

EDUARDO PADUA DE MATTOS

MODELAGEM HIDRODINÂMICA DA DISPERSÃO DA PLUMA DE SEDIMENTOS  
EM SUSPENSÃO ORIUNDOS DE ATIVIDADES DE DRAGAGEM NA BAÍA DE  
PARANAGUÁ E ANTONINA, PR.

CURITIBA

2016

EDUARDO PADUA DE MATTOS

MODELAGEM HIDRODINÂMICA DA DISPERSÃO DA PLUMA DE SEDIMENTOS  
EM SUSPENSÃO ORIUNDOS DE ATIVIDADES DE DRAGAGEM NA BAÍA DE  
PARANAGUÁ E ANTONINA, PR.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial na obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Gonçalves

CURITIBA

2016

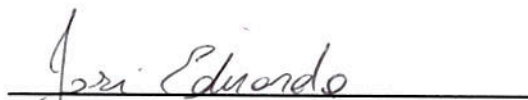
## TERMO DE APROVAÇÃO

EDUARDO PADUA DE MATTOS

### MODELAGEM HIDRODINÂMICA DA DISPERSÃO DA PLUMA DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO ORIUNDOS DE ATIVIDADES DE DRAGAGEM NA BAÍA DE PARANAGUÁ E ANTONINA, PR


Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial na obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador:

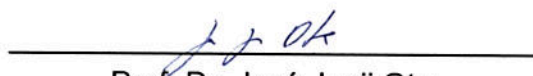
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Eduardo Gonçalves

Departamento de Hidráulica e Saneamento – UFPR

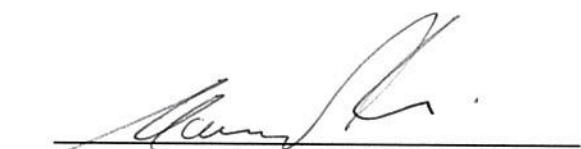
Banca de avaliação:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Tobias Bleninger

Departamento de Hidráulica e Saneamento – UFPR

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Junji Ota

Departamento de Hidráulica e Saneamento – UFPR

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Mauricio Gobbi

Departamento de Engenharia Ambiental – UFPR

Curitiba, 06 de julho de 2016

*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém  
ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”*

*Arthur Schopenhauer*

## **AGRADECIMENTOS**

Com muito orgulho e dedicação, entrego esse trabalho e agradeço a todos os que, de alguma maneira, influenciaram ou contribuíram para que mais essa conquista se tornasse realidade.

Primeiramente agradeço a minha família, por proporcionar condições de estudo e escolaridade que me auxiliaram imensuravelmente em atingir os objetivos que tracei em minha vida, sobretudo considerando a presente etapa como mais uma de sucesso. Nesse aspecto enfatizo meus agradecimentos à minha mãe, pessoa exemplar que sempre me encorajou.

Agradeço a minha namorada Giovana, melhor parceira em todos os momentos, seja para incentivar, dar opiniões ou aguentar os piores momentos. Essa parceria é fruto de um amor enorme e recíproco entre duas pessoas que sabiam desde sempre que enfrentariam muitas coisas juntas no futuro.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas que sempre incentivaram e fortaleceram a crença em minhas capacidades.

Um enorme agradecimento ao meu orientador, Prof. José Eduardo Gonçalves, que sempre com disposição e paciência pôde me auxiliar em todas as etapas do desenvolvimento desse estudo.

Agradeço aos professores membros das bancas de qualificação e de defesa da dissertação, Tobias Bleninger, José Ota e Maurício Gobbi, que colaboraram com uma série de sugestões e críticas nesse estudo.

Ficam meus agradecimentos à Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina (APPA) por cederem os resultados imprescindíveis para o desenvolvimento do presente estudo.

Agradeço de maneira geral à UFPR e ao PPGERHA, programa de pós-graduação com excelente estrutura e corpo docente, fator muito importante para estudar uma área complexa tal qual a modelagem hidrodinâmica.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>6</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>9</b>
<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	<b>10</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>12</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>13</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 OBJETIVOS .....	17
1.1.1 Objetivo geral.....	17
1.1.2 Objetivos específicos .....	17
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>19</b>
2.1 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM ESTUÁRIOS.....	19
2.1.1 Assoreamento de canais portuários.....	22
2.2 DRAGAGENS .....	22
2.2.1 Tipos .....	23
2.2.2 Draga TSHD e a pluma de dispersão de sedimentos .....	25
2.2.3 Impactos ambientais das dragagens .....	27
2.3 MODELAGEM HIDRODINÂMICA – .....	28
2.4 ÁREA DE ESTUDO.....	32
2.4.1 Localização .....	32
2.4.2 Circulação hidrodinâmica.....	33
2.4.3 Caracterização sedimentológica .....	35
2.4.4 Salinidade e Temperatura.....	37
2.4.5 Material em Suspensão e Turbidez .....	37
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>39</b>
3.1 MODELO HIDRODINÂMICO- BASE TEÓRICA .....	39
3.1.1 Transporte de sedimentos e comportamento hidrodinâmico .....	39
3.1.2 Velocidade de sedimentação .....	40

3.1.2.1	Sedimentos Coesivos.....	41
3.1.2.2	Sedimentos Não-Coesivos .....	42
3.2	MODELO HIDRODINÂMICO - IMPLEMENTAÇÃO.....	42
3.2.1	Definição de fronteiras fechadas.....	43
3.2.2	Domínio da grade .....	43
3.2.3	Batimetria.....	45
3.2.4	Condições iniciais .....	48
3.2.5	Contorno – Fronteiras abertas .....	49
3.2.5.1	Descarga fluvial.....	49
3.2.5.2	Constituintes harmônicas de maré .....	51
3.2.6	Parâmetros físicos .....	52
3.2.7	Regime de ventos .....	53
3.2.8	Simulação da pluma de sedimentos em suspensão - Dragagem .....	54
3.2.9	Validação .....	56
3.3	ESTUDO DE CASO – BAÍA DE PARANAGUÁ E ANTONINA .....	56
3.3.1	Dragas consideradas .....	57
3.3.2	Metodologia de coleta de dados durante a dragagem .....	58
3.3.3	Eventos considerados.....	60
3.3.3.1	Evento F10 – Trecho Bravo 2.....	61
3.3.3.2	Evento F12 – Trecho Delta 1.....	63
3.3.3.3	Evento F15 – Trecho Delta 2.....	65
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>67</b>
4.1	TESTES DE COMPARAÇÃO.....	67
4.1.1	Teste do modelo hidrodinâmico .....	67
4.1.2	Comparação I – Dados observados de 1996.....	69
4.1.3	Comparação II – Tábua de marés de 2015 .....	74
4.2	SIMULAÇÃO DAS DRAGAGENS .....	76
4.2.1	Evento F10 – Trecho Bravo 2 .....	77
4.2.1.1	Pontos de observação.....	77
4.2.1.2	Nível do mar.....	77
4.2.1.3	Pluma de dispersão de sedimentos .....	79
4.2.1.4	Sedimentos em suspensão x Turbidez .....	83
4.2.2	Evento F12 – Trecho Delta 1 .....	85

4.2.2.1	Pontos de observação.....	85
4.2.2.2	Nível do mar.....	85
4.2.2.3	Pluma de dispersão de sedimentos .....	87
4.2.2.4	Sedimentos em suspensão x Turbidez .....	92
4.2.3	Evento F15 – Trecho Delta 2 .....	93
4.2.3.1	Pontos de observação.....	93
4.2.3.2	Nível do mar.....	93
4.2.3.3	Pluma de dispersão de sedimentos .....	95
4.2.3.4	Sedimentos em suspensão x Turbidez .....	99
4.3	SÍNTESE DOS RESULTADOS .....	100
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>101</b>
5.1	RECOMENDAÇÕES.....	102
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE.....</b>	<b>114</b>
	<b>APÊNDICE. TABELAS DE RESULTADOS – SIMULAÇÕES DA PLUMA DE DISPERSÃO DE SEDIMENTOS X DADOS OBSERVADOS .....</b>	<b>115</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Draga tipo <i>Hopper</i> .....	25
Figura 2 - Esquema representando a operação de dragas TSHD e o surgimento da pluma. ....	26
Figura 3 - (a) e (b): Surgimento da pluma de sedimentos na atividade de dragagem. (c): Atividade de dragagem com difícil visualização da pluma de sedimentos. ....	26
Figura 4 - Representação gráfica do CEP. Em destaque a Baía de Antonina e a Baía de Paranaguá.....	33
Figura 5 – Mapa sedimentológico do Complexo Estuarino de Paranaguá.....	35
Figura 6 - Histograma de frequência das classes de sedimentos nos canais de navegação.....	36
Figura 7 - Definição das fronteiras do modelo a partir da imagem de satélite.....	43
Figura 8 - Domínio da grade computacional - Módulo RGFRID.....	44
Figura 9 - Cartas náuticas utilizadas.....	46
Figura 10 - Localização das estações maregráficas.....	47
Figura 11 - Área do modelo com valores de batimetria (profundidade em metros), representados após interpolação linear.....	47
Figura 12 - Grade numérica sobreposta a região com valores batimétricos.....	48
Figura 13 - Visualização da grade numérica com indicação das fronteiras abertas..	50
Figura 14 - Série temporal de vazão média - Rio Cachoeira.....	50
Figura 15 - Série temporal de vazão média - Rio Nhundiaquara.....	51
Figura 16 - Gráfico da predominância de direção e intensidade dos ventos em Paranaguá.....	54
Figura 17 - Canal de navegação da Baía de Paranaguá e Antonina.....	57
Figura 18 - Draga Hang Jun 5001.....	57
Figura 19 - Draga Xin Hai Niu.....	57
Figura 20 - Esquema de medição de sólidos em suspensão e turbidez durante a realização da dragagem.....	58
Figura 21 - Esquema representativo da metodologia de medições durante as dragagens.....	59
Figura 22 - Turbidímetro Horiba U52G.....	60
Figura 23 - Localização dos pontos de controle do Evento F10.....	61
Figura 24 - Valores medidos de turbidez - Evento F10 – 24/10/2014.....	62

Figura 25 - Localização dos pontos de controle do Evento F12.....	63
Figura 26 - Valores medidos de turbidez - Evento F12 - 09/12/2014 .....	64
Figura 27 - Localização dos pontos de controle do Evento F15.....	65
Figura 28 - Valores medidos de turbidez - Evento F15 – 01/04/2015 .....	66
Figura 29 - Localização dos pontos de observação utilizados para os testes iniciais .....	68
Figura 30 - Teste de estabilização do modelo em (a) 60 horas, (b) 9 dias e (c) 18 dias.....	69
Figura 31 - Reconstrução da onda de maré - Dados observados.....	72
Figura 32 - Comparação de constituintes harmônicas - Teste I .....	73
Figura 33 - Análise de constituintes harmônicas pela Amplitude x Frequência.....	73
Figura 34 - Calibração do modelo a partir dos dados observados de 1996 - Cais Oeste Porto de Paranaguá.....	74
Figura 35 - Comparação de dados - Tábua de marés.....	75
Figura 36 - Pontos de observação - Evento F10.....	77
Figura 37 - Série de nível do mar simulado - Evento F10 .....	78
Figura 38 - Variação do nível do mar observado (superior) e simulado (inferior) - Evento F10 .....	78
Figura 39 - Simulação da pluma de sedimentos em suspensão - Evento F10 – Tempo T1 .....	80
Figura 40 - Simulação da pluma de sedimentos em suspensão - Evento F10 – Tempo T3.....	81
Figura 41 - Velocidades médias - Evento F10.....	83
Figura 42 - Comparação entre dados modelados de sedimentos em suspensão e dados observados - Evento F10.....	84
Figura 43 - Pontos de observação - Evento F12.....	85
Figura 44 - Série de nível do mar simulado - Evento F12 .....	86
Figura 45 - Variação do nível do mar observado (superior) e simulado (inferior) - Evento F12 .....	87
Figura 46 - Simulação da pluma de sedimentos em suspensão - Evento F12 – Tempo T1 .....	88
Figura 47 - Simulação da pluma de sedimentos em suspensão - Evento F12 – Tempo T3.....	89
Figura 48 - Velocidades médias - Evento F12.....	91

Figura 49 - Comparação entre dados modelados de sedimentos em suspensão e dados observados Evento F12.....	92
Figura 50 - Pontos de observação - Evento F15.....	93
Figura 51 - Série de nível do mar simulado - Evento F15 .....	94
Figura 52 - Variação do nível do mar observado (superior) e simulado (inferior) - Evento F15.....	95
Figura 53 - Simulação da pluma de sedimentos em suspensão - Evento F15 – Tempo T1 .....	96
Figura 54 - Simulação da pluma de sedimentos em suspensão - Evento F15 – Tempo T3.....	97
Figura 55 - Velocidades médias - Evento F15.....	98
Figura 56 - Comparação entre dados modelados de sedimentos em suspensão e dados observados - Evento F15.....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Camadas consideradas na grade computacional .....	44
Tabela 2 - Características da grade numérica computacional.....	45
Tabela 3 - Localização das estações maregráficas e níveis de redução .....	46
Tabela 4 - Parâmetros utilizados como condições iniciais .....	48
Tabela 5 - Valores considerados de descarga afluyente ao CEP .....	51
Tabela 6 – Valores das constituintes harmônicas de maré consideradas na implementação do modelo .....	51
Tabela 7 - Parâmetros físicos considerados na implementação do modelo hidrodinâmico.....	52
Tabela 8 - Localização da Estação Meteorológica - Ventos.....	53
Tabela 9 - Características de vazão da fonte pontual de sedimentos .....	54
Tabela 10 - Parâmetros considerados para sedimentos não coesivos .....	55
Tabela 11 - Parâmetros considerados para sedimentos coesivos .....	55
Tabela 12 - Características das dragas utilizadas nas atividades de dragagem.....	58
Tabela 13 - Localização do marégrafo e período de dados considerados .....	70
Tabela 14 - Constituintes harmônicas de mare - Cais Oeste do Porto de Paranaguá .....	71
Tabela 15 - Síntese dos resultados simulados para os Eventos F10, F12 e F15....	100

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	- Agência Nacional de Águas
ANAC	- Agência Nacional de Aviação Civil
APPA	- Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina
C/NC	- Coesivos/Não coesivos – proporção entre classes de sedimentos
CEP	- Complexo Estuarino de Paranaguá
CFD	- <i>Computational Fluids Dynamics</i> - terminologia
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPPE	- Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
DBO	- Demanda bioquímica de oxigênio
DHN	- Diretoria de Hidrografia e Navegação
IBAMA	- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
LDB	- Formato de arquivo de fronteiras no Delft-3D- <i>landboundary</i>
MMA	- Ministério do Meio Ambiente
MT	- Ministério do Trabalho
NBR	- Norma Brasileira
NR	- Nível de Redução, ou Nível de Referência
NTU	- Unidades Nefelométricas de Turbidez
OD	- Oxigênio dissolvido
OMS	- Organização Mundial de Saúde
ONU	- Organização das Nações Unidas
PEC	- <i>Paranagua Estuarine Complex</i>
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente
POM	- <i>Princeton Ocean Model</i>
QUICKIN	- Ferramenta de interpolação de dados e geração de mapa batimétrico no Delft-3D
QUICKPLOT	- Ferramenta de pós processamento do Delft-3D usada para gerar gráficos e Figuras
RGFGRID	- Ferramenta geradora da grade numérica do modelo Delft-3D

SEP	- Secretaria de Portos
SisBAHIA	- Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – modelo hidrodinâmico
SS	- Sólidos em suspensão
RMSE	- <i>Root-main square error</i> – Raiz do erro médio quadrático – teste estatístico
RPA	- <i>Remotely-Piloted Aircraft</i>
TSHD	- <i>Trailing Suction Hopper Dredge</i> – modelo de draga
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UFRJ	- Universidade Federal do Rio de Janeiro
UNESCO	- <i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i> – Agência da ONU
USGS	- <i>U. S. Geological Survey</i> – Serviço Geológico dos Estados Unidos
VANT	- Veículo Aéreo Não Tripulado
ZMT	- Zona de Máxima Turbidez

## RESUMO

O setor portuário configura importante braço da economia mundial e segue em constante expansão. As atividades de dragagem são intrínsecas à operação portuária e executadas periodicamente, na maior parte dos casos. As dragagens podem intensificar o transporte de sedimentos em um dado local, causando impactos econômicos e ambientais. Por vezes, as operações são realizadas em estuários, ambientes de alta complexidade com forçantes em diferentes sentidos, dificultando a previsibilidade do comportamento hidrodinâmico e sedimentológico.

Nesse contexto, o presente estudo visa simular a pluma de dispersão de sedimentos em suspensão oriundas do processo de *overflow* de dragas do tipo *Trailing Suction Hopper Dredge (TSHD)*. O modelo Delft3D-FLOW foi implementado para o Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) considerando as forçantes de maré, ventos e rios com a verificação dos dados a partir de comparações às séries históricas da região. Foram considerados três eventos reais de dragagem com medições de turbidez *in loco*, próximas à draga, de modo a servir como comparação aos resultados do modelo. É testada a conversão dos dados de turbidez em concentração de sedimentos em suspensão a partir de um fator direto proposto na literatura.

O modelo hidrodinâmico possibilitou a simulação da pluma considerada visível na região com a determinação de parâmetros físicos básicos e características da dispersão no instante de dragagem. As comparações diretas entre os dados medidos e simulados obteve discrepâncias, entretanto, atingiu as mesmas ordens de grandeza, correspondendo ao bom funcionamento da modelagem.

Palavras-chave: dragagem, dispersão de sedimentos, Delft3D, modelagem hidrodinâmica.

## ABSTRACT

The port sector constitutes an important field of the world economy and it remains on a permanent expansion. The dredging works are intrinsic to the port operation and are periodically executed, in most of the cases. The dredgings may intensify the sediment transportation in a specific site, causing economical and environmental impacts. Sometimes, the operations are performed in estuaries, that are places with high complexity with climatic forcing in different ways, difficulting the foreseeability of the hydrodynamic and sedimentological behaviour.

In such a context, this study intend to simulate the suspended plumes of sediment dispersion originated from the processes of *overflow* of dredges of the Trailing Suction Hopper Dredge (TSHD) type. The model Delft3D-FLOW was implemented for the Estuary Complex of Paranaguá considering the natural forces of tide, wind, and rivers with the verification of the data from the comparison of a historical series on the region. Three real dredging events were considered with turbidity measurements *in loco*, close to the dredges, in order to count as a comparison to the results of the model. The conversion of the data about the turbidity in suspended sediments concentration is tested from a direct factor proposed in the literature.

The hydrodynamic model enabled a simulation of the plume considered visible in the region with the designation of the basic physical parameters and characteristics of the dispersion in the dredging moment. The direct comparisons between the data measured and the simulated ones obtained discrepancies, however, achieved the same orders of magnitude corresponding to the good functioning of the model.

Keywords: dredging, sediment dispersion, Delft3D, hydrodynamic model.

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil a questão ambiental ganhou maior importância a partir da década de 1990, com a regulamentação da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) (BRASIL, 1990). Dentre as ferramentas da PNMA, está a exigência de avaliação de impacto ambiental e o licenciamento de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras, como a operação de portos e as atividades de dragagem, incluindo a disposição dos sedimentos dragados (BRASIL, 1981).

O processo contínuo de expansão portuária gera a demanda de infraestrutura para atender um número cada vez maior de embarcações com um calado também cada vez maior. No caso de estuários, o comportamento hidrodinâmico é de difícil previsão, uma vez que geralmente existem muitos forçantes como correntes marítimas, ondas de maré, descargas fluviais afluentes e influências do vento. Inserido nesse contexto, o Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), principal estuário do litoral paranaense, possui alto índices de movimentação portuária e um elevado tráfego diário de navios de grande porte. Esse quadro expõe a necessidade de planejamento estratégico e integrado para execução das inúmeras atividades de dragagem no local.

A atividade de dragagem é intrínseca à operação portuária considerando tanto as dragagens de manutenção, onde comumente os canais de navegação e outras estruturas podem encontrar-se assoreados, quanto às dragagens de aprofundamento, realizadas geralmente para possibilitar o atendimento a navios de maior calado. A grande demanda faz com que aumentem os riscos de impactos ambientais negativos, como a contaminação das águas e a alteração do hábitat natural de diversas espécies. Ademais, podem haver alterações significativas na hidrodinâmica local, afetando a navegação (PORTO, 2010).

As atividades de dragagem estão sujeitas a licenciamento ambiental (BRASIL, 1997) e são necessárias para garantir a implantação e a operação de portos e terminais portuários, a navegabilidade, as condições de operação de obras hidráulicas e o controle de eventos hidrológicos críticos, portanto, podem trazer benefícios sociais, econômicos e de segurança para a sociedade (BRASIL, 2012). O licenciamento ambiental de dragagens é uma das principais conformidades a serem atendidas atualmente pelos portos (KITZMANN & ASMUS, 2006), entretanto,

diversos autores apontam débitos no setor, como o baixo investimento, falta de monitoramento de produtividade, falta de fiscalização e o descumprimento da lei e das metodologias previstas em projeto (BOLDRINI et al, 2007; VIANNA E TEIXEIRA, 2007).

A partir de 2004, com a publicação da Resolução CONAMA 344, a legislação definiu critérios para o efetivo planejamento e monitoramento do local de disposição dos resíduos dragados (BOLDRINI et al., 2007). Em 2012, revogou-se essa resolução para que a legislação fosse atualizada, com a CONAMA 454 (BRASIL, 2012). A partir de então ficaram definidos os limites para diversos contaminantes que podem ser carregados junto com o sedimento de fundo. Os casos de contaminação desse sedimento geralmente são consequências de atividades agrícolas na bacia hidrográfica e despejos de efluentes domésticos e industriais sem tratamento (SILVA, 2007). Por ser um cenário recorrente, Silva (2007) aponta a necessidade de monitoramento ambiental contínuo, tanto na área dragada quanto na área de descarte, com a modelagem da dispersão da pluma de sedimentos.

As áreas dragadas em portos marítimos frequentemente são zonas costeiras e estuários, configuradas por características hidrodinâmicas singulares para um dado ponto no tempo e espaço, dependentes da influência da vazão afluente dos rios e da maré naquele dado instante. A modelagem hidrodinâmica é uma ferramenta capaz de auxiliar os projetos de engenharia para determinação de características relevantes (nível, profundidade, concentração, velocidade), através de simulações computacionais, servindo como complemento aos estudos de campo.

Cita-se aqui, trecho da Resolução CONAMA 454, de 1º de novembro de 2012, enfatizando a importância da modelagem numérica como subsidio de estudos de dragagem (BRASIL, 2012):

*“Art. 25. A localização do polígono de disposição do material dragado em águas sob jurisdição nacional deverá ser definida com base em levantamento prévio*

*que considere:*

*I - outros usos existentes no local e em seu entorno;*

*II - viabilidade econômica da operação de dragagem;*

*III - segurança operacional, incluindo-se zonas de exclusão militar;*

*IV - presença de áreas ambientalmente sensíveis ou protegidas no local e em seu entorno.*

*§ 1º O polígono de disposição em mar, estuário ou baía e seu entorno deverão ser objeto de estudo prévio composto por:*

*I - batimetria;*

*II - caracterização física, química e biológica do sedimento e da coluna d'água;*

*III - modelagem matemática da dispersão da pluma de sedimentos descartados e do transporte de fundo.”*

Estudos recentes sugerem a boa aplicabilidade da modelagem numérica na análise do comportamento hidrodinâmico estuarino. Entretanto, devem ser bem consideradas as etapas de calibração e validação do modelo. A literatura atual aponta que são frequentes os erros de medição na concentração de sedimentos em suspensão, dada a complexidade dos sistemas estuarinos e a variedade de parâmetros influentes na coesividade do sedimento. Pode-se citar também a carência de dados para conhecimento da situação real das áreas estudadas (VAN RIJN, 2003, MARONE e NOERNBERG, 2003; GIURDINO et al., 2009; CHU et al, 2010; CUNHA et al, 2011; MARONE et al., 2012, BLENINGER, 2013; MAYERLE et al., 2015).

Portanto, a modelagem hidrodinâmica pode e vem sendo utilizada como ferramenta de apoio ao setor portuário, sobretudo no planejamento de operações de dragagens, monitoramento de estruturas costeiras além da previsão de condições extremas de ondas e correntes. De maneira geral, a maioria dos estudos enfatiza a modelagem numérica apenas nas áreas de descarte dos sedimentos dragados, omitindo o impacto socioambiental que pode ser gerado durante a operação das dragas, ao longo de todo seu percurso. Esse processo é consequência dos métodos usuais de dragagem, os quais originam uma 'pluma de dispersão de sedimentos' ao longo da região dragada, durante a atividade propriamente dita.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho visa testar a implementação do modelo hidrodinâmico e sedimentológico Delft3D simulando a dispersão da pluma de sedimentos oriunda de atividades de dragagem na Baía de Paranaguá e Antonina, utilizando-se de dados reais de dragagens neste estuário.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Simular a pluma de dispersão de sedimentos oriundos de atividades de dragagem e estimar parâmetros como alcance, largura e concentração máxima de sedimentos em suspensão;
- Validar a modelagem com os dados de uma dragagem real;
- Testar um fator de conversão direta entre dados de turbidez e sedimentos em suspensão, em diferentes pontos da Baía de Paranaguá e Antonina.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente estudo prossegue com o Capítulo 2 - Revisão de Literatura, explorando inicialmente os conceitos principais envolvidos no objeto de estudo como o transporte de sedimentos em estuários e o assoreamento de canais portuários. Em seguida são apresentados conceitos específicos das dragagens, discriminando os principais métodos de dragagens existentes e detalhando o método considerado no objeto de estudo, assim como o fenômeno de surgimento da pluma de dispersão de sedimentos em suspensão. São também apresentados os principais impactos ambientais associados às atividades de dragagem.

Ainda como parte da revisão de literatura, são citados os principais estudos envolvendo modelagem hidrodinâmica e relacionados com o presente estudo de alguma maneira, seja por considerar a mesma área de estudo, por envolver atividades de dragagem, ou ainda, a própria simulação da dispersão de sedimentos em suspensão oriundos de dragagem. Como fim da revisão, são descritas as principais características conhecidas da área de estudo, como padrões de circulação

hidrodinâmica, caracterização sedimentológica e variabilidade de parâmetros como salinidade, temperatura, e materiais em suspensão.

O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos que foram imprescindíveis ao desenvolvimento desse estudo. É descrita brevemente a base teórica em que o modelo hidrodinâmico se sustenta, expondo as principais equações no tocante ao transporte de sedimentos coesivos e não coesivos. Em seguida são detalhados todos os passos percorridos para a implementação do modelo hidrodinâmico na área de estudo, desde a obtenção dos dados primários e construção da grade numérica ao desenvolvimento da simulação da dispersão da pluma de sedimentos e metodologia de análise dos resultados. Por fim, são apresentados os eventos de dragagem em que foram realizadas medições simultâneas à atividade, possibilitando que servissem como base para posterior comparação aos resultados da simulação.

O Capítulo 4 apresenta o resultados das simulações são apresentados de maneira segregada para cada um dos três eventos de dragagem considerados. Para cada evento, são apresentados os resultados de nível do mar, em comparação aos dados reais; os pontos de observação considerados; os resultados gráficos da simulação da pluma de sedimentos em suspensão e a tentativa de correlação entre os dados simulados de concentração de sedimentos em suspensão e, por fim, os dados medidos de turbidez, convertidos para sedimentos em suspensão, com base em um fator experimental.

Por fim, o Capítulo 5 aborda as conclusões de todo o desenvolvimento bem como pontos críticos e análise de resultados. São apresentadas recomendações de estudos correlacionados que podem contribuir ao desenvolvimento contínuo desse ramo da engenharia e ciência.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A presente revisão de literatura inicia-se com os principais conceitos explorados no âmbito do transporte de sedimentos em estuários considerando seus impactos no assoreamento de canais de navegação e a conseqüente necessidade de se realizar dragagens com frequência. São apresentados os modelos e métodos de funcionamento das dragas consideradas nesse estudo assim como os principais impactos ambientais geralmente associados às dragagens.

Em seguida é apresentada a situação atual da pesquisa nessa área, apresentando, de maneira sucinta, trabalhos específicos envolvendo a modelagem hidrodinâmica de dragagens, modelos hidrodinâmicos implementados para a mesma localização (Complexo Estuarino de Paranaguá) e simulações de plumas semelhantes aos objetivos do presente estudo.

Por fim, o presente capítulo traz dados de referência para uma série de parâmetros na Baía de Paranaguá e Antonina, muitos dos quais serviram de base para a implementação do modelo hidrodinâmico e sedimentológico no presente estudo.

### 2.1 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM ESTUÁRIOS

O transporte de sedimentos e as conseqüentes mudanças morfológicas em estuários são assuntos recorrentes em estudos atuais dados os diversos impactos ambientais possíveis e demais problemas associados, sobretudo para portos e canais de navegação (CRONIN et al., 2009; GIURDINO et al, 2009; VILLARET et al., 2012; MAYERLE et al, 2015).

Os estuários são naturalmente ambientes de alta complexidade física, química e biológica. Miranda et al. (2002) definem os estuários de maneira clássica como:

*“Corpos de água parcialmente fechados, com aberturas para o oceano adjacente, onde a água do mar é diluída pela água de origem fluvial. Essa diluição é ocasionada pela mistura da água fluvial com a água do mar.”*

Estuários geralmente são rasos, e o nível da água sofre drásticas mudanças considerando a escala de tempo geológica. A variação na forma dos estuários atuais depende do volume de sedimento que o carreamento dos rios contribuiu para encher os vales, assim como o sedimento vindo do oceano (DYER, 1995). Miranda (2002) ressalta a importância desse processo, que pode ser associado a possíveis contaminantes ou sedimentos advindos de atividades antrópicas:

*“A sedimentação nos estuários torna-se uma ameaça ao expulsar a água do mar que contribuiu para sua formação, podendo transformá-lo novamente num rio forçado por maré. Mas, igualmente importante é a entrada de produtos estranhos ao ambiente estuarino que, associados ao processo de sedimentação, podem encurtar a vida geológica e a saúde biológica natural do estuário”.*

Os sedimentos regem muitos dos processos estuarinos. Como as concentrações de sedimentos suspensos em estuários geralmente são altas, as partículas são finas, coesivas, propensas à floculação e ricas em matéria orgânica. Afetadas pelos ciclos de maré, as partículas frequentemente sofrem processos físicos como erosão, transporte e deposição, e químicos, como, por exemplo, absorção e adsorção a outros elementos. Assim sendo, mesmo quando existe o aporte apenas de sedimento fino, pode ocorrer o assoreamento de canais de navegação, restringindo a operação portuária (DYER, 1995).

O comportamento de sedimentos em suspensão é usualmente observado com base em valores de concentração, que pode ser representada pela razão entre volume de sólidos e volume de fluido ( $L^3/L^3$ ) ou em massa de sólido por volume de fluido ( $M/L^3$ ). É possível perceber que a presença de sedimentos finos aumenta a viscosidade e a densidade do fluido, criando um efeito de retardo da velocidade de queda das partículas, ou velocidade de sedimentação (VAN RIJN, 1993).

As misturas contendo sedimentos com fração de partículas de areia ( $d < 4 \mu m$ ) acima de 10% possuem propriedades coesivas devido às forças eletrostáticas, que podem existir em proporção similar ou maior em influência quando comparadas às forças gravitacionais. Conseqüentemente, as partículas de sedimentos não se comportam como partículas individuais, mas tendem a se agrupar formando agregados cujo tamanho, densidade e velocidade de sedimentação podem atingir valores muito maiores, influenciando o comportamento hidrodinâmico (VAN RIJN, 1993).

Van Rijn (1993) define o lodo (*mud*) como uma mistura de fluido e sedimento contendo águas salgadas, areias, siltes, argilas e matéria orgânica, sendo assim submetido a uma complexa gama de variáveis. A classificação das propriedades dessa mistura possuem dependência a uma série de parâmetros locais como velocidades de correntes, amplitude de ondas, densidade do material de fundo predominante, temperatura, salinidade e pH (VAN RIJN, 1993). Tais particularidades expõem a necessidade de estudos direcionados às particularidades de cada local.

Dependendo das características do estuário pode haver uma zona de máxima turbidez (ZMT), configurada geralmente pelo aporte fluvial de sedimentos influenciado pelas variações de maré, inerentes ao ambiente estuarino (KJERFVE, 1989). Por definição, a ZMT é uma área com alta concentração de sedimentos em suspensão até cem vezes maior que a montante ou a jusante no estuário (DAVIS, 1985; GRABEMANN et. al., 1989; DYER, 1995). Nessa zona, o assoreamento dos canais é acentuado (VAN RIJN, 2012).

As características de elevação ao longo dos estuários criam importantes distinções na capacidade das correntes mover os sedimentos. A força da maré sofre influência do atrito com o fundo e do efeito de afunilamento das margens do sistema. Davies Jr. (1985) classificou estuários como de micromaré, onde as marés possuem amplitudes menores que 2 metros; mesomaré, para amplitudes de 2 a 4 metros; macromaré, maiores que 4 metros.

De maneira geral, estuários compõem a rota pela qual os sedimentos são transportados desde os rios para o mar. Seguindo o sentido do fluxo do rio, a distribuição do tamanho dos sedimentos é afetada pela deposição contínua, erosão e transporte desses. As frações mais finas de sedimento são preferencialmente transportadas dentro do estuário. Existem processos estuarinos que agem como filtro no aporte de sedimentos, sendo que pode haver mistura com o sedimento advindo do oceano (DYER, 1995).

Segundo Miranda (2002), os estuários recebem uma série de substâncias naturais e produtos de atividades antrópicas que podem causar degradação da qualidade da água. Schubel & Pritchard (1972) citou a possibilidade de presença de organismos patogênicos, matéria orgânica, nutrientes, metais pesados, óleos e substâncias tóxicas, oriundas de despejos domésticos, industriais e da navegação, além de efluentes da agricultura. Pode existir também o aporte de sedimentos ao

estuário advindos de obras em seu entorno ou da realização de dragagens nos canais de navegação, assunto detalhado no item 2.2.

Lung (1993) cita os principais impactos associados aos casos de contaminação dos sólidos suspensos (SS) e águas estuarinas: alteração do hábitat de organismos bênticos; assoreamento de canais ou margens, e a consequente redução da penetração da luz limitando a fotossíntese. Por ser capaz de carrear contaminantes, o transporte de sedimentos pode afetar indiretamente os padrões de salinidade, oxigênio dissolvido e temperatura.

### 2.1.1 Assoreamento de canais portuários

Van Rijn (2012) cita que o assoreamento de canais existe desde o início da operação portuária. Segundo o autor é importante a autoridade portuária definir a média anual de volume de sedimento a ser dragado assim como a composição desse, a fim de verificar possível contaminação.

As características de assoreamento estão fortemente associadas às condições físicas e ambientais, como salinidade, ventos, correntes, ondas e marés; e às condições geométricas, principalmente nas entradas de canais portuários. Nasner (1992) aponta que o assoreamento de canais portuários em diferentes ambientes é expressivamente maior em condições de água salgada se comparada com a água doce.

## 2.2 DRAGAGENS

Define-se dragagem como o serviço de desassoreamento, alargamento, desobstrução, remoção, derrocamento ou escavação de material do fundo de rios, lagoas, mares, baías e canais de acesso a portos. Geralmente, o principal objetivo é realizar a manutenção ou aumentar a profundidade dos canais de navegação, utilizados por grandes navios para acesso aos portos (SEP, 2015).

Por definição, pode se dizer que as dragagens constituem influências antrópicas ao transporte de sedimentos no estuário.

A resolução CONAMA nº 454/2012 (BRASIL, 2012), define:

[...]

*II - área de disposição do material dragado: local onde será disposto o material resultante das atividades de dragagem, em seu estado natural ou transformado em material adequado a essa permanência, de forma a não prejudicar a segurança da navegação e não causar danos significativos ao meio ambiente ou à saúde humana;*

[...]

*IV - dragagem de manutenção: dragagem operacional periódica destinada a manter a profundidade ou seção molhada mínima, assim como condições pré-estabelecidas de cota no leito de corpo de água;*

[...]

*IX - gerenciamento do material a ser dragado: procedimentos integrados que incluem a caracterização, avaliação, classificação e disposição do material a ser dragado, bem como monitoramento dos seus efeitos na área de disposição, considerando aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais;*

*X - material a ser dragado: material que será retirado ou deslocado do leito dos corpos d'água por meio da atividade de dragagem;*

[...]"

A área descrita no item II frequentemente é denominada bota-fora.

Segundo Porto (2010), a dragagem é um componente da infraestrutura do transporte aquaviário, podendo ser considerado um fator mercadológico e com direta influência na segurança da navegação e na contingência de danos ambientais. A realização de uma dragagem requer planejamento inicial, decisão técnica especializada e projeto estratégico. Como resultado, a realização da dragagem agrega valor à atividade portuária com o aumento da capacidade do canal visto que o aumento da profundidade permite o atendimento de barcos de maior calado, muitas vezes mais modernos. Já o aumento da largura pode influenciar na melhoria do tráfego marítimo, maior agilidade de operação e conseqüente maior produtividade (PORTO, 2010).

### 2.2.1 Tipos

Os equipamentos utilizados nos serviços de dragagem são denominados de dragas, as quais podem ser basicamente divididas em dois tipos: mecânicas ou hidráulicas.

As dragas mecânicas são utilizadas para a remoção de cascalho, areia e sedimentos muito coesivos, como argila, turfa, e silte altamente consolidado. Estas

dragas removem sedimentos de fundo através da aplicação direta de uma força mecânica para escavar o material, independente de sua densidade. Os principais tipos de dragas mecânicas são as escavadeiras flutuantes (tais como as de caçamba e as de garras) e as dragas de alcatruzes (também conhecidas por *bucket ladder*). Os sedimentos escavados com a utilização de dragas mecânicas são geralmente transportados em barcas ou barcaças, dependendo do volume a ser transportado.

Devido às suas grandes dimensões e capacidade de trabalho, as dragas mecânicas são utilizadas, geralmente, em dragagens de portos marítimos, onde o volume de dragagem costuma ser bastante expressivo.

As dragas hidráulicas são mais adequadas para a remoção de areia e silte pouco consolidado, removendo e transportando o sedimento na forma líquida. São em geral bombas centrífugas, acionadas por motores a diesel ou elétricos, montadas sobre barcas e que descarregam o material dragado através de tubulações que variam de 0,15 m a 1,2 m de diâmetro, mantidas sobre a água através de flutuadores. A bomba produz vácuo na entrada da tubulação e a pressão força água e sedimento através da tubulação. Estas dragas não podem operar com material que contenha grandes pedras. (PORTOGENTE, 2015).

Os tipos de draga de sucção são as aspiradoras e as cortadoras. Nas aspiradoras, a sucção é feita por meio de um grande bocal de aspiração. Com o auxílio de jatos de água, o material é desagregado e, através de aberturas no bocal, é aspirado e levado junto com a água aos tubos de sucção. Este tipo de bocal é utilizado em materiais finos e de fraca coesão, em cortes rasos, não cortando material coesivo e não podendo fazer cortes em bancos cujo material pode desmoronar sobre o bocal e impedir a sucção. As características específicas de uma draga dependem das bombas e da fonte de energia escolhida. As dragas de sucção cortadoras dispõem de um rotor aspirador, equipado com lâminas que desagregam o material já consolidado para que este possa ser aspirado para o interior do tubo de sucção que se insere no núcleo do rotor. O funcionamento é idêntico ao da aspiradora, porém, apresentam maior eficiência, e ao invés de atuarem numa linha reta, o movimento da draga descreve a trajetória de um arco. (PORTOGENTE, 2015).

Uma variação deste tipo de draga são as autotransportadoras, as quais são navios, com tanques (cisternas) de fundo móvel, onde o material dragado é

depositado, sendo a seguir transportado para o mar onde é descarregado, dispensando o uso de barcaças. As dragas hidráulicas, ao aspirar o sedimento, trazem junto uma grande quantidade de água. Conforme os tanques das barcaças e de dragas autotransportadoras vão se enchendo, é necessário eliminar esta água excedente fazendo-a transbordar para fora da embarcação, processo também conhecido por *overflow*.

### 2.2.2 Draga TSHD e a pluma de dispersão de sedimentos

É frequente o uso de dragas autotransportadoras de sucção e arrasto (*Trailing suction hopper dredge – TSHD*). As dragas desse tipo operam por meio de um sistema de dutos e braços de dragagem. Os implementos perfuradores e desagregadores nas extremidades são chamados de cabeça de dragagem e fazem a sucção dos sedimentos (Figura 1). O material succionado é depositado em uma cisterna e o volume depositado depende das características do material dragado (APPA, 2015).

A draga TSHD bombeia uma mistura de sedimento e água proveniente do leito para uma área de armazenamento interna ao navio. Do volume armazenado, boa parte do sedimento se deposita no fundo e o excesso de água é devolvido ao ambiente por meio de uma saída vertical. Esse fluxo pode ser entendido como um transbordamento (*overflow*) e geralmente forma uma pluma de turbidez sob a quilha (Figura 2) (WIT et al, 2014).



Figura 1 - Draga tipo *Hopper*  
Fonte: APPA (2015).

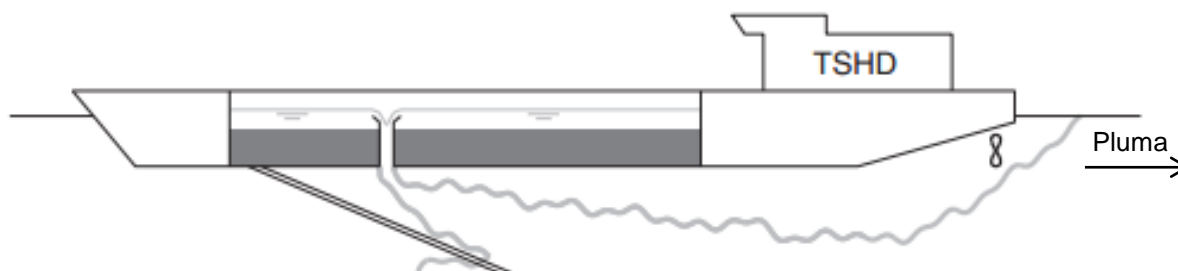


Figura 2 - Esquema representando a operação de dragas TSHD e o surgimento da pluma.  
Fonte: Adaptado de Wit et. al (2014).

A pluma de transbordamento (*overflow plume*) é a principal fonte de sedimentos suspensos a partir de uma draga TSHD, entretanto, seu comportamento e a capacidade de visualização é variável (BRAY, 2008; WIT, 2015), como pode ser visto na Figura 3.

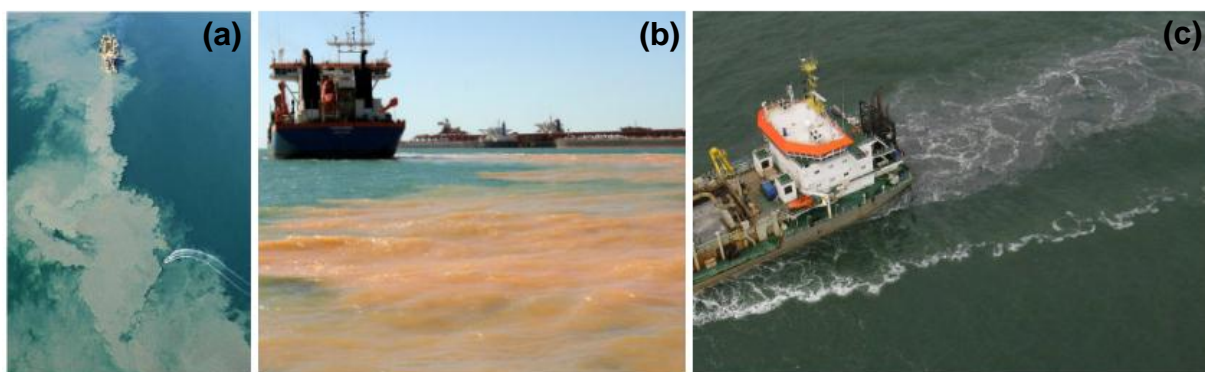


Figura 3 - (a) e (b): Surgimento da pluma de sedimentos na atividade de dragagem. (c): Atividade de dragagem com difícil visualização da pluma de sedimentos.  
Fonte: Wit et al (2015).

Uma pluma de sedimentos em suspensão oriunda de dragagem pode conter uma larga variedade de diâmetros de partículas, variando desde classe de areia com diâmetros maiores que  $63 \mu\text{m}$  até argila, com diâmetros bem menores. Dada a menor velocidade de sedimentação na cisterna da draga, a pluma geralmente contém mais argila e areia fina do que o próprio material dragado (RHEE, 2002; WIT, 2015.)

Segundo Crapper (1977), pode-se definir plumas como fluxos com a flutuabilidade alimentada de maneira contínua pelas características do material, enquanto jatos são fluxos com quantidade de movimento alimentada pela fonte.

Tanto para jatos quanto para plumas, existe a expansão lateral dos fluxos sendo incorporados ao meio. Ambos os escoamentos podem possuir comportamentos turbulentos ou laminares, dependendo das suas principais características. A definição de jatos flutuantes, ou plumas forçadas, é um tipo de jatos e plumas onde os escoamentos são regidos tanto pela quantidade de movimento, quanto pelo empuxo. Inicialmente o principal forçante é a quantidade de movimento ao passo que, conforme progride, passa a ser regido pelos processos de empuxo (FISCHER et al, 1979; FERREIRA, 2013).

### 2.2.3 Impactos ambientais das dragagens

Os impactos ambientais decorrentes de obras de dragagem, considerando tanto o ponto dragado quanto o local de lançamento do material dragado com efeito direto ou indireto sobre o meio ambiente são (OECD, 1993; LEAL NETO, 2000; TORRES, 2000; PORTO & TEIXEIRA, 2002):

- Alteração das condições hidráulicas e sedimentológicas do escoamento, com possível alteração dos padrões de circulação e mistura da água, salinidade e turbidez;
- Poluição por substâncias tóxicas existentes no material de dragagem, sua suspensão e movimentação durante a atividade, com alteração da qualidade da água;
- Impactos diretos sobre habitats da fauna e flora aquática, associada ao sedimento marinho e águas interiores. A ação das dragas e a sucção do material geram impactos negativos de efeito direto sobre organismos e habitats. O efeito indireto ocorre com a movimentação de contaminantes e nutrientes durante a suspensão do sedimento, podendo haver alteração da qualidade da água e a química global do estuário (TORRES, 2000).

Diversos estudos recentes enfatizam os impactos ambientais negativos das dragagens associados ao aumento da turbidez da água e dispersão da pluma de sedimentos (PAGLIAI et al., 1985; NICHOLS et al., 1990; GILKINSON et al., 2003; ERFTEMEIJER e LEWIS-III, 2006; KIM AND LIM, 2009; ERFTEMEIJER et al., 2012; CAPELLO et al., 2013; MESTRES et al., 2013; citados por WIT et al., 2014). A magnitude e a gravidade dos impactos ambientais de projetos de dragagens

dependem da frequência, duração e intensidade de perturbações como turbidez e sedimentação, além da resiliência do ecossistema em questão (ERFTEMEIJER e LEWIS-III 2006; ERFTEMEIJER et al. 2012, citado por WIT et al., 2014).

### 2.3 MODELAGEM HIDRODINÂMICA –

Considerando estudos realizados em estuários, a modelagem hidrodinâmica tridimensional vem sendo desenvolvida a partir da necessidade de se considerar em projeto a relação entre a velocidade e a variação da profundidade de determinado local ao longo do tempo, ocasionada pelo transporte dos sedimentos (LESSER et al, 2004).

Ribas (2004) implementou o modelo numérico Delft3D para as Baías de Paranaguá e Antonina para o estudo do padrão hidrodinâmico da região. O campo batimétrico foi produzido por Herrling (2003) através de digitalização de cartas náuticas, interpolação de imagens de satélite Landsat 5 e Landsat 7, e dados provenientes de campanhas com ecosondas, disponibilizados pela administração portuária. Foram realizados testes de sensibilidade variando o intervalo de tempo de discretização, rugosidade de fundo (Chézy), viscosidade da água, padrões de vento e descargas de rios. O modelo foi calibrado com base em dados de nível do mar da Estação Maregráfica de Paranaguá, de abril de 2000, ajustando a rugosidade de fundo. Foi observada a tendência de aumento da magnitude das correntes geradas com o aumento do coeficiente de Chézy. A autora considerou ainda campos de ventos de NE, SE e SW e descargas médias e máximas anuais dos três principais rios da região (Cachoeira, Nunes e Nhundiaquara). A simulação tridimensional foi realizada para avaliação da importância do efeito baroclínico, indicador de estratificação, na circulação da região. Canais preferenciais de circulação, frentes de maré e células de recirculação foram melhores observadas durante estofas de maré e em campos de velocidade residual. Análises quanto aos campos de velocidade residual e campos de temperatura e salinidade sugeriram que os fluxos tridimensionais tiveram menor importância na circulação da região de estudo, para novembro e dezembro de 2000, considerando as descargas médias anuais dos três principais rios da região. Diferenças entre os campos de temperatura e de salinidade entre as camadas da superfície, meio e fundo, não puderam ser constatadas,

sugerindo que para o cenário construído o estuário apresentou boa capacidade de mistura, resultando em uma homogeneidade vertical destas propriedades (RIBAS, 2004)

Falkenberg (2009) analisou a mistura, dispersão e qualidade da água na Baía de Paranaguá através de um modelo hidrodinâmico bidimensional desenvolvido por meio da plataforma Delft3D. Utilizando também a grade de Herrling (2003) foi permitido determinar parâmetros físicos como o prisma de maré e a cunha de salinidade. O balanço de massas de água foi analisado para períodos de quadratura e sizígia, verificando características de retenção de massas de água na sizígia e exportação de massas de água na quadratura. O autor calibrou o modelo com diferentes valores de coeficiente de Chézy, sugerindo bons resultados utilizando  $105 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{-1}$  para o Canal da Galheta e  $120 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{-1}$  para pontos internos como o Porto de Paranaguá. O autor utilizou o módulo Delft3D-WAQ, componente específico do sistema Delft que permite a modelagem de parâmetros de qualidade da água, para calibrar um modelo de transporte de material particulado em suspensão, considerando partículas de silte e argila. Os resultados apresentaram boa correlação entre os dados da simulação e os dados medidos, conferindo boa aplicabilidade da modelagem hidrodinâmica à situação.

Je et. al (2007) realizou a simulação do transporte de sedimentos a partir de um modelo bidimensional integrado ao longo da coluna d'água. A modelagem da floculação requereu como parâmetros de entrada, a concentração inicial total de sedimentos em suspensão, a distribuição da fonte (parâmetro relacionado ao movimento da draga), as características hidráulicas de transporte e as propriedades de floculação e deposição. A concentração local inicial (*background*) foi considerada nula. Os coeficientes de difusão turbulenta horizontal variaram entre 10 e  $28 \text{ m}^2/\text{s}$ . A área de estudo foi um rio no município Savannah, estado da Georgia nos Estados Unidos, abrangendo 250 metros na direção longitudinal e 100 metros na direção transversal, com células espaçadas a cada metro. Foram observadas velocidades médias de corrente de até  $0,48 \text{ m/s}$ . Analisando os parâmetros da pluma formada, os resultados mostraram boa capacidade de simulação dos perfis de concentração de sedimentos em suspensão no local estudado.

Lopes (2010) implementou o modelo hidrodinâmico Delft3D para todo o CEP para testar a influência de parâmetros físicos e numéricos no modelo e analisar as possíveis discrepâncias entre os dados medidos e simulados. A calibração do

modelo foi realizada com base em dados de 2007 e 2008. O autor obteve melhores resultados a partir do coeficiente de Chézy definido uniformemente em  $65 \text{ m}^{0.5}/\text{s}^{-1}$ , entretanto, indicou a necessidade de um mapa de rugosidade de fundo variável ao longo do CEP. O autor aponta o efeito de barreira hidráulica observada nas regiões de alargamento da baía, sobretudo nas velocidades máximas de correntes. Nesses períodos as velocidades do canal principal impedem a renovação de água e sedimentos em suspensão, situação evidenciada em frente ao Porto de Paranaguá. Já nos períodos de inversão de marés, a região apresentou formações de vórtices devido às oscilações das componentes de maré e à irregularidade da morfologia do fundo. De maneira geral, atesta a maior dificuldade na simulação em eventos de marés de quadratura, ou de baixa amplitude.

CPE (2010) realizou a modelagem numérica bidimensional da dispersão da pluma de sedimentos provenientes das atividades de dragagem através do modelo hidrodinâmico Delft3D. Foram obtidos dados relativos à granulometria dos sedimentos de fundo ao longo do canal de navegação da Baía de Paranaguá e Antonina, local onde foi realizada a dragagem. Foi considerada a pluma na região de descarte, ou bota-fora, dos sedimentos dragados. Como resultado observou-se, no trecho Bravo 2 (fração de silte = 65%), a pluma de *overflow* inicialmente com concentrações superiores a 100 mg/L nas imediações do canal, em um raio de aproximadamente 1,8 km, dispersando-se após 1 hora em um raio de aproximadamente 4,5 km, com concentrações variando de 40 mg/L a 10 mg/L, chegando a concentrações inferiores a 10 mg/L após 4 horas do momento do *overflow*. Segundo o estudo, a pluma pode se dispersar a distâncias superiores a 10 km para dentro ou fora da baía em condições de máximas correntes na enchente ou vazante, respectivamente. No trecho Delta (fração de silte = 99%) a pluma de sedimentos oriundos do processo de resuspensão, apresentou concentrações variando de 40 mg/L, no ponto de dragagem, até 5 mg/L, prolongando-se longitudinalmente na baía numa extensão de aproximadamente 4 km, para o interior ou para a área externa, de acordo com o fluxo de correntes. Em decorrência da alta quantidade de silte, o processo *overflow* não foi considerado nessa simulação.

Cunha et al. (2011) avaliou a poluição oriunda de esgotamento sanitário no Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) usando modelagem ambiental e dados de monitoramento. O modelo utilizado é denominado SisBAHIA<sup>®</sup> (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental) e foi desenvolvido pelo Programa de Engenharia

Oceânica COPPE/UFRJ. O modelo de qualidade da água do SisBAHIA<sup>®</sup> considera parâmetros como nitrogênio amoniacal, nitrato, nitrogênio orgânico, clorofila, oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo orgânico e inorgânico, temperatura e salinidade. O sistema permite a decomposição de séries temporais de maré em constituintes harmônicas a partir da Análise de Fourier.

Carneiro (2013) estudou a dinâmica sedimentar das Baías de Paranaguá e Antonina com base nas tendências naturais de transporte de sedimentos na região. O autor buscou a melhor compreensão das mudanças nos padrões de distribuição granulométrica a partir de três conjuntos de dados dos últimos 50 anos (1966, 1995 e 2012) e análises estatísticas. Conclui que as áreas com maior ação hidrodinâmica possuem sedimentos mais grossos (areias) e bem selecionados, sendo que os teores mais elevados de carbonatos também se relacionam com estas mesmas áreas. Já as zonas interiores, com baixa hidrodinâmica, caracterizam-se pela deposição de sedimentos finos (siltes e argilas), marcados pela má seleção e com teores elevados de matéria orgânica.

Wit et al. (2014) utilizou um modelo computacional tridimensional de dinâmica de fluídos (CFD) para simular a mistura de uma pluma de sedimentos com extensão de 400 metros, oriunda do processo de *overflow* durante um evento de dragagem a partir de uma draga do tipo TSHD. As simulações foram comparadas com medições de campo *in loco* da pluma de sedimentos gerada e aplicadas a sete situações distintas. As medidas máximas de concentração de sólidos em suspensão na pluma variaram de 30 a 500 mg/L e os fluxos representaram valores entre 0,7% a 20% do fluxo total do *overflow* e, de maneira geral, os resultados apresentados permitiram a visualização da pluma. Foram considerados eventos na Europa (dragas de 6 e 15 m<sup>3</sup>) e na Austrália (dragas de 20 m<sup>3</sup>) com vazões de *overflow* variando entre 1 e 15 m<sup>3</sup>/s, correspondendo a cargas variáveis também, entre 86 e 2500 kg/s. O autor define o campo próximo como a zona onde os efeitos de flutuação e de interação com o navio são dominantes, podendo ser tipicamente os primeiros 100 metros de distância da fonte. Já o campo afastado foi definido pela zona onde os efeitos de flutuação e da interação com o barco não são mais dominantes e a dispersão dos sedimentos é governada principalmente pelas características locais de sedimentação e forçantes do ambiente, como as marés (WIT et al., 2014).

Mayerle et al. (2015) simulou os processos de transporte de sedimentos coesivos e não-coesivos no CEP a partir de um modelo hidrodinâmico tridimensional

considerando correntes e ondas e base desenvolvido a partir do modelo Delft3D. Foram obtidos dados de campo da concentração de sedimentos em suspensão ao longo do canal de navegação, durante os diferentes ciclos de maré. Como fonte de dados de batimetria foram utilizadas as cartas náuticas, imagens do satélite Landsat, e medidas com ecobatímetro ao longo do canal de navegação. São considerados os processos de transporte de fundo e de ressuspensão de sedimentos a partir de coeficientes uniformes, como viscosidade turbulenta horizontal ( $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ ) difusividade turbulenta horizontal ( $1 \text{ m}^2/\text{s}$ ), e coeficientes variáveis como a rugosidade. Os coeficientes de rugosidade foram considerados como um mapa, elaborado a partir do procedimento numérico proposto por Escobar e Mayerle (2006). Com base em uma larga gama de medidas de campo considerando velocidade da corrente, nível do mar, salinidade e sedimentos em suspensão, foi calibrado e validado o modelo hidrodinâmico Delft3D-FLOW, o qual obteve resultados considerados como bem representativos à realidade. O trabalho permite uma noção da dinâmica sedimentar do estuário a partir do transporte de sedimentos coesivos e as consequentes modificações morfológicas.

## 2.4 ÁREA DE ESTUDO

### 2.4.1 Localização

O Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), principal estuário do litoral paranaense, é composto basicamente por dois eixos de orientação: a baía de Paranaguá e Antonina, com 56 km de extensão no eixo Leste-Oeste; e a baía das Laranjeiras, com 30 km de extensão no eixo Norte-Sul. Possui área total de  $612 \text{ km}^2$  (LAMOUR et al, 2004; MAYERLE et al, 2015).

Na Figura 4 está representada a área de estudo com destaque na Baía de Paranaguá e Antonina, subdividida na área de influência desse estudo.

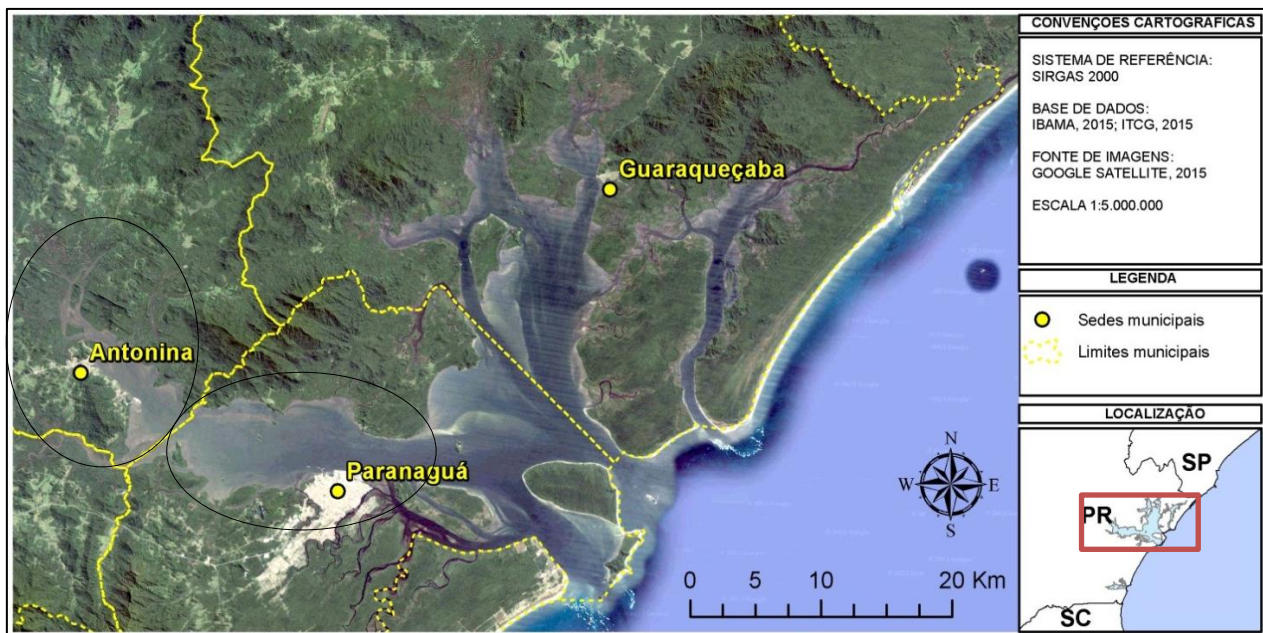


Figura 4 - Representação gráfica do CEP. Em destaque a Baía de Antonina e a Baía de Paranaguá.

Segundo Mantovanelli (1999), uma grande diversidade de ambientes pode ser notada ao longo dessa região, incluindo planícies de maré, baixios, costões rochosos, marismas, canais de maré e manguezais.

De maneira bem geral, a distribuição e variação temporal das propriedades físico-químicas da Baía de Paranaguá estão bem relacionadas com os gradientes de salinidade e de energia (LANA et al., 2001).

#### 2.4.2 Circulação hidrodinâmica

Ambientes estuarinos geralmente podem ser influenciados por três principais forçantes: as correntes de maré, a vazão fluvial e a tensão do vento. A circulação hidrodinâmica geralmente está associada ao transporte de constituintes presentes no corpo d'água, devido ao processo de advecção destes aos sólidos em suspensão. Na Baía de Paranaguá, o principal mecanismo de fornecimento de energia para o sistema são as correntes de maré com influência do aporte fluvial de caráter predominantemente semidiurno (KNOPPERS et al., 1987; MARONE e CAMARGO, 1994). Cunha et al. (2011), considera que com os padrões de baixa estratificação do CEP, as velocidades das correntes podem ser bem representadas pelas médias do eixo vertical. Lopes (2010) aponta valores de até 1,5 m/s de velocidade de corrente de maré enchente, principalmente nas regiões de afunilamento da baía.

A estimativa da drenagem fluvial total no CEP possui divergências na literatura. Considerando a soma das vazões de todos os rios que compõem o estuário, resultados entre diferentes estudos conferem valores de até 200 m<sup>3</sup>/s (BIGARELLA et al., 1978; KNOPPERS et al., 1987; MARONE et al., 1997; FALKENBERG, 2009).

No que se refere ao regime de marés no CEP, as características geográficas deste são de proporções capazes de conferir um comportamento regular e de alta previsibilidade considerando os ciclos de maré e as consequentes variações no nível do mar. Camargo (1998), através do modelo hidrodinâmico *Princeton Ocean Model* (POM) implementado na plataforma sul-sudeste do Brasil, gerou as constituintes harmônicas para toda a extensão da costa brasileira. A grade numérica considerada pelo autor possuía resolução aproximada de 1,5 km. O método para determinação das constituintes harmônicas de maré é a Análise de Fourier, análise harmônica de funções ou sinais como a sobreposição de outras ondas senoidais de base que permite a decomposição dessas ondas e a definição de características como amplitude, frequência e fase. Cada onda corresponderá a uma constituinte harmônica com influência variável, conforme o local analisado. As constituintes encontradas por Camargo (1998) para a região do CEP são apresentadas no capítulo seguinte.

Alguns autores afirmam que para o CEP em condições meteorológicas estáveis, as correntes e profundidades são determinadas basicamente pela maré, sendo a M2 (lunar semidiurno) a principal componente de maré (MARONE et al., 1997; FALKENBERG, 2009; MAYERLE et al., 2015). A variação de maré aumenta estuário acima, especialmente durante marés de sizígia, variando de 1,7 m na desembocadura do estuário até aproximadamente 2,7 m em Antonina (FALKENBERG, 2009). No canal de navegação, na região de Paranaguá, a faixa de variação da maré é de até 2,0 m (MAYERLE et al., 2015).

Com relação aos ventos, a literatura indica a predominância das direções de Leste, com variações de Sudeste a Nordeste, com uma intensidade média de 4 m/s e amplitudes de cerca de 2 m/s ,de novembro a março (CAMARGO et al., 1996).

### 2.4.3 Caracterização sedimentológica

O CEP sofre influência da Serra do Mar que, situada em posição adjacente à baía e com altitudes de até 1.800 m, possui grandes vertentes e seus rios são responsáveis pela lixiviação das rochas e consequente aporte sedimentar na planície litorânea. Grande parte desses sedimentos fica aprisionada no interior da baía pelo fato da zona intermediária do estuário não ter força hidrodinâmica para expulsar o material trazido pelos rios (LAMOUR, 2004; BIGARELLA, 2007; CPE, 2010).

Mayerle et al (2015) cita que os sedimentos consistem principalmente em areia e silte fina na área próxima à foz dos rios, e areia muito fina na desembocadura do CEP. Já na área do Porto de Paranaguá pode ser considerada como silte fina.

Lamour (2004) determinou parâmetros texturais dos sedimentos de fundo no CEP, compondo o mapa sedimentológico apresentado na Figura 5 (CPE, 2010).

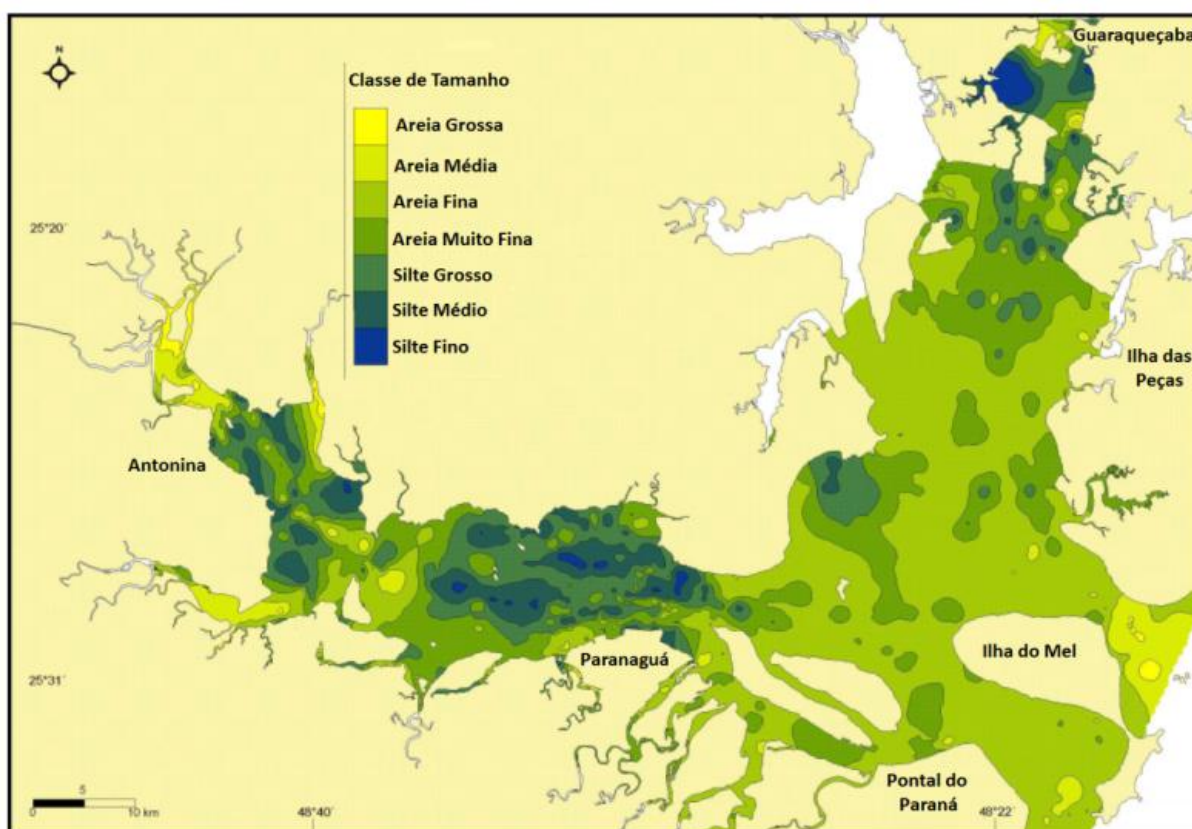


Figura 5 – Mapa sedimentológico do Complexo Estuarino de Paranaguá  
Fonte: CPE (2010); adaptado de Lamour (2004).

A Norma ABNT NBR 6502/95 (ABNT, 1995), classifica os solos como:

- Areia: solo não coesivo e não plástico formado por minerais ou partículas de rochas com diâmetros compreendidos entre 0,06 e 2 mm;
- Silte: solo que apresenta baixa ou nenhuma plasticidade, e que exibe baixa resistência quando seco o ar. É formado por partículas com diâmetros compreendidos entre 0,002 e 0,06 mm.
- Argila: solo de granulação fina constituído por partículas com dimensões menores que 0,002 mm, apresentando coesão e plasticidade.

O gráfico da Figura 6 apresenta a distribuição média da granulometria dos sedimentos em cada trecho do canal de navegação.

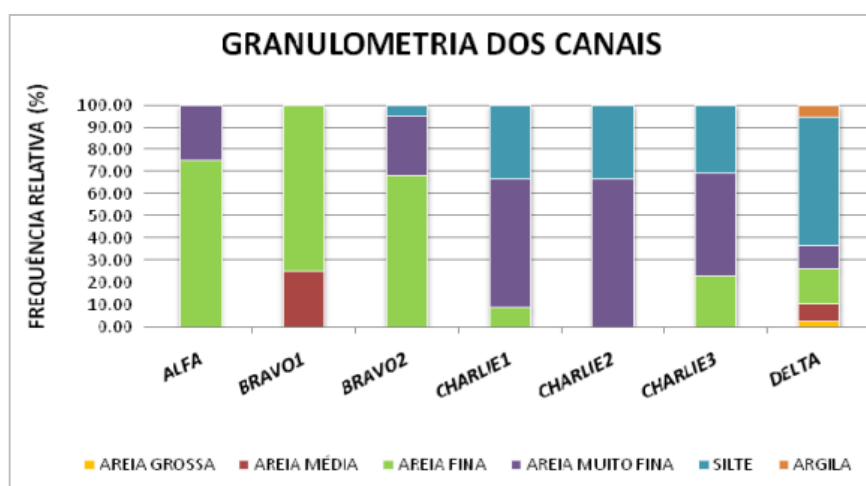


Figura 6 - Histograma de frequência das classes de sedimentos nos canais de navegação  
Fonte: CPE, 2010.

Pelo mapa sedimentológico e o gráfico de distribuição, conclui-se que onde a circulação é mais forte, os sedimentos são mais selecionados e predominam areias. Já em locais onde a circulação é menos intensa, predominam sedimentos pouco selecionados (maior número de classes de tamanho), mais finos e argilosos (CPE, 2010).

De maneira geral, a literatura existente traz resultados qualitativos a respeito do transporte natural de sedimentos e a relação com operações de dragagens causando mudanças morfológicas antecipadamente (LAMOUR et al., 2004; ÂNGULO et al., 2006; NOERNBERG et al., 2007).

Os sedimentos são tipicamente definidos em coesivos e não coesivos, classificados conforme a capacidade de coesão, ocasionando a formação de flocos

maiores (floculação). Esse conceito é diretamente correlacionado ao diâmetro predominante dos grãos, sendo o marco de referência em torno de 0,065 mm. Portanto, pode-se associar a definição de sedimentos coesivos aos sedimentos com granulometria de argila e silte, enquanto os sedimentos não coesivos correspondem àqueles com granulometria de areia.

#### 2.4.4 Salinidade e Temperatura

O gradiente horizontal de salinidade média varia de 12 a 29 g/kg no verão e 20 a 34 g/kg no inverno, com gradientes máximos de 0 a 35 g/kg no verão e de 3 a 35 g/kg no inverno. A temperatura média da água varia de 23 a 30°C no verão e de 18 a 25°C no inverno, (MARONE et al., 1997; FALKENBERG, 2009).

#### 2.4.5 Material em Suspensão e Turbidez

Segundo Tomazoni (2005):

*“O material particulado em suspensão está em constante mobilidade pela turbulência, pelas correntes convectivas no líquido e pela repulsão causada pelas cargas elétricas presentes na superfície das partículas. Esse processo mantém as partículas em equilíbrio dinâmico, sendo que as menores permanecem em suspensão e as maiores tendem a sedimentar gradativamente.”*

Para a Baía de Paranaguá e Antonina, estudos recentes sugerem que as concentrações de sedimentos em suspensão são geralmente baixas e menores do que 0,22 kg/m<sup>3</sup>, sendo que os maiores ocorrem em marés de sizígia (MAYERLE et al., 2015).

A turbidez é definida pela redução da transparência da água ocasionada pela presença de material em suspensão, refletindo a luz e dificultando a passagem para a coluna de água. A quantificação de luz refletida pelas partículas suspensas permite ter noção da ordem de grandeza da concentração de sólidos em suspensão na amostra (TOMAZONI et al., 2005). De maneira geral, a medição da turbidez é expressa em NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez) sendo realizada por equipamentos específicos denominados turbidímetros, os quais funcionam a partir da medição de diferentes intensidades de luz em uma amostra de água (USGS, 2015).

Tomazoni et al. (2005) estabeleceu um fator de conversão dos dados de turbidez em NTU para concentração de sedimentos em suspensão (em mg/L) para bacias hidrográficas do Sudoeste do Paraná. Segundo os resultados obtidos, o autor considera viável a conversão dessas unidades a partir da multiplicação dos dados de turbidez pelo fator 0,6937, obtendo como produto valor equivalente à concentração de sólidos suspensos, expresso em mg/L.

Os valores de turbidez são frequentemente correlacionados com a concentração de cloro residual, coliformes fecais, casos de hepatite A e poliomielite. Outro aspecto é a correlação da turbidez com a eficácia da desinfecção da água, o que torna esse parâmetro grande indicador sanitário (OMS 1996; TOMAZONI, 2005).

Em geral os estuários possuem uma zona definida pelo acúmulo de sedimentos em suspensão denominada Zona de Máxima Turbidez (ZMT). Considerando a Baía de Paranaguá e Antonina, essa área encontra-se nas proximidades do Porto de Paranaguá. Essa ZMT foi identificada por estudos anteriores na região entre a Ilha do Teixeira e o Porto de Paranaguá e observaram sua migração longitudinal (ao longo do canal) durante o ciclo de maré semidiurna característica deste estuário (MANTOVANELLI, 1999; NOERNBERG, 2001; ZEM, 2008, CARNEIRO, 2013). Os sedimentos na ZMT variam em função da vazão dos rios e da ação diferenciada das correntes de maré de sizígia e de quadratura, pode haver grande variabilidade temporal e espacial relacionadas à intensidade das correntes de maré, aos processos de advecção e ressuspensão (MANTOVANELLI, 1999; CARNEIRO, 2013).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento da modelagem hidrodinâmica e sedimentológica para cumprir com os objetivos do presente estudo foi baseado inicialmente na reunião de todos os dados necessários à implementação do modelo hidrodinâmico Delft3D na Baía de Paranaguá e Antonina.

Em seguida, com base em análises dos relatórios cedidos pela Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina (APPA), foram definidos os períodos de simulação e os locais exatos onde aconteceram as atividades de dragagem reais com coletas de dados simultâneas. A partir de então houve a adequação dos parâmetros na tentativa de simular os eventos de dragagem, especificamente o fenômeno de formação da pluma de sedimentos em suspensão oriundos do processo de *overflow* das dragas convencionais.

#### 3.1 MODELO HIDRODINÂMICO- BASE TEÓRICA

O módulo hidrodinâmico do Sistema de Modelagem Delft3D (DELFT3D-FLOW), desenvolvido pelo *Delft3D Deltares Hydraulics* (Holanda), simula fluxos não estacionários em duas ou três dimensões, fenômenos de transporte resultantes de marés, descarga de água e efeitos meteorológicos, incluindo o efeito de diferenças nos valores de densidade devido a gradientes de temperatura e salinidade, assim como os efeitos de maré e a influência dos ventos (DELTARES, 2012).

##### 3.1.1 Transporte de sedimentos e comportamento hidrodinâmico

O módulo de transporte de sedimentos e modificações morfológicas pode considerar tanto as parcelas de transporte de fundo (*bedload*) quanto o transporte suspenso, para sedimentos não coesivos. Para sedimentos coesivos é considerado apenas o transporte suspenso. O presente trabalho desconsiderou o transporte de fundo por não influenciar o objeto de estudo, a pluma de dispersão de sedimentos em suspensão.

De maneira geral, o transporte tridimensional de sedimentos suspensos é calculado resolvendo a equação tridimensional (Equação 1) de balanço de massa (advecção-difusão):

$$\frac{dc}{dt} + \frac{duc}{dx} + \frac{dvc}{dy} + \frac{d(w - w_s)c}{dz} - \frac{d}{dx} \left( \varepsilon_{s,x} \frac{dc}{dx} \right) - \frac{d}{dy} \left( \varepsilon_{s,y} \frac{dc}{dy} \right) - \frac{d}{dz} \left( \varepsilon_{s,z} \frac{dc}{dz} \right) = 0 \quad (1)$$

Onde:

$c$ : concentração da fração de sedimentos, em massa (kg/m<sup>3</sup>)

$u$ ,  $v$  e  $w$ : componentes de velocidade do fluxo (m/s)

$\varepsilon$ : coeficientes de difusão turbulenta da fração de sedimentos (m<sup>2</sup>/s)

$w_s$ : velocidade de sedimentação da fração de sedimento, dificultada pela concentração de sólidos suspensos na coluna d'água.

Computacionalmente, o transporte de sedimentos em 3 dimensões é calculado da mesma maneira que o transporte de qualquer outro constituinte conservativo, tais como salinidade, calor etc. Existem, entretanto, algumas diferenças entre sedimentos e outros constituintes, como por exemplo as alterações hidrodinâmicas causadas pela mudança na densidade da coluna d'água e a velocidade de precipitação pela ação da gravidade. O Delft3D-FLOW utiliza a relação formulada por UNESCO (1981) para ajustar a densidade da água de acordo com a salinidade e temperatura. Para sedimentos essa relação é estendida a partir da inclusão da massa de sedimento (em suspensão) por volume e posterior subtração da massa de água, conforme a Equação (2).

$$\rho_{mistura} = \rho_{\acute{a}gua} + c \left( 1 - \frac{\rho_{\acute{a}gua}}{\rho_{sed}} \right) \quad (2)$$

Onde:

$\rho_{\acute{a}gua}$ : Densidade específica da água salgada (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_{sed}$ : Densidade específica da fração de sedimentos (kg/m<sup>3</sup>)

Cita-se aqui a possibilidade de criação de fluxos devidos aos gradientes horizontais e verticais de densidade (DELTARES, 2012).

### 3.1.2 Velocidade de sedimentação

A velocidade de sedimentação do material em suspensão é um parâmetro importante na determinação do transporte e das taxas de deposição do sedimento e

são calculadas de maneira bem distintas para argila e areia (DYER, 1995; DELTARES, 2012). Para argila floculada, a velocidade está relacionada com a concentração. Dyer (1995) cita que existem discrepâncias nas relações entre velocidade de sedimentação e concentração em diferentes estuários, dadas as mudanças na densidade do floco e variações na quantidade de matéria orgânica, além de diferentes estágios de turbulência durante a formação do floco (DYER, 1995).

Os cálculos para sedimentos coesivos e não coesivos são bastante diferentes. Em misturas de água-sedimento em grandes concentrações, a velocidade de sedimentação de uma partícula individual é reduzida devido à presença das outras partículas. O Delft3D-FLOW baseia-se na fórmula Richardson e Zaki (1954) para o cálculo da velocidade 'dificultada' (reduzida) em função da concentração de sedimentos e da velocidade de sedimentação padrão, conforme mostrado na Equação (3).

$$w_s = \left(1 - \frac{C_s^{tot}}{C_{solo}}\right) w_{s,0} \quad (3)$$

Onde:

$C_s^{tot}$ : soma da concentração em massa, de todas as frações de sedimento (kg/m<sup>3</sup>)

$C_{solo}$ : densidade de referência (parâmetro de entrada) (kg/m<sup>3</sup>).

$w_{s,0}$ : velocidade de sedimentação padrão, sem considerar o efeito das outras partículas.

Como a velocidade de sedimentação é considerada função da concentração de sedimentos, cada fração de sedimentos possui uma velocidade de sedimentação como função do espaço e do tempo.

### 3.1.2.1 Sedimentos Coesivos

Em águas salgadas os sedimentos coesivos tendem a se agrupar formando flocos cujo grau de floculação depende da salinidade da água. Esses flocos são consideravelmente maiores do que as partículas individuais e, conseqüentemente, possuem velocidade de sedimentação maior (DELTARES, 2012). Como o modelo foi iniciado já com mistura completa e densidade geral correspondente à densidade da

água salina, a equação de velocidade de sedimentação referente aos flocos se iguala à velocidade de sedimentação em salinidade máxima, definida como parâmetro de entrada.

### 3.1.2.2 Sedimentos Não-Coesivos

Para sedimentos não-coesivos (areia), o cálculo da velocidade de sedimentação é feito com base em Van Rijn (1993) (DELTARES, 2012):

$$\begin{aligned}
 w_s &= \frac{(s-1)gD_s^2}{18\nu} & 65\mu m \leq D_s \leq 1000\mu m \\
 w_s &= \frac{10\nu}{D_s} \sqrt{1 + \frac{0,01(s-1)gD_s^3}{\nu^2}} - 1 & 100\mu m \leq D_s \leq 1000\mu m \\
 w_s &= 1,1\sqrt{(s-1)gD_s} & 1000\mu m < D_s
 \end{aligned} \tag{4}$$

Onde:

$s$ : densidade relativa da fração de sedimentos

$D_s$ : diâmetro representativo

$\nu$ : viscosidade cinemática da água ( $m^2/s$ )

## 3.2 MODELO HIDRODINÂMICO - IMPLEMENTAÇÃO

A implementação do modelo hidrodinâmico consistiu nas seguintes etapas:

- 1) Definição das fronteiras fechadas do sistema;
- 2) Desenvolvimento da grade computacional;
- 3) Atribuição da batimetria e interpolação dos dados;
- 4) Estabelecimento das condições iniciais;
- 5) Estabelecimento das condições de contorno (fronteiras abertas);
- 6) Validação dos resultados de circulação hidrodinâmica, com base em comparação entre dados reais e simulados;
- 7) Atribuição de uma fonte pontual de sedimentos em suspensão, para simulação da atividade de dragagem.

Cada uma das etapas citadas é descrita nos itens seguintes.

### 3.2.1 Definição de fronteiras fechadas

As fronteiras fechadas do modelo representam as faixas de terra e demais terrenos não inundáveis. A fronteira foi obtida a partir da digitalização da linha de costa a partir de uma imagem de satélite, apresentada na Figura 7. Para tal, foi utilizado o banco de imagens do *software Google Earth*, considerando para cada local a imagem mais recente disponível.



Figura 7 - Definição das fronteiras do modelo a partir da imagem de satélite  
Fonte: Google Earth (2015)

O polígono gerado é utilizado como base para geração da grade computacional a partir da ferramenta RGFGRID, módulo do Delft3D-FLOW que permite gerar grades computacionais curvilíneas com base em dados espaciais.

### 3.2.2 Domínio da grade

Para melhor representar os canais e regiões mais estreitas do estuário, a grade computacional utilizada para os cálculos do modelo foi gerada densificando o cálculo nessas regiões, ou seja, com um número maior de células por área. O domínio da grade compreende toda a área molhada do CEP, além de uma área de oceano atlântico, com raio de aproximadamente 15 km afastado das principais desembocaduras do estuário (Figura 8).

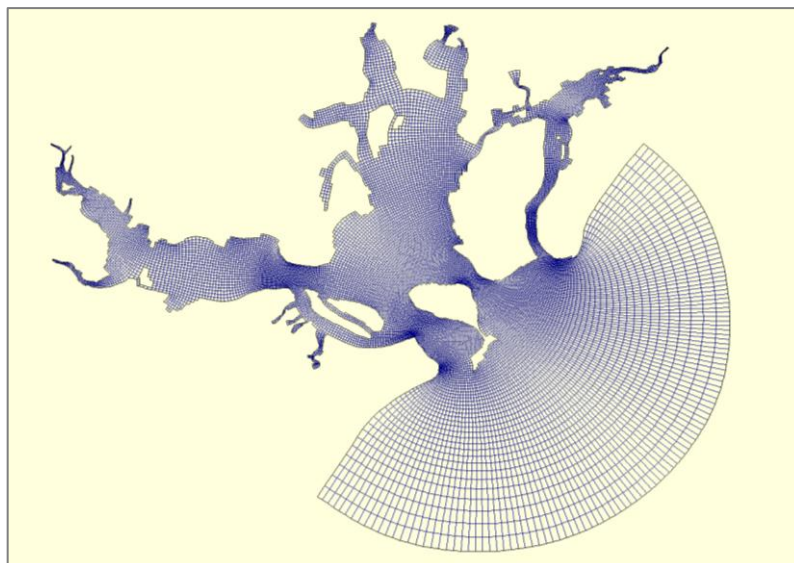


Figura 8 - Domínio da grade computacional - Módulo RGFRID

Para cada célula foram consideradas três camadas de profundidade, sendo a primeira superficial e a terceira de fundo, com alturas proporcionais a 10% da profundidade total, cada. Logo, a camada central corresponde a 80% da profundidade total naquele ponto, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Camadas consideradas na grade computacional

	Nº	Posição	Espessura
Coluna d'água	1	Superfície	10%
	2	Meio	80%
	3	Fundo	10%
	<b>PROFUNDIDADE TOTAL</b>		<b>100%</b>

A Tabela 2 apresenta as características básicas da grade numérica desenvolvida e o intervalo de tempo considerado para os cálculos iterativos.

Tabela 2 - Características da grade numérica computacional

<b>Nº de células direção 'L-O'</b>	314
<b>Nº de células direção 'N-S'</b>	215
<b>Total células</b>	20497
<b>Resolução mínima</b>	25 x 25 m
<b>Resolução máxima</b>	1120 x 343 m
<b>Nº de camadas</b>	03
<b>Intervalo de tempo entre cálculos</b>	1 min.

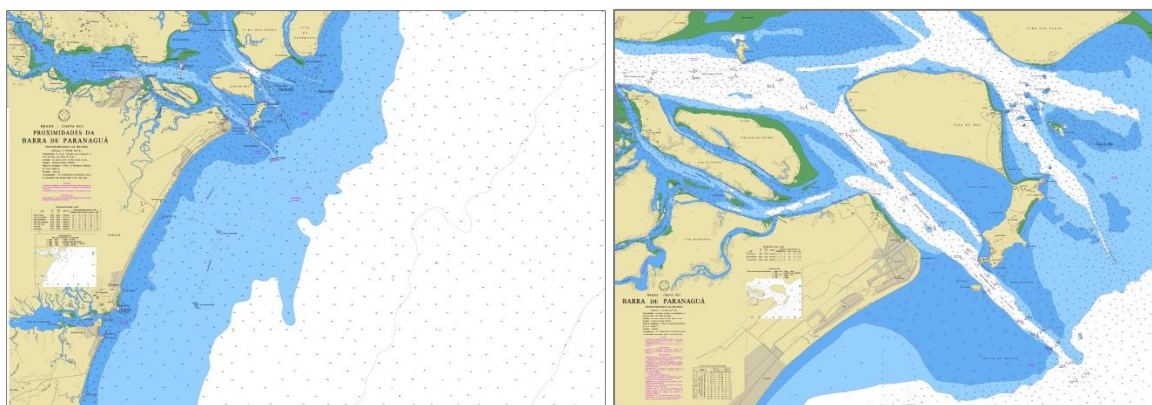
As áreas com células de menor resolução são geralmente referentes aos afunilamentos de canais e regiões de desembocadura, ao passo que, as de maior resolução, referem-se às áreas oceânicas mais afastadas da costa.

### 3.2.3 Batimetria

A batimetria considerada foi feita com base nas cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN, 2015) apresentadas na Figura 9.

1820 (Proximidades da Barra de Paranaguá);

1821 (Barra de Paranaguá)



1822 (Portos de Paranaguá e Antonina) –



Figura 9 - Cartas náuticas utilizadas  
 Fonte: DHN, 2015

A partir dos valores de profundidades apresentados na carta, foi considerado o Nível de Referência (NR) de cada local, a partir do marégrafo mais próximo. O nível de redução é definido geralmente como o nível médio das baixas marés de sizígia (DHN, 2015). A Tabela 3 apresenta os valores de NR de cada marégrafo e a Figura 10 ilustra suas localizações.

Tabela 3 - Localização das estações maregráficas e níveis de redução

<b>Estação maregráfica</b>	<b>NR (m)</b>	<b>Latitude aprox.</b>	<b>Longitude aprox.</b>
Antonina	1,46	25°26'35.21"S	48°41'37.07"W
Ilha das Cobras	0,92	25°28'55.35"S	48°26'00.03"W
Porto de Paranaguá-Cais Oeste	0,82	25°30'07.62"S	48°31'33.41"W
Barra de Paranaguá-Canal da Galheta	0,73	25°34'01.52"S	48°18'57.95"W
Terminal Portuário da Ponta do Félix	1,13	25°27'18.08"S	48°40'44.63"W

Fonte: DHN, 2015



Figura 10 - Localização das estações maregráficas

A partir da soma entre as profundidades obtidas pelas cartas náuticas e os respectivos NR, foram definidos os pontos de profundidade da grade. Foi utilizada a operação de interpolação triangular entre os pontos batimétricos e a grade, diretamente no módulo RGFGRID do Delft. De acordo com Deltares (2012), este método é o mais adequado para os conjuntos de dados que possuem uma resolução igual ou menor que a resolução da grade. O resultado é apresentado na Figura 11.

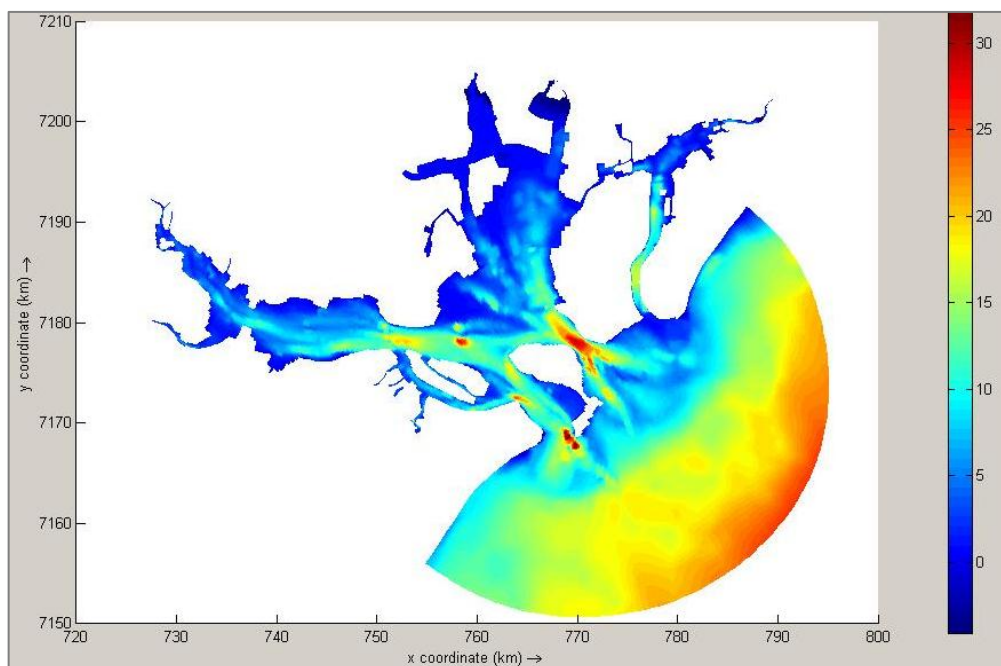


Figura 11 - Área do modelo com valores de batimetria (profundidade em metros), representados após interpolação linear

A Figura 12 mostra a mesma representação com a grade numérica sobreposta.

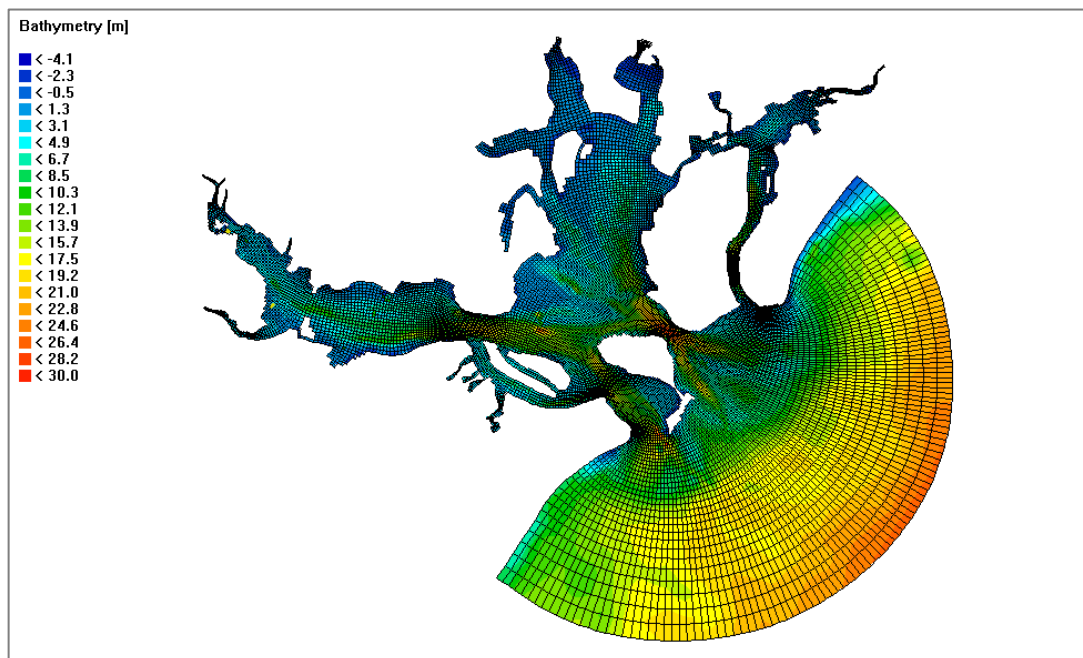


Figura 12 - Grade numérica sobreposta a região com valores batimétricos

### 3.2.4 Condições iniciais

O nível do mar foi considerado como inicialmente uniforme, com cota zero (0 m). Foram definidos valores iniciais uniformes de concentração de sedimentos em suspensão, para toda a região de estudo. Esses valores foram considerados nulos, para que não interferissem na simulação da pluma permitindo enfatizar os resultados simulados (Tabela 4).

Tabela 4 - Parâmetros utilizados como condições iniciais

Parâmetro	Valor
Nível da água (cota)	0 m
Concentração (sed. não-coesivos)	0 kg/m <sup>3</sup>
Concentração (sed. coesivos)	0 kg/m <sup>3</sup>

O modelo é iniciado em repouso, ou seja, com as velocidades nulas. O item 4.1.1 apresenta detalhes relativos ao tempo de estabilização do modelo.

### 3.2.5 Contorno – Fronteiras abertas

No CEP, identificam-se as principais forçantes que regem a circulação hidrodinâmica local como as ondas de maré e a descarga fluvial. A influência de cada forçante é considerada a partir da definição de fronteiras abertas nas principais extremidades da grade computacional.

As fronteiras abertas do modelo hidrodinâmico correspondem às faixas de cálculo onde é considerada a movimentação de fluido tanto para o sentido interno quando externo ao sistema. Para o caso do CEP, esses contornos são divididos nas duas principais classes: descarga fluvial, referente à entrada contínua de vazão ao sistema por influência dos rios que desaguam no estuário; e marés, com referência à movimentação cíclica, de entrada e saída (marés de enchente e vazante) no sistema.

#### 3.2.5.1 Descarga fluvial

Para forçar o modelo com descargas fluviais, foram utilizadas as séries temporais da Agência Nacional de Águas (ANA, 2015) para estimar a vazão média nos rios afluentes ao CEP no período referente às simulações. São considerados os três principais rios afluentes à Baía de Paranaguá e o perímetro referente ao raio de influência da maré no Oceano Atlântico. Os rios afluentes considerados são descritos abaixo:

- Nunes, Cachoeira, Nhundiaquara – Porção oeste, Baía de Antonina e Paranaguá.

Os rios Guaraqueçaba e Tagaçaba, localizados na Baía de Guaraqueçaba, possuem pouca influência considerando a vazão média de cada um deles, entretanto, assim mesmo foram considerados com base nos valores existentes de vazão. A Figura 13 mostra a visualização da grade numérica com a indicação da localização das condições de contorno.

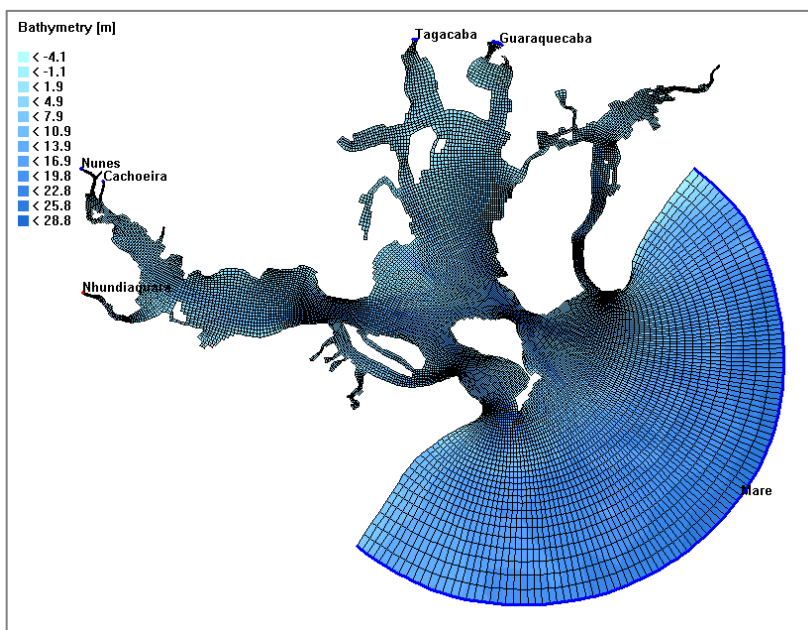


Figura 13 - Visualização da grade numérica com indicação das fronteiras abertas

As características de vazões nesses pontos foram compiladas a partir dos dados de vazões médias disponíveis na plataforma *HidroWeb* (ANA, 2015) e são apresentadas abaixo (Figura 14, Figura 15 e Tabela 5). Foram considerados os valores de vazão média em cada rio abrangendo os meses de setembro a abril, para compreender as tendências nos períodos de dragagem simulados. As taxas de aporte de sedimentos em suspensão a partir dos rios foram desconsideradas para que não influenciassem os resultados de simulação das plumas oriundas das dragagens.

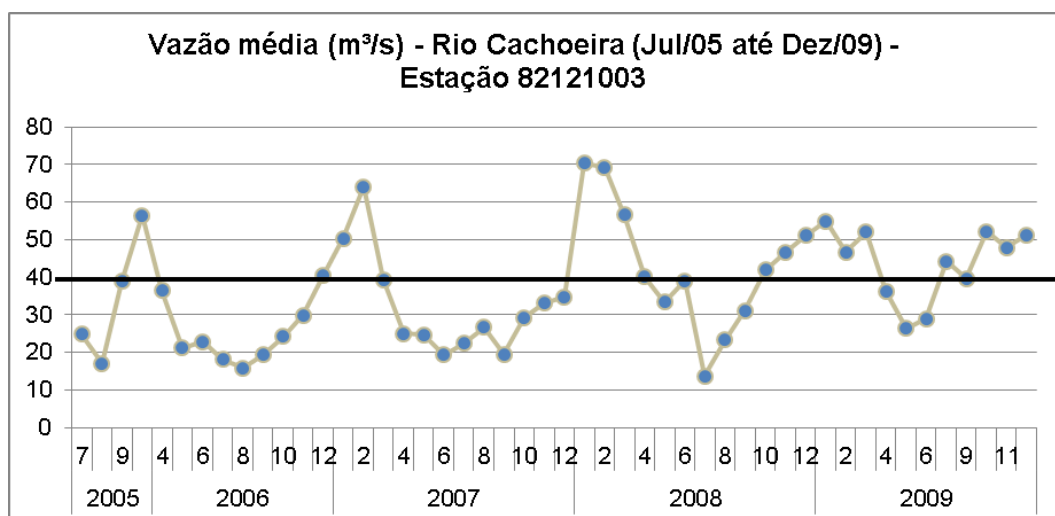


Figura 14 - Série temporal de vazão média - Rio Cachoeira  
Fonte: ANA, 2015

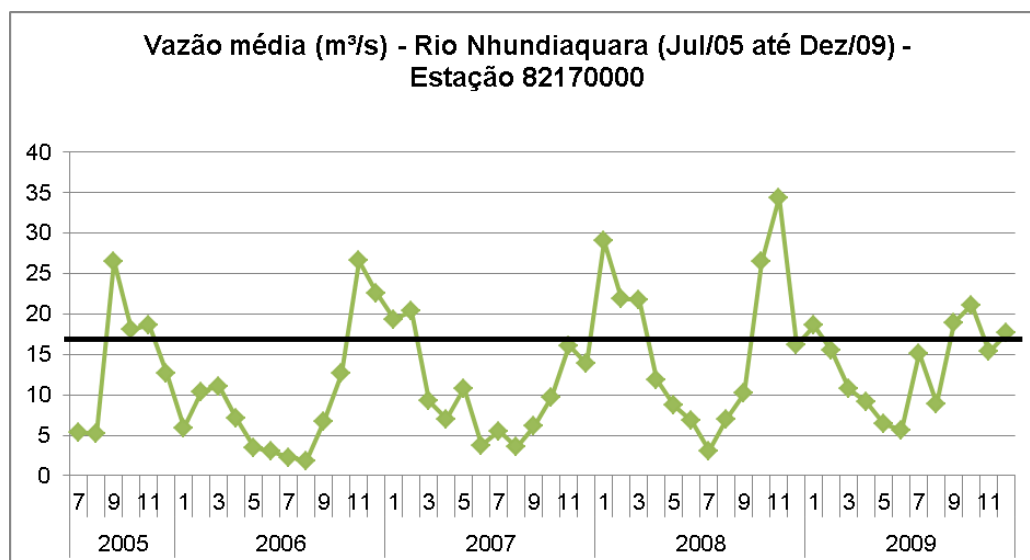


Figura 15 - Série temporal de vazão média - Rio Nhundiaquara  
Fonte: ANA, 2015

Tabela 5 - Valores considerados de descarga afluente ao CEP

Rio	Município	Vazão (m³/s)
Nunes	Antonina	6,91
Cachoeira	Antonina	40,41
Nhundiaquara	Morretes	17,72
Guaraqueçaba*	Guaraqueçaba	6,23
Tagaçaba*	Guaraqueçaba	7,25

Fonte: ANA, 2015.

### 3.2.5.2 Constituintes harmônicas de maré

As constituintes harmônicas, necessárias para geração da onda de maré na fronteira aberta oceânica, foram obtidas de Camargo (1998), conforme descrito no item 2.4.2. Os resultados obtidos pelo autor, e utilizados como base na implementação do modelo do presente estudo, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores das constituintes harmônicas de maré consideradas na implementação do modelo

Constituinte	Amplitude (m)	Fase (Graus)
<b>M2</b>	0,345	53,74
<b>S2</b>	0,23	60,25
<b>MSF</b>	0,12	80
<b>O1</b>	0,1196	62,03
<b>M3</b>	0,09	185,62
<b>K1</b>	0,09	135,28

<b>M4</b>	0,089	140,5
<b>MS4</b>	0,065	200,96
<b>MK3</b>	0,05	55,14
<b>N2</b>	0,05	148,82

Fonte: Camargo (1998)

### 3.2.6 Parâmetros físicos

Foram desconsiderados os processos de transporte relacionados à temperatura e salinidade além de considerada a mistura completa e estável desses parâmetros ao longo do sistema. Tal definição permite a abordagem específica para a formação da pluma devido às influências hidrodinâmicas, desconsiderando os efeitos possivelmente provocados pela estratificação. Para tanto, a densidade da água de todo o sistema foi definida como de água salgada, com o valor referencial de 1025 kg/m<sup>3</sup>.

Foram adotados os parâmetros apresentados na Tabela 7, com base na literatura recente (LOPES, 2010; DELTARES, 2012; MAYERLE et al., 2015).

Tabela 7 - Parâmetros físicos considerados na implementação do modelo hidrodinâmico

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Gravidade	9,81 m/s <sup>2</sup>
Densidade da água	1025 kg/m <sup>3</sup>
Densidade do ar	1 kg/m <sup>3</sup>
Rugosidade de fundo (Chézy) - uniforme	65 m <sup>0,5</sup> /s <sup>-1</sup>
Viscosidade turbulenta horizontal	0,1 m <sup>2</sup> /s
Difusividade turbulenta horizontal	1 m <sup>2</sup> /s
Intervalo de tempo entre cálculos iterativos ( <i>Time step</i> )	1 min.

Segundo Lopes (2010) o coeficiente de rugosidade de fundo (Chézy) decresce com base na rugosidade, ou seja, sedimentos mais finos possuem menor rugosidade e maior coeficiente de Chézy. O parâmetro de rugosidade de fundo está relacionado à distribuição de energia dentro do sistema, regulando a magnitude das correntes e alturas de maré simuladas. Estudos sugerem que no CEP, os efeitos de atrito com o fundo não são significantes pelo fato das correntes transportarem os sedimentos coesivos do fundo evitando a formação de dunas (MAYERLE et al, 2015).

Os parâmetros de viscosidade turbulenta e difusividade turbulenta, ambos no sentido horizontal, estão relacionados com o fluxo de quantidade de movimento turbulento (LOPES, 2010). A turbulência está associada á formação de pequenos vórtices na superfície, transmitindo a energia da superfície para o fundo. A magnitude da viscosidade turbulenta depende da estratificação da coluna d'água. Franklin (2009) aponta que esse parâmetro pode não apresentar variações significativas quanto aos resultados do modelo, entretanto tem papel fundamental para garantir sua estabilidade controlando as oscilações turbulentas e garantindo a uniformidade do escoamento.

### 3.2.7 Regime de ventos

Foi considerada a série temporal de dados da direção e intensidade dos ventos medidos na Estação Meteorológica Paranaguá, operada pelo Instituto Simepar, para o período compreendido entre o início de 2013 e o final de 2015, em intervalos de 15 minutos. A localização é indicada na Tabela 8.

Tabela 8 - Localização da Estação Meteorológica - Ventos

Estação	Operadora	Altitude	Coordenadas	
			Latitude	Longitude
Paranaguá	SIMEPAR	13 m	25°32'16,08" S	48°31'46,56" O

Fonte: Simepar (2015).

O gráfico da Figura 16 apresenta a síntese dos dados observados, com base na velocidade média observada para cada direção de vento.

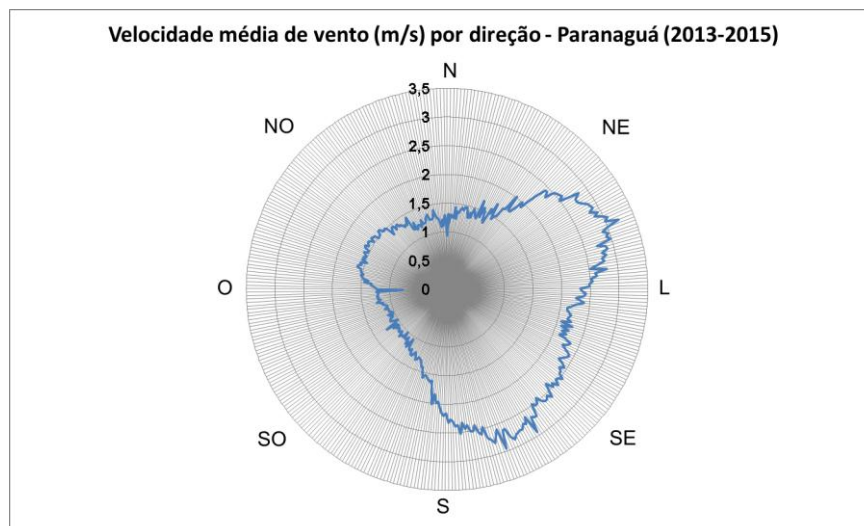


Figura 16 - Gráfico da predominância de direção e intensidade dos ventos em Paranaguá.

Fica evidente a predominância de ventos de direção Leste e Sudeste, com claras variações para Nordeste na Baía de Paranaguá. Os valores medidos de vento para cada instante foram considerados uniformes ao longo da grade.

### 3.2.8 Simulação da pluma de sedimentos em suspensão - Dragagem

Como forma de representação dos processos de *overflow*, para cada evento foi considerado o ponto de dragagem como uma fonte pontual de uma mistura fluido-sedimento, com vazão constante e valores fixos e elevados de concentração de sedimentos, tanto coesivos, como não coesivos.

As características dessa vazão foram estimadas considerando a taxa média de *overflow* (15 min) de uma draga TSHD e taxa de dragagem de 500 m<sup>3</sup>/h. O volume despejado é calculado com base em APPA (2015) e CPE (2010), para cada trecho considerado do canal (Tabela 9).

Tabela 9 - Características de vazão da fonte pontual de sedimentos

Trechos	Volume da Cisterna	Tempo de <i>overflow</i>	Vazão de despejo aproximada
Delta 1, Delta 2	5.000 m <sup>3</sup>	15 min	20.000 m <sup>3</sup> /h ou 5,6 m <sup>3</sup> /s
Bravo 2	10.000 m <sup>3</sup>	15 min	40.000 m <sup>3</sup> /h ou 10,12 m <sup>3</sup> /s

Fonte: APPA, 2015

A concentração de cada tipo de sedimento, para cada um dos eventos considerados foi aproximada com base no mapa da Figura 5. Os parâmetros de

salinidade e temperatura foram desconsiderados para que não influenciassem os resultados da simulação da pluma de sedimentos oriundos exclusivamente da dragagem.

Por ser desconsiderada a atualização da batimetria pelo transporte de sedimentos, as principais características hidrodinâmicas locais foram preservadas ao longo da simulação para dar ênfase ao processo de formação da pluma de sedimentos. O valor referencial chamado de *Van Rijn's reference height factor* possui influência significativa na transformação do fundo e, principalmente para sedimentos não coesivos, portanto foi mantido em seu valor padrão (1).

O valor densidade da mistura sedimento-água foi estimado em  $1300 \text{ kg/m}^3$  por Wit (2015), para a fase final de geração da pluma de *overflow*. O presente estudo considerou um aporte total de  $150 \text{ kg/m}^3$  de sedimentos em suspensão sendo a predominância granulométrica dividida em coesivos e não coesivos, conforme a localização de cada evento. Os parâmetros adotados para sedimentos não coesivos são apresentados na Tabela 10 abaixo:

Tabela 10 - Parâmetros considerados para sedimentos não coesivos

Parâmetro	Valor
Densidade referencial para sedimentação 'dificultada'	$1600 \text{ kg/m}^3$
Densidade específica	$2650 \text{ kg/m}^3$
Densidade do leito seco	$1600 \text{ kg/m}^3$
Diâmetro médio ( $d_{50}$ )	0,07 mm
Espessura inicial da camada de sedimento	0,5 m

Já para sedimentos coesivos, os valores são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros considerados para sedimentos coesivos

Parâmetro	Valor
Densidade referencial para sedimentação 'dificultada'	$1600 \text{ kg/m}^3$
Densidade específica	$2650 \text{ kg/m}^3$
Densidade do leito seco	$500 \text{ kg/m}^3$
Velocidade de sedimentação	0,25 mm/s
Tensão crítica de cisalhamento de fundo para sedimentação (uniforme)	$1000 \text{ N/m}^2$
Tensão crítica de cisalhamento de fundo para erosão (uniforme)	$0,5 \text{ N/m}^2$
Parâmetro de erosão	$1 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2/\text{s}$
Espessura inicial da camada de sedimento no fundo	0,05 m

O valor de densidade referencial dita como ‘dificultada’ refere-se de maneira equivalente à redução da velocidade de sedimentação de uma fração de sedimento, dada a dificuldade imposta pela concentração de sólidos suspensos presente na coluna d’água.

O movimento da draga durante a operação foi considerado nulo dada a baixa velocidade de deslocamento comparada às dimensões das célula da grade numérica.

### 3.2.9 Validação

Os resultados são avaliados com base no mapa do sistema como um todo e nas séries de dados para cada ponto de observação, gerados a partir do módulo QUICKPLOT do Delft3D. Os pontos de observação foram alocados conforme os eventos estudados, de maneira a tentar reproduzir os resultados dos pontos denominados “Perturbado” e “Controle”. Foram considerados pontos adicionais e seções transversais para eventuais conferências.

Para a conversão dos valores observados de turbidez (NTU) em concentração de sólidos suspensos (mg/L), foi considerado o estudo desenvolvido por Tomazoni et al. (2005) o qual obteve o fator de conversão de turbidez em NTU para concentração de material particulado suspenso em torno de 0,6937.

## 3.3 ESTUDO DE CASO – BAÍA DE PARANAGUÁ E ANTONINA

Foi cedido pela Administração de Portos de Paranaguá e Antonina (APPA) o resumo dos resultados de monitoramento de dragagens realizadas de dezembro de 2013 a março de 2015. O Programa de Monitoramento de Dispersão da Pluma e Parâmetros Oceanográficos, principal referência na validação dos resultados obtidos do modelo hidrodinâmico, possui como um de seus objetivos:

*“[...] estipular os limites e a extensão que podem ser atingidos pelas plumas de sedimento formadas a partir das obras de dragagem de manutenção do sistema hidroviário da baía de Paranaguá, em função das condicionantes meteoceanográficas da região.” (APPA, 2015)*



Figura 17 - Canal de navegação da Baía de Paranaguá e Antonina  
 Fonte: Adaptado de APPA, 2015.

### 3.3.1 Dragas consideradas

São mostradas na Figura 18 e na Figura 19 as embarcações utilizadas nas atividades de dragagem estudadas, sendo ambas do tipo TSHD.



Figura 18 - Draga Hang Jun 5001  
 Fonte: APPA, 2015



Figura 19 - Draga Xin Hai Niu  
 Fonte: APPA, 2015

As características da operação de cada uma das dragas são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Características das dragas utilizadas nas atividades de dragagem

<b>Especificações</b>	<b>HANG JUN 5001</b>	<b>XIN HAI NIU</b>
<b>Tipo de navio</b>	Trailing Suction Hopper Dredge (TSHD)	Trailing Suction Hopper Dredge (TSHD)
<b>Ano de construção</b>	1995	2009
<b>Comprimento x Largura</b>	112 m x 18 m	134,4 m x 28 m
<b>Arqueação bruta</b>	8105 ton.	11701 ton.
<b>Porte bruto</b>	5438 ton.	15403 ton.
<b>Velocidade registrada (máx/media)</b>	9,4 nós	15,9 / 12,8 nós
<b>Capacidade da cisterna</b>	5.000 m <sup>3</sup>	10.000 m <sup>3</sup>

Fonte: APPA, 2015

### 3.3.2 Metodologia de coleta de dados durante a dragagem

A metodologia utilizada para a medição da concentração de sólidos em suspensão para todos os eventos considerados é explicada a seguir.

A análise de variabilidade espacial baseou-se em medições replicadas espacialmente em uma área diretamente afetada pela dragagem (ponto “Perturbado”) distante menos de 1 km, e em outra área não afetada (ponto “Controle”), disposta cerca de 2 km de distância do ponto da área afetada, sempre no sentido oposto da corrente de maré (Figura 20) (APPA, 2015).

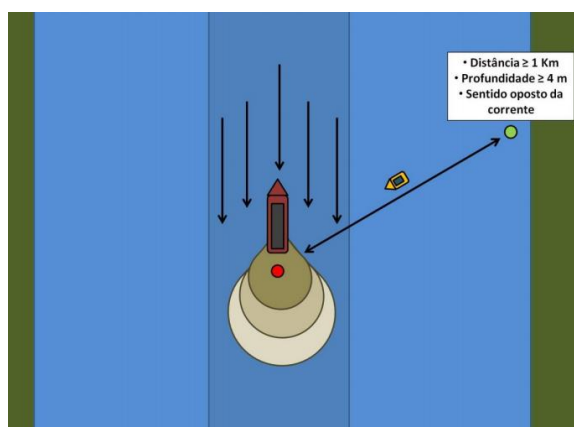


Figura 20 - Esquema de medição de sólidos em suspensão e turbidez durante a realização da dragagem

Fonte: APPA, 2015

A variabilidade temporal dos dados foi considerada com base em medidas sequenciais repetidas, como tempo 1 (T1), tempo 2 (T2) e tempo 3 (T3).

Foi considerada a situação de amostragem para cada evento, com base na coleta realizada em momento “Depois” do início da execução da atividade de dragagem. O trabalho foi executado num intervalo de 6 horas, considerando o mesmo intervalo de maré do dia anterior, em coletas (duplicatas) intercaladas, com a presença da draga no trecho que está sendo dragado. A Figura 21 mostra esquematicamente a metodologia adotada (APPA, 2015).

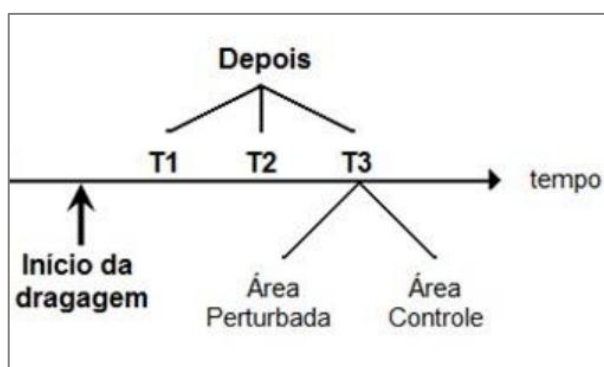


Figura 21 - Esquema representativo da metodologia de medições durante as dragagens  
Fonte: APPA (2015)

### 3.3.3 Eventos considerados

Os eventos foram escolhidos com base na disponibilidade dos dados de medições nas áreas dragadas, situação decorrente do processo *overflow*, descrito no capítulo 2.2.2.

Foram realizadas medições de turbidez com o turbidímetro HORIBA U52G (Figura 22) na região estuarina, em vários pontos, considerando as áreas internas e externas à propagação da pluma de sedimentos. Foram considerados os pontos em uma área considerada diretamente afetada pela dragagem (ponto Perturbado) e outro ponto disposto a cerca de 2 km da área afetada (ponto de Controle). Para cada ponto foram consideradas três profundidades (superfície, meia profundidade e próximo ao fundo), em três instantes antes e em três instantes após uma dragagem (APPA, 2015).



Figura 22 - Turbidímetro Horiba U52G  
Fonte: HORIBA (2015)

### 3.3.3.1 Evento F10 – Trecho Bravo 2

Data das medições: 23 e 24 de outubro de 2014

Trecho de dragagem: Bravo 2

Draga utilizada: Xin Hai Nui

A Figura 23 apresenta os pontos de Controle e Perturbado considerados e a localização aproximada da dragagem.



Figura 23 - Localização dos pontos de controle do Evento F10

Fonte: Adaptado de APPA, 2015.

A Figura 24 apresenta os valores medidos de turbidez para cada ponto e intervalo do Evento F10.

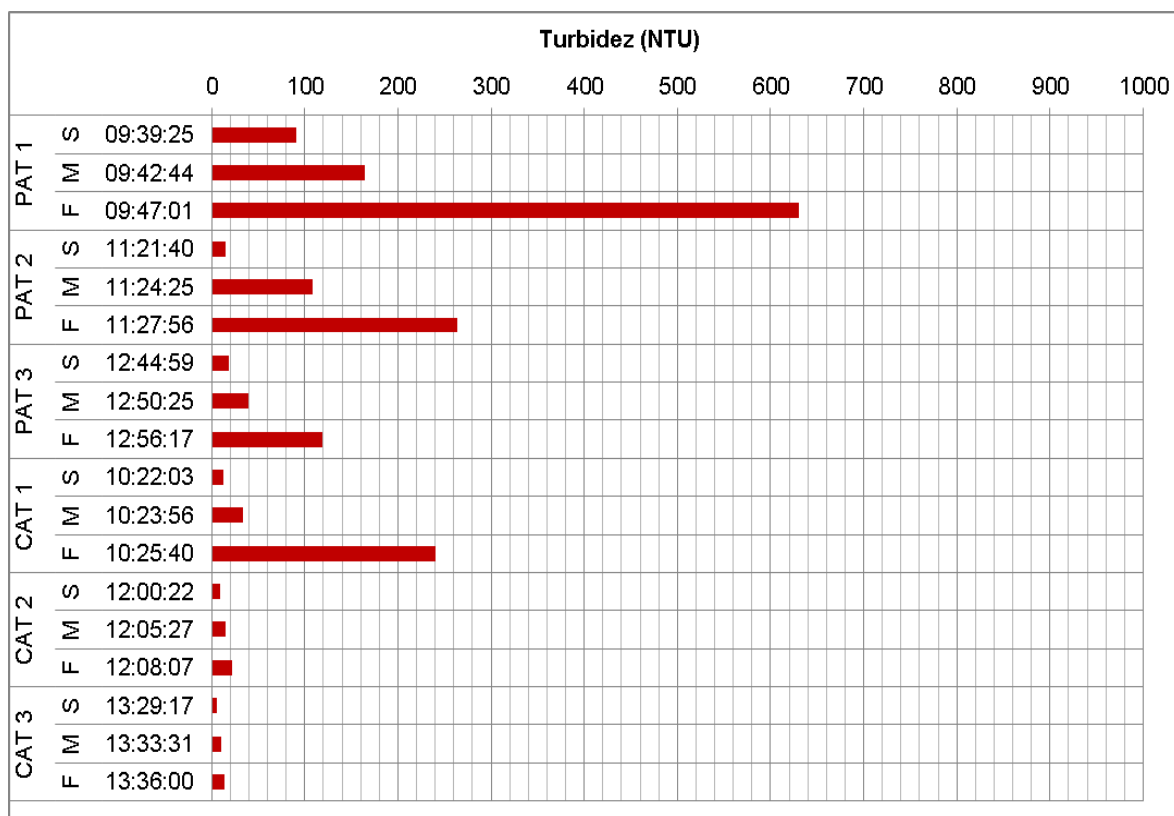


Figura 24 - Valores medidos de turbidez - Evento F10 – 24/10/2014  
 Fuente: APPA (2015)

### 3.3.3.2 Evento F12 – Trecho Delta 1

Data das medições: 08 e 09 de dezembro de 2014.

Trecho de dragagem: Delta 1

Draga utilizada: Hang Jun 5001

A Figura 25 apresenta os pontos de Controle e Perturbado, além da localização aproximada da dragagem considerada.



Figura 25 - Localização dos pontos de controle do Evento F12

Fonte: Adaptado de APPA, 2015.

A Figura 26 apresenta os valores medidos de turbidez para cada ponto e intervalo do evento F12.

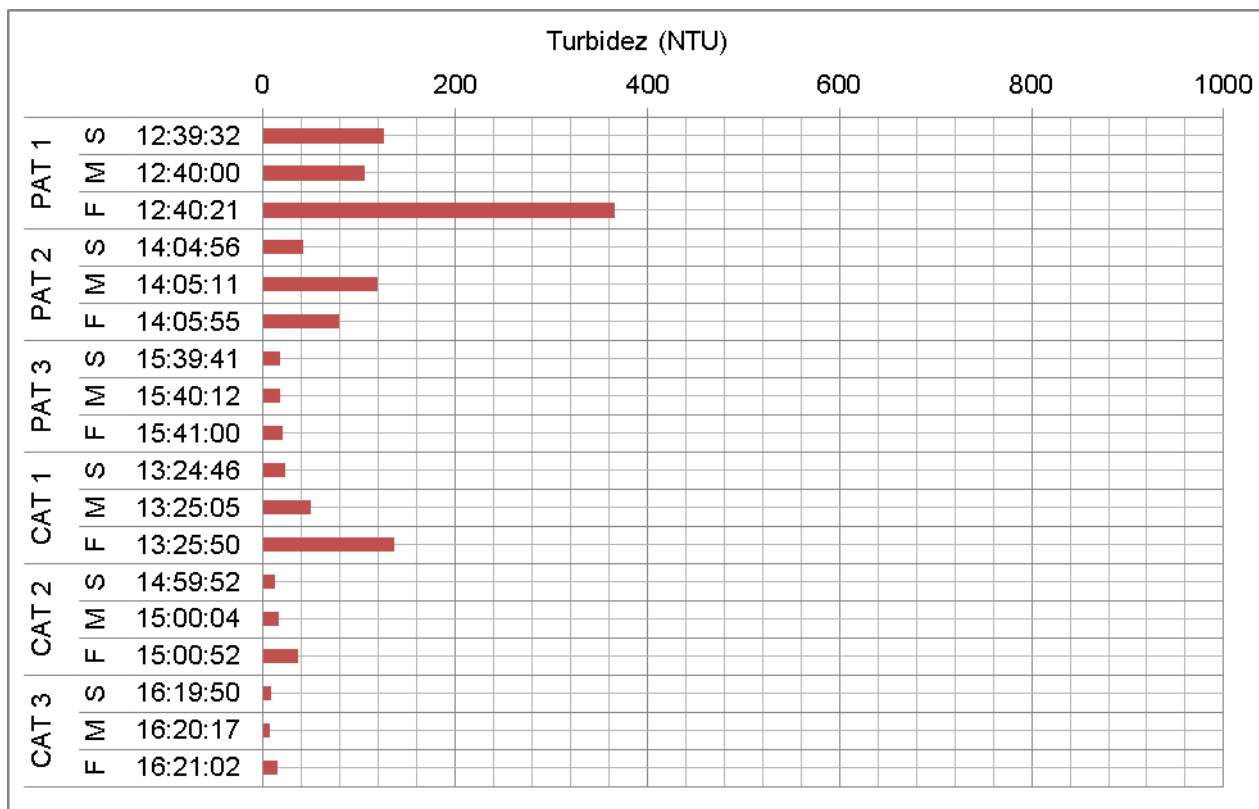


Figura 26 - Valores medidos de turbidez - Evento F12 - 09/12/2014  
 Fonte: APPA (2015)

### 3.3.3.3 Evento F15 – Trecho Delta 2

Data das medições: 31 de março e 01 de abril de 2015.

Trecho de dragagem: Delta 2

Draga utilizada: Hang Jun 5001

A Figura 27 apresenta os pontos de Controle e Perturbado, além da localização aproximada da dragagem considerada.



Figura 27 - Localização dos pontos de controle do Evento F15

Fonte: Adaptado de APPA, 2015.

Em cada um dos pontos de controle foi alocado um ponto de observação e uma seção transversal de monitoramento. Esse mesmo procedimento foi usado em todos os eventos.

A Figura 28 apresenta os valores medidos de turbidez para cada ponto e intervalo do Evento F15.

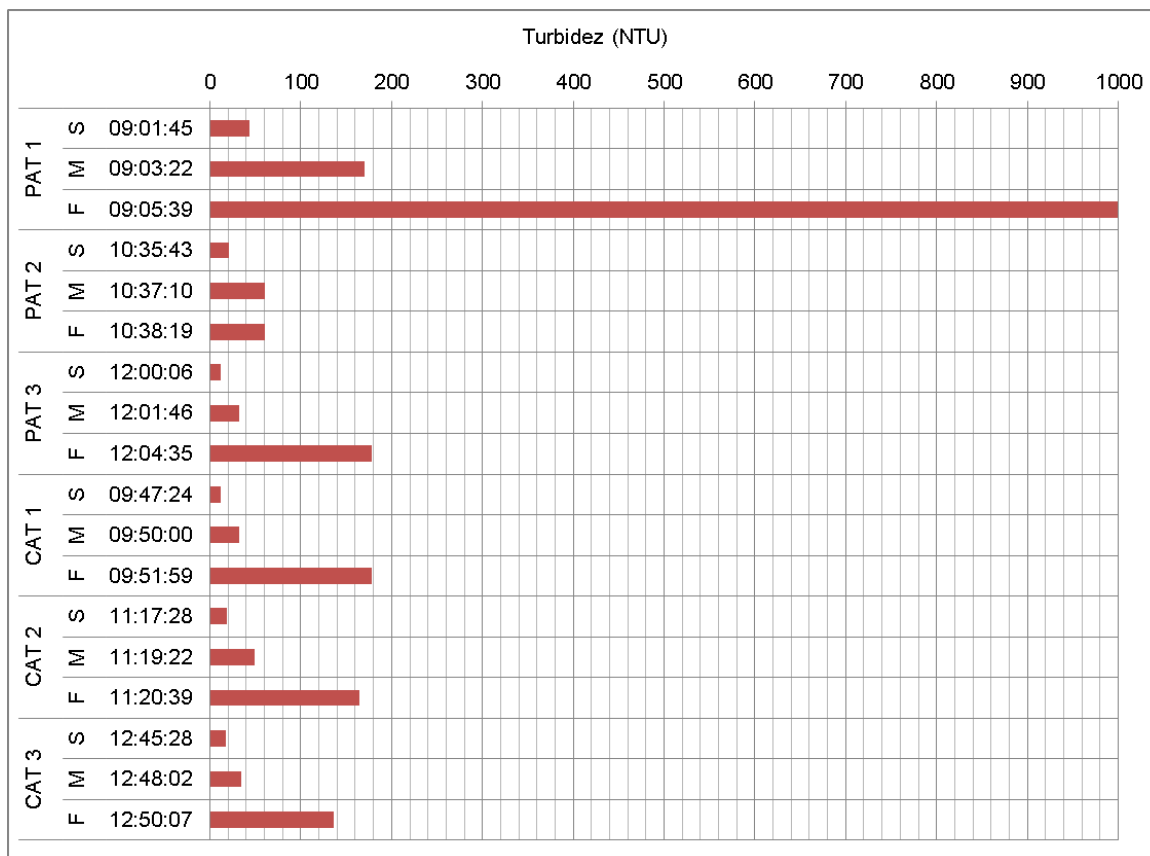


Figura 28 - Valores medidos de turbidez - Evento F15 – 01/04/2015

Fonte: APPA (2015)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O capítulo de resultados foi dividido em duas partes, sendo inicialmente abordado o funcionamento do modelo hidrodinâmico e a avaliação da capacidade do modelo reproduzir os comportamentos observados num dado momento, baseando-se sobretudo na variação do nível do mar em pontos conhecidos, nesse caso, os marégrafos da região.

Em seguida são apresentados os resultados referentes a cada um dos eventos de dragagem simulados, dando ênfase especificamente na pluma de dispersão de sedimentos.

### 4.1 TESTES DE COMPARAÇÃO

A realização dos testes de comparação serviu para fundamentar os resultados gerados pelo modelo hidrodinâmico e assegurar a capacidade de simulação da realidade. Esse capítulo está dividido com base nas três principais etapas realizadas:

- Teste inicial do modelo hidrodinâmico
- Comparação I – Dados de observação 1996
- Comparação II – Tábua de marés 2015

#### 4.1.1 Teste do modelo hidrodinâmico

O modelo hidrodinâmico considerou as constituintes harmônicas obtidas por Camargo (1998) aplicadas no contorno a mar aberto. Foram analisados dois pontos distintos, referentes aos marégrafos do Cais Oeste do Porto de Paranaguá e do Canal da Galheta (DHN, 2015).

A Figura 29 apresenta os pontos de monitoramento representados na grade numérica do modelo hidrodinâmico. O ponto à esquerda na imagem é referente ao Cais Oeste no Porto de Paranaguá enquanto o ponto à direita refere-se ao Canal da Galheta, visualizados na grade numérica. Conforme indicado, o Nível de Redução (NR) no marégrafos Cais Oeste do Porto de Paranaguá é de 82 centímetros ao

passo que no Canal da Galheta é de 73,4 centímetros, ambas segundo a última atualização em 2013 (DHN, 2013).

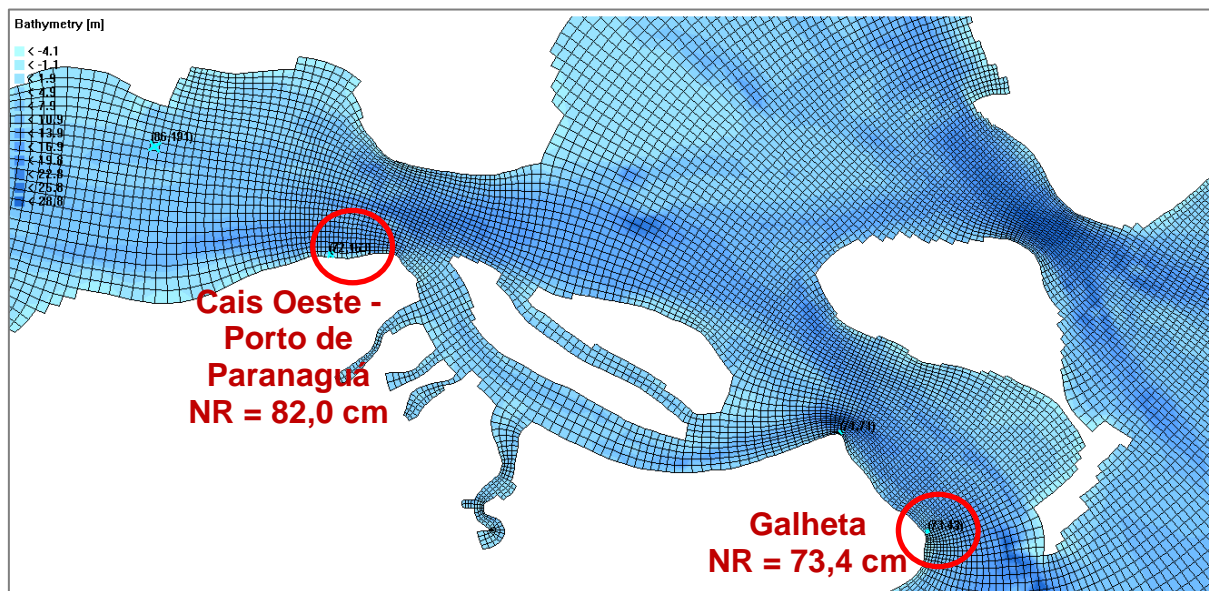


Figura 29 - Localização dos pontos de observação utilizados para os testes iniciais

Os resultados das simulações nesses pontos serviram como base de comparação aos dados observados, apresentados nos capítulos seguintes.

Com base nos resultados simulados foi avaliado o tempo mínimo necessário para estabilização do modelo pois, partindo-se do repouso, é de se esperar que o modelo demore um certo tempo para estabilizar. O padrão constatado com base na observação do módulo da velocidade média em diversos pontos mostra que a partir de 24 horas os resultados simulados já assumem um padrão melhor definido. A Figura 30 mostra a simulação da velocidade média no ponto Galheta, como exemplo do período de estabilização do modelo implementado.

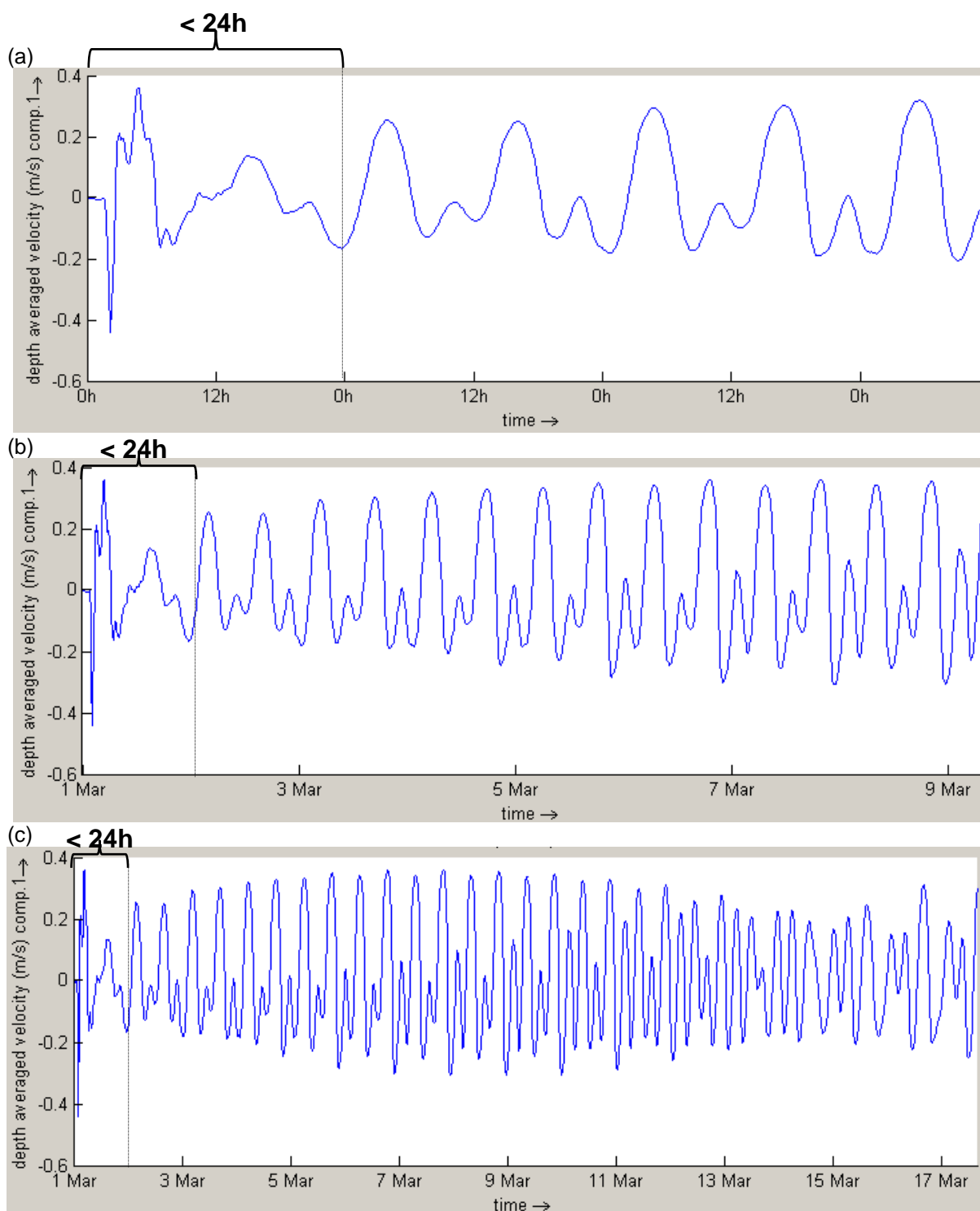


Figura 30 - Teste de estabilização do modelo em (a) 60 horas, (b) 9 dias e (c) 18 dias.

#### 4.1.2 Comparação I – Dados observados de 1996

Foram considerados dados observados do nível do mar no marégrafos Cais Oeste do Porto de Paranaguá.

Tabela 13 - Localização do marégrafo e período de dados considerados

<b>Marégrafo</b>	<b>Localização</b>	<b>Intervalo</b>	<b>Período</b>	<b>Nº de dados</b>
Cais Oeste – Porto de Paranaguá	25°30'07,62"S 48°31'33,41" O	30 min.	11/07/1996 a 22/08/1996 (42 dias)	2017

Com base na Análise de Fourier, foram extraídas as constituintes harmônicas de maré para o ponto referente ao Porto de Paranaguá – Cais Oeste.

A análise harmônica, aplicada aos dados de nível do mar para o Cais Oeste Porto de Paranaguá, gerou o conjunto de constantes harmônicas apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Constituintes harmônicas de mare - Cais Oeste do Porto de Paranaguá

<b>Constante</b>	<b>Período (h)</b>	<b>Período (d)</b>	<b>Amplitude (m)</b>	<b>Fase (rad)</b>
<b>Mm</b>	661,31	27,55	0,1013	4,355
<b>MSf</b>	354,37	14,77	0,0581	4,404
<b>alpha1</b>	29,07	1,21	0,0065	5,043
<b>2Q1</b>	28,01	1,17	0,0064	6,215
<b>Q1</b>	26,87	1,12	0,0397	0,587
<b>O1</b>	25,82	1,08	0,1079	0,963
<b>M1</b>	24,83	1,03	0,015	0,135
<b>K1</b>	23,93	1,00	0,1069	2,657
<b>J1</b>	23,10	0,96	0,0168	4,617
<b>OO1</b>	22,31	0,93	0,0198	3,824
<b>KQ1</b>	21,58	0,90	0,0141	5,534
<b>MNS2</b>	13,13	0,55	0,0041	0,882
<b>mu2</b>	12,87	0,54	0,0683	1,88
<b>N2</b>	12,66	0,53	0,0797	2,274
<b>M2</b>	12,42	0,52	0,4775	1,264
<b>L2</b>	12,19	0,51	0,0527	1,269
<b>S2</b>	12,00	0,50	0,3241	2,017
<b>KJ2</b>	11,75	0,49	0,0078	2,093
<b>MO3</b>	8,39	0,35	0,1089	6,233
<b>M3</b>	8,28	0,35	0,1659	3,956
<b>MK3</b>	8,18	0,34	0,0595	2,953
<b>SK3</b>	7,99	0,33	0,1062	0,216
<b>MN4</b>	6,27	0,26	0,083	2,982
<b>M4</b>	6,21	0,26	0,1539	3,905
<b>SN4</b>	6,16	0,26	0,0169	1,073
<b>MS4</b>	6,10	0,25	0,0574	6,146
<b>S4</b>	6,00	0,25	0,0047	4,406
<b>2MK5</b>	4,93	0,21	0,0022	0,081
<b>2SK5</b>	4,80	0,20	0,004	0,553
<b>2MN6</b>	4,17	0,17	0,0032	5,495
<b>M6</b>	4,14	0,17	0,0037	1,755
<b>2MS6</b>	4,09	0,17	0,0111	2,761
<b>2SM6</b>	4,05	0,17	0,0062	4,322
<b>3MK7</b>	3,53	0,15	0,0032	2,179
<b>M8</b>	3,11	0,13	0,0019	5,455

Os dados da Tabela 14 foram utilizados para a reconstrução da onda de maré. Essa metodologia permite a análise do comportamento do nível do mar local com base somente nas forçantes de maré, desconsiderando outras forçantes, tais como os ventos. A Figura 31 mostra o gráfico da onda reconstruída, utilizada como

base de comparação para os testes de validação do modelo. Foi desconsiderado o nível de redução local para evidenciar a comparação entre os comportamentos.

É dado destaque às variações de comportamento causadas por efeitos de maré meteorológica, definida por Pugh (1987) como a diferença entre a maré observada e a maré astronômica. A maré meteorológica tem como principais causas as variações da pressão atmosférica e a troca de momento linear entre o vento e a água, causando assim níveis mais baixos ou mais altos – efeito de empilhamento.

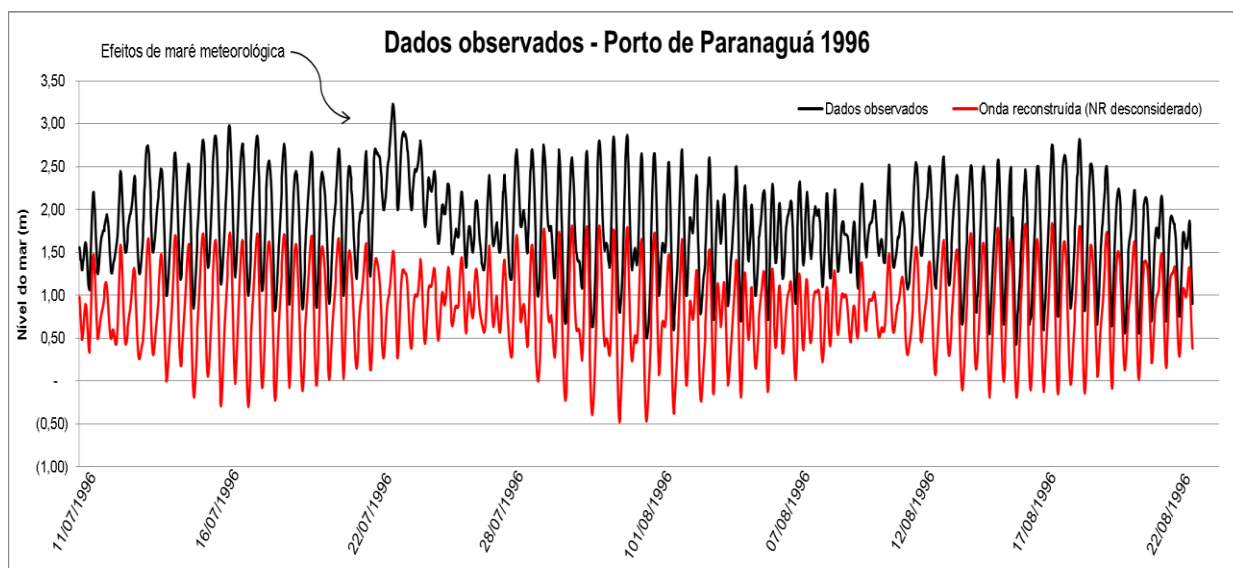


Figura 31 - Reconstrução da onda de maré - Dados observados

A partir de então se comparam as amplitudes de onda das constituintes harmônicas obtidas da série de dados reconstruída (dados observados) com as obtidas na modelagem hidrodinâmica (dados modelados), conforme apresentado no gráfico da Figura 32.

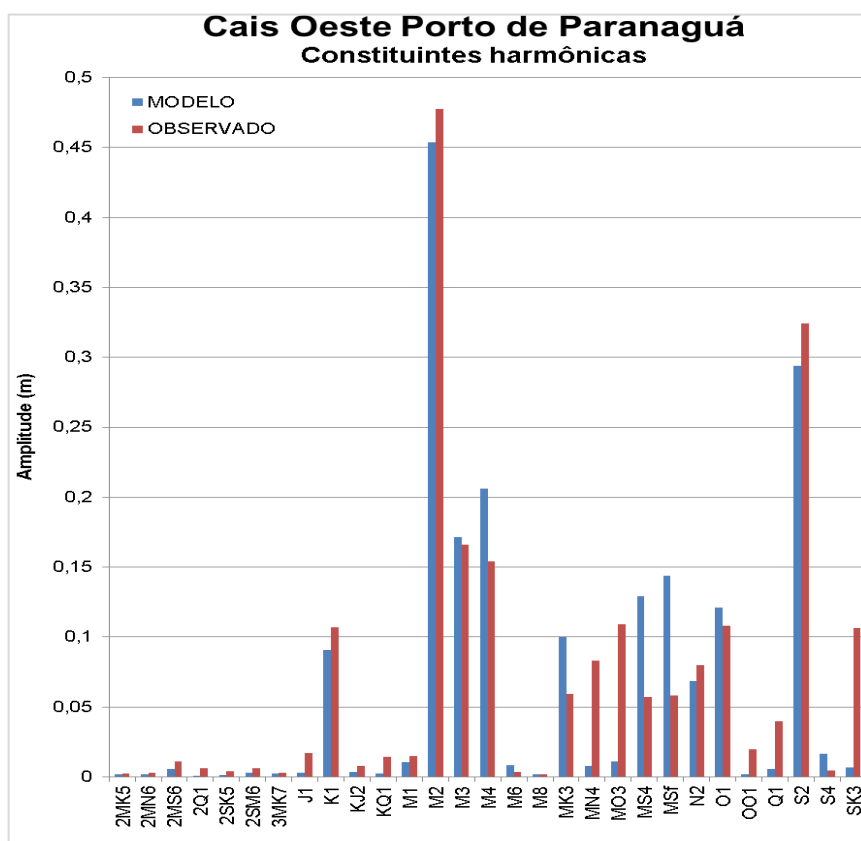


Figura 32 - Comparação de constituintes harmônicas - Teste I

De maneira similar, a Figura 33 apresenta a comparação entre as constituintes modeladas e observadas considerando a amplitude e a frequência de cada.

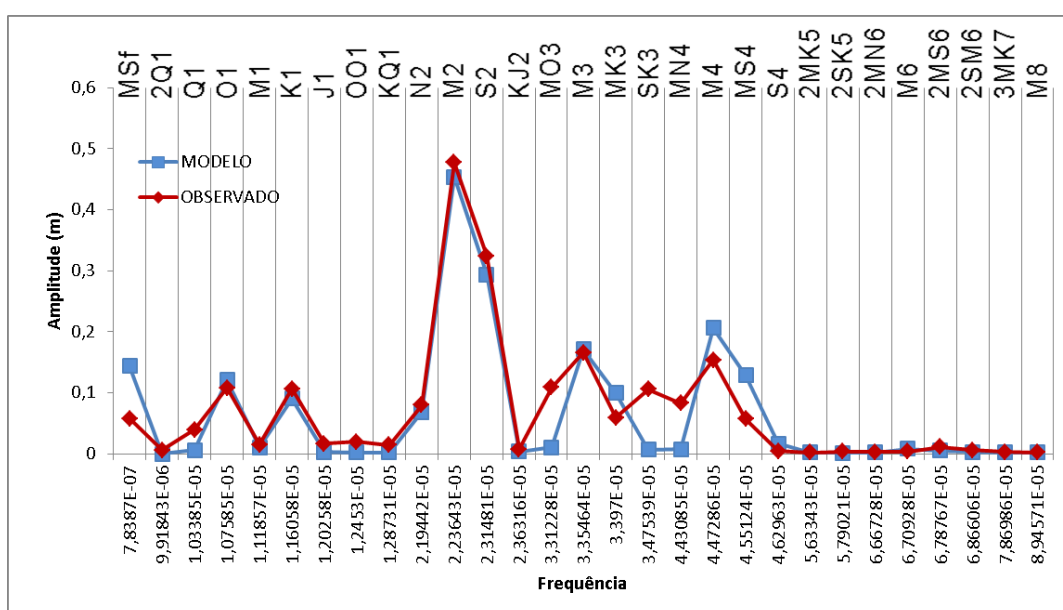


Figura 33 - Análise de constituintes harmônicas pela Amplitude x Frequência

A onda gerada a partir dos dados observados foi comparada com os resultados de nível da água simulados pelo modelo hidrodinâmico, para a mesma época, nos mesmos locais dos pontos de observação mostrados na Figura 29. O resultado da comparação é apresentado no gráfico da Figura 34.

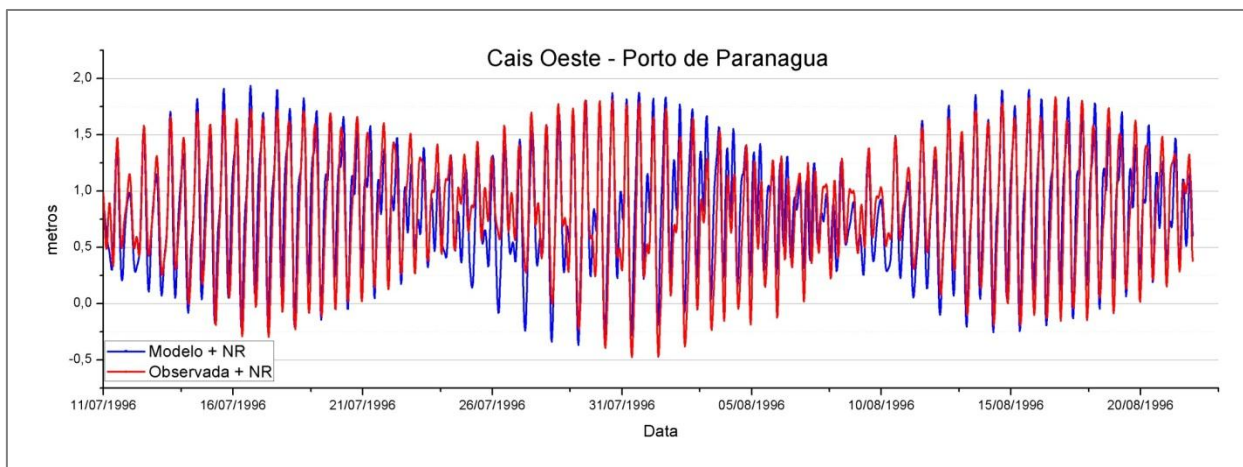


Figura 34 - Calibração do modelo a partir dos dados observados de 1996 - Cais Oeste Porto de Paranaguá

A raiz do erro médio quadrático (RMSE) para ambas as séries medidas e observadas foi calculada através do *software* *Statistica* em aproximadamente 0,22 m. A sobreposição das ondas foi boa, sugerindo melhor interpretação de resultados pelo modelo nas marés de sizígia.

#### 4.1.3 Comparação II – Tábua de marés de 2015

Paralelamente, foi testada a metodologia de validação do modelo com base em valores recentes da Tábua de Marés para as mesmas estações maregráficas, Cais Oeste do Porto de Paranaguá e Canal da Galheta, em comparação aos dados simulados no mesmo instante de tempo, aproximadamente. O período selecionado foi de 03 de outubro de 2015 até 31 de outubro de 2015, com 154 valores para o Cais Oeste e 133 valores para o Canal da Galheta. Para análise foi desconsiderado o período de estabilização do modelo, definido pelas observações como de 5 a 7 dias. Somando os respectivos Níveis de Redução foram gerados os gráficos da Figura 35, que representam o nível do mar para os marégrafos estudados.

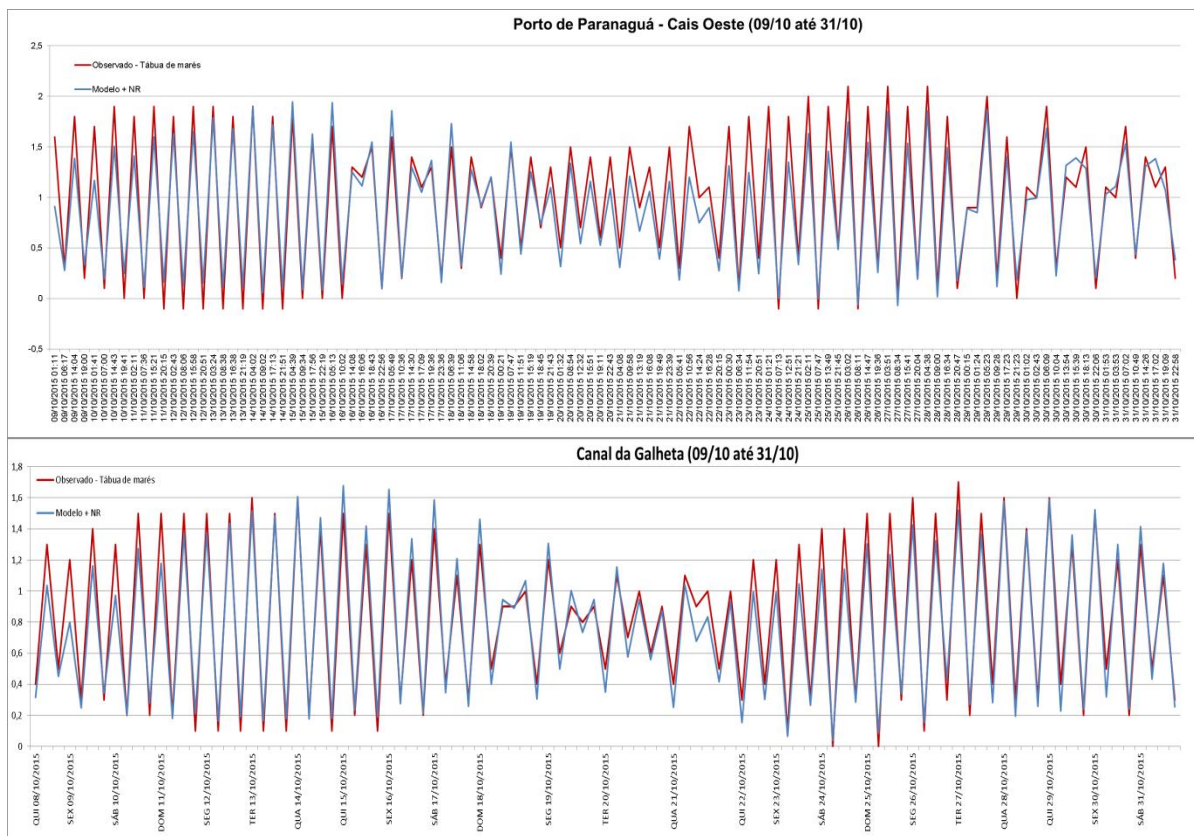


Figura 35 - Comparação de dados - Tábua de marés

A partir dos dados de calibração, foi possível determinar o período de 1 mês como necessário à estabilização do modelo. Portanto, para cada um dos eventos selecionados, o modelo foi rodado com 1 mês de antecedência ao evento de dragagem. A partir de então foi simulado o lançamento da mistura sedimento-água nas datas em que existem dados de medição.

## 4.2 SIMULAÇÃO DAS DRAGAGENS

São apresentados neste capítulo os resultados obtidos na modelagem hidrodinâmica dos três eventos de dragagem considerados:

- 1) Evento F10 – Outubro de 2014
- 2) Evento F12 – Dezembro de 2014
- 3) Evento F15 – Abril de 2015

Para cada evento são descritos quatro itens de interpretação dos resultados.

- a) Pontos de observação: ilustrando os pontos de observação dos resultados para cada evento;
- b) Nível do mar: indicando a razoabilidade dos dados do modelo hidrodinâmico em comparação à realidade, em período total aproximado de um mês anterior às dragagens;
- c) Pluma de dispersão de sedimentos: apresentando os resultados gráficos obtidos pelas etapas de simulação da pluma de dispersão de sedimentos em suspensão. A pluma de dispersão de sedimentos da dragagem pode ser facilmente vista nos resultados da simulação, por serem apresentados em representação gráfica de cores com a escala referente à concentração de sedimentos em suspensão (em  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) na coluna d'água. Segundo Wit et al (2014), existem valores variando de 30 a 500  $\text{mg}/\text{L}$  (0,03 a 0,5  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) na pluma de sedimentos, correspondendo à faixa de cores apresentada na legenda das imagens;
- d) Sedimentos em suspensão x turbidez: apresenta o resultado da comparação entre os dados simulados de concentração de sedimentos em suspensão e os dados reais de turbidez medidos no momento de execução da dragagem. Os dados de turbidez foram convertidos em concentração de sedimentos em suspensão com base na metodologia proposta por Tomazoni et al. (2005), que consiste na multiplicação do valor de turbidez pelo fator 0,6937, para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão .

#### 4.2.1 Evento F10 – Trecho Bravo 2

Períodos simulados:

- Pré-evento: 22 de setembro de 2014 até 26 de outubro de 2014.
- Pluma de dispersão de sedimentos: 24 de outubro de 2014.
- Maré de sizígia.

Granulometria considerada: 50% coesivos / 50% não coesivos

##### 4.2.1.1 Pontos de observação

A Figura 36 apresenta os pontos de observação considerados na simulação do Evento F10. O ponto de dragagem possui profundidade de aproximadamente 22 metros.

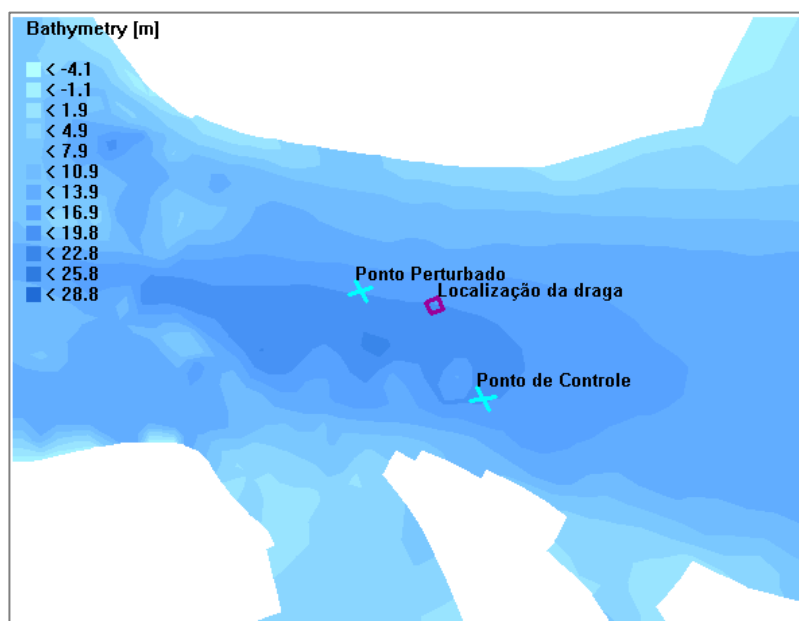


Figura 36 - Pontos de observação - Evento F10

##### 4.2.1.2 Nível do mar

A Figura 37 apresenta a série de nível do mar para o ponto de observação “Perturbado”, com destaque ao período onde foi simulada a pluma de dispersão de sedimentos da dragagem.

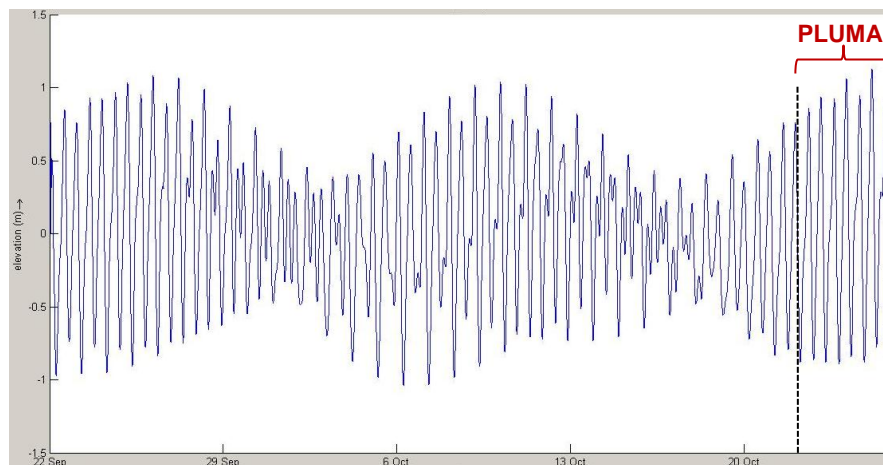


Figura 37 - Série de nível do mar simulado - Evento F10

A Figura 38 apresenta a comparação entre o nível do mar real, observado no dia do Evento F10 e os níveis do mar simulados para o período de análise da pluma de dispersão de sedimentos, dia 24 de outubro de 2014. Em destaque está o período coincidente (aprox. das 09h às 14h) às medições de turbidez, cujos valores subsidiaram as comparações entre resultados observados e simulados. Como referência é definida a localização do ponto Perturbado.

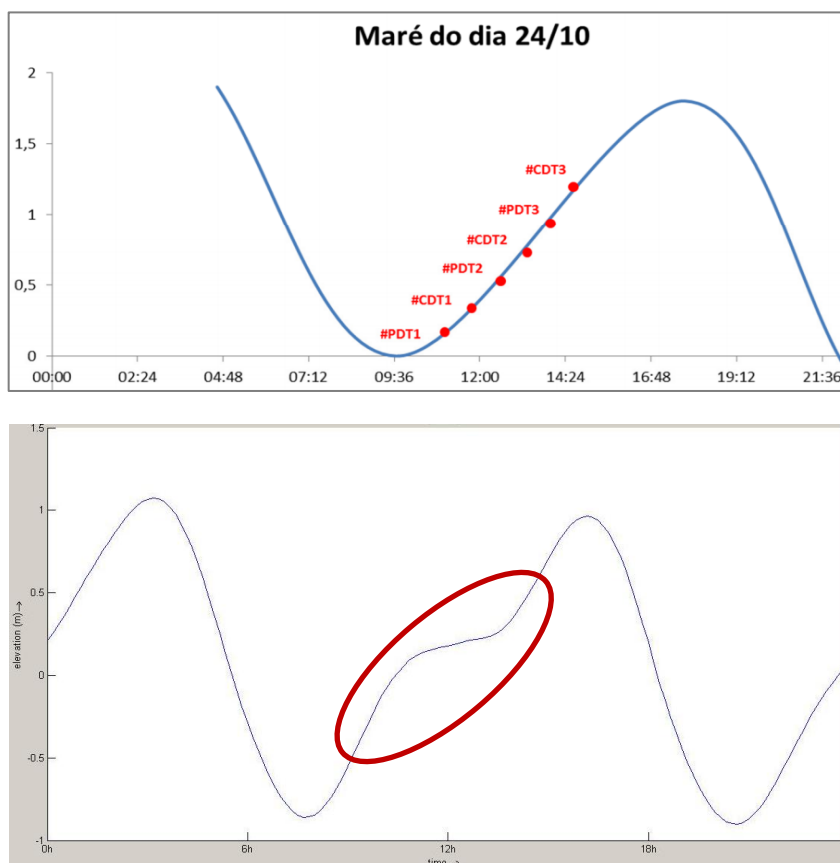


Figura 38 - Variação do nível do mar observado (superior) e simulado (inferior) - Evento F10  
Fonte: APPA, 2015

Com base na comparação entre os gráficos da Figura 38, os resultados simulados de nível do mar se mostraram bem representativos à realidade, dada a similaridade observada entre as curvas.

#### 4.2.1.3 Pluma de dispersão de sedimentos

Foram observados dois instantes de tempo (09h e 12h), com base nos dados disponibilizados de medições de turbidez. São apresentados os resultados para as três camadas consideradas, para a pluma gerada na data 24/10/2014, separados em sedimentos coesivos e não coesivos. Nesse caso, ambos os pontos (09h e 12h) se referem aos instantes de maré enchente, sendo o primeiro logo após o estofo de maré vazante para enchente (baixa-mar). Em geral, o segundo momento (12h) tende a apresentar as maiores velocidade de corrente dada à proximidade ao pico da maré enchente.

24/10/2014 - 09h:

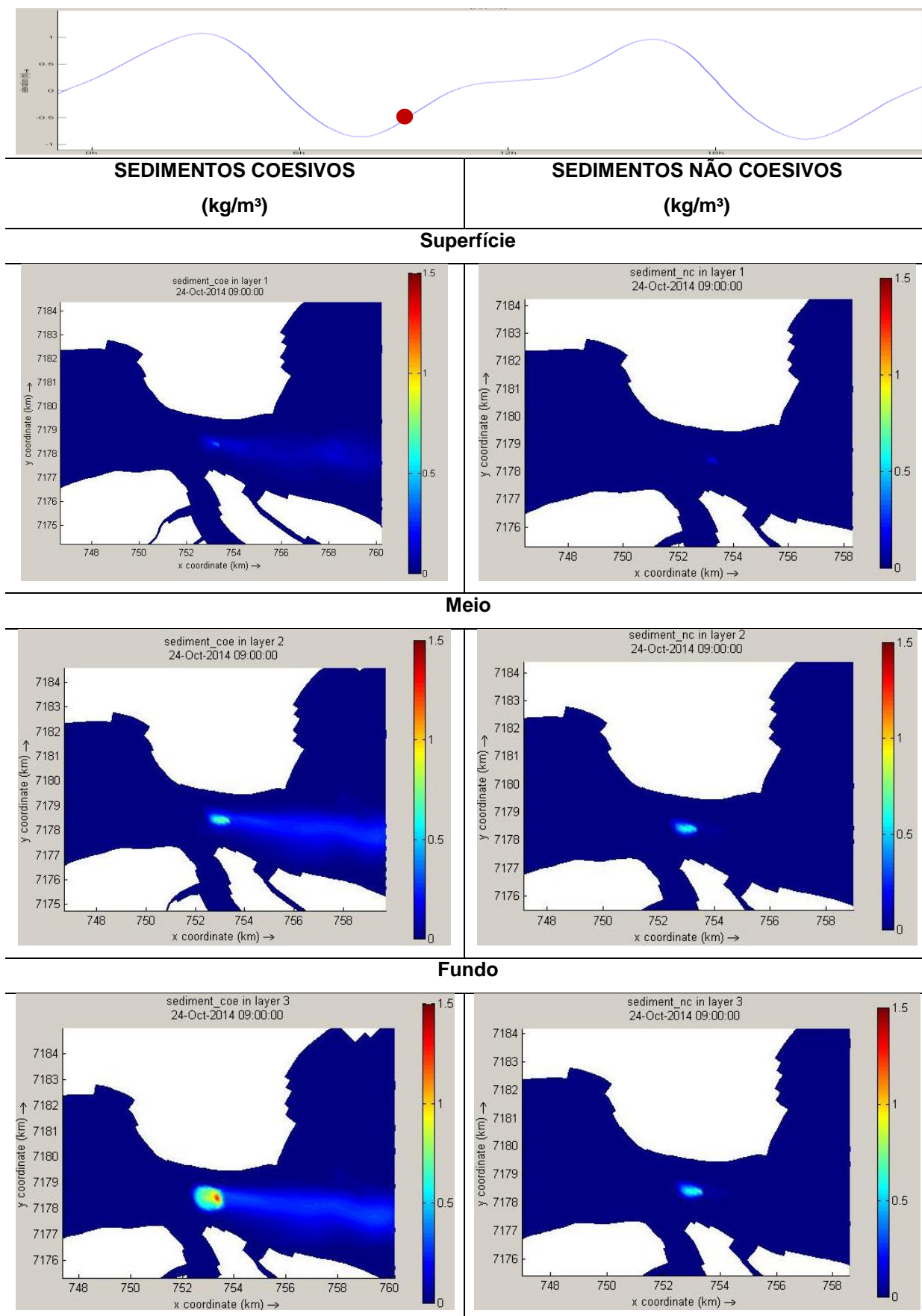


Figura 39 - Simulação da pluma de sedimentos em suspensão - Evento F10 – Tempo T1

24/10/2014 - 12h:

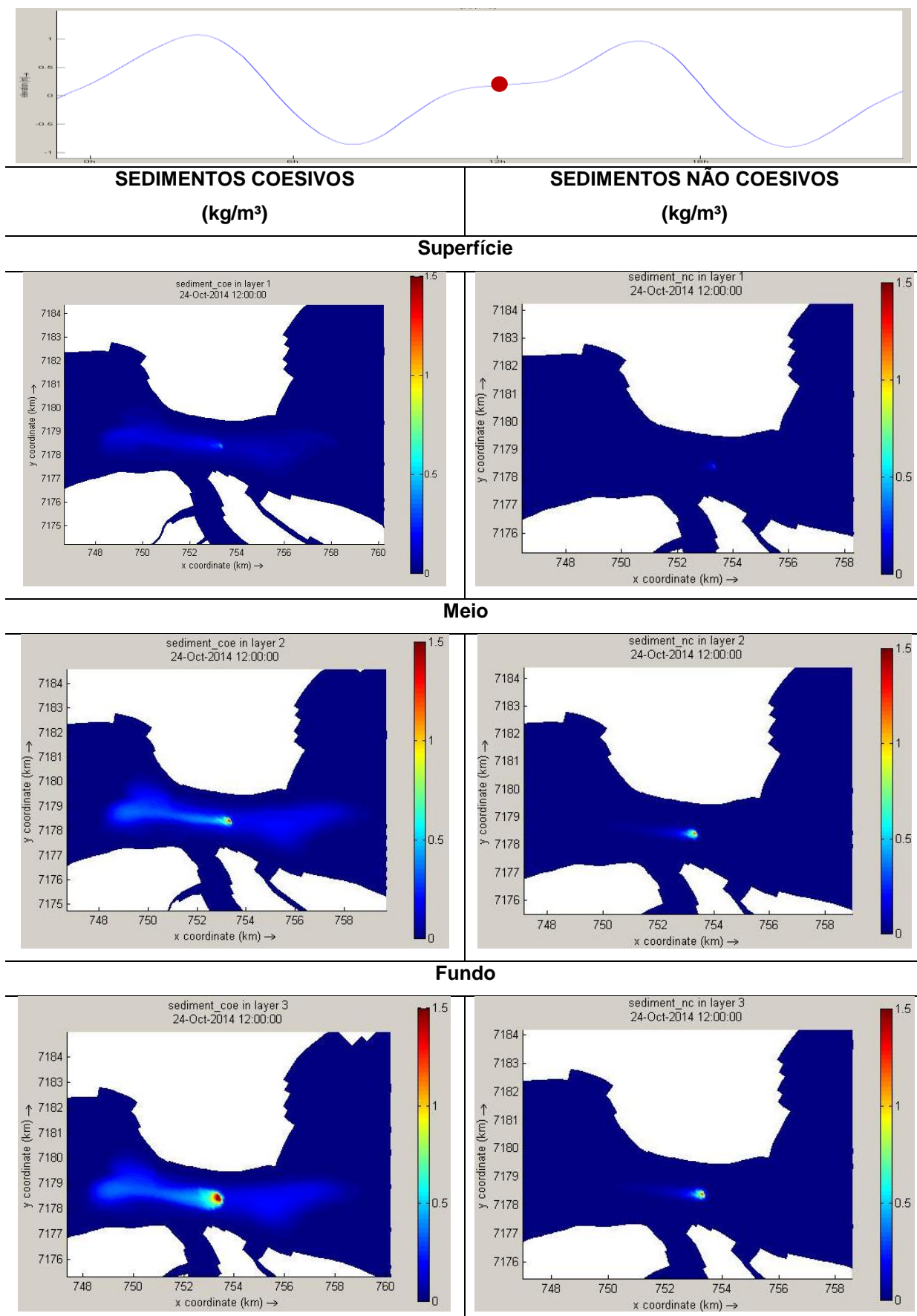


Figura 40 - Simulação da pluma de sedimentos em suspensão - Evento F10 – Tempo T3

O trecho em questão (Bravo 2) possui as maiores velocidades de corrente entre os três eventos analisados ( $> 1$  m/s). Para o primeiro momento analisado (após baixa-mar - 09h), observa-se a concentração de sedimentos em suspensão predominantemente no sentido da maré vazante e início de dispersão no sentido da maré enchente. No sentido vazante a pluma aparece com alcance bastante expressivo de sedimentos coesivos e dispersão local de sedimentos não coesivos. Tal situação sugere que esta distribuição está associada aos remanescentes de sedimentos em suspensão transportados pelo movimento de maré vazante e ao intervalo de tempo necessário para que a inversão de marés (mudança instantânea no sentido das velocidades de corrente) ocasione efeito significativo no transporte de sedimentos.

Em um segundo momento (12h), observa-se a tendência de dispersão significativa de sedimentos em suspensão, tanto no sentido vazante quanto no sentido de enchente, sugerindo a influência de vórtices locais. Observam-se concentrações de sedimentos coesivos em suspensão em torno de  $0,5$  kg/m<sup>3</sup> em uma distância de até 08 km da fonte considerando ambos os sentidos de dispersão (enchente e vazante).

A Figura 41 apresenta as velocidades médias na localização do Evento F10. É dado destaque ao local onde houve o aparecimento de vórtices.

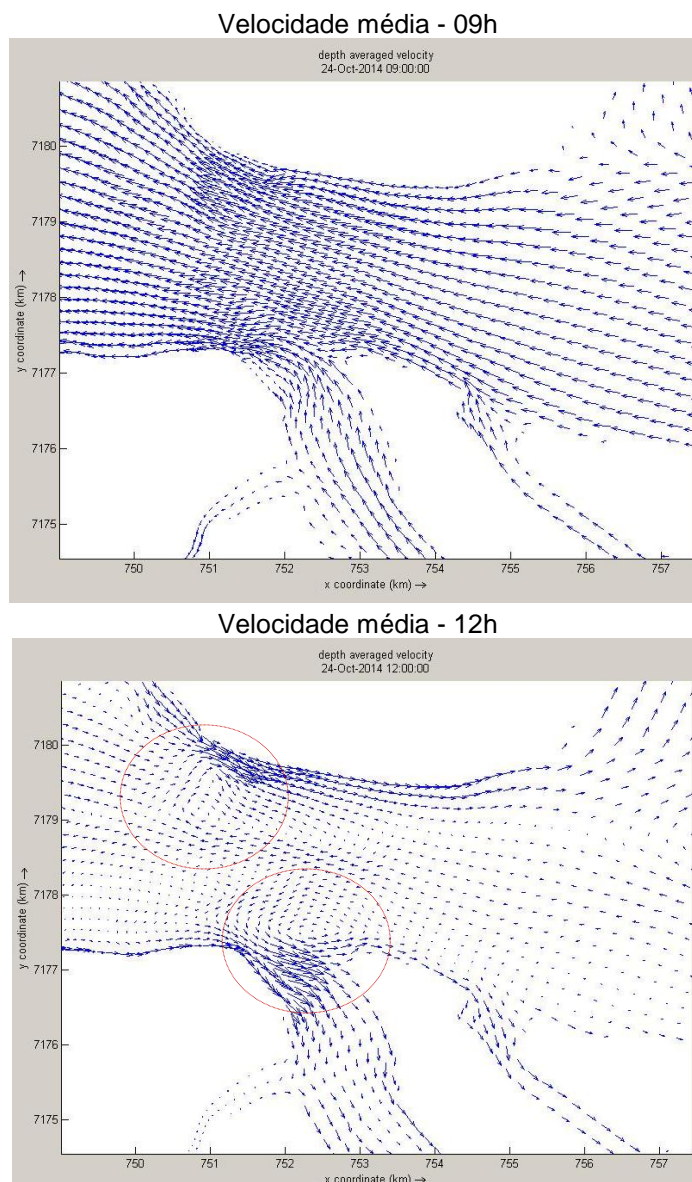


Figura 41 - Velocidades médias - Evento F10

#### 4.2.1.4 Sedimentos em suspensão x Turbidez

A Figura 42 apresenta a comparação entre os dados de turbidez observados, convertidos para concentração de sedimentos em suspensão (mg/L), e os dados modelados de sedimentos em suspensão para o Evento F10.

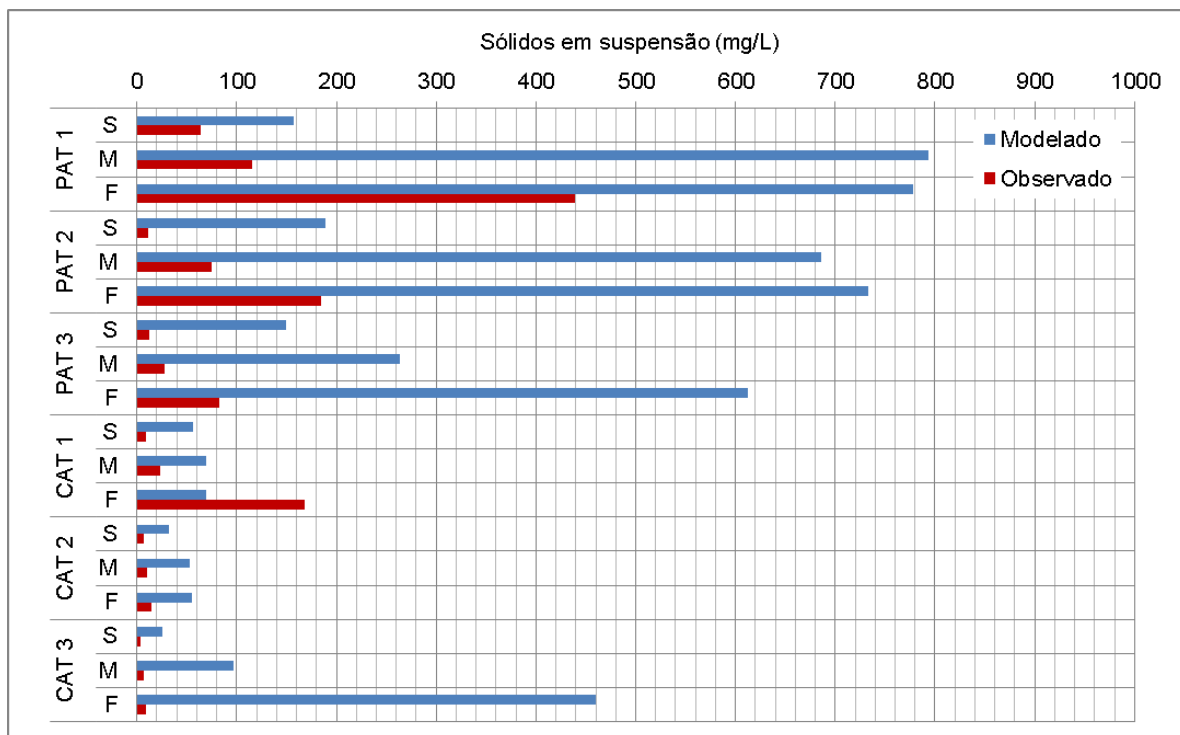


Figura 42 - Comparação entre dados modelados de sedimentos em suspensão e dados observados - Evento F10

Verifica-se que, apesar de virtual discrepância entre os resultados, a simulação atingiu a mesma ordem de grandeza dos dados de turbidez medidos *in loco*, e posteriormente convertidos para concentração de sedimentos em suspensão (mg/L) a partir do fator de conversão ( $F = 0,6975$ ) proposto por Tomazoni et. al (2015).

Em algumas situações, sobretudo considerando o ponto Controle, observa-se aparente boa correlação entre os dados simulados e observados.

#### 4.2.2 Evento F12 – Trecho Delta 1

Períodos simulados:

- Pré-evento: 15 de novembro a 11 de dezembro de 2014.
- Pluma de dispersão de sedimentos: 09 de dezembro de 2014.
- Maré de sizígia.

Granulometria considerada: 70% coesivos / 30% não coesivos

##### 4.2.2.1 Pontos de observação

A Figura 43 apresenta os pontos de observação considerados na simulação do Evento F12. O ponto de dragagem possui profundidade de aproximadamente 9 metros.

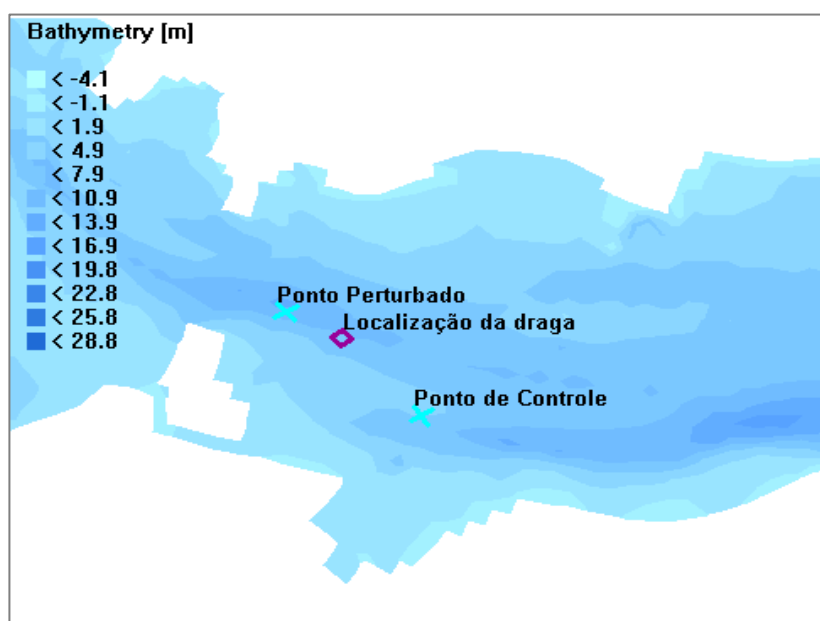


Figura 43 - Pontos de observação - Evento F12

##### 4.2.2.2 Nível do mar

A Figura 44 apresenta a série de nível do mar para o ponto de observação “Perturbado”, com destaque ao período onde foi simulada a pluma de dispersão de sedimentos da dragagem.

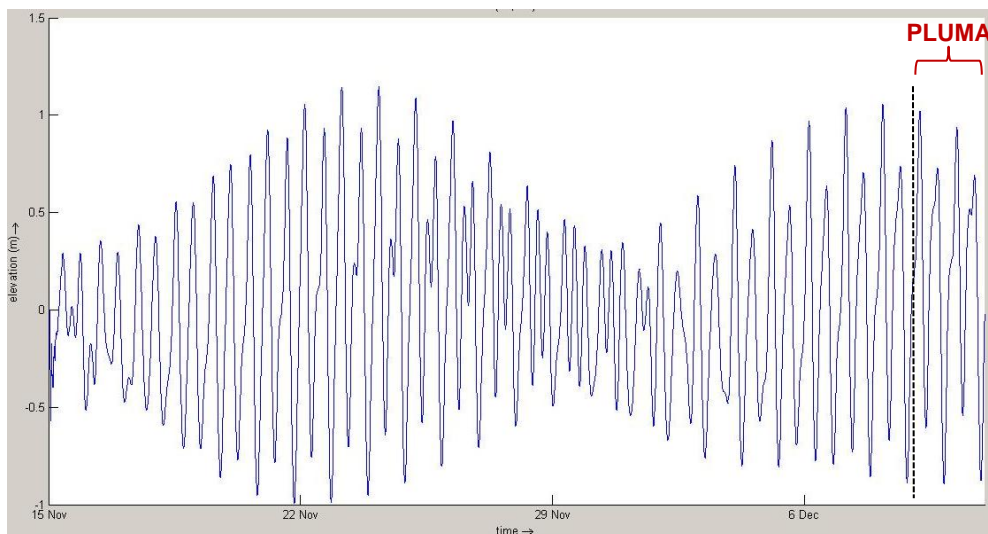


Figura 44 - Série de nível do mar simulado - Evento F12

A Figura 45 apresenta a comparação entre o nível do mar real no dia do Evento F12 e os níveis do mar simulados para o período de análise da pluma de dispersão de sedimentos, dia 09 de dezembro de 2014. Em destaque está o período coincidente (aprox. das 12h às 16h) às medições de sólidos em suspensão, cujos valores subsidiaram as comparações entre resultados observados e simulados. Como referência é definida a localização do ponto Perturbado.

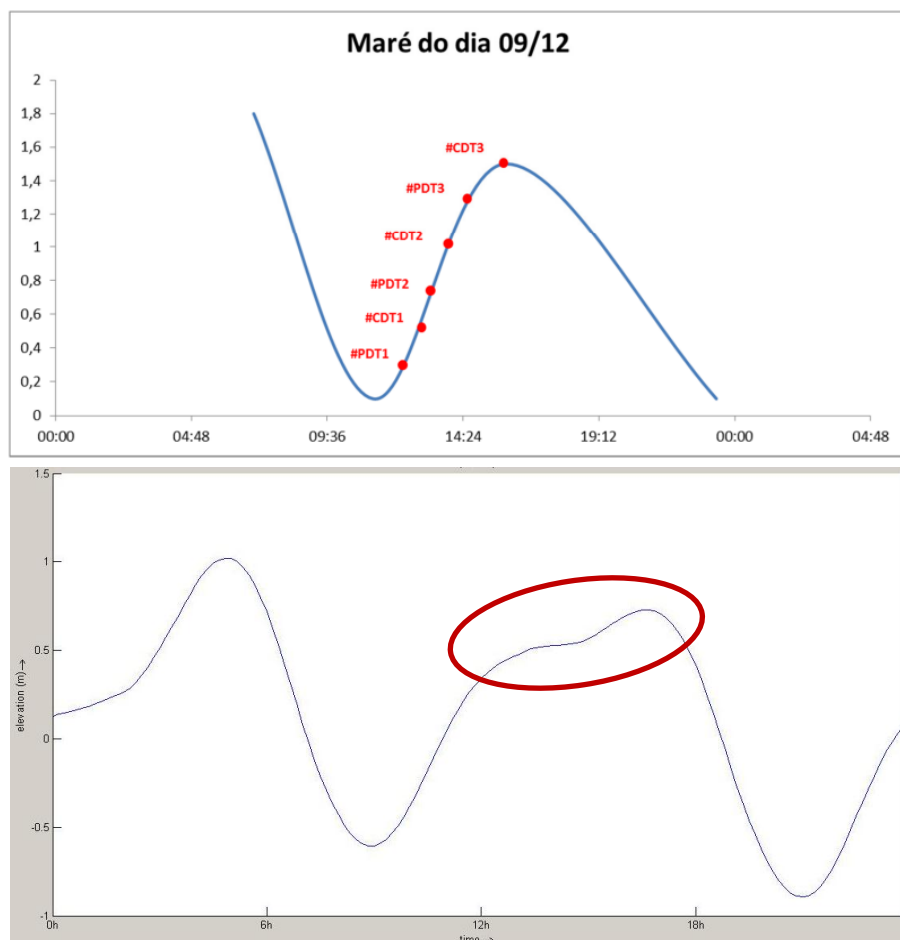


Figura 45 - Variação do nível do mar observado (superior) e simulado (inferior) - Evento F12  
Fonte: APPA, 2015.

Com base na comparação entre os gráficos da Figura 45, observou-se leve desvio no comportamento hidrodinâmico, sobretudo na amplitude da onda de maré, com pequena divergência entre os dados observados e simulados.

#### 4.2.2.3 Pluma de dispersão de sedimentos

São apresentados os resultados para as três camadas consideradas, para a pluma gerada na data 09/12/2014, separados em sedimentos coesivos e não coesivos. Nesse caso, às 13h é verificada maré enchente e, posteriormente, às 16h o estofa de maré enchente para vazante (preia-mar).

09/12/2014 - 13h:

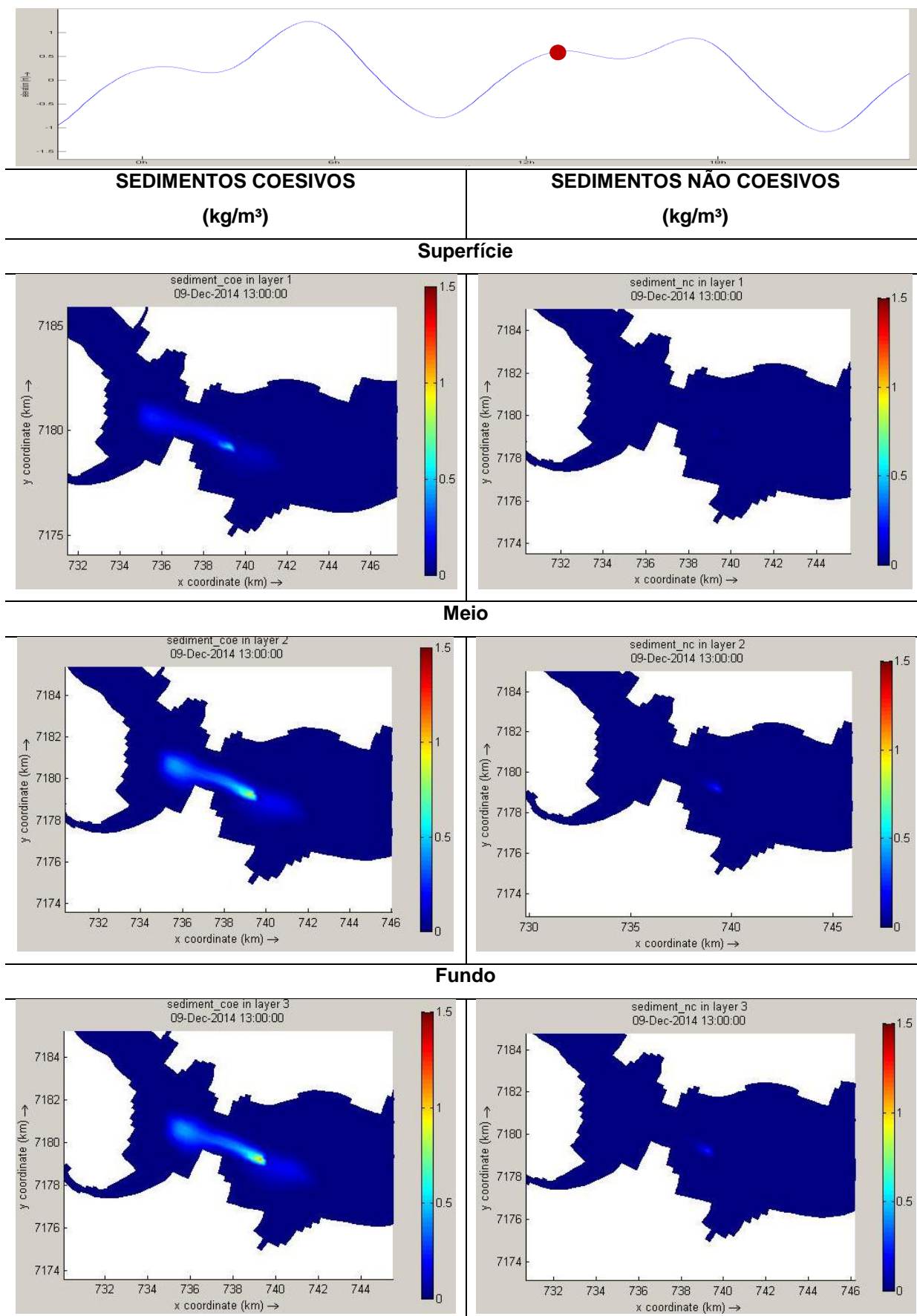


Figura 46 - Simulação da pluma de sedimentos em suspensão - Evento F12 – Tempo T1

09/12/2014 - 16h:

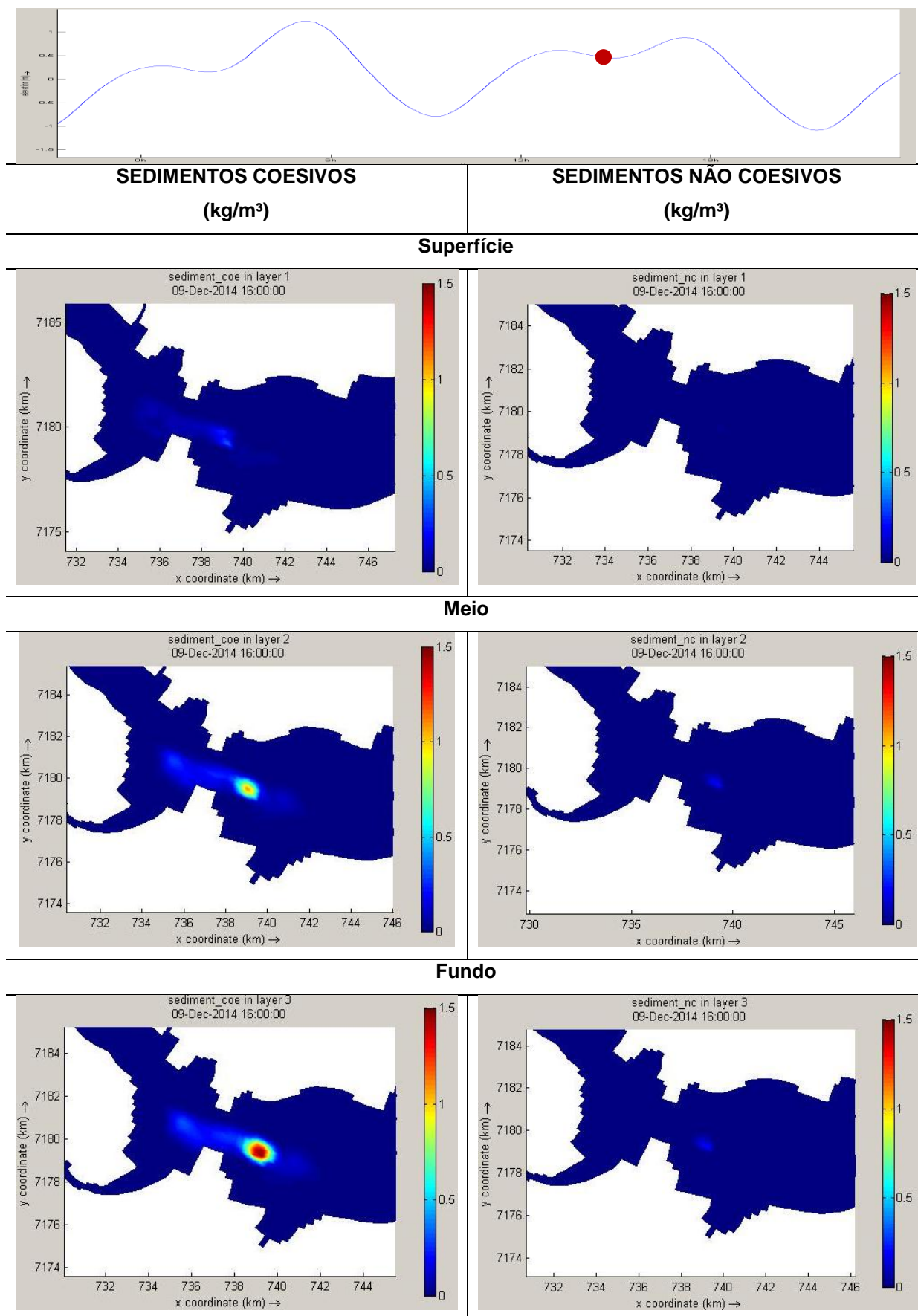


Figura 47 - Simulação da pluma de sedimentos em suspensão - Evento F12 – Tempo T3

As tendências de dispersão da pluma de sedimentos em suspensão sugerem clara influência das forçantes de maré. No primeiro momento (13h), a pluma, formada por sedimentos predominantemente coesivos, possui maior alcance e direção claramente definida no mesmo sentido (enchente). Existe dispersão no sentido vazante, porém bem menos expressiva. Esta deve associar-se à influência das descargas fluviais afluentes ao estuário, dada a proximidade principalmente ao Rio Nhundiaquara, bem como ao período de preia-mar (mudança de marés).

No período de estofo de maré (16h), verifica-se a convergência de sedimentos em suspensão ao redor da localização da draga, conferindo à pluma definição menos clara da direção predominante e menor alcance, além de maior concentração de sedimentos em suspensão nesse ponto. Observam-se concentrações de sedimentos coesivos em suspensão em torno de  $0,5 \text{ kg/m}^3$  em uma distância de até 07 km da fonte considerando ambos os sentidos de dispersão (enchente e vazante).

A Figura 48 representa as velocidades médias para o Evento F12 (instantes 13h e 16h), com destaque aos pequenos vórtices observados.

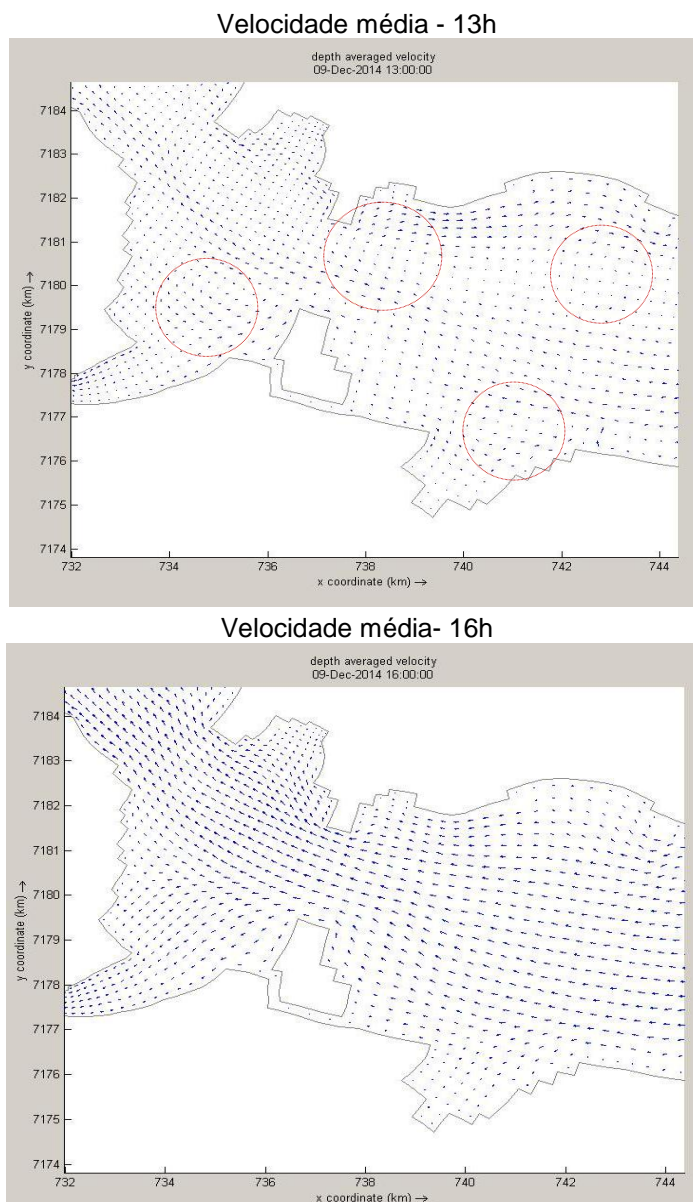


Figura 48 - Velocidades médias - Evento F12

A distribuição de velocidades instantâneas comparada com a dispersão de sedimentos sugere que há um intervalo de tempo entre o momento de mudança da maré e o impacto disso no surgimento da pluma de sedimentos em suspensão em uma atividade de dragagem.

#### 4.2.2.4 Sedimentos em suspensão x Turbidez

A Figura 49 apresenta a comparação entre os dados de turbidez observados, convertidos para concentração de sedimentos em suspensão (mg/L), e os dados modelados de sedimentos em suspensão para o Evento F12.



Figura 49 - Comparação entre dados modelados de sedimentos em suspensão e dados observados Evento F12

Da mesma forma que no evento precedente, verifica-se que a simulação atingiu a mesma ordem de grandeza dos dados medidos, em alguns casos apresentando aparente boa correlação.

#### 4.2.3 Evento F15 – Trecho Delta 2

Períodos simulados:

- Pré-evento: 01 de março a 03 de abril de 2015.
- Pluma de dispersão de sedimentos: 01 de abril de 2015.
- Maré de quadratura.

Granulometria considerada: 70% coesivos / 30% não coesivos

##### 4.2.3.1 Pontos de observação

A Figura 50 apresenta os pontos de observação considerados na simulação do Evento F15. O ponto de dragagem possui profundidade de aproximadamente 7,7 m.

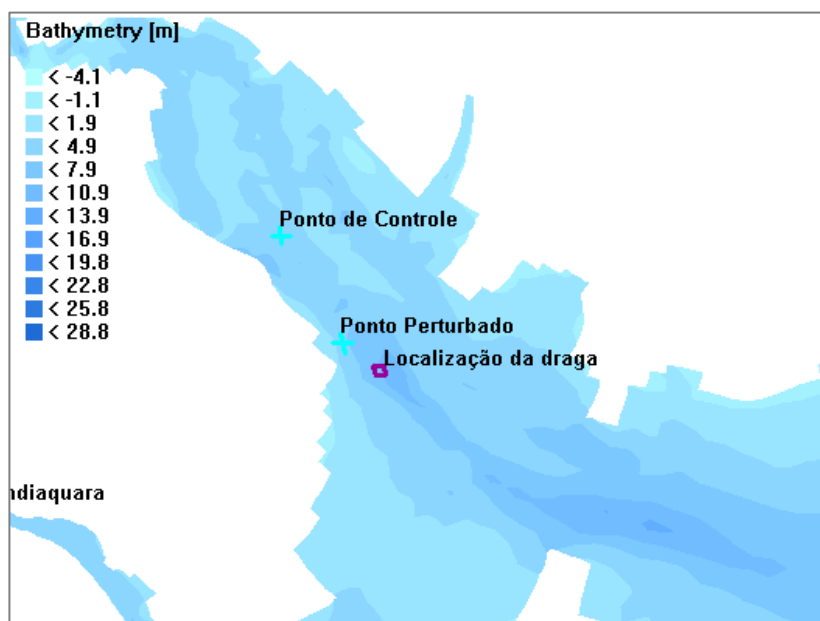


Figura 50 - Pontos de observação - Evento F15

##### 4.2.3.2 Nível do mar

A Figura 51 apresenta a série de nível do mar para o ponto de observação “Perturbado”, com destaque ao período onde foi simulada a pluma de dispersão de sedimentos da dragagem.

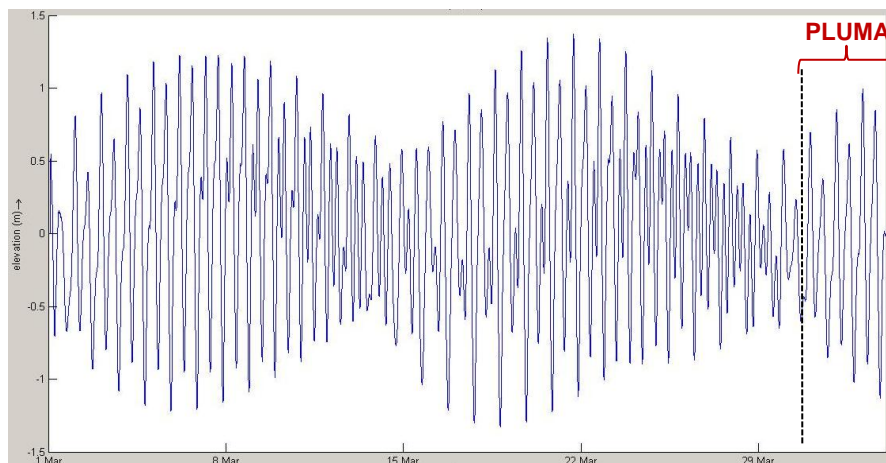


Figura 51 - Série de nível do mar simulado - Evento F15

A Figura 52 apresenta a comparação entre o nível do mar real, observado no dia do Evento F15 e os níveis do mar simulados para o período de análise da pluma de dispersão de sedimentos, dia 01 de abril de 2015. Em destaque está o período coincidente (aprox. das 09h às 13h) às medições de turbidez, cujos valores convertidos em concentração de sedimentos em suspensão subsidiaram as comparações entre resultados observados e simulados. Como referência é definida a localização do ponto Perturbado.

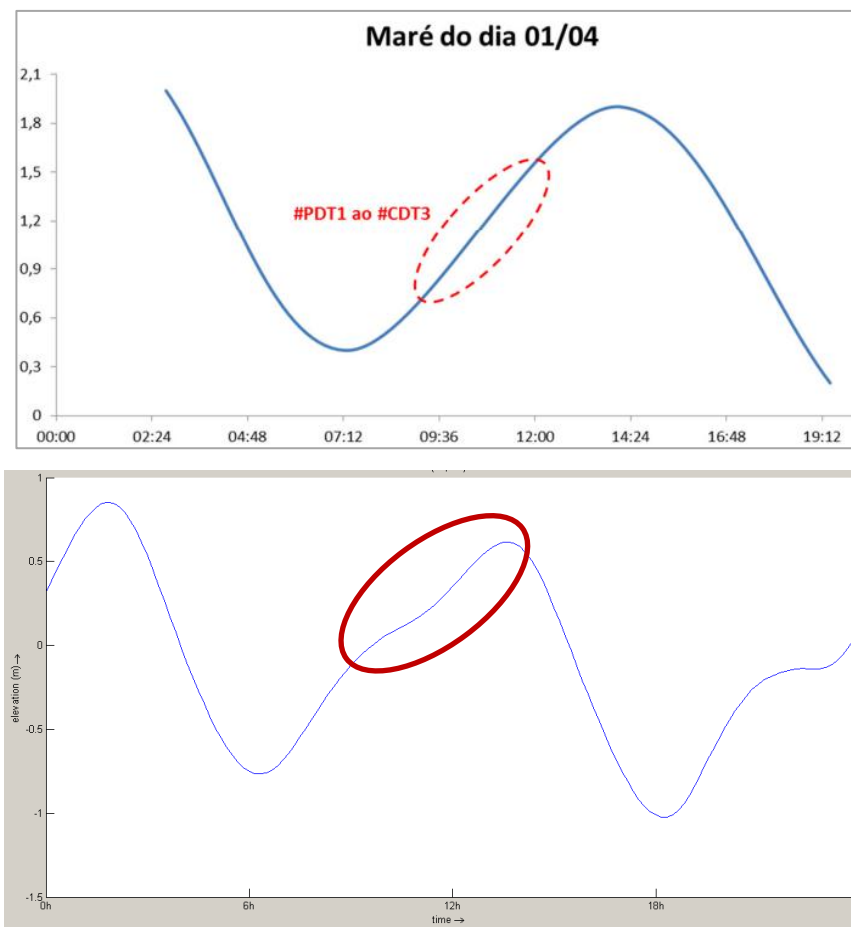


Figura 52 - Variação do nível do mar observado (superior) e simulado (inferior) - Evento F15  
Fonte: APPA, 2015

Os resultados interpretados pela comparação dos gráficos na Figura 52 se mostraram bem representativos à realidade observada no local.

#### 4.2.3.3 Pluma de dispersão de sedimentos

Foram observados dois instantes de tempo (09h e 12h), com base nos dados disponibilizados de medições de turbidez. Nesse caso esses pontos correspondem às máximas velocidades de corrente da maré enchente e ao estofo de marés, respectivamente.

São apresentados os resultados para as três camadas consideradas, para a pluma gerada na data 01/04/2015, separados em sedimentos coesivos e não coesivos. Nesse caso, ambos os pontos (09h e 12h) se referem aos instantes de maré enchente.

01/04/2015 - 09h:

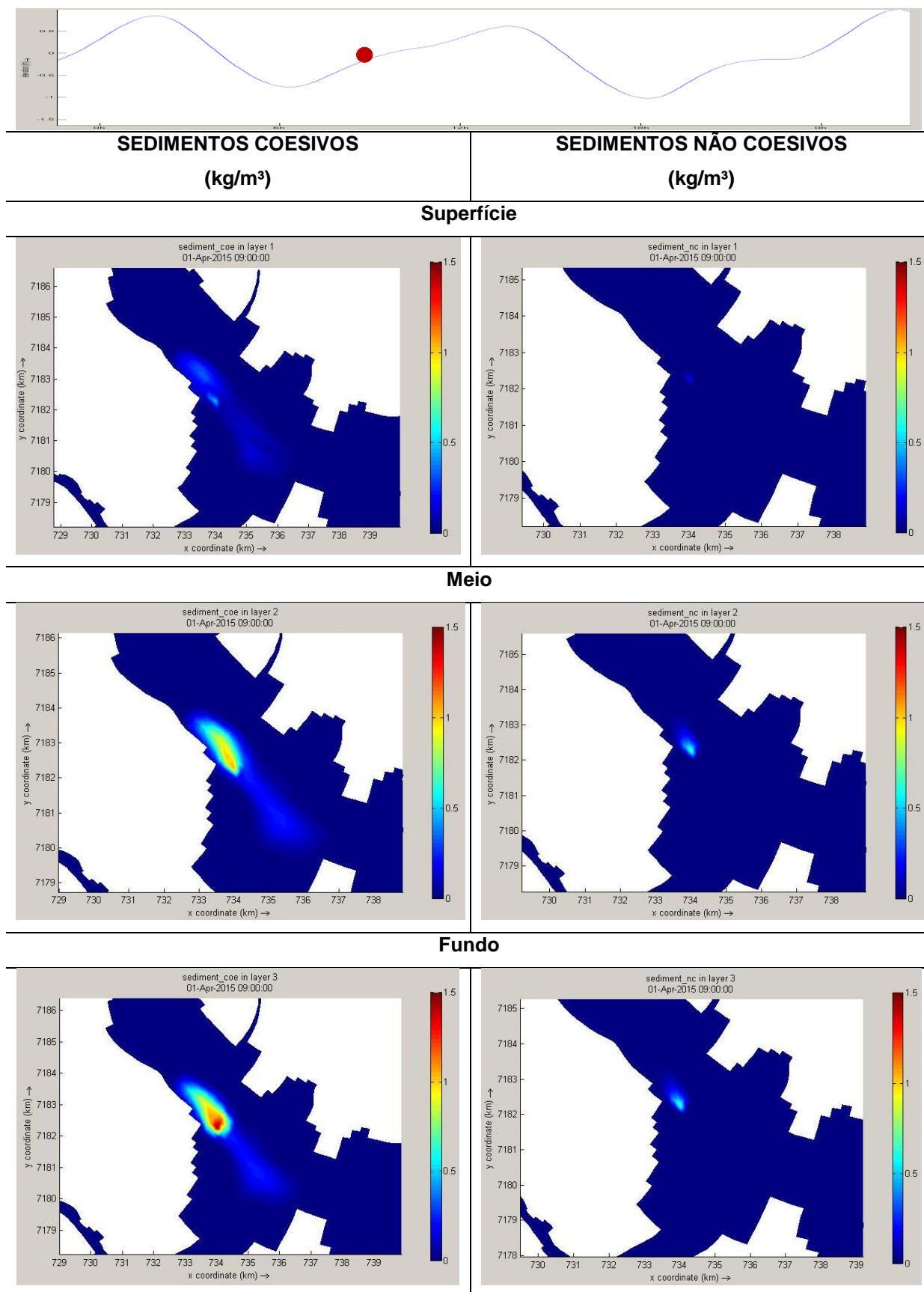


Figura 53 - Simulação da pluma de sedimentos em suspensão - Evento F15 – Tempo T1

01/04/2015 - 12h:

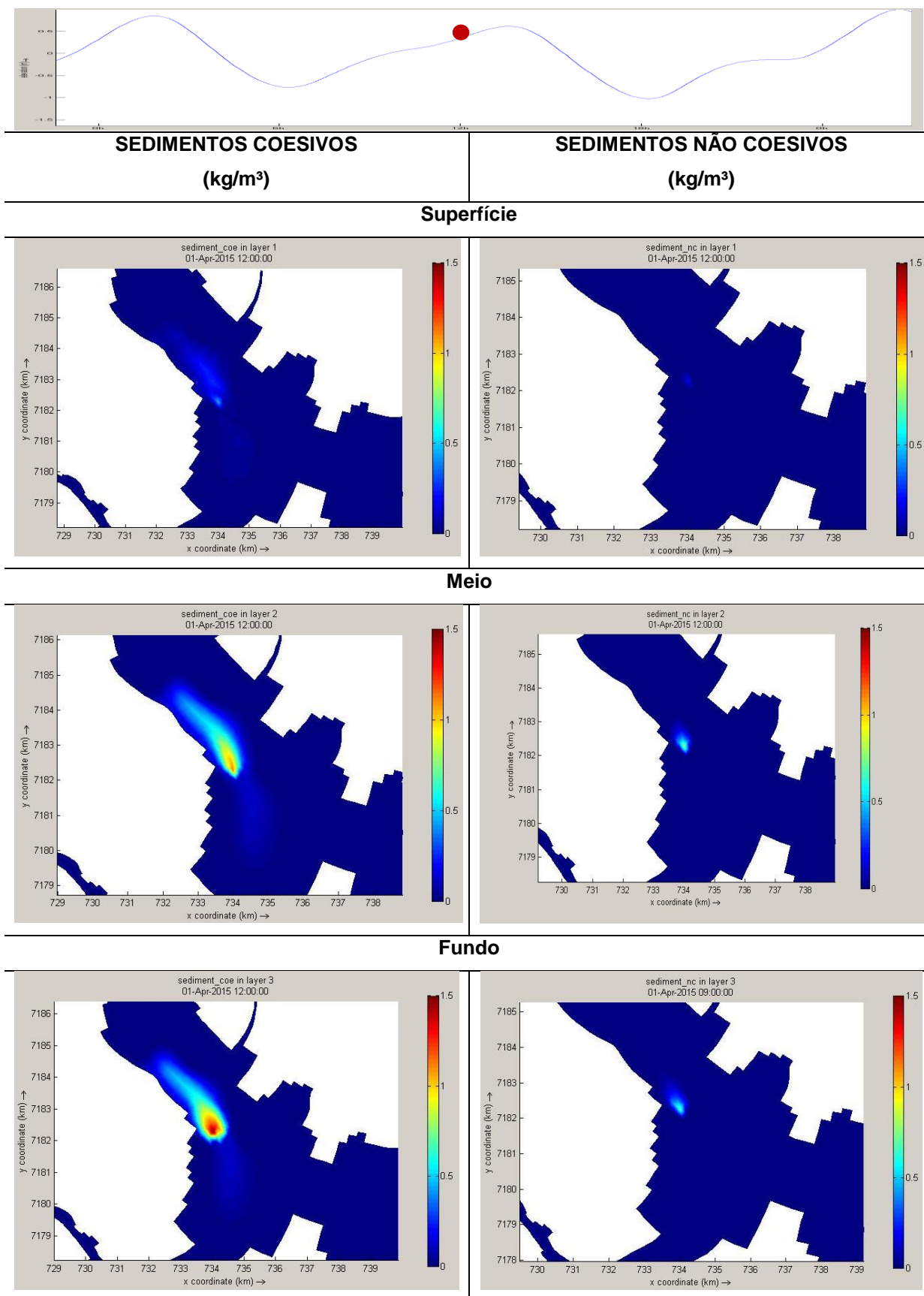


Figura 54 - Simulação da pluma de sedimentos em suspensão - Evento F15 – Tempo T3

A dispersão de sedimentos em suspensão, oriundos da atividade de dragagem, aparece como predominantemente no sentido da maré enchente, para ambos os instantes analisados (09 e 12h), considerando tanto os sedimentos coesivos quanto não coesivos. Existe dispersão no sentido vazante, porém bem menos expressiva. Esta deve associar-se à influência das descargas fluviais afluentes ao estuário, dada a proximidade principalmente ao Rio Nhundiaquara e ao final do estuário, podendo sofrer o efeito. Observam-se concentrações altas de sedimentos coesivos em suspensão ( $> 1 \text{ kg/m}^3$ ) em uma distância de até 1 km da fonte e aproximadamente  $0,75 \text{ kg/m}^3$  em até 2 km de distância. O alcance da pluma é estimado em 05 km, considerando ambos os sentidos de dispersão (enchente e vazante). A Figura 55 representa as velocidades médias para o Evento F15 (instantes 09h e 12h).

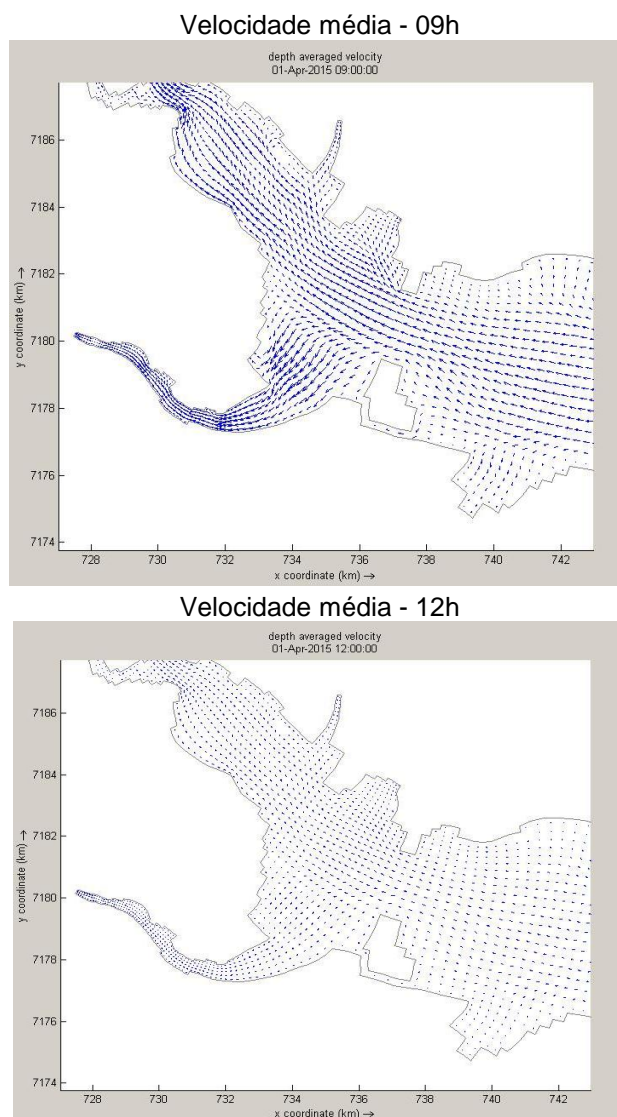


Figura 55 - Velocidades médias - Evento F15

#### 4.2.3.4 Sedimentos em suspensão x Turbidez

A Figura 56 apresenta a comparação entre os dados de turbidez observados, convertidos para concentração de sedimentos em suspensão (mg/L), e os dados modelados de sedimentos em suspensão para o Evento F15.

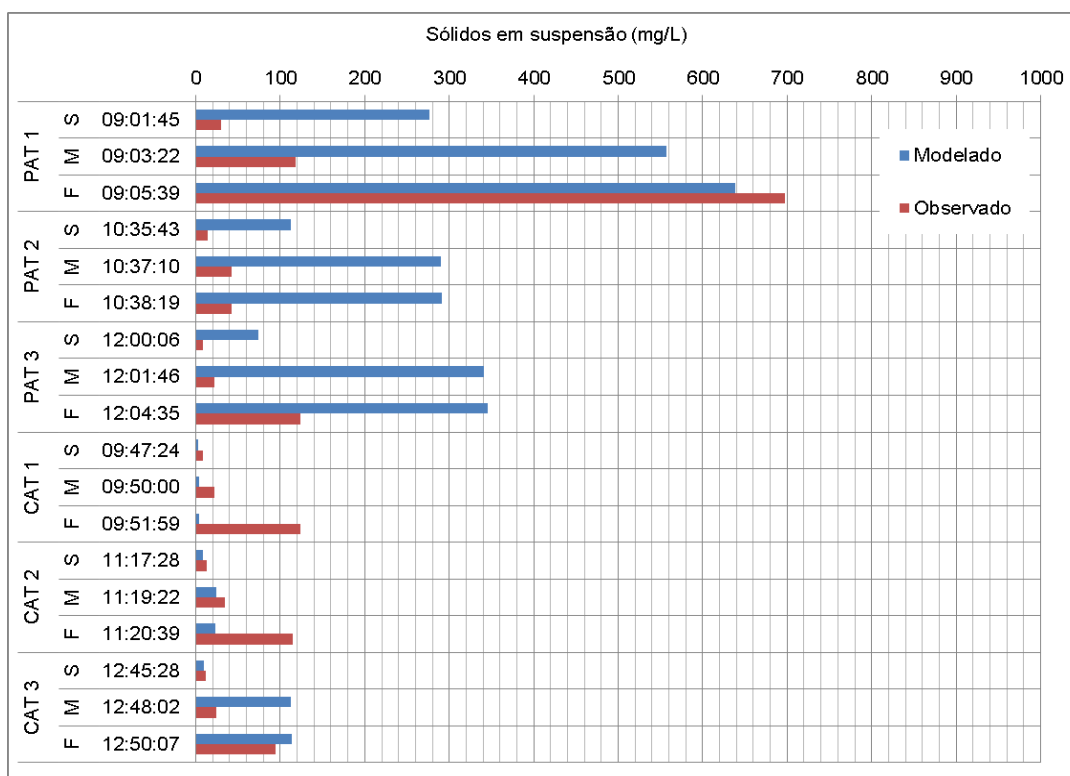


Figura 56 - Comparação entre dados modelados de sedimentos em suspensão e dados observados - Evento F15

Da mesma forma que nos eventos precedentes, verifica-se que a simulação atingiu a mesma ordem de grandeza dos dados medidos, em alguns casos apresentando aparente boa correlação.

### 4.3 SÍNTESE DOS RESULTADOS

A Tabela 15 apresenta a síntese dos resultados obtidos no presente estudo. A Distribuição C/NC (coesivos/não coesivos) refere-se à proporcionalidade considerada entre sedimentos coesivos e não coesivos. O alcance e a largura aproximada da pluma são estimativas da extensão alcançada pelos sólidos em suspensão, considerados em valores acima de 0,5 kg/m<sup>3</sup>, ou 500 mg/L. A concentração máxima observada é referente à soma entre as parcelas coesivas e não coesivas ao longo da coluna d'água, nos pontos perturbados de cada evento, ou seja, próximo a draga.

Tabela 15 - Síntese dos resultados simulados para os Eventos F10, F12 e F15

Evento	Trecho	Maré	Distribuição C/NC	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Alcance da pluma (km)	Largura da pluma (km)	Concentração máxima (mg/L)
F10	Bravo 2	Sizígia	50/50	10,1	8,2	1,3	1729,2
F12	Delta 1	Sizígia	70/30	5,6	7,1	0,9	1291,7
F15	Delta 2	Quadratura	70/30	5,6	4,9	1,2	1472,1

Observando a Tabela 15 verifica-se a tendência à maior dispersão dos sedimentos em suspensão em regimes de marés de sizígia, resultado razoável dada a notada dominância das forçantes de maré nos padrões de circulação hidrodinâmica do estuário como um todo e às máximas amplitudes na medição do nível do mar nessas marés.

As concentrações máximas observadas, apesar de localizadas próximas da fonte, conferem valores bem elevados, sugerindo a tendência à superestimativa da concentração de sedimentos para resultados no campo próximo.

Considerando os pontos perturbados distantes cerca de 500 metros da fonte de sedimentos (posição da draga), os resultados de máximas concentrações observadas configuram concentrações passíveis de observação, sendo que com base na literatura (WIT et al, 2014) valores altos de concentração são citados como em torno de 500 mg/L.

## 5 CONCLUSÕES

A complexidade do comportamento hidrodinâmico do CEP faz com que haja influência de uma grande variedade de parâmetros locais. Apesar de simplificações adotadas no presente estudo para possibilitar a implementação do modelo hidrodinâmico, foi possível atingir as ordens de grandeza de parâmetros físicos e características geométricas esperadas nas simulações do transporte de sedimentos em suspensão, especificamente para três eventos reais de dragagem, considerando dados da turbidez das plumas formadas nas ocasiões.

Considerando os dados existentes de profundidade, a interpolação realizada pareceu satisfatória, dada a boa correlação entre os resultados de nível do mar observados em épocas distintas e as simulações do modelo hidrodinâmico, permitindo a confiabilidade dos resultados para as atividades de dragagem.

Foi possível a simulação das plumas consideradas visíveis, adotando a posição da draga como uma fonte pontual e imóvel de sedimentos em suspensão e o processo de *overflow* como de vazão contínua em diferentes trechos do canal de navegação da Baía de Paranaguá e Antonina. Em pontos de observação localizados próximos da fonte, observaram-se pontos com concentrações possivelmente superestimadas, podendo estar associadas à superestimativa da vazão de *overflow* ou da carga de sedimentos considerada. Cabe citar a possibilidade de erros de medição ou registro de dados no momento da coleta, variabilidade natural da turbidez local (associada a fenômenos climáticos e aportes naturais de sedimentos), erros numéricos na modelagem hidrodinâmica, variabilidade de comportamentos dos parâmetros relacionados à difusão turbulenta, dentre outros.

Por outro lado, o comportamento de dispersão da pluma de sedimentos no campo afastado atinge resultados razoáveis em comparação à literatura existente. Foi possível visualizar e determinar pontos com o surgimento de vórtices, sobretudo em situações de mudança de marés, configurando prováveis causas do acúmulo temporário de sedimentos em suspensão. Como o transporte de sedimentos está intrinsecamente correlacionado às velocidades e direções do escoamento, verifica-se que o modelo hidrodinâmico e sedimentológico é uma ferramenta eficaz no auxílio da previsão de dispersão de plumas de dispersão de sedimentos oriundos de dragagem.

A comparação entre os dados de sedimentos em suspensão simulados e os dados observados turbidez, convertidos à unidade equivalente (mg/L) se mostrou mais sensível à erros e imprecisões. Entretanto, os resultados obtidos também alcançaram ordem de grandeza condizente à realidade, configurando outro indício de boa capacidade do modelo hidrodinâmico como ferramenta de apoio ao monitoramento ambiental.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES

A obtenção de dados de monitoramento em eventos de dragagem, em séries confiáveis e com elevada frequência, auxiliaria o desenvolvimento de estudos científicos que servirão de apoio às tomadas de decisão relacionadas à localização e instantes de uma atividade de dragagem.

Recomenda-se fortemente o desenvolvimento de estudos que considerem a validação do modelo hidrodinâmico com base em imagens aéreas obtidas por meio de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), modalidade de RPA (Aeronave Remotamente Pilotada) conforme definição da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) (ANAC, 2012).

Como já citado por Marone e Noernberg (2003), a modelagem numérica e o sensoriamento remoto constituem duas prováveis áreas que mais tem crescido se considerarmos o volume de publicações. O acompanhamento aéreo simultâneo à atividade de dragagem pode consistir em técnicas mais precisas e baratas de monitoramento ambiental além de contribuir com a integração e velocidade de alerta em de sistemas de defesa, em caso de ocorrência de acidentes.

## 6 REFERÊNCIAS

ADMINISTRAÇÃO DOS PORTOS DE PARANAGUÁ E ANTONINA – APPA. Monitoramento ambiental da dragagem de manutenção do Canal de Acesso, Baía de Evolução e Berços do Cais Comercial do Porto de Paranaguá e (Áreas Alfa, Bravo e Charlie) e Canal de Acesso ao Porto de Antonina (Áreas Delta). Relatório Técnico Final. 2 Vol. Junho de 2015. Elaborado por: DTA Engenharia, SP. APPA, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. Hidroweb – Séries históricas. Acesso em 20 de julho de 2015.

ANGULO, R.J., SOUZA, M.C. DE, LAMOUR, M.R. Coastal problems induced by dredging activities in the navigation channels of Paranagua and Sao Francisco do Sul harbour, Southern Brazil. J. Cost. Res. SI39, (Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Coastal Symposium), Itajai, Brasil, 1801-1803, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: Rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

BIGARELA, J.J., BECKER, R.D., MATTOS, D.J., WERNER, A. A Serra do Mar e a porção oriental do Estado do Paraná, um problema de segurança ambiental e nacional. Secretaria do Estado do Planejamento do Paraná, 248pp. 1978.

BIGARELLA, J.J. Problemas de assoreamento na Baía de Paranaguá (PR). In: Boldrini et al., 2007.

BLENINGER, T. POLETTO, F, M. HORITA, C, O. Modelagem hidrodinâmica da área costeira sob influência do estuário do Rio Itajaí-Açú, SC: resultados preliminares. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídrico. ABRH. 2013.

BOLDRINI, E. B. SOARES, C. A. DE PAULA, E. V. Dragagens Portuárias no Brasil: Licenciamento e Monitoramento Ambiental, p.32-37. 2007.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. BRASIL, 1981.

BRASIL. Decreto nº 99.274, de 6 de junho de 1990. Regulamenta a Lei nº 6.902, de 27 de abril de 1981, e a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõem, respectivamente sobre a criação de Estações Ecológicas e Áreas de Proteção Ambiental e sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, e dá outras providências. BRASIL, 1990.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997. Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental. BRASIL, 1997.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 454, de 01 de novembro de 2012. Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. BRASIL, 2012.

BRASIL. Agência Nacional de Aviação Civil. Instrução Suplementar nº 21/2012. Brasília: ANAC, 2012.

BRASIL. Dragagem. Secretaria de Portos. Disponível em: <<http://www.portosdobrasil.gov.br/assuntos-1/pnd>>. Acesso em 16 de junho de 2015. SEP, 2015.

BRAY, R. Environmental aspects of dredging. Taylor & Francis/Balkema. 2008.

CAMARGO, R.; MARONE, E.; SILVA DIAS, P. L. 1996. Detecção do sinal de brisa no registro de vento de Pontal do Sul (PR). In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 9. Rio de Janeiro, 1996. Anais. Rio de Janeiro, Sbmec. p.1036-1040.

CAMARGO, R. Estudo numérico das circulações atmosférica e oceânica na região da Baía de Paranaguá. Tese PhD. Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico. 181 p. 1998.

CAPELLO, M., CUTRONEO, L., FERRANTI, M., BUDILLON, G., BERTOLOTTI, R., CIAPPA, A., COTRONEO, Y., CASTELLANO, M., POVERO, P., TUCCI, S. Simulations of dredged sediment spreading on a *Posidonia oceanica* meadow off the Ligurian coast, Northwestern Mediterranean. *Marine Pollut. Bull.* (2013).

CARNEIRO, J. C. Dinâmica sedimentar das Baías de Paranaguá e Antonina (Paraná, Brasil) com base nas tendências de transporte de sedimentos. CEM – PGSISCO. UFPR. 2013.

CHU AO, WANG, Z.B., DE VRIEND, H.J., STIVE, M.J.F. A process-based approach to sediment transport in the Yangtze River. *Proceedings of the 32nd International Conference on Coastal Engineering Shanghai, China*, pp. 1–12. 2010.

COASTAL PLANNING AND ENGINEERING DO BRASIL. Modelagem numérica dos processos de transporte de sedimentos e mudanças morfológicas como ferramenta para estimativa da taxa de sedimentação do canal de acesso aos Portos de Paranaguá e Antonina. CPE, 2010.

CRAPPER, P. F. Forced Plume Characteristics. *Tellus*, n.29, p.470-475. 1977.

CRONIN, K.M., DEVOY, R.J.N., GAULT, J. The value of different modeling approaches to investigate estuarine morphodynamics. *J. Coast. Res. Special Issue* 56, 932– 936. 2009.

CUNHA, C. L. N. Scudelari, A. C., J. E. Gonçalves<sup>∞</sup> and E. G. F. Mercuri. Assessment of sanitary sewage pollution in the Paranaguá estuarine complex of Paranaguá, Brazil using environmental modeling. 2011.

DAVIS JR, R. A Coastal Sedimentary Environments. Springer-Verlag. 716p. 1985.

DELTAES. Delft3D-FLOW User Manual. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. Hydro-Morphodynamics. Version 3.15.25157. Delft, NL. 2012

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO - DHN. Estações Maregráficas. Centro de Hidrografia da Marinha. Disponível em: <<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-estacoes-maregraficas/estacaomare.html>>. Acesso 22 jul 2014. DHN, 2013.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO - DHN. Cartas Náuticas. Centro de Hidrografia da Marinha. Disponível em: <[http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster\\_disponiveis.html](http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html)>. Acesso 10 fev 2015. DHN, 2015.

DYER K.R. "Sediment transport processes in estuaries". In: Geomorphology and Sedimentology of Estuaries, G.M.E. Perillo (ed.). Developments in Sedimentology, 53. Elsevier Science, 423-449. 1995.

DYER, K.R. Estuaries: A physical introduction. John Wiley & Sons, 2nd edition, 195p. 1997.

ERFTEMEIJER, P.L., LEWIS-III, R.R.R. Environmental impacts of dredging on seagrasses: a review. Marine Pollut. Bull. 52 (12), 1553–1572. 2006.

ERFTEMEIJER, P.L., RIEGL, B., HOEKSEMA, B.W., TODD, P.A. Environmental impacts of dredging and other sediment disturbances on corals: a review. Marine Pollut.Bull. 64 (9), 1737–1765. 2012.

ESCOBAR, C.A. S., MAYERLE, R. Procedures for improving the prediction of equilibrium grain sizes, bed forms and roughness in tidally dominated areas. 30th

International Conference on Coastal Engineering ICCE, San Diego, California, USA, pp. 3092– 3104. 2006.

FALKENBERG, A. V. Estudo da dispersão, mistura e qualidade da água do Complexo Estuarino de Paranaguá com uso de modelagem numérica. Dissertação de Mestrado. Pontal do Paraná, 2009.

FERREIRA, P. L. C. Análise comparativa entre correntes de densidade e jatos. IPH. UFRGS. 2013.

FISCHER, H. B; LIST, E. J.; KOH, R. C. Y.; IMBERGER, J.; BROOKS, N H. Mixing in inland and coastal waters. 1ªed. Academic Press. 1979.

FRANKLIN. T. S. A ocupação da orla da Baía da Ribeira e seus impactos sobre a hidrodinâmica local. Uma investigação através da modelagem numérica. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA. 2009.

GILKINSON, K., FADER JR., G., GORDON, D., CHARRON, R., MCKEOWN, D., RODDICK, D., KENCHINGTON, E., MACISAAC, K., BOURBONNAIS, C., VASS, P., LIU, Q. Immediate and longer-term impacts of hydraulic clam dredging on an offshore sandy seabed: effects on physical habitat and processes of recovery. *Continent. Shelf Res.* 23 (1415), 1315–1336. 2003.

GIURDINO, A., IBRAHIM, E., ADAM, S., TOORMAN, E.A., MONBALIU, J. Hydrodynamics and cohesive sediment transport. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng. ASCE*, 135; , pp. 176–184. 2009.

GRABEMANN I., KRAUSE G. Transport Processes of Suspended Matter Derived from Time Series in a Tidal Estuary. *Journal of Geophysical Research*, Federal Republic of Germany, 94, 14,373-14,379. 1989.

HERRLING, G. Development of a numerical model for the Paranaguá Bay in Brazil. M.Sc. Thesis – Coastal Research Laboratory, Institute of Geosciences, Christian Albrechts University, Kiel-Germany. 2003.

HORIBA. U-50 Multiparameter Water Quality Meter. Disponível em: <<http://www.horiba.com/us/en/process-environmental/products/water-quality-measurement/details/u-50-multiparameter-water-quality-checker-368/>>. Acesso em 20 de julho de 2015.

JE, C.; HAYES, D. F.; KIM, K. Simulation of resuspended sediments resulting from dredging operations by a numerical flocculent transport model. ScienceDirect. Chemosphere 70. P. 187–195. 2007.

KIM, C.S., LIM, H.-S., Sediment dispersal and deposition due to sand mining in the coastal waters of Korea. Continent. Shelf Res. 29 (1), 194–204, Physics of Estuaries and Coastal Seas: Papers from the {PECS} 2006 Conference. 2009.

KITZMANN, D. I. S. ASMUS. M. L. Gestão ambiental portuária: Desafios e possibilidades. Revista de Administração Pública, 40(6): 1041-1060. 2006.

KJERFVE, B. AND MAGILL, K.E. Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. In: L.G. Ward and G.M. Ashley (Editors), Physical Processes and Sedimentology of Siliciclastic-Dominated Lagoonal Systems. Mar. Geol., 88: 187-199. 1989.

KNOPPERS, B.A., BRANDINI, F.P., THAMM, C.A. Ecological studies in the Paranaguá Bay II. Some physical and chemical characteristics. Nerítica 2:1-36. 1987.

LAMOUR, M.R.; SOARES, C.R.; CARRILHO, J. C. Mapas dos parâmetros texturais dos sedimentos de fundo do Complexo Estuarino de Paranaguá – PR. Boletim Paranaense de Geociências. n 55. 2004

LANA, P.C., MARONE, E., LOPES, R.M., MACHADO, E.C. The subtropical Estuarine Complex of Paranaguá Bay, Brazil. In: Sellinger, U., Kjerfve, P. eds. Ecological Studies, v. 144 – Coastal Marine Ecosystems of Latin America. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg p. 131-145. 2001.

LEAL NETO, A. de C. A expansão do terminal de contêineres de Sepetiba: uma aplicação da dinâmica de sistemas e considerações ambientais. Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, 2000.

LESSER, G. R.; Roelvink, J. A.; van Kester, J. A. T. M.; Stelling, G. S. Development and validation of a three-dimensional morphological model. Coastal Engineering. Vol. 51. P. 883-915. 2004.

LOPES, G. M. Aplicação de um modelo numérico hidrodinâmico para as Baías de Paranaguá e Antonina – PR. Dissertação de Mestrado. PGSISCO. CEM. UFPR. Pontal do Paraná, 2010.

LUNG, W. Water quality modeling: application to estuaries, vol III. CRC Press, Florida. 1993.

MANTOVANELLI, A. Caracterização da dinâmica hídrica e do material particulado em suspensão da Baía de Paranaguá e em sua bacia de drenagem. Curitiba, 149 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. 1999.

MARONE, E. CAMARGO, R. Marés meteorológicas no litoral do Estado do Paraná: O evento de agosto de 1993: Nerítica, 8, p. 73-85. 1994.

MARONE, E., JAMIYANAA, D. Tidal characteristics and a numerical model for the M2 tide at the estuarine complex of the Bay of Paranaguá. Nerítica v. 11 p. 95-107. 1997.

MARONE, E.; NOERNBERG, M. A. Modelagem numérica costeira no Estado do Paraná: do usuário ao Desenvolvedor dos dados ao produto. Centro de Estudos do Mar da Universidade Federal do Paraná. Relatório Técnico. 28f., 2003.

MARONE, E., NOERNBERG, M.A., NETTO, J.R.J.P., ETRI, T., MAYERLE, R. Flow and transport processes in the Paranaguá Estuarine Complex in Brazil. CORELAB, Univ. Kiel, Kiel, Germany, Unpublished. 2012.

MAYERLE, R. NARAYANAN, R. ETRI, T. WAHAB, A. K. A. A case study of sediment transport in the Paranaguá Estuarine Complex. *Ocean Engineering* nº 106, 161-174. 2015.

MESTRES, M., SIERRA, J.P., MÖSSO, C., SÁNCHEZ-ARCILLA, A., HERNÁNDEZ, M., MORALES, J. Numerical assessment of the dispersion of overspilled sediment from a dredge barge and its sensitivity to various parameters. *Marine Pollut. Bull.* (0). 2013.

MIRANDA, L. B. et al. *Princípios de oceanografia física de estuários*. São Paulo. Edusp. 424p. 2002.

NASNER, H. Siltation in tidal harbours, part I (in German). *Die Küste*, p. 127-170. 1992.

NICHOLS, M., DIAZ, R., SCHAFFNER, L. Effects of hopper dredging and sediment dispersion, Chesapeake Bay. *Environ. Geol. Water Sci.* 15 (1), 31–43. 1990.

NOERNBERG, M. A. *Processos Morfodinâmicos no Complexo Estuarino de Paranaguá, Paraná, Brasil: Um estudo a Partir de Dados in situ e LANDSAT – TM*. Tese (doutorado em Geologia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2001.

NOERNBERG, M., MARONE, E., ANGULO, R. Coastal currents and sediment transport in Paranaguá complex navigation channel, *Boletim Paranaense de Geociências*, Editora UFPR, 60– 61, pp. 45– 54. 2007

ORGANIZATION OF ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT. Indicators for the integration of environmental concerns into transport policies. OECD Publications, 1993.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE - OMS. Guidelines for drinking water quality, vol. 2 ('Health criteria and other supporting information'). Genebra, Suíça. 1996.

PAGLIAI, A.B., VARRIALE, A.C., CREMA, R., GALLETTI, M.C., ZUNARELLI, R.V.. Environmental impact of extensive dredging in a coastal marine area. Marine Pollut. Bull. 16 (12), 483–488. 1985.

PRITCHARD, D W. What is an estuary: physical viewpoint. In Lauf, G. H. Estuaries. Publ. 83. Washington, DC. p. 3–5. 1967.

PORTO, M. M.; TEIXEIRA, S. G. Portos e o desenvolvimento. São Paulo: Lex Editora, 2002.

PORTO, M. M. Investir em dragagem é investir em meio ambiente. Dragagens e o Meio Ambiente. IBC Rio 2010, ANTAQ. 2010.

PORTOGENTE. Sítio eletrônico: <<https://portogente.com.br/>>. Acesso em 10 de agosto de 2015.

PUGH, D. T. Tides, surges and mean sea level. A handbook for Engineers and Scientists, John Wiley&Sons Ltd, New York, 472pp., 1987.

RHEE, C. v. On the sedimentation process in a Trailing Suction Hopper Dredger. Ph. D. thesis, TU Delft. 2002.

RIBAS, T. M. Implementação de Modelo Numérico para Estudo Hidrodinâmico das Baías de Antonina e de Paranaguá/PR. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Departamento de Hidráulica e Saneamento. 2004.

RICHARDSON, J. F. ZAKI, W. N. Sedimentation and fluidization: Part I. I. Trans. Institution of Chemical Engineers 32: 35–53. 1954.

SCHUBEL, J. R. AND D. W. PRITCHARD. The estuarine environment, Pt. 1, Council on Education in the Geological Sciences, J. Geol. Education., 20, 60–68. 1972.

SILVA, J. M. Portos – indutores de desenvolvimento econômico, com responsabilidade sócio-ambiental. Em Boldrini, 2007. p.32-37. 2007.

SIMEPAR. Estações meteorológicas (2015). Acesso em 15 de agosto de 2015.

TOMAZONI, J. C. MANTOVANI, L. E. BITTENCOURT, A. V. L. ROSA F. E. F. Utilização de medidas de turbidez na quantificação da movimentação de sólidos por veiculação hídrica nas Bacias dos Rios Anta Gorda, Brinco, Coxilha Rica e Jirau – Sudoeste do Estado do Paraná. Boletim Paranaense de Geociências, n. 57, p. 49-56, Editora UFPR. 2005.

TORRES, R. J. Uma Análise Preliminar dos Processos de Dragagem do Porto do Rio Grande, RS. Rio Grande, RS, Dissertação de Mestrado. Fundação Universidade Federal do Rio Grande, 2000.

UNESCO. Background papers and supporting data on the international equation of state 1980. Tech. Rep. 38, UNESCO, 1981.

USGS. U.S. GEOLOGICAL SURVEY. National Field Manual for the Collection of Water Quality Data. Handbooks for Water-Resources Investigations – Book 9. October, 2015.

VAN RIJN, L. C. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications, The Netherlands. 1993.

VAN RIJN, L. C., J. A. ROELVINK AND W. T. HORST, Approximation formulae for sand transport by currents and waves and implementation in DELFT-MOR. Tech. Rep. Z3054.40, WL j Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands. 2000.

VAN RIJN, L.C. Harbour siltation and control measures. Disponível em: <<http://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Harboursiltation2012.pdf>> Acesso em 30 nov 2014. VAN RIJN, 2012.

VIANNA JR., E. O. TEIXEIRA, G. A. O mercado e a política de dragagem do Ministério dos Transportes. Em Boldrini, 2007. p.14-19. 2007.

VILLARET, C., HUYBRECHTS, N., DAVIES, A .G. A large scale morphodynamic process-based model of the Gironde estuary. Jubilee Conference Proceedings NCK-Days, 10.3990/2.172: 29-76. 2012.

WIT, L.. TALMON, A.M. RHEE, C van. 3D CFD simulations of trailing hopper dredger plume mixing: Comparison with field measurements. Marine Pollution Bulletin 88. p 34–46. 2014.

WIT, L. 3D CFD modeling of overflow dredging plumes. NL, 2015.

ZEM, R. C. Hidrodinâmica e fluxo de Material Particulado em Suspensão na região estuarina da Baía de Paranaguá-PR. 155 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica Marinha) – Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2008

## APÊNDICE

**APÊNDICE. TABELAS DE RESULTADOS – SIMULAÇÕES DA PLUMA DE DISPERSÃO DE SEDIMENTOS X DADOS OBSERVADOS**

EVENTO F10 - 24/10/2014					Sed. Total modelado (kg/m <sup>3</sup> )			
Depois	Camada	Hora	Turbidez (NTU)	SS: Turb. x F (mg/l)	Coesivos	Não coesivos	SST (kg/m <sup>3</sup> )	SST * 1000 (mg/L)
PAT 1	S	09:39:25	91	63,4543	0,141595	0,016112	0,157707	157,7066
	M	09:42:44	165	115,0545	0,535724	0,257868	0,793592	793,592
	F	09:47:01	630	439,299	0,531478	0,246427	0,777905	777,905
PAT 2	S	11:21:40	15,5	10,80815	0,178716	0,010487	0,189203	189,2034
	M	11:24:25	108	75,3084	0,475355	0,211016	0,686371	686,371
	F	11:27:56	264	184,0872	0,533442	0,199476	0,732918	732,918
PAT 3	S	12:44:59	18,1	12,62113	0,144837	0,004451	0,149288	149,2876
	M	12:50:25	39,2	27,33416	0,231935	0,031135	0,26307	263,0703
	F	12:56:17	119	82,9787	0,587953	0,02494	0,612893	612,8926
CAT 1	S	10:22:03	12,6	8,78598	0,055895	0,000586	0,056481	56,4809
	M	10:23:56	33,3	23,22009	0,066901	0,002307	0,069208	69,20848
	F	10:25:40	241	168,0493	0,066827	0,002322	0,06915	69,14973
CAT 2	S	12:00:22	9,2	6,41516	0,031577	0,000136	0,031713	31,71307
	M	12:05:27	15	10,4595	0,052567	0,000373	0,05294	52,94006
	F	12:08:07	21,5	14,99195	0,054886	0,000329	0,055215	55,21468
CAT 3	S	13:29:17	5,8	4,04434	0,024828	0,000178	0,025006	25,00588
	M	13:33:31	10,5	7,32165	0,096661	0,000178	0,096839	96,83858
	F	13:36:00	13,6	9,48328	0,459991	0,000145	0,460136	460,1355
EVENTO F12 - 09/12/2014					Sed. Total modelado (kg/m <sup>3</sup> )			
Depois	Camada	Hora	Turbidez (NTU)	SS: Turb. x F (mg/l)	Coesivos	Não coesivos	SST (kg/m <sup>3</sup> )	SST * 1000 (mg/L)
PAT 1	S	12:39:32	126	87,8598	0,273315	0,0011016	0,2744166	274,4166
	M	12:40:00	106	73,9138	0,466175	0,0411715	0,5073465	507,3465
	F	12:40:21	366	255,2118	0,468512	0,0414162	0,5099282	509,9282
PAT 2	S	14:04:56	41,3	28,79849	0,114317	0,000132	0,114449	114,44902
	M	14:05:11	119	82,9787	0,308205	0,0056994	0,3139044	313,90436
	F	14:05:55	79,7	55,57481	0,371184	0,0057497	0,3769337	376,93371
PAT 3	S	15:39:41	17,6	12,27248	0,0858505	6,76E-05	0,0859181	85,918068
	M	15:40:12	17,5	12,20275	0,150027	0,0024847	0,1525117	152,51167
	F	15:41:00	21,1	14,71303	0,30628	0,0025866	0,3088666	308,86663
CAT 1	S	13:24:46	23,4	16,31682	0,0155775	1,47E-06	0,015579	15,57897
	M	13:25:05	50,1	34,93473	0,0252374	2,41E-05	0,0252615	25,26154
	F	13:25:50	137	95,5301	0,025919	2,42E-05	0,0259432	25,9432
CAT 2	S	14:59:52	11,9	8,29787	0,0031502	3,45E-09	0,0031502	3,1502035
	M	15:00:04	17	11,8541	0,0279741	3,50E-07	0,0279744	27,97445
	F	15:00:52	36,2	25,24226	0,0285567	3,52E-07	0,0285571	28,557052
CAT 3	S	16:19:50	8,7	6,06651	0,0015416	2,07E-07	0,0015418	1,5417668
	M	16:20:17	6,9	4,81137	0,0022346	8,50E-07	0,0022355	2,2354601
	F	16:21:02	14,9	10,38977	0,0026925	8,52E-07	0,0026933	2,6933425

EVENTO F15 - 01/04/2015					Sed. Total modelado (kg/m <sup>3</sup> )			
Depois	Camada	Hora	Turbidez (NTU)	SS: Turb. x F (mg/l)	Coesivos	Não coesivos	SST (kg/m <sup>3</sup> )	SST * 1000 (mg/L)
PAT 1	S	09:01:45	43,4	30,26282	0,274429	1,74822E-03	0,27617722	276,17722
	M	09:03:22	170	118,541	0,540516	1,64809E-02	0,5569969	556,9969
	F	09:05:39	1000	697,3	0,605422	3,34856E-02	0,6389076	638,9076
PAT 2	S	10:35:43	20,7	14,43411	0,112444	4,46657E-06	0,112448467	112,4484666
	M	10:37:10	60,1	41,90773	0,288784	8,10384E-04	0,289594384	289,594384
	F	10:38:19	60,2	41,97746	0,290482	8,10998E-04	0,291292998	291,292998
PAT 3	S	12:00:06	11,8	8,22814	0,0738365	1,24694E-05	0,073848969	73,8489694
	M	12:01:46	32,3	22,52279	0,338132	2,97747E-03	0,34110947	341,10947
	F	12:04:35	178	124,1194	0,342395	3,01179E-03	0,34540679	345,40679
CAT 1	S	09:47:24	11,8	8,22814	0,00233694	9,10332E-07	0,00233785	2,337850332
	M	09:50:00	32,3	22,52279	0,00364345	7,66230E-06	0,003651112	3,6511123
	F	09:51:59	178	124,1194	0,00385402	7,70377E-06	0,003861724	3,86172377
CAT 2	S	11:17:28	18,9	13,17897	0,00814271	1,54557E-07	0,008142865	8,142864557
	M	11:19:22	48,7	33,95851	0,02414	6,90855E-06	0,024146909	24,14690855
	F	11:20:39	164	114,3572	0,0230867	6,94424E-06	0,023093644	23,09364424
CAT 3	S	12:45:28	17	11,8541	0,0100086	2,05870E-08	0,010008621	10,00862059
	M	12:48:02	34,4	23,98712	0,112065	1,09785E-07	0,11206511	112,0651098
	F	12:50:07	136	94,8328	0,114085	1,30566E-07	0,114085131	114,0851306