estreita) e um pequeno desvio do eixo médio principal.

A comparação dos eixos principais dos resultados de corrente das modelagens hidrodinâmicas (69.6°) com as respectivas medições efetuadas *in situ* (71.7°), pode-se concluir que a calibração apresenta uma boa de similaridade angular, com diferença de 2.1° apenas.

B.3.3 Marés no Porto de Paranaguá

A Figura B.3.3.1 apresenta a comparação dos níveis de água calculados para o Porto de Paranaguá e os valores obtidos do modelo Delft3D-FLOW. A Tabela B.3.3-1 resume os resultados em termos dos desvios (erros) desta etapa de calibração.

A comparação numérica dos valores de nível de água do Porto de Paranaguá e os estimados pelo modelo Delft3D-FLOW resultou em desvios abaixo de 16 cm. Os erros normalizados ficaram abaixo de 7% (Tabela B.3.3-1). Estes desvios estão bastante próximos dos valores obtidos na comparação dos níveis de água obtidos no local do ADCP.

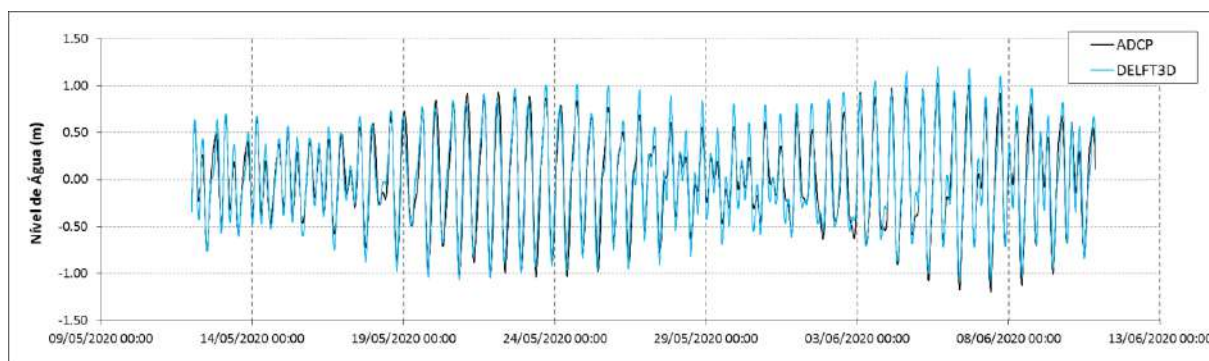


Figura B.3.3-1: Comparação entre o nível de água do Porto de Paranaguá e os valores calculados pelo modelo numérico Delft3D-FLOW.

Tabela B.3.3-1 Desvios obtidos entre o nível de água do Porto de Paranaguá e os valores calculados pelo modelo numérico.

| Correntes | Nível |
|---------------------------------------|-------|
| Desvio Médio Absoluto (m) | 0.121 |
| Erro Quadrático Médio (m) | 0.156 |
| Erro Quadrático Médio Normalizado (%) | 0.070 |
| Erro Relativo Normalizado (%) | 0.055 |

B.3.4 Marés na Ponta da Galheta

A Figura B.3.4-1 apresenta a comparação dos níveis de água calculados para a Ponta da Galheta e os valores obtidos do modelo Delft3D-FLOW. A Tabela B.3.4-1 resume os resultados em termos dos desvios (erros) desta etapa de calibração.

A comparação numérica dos valores de nível de água da Ponta da Galheta e os estimados pelo modelo Delft3D-FLOW resultou em desvios abaixo de 24 cm. Os erros normalizados ficaram abaixo de 12.0% (Tabela B.3.4-1).

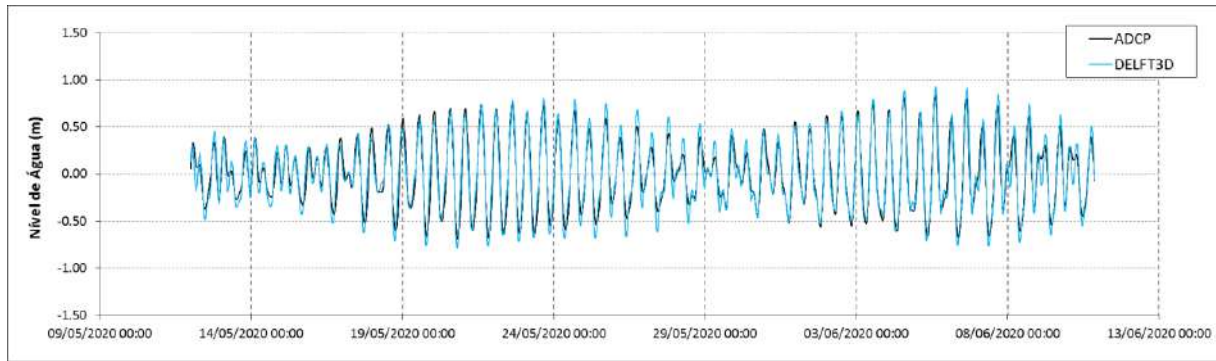


Figura B.3.4-1: Comparação entre o nível de água da Ponta da Galheta e os valores calculados pelo modelo numérico Delft3D-FLOW.

Tabela B.3.4-1 Desvios obtidos entre o nível de água da Porta da Galheta e os valores calculados pelo modelo numérico.

| Correntes | Nível |
|---------------------------------------|-------|
| Desvio Médio Absoluto (m) | 0.197 |
| Erro Quadrático Médio (m) | 0.238 |
| Erro Quadrático Médio Normalizado (%) | 0.120 |
| Erro Relativo Normalizado (%) | 0.100 |

B.4 Conclusão da Calibração

Os baixos valores dos erros relativos e absolutos obtidos na etapa de calibração permitem afirmar que o modelo hidrodinâmico está representando bem os processos físicos na Baía de Paranaguá.

As marés no interior do Complexo Estuarino de Paranaguá estão bem descritas pelo modelo, considerando os desvios máximos de 7% na região do Porto Guará e do Porto de Paranaguá. A comparação das correntes calculadas pelo modelo hidrodinâmico e medidas pelo ADCP apresentou desvios máximos de 8.2% para as componentes U e V e um desvio angular médio do seu eixo direcional de 2.1°. As velocidades máximas medidas foram alcançadas nas simulações numéricas efetuadas.



Anotação de Responsabilidade Técnica - ART
Lei nº 6.496, de 7 de dezembro de 1977
Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Estado de São Paulo

CREA-SP

ART de Obra ou Serviço
28027230211048637

1. Responsável Técnico

EDUARDO AOUN TANNURI

Título Profissional: **Engenheiro Mecânico**

Empresa Contratada:

RNP: **2603681583**

Registro: **5060945220-SP**

Registro:

2. Dados do Contrato

Contratante: **Porto Guará Infraestrutura SPE S/A**

CPF/CNPJ: **32.787.154/0001-61**

Endereço: **Avenida IGUAÇU**

Nº:

Complemento:

Bairro: **ÁGUA VERDE**

Cidade: **Curitiba**

UF: **PR**

CEP: **80240-031**

Contrato:

Celebrado em: **31/01/2020**

Vinculada à Art nº:

Valor: R\$ **371.425,00**

Tipo de Contratante: **Pessoa Jurídica de Direito Privado**

Ação Institucional:

3. Dados da Obra Serviço

Endereço: **Avenida PROFESSOR MELLO DE MORAIS**

Nº:

Complemento:

Bairro: **BUTANTÃ**

Cidade: **São Paulo**

UF: **SP**

CEP: **05508-030**

Data de Início: **31/01/2020**

Previsão de Término: **08/12/2020**

Coordenadas Geográficas:

Finalidade:

Código:

CPF/CNPJ:

4. Atividade Técnica

Consultoria

| | | | | Quantidade | Unidade |
|---|---------|---------|-------------|------------|---------|
| 1 | Análise | Reboque | Embarcações | 1,00000 | unidade |

Após a conclusão das atividades técnicas o profissional deverá proceder a baixa desta ART

5. Observações

Realização de simulação de manobras e análise de risco na navegação considerando a entrada e saída dos navios-tipo nos berços do Porto Guará, em projeto na Baía de Paranaguá (PR). O estudo considerou as 3 fases de implantação do porto, com navios porta container, tankers e de granel sólido.

6. Declarações

Acessibilidade: Declaro que as regras de acessibilidade previstas nas normas técnicas da ABNT, na legislação específica e no Decreto nº 5.296, de 2 de dezembro de 2004, não se aplicam às atividades profissionais acima relacionadas.

7. Entidade de Classe

SINDICATO DOS ENGENHEIROS NO ESTADO DE SÃO PAULO - SEESP

8. Assinaturas

Declaro serem verdadeiras as informações acima

São Paulo 28 de julho de 2021

Local

Eduardo A. Tannuri
Coordenador do Projeto

Docu EDUARDO AOUN TANNURI - CPF: 260.053.378-82

Xenia Karina Am

Porto Guarani Infraestrutura SPE S/A - CPF/CNPJ: 32.787.154/0001-61

9. Informações

- A presente ART encontra-se devidamente quitada conforme dados constantes no rodapé-versão do sistema, certificada pelo Nosso Número.

- A autenticidade deste documento pode ser verificada no site www.creasp.org.br ou www.confes.org.br

- A guarda da via assinada da ART será de responsabilidade do profissional e do contratante com o objetivo de documentar o vínculo contratual.

www.creasp.org.br

Tel: 0800 017 18 11

E-mail: acessar link Fale Conosco do site acima

**CREA-SP**
Conselho Regional de Engenharia e Agronomia
do Estado de São Paulo

Valor ART R\$ 233,94

Registrada em: 26/07/2021

Valor Pago R\$ 233,94

Nosso Número: 28027230211048637

Versão do sistema

Impresso em: 28/07/2021 19:58:20