



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS SEDIMENTOLÓGICOS DO CANAL DO MANGUE NO PORTO DO RIO DE JANEIRO COM AUXÍLIO DA MODELAGEM COMPUTACIONAL

Felipe Teixeira Duarte

Rodrigo dos Santos Peixoto

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman

Rio de Janeiro

Agosto de 2012

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS SEDIMENTOLÓGICOS DO CANAL
DO MANGUE NO PORTO DO RIO DE JANEIRO COM AUXÍLIO DA MODELAGEM
COMPUTACIONAL**

Felipe Teixeira Duarte

Rodrigo dos Santos Peixoto

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL

Examinado por:

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph. D.

Prof. Gilberto Olympio Mota Fialho, D.Sc

Prof. Afonso Augusto Magalhães de Araújo, D.Sc

Rio de Janeiro

Agosto de 2012

Duarte, Felipe Teixeira

Peixoto, Rodrigo dos Santos

Estudo da Influência dos Processos Sedimentológicos do Canal do Mangue no Porto do Rio de Janeiro com Auxílio da Modelagem Computacional / Felipe Teixeira Duarte; Rodrigo dos Santos Peixoto – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2012

xiii, 79 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Projeto de Graduação – UFRJ / POLI / Curso de Engenharia Ambiental, 2012

Referências Bibliográficas: p. 78-79

1.Canal do Mangue; 2. Modelo Computacional; 3.Transportes de Sedimento; 4.Porto do Rio de Janeiro; 5.Dragagem; 6.Assoreamento; 7.Baía de Guanabara; 8.Modelo Hidrossedimentológico I. Rosman, Paulo Cesar Colonna. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental. III. Estudo da Influência dos Processos Sedimentológicos do Canal do Mangue no Porto do Rio de Janeiro com Auxílio da Modelagem Computacional.

AGRADECIMENTOS – Felipe Teixeira Duarte

Agradeço primeiramente a minha família, meus Pais José Ernesto e Maria Bernarda e meu irmão Daniel, por todo apoio que me deram durante toda minha vida, me proporcionando suporte para buscar todas as oportunidades possíveis de desenvolvimento pessoal e acadêmico.

Aos meus amigos de faculdade, de camping e de todos os lugares que me proporcionaram muitos momentos de descontração, relaxamento, reflexão, aprendizagem e muita alegria, para superar sempre os obstáculos do caminho.

Ao meu parceiro de Projeto Rodrigo, que se juntou a mim nessa empreitada final, e viveu todas as dificuldades e obstáculos impostos pelo projeto no qual junto conseguimos concluir.

Agradeço à minha namorada, que me deu e dá muita motivação, não apenas para concluir essa etapa, mas também para buscar novos desafios que me façam sempre crescer ao seu lado.

Por fim e não menos importante agradeço a todos os meus professores, que às vezes eu gostando ou não sempre me passaram valiosos ensinamentos. Em especial a todos que colaboraram para esse trabalho e ao Professor Rosman pela sua orientação e oportunidade de fazer parte dos projetos de modelagem da AECO (Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica)

AGRADECIMENTOS – Rodrigo dos Santos Peixoto

Antes de mais nada devo dedicar esse trabalho aos meus pais Paulo Rubens e Valéria que durante toda a minha vida me deram apoio e orientação, me transmitindo os valores que hoje levo comigo. Além da minha irmã Thaise pelas brincadeiras e por sempre me transmitir bom humor e divertimento. Devo tudo a eles!

Agradeço também aos meus tios, primos, avós e avôs que fazem e fizeram parte da minha vida e pelos quais possuo um carinho e afeto especiais.

Não posso deixar de agradecer à Alessandra, minha namorada, amiga e companheira, que vivenciou comigo todos os momentos da minha graduação, me aturou nos momentos de estresse de fim de período, me aconselhou quando tive dúvidas sobre que decisões tomar na minha vida, e curtiu comigo todos os momentos felizes.

Agradeço muito aos amigos que adquiri, e que espero manter pro resto da vida, ao longo desses cinco anos de graduação, por todos os momentos que passamos juntos, os bons e os maus. Graças a eles os bons momentos foram muito mais abundantes, e graças a eles, os maus momentos não foram tão ruins assim.

Agradeço a todos os professores pelos ensinamentos, e em especial ao Prof^o Paulo Cesar Rosman pela orientação e pela oportunidade de me apresentar esse novo horizonte profissional, que é a modelagem computacional.

Agradeço ao meu parceiro de projeto Felipe, pela ótima convivência que tivemos ao longo desse trabalho, e pelo apoio mútuo nos momentos de dificuldade.

Finalmente, agradeço aos alunos da AECO, por sempre estarem de prontidão para ajudar em dúvidas sobre o SisBaHiA[®] e pelo ótimo relacionamento que desenvolvemos nesse período. Não posso esquecer da Marise, por sempre levar alto astral ao laboratório e se mostrar muito solícita em resolver nossos problemas.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS SEDIMENTOLÓGICOS DO CANAL DO MANGUE NO PORTO DO RIO DE JANEIRO COM AUXÍLIO DA MODELAGEM COMPUTACIONAL

Felipe Teixeira Duarte

Rodrigo dos Santos Peixoto

Agosto/2012

O porto do Rio de Janeiro, desde a época de sua construção, possui grande importância para a economia do estado do Rio de Janeiro e do Brasil, por ser um local de grande fluxo de mercadorias. Sob essa ótica, é de extrema importância que suas condições operacionais permaneçam adequadas para assegurar que a operação portuária não seja afetada. No entanto, o porto do Rio de Janeiro sofre com assoreamentos em seus canais de acesso, sendo necessário que se realizem obras de dragagem para manutenção de profundidades que permitam que navios de maiores calados tenham acesso aos cais.

Nesse contexto, o presente trabalho faz uma análise qualitativa da influência dos fenômenos de deriva de sedimentos e dos processos de erosão e assoreamento, originários do Canal do Mangue nos canais de acesso do porto.

Para isso, foram simulados dois cenários utilizando o sistema de modelagem SisBaHiA[®], de forma que assim se consiga fazer uma avaliação de todas as situações possíveis de serem encontradas.

Os resultados mostraram que a influência do Canal do Mangue na dinâmica de sedimentos no porto é insignificante em condições de vazões usuais, porém com a ocorrência de chuvas extremas na bacia hidrográfica, a descarga sólida no canal pode aumentar bastante, levando a assoreamentos consideráveis na região próxima da desembocadura do canal. A hidrodinâmica no porto tende a redistribuir, dentro de alguns dias, esses depósitos de sedimentos, fazendo com que as profundidades retornem para seus valores iniciais. No entanto, durante esse intervalo de tempo, a operação portuária pode ser afetada.

Palavras-chave: Canal do Mangue, Modelo Computacional, Transporte de Sedimentos, Porto do Rio de Janeiro, Dragagem, Assoreamento, Baía de Guanabara, Modelo Hidrossedimentológico

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Environmental Engineer.

STUDY OF THE INFLUENCE OF CANAL DO MANGUE 'S SEDIMENTOLOGICAL PROCEEDINGS IN THE PORT OF RIO DE JANEIRO THROUGH THE USE OF COMPUTER MODELING

Felipe Teixeira Duarte

Rodrigo dos Santos Peixoto

August/2012

The Port of Rio de Janeiro, since the time of its construction, has a big importance for the economy of Rio de Janeiro state and Brazil, as a place of great flow of goods. Under this view, is extremely important that their operating conditions remain appropriate to ensure that the operation in the harbor won't be affected. However, the Port of Rio de Janeiro suffers with silting on their access channels, being necessary to perform maintenance depths dredging that allow larger ships access to dock silent.

In this context, this study makes a qualitative analysis of the drift phenomena of sediments, from Canal do Mangue, and its processes of erosion and sedimentation that influence on the access channels on the harbor.

For this, two scenarios were simulated using the modeling system SisBaHiA[®], so that it's possible to make an assessment of all situations likely to be encountered.

The results showed that the influence of the Canal do Mangue in the dynamics of sediments in the harbor is insignificant in normal water flow conditions, but with the occurrence of extreme rainfall in the catchment basin, the solid discharge on the channel can significantly increase, leading to considerable silting in the region near the mouth of the channel. The hydrodynamics in the harbor tends to redistribute, within some days, these sediment deposits, causing the depths return to their initial values. However, during this time interval, the port operations can be affected.

Keywords: Canal do Mangue, Computational Model, Sediment Transport, Port of Rio de Janeiro, Dredging, Silting, Guanabara Bay, Hydrosedimentological Model

CONTEÚDO

1.	Introdução	1
1.1.	Sobre o Canal do Mangue	1
1.2.	Sobre o Porto do Rio	4
1.2.1.	Problemas de assoreamento.....	6
1.2.2.	Histórico de Dragagem.....	6
2.	Objetivo.....	9
3.	Metodologia	10
3.1.	Modelagem Computacional.....	10
3.2.	Modelo Hidrodinâmico	13
3.2.1.	Equações Governantes.....	15
3.2.1.	Condições de Contorno.....	18
3.2.2.	Condições Iniciais	18
3.3.	Modelo hidrodinâmico com fundo móvel	18
3.3.1.	Critério de mobilidade de sedimentos.....	19
3.3.2.	Vazão Sólida Potencial	21
3.3.3.	Atualização da Batimetria	23
3.3.4.	Vazão Sólida Efetiva	25
3.3.5.	Condições iniciais e de contorno.....	25
3.4.	Modelo de deriva de sedimentos finos – Transporte Lagrangeano	27
3.4.1.	Equações Governantes.....	27
3.4.2.	Processos Sedimentológicos - Transporte Condicionado	28
3.4.3.	Condições de Contorno e Iniciais	29
4.	Dados para Modelagens Hidro - Sedimentológica.....	30
4.1.	Modelo Digital do Terreno	30
4.2.	Malha de Elementos Finitos.....	32
4.3.	Batimetria.....	34
4.4.	Rugosidade	37
4.5.	Maré.....	39
4.6.	Ventos	41
4.7.	Rios da Bacia Contribuinte da Baía de Guanabara.....	47
4.8.	Aspectos Hidro - Sedimentológicos do Canal do Mangue	50
4.8.1.	Vazão Fluvial.....	50

4.8.2.	Caracterização dos sedimentos do fundo	57
4.8.3.	Cargas de sedimentos afluentes	57
5.	Resultados e Análises dos Modelos Hidro-Sedimentológicos.....	58
5.1.	Cenário de Período Crítico	60
5.1.1.	Modelo Hidrodinâmico	60
5.1.2.	Modelo Hidrodinâmico com Fundo Móvel	61
5.1.3.	Deriva de Sedimentos Finos em Suspensão.....	65
5.2.	Cenário de Ano Típico	67
5.2.1.	Modelo Hidrodinâmico	67
5.2.2.	Modelo Hidrodinâmico com Fundo Móvel	68
6.	Análise Comparativa dos Cenários.....	73
7.	Considerações Finais	75
8.	Recomendações	76
9.	Referências.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Canal do Mangue no final do século XIX, período do término das obras para sua construção. (O Rio de Antigamente, 2012)	2
Figura 2: Fotografia aérea da região do Canal do Mangue em 2009, pode-se perceber que a bacia está localizada em região densamente urbanizada. [Fonte: Google Earth®].....	2
Figura 3: Representação dos rios afluentes ao Canal do Mangue (Miguez, 2001)	3
Figura 4 - Imagem do Porto do Rio de Janeiro no Princípio do Século XX. (Companhia Docas do Rio de Janeiro, 2010)	4
Figura 5 - Vista aérea do Porto do Rio de Janeiro. (Portal Brasil, 2010).....	4
Figura 6 - Ilustração das áreas dragadas sobre a imagem de satélite da região do Porto do Rio de Janeiro.	8
Figura 7: Diagrama do processo de modelagem hidrodinâmica ambiental. A parte realçada mostra a rota mais usual, e que abrange a modelagem computacional. (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011)	12
Figura 8: Esquema dos métodos de alagamento e secamento. As espessuras das camadas equivalente de escoamento estão exageradas para facilitar a visualização (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011).	14
Figura 9: Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D & 2DH), onde NR é o nível de referência, U_i representa a velocidade promediada na vertical, utilizada no módulo 2DH. A profundidade instantânea $H = z_{sup} - z_{fundo} = \zeta + h$, também é chamada de altura da coluna d'água (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011).	15
Figura 10: Diagrama de Shields tradicional, no qual a obtenção da tensão de atrito no fundo, implica em processo iterativo, pois a velocidade de atrito aparece nos dois eixos. (Rosman, Relatório de Modelagem de Processos Sedimentológicos na Região do Canal do Mangue Porto do Rio de Janeiro - RJ, 2011)	20
Figura 11: Diagrama de Shields modificado, no qual a tensão crítica pode ser obtida diretamente das características do sedimento e da água. (Rosman, Relatório de Modelagem de Processos Sedimentológicos na Região do Canal do Mangue Porto do Rio de Janeiro - RJ, 2011)	21
Figura 12: Curvas de sedimentação pela teoria linear para granulometria uniforme e pelas formulações com taxa $KS = VSH$ e com taxa adotada no modelo $KS = -\ln(0,205) \times VSH$. (Rosman, Relatório de Modelagem de Processos Sedimentológicos na Região do Canal do Mangue Porto do Rio de Janeiro - RJ, 2011).	29
Figura 13 - Imagem da Carta Náutica 1501 – baía de Guanabara, escala 1:50.000 de 2001. (Fonte DHN).	31
Figura 14 - Mapa Base da Baía de Guanabara mostrando o domínio de modelagem.	32
Figura 15 - Malha de elementos finitos quadrangulares da Baía de Guanabara com informações sobre os nós e elementos.	33
Figura 16 - Ampliação da malha de elementos finitos para a região do Canal do Mangue - RJ.....	34
Figura 17 - Carta Náutica Barra do Rio de Janeiro nº1511, escala 1:20.000, de 2000. (Fonte DHN)	35
Figura 18 - Carta Náutica do Porto do Rio de Janeiro nº1512, escala 1:20.000, de 2000. (Fonte DHN).	35

Figura 19 – Cotas de fundo como vistas pelo modelo no domínio de modelagem. Dados de batimetria gerados a partir de Cartas Náuticas da DHN e de levantamentos na região do porto referentes às dragagens realizadas em 2010 e 2011. Dados no Canal do Mangue são inferidos.	36
Figura 20 – Ampliação na Região do Canal do Mangue das cotas de fundo vista pelo modelo no domínio de modelagem.....	37
Figura 21 – Rugosidade do fundo da Baía de Guanabara.....	38
Figura 22 - Níveis de maré na fronteira do domínio de modelagem no mar, ao longo de 30 dias.	41
Figura 23 - Gráfico da série temporal de ventos de Abril de 2011 fornecida ao modelo como dados de entrada. As setas têm módulo proporcional à velocidade do vento, que é indicada pelo padrão de cores. A direção e o sentido do vento são indicados pelas setas, relacionada à rosa de pontos cardeais.	43
Figura 24 - - Rosa dos ventos para o mês de Abril de 2011. No eixo radial, observa-se a frequência de ocorrência das direções ilustradas no rótulo. O padrão de cores representa a faixa de intensidade dos ventos medidos.	44
Figura 25 - Gráfico da série temporal de ventos de Julho de 2011 fornecida ao modelo como dados de entrada. As setas têm módulo proporcional à velocidade do vento, que é indicada pelo padrão de cores. A direção e o sentido do vento são indicados pelas setas, relacionada à rosa de pontos cardeais.	45
Figura 26 -- Rosa dos ventos para o mês de Julho de 2011. No eixo radial, observa-se a frequência de ocorrência das direções ilustradas no rótulo. O padrão de cores representa a faixa de intensidade dos ventos medidos.	46
Figura 27 - Rosa dos Ventos para o ano de 2011. No eixo radial, observa-se a frequência de ocorrência das direções ilustradas no rótulo. O padrão de cores representa a faixa de intensidade dos ventos medidos.	47
Figura 28 - Hidrogramas hipotéticos de vazões fluviais afluentes ao Canal do Mangue durante um mês com três eventos de chuvas moderadas a fortes. Em vermelho as vazões médias usuais de 3,0 m ³ /s, em azul, as vazões variáveis com eventos de chuvaradas.	51
Figura 29 - Hidrogramas hipotéticos de vazões fluviais afluentes ao Canal do Mangue durante um ano com vazões calculadas a partir de dados pluviométricos da Sub Bacia do Canal do Mangue. Em vermelho as vazões médias usuais de 3,0 m ³ /s, em azul, as vazões variáveis com eventos de chuvaradas.	52
Figura 30 – Mapa adaptado do criado pelo Instituto Pereira Passos das Sub-Bacias do Rio de Janeiro, com destaque para a Sub-Bacia do Canal do Mangue. (Prefeitura do Rio de Janeiro, 2012)	54
Figura 31 - Sub.Bacia do Canal do Mangue sub dividida em áreas de influencia dos postos pluviométricos de acordo com o método de Thiessen.	54
Figura 32 - Ampliação do Mapa base nas cercanias do canal do mangue, com a inclusão dos postos de observação inseridos no modelo computacional.	59
Figura 33 - Ocorrência de tensões no fundo com valores suficientes para mobilizar sedimentos como areia muito fina de diâmetro mediano d50 = 0,1mm, considerando o Canal do Mangue com vazões de cheia, conforme hidrograma hipotético de período crítico.....	61

Figura 34 - Alturas de erosão e assoreamento nas cercanias do Canal do Mangue no Porto do Rio de Janeiro, no instante posterior à vazão de pico do hidrograma para o cenário de período crítico, apresentada na Figura 28.	62
Figura 35 - Altura de Assoreamento nas Cercanias do Canal do Mangue - RJ, para cada posto de observação adotado no modelo conforme Figura 32. Considerando o cenário de período crítico.	64
Figura 36 - Descarga sólida de areia fina, $d_{50} = 0.1\text{mm}$, correspondendo ao cenário de hidrograma crítico, passando pela seção de montante de referência, a cerca de 1 km da desembocadura.	64
Figura 37 - Concentrações de sedimentos finos em suspensão, siltes e argilas, correspondendo aos hidrogramas hipotéticos do cenário com período crítico, passando pela seção de montante de referência, a cerca de 1 km da desembocadura.	65
Figura 38 - Mapa de isolinhas de alturas de deposição primária de sedimentos finos em suspensão, siltes e argilas, oriundos do Canal do Mangue. Resultado após o período do cenário crítico, tendo a montante do Canal as vazões e concentrações de tal cenário.	66
Figura 39 - Ocorrência de tensões no fundo com valores suficientes para mobilizar sedimentos como areia muito fina de diâmetro mediano $d_{50} = 0,1\text{mm}$, considerando o Canal do Mangue com vazões de cheia, conforme hidrograma hipotético de ano típico.	68
Figura 40 - Alturas de erosão e assoreamento nas cercanias do Canal do Mangue no Porto do Rio de Janeiro, no instante posterior à vazão de pico do hidrograma hipotético do ano típico, apresentado na Figura 29, e no instante final do cenário.	69
Figura 41 - Altura de Assoreamento e Erosão nas cercanias do Canal do Mangue - RJ, para cada posto de observação adotado no modelo conforme Figura 32. Considerando o cenário de ano Típico.	70
Figura 42 - Altura de Assoreamento e Erosão nos canais de acesso do Porto do Rio de Janeiro, para cada posto de observação adotado no modelo conforme Figura 32. Considerando o cenário de ano Típico.	71
Figura 43 – Descargas sólidas de areia fina, $d_{50} = 0.1\text{mm}$, correspondendo ao cenário de ano Típico, passando pela seção de montante de referência, a cerca de 1 km da desembocadura.	72
Figura 44 - Destaque das descargas sólidas de areias fina, $d_{50} = 0,1\text{ mm}$, para o maior período de chuva do cenário de ano Típico, passando pela seção de montante de referência, a cerca de 1 km da desembocadura.	72
Figura 45 - Comparativo dos cenários estudados quanto à ocorrência de tensões no fundo com valores suficientes para mobilizar sedimentos como areia muito fina de diâmetro mediano $d_{50} = 0,1\text{mm}$	73
Figura 46 - Comparativo das alturas de assoreamento na Desembocadura do Canal do Mangue em Abril.	74
Figura 47 - Comparativo das Descargas Sólidas a Montante do Canal do Mangue em Abril.	75
Figura 48 - Campos de controle e monitoramento das características morfológicas e sedimentológicas recomendados, com a área do canal do mangue em amarelo, do campo próximo em azul e do campo afastado em verde.	78

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Dragagens Executadas No Porto Do Rio De Janeiro Período: 1967 a 1973	6
Tabela 2 - Identificação das áreas onde foram realizadas obras de dragagem entre fevereiro de 2010 e outubro de 2011, com as profundidades e larguras medias destes canais aquaviários.	8
Tabela 3: Quadro explicativo dos termos que compõem as equações do módulo 2DH. Adaptado de: (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011).	16
Tabela 4 - Constantes harmônicas na fronteira de mar do domínio de modelagem, ordenadas pela significância da amplitude.	40
Tabela 5 - Dados da estação SBGL - INFRAERO	42
Tabela 6 -. Valores de Precipitação Total para todos os meses do ano de 1990, para Estação do Rio de Janeiro.	48
Tabela 7 - Valores de C em função das características da bacia.	49
Tabela 8 - Áreas de drenagem dos rios considerados e suas vazões médias.	49
Tabela 9 - Coordenadas das Estações Pluviométricas, do Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro, pertinentes a Sub-Bacia do Canal do Mangue.	53
Tabela 10 - Pluviosidade registrada, para o mês de abril de 2011, por cada posto pluviométrico influente na Sub-Bacia do Canal do Mangue.....	53
Tabela 11 - Áreas de Influência dos Postos Pluviométricos delimitadas pelo método de Thiessen.	55
Tabela 12 - Estimativas para o mês de abril de 2011, para pluviosidade média, intensidade de chuva e vazão afluente no canal do mangue.	56
Tabela 13 - Coordenadas dos Postos de Observação inseridos no modelo Computacional.	58

1. Introdução

O porto do Rio de Janeiro estabelecido na costa ocidental da Baía de Guanabara apresenta grande importância para a economia do Estado, sendo ponto estratégico para chegadas de produtos e de turistas para a cidade do Rio de Janeiro.

Assim como em diversos portos pelo mundo, ele sofre com assoreamentos em seus canais de acesso aos cais, necessitando assim de obras de dragagem para a manutenção de suas capacidades máximas de utilização.

Como o Estudo de Impacto Ambiental elaborado em 2002 para o Projeto de Dragagem do Canal de Acesso e das Bacias de Evolução dos Terminais do Porto do Rio de Janeiro e de Niterói, identificou o Canal do Mangue como principal causador de assoreamento nesse porto, existe a necessidade de verificar a sua real importância e como ocorrem tais processos sedimentológicos nas imediações deste.

1.1. Sobre o Canal do Mangue

Em 1835, o governo imperial resolveu acabar com um extenso manguezal, formado por diversos rios, que se estendia da atual Ponte dos Marinheiros até a Praça Onze, pois sua localização atrapalhava o deslocamento para diferentes regiões da cidade, além de estar se tornando um foco de proliferação de vetores de doenças e exalação de odores desagradáveis.

A solução encontrada pelo império, foi a construção de um canal, chamado de Canal do Mangue, que recebesse as águas dos rios da bacia e as águas pluviais, fazendo-as escoarem até a baía de Guanabara.



Figura 1: Canal do Mangue no final do século XIX, período do término das obras para sua construção. (O Rio de Antigamente, 2012)

Atualmente, com o desenvolvimento econômico da região e a ocupação desordenada do espaço, a bacia do Canal do Mangue sofre com problemas de inundações em épocas de verão, quando ocorrem as maiores chuvas no Rio de Janeiro, além de os rios contribuintes receberem o aporte de descargas de esgotos sem o devido tratamento, fazendo com que a qualidade da água dos rios na bacia fique comprometida.



Figura 2: Fotografia aérea da região do Canal do Mangue em 2009, pode-se perceber que a bacia está localizada em região densamente urbanizada. [Fonte: Google Earth®]

Na Figura 3 estão representados os principais rios da bacia, afluentes ao canal do mangue: Rio Maracanã, Rio Joana, Rio Papa-Couve, Rio Comprido e Rio Trapicheiros.

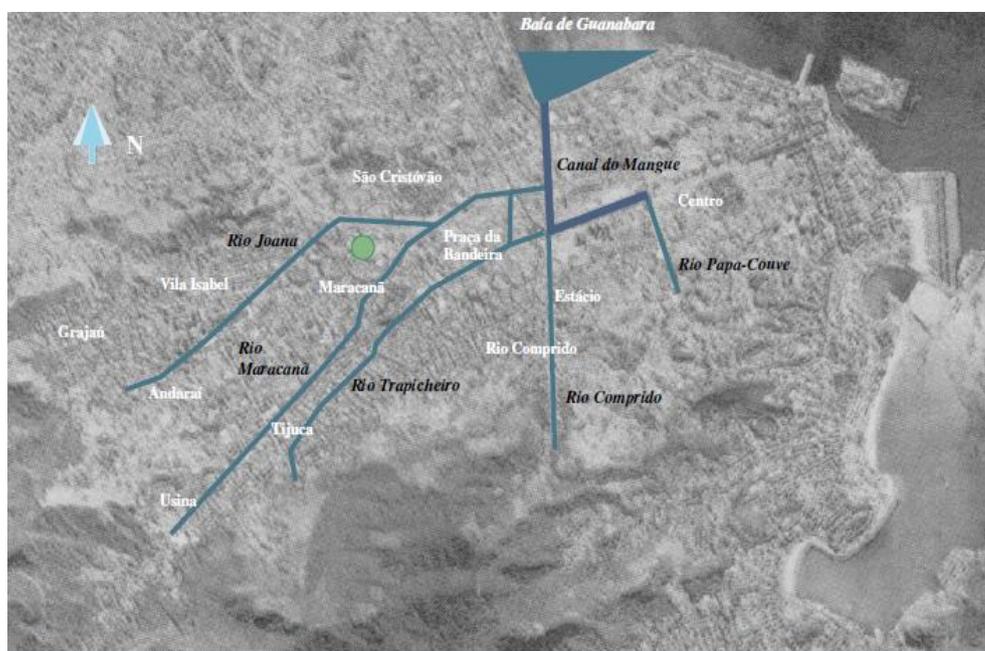


Figura 3: Representação dos rios afluentes ao Canal do Mangue (Miguez, 2001)

Por serem, na maior parte, canalizados os rios da bacia, é certo que a vazão de sedimentos no Canal do Mangue seja irrisória em períodos sem chuvas, embora não se tenha dados a esse respeito. No entanto, em épocas de grandes chuvas essa vazão pode aumentar significativamente, devido ao aumento da vazão líquida nos rios da bacia e pela carga de *wash-load*.

A bacia do Canal do Mangue possui área de drenagem com cerca de 44,6 km², correspondendo a aproximadamente 1% do total da área continental de contribuição à Baía de Guanabara. Seu perímetro é da ordem de 32,9 km e sua altitude máxima, localizada no Maciço da Tijuca, atinge 826 m. (Consócio Ecologus-Agrar, 2003/2006)

Apresentam-se a seguir, parâmetros de caracterização da unidade hidrográfica (Consócio Ecologus-Agrar, 2003/2006):

- Índice de Compacidade: 1,377
- Índice de Forma: 0,366
- Declividade Média (m/km): 61,629
- Coeficiente Médio de Escoamento: 0,65

1.2. Sobre o Porto do Rio

O porto do Rio de Janeiro tem sido usado desde a época do descobrimento do Brasil. As instalações portuárias evoluíram ao longo dos anos, em função do desenvolvimento do transporte marítimo. Da mesma forma evoluíram as intervenções que se fizeram necessárias para dar ao porto o formato adequado para atender a essas demandas.



Figura 4 - Imagem do Porto do Rio de Janeiro no Princípio do Século XX. (Companhia Docas do Rio de Janeiro, 2010)



Figura 5 - Vista aérea do Porto do Rio de Janeiro. (Portal Brasil, 2010)

Em 1903 o governo federal comprou a Empresa Industrial de Melhoramentos do Brasil, do Eng. Paulo de Frontin, que havia recebido em 1890 a concessão para a construção de um cais de atracação para grandes navios na Saúde e na Gamboa e já havia construído 160 m de cais e a partir daí empreendeu a construção do porto através de contrato firmado com a empresa inglesa C.H.Walker & Company Limited. Rodrigues Alves já havia levantado junto aos banqueiros da praça de Londres 8.500.000 libras.

O projeto da Comissão das obras do porto previa a ocupação de todo o trecho do litoral da cidade entre o Arsenal de Marinha e a embocadura do Canal do Mangue. Seria inicialmente construído um cais corrido de 3.500 m de extensão para atracação de navios de grande calado neste trecho. Os 2000 metros restantes entre o Mangue e a Ponta do Caju seriam objeto de concessão posterior.

Um primeiro trecho do cais do porto denominado Cais da Gamboa é iniciado em 1904 e concluído em 1906. Foi utilizado para o aterro material dragado da baía e procedente do desmonte dos morros do Senado (parte final) e do Castelo (trecho retirado para a construção da Avenida Central). Desaparecem com este trecho de aterros, parte da Baía e as ilhas do Melão e das Moças.

A conclusão do cais da Gamboa, da Praça Mauá até o Canal do Mangue, numa extensão de 2.500 metros só se dá em 1910. Sendo aterrado neste trecho uma superfície de 175.000 m² que se somaria a aterros anteriores. Ao longo do aterro é construída a Av. Rodrigues Alves e são instalados 18 armazéns internos, 96 armazéns externos, voltados para a importação e exportação além de 90 guindastes elétricos.

Em 1907 é aprovada a extensão do cais do Porto entre o Canal do Mangue e o Caju que, no entanto, só tem as obras iniciadas em 1924 e concluídas em 1932. Com o nome de Cais de São Cristóvão, este trecho do cais do Porto, com a extensão de 2.000 metros, receberia a Av. Rio de Janeiro.

Posteriormente, completando o sistema portuário, seria ainda construído no período 1949-1952 o píer da Praça Mauá, com um aterro de 33.200m², distribuído numa projeção em direção à baía com as dimensões de 400x82 metros; no ano de 1962 o cais do Caju ou Cais dos Minérios, um prolongamento sobre aterro, da Ponta do Caju, por sob a Ponte Rio Niterói. Recentemente seriam ainda executados novos aterros e novas projeções. (Companhia Docas do Rio de Janeiro, 2002)

Atualmente, o sistema portuário do Rio de Janeiro é gerido pela Companhia Docas do Rio de Janeiro, criado em 1973 sob a razão social de Companhia Docas da Guanabara e alterado em 1975 para o nome atual.

1.2.1. Problemas de assoreamento

As principais causas do assoreamento das bacias de evolução e canal de acesso do Porto do Rio de Janeiro são devidas ao lançamento de material pelo Canal do Mangue. Não existem estudos a respeito da taxa de assoreamento do porto, entretanto, com base nas últimas dragagens realizadas e nos levantamentos batimétricos desenvolvidos ao longo do ano de 2001, pode ser estimado como quantidade anual de assoreamento um volume da ordem de 500.000 m³.

Da análise dos levantamentos batimétricos, verifica-se que o canal de acesso ao Caju oferece, atualmente, passagem permanente para navios que calem até 12,5 metros, numa largura de 150 metros. Por outro lado, intenso assoreamento observado no canal entre os armazéns 13 e 18, vem reduzindo as profundidades daquele trecho, passagem obrigatória dos navios que se destinam ao Cais de São Cristóvão. (Companhia Docas do Rio de Janeiro, 2002)

1.2.2. Histórico de Dragagem

O histórico das dragagens realizadas no Porto do Rio de Janeiro mostra a necessidade de obras de manutenção permanente. A seguir seguem as dragagens realizadas até o ano de 2011.

Até 1973

De 1967 a 1973 foram realizadas as dragagens constantes da Tabela 1.

Tabela 1 - Dragagens Executadas No Porto Do Rio De Janeiro Período: 1967 a 1973 (Adaptado de: Companhia Docas do Rio de Janeiro, 2002)

Local	Largura (m)	Cota (m)	Volume (m ³)	Período
Cais da Gamboa	250	8.0	684.277	Abril a Setembro de 1967
Cais de São Cristóvão	250	9.0	530.454	Fevereiro de 1967 a julho de 1968
Cais de São Cristóvão	250	9.0	343.900	Maio a agosto de 1972
Caju	200	12.0	107.000	Agosto a setembro de 1972
Cais de inflamáveis	200	6.0	263.900	Outubro de 1972 a janeiro de 1973
Cais de inflamáveis	-	7.0	160.000	Julho a setembro de 1973
Em frente ao armazém nº 9	-	7.0	160.000	Outubro de 1973

De 1974 A 1978

Nos últimos anos foram realizadas as seguintes dragagens no Porto do Rio de Janeiro:

1974 - Dragagem de manutenção no Cais da Gamboa num volume total de 38.350m³ (medição na cisterna dos batelões) durante o mês de dezembro pela draga de alcatruzes Brasília, tendo sido dragados lodo e argila mole e média.

1975 - Dragagem de manutenção nos Cais da Gamboa, São Cristóvão e Caju para um volume total de 1.044.255m³ (medição nas cisternas dos batelões) de Janeiro a Dezembro, sendo utilizadas as dragas de alcatruzes Brasília e Europa, que dragaram lodo e argila mole e média.

1976 - Dragagem de manutenção, nos cais da Gamboa, São Cristóvão, Caju e Píer da Praça Mauá, para um volume total de 481.020m³ (medição nas cisternas das batelões), de Janeiro a Junho, sendo utilizadas as dragas de alcatruzes Brasília e Olinda que dragaram lodo e argila mole e média.

1977 - Dragagem para retificação do canal de acesso à Baía de Guanabara entre a Ilha de Cotunduba e a Pedra do Pão de Açúcar, num volume total de 800.000m³ (medição "in situ") de Janeiro a Março, sendo utilizada a draga autotransportadora Macapá que dragou areia.

1978 - Dragagem de manutenção para retirada de material acumulado junto à estrutura dos cais de São Cristóvão, Gamboa e Píer da Pça. Mauá, numa faixa de 10m de largura, para o volume total de 95.000m³ (medição nas cisternas) de Janeiro a Julho, sendo utilizada uma escavadeira Link Belt sobre flutuante, que, além da retirada de corpos estranhos diversos, dragou lodo e argila mole.

Dragagem Realizada em 2010-2011

A dragagem do Porto do Rio de Janeiro foi uma das obras da Secretaria de Portos (SEP) previstas no Programa Nacional de Dragagem (PND) e fez parte do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC). Autorizada pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA) através da LI nº IN000178, AVB 000884, a dragagem do Porto do Rio de Janeiro iniciada em fevereiro de 2010, foi concluída em setembro de 2011.

As obras foram realizadas nos canais de acesso aquaviários do Porto do Rio de Janeiro, e assim definidas diferentes áreas de dragagem como explicitado na Tabela 2, onde define-se onde são tais áreas e suas profundidades e larguras medias. A Figura 6 ilustra em imagem de satélite a localização das áreas a serem dragadas.

Tabela 2 - Identificação das áreas onde foram realizadas obras de dragagem entre fevereiro de 2010 e outubro de 2011, com as profundidades e larguras medias destes canais aquaviários. (Adaptado de: AECO - Área de Engenharia Costeira e Oceânica, 2011)

Localização	Identificação	Profundidade	Largura
Canal do Cais de Containeres	Área 1	15.5	120
Canal do Cais de Ro-Ro	Área 2	13.0	140
Canal do Cais de São Cristóvão	Área 3	10	130
Berço do Cais de Passageiros	Área 3A	10	50
Canal do Cais da Gamboa	Área 4	11.5	100



Figura 6 - Ilustração das áreas dragadas sobre a imagem de satélite da região do Porto do Rio de Janeiro. (Fonte: AECO - Área de Engenharia Costeira e Oceânica, 2011)

As obras com o intuito de aumentar a capacidade de movimentação de carga do porto, retiraram um volume de 3,9 milhões de m³ de sedimentos dos canais interno e externo, bacias de evolução e berços de atracação dos cais da Gamboa, de São Cristovão e do Caju, aumentou a profundidade, em alguns trechos, de treze para quinze metros. Assim nos terminais de contêineres tornou-se possível o tráfego de navios de capacidade de até oito mil TEU¹s.

De acordo com o EIA, uma vez efetuada a dragagem prevista pode-se estimar em 500.000m³ o volume anual de dragagem necessária à manutenção das profundidades de projeto do porto.

2. Objetivo

Os objetivos do presente trabalho incluem:

Utilizar a modelagem computacional para analisar e avaliar a circulação hidrodinâmica, processos sedimentológicos e evolução morfodinâmica na região de desembocadura do canal do mangue no Porto do Rio de Janeiro, RJ.

Mostrar a viabilidade de utilização de modelos computacionais como ferramentas de assistência à tomada de decisão quanto à realização de dragagens a serem realizadas na região de interesse.

Serão analisados dois cenários distintos,

- Período curto, quatro meses, onde durante um mês serão impostas condições críticas de escoamento superficial no canal do mangue e posterior período de escoamento típico para assim analisar o comportamento hidrodinâmico e morfodinâmico da região de estudo.
- Período longo, onde será analisado um período alguns anos, com condições de vazão típicas para o canal do mangue, assim mostrando uso da modelagem em assistir tomadas de decisão em dragagens.

¹ Um TEU equivale a um contêiner de 20 pés.

Este trabalho apresenta modelagens apenas de caráter qualitativo, uma vez que se encontra limitado pela pouca existência de dados. Assim, também serão sugeridas campanhas de campo necessárias para alimentar a base de dados dos modelos e permitir a calibração do sistema de modelagem, para futuras simulações de prognósticos quantitativos.

3. Metodologia

Para alcançar os objetivos almejados, optou-se por fazer simulações de diferentes cenários e condições ambientais, como mencionado anteriormente. As simulações serão realizadas através do uso de modelos computacionais, sejam eles (i) modelo da circulação hidrodinâmica, (ii) modelo hidrodinâmico com fundo móvel – evolução morfodinâmica (iii) modelo de deriva de sedimentos finos.

O modelo computacional utilizado para o desenvolvimento desse estudo foi o SisBaHiA® – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, este é um sistema profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação COPPETEC, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do COPPE/UFRJ - Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

O conteúdo deste tópico é uma adaptação da Referência Técnica do SisBaHiA®, que pode ser acessada em www.sisbahia.coppe.ufrj.br.

3.1. Modelagem Computacional

O processo de modelagem, de uma forma geral, é composto de várias etapas - como mostrado na Figura 7 - sendo que a primeira delas é a formação do modelo conceptual, que se caracteriza pelo entendimento, por parte do modelador, de todos os processos físicos relevantes, atuantes no fenômeno de interesse, e de suas interações. Assim, o modelo conceptual é o primeiro e mais fundamental dos modelos (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011). O passo seguinte seria descrever tais fenômenos físicos - modelo conceptual - através de equações matemáticas para posteriormente serem resolvidas. A essa etapa dá-se o nome de modelagem matemática.

Existem 4 métodos de resolução dos modelos matemáticos (Machado & Da Silva, 2010): analítico, analógico, físico, e numérico. As soluções analíticas são de difícil aplicação, pois muitas das equações matemáticas que descrevem um determinado fenômeno não possuem solução, a menos que simplificações sejam feitas, e daí só se tornam aplicáveis a situações muito peculiares, que geralmente não se observam em ambientes naturais. O mesmo acontece aos modelos analógicos, que também só servem para representar situações teóricas e de pouca aplicação prática (De Paula, 2009).

Os modelos físicos consistem em reproduzir o fenômeno de interesse em escala reduzida. Esses têm boa aplicação quando o fenômeno de interesse não possui tanta complexidade. Quando se trata de fenômenos de grande escala, sua reprodução pode se tornar muito dispendiosa. A outra resolução seria através de modelos numéricos, que transformam as equações analíticas do modelo matemático em equações numéricas, fazendo com que as variáveis contínuas se tornem variáveis discretas, de mais fácil operação.

O inconveniente da modelagem numérica é a geração de uma quantidade muito grande de contas e informações, que só foi possível de ser contornado com o advento da computação, tornando viável a solução numérica de uma gama de problemas muitíssimo mais abrangente que qualquer outra modalidade de modelos (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011).

No entanto, para garantir a confiabilidade do modelo, é extremamente importante que sejam feitas coletas de todos os dados necessários e de forma precisa, de modo que o resultado apresentado pelo modelo não fuja da realidade. Também é de suma importância que haja a calibração dos modelos computacionais, pois esta consiste justamente em ajustes dos parâmetros do modelo, de forma a fazer com que seus resultados se aproximem o máximo possível das medições feitas em campo. Logo, é importante ressaltar que um modelo é, no máximo, tão bom quanto os dados que o alimentam (De Sousa e Silva, 2011).

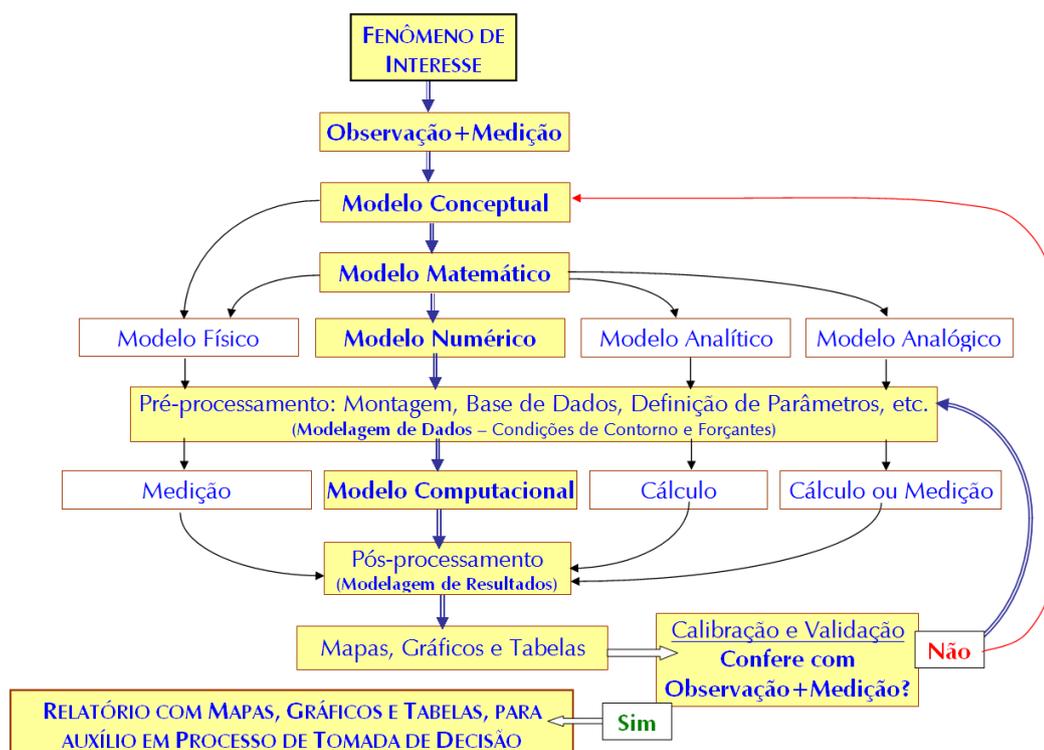


Figura 7: Diagrama do processo de modelagem hidrodinâmica ambiental. A parte realçada mostra a rota mais usual, e que abrange a modelagem computacional. (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011)

De uma forma geral, a modelagem computacional permite (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011):

- Em análises de diagnóstico:
 - Otimização de custos de monitoramento e medição integrando informações espacialmente dispersas, geralmente obtidas em estações pontuais de medição;
 - Estender o conhecimento para regiões nas quais não há medições: somente através de modelos tem-se efetivamente um modo consistente de interpolar e extrapolar medições, viabilizando um conhecimento amplo da região de interesse, minimizando e otimizando o monitoramento de variáveis ambientais;
 - Entender processos dinâmicos, ajudando na interpretação de medições feitas em estações pontuais.

- Em análises de prognóstico:
 - Prever situações simulando cenários para estudos e projetos;
 - Indispensável para Licenciamento Ambiental: mapeamento de áreas de risco, determinação de destinos prováveis de contaminantes, etc;
 - Fundamental para Planos de Emergência, e definição de estratégias de ação em caso de acidentes com derrame de contaminantes por exemplo;
 - Fundamental na elaboração de Planos de Mitigação;
 - Prever evolução de eventos em tempo real.

3.2. Modelo Hidrodinâmico

O modelo hidrodinâmico implementado no SisBaHiA[®] é um modelo 3D da linhagem FIST (*Filtered in Space and Time*). Trata-se de um modelo numérico bastante eficiente para escoamentos homogêneos e de grande escala. Tal modelo é composto por dois módulos (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA[®], 2011):

- Um módulo 2DH, que é promediado na vertical ou bidimensional na horizontal, no qual os valores de elevação da superfície livre e das velocidades de corrente que o modelo adota são valores médios na coluna d'água. O modelo FIST3D sempre calcula esse módulo;
- Um módulo 3D que calcula o campo de velocidades através de duas opções possíveis. Em uma delas, o modelo é totalmente numérico, acoplado a uma módulo 2DH. A outra opção trata-se de um modelo 3D analítico-numérico para se obter os perfis de velocidade no campo de escoamento horizontal.

Neste trabalho o estudo foi realizado utilizando o módulo promediado na vertical (2DH).

Além disso, no SisBaHiA[®], pode-se optar por fazer a modelagem com ou sem áreas que podem sofrer alagamento e secamento em função da variação no nível da água. Existem três métodos que consideram situações diferentes (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA[®], 2011):

- MRP - Método Rugoso-Poroso;
- MMP - Método de Meio Poroso;
- MFS - Método do Filme Superficial.

Na Figura 8 os três métodos estão esquematizados. Os dois primeiros métodos são similares, pois consideram que existe uma faixa de meio poroso abaixo da superfície do terreno, ou do fundo quando coberto de água, através do qual ocorre um fluxo restrito de água, porém não se trata de uma simulação de escoamento em meio poroso propriamente, mas um efeito equivalente, na qual a água que estaria distribuída em toda a espessura do meio poroso é forçada a escoar por uma camada equivalente com pequena espessura e grande rugosidade.

No MRP - método adotado neste trabalho - um dado local é afetado por efeitos de escoamento sub-superficial apenas quando a altura da coluna de água acima do fundo for inferior à espessura da camada de escoamento equivalente no meio poroso, e só ocorre fluxo em toda a espessura rugosa-porosa quando a cota do NA estiver abaixo da cota do terreno. No MMP, a camada equivalente de escoamento restrito está sempre plenamente presente e é adicionado ao escoamento no meio fluido existente em locais em que o NA está acima da cota do fundo. Já no MFS, a superfície livre "cola" no terreno em locais em que o NA da superfície livre esteja abaixo da cota do terreno, considerando que as velocidades são nulas em tais pontos (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011).

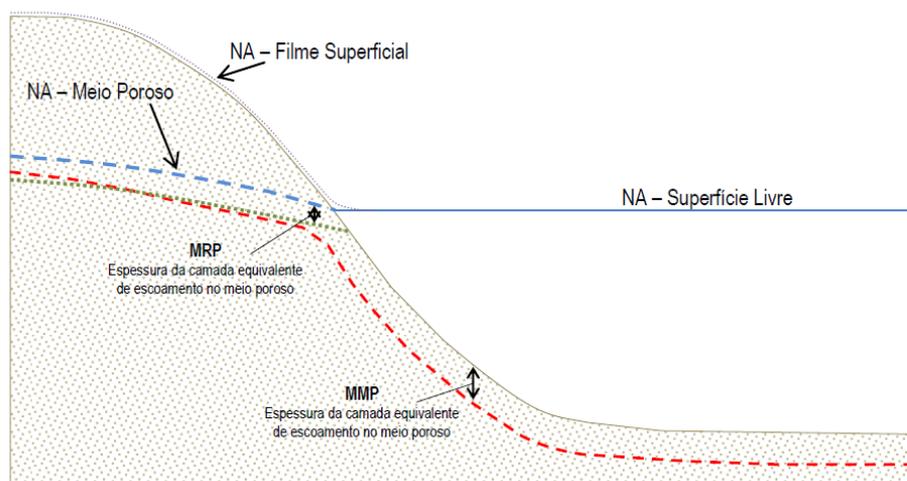


Figura 8: Esquema dos métodos de alagamento e secamento. As espessuras das camadas equivalente de escoamento estão exageradas para facilitar a visualização (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011).

3.2.1. Equações Governantes

O sistema de coordenadas adotado pelo SisBaHiA®, tanto para o modelo 3D quanto para o 2DH é mostrado na Figura 9.

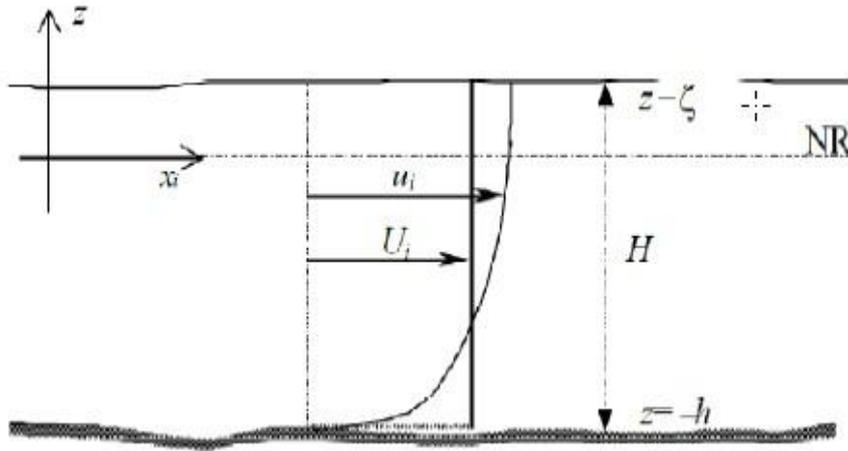


Figura 9: Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D & 2DH), onde NR é o nível de referência, U_i representa a velocidade promediada na vertical, utilizada no módulo 2DH. A profundidade instantânea $H = z_{\text{sup}} - z_{\text{fundo}} = \zeta + h$, também é chamada de altura da coluna d'água (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011).

O módulo 2DH do FIST3D determina as componentes das velocidades médias na vertical, $U(x,y,t)$ na direção x , e $V(x,y,t)$ na direção y , e as elevações da superfície livre, $z = \zeta(x,y,t)$, a cada passo de tempo. Dessa forma, é necessário que se tenha pelo menos três equações para se determinar essas incógnitas. São as equações de quantidade de movimento 2DH nas direções x e y , e a equação da continuidade do volume integrada na vertical. Essas equações estão representadas a seguir (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011).

1. Equação da quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção x :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial (H \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (H \tau_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S - \tau_x^B) + 2\phi \cdot \text{sen} \theta \cdot V - \frac{U}{H} \sum q \quad (1)$$

2. Equação da quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção y :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial (H \tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (H \tau_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^S - \tau_y^B) + 2\phi \cdot \text{sen} \theta \cdot U - \frac{V}{H} \sum q \quad (2)$$

3. Equação da continuidade do volume integrada ao longo da vertical:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \sum q \quad (3)$$

Na Tabela 3 está explicado com maiores detalhes o significado de cada um dos termos das equações.

Tabela 3: Quadro explicativo dos termos que compõem as equações do módulo 2DH. (Adaptado de: Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011).

$\frac{\partial U}{\partial t}$	Representa a aceleração local do escoamento 2DH, isto é, em uma dada posição, a taxa de variação temporal da quantidade de movimento média na vertical por unidade de massa. Em escoamentos permanentes, esse termo é igual a zero.
$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y}$	Representa a aceleração advectiva do escoamento 2DH, isto é, em um determinado instante, representam o balanço dos fluxos advectivos médios na vertical, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção x, por unidade de massa. Em escoamentos uniformes, esses termos são iguais a zero.
$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$	Representa a variação da pressão hidrostática na direção x (gradiente de pressão), devido à declividade da superfície livre na direção x. Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força escoamentos de lugares onde o nível de água é mais alto para onde o nível de água é mais baixo.
$\frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial (H\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (H\tau_{xy})}{\partial y} \right)$	Representa a resultante das tensões dinâmicas turbulentas 2DH no escoamento, isto é, em um determinado instante, representa o balanço dos fluxos difusivos médios na vertical, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção x, por unidade de massa. Esses termos são responsáveis, por exemplo, pela geração de vórtices horizontais em zonas de recirculação.
$2\phi \cdot \text{sen}\theta \cdot V$	Representa a aceleração de Coriolis decorrente de o referencial estar se movendo com a rotação da Terra. Esse termo é irrisório próximo ao equador, isto é, em baixas latitudes, e pouco relevante em corpos de água relativamente pequenos como a Baía de Guanabara.
$\frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S)$	Representa a tensão do vento na superfície livre por unidade de massa. Se o vento estiver na mesma direção do escoamento, esse termo irá acelerar o escoamento; se estiver oposto, irá retardar o escoamento.
$-\frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^B)$	Representa a tensão de atrito no fundo atuante no escoamento 2DH por unidade de massa. Conforme indicado pelo sinal negativo, esse termo sempre tende a desacelerar o escoamento. É sempre oposto ao escoamento.

$\frac{U}{H} \sum q = \frac{U}{H} (q_P - q_E + q_I)$	Representa efeitos na quantidade de movimento devidos a variações de massa em função dos fluxos, por unidade de área, de precipitação q_P , evaporação q_E , e infiltração q_I .
--	--

Além disso, existe a determinação das tensões de atrito no fundo e das tensões de atrito devido ao vento na superfície livre, τ^B e τ^S , respectivamente. As equações que definem tais grandezas estão descritas a seguir:

4. Equação da tensão de atrito na superfície livre devido ao vento:

$$\tau_i^S = \rho_{ar} \cdot C_D \cdot W_{10}^2 \cdot \cos \varphi_i \quad (4)$$

onde ρ_{ar} é a massa específica do ar; C_D é o coeficiente de arraste do vento, determinado em função da velocidade do vento W_{10} , medida a dez metros da superfície livre; e φ_i é o ângulo entre o vetor velocidade e a direção x_i .

5. Equação da tensão de atrito no fundo:

$$\tau_i^B = \rho_0 \cdot \beta \cdot U_i \quad (5)$$

onde ρ_0 é a massa específica da água; U_i é a velocidade média na coluna d'água e β , no caso do modelo 2DH, como foi utilizado no estudo, será:

6. Parâmetro β da equação de atrito no fundo:

$$\beta = \frac{g}{C_h^2} \cdot \sqrt{U^2 + V^2} \quad (6)$$

Na equação acima, C_h é o coeficiente de Chézy, dado pela seguinte expressão:

7. Coeficiente de Chézy:

$$C_h = 18 \cdot \log_{10} \frac{6H}{\varepsilon} \quad (7)$$

onde ε é o parâmetro de rugosidade no fundo.

No entanto, para que o modelo consiga resolver as equações acima descritas, é necessário que condições iniciais e de contorno sejam conhecidas.

3.2.1. Condições de Contorno

As condições de contorno consideradas podem ser verticais ou horizontais, sendo que as condições de contorno horizontais podem ser de dois tipos: de terra ou abertos. Os contornos de terra caracterizam as margens do corpo d'água no domínio, incluindo afluentes e captações. A fronteira aberta representa o limite do domínio de modelagem, não sendo uma limitação física, mas sim do modelo. Suas condições são caracterizadas pela elevação da superfície livre.

As condições de contorno verticais são a velocidade nula no fundo e a tensão de atrito do vento na superfície livre, calculada a partir das velocidades de vento inseridas. (Machado & Da Silva, 2010)

3.2.2. Condições Iniciais

No caso das condições iniciais, para que o programa calcule a variação dos parâmetros analisados, é preciso fornecer primeiramente estas condições para que sejam realizadas as interpolações e extrapolações pertinentes. Assim, o modelador deve informar, para o instante inicial de simulação, os valores de elevação da superfície livre ζ e as componentes da velocidade 2DH, U e V para todos os nós do domínio modelado. (Sampaio, 2003 apud Machado & Da Silva, 2010)

3.3. Modelo hidrodinâmico com fundo móvel

Na natureza os processos hidrodinâmicos e os sedimentológicos em um corpo d'água são retroalimentativos, ou seja, os agentes hidrodinâmicos provocam alterações na batimetria (processos sedimentológicos), que por sua vez causa variações nas correntes e padrões de circulação. Portanto, para que tal efeito pudesse ser reproduzido, optou-se por usar o modelo de transporte de sedimentos acoplado com o modelo hidrodinâmico.

No SisBaHiA[®], o modelo hidrodinâmico com fundo móvel faz o balanço de massa de sedimentos no fundo, calculando ao longo do tempo o transporte de sedimentos devido à ação dos agentes hidrodinâmicos.

Ao longo do tempo, a superfície do fundo $S_F \equiv z + h(x, y, t) = 0$, vai se alterando já que h torna-se variável no tempo. Deste modo, é possível fazer uma avaliação da evolução morfológica no domínio de modelagem e quantificar taxas de erosão e assoreamento. (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA[®], 2011)

3.3.1. Critério de mobilidade de sedimentos

Para uma determinada granulometria de sedimentos no leito, o processo de erosão e transporte, bem como de assoreamento, depende da *tensão crítica de mobilidade*, τ_c . Valores da tensão de arrasto no leito, τ_0 , acima deste valor crítico podem promover a erosão e transporte de grãos enquanto que, para valores inferiores a esta tensão, os grãos permanecem imóveis, ou, se em movimento, tenderão a depositar. (Rosman, Relatório de Modelagem de Processos Sedimentológicos na Região do Canal do Manguê Porto do Rio de Janeiro - RJ, 2011)

No caso de sedimentos predominantemente arenosos, o critério de mobilidade empregado baseia-se no parâmetro de Shields, Ψ , que tem a seguinte expressão:

$$\Psi = \frac{u_*^2}{g(S_s-1)d} = \frac{\tau_0}{\gamma_a(S_s-1)d} ; S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_a} ; R_* = \frac{du_*}{\nu} \quad (8)$$

onde:

τ_0 = tensão de arrasto no leito

γ_s = peso específico do grão

γ_a = peso específico da água

g = aceleração da gravidade

d = diâmetro do grão

u_* = velocidade de atrito no leito

R_* = número de Reynolds do grão

A aplicação do critério de transporte de sedimentos baseado no parâmetro de Shields consiste na comparação entre a tensão de arrasto no fundo, τ_0 , causada pelos agentes hidrodinâmicos em um dado local, e a tensão crítica de mobilidade para os sedimentos do mesmo local, τ_c . Assim, se τ_0 for maior que τ_c admite-se que os sedimentos no local são mobilizados e transportados pelas correntes, caso contrário, os sedimentos permanecem em repouso ou tendem a depositar se estiverem sendo transportados. Na Figura 10 é representado o diagrama de Shields.

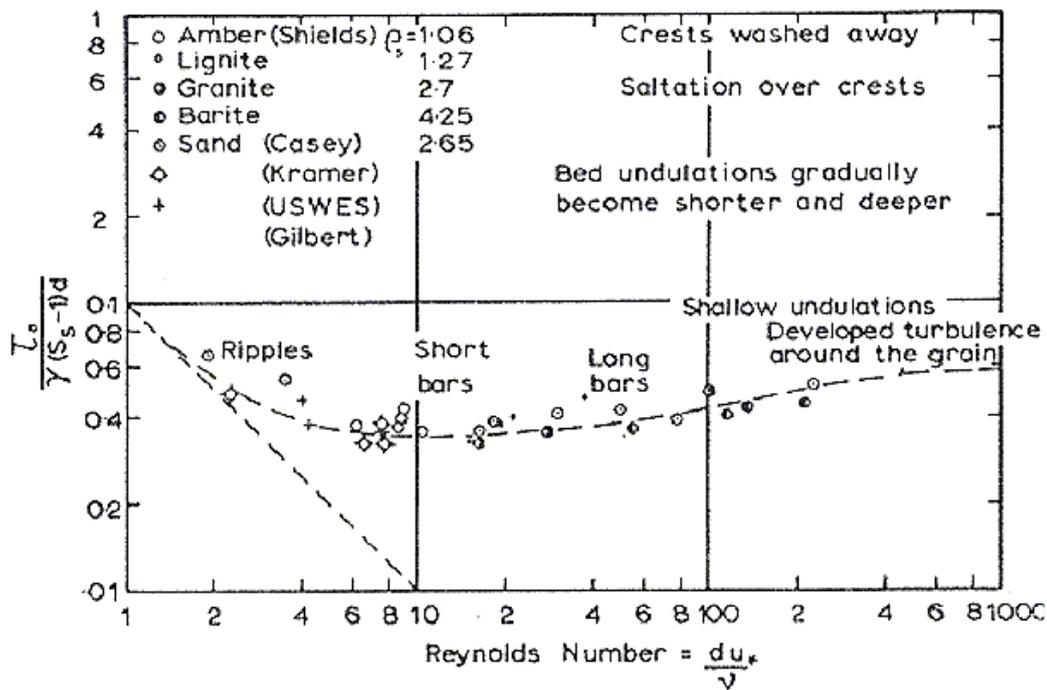


Figura 10: Diagrama de Shields tradicional, no qual a obtenção da tensão de atrito no fundo, implica em processo iterativo, pois a velocidade de atrito aparece nos dois eixos. (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011)

No entanto, o critério de transporte adotado pelo SisBaHiA® considera um efeito probabilístico na decisão de haver ou não transporte quando a tensão no fundo tem valor próximo do valor crítico. De fato, dada a variabilidade de forma e tamanho dos grãos de sedimentos naturais, o valor da tensão crítica de mobilidade para um dado grão de referência deve ser interpretado como o valor para o qual a probabilidade de deposição ou de mobilidade é 50%, havendo uma faixa de tolerância α . Deste modo, ao invés de um valor crítico preciso, há uma faixa de movimento incipiente definida por $\Psi_c \pm \alpha$. (Rosman, Relatório de Modelagem de Processos Sedimentológicos na Região do Canal do Mangue Porto do Rio de Janeiro - RJ, 2011)

Para incorporar esse efeito probabilístico, define-se um fator de tolerância α de modo que, para um dado tamanho de grão em um determinado tempo (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011):

1. Se a tensão no fundo exercida pelo escoamento for tal que $\Psi/\Psi_c < (1 - \alpha)$, o modelo considera que certamente não há condições de erosão ou transporte. No caso, se no local houver sedimentos em transporte, eles se depositariam, e os sedimentos em repouso assim permaneceriam.
2. Contrariamente, se a tensão no fundo for tal que $\Psi/\Psi_c > (1 + \alpha)$, o modelo considera que certamente o escoamento tem capacidade de erosão e transporte

3. Na situação intermediária o modelo entra no processo probabilístico. Se $(\Psi/\Psi_c - 1 + \alpha) < (2\alpha \times A[0,1])$ admite-se não haver capacidade de erosão e transporte, caso contrário há capacidade. Na expressão, a função $A[0,1]$ gera números aleatórios entre 0 e 1, a cada instante.

Como o emprego do tradicional Diagrama de Shields acarreta em um processo iterativo, apresenta-se na Figura 11 um diagrama modificado, no qual a tensão crítica pode ser obtida diretamente a partir da caracterização do sedimento e da água.

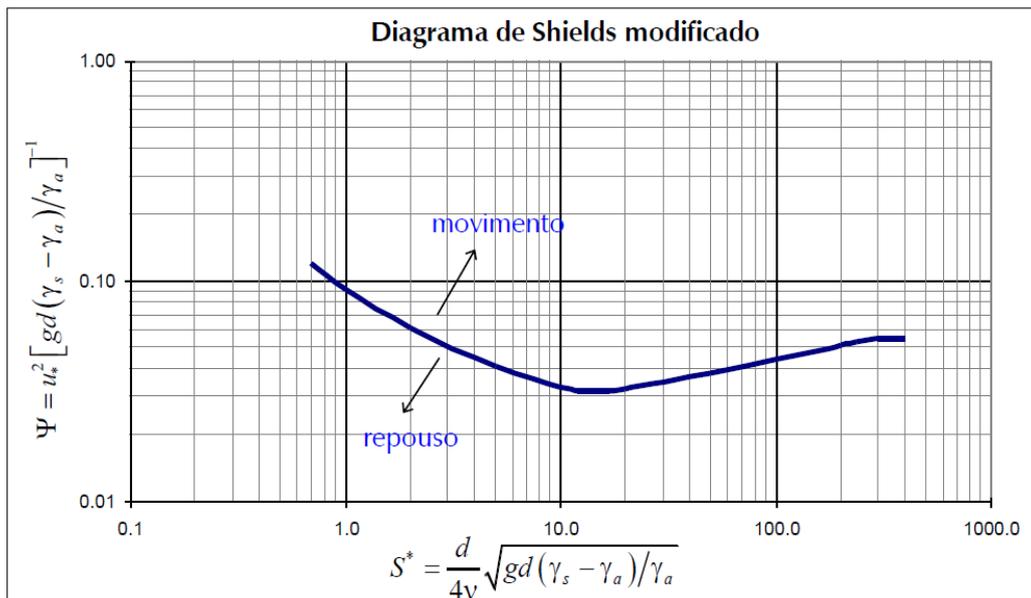


Figura 11: Diagrama de Shields modificado, no qual a tensão crítica pode ser obtida diretamente das características do sedimento e da água. (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011)

3.3.2. Vazão Sólida Potencial

A vazão sólida potencial é a descarga máxima de um dado sedimento que o escoamento fluido teria capacidade de transportar, supondo disponibilidade ilimitada de sedimento. Esse transporte de sedimentos pode ocorrer por suspensão ou por arraste.

A natureza do transporte depende do tamanho, formato e peso específico das partículas, e das condições hidrodinâmicas locais como velocidade e turbulência. O transporte em suspensão pode incluir também o transporte lavado, definido como a porção transportada proveniente de trechos a montante, e não obtida no trecho em questão. (Rosman, Relatório de Modelagem de Processos Sedimentológicos na Região do Canal do Mangue Porto do Rio de Janeiro - RJ, 2011)

Existem diversas fórmulas para o cálculo da vazão sólida potencial, e no SisBaHiA® é dada a opção de escolher algumas delas. Embora todas sejam fórmulas bem estabelecidas, a escolha das mesmas demanda critério, já que foram definidas por presunção de condições específicas, e o resultado obtido pode variar substancialmente de uma fórmula para outra, fazendo com que o processo de escolha de uma delas tenha grande importância no resultado da modelagem. Neste trabalho optou-se por usar a formulação de Engelund e Hansen.

A seguir são apresentadas as fórmulas disponíveis no SisBaHiA® para o cálculo da vazão sólida potencial. (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011)

Nas diversas fórmulas aparecem os seguintes parâmetros:

q_s = vazão sólida em m³/s/m

τ_0 = tensão de arrasto no leito

τ_c = tensão crítica de mobilidade

ρ_a = massa específica da água

ρ_s = massa específica do sedimento do leito

γ_s = peso específico do grão

γ_a = peso específico da água

D_{50} = diâmetro mediano dos sedimentos

V = velocidade média na coluna d'água (2DH)

De forma a facilitar a visualização e comparação, as fórmulas são apresentadas na forma adimensional. As expressões utilizadas para adimensionalizar a vazão sólida e a tensão de atrito no fundo são representadas pelas equações 9 e 10, respectivamente.

$$q_s^* = q_s / D_{50} \sqrt{g(S_s - 1)D_{50}} \quad (9)$$

$$\tau^* = \tau_0 / g(\rho_s - \rho_0)D_{50} \quad (10)$$

Meyer-Peter Muller (1948): Fórmula muito utilizada na prática de engenharia. Quantifica o transporte por arraste e deve ser utilizada apenas quando o transporte em suspensão for pouco relevante.

$$q_s^* = 8(\tau_0^* - \tau_c^*)^{3/2} \quad (11)$$

Engelund e Hansen (1967): Trata-se de uma das fórmulas mais utilizadas para rios em geral, bem como corpos d'água costeiros como estuários e canais de maré. Considera transporte total, exceto sedimentos coesivos.

$$q_s^* = \frac{0,05}{c_f} (\tau_0^*)^{5/2} \quad (12)$$

Onde o coeficiente c_f é o coeficiente de atrito no fundo definido no modelo hidrodinâmico. Conforme apresentado na equação 13, pode-se obter c_f através das seguintes expressões:

$$c_f = \frac{g}{c_h^2} = g / \left[18 \log_{10} \left(\frac{6H}{\varepsilon} \right) \right]^2 \text{ ou } c_f = \tau^B / [\rho(U^2 + V^2)] \quad (13)$$

No SisBaHiA[®], a fórmula de Engelund e Hansen presume o coeficiente 0,05 e o expoente 5/2, porém o usuário pode calibrar a fórmula para melhor ajuste a dados de campo, alterando os valores presumidos.

Van Rijn (1984): É usada para o cálculo de transporte por arrasto ou pelo leito. É recomendável para sedimentos com granulometria na faixa de areias finas a muito grossas, indo de 0,2 a 2,0mm.

$$q_s^* = 0,053 \frac{T^{2,1}}{d_*^{0,3}} \quad (14)$$

Onde: $T = \frac{\tau_0 - \tau_c}{\tau_c}; \quad S_s = \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a}; \quad d_* = d_{50} \left(\frac{g S_s}{\nu^2} \right)^{1/3}$

Nielsen (1992): Fórmula ajustada com base em dados experimentais na fórmula original de Meyer-Peter Muller. Tal formulação tem sido aplicada com sucesso em áreas costeiras com sedimentos arenosos.

$$q_s^* = 12(\tau_0^*)^{1/2} [\tau_0^* - \tau_c^*] \quad (15)$$

3.3.3. Atualização da Batimetria

Para a modelagem morfodinâmica é necessário definir a distribuição granulométrica dos sedimentos do fundo e o estoque disponível, ou altura da camada erodível em cada local.

Em um dado local, a altura da camada erodível de sedimentos no fundo por metro quadrado é dada por $S_E(x, y, t)$. Em cada instante, a altura da camada erodível corresponde à diferença entre a cota de fundo e a cota da camada não erodível mais abaixo. Um valor inicial S_{E0} tem que ser prescrito para todos os pontos do domínio do modelo. No entanto, esses valores normalmente são desconhecidos, porém podem ser estimados considerando valores de velocidades de correntes obtidas de modelagens prévias feitas com fundo fixo. Em locais com velocidades muito intensas é provável que S_{E0} seja menor, pois a capacidade erosiva seria muito grande e possivelmente o fundo seria rochoso ou de sedimentos muito graúdos. (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011)

No SisBaHiA® pode-se entrar com diferentes classes de sedimentos. Para cada classe m de sedimentos devem ser prescritos os valores dos seguintes parâmetros (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011):

ρ = massa específica em kg/m³

p = porosidade

τ_c = tensão crítica de mobilidade em N/m²

D_{50} = diâmetro mediano em mm

α = percentual da faixa de tolerância para τ_c .

No instante inicial, t_0 , o modelo calcula o estoque inicial de sedimentos para cada classe S_{E0m} , de modo que a soma das alturas erodíveis de cada classe seja igual ao limite total S_{E0} em cada ponto:

$$\sum_{m=1}^M S_{E0m}(x, y) = S_E(x, y) \quad (16)$$

Onde M corresponde ao total de classes de sedimentos.

A equação de balanço de massa com apenas uma classe de sedimento permite calcular a variação temporal de S_E , e pode ser escrita como (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011):

$$(1 - p) \frac{\partial h}{\partial t} + \left(\frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} \right) = 0 \therefore \frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{1}{1-p} \left(\frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} \right) \quad (17)$$

Onde a vazão sólida efetiva q_s está decomposta nas componentes x e y.

Dessa forma, com h variando no tempo, a equação da continuidade integrada na vertical, conforme apresentada na seção 3.2.1, é reescrita como (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \sum q \quad (18)$$

Onde a altura instantânea de água é definida por $H(x, y, t) = \zeta(x, y, t) + h(x, y, t)$.

3.3.4. Vazão Sólida Efetiva

O cálculo de q_s leva em conta a fração disponível de sedimento no fundo em cada local do modelo. Esta é computada como:

$$q_s = \min(q_p, q_d) \quad (19)$$

Onde q_p é a vazão sólida potencial, calculada a partir da fórmula de Engelund e Hansen, e q_d é a vazão sólida disponível no fundo em função do estoque de sedimentos no local. Em um dado ponto, só precisa calcular q_d , se $q_p > 0$. Caso contrário, $q_s = 0$. (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011)

A determinação de q_d , para quando se tem apenas uma classe de sedimentos - como é o caso estudado no presente trabalho - é feita da seguinte forma:

$$q_d = \frac{(1-p)}{\Delta t} S_E \quad (20)$$

Quando se tem mais de uma classe de sedimentos, o procedimento de cálculo é mais complexo, pois deve-se levar em conta que as variações cumulativas das alturas erodíveis de cada classe de sedimento DS_{Em} pode ser diferente para cada classe. E então deve-se calcular a vazão disponível em cada camada para determinar em até qual camada existirá vazão efetiva. Em outras palavras, se a vazão disponível em determinada camada for menor que a vazão potencial para as m classes de sedimento, significa que existe transporte na camada seguinte, e assim sucessivamente. Caso contrário, a vazão efetiva será igual a vazão potencial.

3.3.5. Condições iniciais e de contorno

As condições iniciais do modelo hidro-sedimentológico são as mesmas do modelo hidrodinâmico, ou seja, valores de elevação e velocidades em x e y , para todos os nós da malha no instante inicial. Além dessas, também é preciso determinar para cada nó, quais são as classes de sedimento presentes e qual é a altura erodida.

No modelo de transporte de sedimentos, tanto no modo acoplado como no desacoplado, existem três tipos de condição de contorno que podem ser aplicadas a qualquer ponto do contorno (Rosman, Relatório de Modelagem de Processos Sedimentológicos na Região do Canal do Mangue Porto do Rio de Janeiro - RJ, 2011):

- **Tipo 0:** a vazão sólida afluyente para cada uma das M classes de sedimentos é calculada levando em conta a hidrodinâmica vigente no local. As variáveis necessárias são obtidas do módulo hidrodinâmico, e o cálculo da vazão sólida normal à fronteira é realizado com a fórmula previamente selecionada no módulo de transporte de sedimentos, como visto na seção 3.3.2. Este modo de prescrição da condição de contorno é usualmente denominado condição de equilíbrio, pois as vazões sólidas na fronteira são iguais à capacidade de transporte do escoamento, ou seja, admite-se a vazão sólida potencial, respeitando a proporção das diferentes classes de sedimentos definida nas condições iniciais para o nó de contorno.
- **Tipo 1:** em pontos tipo 1, a vazão sólida normal à fronteira é prescritas para cada uma das M classes de sedimentos do domínio. Esta opção é útil quando se tem à disposição dados obtidos em campo ou dados provenientes de outros modelos. A vazão sólida imposta pode ser permanente ou variável no tempo, na forma de uma série temporal. Recomenda-se em conjunto com essa abordagem, um ajuste das fórmulas de transporte a fim de obter resultados mais fidedignos. Uma consequência comum da utilização do tipo 1 é a ocorrência de erosão ou assoreamento nas proximidades da fronteira onde foi prescrita a condição de contorno. Caso a vazão sólida normal prescrita seja menor que a capacidade de transporte do escoamento, é provável que ocorra erosão, se for maior que a capacidade de transporte do escoamento haverá assoreamento.
- **Tipo 2:** em nós desse tipo, a batimetria não muda. Este caso é importante para pontos de contorno aberto com nível d'água e curva chave prescrita. Como a vazão nodal é o produto da coluna d'água pela velocidade 2DH calculada no modelo hidrodinâmico, se houvesse variação de batimetria, haveria variação de vazão nodal.

3.4. Modelo de deriva de sedimentos finos – Transporte Lagrangeano

O modelo de Transporte Lagrangeano se baseia na trajetória da partícula e além de adequado a representação de fontes de pequena escala em relação ao domínio, é um modelo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, especialmente adequadas para simulações de vários tipos de problemas, como por exemplo: (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011)

- Determinação de tendências de deriva de sedimentos
- Determinação de massa e altura de material sedimentado
- Modelo com transporte condicionado, especialmente úteis em análises de processos sedimentológicos. O transporte pode ser condicionado por valores mínimos de velocidade, ou de tensão no fundo.

3.4.1. Equações Governantes

Seguindo a lógica de focar-se na trajetória de uma partícula, as equações físicas referentes ao modelo lagrangeano concernem somente ao cálculo do comportamento de cada partícula individualmente, sendo o resultado posteriormente agrupado de acordo com os objetivos da modelagem. (Machado & Da Silva, 2010)

As partículas são dispostas na região fonte aleatoriamente e são advectadas pelas correntes computadas através do modelo hidrodinâmico. A posição de qualquer partícula no instante seguinte, P^{n+1} , é determinada através da expansão em série de Taylor a partir da posição anterior conhecida, P_n (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011):

$$P^{n+1} = P^n + \Delta t \frac{dP^n}{dt} + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{d^2P^n}{dt^2} + T.A.D \quad (21)$$

Onde T.A.D., são termos de alta ordem desprezados. As derivadas temporais de P são obtidas a partir do campo de velocidades hidrodinâmico resolvível, conforme descrito a seguir:

$$\frac{dP}{dt} = \vec{V}(u, v, w) \quad (22)$$

$$\frac{d^2P}{dt^2} = \frac{d\vec{V}}{dx} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \quad (23)$$

Onde se admite que nas escalas resolvíveis, as velocidades responsáveis pelo transporte advectivo das partículas, $\vec{V}(u, v, w)$ e as velocidades calculadas pelo modelo hidrodinâmico são as mesmas (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011).

Há que se considerar, ainda, as velocidades difusivas, que são componentes de pequena escala não capturadas pelo modelo hidrodinâmico. De modo a inserir esse efeito difusivo, ou turbulência, após o cálculo da nova posição da partícula pode-se impor um desvio aleatório, como o que seria causado pelas velocidades difusivas. (Machado & Da Silva, 2010)

3.4.2. Processos Sedimentológicos - Transporte Condicionado

No caso de estudo, onde se deseja usar o modelo Lagrangeano para simular a deriva de sedimentos, condiciona-se o transporte pela tensão do fundo, que pode ser causada apenas por ação das correntes ou por ação sinérgica das ondas e correntes.

O processo implementado no SisBaHiA® para descrever o transporte condicionado pela tensão no fundo considera (Rosman, Relatório de Modelagem de Processos Sedimentológicos na Região do Canal do Manguê Porto do Rio de Janeiro - RJ, 2011):

V_S = velocidade de sedimentação média, constante

τ_{0c} = tensão no fundo crítica de mobilidade das partículas que sedimentam com V_S

α = tolerância entre 0 e 0,5

A partir de V_S calcula-se uma taxa de sedimentação variável no tempo e espaço em função da altura da coluna de água H :

$$K_S(x, y, t) = -\ln(0,205) \times V_S/H(x, y, t) \quad (24)$$

K_S é variável no tempo e espaço em função da altura da coluna d'água H onde está a partícula em um dado instante. A explicação disso é que em um local com maior profundidade, o tempo necessário para deposição no fundo é maior que em local mais raso. Esta formulação de K_S , representada na Figura 12, simula de forma mais realista o processo deposicional que a usual formulação linear, pois no início, a deposição é mais rápida devido aos sedimentos mais graúdos, e no final acontece mais lentamente por conta da remanescência dos sedimentos mais finos em suspensão (Rosman, Relatório de Modelagem de Processos Sedimentológicos na Região do Canal do Manguê Porto do Rio de Janeiro - RJ, 2011).

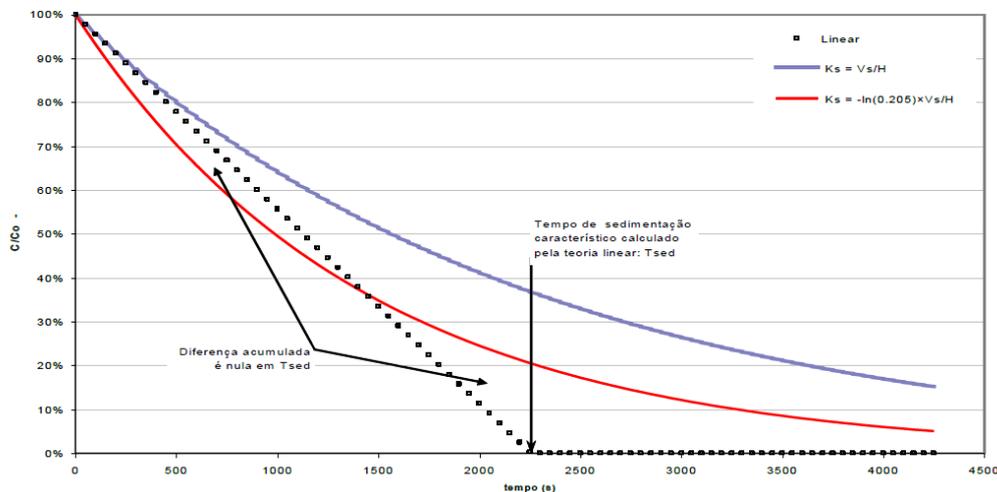


Figura 12: Curvas de sedimentação pela teoria linear para granulometria uniforme e pelas formulações com taxa $K_S = V_S/H$ e com taxa adotada no modelo $K_S = -\ln(0,205) \times V_S/H$. (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011)

Logo, o modelo só irá ativar o K_S para a partícula se em um dado local num dado instante, a tensão no fundo não for suficiente para promover o transporte dessa partícula. A maneira como o modelo define se a tensão no fundo é suficiente ou não para causar transporte já foi detalhada na seção 3.3.1.

Um ponto importante a ser ressaltar é que no modelo Lagrangeano de deriva de sedimentos, os processos de ressuspensão não são considerados, portanto, o que se calcula é a deposição primária de partículas e as estimativas de alturas sedimentadas indicam valores máximos esperados, retratando efeitos de curto prazo (Rosman, Relatório de Modelagem de Processos Sedimentológicos na Região do Canal do Manguê Porto do Rio de Janeiro - RJ, 2011). Os processos sedimentológicos completos, com sucessivos ciclos de erosão, transporte e sedimentação são considerados apenas nos modelos morfodinâmicos conforme discutido na seção 3.3.

3.4.3. Condições de Contorno e Iniciais

Existem duas condições de contorno no modelo lagrangeano, uma ao longo dos contornos abertos e outra nos contornos de terra.

A primeira, ao longo dos contornos abertos, é de que quando uma partícula atravessa um segmento do contorno, ela sai do domínio de modelagem e é perdida. Por esse motivo, não se deve usar o modelo lagrangeano para regiões fonte próximas aos limites de contornos abertos, que deve estar suficientemente afastado da região fonte, de modo que, se as partículas deixarem o domínio, não causarão perdas

sensíveis para o problema sendo modelado. (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011)

Ao longo das fronteiras de terra, pode-se considerar diferentes condições (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011):

- A partícula que atinge a fronteira retorna ao meio sem sofrer qualquer perda de massa
- A partícula retorna ao meio, mas retém-se parte de sua massa no trecho da fronteira atingido.

A retenção de massa depende da definição de um coeficiente de absorção ao longo das fronteiras de terra. Se esses coeficientes não forem definidos, são considerados nulos. (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011)

4. Dados para Modelagens Hidro - Sedimentológica

Os dados para modelagem hidro-sedimentológica utilizados neste estudo são o modelo digital do terreno, malha de elementos finitos, batimetria, rugosidade, maré, ventos, vazões dos rios da bacia da Baía de Guanabara e os aspectos hidro-sedimentológicos do próprio Canal do Mangue.

4.1. Modelo Digital do Terreno

O modelo digital do terreno, ou mapa base, é a representação da região de interesse onde serão apresentados os resultados espaciais fornecidos pelo programa. Esse tem por finalidade localizar geograficamente a região assim como delimitar o domínio de modelagem e definir os contornos de terra e de mar.

Tal mapa pode ser confeccionado a partir de inferências de campo, imagens de satélite, cartas náuticas ou outro meio onde seja possível a definição do perímetro da região de interesse. No caso deste estudo utilizou-se a carta náutica DHN, Diretoria de Hidrografia e Navegação, 1501 – Baía de Guanabara, escala 1 : 50.000, de 2001. Mostrada na Figura 13.

A variação temporal do nível de água, NA, faz com que áreas do domínio de modelagem apresentem alagamento na subida da maré e secamento na baixa. Neste trabalho, as zonas de alagamento e secamento são tratadas pela metodologia MRP (meio poroso-rugoso), explicado em 3.2.



Figura 13 - Imagem da Carta Náutica 1501 – baía de Guanabara, escala 1:50.000 de 2001. (Fonte DHN).

Para digitalizar os contornos, utilizou-se o software Surfer® 9 que possibilita também o ajuste da escala do mapa, definição das cores entre outros aspectos visuais. A Figura 14 apresenta o mapa base produzido para a totalidade da baía de

Guanabara e incluindo assim a região de interesse, o canal do mangue e o Porto do Rio de Janeiro.

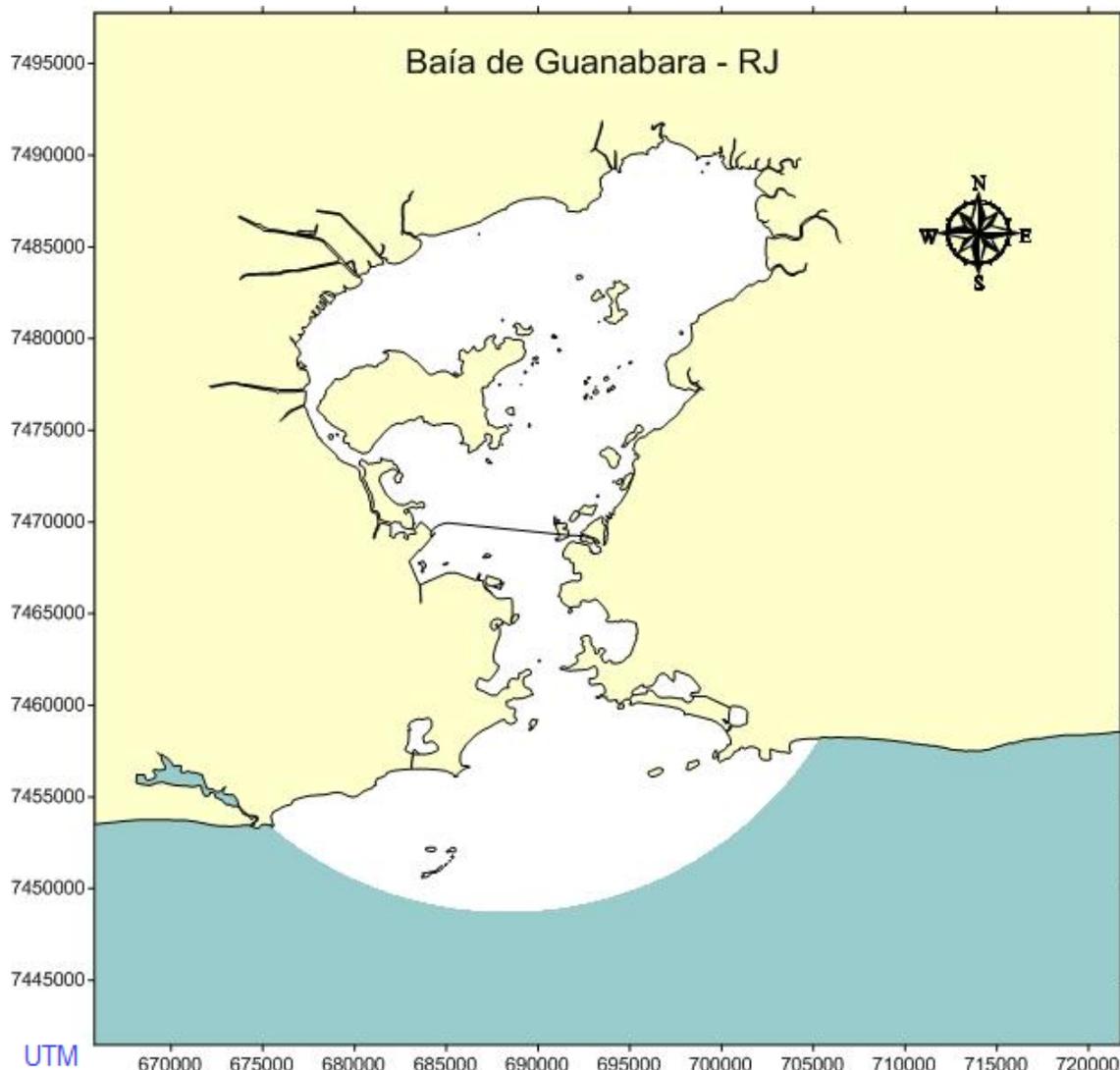


Figura 14 - Mapa Base da Baía de Guanabara mostrando o domínio de modelagem.

4.2. Malha de Elementos Finitos

A malha consiste de uma forma geral, na discretização espacial do meio contínuo - representado pelo domínio de modelagem - através da definição geométrica de elementos finitos - que neste trabalho são representados por quadriláteros. Para cada nó destes elementos, serão resolvidas as equações governantes do processo apresentadas na metodologia (Siqueira & Queiroz, 2012).

A confecção da malha foi originada a partir do contorno do mapa base, com o intuito de preservar os contornos naturais e garantir a estabilidade numérica do modelo. Para sua confecção utilizou-se o software Argus ONE© e optou-se pela

utilização de elementos quadriláteros, pois estes fornecem melhores resultados que os triangulares quando utilizados pelo SisBaHiA® (Rosman, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2011).

A Figura 15 apresenta a malha confeccionada para toda a baía de Guanabara e a Figura 16 uma ampliação na região de maior interesse, o canal do mangue e o Porto do Rio de Janeiro, onde se pode observar uma maior discretização, ou seja, um maior adensamento de elementos. Isso foi feito com o intuito de se obter resultados mais precisos nesta região.

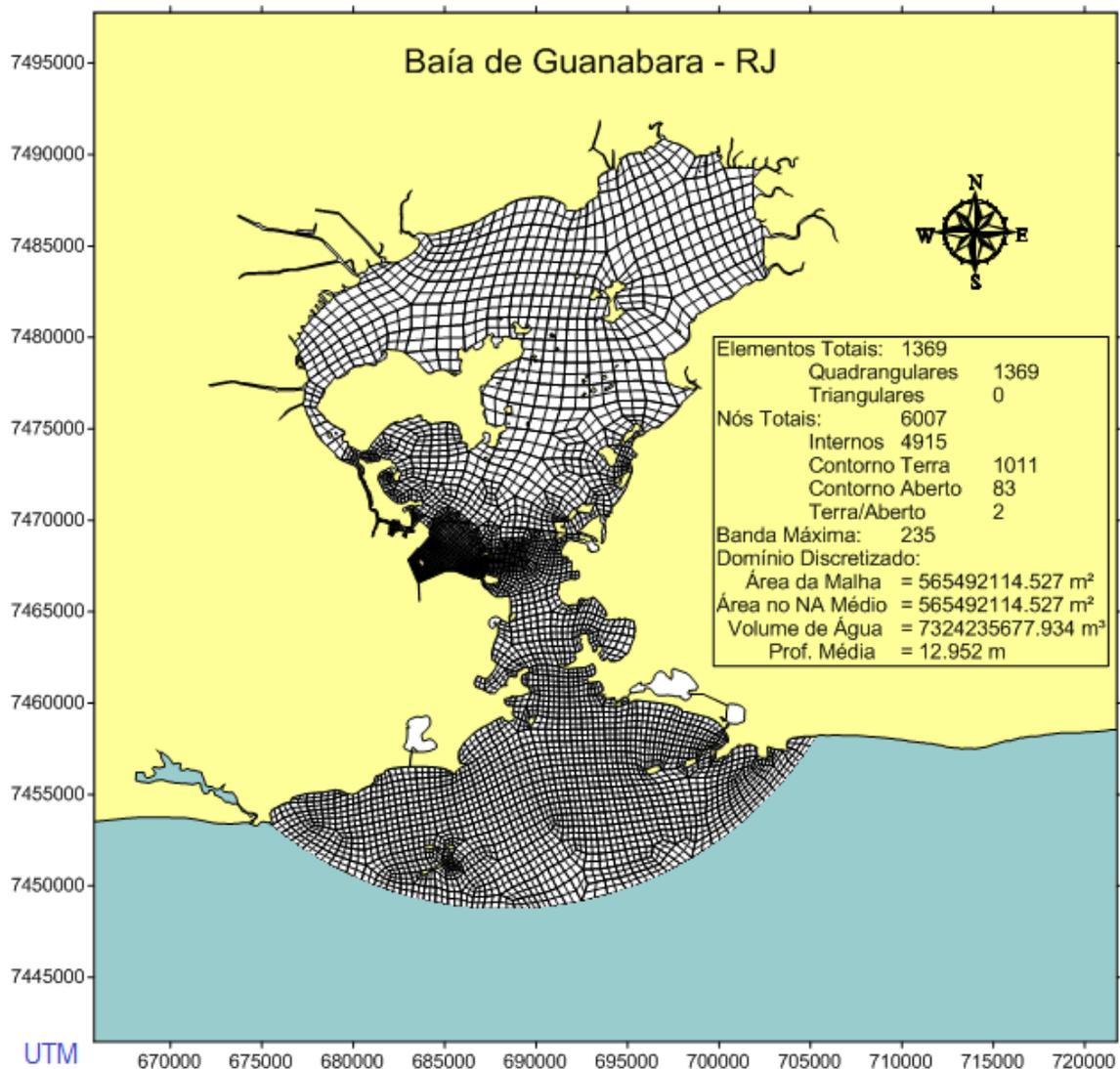


Figura 15 - Malha de elementos finitos quadrangulares da Baía de Guanabara com informações sobre os nós e elementos.

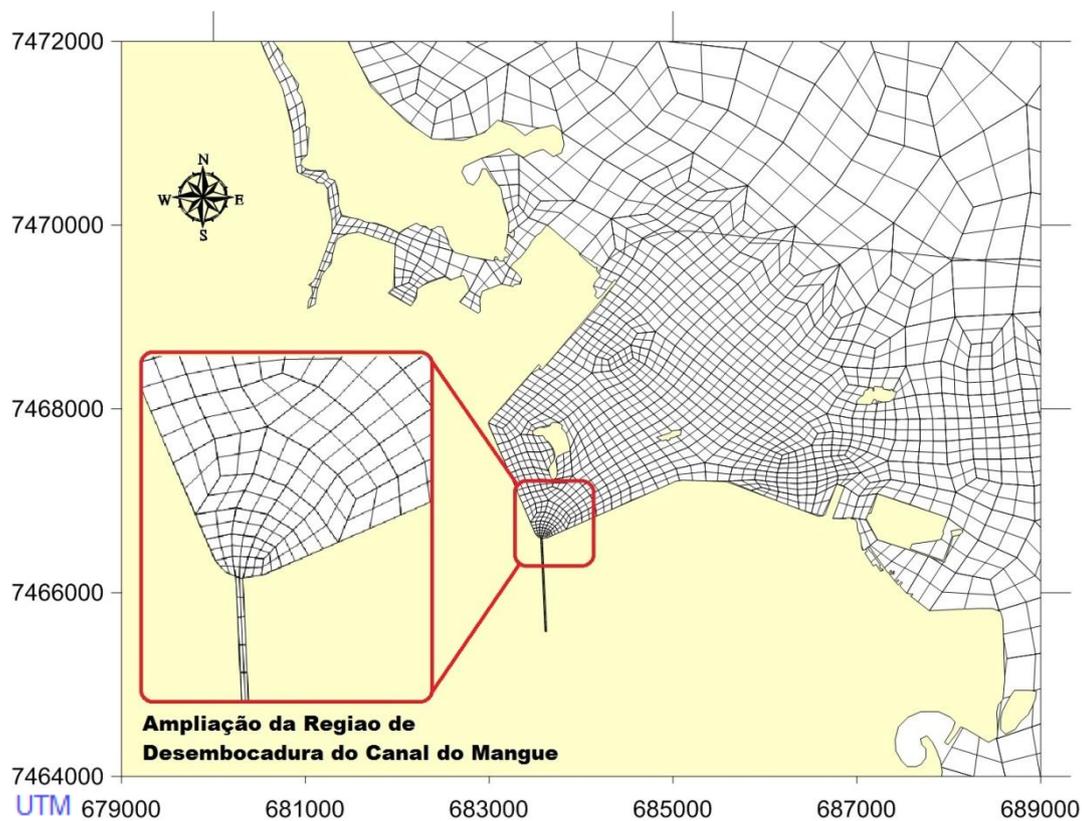


Figura 16 - Ampliação da malha de elementos finitos para a região do Canal do Mangue - RJ

4.3. Batimetria

As informações relativas à batimetria utilizada neste estudo foram obtidas das cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil - DHN: carta Baía de Guanabara nº1501(Figura 13), na escala 1:50.000; carta Barra do Rio de Janeiro nº1511(Figura 17), na escala 1:20.000; e a carta do porto do Rio de Janeiro nº1512 (Figura 18), na escala 1:20.000.

Completando os dados referentes às cartas náuticas, obteve-se uma atualização das cotas de fundo dos canais dragados no Porto do Rio de Janeiro, assim modificando os nós da malha pertinentes. Tais cotas batimétricas atualizadas após as obras de dragagem no período de 2010 a 2011 foram fornecidas pelo Consórcio Internave/Fausto de Souza/J. Ruano. (AECO - Área de Engenharia Costeira e Oceânica, 2011)

Os dados foram utilizados de forma simultânea para a definição da batimetria do local². Para a realização de tal tarefa foi confeccionado, com auxílio do programa Surfer® 9, uma grid de interpolação utilizando o método Kriging, que interpola os

² A batimetria no Canal do Mangue foi inferida por não haver disponibilidade de dados.

dados e extrapola para os limites que se definir, para cobrir todo o domínio de modelagem.



Figura 17 - Carta Náutica Barra do Rio de Janeiro nº1511, escala 1:20.000, de 2000. (Fonte DHN)

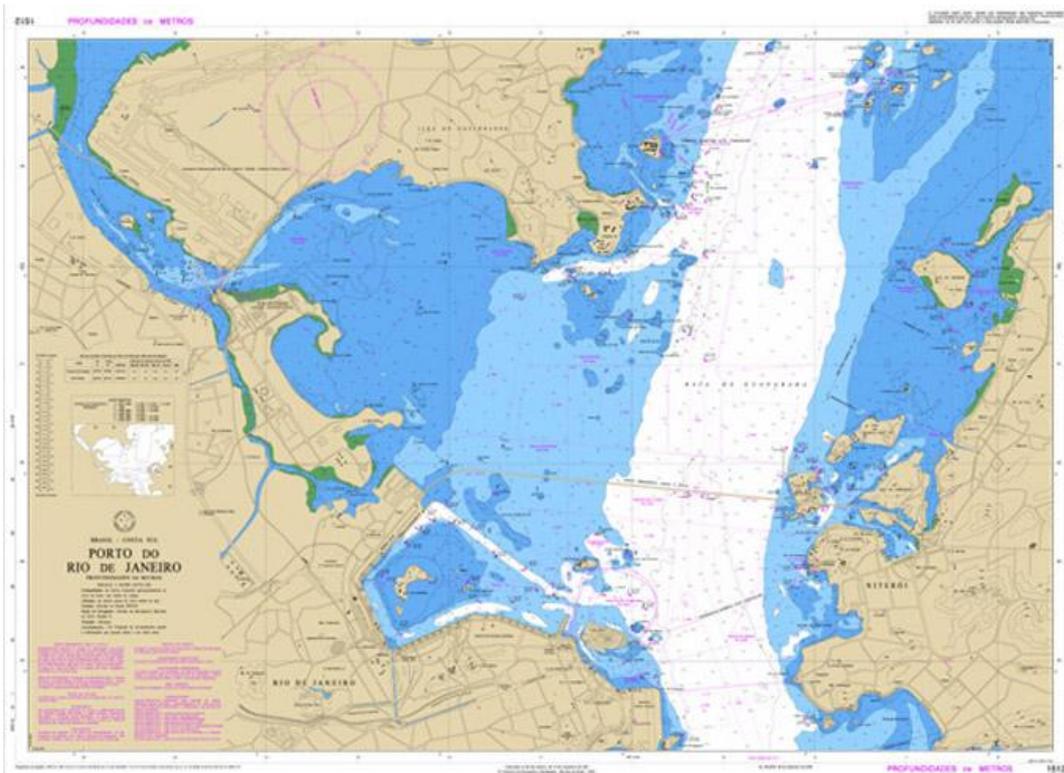


Figura 18 - Carta Náutica do Porto do Rio de Janeiro nº1512, escala 1:20.000, de 2000. (Fonte DHN).

O Resultado da interpolação da batimetria e como é visto pelo modelo é apresentado na Figura 19. Na Figura 20 o mesmo mapa batimétrico é apresentado, com um zoom na região de interesse do estudo, no Canal do Mangue e Porto do Rio de Janeiro.

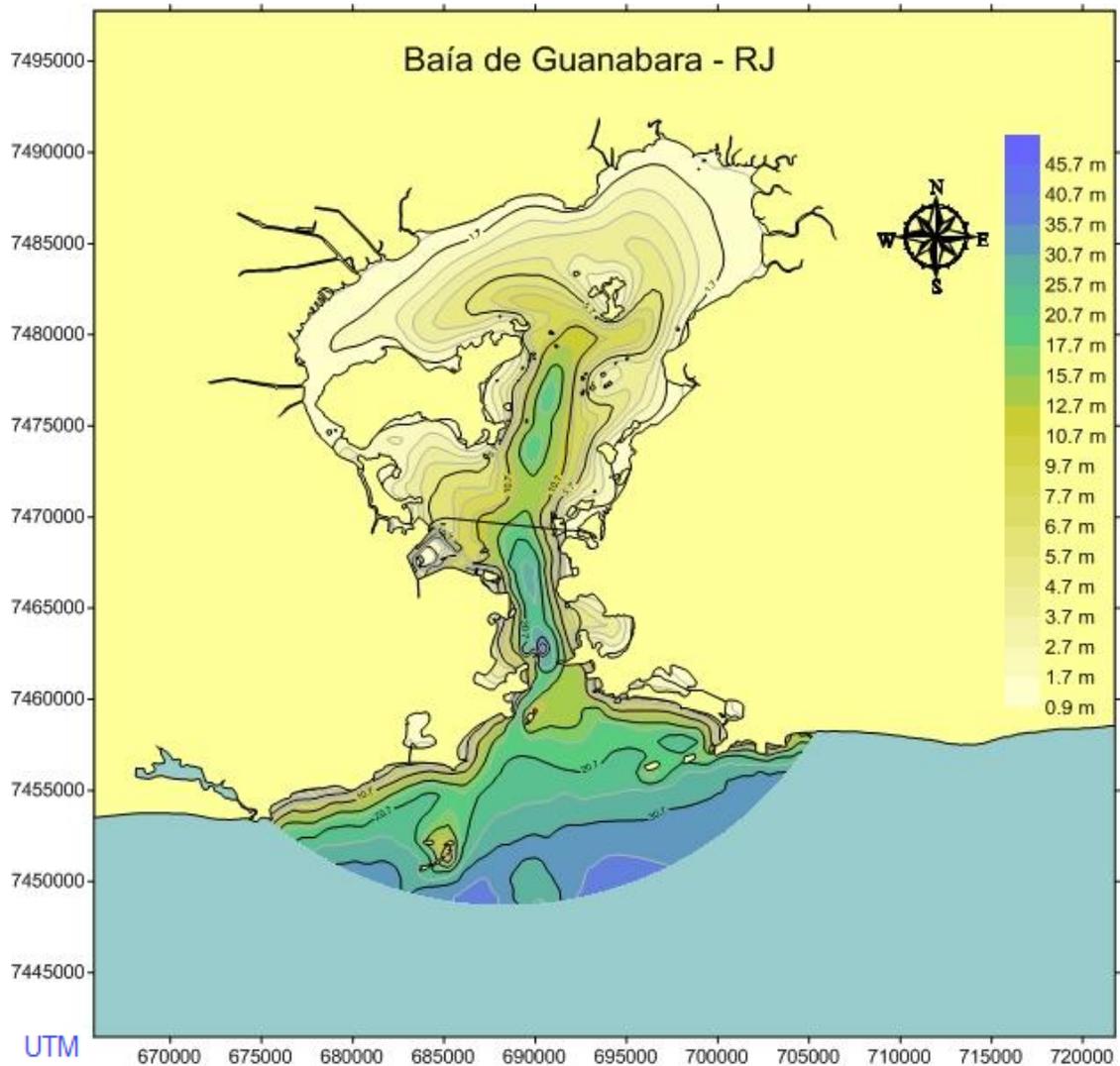


Figura 19 – Cotas de fundo como vistas pelo modelo no domínio de modelagem. Dados de batimetria gerados a partir de Cartas Náuticas da DHN e de levantamentos na região do porto referentes às dragagens realizadas em 2010 e 2011. Dados no Canal do Mangue são inferidos.

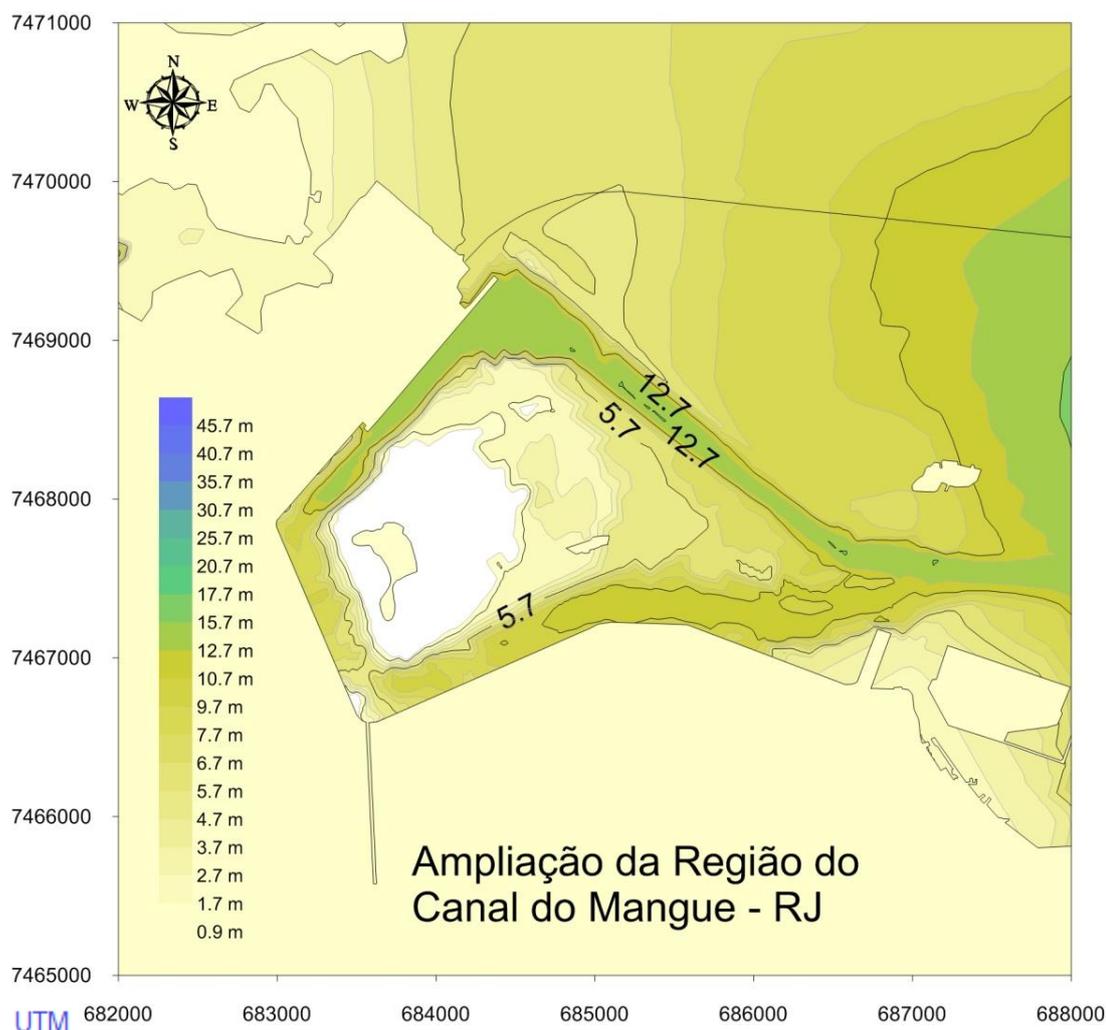


Figura 20 – Ampliação na Região do Canal do Mangue das cotas de fundo vista pelo modelo no domínio de modelagem.

4.4. Rugosidade

A Baía de Guanabara possui sedimentos de fundo que variam de argilas finas a areias médias. Os valores adotados para a amplitude da rugosidade do fundo são: (SAMPAIO, 2003 apud Machado & Da Silva, 2010).

- ~0.01 m: Áreas onde predominam partículas coloidais e silte fino (porção norte da Baía de Guanabara)
- ~0.02 m: Áreas onde predominam areia e argila (a leste e ao sul da ilha do Governador)
- ~0.03 m: Áreas onde predominam as areias finas (área do canal central)

- ~0.05 m: Áreas de areia média (entre a entrada da baía de Guanabara e o contorna aberto).

Baseado nas áreas de predominância dos sedimentos, os valores de rugosidade equivalentes calculados para cada nó da malha foram obtidos com o auxílio do programa Surfer® 9, utilizando, da mesma forma que na batimetria, uma interpolação pelo método de Kriging. Na Figura 21 está representado o mapa gerado de rugosidade.

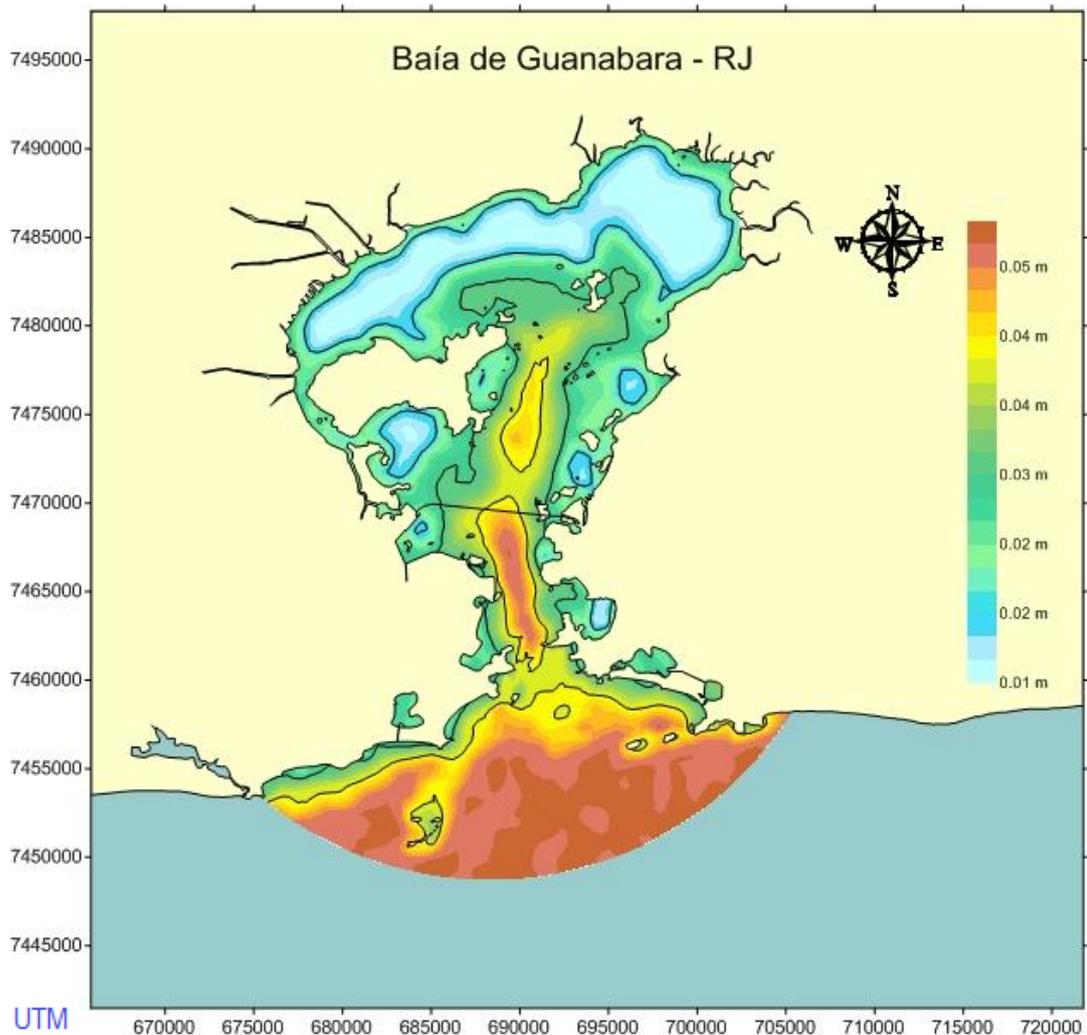


Figura 21 – Rugosidade do fundo da Baía de Guanabara

4.5. Maré

Os níveis de maré impostos como condicionantes na fronteira aberta do domínio de modelagem foram curvas de maré sintética, geradas a partir das principais constantes harmônicas da região.

Assim, para o cálculo das alturas de maré considerou-se nesse estudo as marés parciais, representadas pelas constantes harmônicas. Cada maré apresenta um período característico universal e sua amplitude e fase são característicos do local.

O modelo hidrodinâmico considera a soma da contribuição de cada maré para o cálculo da maré efetivamente utilizada, através da equação 25 :

$$\zeta = C_0 + \sum_{i=1}^N A_i \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi \cdot f}{T_i} + f_i\right) \quad (25)$$

Onde:

ζ = o nível de maré;

C_0 C_0 = Corresponde à cota do nível médio do mar em relação ao nível de referência do modelo;

A_i A_i = A amplitude de cada constante harmônica

T_i T_i = O período de cada constante harmônica

f_i f_i = A fase de cada constante harmônica.

A Tabela 4 apresenta as 25 constantes consideradas na fronteira de mar do modelo, listadas em ordem de magnitude. Com tais constantes obteve-se as curvas de maré mostradas na Figura 22 e impostas como condições de contorno ao modelo.

Tabela 4 - Constantes harmônicas na fronteira de mar do domínio de modelagem, ordenadas pela significância da amplitude.

Constante	Período (seg)	Amplitude (m)	Fase (grau)
M2	44714.164	0.288	99.672
S2	43200.000	0.160	105.671
O1	92949.630	0.105	89.496
Sa	31556955.920	0.079	343.001
K1	86164.091	0.058	146.500
K2	43082.045	0.049	98.675
M4	22357.082	0.045	149.502
N2	45570.054	0.035	141.675
Mm	2380713.137	0.032	153.003
Q1	96726.084	0.028	59.496
P1	86637.205	0.022	132.497
MS4	21972.021	0.022	249.500
MN4	22569.026	0.020	100.503
mu2	46338.327	0.015	125.673
2N2	46459.348	0.012	146.672
M1	89399.694	0.009	129.500
nu2	45453.616	0.005	127.672
T2	43259.217	0.005	140.673
L2	43889.833	0.004	181.674
MNS2	42430.071	0.004	98.675
SN4	22176.694	0.004	218.503
M3	29809.443	0.004	225.625
MO3	30190.691	0.003	74.628
OO1	80301.867	0.003	323.498
MK3	29437.704	0.002	142.626

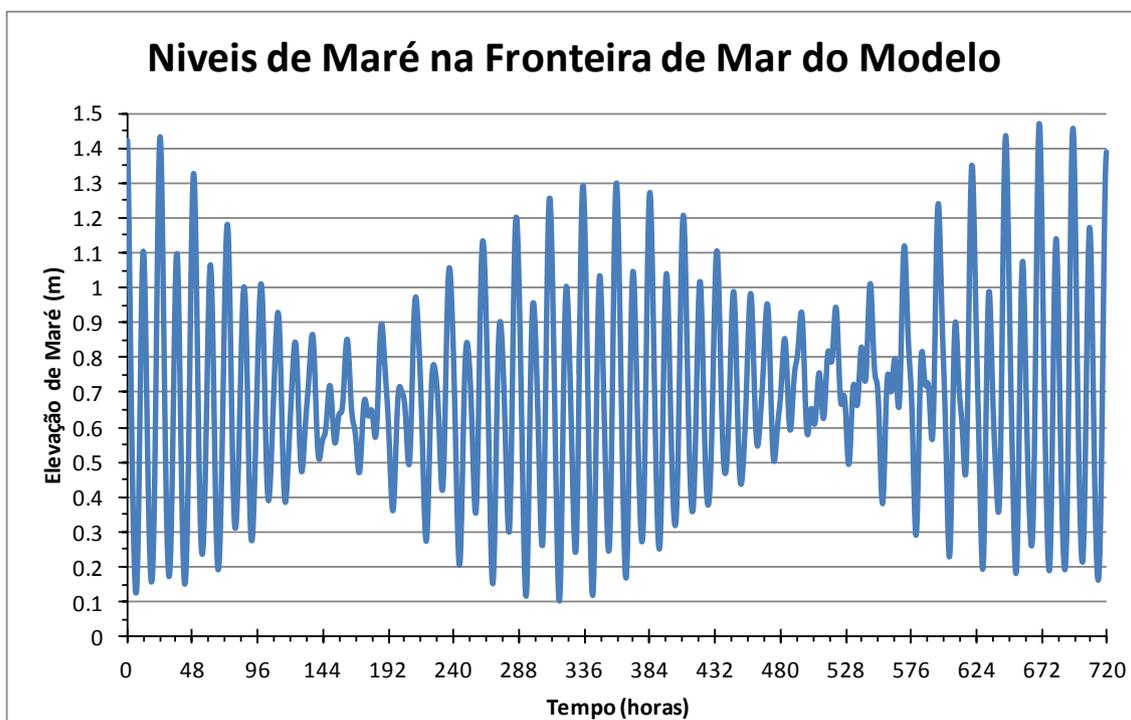


Figura 22 - Níveis de maré na fronteira do domínio de modelagem no mar, ao longo de 30 dias.

Observa-se o desenvolvimento do ciclo completo de maré, com duas quadraturas e duas sizígias. Pode-se observar ainda a variação diária da maré, com duas preamares e duas baixamars, caracterizando uma predominância de maré semi-diurna.

4.6. Ventos

A região do Canal do Mangué é pouco afetada pelos ventos reinantes na Baía de Guanabara, por conta de sua localização. Efeitos conjuntos de ondas e correntes são relevantes nos processos sedimentológicos verificados no fundo da Baía de Guanabara, mas tem pouca influência na zona do Canal do Mangué. Porém, na região do Porto do Rio de Janeiro, os ventos geram correntes residuais que afetam a deriva de sedimentos finos. (Rosman, Relatório de Modelagem de Processos Sedimentológicos na Região do Canal do Mangué Porto do Rio de Janeiro - RJ, 2011)

Nesse estudo, os dados de vento fornecidos ao modelo de circulação hidrodinâmica, foram fornecidos de forma uniforme no espaço e com intensidade variável no tempo com intervalos de uma hora.

Esses dados foram obtidos da série de registros horários da estação meteorológica (SBGL) localizada no Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro - Galeão, operada pela INFRAERO - Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária, cujos dados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados da estação SBGL - INFRAERO

Estação	Altitude	Latitude	Longitude
SBGL	9 m	22° 48' 36" S	43° 15' 02"W

Os dados coletados são referentes ao período de janeiro a dezembro de 2011. Para o cenário crítico, que corresponde a um período de tempo de quatro meses, utilizou-se os dados correspondentes dos meses de abril, por ser o mês com maiores chuvas registradas nesse ano, a julho. E para o cenário de ano típico utilizou-se os dados do ano inteiro.

Os ventos fornecidos ao modelo, para o mês de abril, estão ilustrados na Figura 23 onde se observa as variações de intensidade e direção ao longo do dia. Para ilustrar uma situação de inverno e consequentes períodos de frente fria, a Figura 25 apresenta os ventos para o mês de julho.

Para se analisar os padrões de direção e intensidade dos ventos ao longo de ambos os meses e também de todo o ano de 2011, foram elaboradas as rosas dos ventos ilustradas nas Figura 24, Figura 26 e Figura 27.

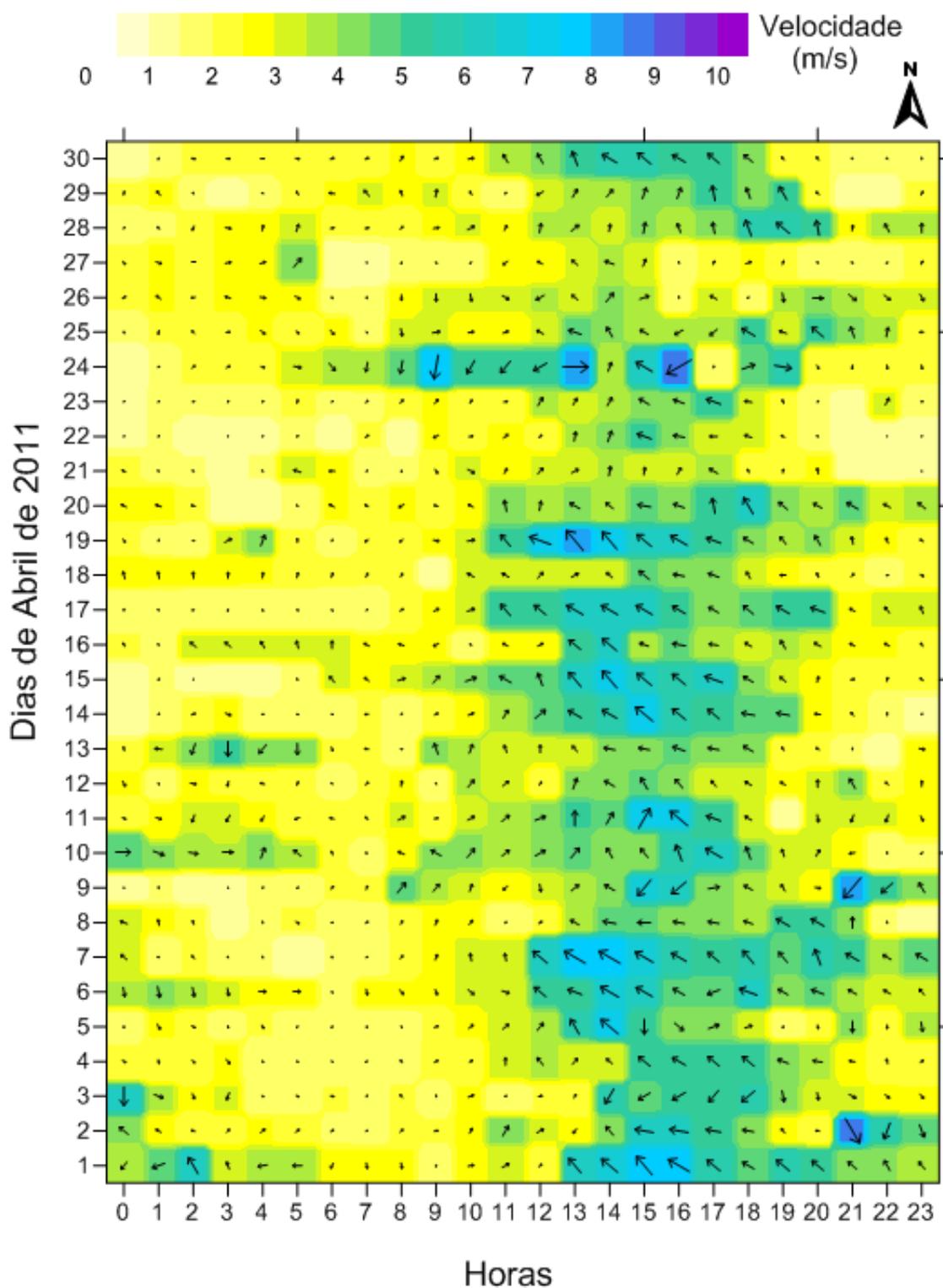


Figura 23 - Gráfico da série temporal de ventos de Abril de 2011 fornecida ao modelo como dados de entrada. As setas têm módulo proporcional à velocidade do vento, que é indicada pelo padrão de cores. A direção e o sentido do vento são indicados pelas setas, relacionada à rosa de pontos cardeais.

Na Figura 23 pode-se notar que os ventos mais intensos ocorrem ao final do dia, pela ocorrência de brisa marinha e também tendem a se ser ventos do quadrante sudeste.

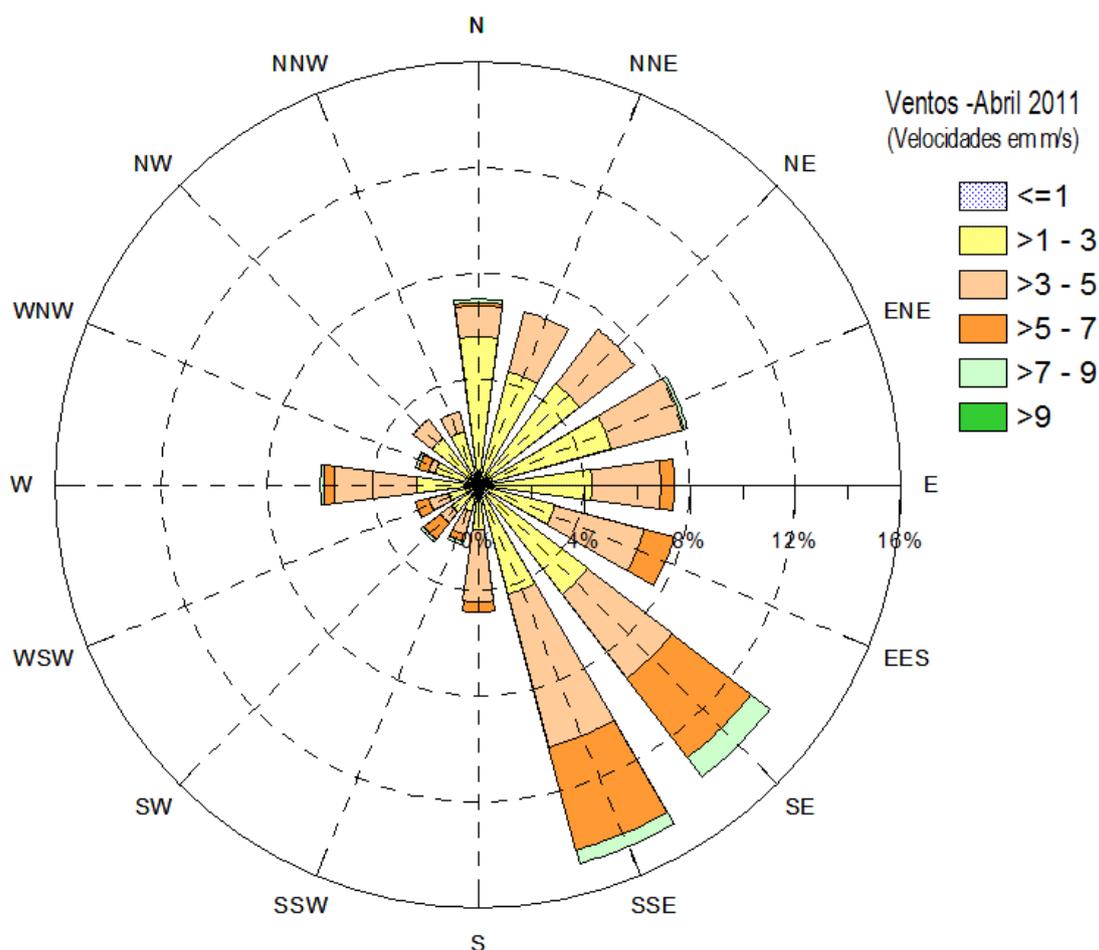


Figura 24 - - Rosa dos ventos para o mês de Abril de 2011. No eixo radial, observa-se a frequência de ocorrência das direções ilustradas no rótulo. O padrão de cores representa a faixa de intensidade dos ventos medidos.

Observando a rosa dos ventos na Figura 24, nota-se claramente a predominância de ventos do quadrante sudeste com intensidades maiores para os de sudeste (SE) em si e os de su-sudeste (SSE). Apesar desta predominância de ventos do quadrante sudeste, os provenientes do quadrante nordeste também apresentam frequências medias/altas,

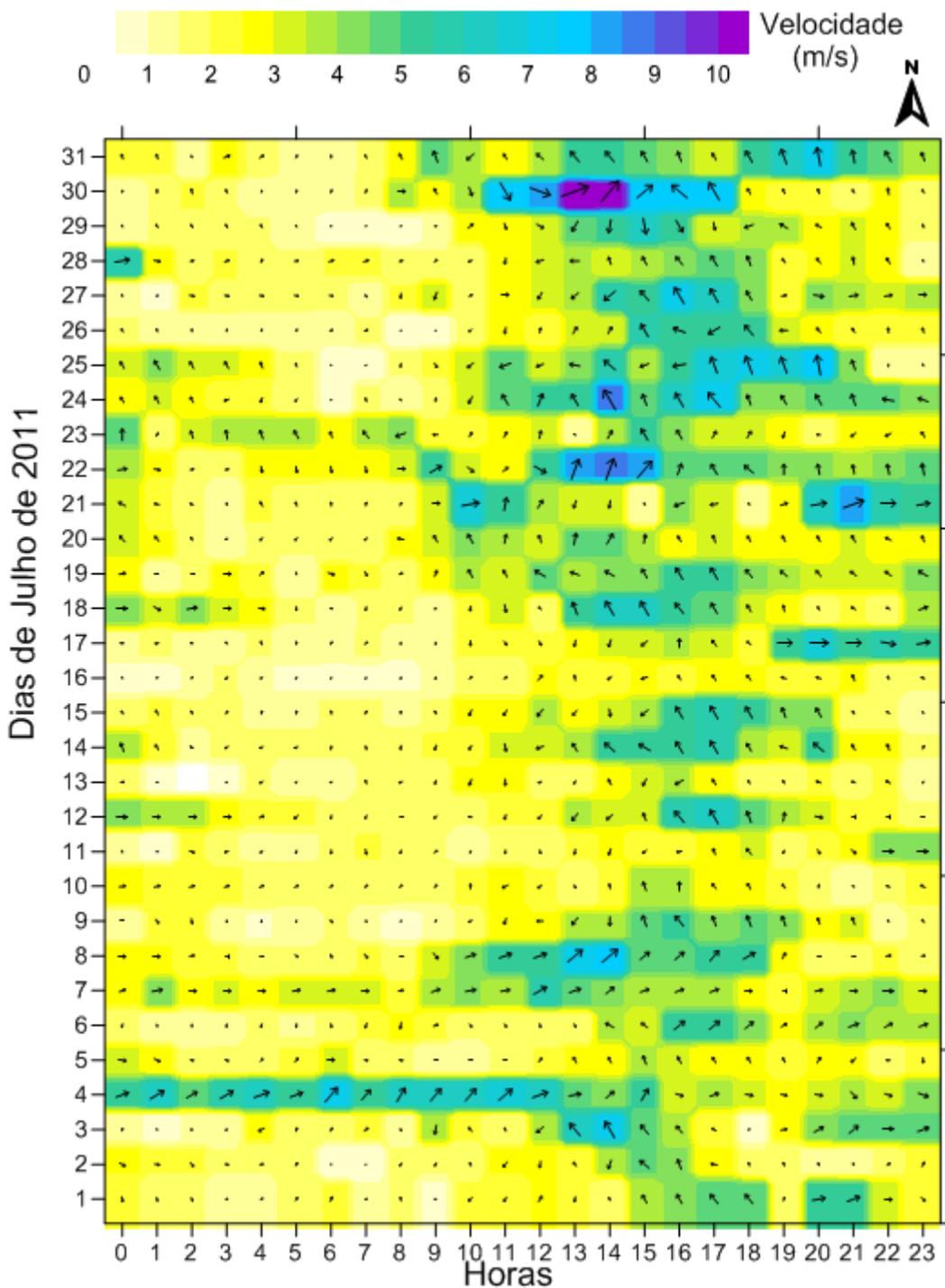


Figura 25 - Gráfico da série temporal de ventos de Julho de 2011 fornecida ao modelo como dados de entrada. As setas têm módulo proporcional à velocidade do vento, que é indicada pelo padrão de cores. A direção e o sentido do vento são indicados pelas setas, relacionada à rosa de pontos cardeais.

Na Figura 25, observa-se um claro padrão de brisa com ventos também mais intensos ocorrendo ao final do dia, devido à brisa marinha. Os registros de maiores intensidades tendem a se concentrar no período final do mês de Julho.

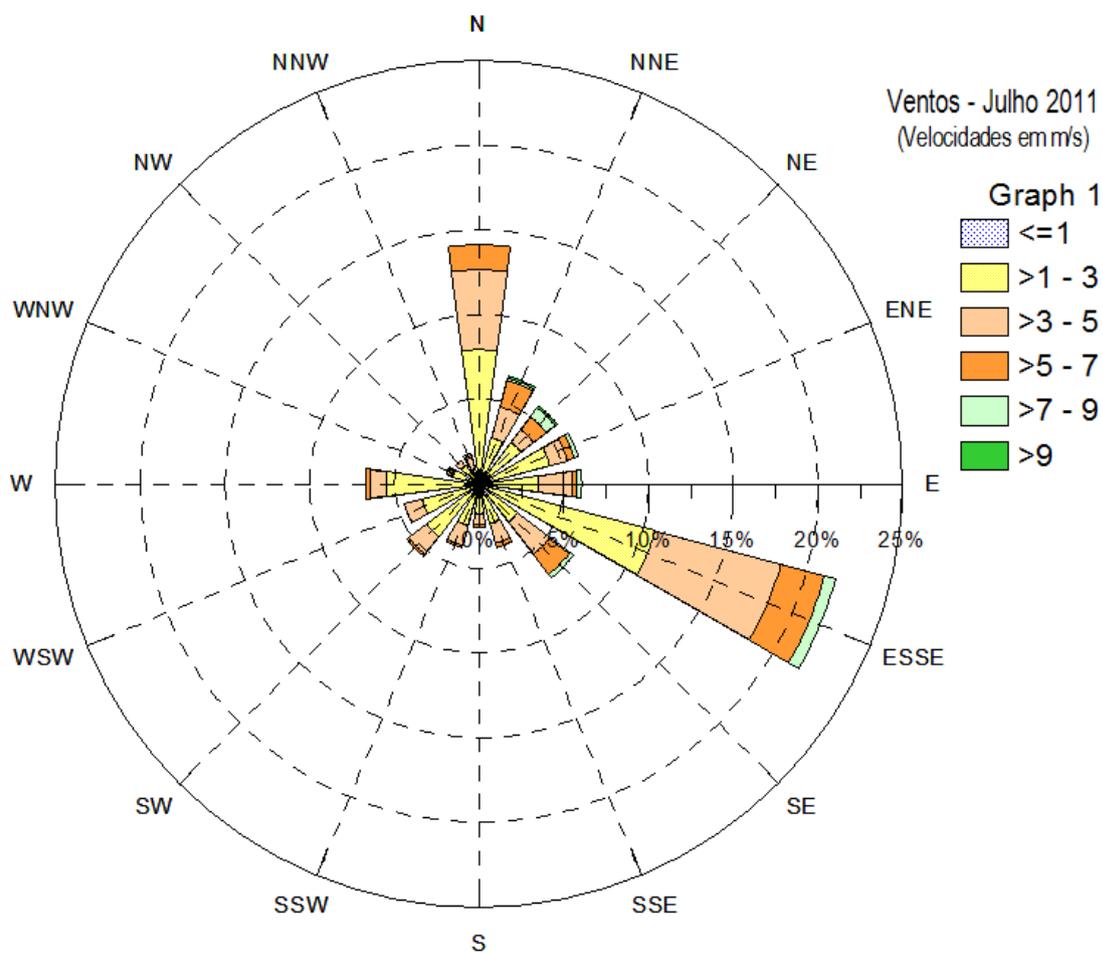


Figura 26 -- Rosa dos ventos para o mês de Julho de 2011. No eixo radial, observa-se a frequência de ocorrência das direções ilustradas no rótulo. O padrão de cores representa a faixa de intensidade dos ventos medidos.

Observando a rosa dos ventos apresentada na Figura 26, nota-se claramente a predominância de ventos de direção norte (N) e lés-sudeste (ESE).

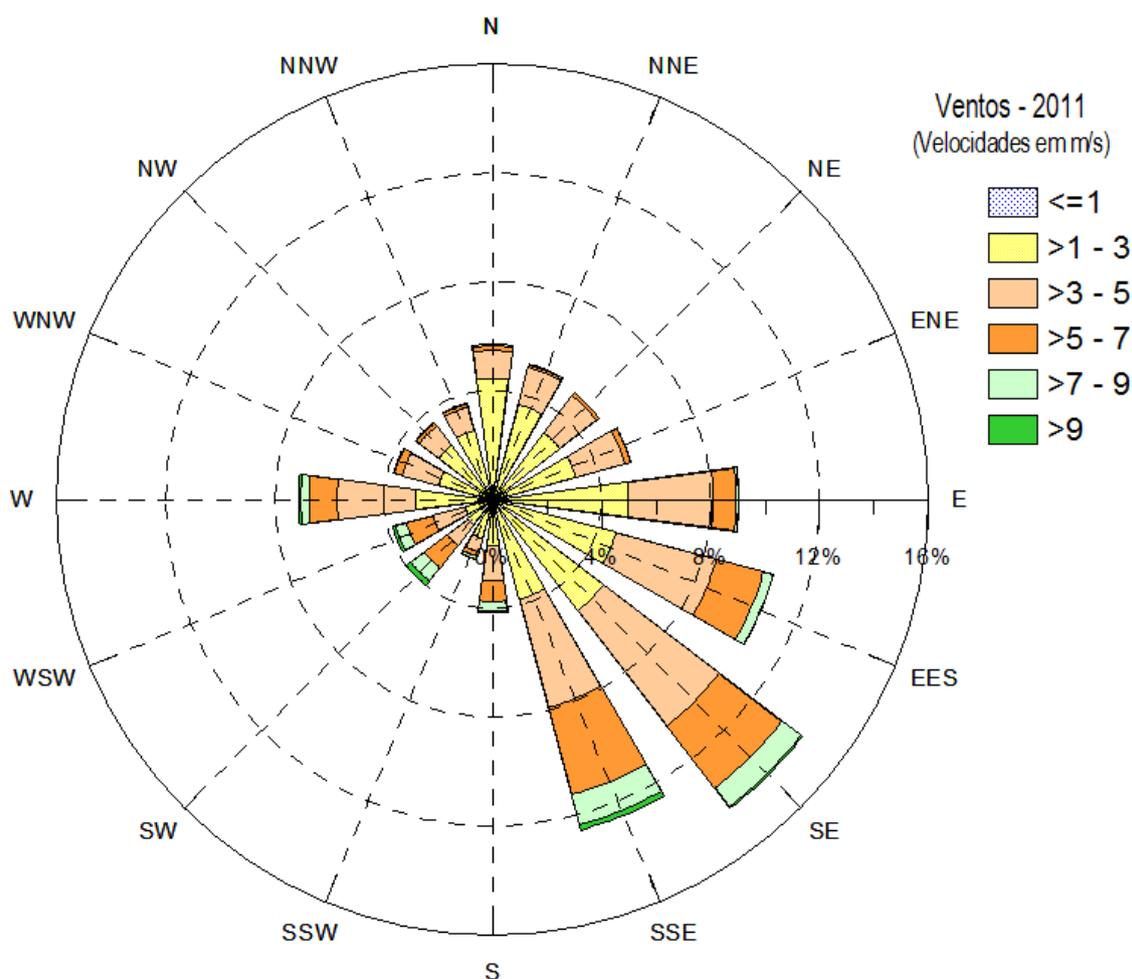


Figura 27 - Rosa dos Ventos para o ano de 2011. No eixo radial, observa-se a frequência de ocorrência das direções ilustradas no rótulo. O padrão de cores representa a faixa de intensidade dos ventos medidos.

Ao observar a Figura 27, nota-se claramente que ventos do quadrante sudeste (SE) são predominantes ao longo do ano, com destaque para os su-sudeste (SSE) que apresentam maiores intensidades. Ventos com direção oeste (W), oés-sudoeste (WSW) e sudoeste (SW) apesar de pouca ocorrência apresentam intensidades altas também.

4.7. Rios da Bacia Contribuinte da Baía de Guanabara

Como este trabalho foca no Canal do Mangue e na sua interação com o Porto do Rio de Janeiro, as vazões dos rios da bacia contribuinte da Baía de Guanabara, foram calculadas a partir das vazões médias destes rios, sem a inclusão das vazões de ETEs nos dados para modelagem.

O cálculo para estimar a vazão desses rios contribuintes se baseou no método racional, conforme mostrado na equação 26:

$$Q = \frac{i_m A c}{3,6} \quad (26)$$

Onde:

Q = vazão em [m³/s];

i_m = Intensidade média de precipitação sobre toda área drenada, de duração igual ao tempo de concentração em [mm/h];

A = Área drenada em [km²];

c = Coeficiente de escoamento.

A intensidade média de precipitação, i_m , foi obtida pelos dados do DNMET – Departamento Nacional de Meteorologia, pelas normais climatológicas da Estação do Rio de Janeiro, apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - . Valores de Precipitação Total para todos os meses do ano de 1990, para Estação do Rio de Janeiro.

Meses	Precipitação Total (mm)
JAN	114.1
FEV	104.3
MAR	103.3
ABR	137.4
MAI	85.6
JUN	80.4
JUL	56.4
AGO	50.5
SET	87.1
OUT	88.2
NOV	95.6
DEZ	169
TOTAL	1171.9

O coeficiente de escoamento foi adotado como sendo 50%, em função dos diversos tipos de uso do solo na bacia e conforme valores indicados na Tabela 7 (Sampaio, 2003, apud Machado & Da Silva). A seguir, a Tabela 8 apresenta vazões médias obtidas para diversos rios.

Tabela 7 - Valores de C em função das características da bacia.

Características da Bacia	C [%]
Superfícies impermeáveis	90 - 95
Terreno estéril montanhoso	80 - 90
Terreno estéril ondulado	60 - 80
Terreno estéril plano	50 - 70
Prados, campinas, terreno ondulado	40 - 65
Matas decíduais, folhagem caduca	35 - 60
Matas coníferas, folhagem permanente	25 - 50
Pomares	15 - 40
Terrenos cultivados em zonas altas	15 - 40
Terrenos cultivados em vales	10 - 30

Tabela 8 - Áreas de drenagem dos rios considerados e suas vazões médias.

Rios	Área Drenada(km ²)	C	Chuva (mm/h)	Vazão (m ³ /s)
Canal do Cunha	60,5	0,5	0,1712	1,439
Rio Irajá	27,3	0,5	0,1712	0,649
Rio São João de Meriti	163,5	0,5	0,1712	3,880
Rio Sarapuí	159,8	0,5	0,1712	3,800
Rio Iguaçu	554,2	0,5	0,1712	12,942
Rio Estrela	342,5	0,5	0,1712	8,145
Rio Suruí	53,2	0,5	0,1712	1,265
Rio Iriri	8,4	0,5	0,1712	0,200
Rio Roncador	107	0,5	0,1712	2,545
Canal de Magé	4,6	0,5	0,1712	0,109
Rio Guapimirim	1233,7	0,5	0,1712	29,340
Rio Cacerebu	758,4	0,5	0,1712	18,037
Rio Guaxindiba	11,8	0,5	0,1712	0,281
Rio Imboassú	11,6	0,5	0,1712	0,276

4.8. Aspectos Hidro - Sedimentológicos do Canal do Mangue

Os aspectos hidro-sedimentológicos do canal do mangue levam em conta a sua vazão fluvial calculada para ambos os cenários e as características dos sedimentos presentes e afluentes ao canal.

4.8.1. Vazão Fluvial

Para a definição das vazões afluentes ao canal do mangue na seção de estudo, utilizou-se como base estimativas realizadas pelo professor, Marcelo Miguez³, D.Sc., da Área de Recursos Hídricos do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, que participou do Projeto da Bacia do Canal do Mangue⁴ e desenvolveu em sua tese de doutorado um modelo matemático de células de escoamento para bacias urbanas, na própria Bacia do canal do Mangue.

Segundo essas estimativas o Canal apresenta vazões médias afluentes de água não salinas, em épocas sem chuva de aproximadamente 3,0 m³/s. Porém em épocas de ocorrências de chuvas intensas esta pode ultrapassar os 100 m³/s, em períodos de poucas horas.

No caso deste trabalho, a seção de montante de referência é a que fica a cerca de 1 km da embocadura, após a última confluência, aproximadamente sob o viaduto Eng. Paulo de Souza Reis. As vazões fluviais consideradas no estudo serão as que chegam nesta seção do canal.

Para a estimativa de vazões afluentes na seção, foram criados hidrogramas diferentes para cada um dos cenários pretendidos.

O hidrograma hipotético de vazões fluviais chegando ao Canal do Mangue, apresentado na Figura 28, representa um período de um mês com chuvas intensas e prolongadas e assim levando a vazões próximas dos 100m³/s máximos estimados e outras três com intensidades menores, porém também com valores refletindo chuvas de grande intensidade. Este hidrograma representa o primeiro mês do cenário crítico.

³ Professor Associado da UFRJ, Marcelo Gomez Miguez, D.Sc., <marcelomiguez@poli.ufrj.br>

⁴ Projeto COPPETEC, nº ET500090, "Projeto da Bacia do Canal do Mangue".

Nos três meses seguintes, deste cenário, foram adotados valores calculados a partir de dados pluviométricos da Sub-bacia do Canal do Mangue, como se mostrará na seção 4.8.1.1. Como o mês mais chuvoso do ano de 2011 foi abril, o primeiro mês, de chuvas intensas, foi definido como tal e para os meses subsequentes, de chuvas típicas, utilizou-se os meses de maio, junho e julho.

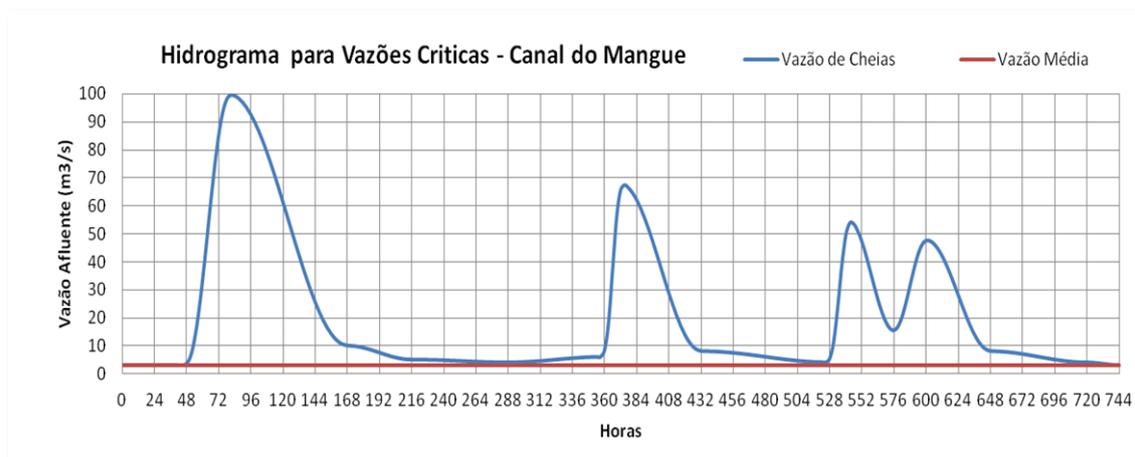


Figura 28 - Hidrogramas hipotéticos de vazões fluviais afluentes ao Canal do Mangue durante um mês com três eventos de chuvas moderadas a fortes. Em vermelho as vazões médias usuais de 3,0 m³/s, em azul, as vazões variáveis com eventos de chuvaradas.

Para o cenário longo, de um ano típico de chuvas, foi construído o hidrograma hipotético apresentado na Figura 29. Neste estão representadas as vazões médias estimadas, tal qual na Figura 28, e as vazões de cheias esperadas calculadas a partir de dados pluviométricos da Sub-bacia do Canal do Mangue, como se mostrará na seção 4.8.1.1.

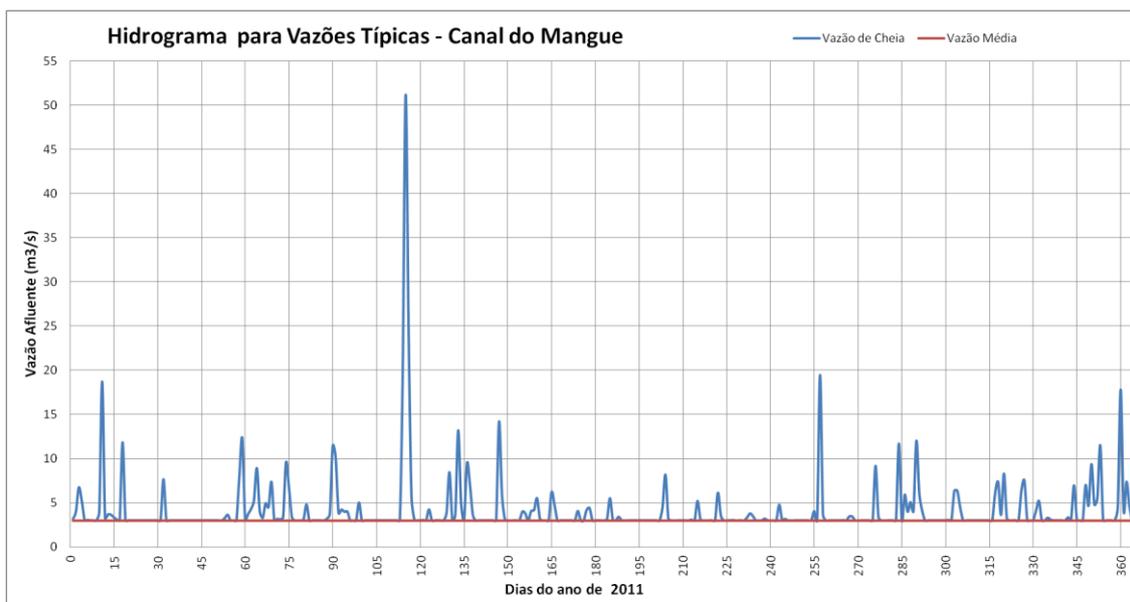


Figura 29 - Hidrogramas hipotéticos de vazões fluviais afluentes ao Canal do Mangue durante um ano com vazões calculadas a partir de dados pluviométricos da Sub Bacia do Canal do Mangue. Em vermelho as vazões médias usuais de 3,0 m³/s, em azul, as vazões variáveis com eventos de chuvaradas.

4.8.1.1. Cálculo da Vazão no Canal do Mangue

O cálculo para estimar vazões no canal do mangue durante um ano, foi baseado nos dados pluviométricos obtidos do Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro. Neste caso como o objetivo é montar um hidrograma com valores típicos de ocorrência de chuvas, optou-se pelo ano de 2011 que simboliza um ano onde não ocorreu El Niño ou La Niña proeminentes.

No Sistema Alerta Rio existem seis estações pluviométricas de interesse quanto a sub-bacia do Canal do Mangue, estas são: Tijuca, Tijuca/Muda, Grajaú, Santa Teresa, São Cristovão e Saúde. A Tabela 9 apresenta as coordenadas geográficas de cada estação. E a Tabela 10 apresenta, como exemplo, os dados obtidos para o mês de abril, o mais chuvoso do ano.

Tabela 9 - Coordenadas das Estações Pluviométricas, do Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro, pertinentes a Sub-Bacia do Canal do Mangue.

Estação	Latitude	Longitude
Tijuca	-22,93167	-43,22167
Tijuca/Muda	-22,932722	-43,243322
Grajaú	-22,92361	-43,26778
Santa Teresa	-22,93111	-43,19639
São Cristovão	-22,89667	-43,22167
Saúde	-22,89722	-43,19417

Tabela 10 - Pluviosidade registrada, para o mês de abril de 2011, por cada posto pluviométrico influente na Sub-Bacia do Canal do Mangue.

Dia	Pluviosidade (mm)					
	Tijuca	Tijuca/Muda	Grajaú	Saúde	São Cristovão	Santa Teresa
01/04/2011	20.4	30.2	24.40	8.2	10.60	5.8
02/04/2011	2.8	2.8	2.40	1.6	1.80	2
03/04/2011	4.4	3.4	3.40	4	3.60	3.6
04/04/2011	2.8	2.4	4.20	3.2	2.60	2
05/04/2011	3.2	3.2	2.60	2.4	2.60	3.2
06/04/2011	0	0	0.00	0	0.00	0
07/04/2011	0	0	0.00	0	0.00	0
08/04/2011	0	0	0.00	0	0.00	0
09/04/2011	9.4	7	7.00	0.2	0.20	4
10/04/2011	0	0	0.00	0	0.00	0
11/04/2011	0	0	0.00	0	0.00	0
12/04/2011	0	0	0.00	0	0.00	0
13/04/2011	0	0	0.00	0	0.00	0
14/04/2011	0	0	0.00	0	0.00	0
15/04/2011	0	0	0.00	0	0.00	0
16/04/2011	0	0	0.00	0	0.00	0
17/04/2011	0	0	0.00	0	0.00	0
18/04/2011	0	0	0.00	0	0.00	0
19/04/2011	0	0	0.00	0	0.00	0
20/04/2011	0	0	0.00	0	0.00	0
21/04/2011	0	0	0.00	0	0.00	0
22/04/2011	0	0	0.00	0	0.00	0
23/04/2011	0	0	0.00	0	0.00	0
24/04/2011	71	49.6	53.40	43.4	23.20	39.2
25/04/2011	171.6	222.2	126.40	44.4	16.40	69.2
26/04/2011	65.8	71.2	63.40	63.8	62.80	46.2
27/04/2011	6	7.2	10.40	6.2	8.40	9.2
28/04/2011	0	0.4	0.20	0	0.00	0.2
29/04/2011	0	0	0.00	0	0.00	0
30/04/2011	0	0	0.00	0	0.00	0

Para a definição do contorno da Sub-Bacia do Canal do Mangue utilizou-se de dados geográficos obtidos no Portal Geo da Prefeitura do Rio de Janeiro e produzidos pelo Instituto Pereira Passos. A Figura 30 apresenta o mapa criado pelo IPP das Sub-Bacias do Rio de Janeiro, destacando a Sub-Bacia do Canal do Mangue.

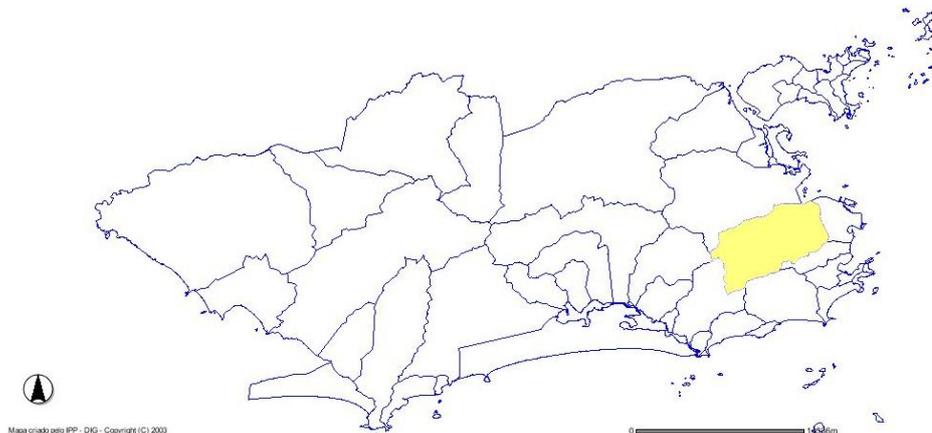


Figura 30 – Mapa adaptado do criado pelo Instituto Pereira Passos das Sub-Bacias do Rio de Janeiro, com destaque para a Sub-Bacia do Canal do Mangue. (Prefeitura do Rio de Janeiro, 2012)

Com as coordenadas das estações e o contorno da Sub-Bacia utilizou-se o programa Surfer® para posicionar essas em relação ao contorno e o programa AutoCad® para delimitar as áreas de influencia de cada estação segundo o método de Thiessen. A Figura 31 apresenta a Sub-Bacia do Canal do Mangue dividida nas pelas áreas de influencia de cada posto pluviométrico.

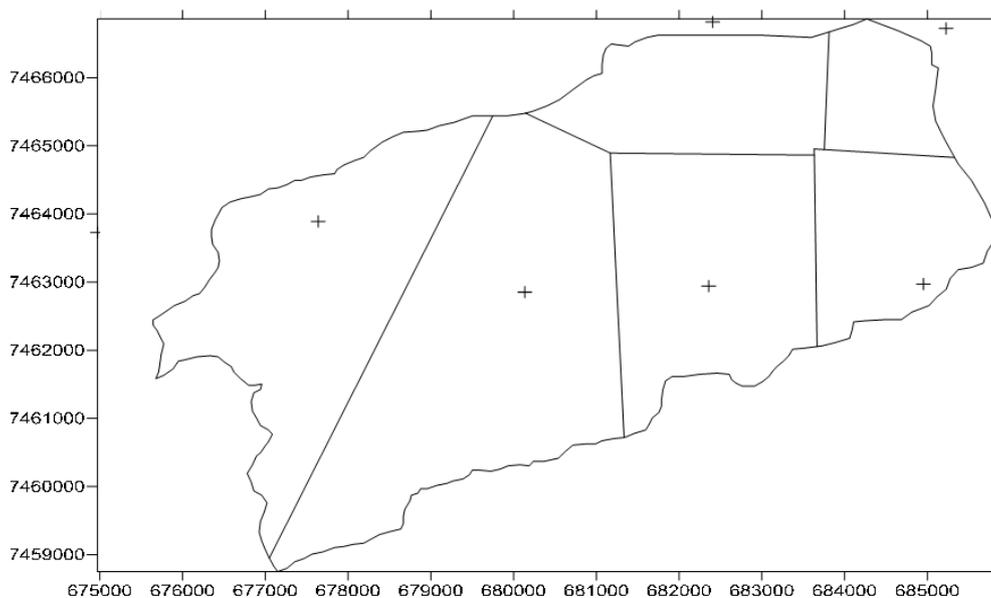


Figura 31 - Sub.Bacia do Canal do Mangue sub dividida em áreas de influencia dos postos pluviométricos de acordo com o método de Thiessen.

Assim através do método de Thiessen, conforme mostrado na equação 27 calculou-se a pluviosidade média e a intensidade de chuva em milímetros por hora (mm/h) para cada dia do ano de 2011.

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \bar{P}_i}{A} \quad (27)$$

Onde:

\bar{P} é a precipitação média na bacia (mm);

P_i é a precipitação no posto i (mm);

A_i é a área do respectivo polígono, dentro da bacia (km²);

A é a área total da bacia

Para estimar a vazão do canal do mangue utilizou-se o método racional mostrado na equação $Q = \frac{i_m A c}{3,6}$ (26, calculando assim a vazão media para cada dia.

O coeficiente de escoamento médio da Sub-Bacia, de acordo com o Plano Diretor de Recursos Hídricos da Região hidrográfica da Baía de Guanabara, produzido pelo consórcio Ecologus-Agrar, é de 0,65.

As áreas utilizadas nos cálculos, tanto do método de Thiessen quanto no método racional foram determinadas com o auxílio do programa AutoCad® e estão mostradas na Tabela 11.

Tabela 11 - Áreas de Influência dos Postos Pluviométricos delimitadas pelo método de Thiessen.

Posto	Tijuca	Tijuca/ Muda	Grajaú	Saúde	São Cristovão	Santa Tereza	Total
Área (Km ²)	8.10	14.54	10.09	2.41	5.13	4.62	44.89

A esta vazão somou-se a vazão para épocas sem chuva, 3m³/s, para assim obter a estimativa final da vazão afluente na seção de interesse. A Tabela 12 exemplifica o mês de abril, pois como já citado este foi o mês com maior intensidade de chuvas.

Tabela 12 - Estimativas para o mês de abril de 2011, para pluviosidade média, intensidade de chuva e vazão afluente no canal do mangue.

Dia	Pluviosidade Media (mm)	Intensidade de Chuva (mm/h)	Vazão Afluente na Seção (m³/s)
01/04/2011	21.20	0.88	10.16
02/04/2011	2.45	0.10	3.83
03/04/2011	3.66	0.15	4.23
04/04/2011	2.90	0.12	3.98
05/04/2011	2.95	0.12	4.00
06/04/2011	0.00	0.00	3.00
07/04/2011	0.00	0.00	3.00
08/04/2011	0.00	0.00	3.00
09/04/2011	5.98	0.25	5.02
10/04/2011	0.00	0.00	3.00
11/04/2011	0.00	0.00	3.00
12/04/2011	0.00	0.00	3.00
13/04/2011	0.00	0.00	3.00
14/04/2011	0.00	0.00	3.00
15/04/2011	0.00	0.00	3.00
16/04/2011	0.00	0.00	3.00
17/04/2011	0.00	0.00	3.00
18/04/2011	0.00	0.00	3.00
19/04/2011	0.00	0.00	3.00
20/04/2011	0.00	0.00	3.00
21/04/2011	0.00	0.00	3.00
22/04/2011	0.00	0.00	3.00
23/04/2011	0.00	0.00	3.00
24/04/2011	49.89	2.08	19.85
25/04/2011	142.72	5.95	51.20
26/04/2011	64.54	2.69	24.80
27/04/2011	7.99	0.33	5.70
28/04/2011	0.20	0.01	3.07
29/04/2011	0.00	0.00	3.00
30/04/2011	0.00	0.00	3.00

Assim, com os dados provenientes das vazões afluentes na seção de montante da região de interesse do estudo, montou-se o hidrograma representado na Figura 29.

4.8.2. Caracterização dos sedimentos do fundo

Não se dispõe de dados de caracterização de sedimentos do fundo do Canal do Mangue, nem no entorno de sua desembocadura na região do Porto do Rio de Janeiro. Os modelos de processos morfológicos do SisBaHiA® permitem a definição de curvas granulométricas específicas em diferentes regiões do domínio de modelagem. No caso, seria necessário conhecer a gama de sedimentos existentes no domínio de modelagem, que seria então segmentada em N classes. Em diferentes áreas do domínio, a curva granulométrica local seria dada pelos percentuais de cada classe de sedimentos no local.

Como não há dados sedimentológicos para a área de interesse adotou-se uma faixa plausível, caracterizada por apenas um diâmetro mediano.

De modo a exemplificar o processo de modelagem, adotou-se um procedimento simplificado, caracterizando os sedimentos da região de interesse com diâmetro mediano $d_{50} = 0.1\text{mm}$ e tensão crítica de mobilidade $\tau_{oc} = 0.1681 \text{ N/m}^2 \pm 20\%$,

Efetivamente, com a tolerância de 20% na tensão crítica do fundo, o valor de d_{50} considerado representa uma faixa de sedimentos que vai de sedimentos finos não consolidados com valor de $\tau_{oc} = 0,134 \text{ N/m}^2$ até areia média fina com $\tau_{oc} = 0,202 \text{ N/m}^2$,

4.8.3. Cargas de sedimentos afluentes

A fórmula de cálculo de transporte de sedimentos adotada foi a de Engelund-Hansen, pois é a que melhor considera a carga total de sedimento não coesivos devido a transporte de fundo e transporte em suspensão, conforme mostrado na seção 3.3.2.

Contudo a vazão sólida nos rios da bacia do Rio Maracanã é desconhecida. Por serem rios com grande parte de seus cursos canalizados em zona totalmente urbanizada, não há fontes significativas de sedimentos. Portanto, é certo que a vazão sólida afluente ao Canal do Mangue tenha magnitude insignificante em condições usuais sem chuvas. Em épocas de grandes enxurradas, a lavagem das ruas e erosões na parte superior dos rios, em áreas montanhosas vegetadas, mas com trechos desmatados e ocupados por favelas, propiciam cargas sólidas significativas.

Além de vazões sólidas de areias, considerou-se vazões de sedimentos finos em suspensão, especialmente siltes e argilas. A cor característica usual das águas do

Canal do Mangue é indicativa de poluição orgânica por esgotos e lavagem de ruas, e não de elevada carga de sedimentos tais como siltes e argilas em suspensão. Em épocas de enxurradas, é possível haver concentrações de sedimentos finos em suspensão em valores elevados, porém, não há dados a este respeito. De modo a exemplificar tais possibilidades admitiu-se uma carga de sedimentos finos em suspensão, Q_{SS} , relacionada às vazões líquidas afluentes, Q_L , da seguinte forma:

$$Q_{SS} = 33,22Q_L^{0,8} \quad (28)$$

Tal expressão provavelmente superestima os valores de concentrações de sedimentos finos em suspensão, e objetiva tão somente gerar dados sintéticos para exemplificar as análises mostradas neste trabalho. (Rosman, Relatório de Modelagem de Processos Sedimentológicos na Região do Canal do Mangue Porto do Rio de Janeiro - RJ, 2011)

5. Resultados e Análises dos Modelos Hidro-Sedimentológicos

Para a verificação dos resultados foram definidos diferentes postos de observação dentro do modelo computacional. Tais postos estão identificados na Tabela 13 e ilustrados no mapa base na Figura 32.

Tabela 13 - Coordenadas dos Postos de Observação inseridos no modelo Computacional.

Postos	Coordenada X (UTM)	Coordenada Y (UTM)
Desembocadura do Canal do Mangue	683570.94	7466649.50
1A	686725.92	7467610.10
1B	685629.03	7468455.85
1C	684545.20	7469245.70
2A	683390.07	7468162.00
3A	683066.17	7467818.00
3B	683333.65	7467195.75
4A	686350.81	7467187.30
4B	685201.14	7467301.23
4C	684330.60	7466974.70

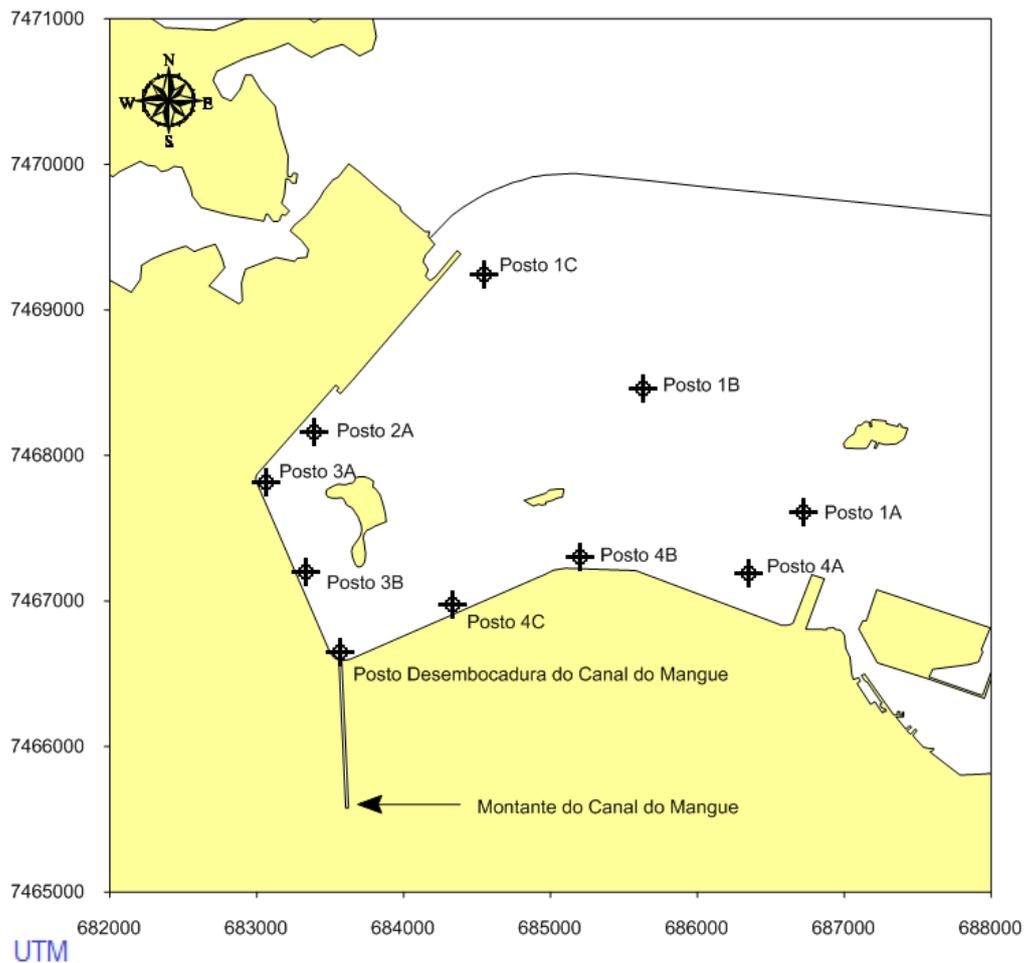


Figura 32 - Ampliação do Mapa base nas cercanias do canal do mangue, com a inclusão dos postos de observação inseridos no modelo computacional.

Como pode ser observado, a localização e a nomenclatura utilizada para identificação dos postos, foram baseadas nos canais de acesso dragados na última obra para tal fim, realizada em 2010-2011, e ilustrados na Figura 6.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para ambos os cenários explicitados nos objetivos do trabalho.

5.1. Cenário de Período Crítico

Este é um cenário Hipotético, em que o Canal do Mangue apresenta vazões muito altas, provenientes de precipitações intensas e prolongadas em toda a sua bacia hidrográfica.

A análise desse será dividida de acordo com os modelos rodados para ele, assim serão analisados os resultados pertinentes do modelo hidrodinâmico puro, do modelo hidrodinâmico com fundo móvel e do modelo de deriva de sedimentos finos em suspensão.

5.1.1. Modelo Hidrodinâmico

Através do modelo Hidrodinâmico é possível verificar as tensões de atrito no fundo, em cada ponto do domínio, gerado pelas correntes do corpo d'água. Permite-se então que sejam identificados os pontos onde a tensão de atrito no fundo ultrapassa a tensão crítica e propicia o movimento de sedimentos de fundo.

Na Figura 33 mostra-se um mapa de isolinhas de ocorrência de tensões de atrito no fundo geradas por correntes na Baía de Guanabara ao longo de todo o período do cenário, quatro meses. Estas são as ocorrências de tensões com valores acima da tensão crítica de mobilidade para os sedimentos com diâmetro mediano $d_{50} = 0.1\text{mm}$, ou seja, $\tau_{oc} = 0.1681 \text{ N/m}^2$.

O mapa da Figura 33 mostra que as situações propícias ao transporte de sedimentos, em decorrência das vazões do canal do mangue, ocorrem em uma faixa de 10 a 20 % do tempo de modelagem, ou seja, aproximadamente de 12 a 24 dias. Tal tempo evidencia-se por ser semelhante ao de ocorrências de cheias do hidrograma, indicando que as situações de transporte de sedimentos nas cercanias do canal do mangue ocorrem quase exclusivamente em momentos de chuvas mais intensas.

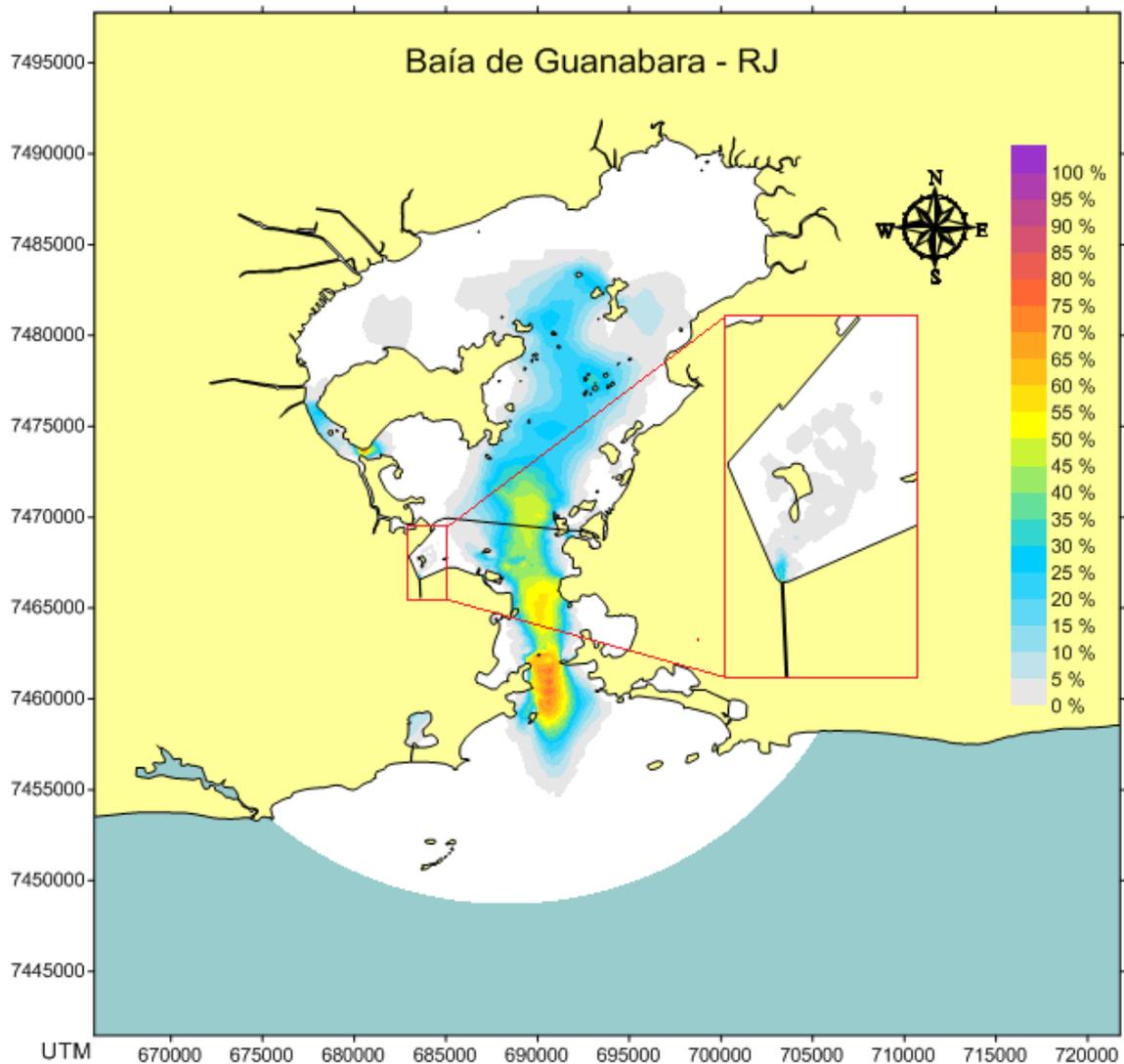


Figura 33 - Ocorrência de tensões no fundo com valores suficientes para mobilizar sedimentos como areia muito fina de diâmetro mediano $d_{50} = 0,1\text{mm}$, considerando o Canal do Mangue com vazões de cheia, conforme hidrograma hipotético de período crítico.

5.1.2. Modelo Hidrodinâmico com Fundo Móvel

O modelo Hidrodinâmico com fundo móvel permite acompanhar a morfodinâmica do fundo do corpo d'água estudado em cada passo de tempo, assim é possível verificar quando, por quanto tempo e onde ocorrem assoreamentos e erosões no leito da área de estudo.

A Figura 34 mostra o mapa de isolinhas de alturas de erosão e assoreamento de areias finas no instante com maior assoreamento, logo após o maior pico de vazão do canal do mangue. Pode-se notar a formação de um depósito de sedimentos logo após a desembocadura do canal, o que é condizente com o apresentado na carta náutica

(Figura 18) e por consequência no mapa batimétrico (Figura 20), que mostram uma tendência de assoreamento nessa região. Tal assoreamento possui leve derivação em direção ao cais de São Cristóvão.

Este mapa, apesar da difícil visualização, apresenta alturas de erosão ocorrendo no interior do canal do mangue. Tal fato é devido às grandes velocidades de escoamento apresentadas nesse instante dentro do canal, promovendo assim o transporte de sedimentos em seu interior e posterior deposição na desembocadura devido à diminuição das velocidades.

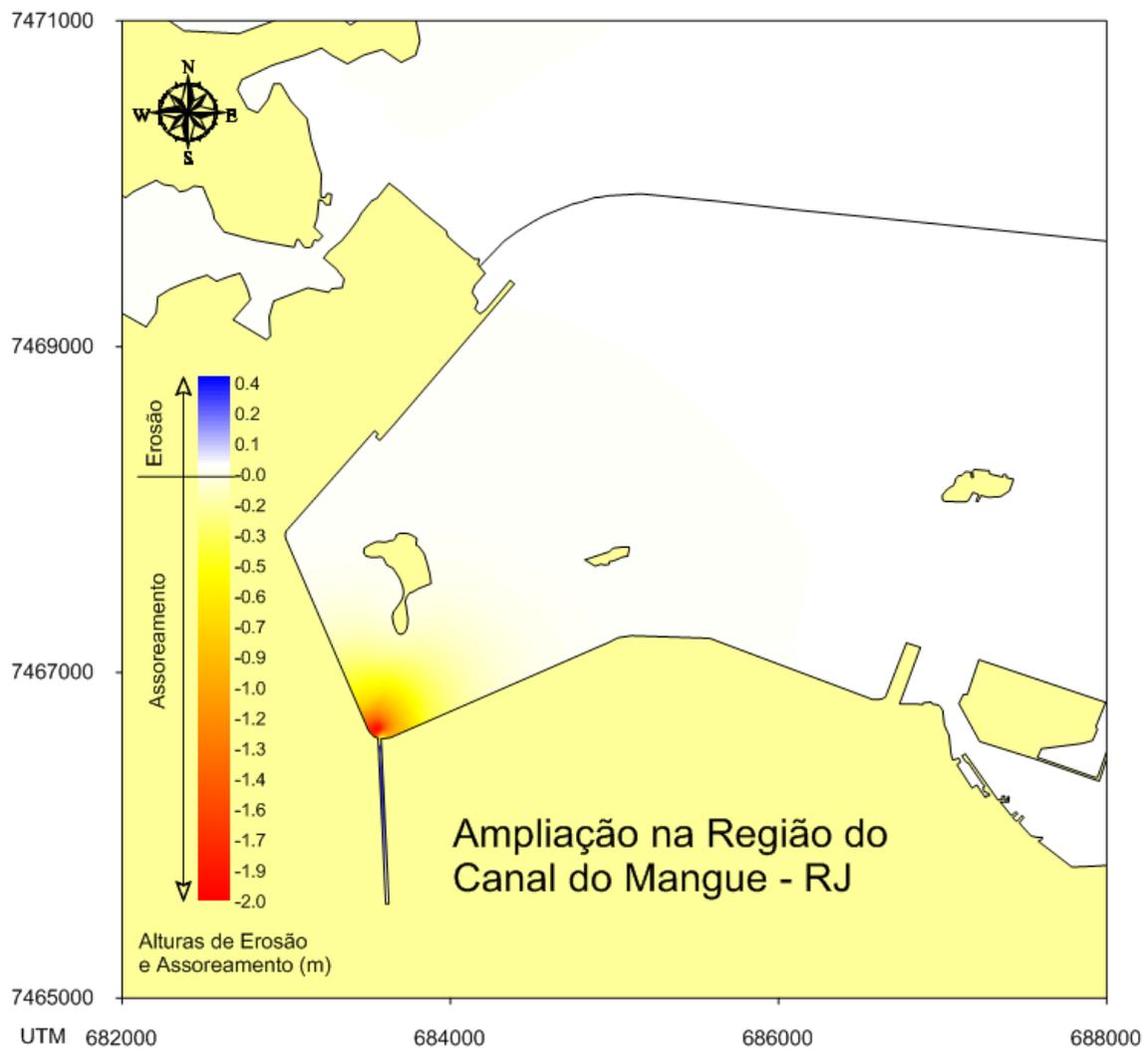


Figura 34 - Alturas de erosão e assoreamento nas cercanias do Canal do Manguê no Porto do Rio de Janeiro, no instante posterior à vazão de pico do hidrograma para o cenário de período crítico, apresentada na Figura 28.

Para uma análise temporal da evolução morfodinâmica da área de estudo, montou-se o gráfico ilustrado na Figura 35, onde são apresentadas as variações da cota do fundo nos postos de observação da Figura 32.

Nota-se claramente neste gráfico que na região de desembocadura as variações das alturas de assoreamento são muito maiores que nos canais de acesso do Porto do Rio de Janeiro. Contudo tanto na desembocadura quanto nos outros pontos, a interrupção das vazões de pico em conjunto com as correntes locais, de ação ininterrupta, provocam a erosão e a redistribuição das areias finas dos depósitos formados para toda a região do entorno.

Essa redistribuição leva a variação na cota de fundo tender a estabilizar em 0,1 metros, ou seja, o evento de sucessivas chuvas intensas provoca um assoreamento considerável em algumas regiões do porto, porém a posterior redistribuição dos sedimentos faz com que, ao final, o assoreamento residual seja da ordem de 10 centímetros, o que é um valor pequeno considerando que se tem uma coluna d'água da ordem de 10 a 15 metros nos canais de acesso.

O gráfico ilustrado na Figura 35, também mostra que os assoreamentos apenas ocorrem nos períodos de grandes enxurradas, e se dissipam pouco mais lentamente do que se formam, recuperando mais rapidamente quanto maior for a diferença de altura provocada. É importante ressaltar que o tempo necessário para que haja tal dissipação é da ordem de dias, o que faz com que nesse intervalo se tenha alturas de assoreamento significativas nos arredores da desembocadura do canal do mangue, capazes de afetar a operação rotineira no porto.

Os canais de acesso do Cais de São Cristovão, do Cais da Gamboa e do Cais de Ro-Ro (Caju) foram os que apresentaram maiores alturas de assoreamento, respectivamente. Isso se explica pelo fato destes serem os mais próximos ao canal do mangue e pela tendência, comentada anteriormente, de maior deriva de sedimentos para essa região do Porto.

Chama-se a atenção para o fato da oscilação nas alturas de assoreamento apresentadas pelo posto da desembocadura do canal do mangue. Estas são decorrentes das oscilações de maré que provocam variações na velocidade de escoamento no canal do mangue e por consequência na sua capacidade de transporte de sedimentos.

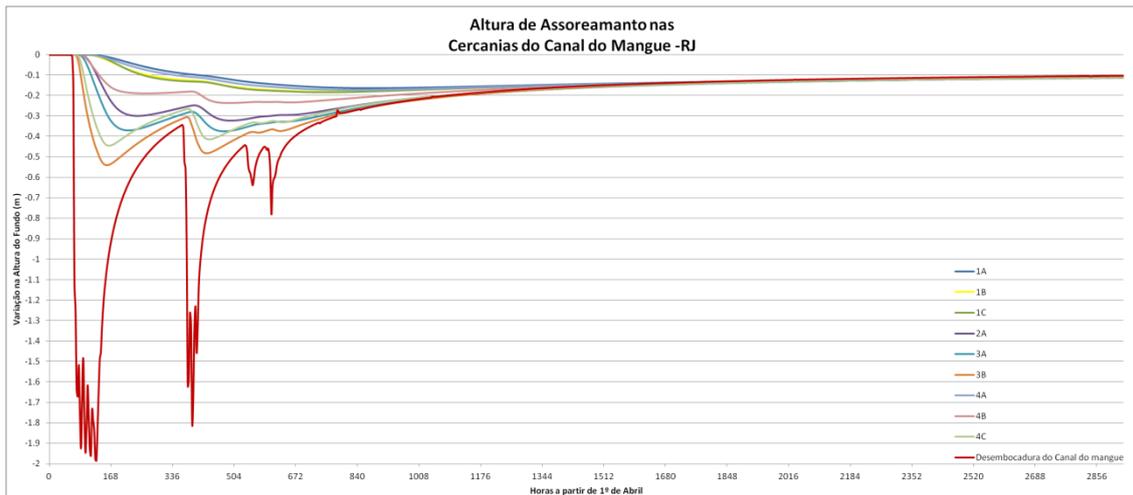


Figura 35 - Altura de Assoreamento nas Cercanias do Canal do Mangue - RJ, para cada posto de observação adotado no modelo conforme Figura 32. Considerando o cenário de período crítico.

O gráfico ilustrado na Figura 36, apresenta as variações das descargas sólidas de areia fina, $d_{50} = 0.1\text{mm}$, calculadas pelo SisBaHia® para a seção de montante do canal do mangue. Observa-se que essas descargas sólidas provavelmente são superestimadas, pois os sedimentos existentes no leito do canal podem apresentar granulometria superior ao estipulado.

Contudo a análise do gráfico permite identificar que somente vazões fluviais elevadas provocam descargas sólidas no canal do mangue, vazões líquidas menores que $15\text{m}^3/\text{s}$ provocaram descargas sólidas desprezíveis. As oscilações observadas na descarga sólida são causadas por efeitos de maré.

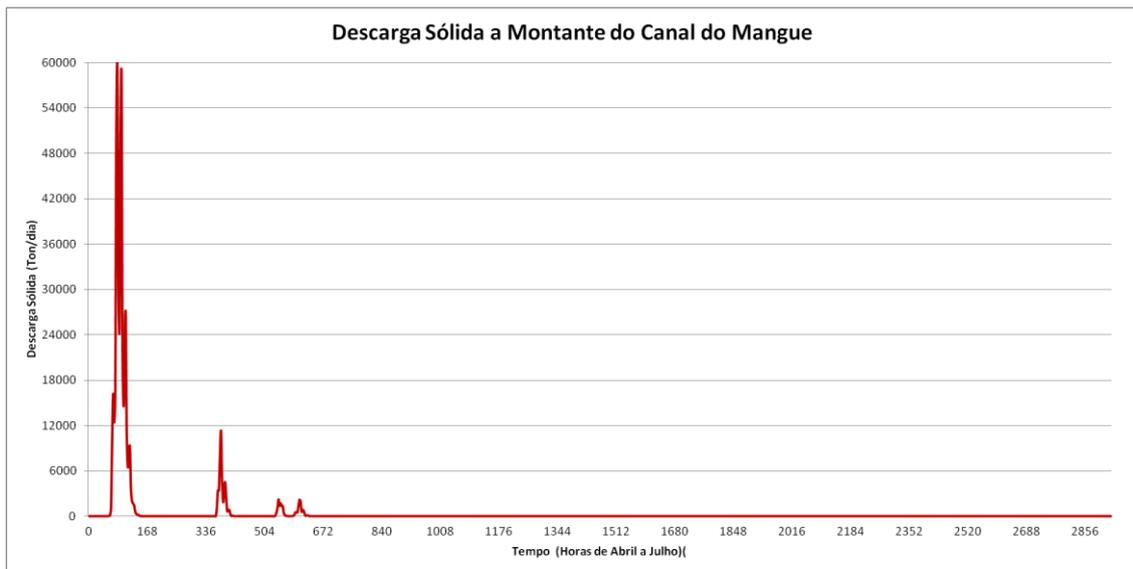


Figura 36 - Descarga sólida de areia fina, $d_{50} = 0.1\text{mm}$, correspondendo ao cenário de hidrograma crítico, passando pela seção de montante de referência, a cerca de 1 km da desembocadura.

5.1.3. Deriva de Sedimentos Finos em Suspensão

Para avaliação da deriva e deposição primária de sedimentos finos trazidos pelo Canal do Mangue para o porto do Rio de Janeiro, utilizou-se o Modelo de Transporte Lagrangeano do SisBaHiA®. Tal modelo permite observar a trajetória de uma partícula que é lançada na água por uma determinada fonte, assim como o seu local de deposição primária.

Na caracterização da fonte utilizou-se a equação 28 para calcular a concentração de sedimentos finos em suspensão, siltes e argila, afluentes na seção de montante do canal do mangue, assim o gráfico ilustrado na Figura 37 representa tal aporte de sedimentos finos baseados no hidrograma referente ao cenário.

No gráfico observa-se que a concentração mínima de sedimentos é de 80mg/L, tal valor se enquadra dentro de valores usuais a estuários. Os valores de pico próximos a 1300mg/L, apesar de altos para estuários, também são coerentes com as águas de coloração amarronzadas ocorrentes em situações de enxurradas.

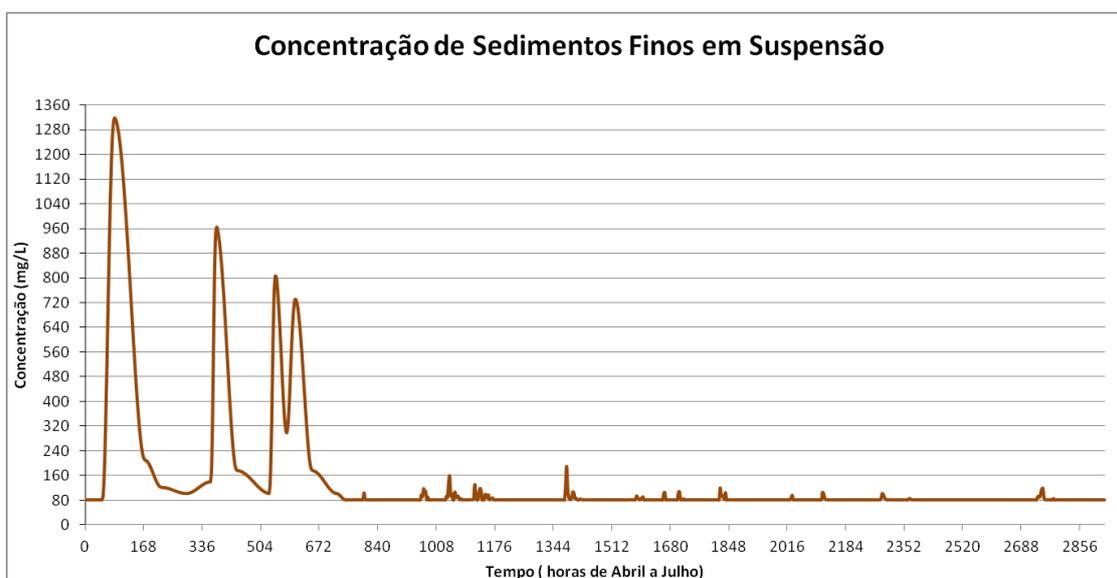


Figura 37 - Concentrações de sedimentos finos em suspensão, siltes e argilas, correspondendo aos hidrogramas hipotéticos do cenário com período crítico, passando pela seção de montante de referência, a cerca de 1 km da desembocadura.

Com as concentrações de sedimentos finos impostas à fonte, no canal do mangue, o modelo de transporte lagrangeano possibilita montar o mapa de isolinhas das alturas de deposição primária após o decorrer do período do cenário. Esse mapa é mostrado na Figura 38.

No mapa é possível observar uma deposição preferencial similar à apresentada pelo modelo morfodinâmico, com maior deposição nas regiões próximas à desembocadura do Canal do Mangue e na direção do cais de São Cristovão.

Esse modelo ainda apresenta uma tendência, não mostrada claramente pelo morfodinâmico, da deposição de sedimentos seguir pelo canal de acesso do cais de São Cristovão, para o canal de acesso do cais do caju (Ro-Ro e containers).

Tal tendência se mostra mais clara no modelo de deriva de sedimentos finos justamente por esse trabalhar com partículas menores e mais leves que são carregadas mais facilmente pelas correntes, e também por ilustrar a deposição primária, ou seja, não há resuspensão do sedimentado e possibilidade de depositar em outro local.

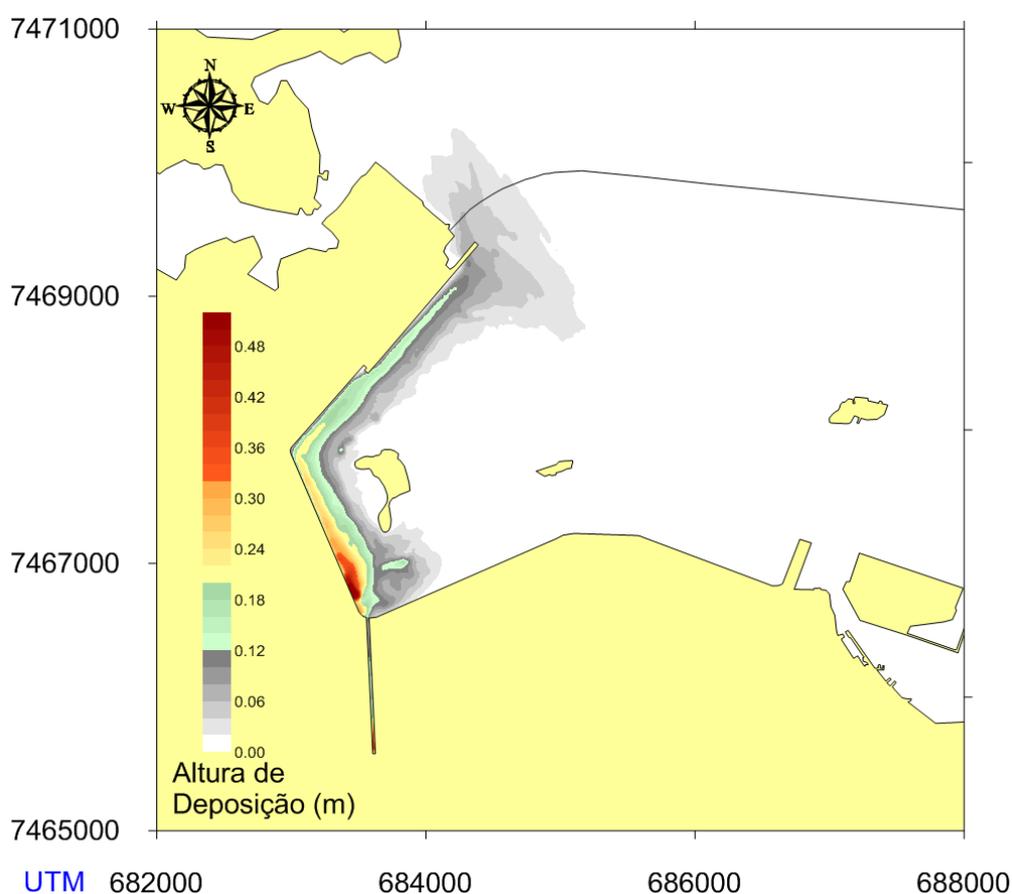


Figura 38 - Mapa de isolinhas de alturas de deposição primária de sedimentos finos em suspensão, siltes e argilas, oriundos do Canal do Mangue. Resultado após o período do cenário crítico, tendo a montante do Canal as vazões e concentrações de tal cenário.

5.2. Cenário de Ano Típico

Este é um cenário hipotético, em que o Canal do Mangue apresenta vazões afluentes na seção de referência a um quilometro da sua desembocadura. Estas vazões foram estimadas através das precipitações na bacia hidrográfica conforme mostrado na seção 4.8.1.1.

A análise desse cenário, assim como a do anterior, será dividida de acordo com os modelos rodados para ele, assim serão analisados os resultados pertinentes do modelo hidrodinâmico puro e do modelo hidrodinâmico com fundo móvel.

Para o cenário de ano Típico não foi simulada a deriva de sedimentos finos em suspensão, pois não se justifica avaliar a altura de deposição primária dos sedimentos para cenários de longo prazo, pelo fato de que neste cenário os fenômenos de ressuspensão, que não são representados pelo modelo Lagrangeano, são mais pronunciados.

5.2.1. Modelo Hidrodinâmico

Para o cenário de ano típico, foi construído o mapa de isolinhas de tensão de atrito no fundo mostrado na Figura 39, similar ao de período crítico da Figura 33.

O mapa mostra ocorrências de tensões capazes de transportar sedimentos de diâmetro mediano $d_{50} = 0.1\text{mm}$, decorrentes de vazões do canal do mangue, pouco superiores a 0%, não atingindo ao menos 5%, que seriam 18 dias do ano. Logo pode-se verificar que o movimento de sedimentos causados pelo canal do mangue ocorre apenas nas maiores chuvas do ano.

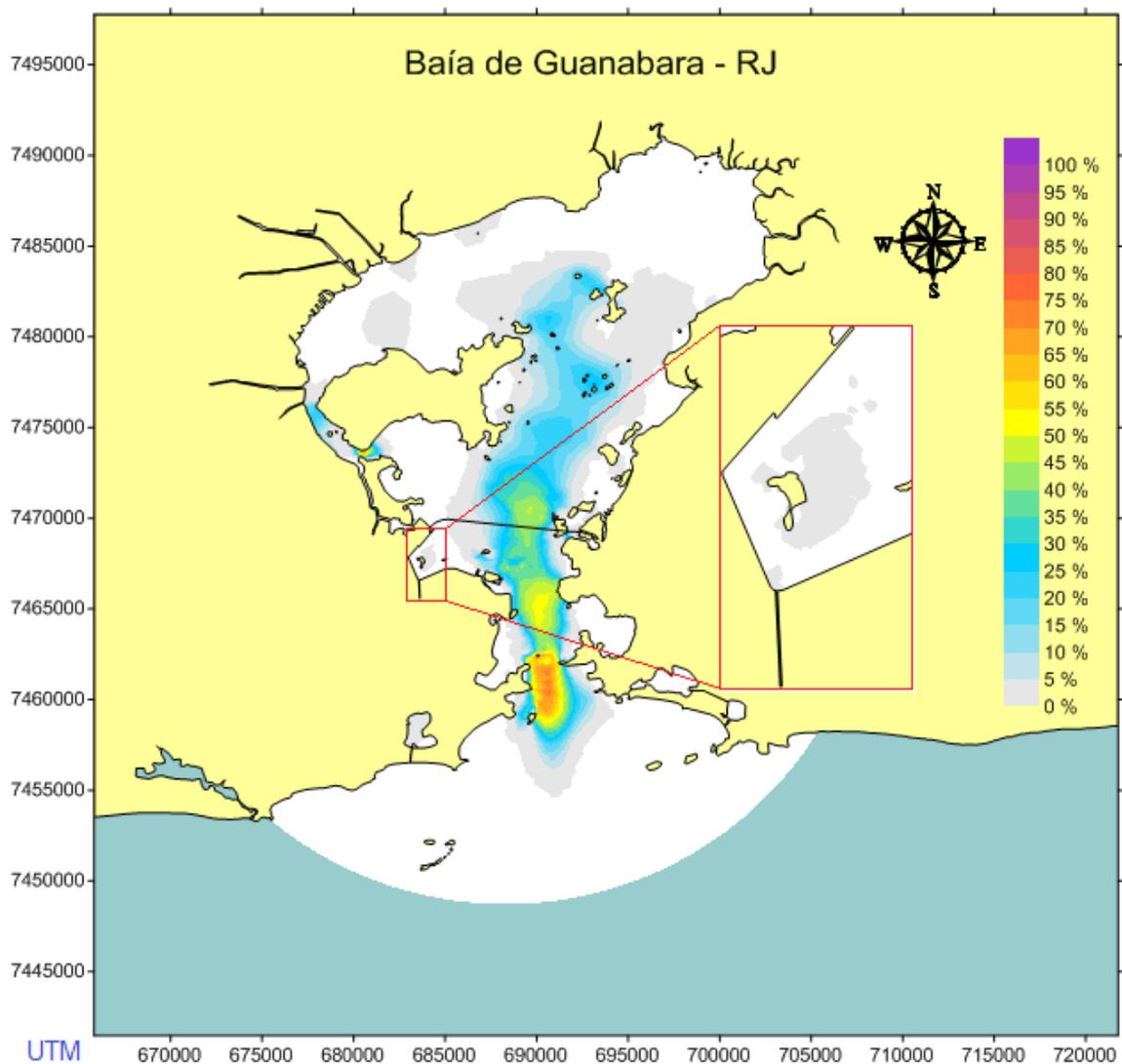


Figura 39 - Ocorrência de tensões no fundo com valores suficientes para mobilizar sedimentos como areia muito fina de diâmetro mediano $d_{50} = 0,1\text{mm}$, considerando o Canal do Mangue com vazões de cheia, conforme hidrograma hipotético de ano típico.

5.2.2. Modelo Hidrodinâmico com Fundo Móvel

Para o cenário de ano típico, foi construído o mapa de isolinhas de tensão de atrito no fundo mostrado na Figura 40, similar ao mostrado na Figura 34, mas com escala muito inferior de alturas de assoreamento e erosão.

O mapa apresenta a situação final do cenário, onde se pode notar que as alturas de assoreamento e erosão não são significativas, indicando uma tendência à manutenção das profundidades nesta região.

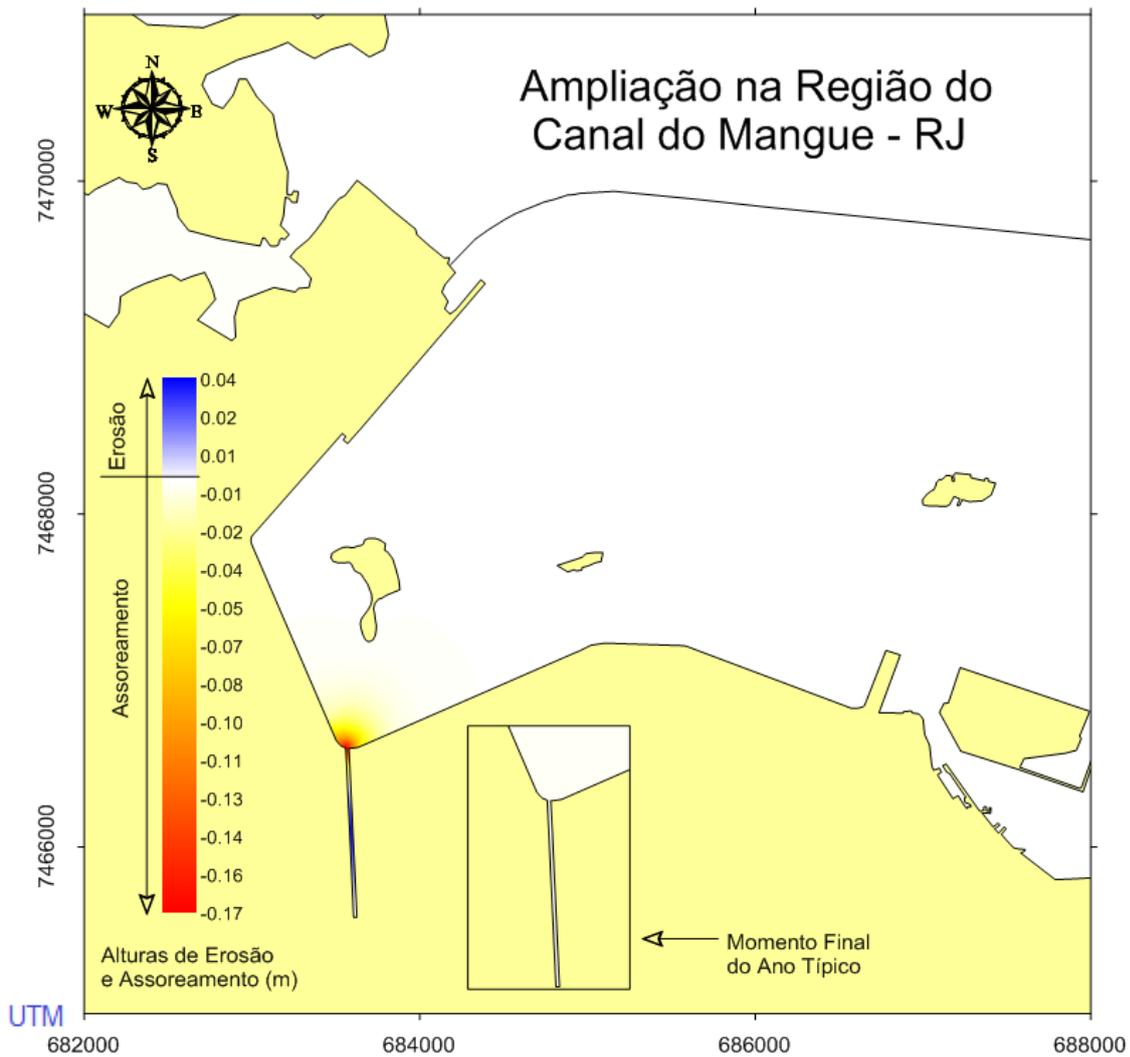


Figura 40 - Alturas de erosão e assoreamento nas cercanias do Canal do Mangue no Porto do Rio de Janeiro, no instante posterior à vazão de pico do hidrograma hipotético do ano típico, apresentado na Figura 29, e no instante final do cenário.

A Figura 41 ilustra o gráfico da evolução morfodinâmica da área de estudo, através das variações de altura nos postos de observação da Figura 32. E a Figura 42 destaca apenas os canais de acesso para uma melhor interpretação e compreensão dos dados obtidos.

Como observado na Figura 40, a formação de bancos de areia fina é pequena, próximo de 17 cm, e ocorre principalmente na desembocadura do canal do mangue e em momentos de chuvas mais intensas. Posteriormente as chuvas, a ação das correntes redistribuem os grãos ao longo do entorno, dissipando esses pequenos bancos de areia fina.

Os canais de acesso do Porto do Rio de Janeiro sofrem variações de cota de fundo que chegam no máximo, em momentos de pico de vazões, a 15 mm, mostrando que as alterações causadas por chuvas usuais é insignificante. Além disso, tal como na região de desembocadura, há o efeito da redistribuição dos sedimentos pela ação hidrodinâmica, fazendo com que as variações residuais sejam praticamente nulas.

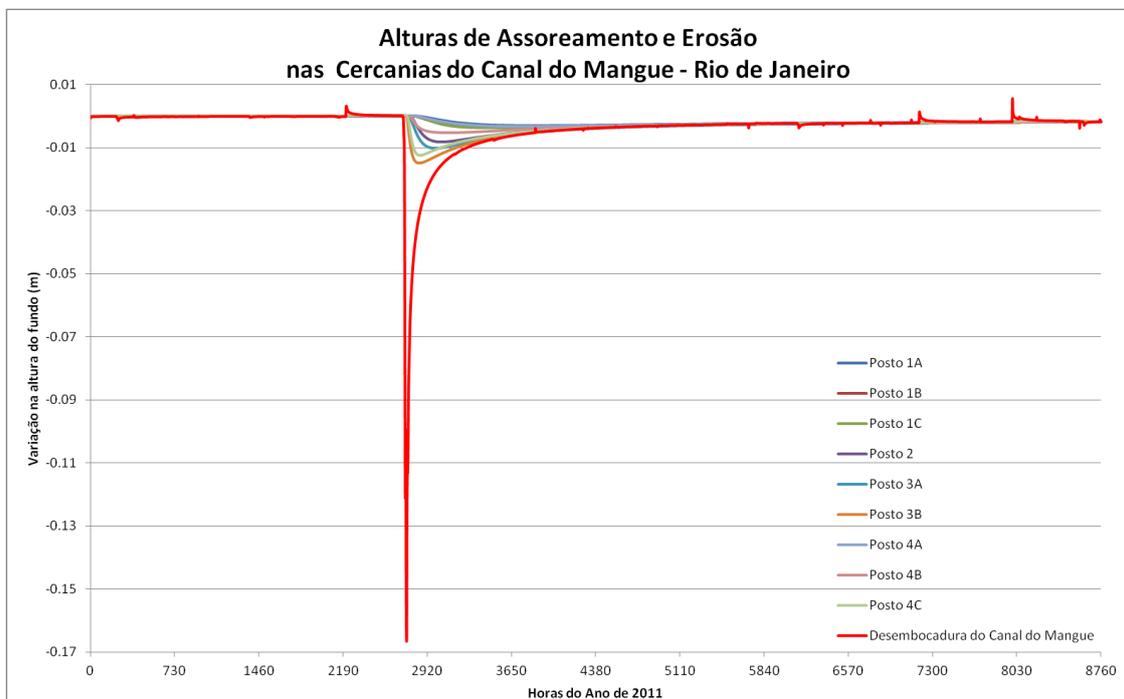


Figura 41 - Altura de Assoreamento e Erosão nas cercanias do Canal do Mangue - RJ, para cada posto de observação adotado no modelo conforme Figura 32. Considerando o cenário de ano típico.

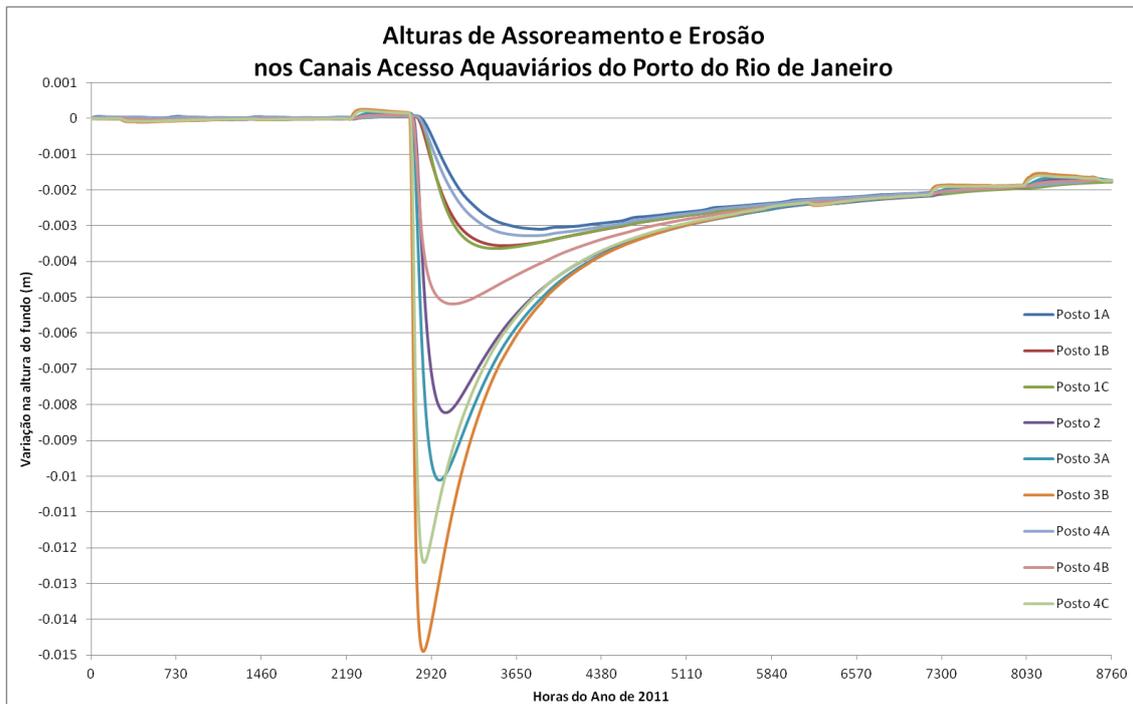


Figura 42 - Altura de Assoreamento e Erosão nos canais de acesso do Porto do Rio de Janeiro, para cada posto de observação adotado no modelo conforme Figura 32. Considerando o cenário de ano Típico.

O gráfico ilustrado na Figura 43, apresenta as variações das descargas sólidas de areia fina, $d_{50} = 0.1\text{mm}$, calculadas pelo SisBaHiA[®] para a seção de montante do canal do mangue no período do cenário de ano típico. Assim como no cenário anterior observa-se que essas descargas sólidas provavelmente são superestimadas, pois os sedimentos existentes no leito do canal podem apresentar granulometria superior ao estipulado.

O gráfico permite identificar que somente vazões fluviais maiores que $15\text{m}^3/\text{s}$ geram descargas sólidas, mesmo que muito pequenas se comparadas com a descarga sólida provocada pela vazão de pico de $55\text{m}^3/\text{s}$.

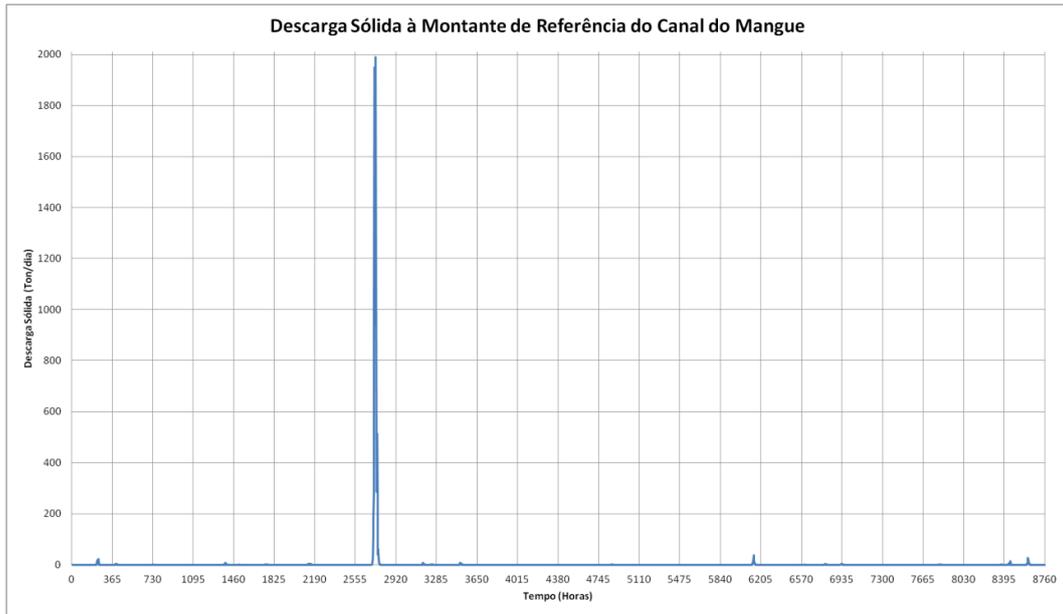


Figura 43 – Descargas sólidas de areia fina, $d_{50} = 0.1\text{mm}$, correspondendo ao cenário de ano Típico, passando pela seção de montante de referência, a cerca de 1 km da desembocadura.

Na Figura 44 é apresentado um destaque das descargas sólidas de areias fina, $d_{50} = 0,1\text{ mm}$, para o maior período de chuva do cenário de ano Típico. Nela podem-se observar três picos de descarga sólida que simbolizam três diferentes picos de chuva, onde a vazão afluyente e sua descarga sólida correspondente se mantiveram mais elevadas por um período de aproximadamente 54 horas, ou seja, pouco mais de dois dias.

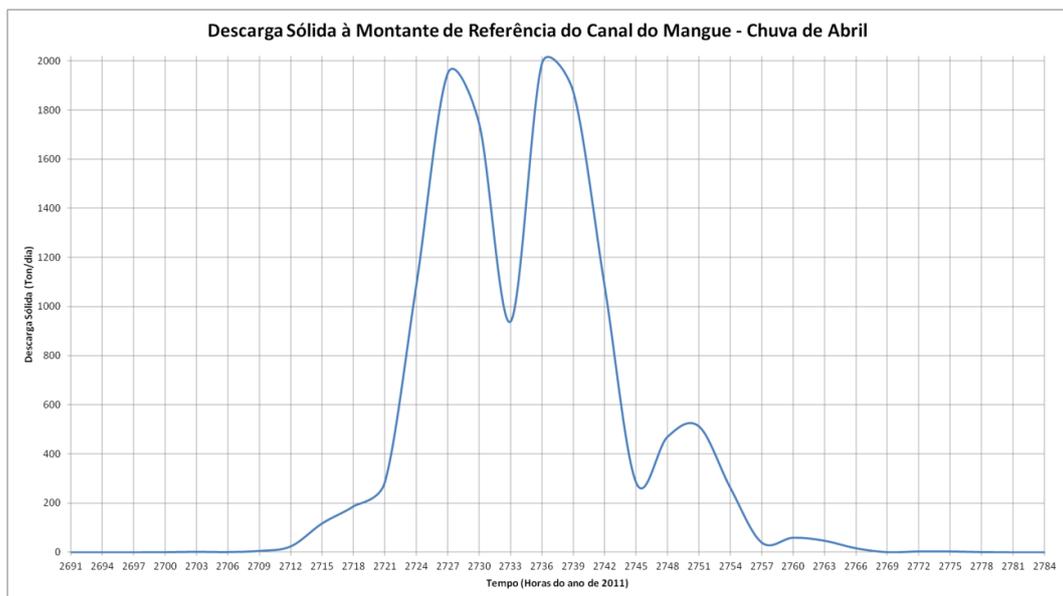


Figura 44 - Destaque das descargas sólidas de areias fina, $d_{50} = 0,1\text{ mm}$, para o maior período de chuva do cenário de ano Típico, passando pela seção de montante de referência, a cerca de 1 km da desembocadura.

6. Análise Comparativa dos Cenários

Como observado nas análises dos cenários, estes apresentam resultados consideravelmente diferentes em relação ao transporte e deposição dos sedimentos na região do Porto do Rio de Janeiro. Assim nesse tópico comparar-se-á tais diferenças de acordo com as análises de cada cenário.

Comparando as porcentagens de ocorrência de tensões superiores à tensão crítica apresentados nas Figura 33 e Figura 39, cenário com período crítico e cenário de ano típico respectivamente, e destacados na Figura 45, observa-se similaridade nessas ocorrências no centro do porto, onde não há canais de acesso e onde a profundidade é relativamente pequena.

Contudo na desembocadura do Canal do Mangue existe praticamente ocorrência de tensões capazes de mobilizar sedimentos apenas no cenário crítico, corroborando a análise realizada neste cenário sobre haver apenas capacidade de transporte de sedimentos em situações de chuvas intensas.

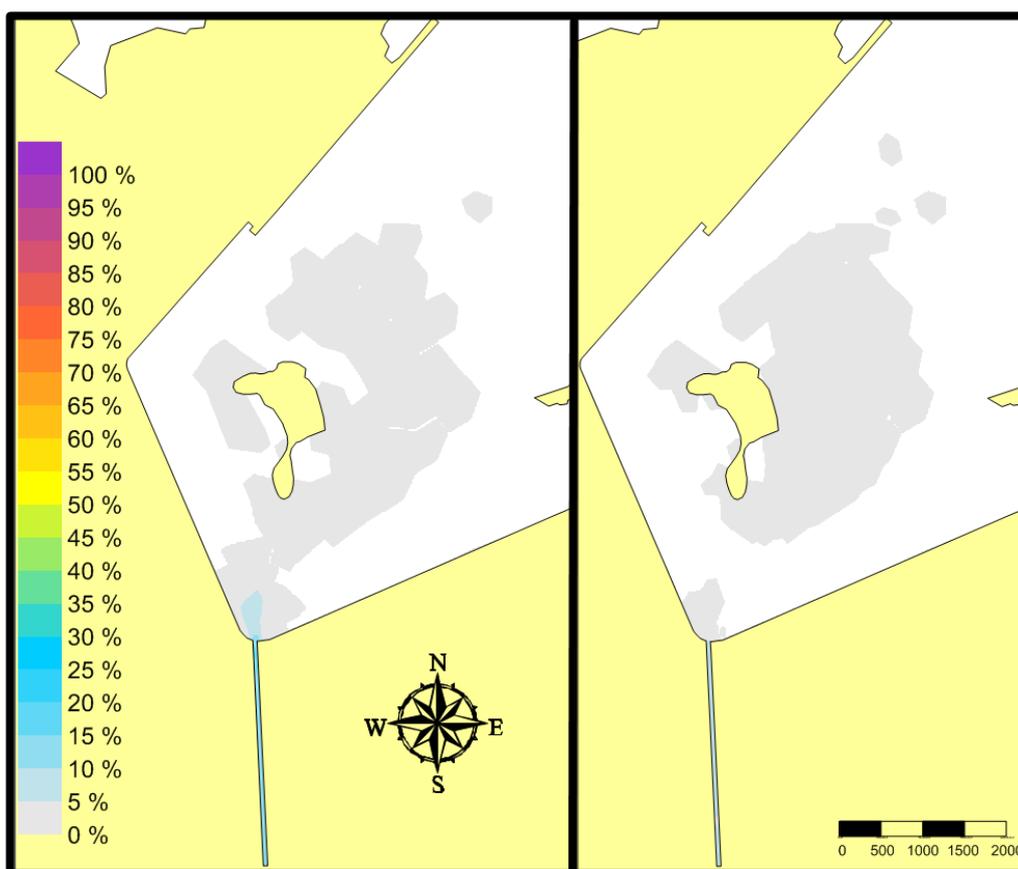


Figura 45 - Comparativo dos cenários estudados quanto à ocorrência de tensões no fundo com valores suficientes para mobilizar sedimentos como areia muito fina de diâmetro mediano $d_{50} = 0,1\text{mm}$.

Para comparar o assoreamento causado pelo Canal do Mangue no Porto do Rio de Janeiro, produziram-se as Figura 46 e Figura 47 que apresentam gráficos comparativos de assoreamento na desembocadura e de descargas sólidas na seção a 1 km a montante da desembocadura em um mês de abril, pois este foi o mês com a maior chuva do ano de 2011.

Na Figura 46 observa-se claramente um assoreamento ao longo do tempo muito maior do cenário de período crítico, pois este apresenta chuvas maiores e mais prolongadas que o de ano típico. Pode-se notar ainda que para chuvas semelhantes, a variação de ambos é similar, contudo quando ocorrem chuvas de intensidades semelhantes de forma seguida a tendência será formar bancos de areia maiores do que o esperado para eventos singulares.

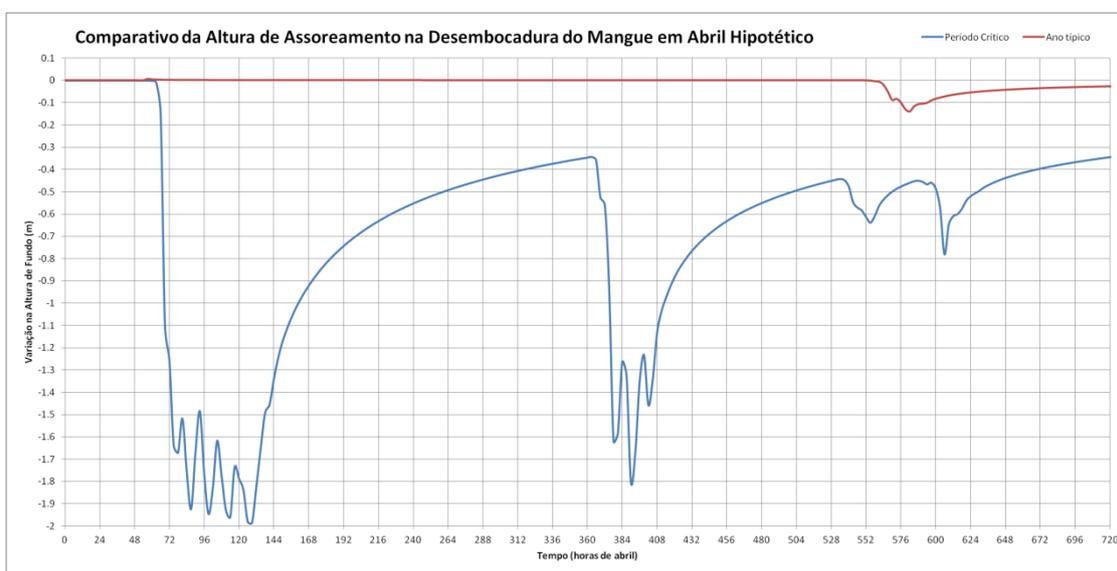


Figura 46 - Comparativo das alturas de assoreamento na Desembocadura do Canal do Mangue em Abril.

A Figura 47 mostra o comparativo entre as chuvas ocorridas em ambos os cenários através das descargas sólidas produzidas pelas suas vazões afluentes. Aponta-se ainda para a relação não-linear entre a descarga sólida e a descarga líquida. Neste caso uma vazão de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ provoca uma descarga 30 vezes maior do que uma vazão de aproximadamente $50 \text{ m}^3/\text{s}$, isto ocorre pelo fato de que na fórmula de Engelund e Hansen, adota-se que a descarga sólida é proporcional à tensão de atrito no fundo elevada a $5/2$, que por sua vez é proporcional ao quadrado da velocidade de escoamento, resultando que a descarga sólida é proporcional a velocidade elevada à quinta potência.

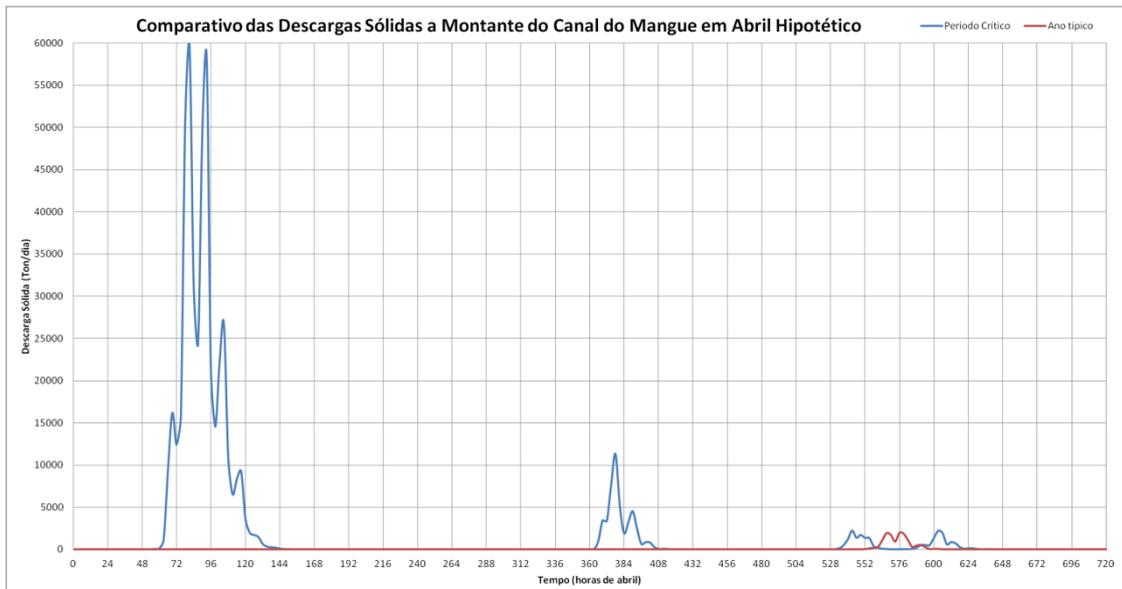


Figura 47 - Comparativo das Descargas Sólidas a Montante do Canal do Manguê em Abril.

7. Considerações Finais

A modelagem hidro-sedimentológica computacional mostrou-se uma ferramenta com potencial para realização de estudos de prognóstico de processos sedimentológicos com alteração de batimetria em corpos d'água, apresentando no caso estudado, resultados coerentes com o esperado na teoria.

De acordo com os resultados obtidos pelas simulações dos diversos cenários, pode-se estimar que o Canal do Manguê não possui influência significativa, em condições usuais de vazões, nos processos de assoreamento nos canais de acesso aos cais do Porto do Rio de Janeiro. Já em eventos de chuvas extremas na bacia do Canal do Manguê, ocorrem assoreamentos mais acentuados nas cercanias da desembocadura do canal no Porto do Rio.

No entanto, as profundidades originais do canal de acesso são reestabelecidas alguns dias após o evento de cheia, pela ação da hidrodinâmica no porto. Logo, a operação logística portuária, principalmente para navios de maiores calados, pode ser afetada temporariamente na ocasião de uma chuva muito intensa na bacia.

Por fim, os resultados obtidos para o caso estudado não podem ser encarados como uma representação precisa da magnitude dos fenômenos de deriva de sedimentos e dos processos de erosão e assoreamento que ocorrem na região do Porto do Rio de Janeiro, em especial nos canais de acesso aos cais, já que para se

fazer possível um estudo de prognóstico quantitativo condizente com os fenômenos reais é preciso que se tenha uma grande quantidade de dados, que serão explicitados na seção 8.

8. Recomendações

A modelagem hidro-sedimentológica computacional pode ser uma ferramenta eficiente de prognósticos e auxílio a tomada de decisão, contudo ela é dependente de uma base de dados consistente e representativa do ambiente a ser estudado.

Assim, de forma a obter dados que possibilitem uma modelagem mais realística das ações e reações ocorridas na região de desembocadura do Canal do Mangue, fazem-se necessários maiores estudos tanto da área de interesse, quanto da região onde se encontra o Canal do Mangue, para definir condições iniciais e de contorno e dados para calibração do modelo.

Definir as condições de contorno na seção de montante do Canal do Mangue, a cerca de um quilômetro da desembocadura, é de extrema importância, pois estes possibilitarão, de forma mais efetiva, definir o real comportamento do canal ao longo de um ano hidrológico.

Recomenda-se então um programa para o levantamento de dados hidro-sedimentológicos mensais de vazões líquidas e descargas sólidas ao longo de um ano hidrológico, assim como uma caracterização dos sedimentos em trânsito no fundo e em suspensão. Nesse caso há de se levar em conta que a seção de montante se encontra sob efeito de maré e assim para evitar irregularidades pertinentes às mares de quadratura da Baía de Guanabara, os dados devem ser recolhidos em maré de sizígia.

Nesse programa de levantamento de condições de contorno, deve ser estabelecido a coleta de dados em dias de chuvas intensas, pois como mostrado nesse trabalho estas são as épocas com maiores interferências e mudanças nas características hidro-sedimentológicas do canal do mangue.

Assim como a definição das condições de contorno são essenciais para uma boa acurácia do modelo, as condições iniciais e os dados de calibração do modelo também são fundamentais para obtenção de resultados mais fiáveis.

Uma recomendação para futuros estudos dessa região é o levantamento de dados batimétricos mais detalhados e a caracterização sedimentológica do fundo do canal do mangue e de sua circunvizinhança no Porto do Rio de Janeiro.

Recomenda-se que sejam realizadas caracterizações e levantamentos batimétricos nas áreas mostradas na Figura 48, de forma a monitorar a evolução morfodinâmica dos canais próximos a desembocadura e prover maior quantidade de dados para calibração e validação dos modelos computacionais.

Na Figura 48, são ilustradas três diferentes áreas, em amarelo é representado o canal do mangue e sua desembocadura, em azul os canais de acesso mais próximos e mais afetados e em verde os canais de acesso que apresentaram também variações, porém menores que os da área azul.

Em um primeiro instante, com ocorrência de chuva intensa, todas as áreas devem ser monitoradas, com caracterização sedimentológica principalmente do provável banco de areia formado na desembocadura do canal do mangue, contudo o monitoramento contínuo, para possibilitar a calibração do modelo, pode ocorrer apenas nas áreas azul e amarela, por apresentarem maior relevância quanto às alterações morfológicas.



Figura 48 - Campos de controle e monitoramento das características morfológicas e sedimentológicas recomendados, com a área do canal do mangue em amarelo, do campo próximo em azul e do campo afastado em verde.

9. Referências

AECO - Área de Engenharia Costeira e Oceânica. (2011). *PORTO DO RIO DE JANEIRO - Relatório Final de andamento dos serviços de modelagem computacional*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.

Companhia Docas do Rio de Janeiro. (2002). *Estudo de Impacto Ambiental - Projeto de Dragagem do Canal de Acesso e das Bacias de Evolução dos Terminais do Porto do Rio de Janeiro e de Niterói*. Rio de Janeiro.

Companhia Docas do Rio de Janeiro. (2010). *Docas do Rio - Autoridade Portuária*. Acesso em Abril de 2012, disponível em <http://www.portosrio.gov.br/>

Consócio Ecologus-Agrar. (2003/2006). *Plano Diretor de Recursos Hídricos da Região da Baía de Guanabara*. Rio de Janeiro.

- De Paula, T. P. (2009). *Análise Hidrodinâmica e de Renovação de Massas d'Água na Lagoa Rodrigo de Freitas através do Uso de Modelagem Computacional*. Rio de Janeiro: Escola Politécnica/UFRJ.
- De Sousa e Silva, M. G. (2011). *Otimização do Emissário do Rio Vermelho, Salvador – BA, via Modelagem Computacional*. Rio de Janeiro: Escola Politécnica/UFRJ.
- DHN, Diretoria de Hidrografia e navegação. (2012). Acesso em 03 de Março de 2012, disponível em <https://www.mar.mil.br/dhn/chm/images/cartas/1501.html>
- Machado, B. V., & Da Silva, R. M. (2010). *Análise da Influência da Baía da Guanabara na Qualidade da Água das Praias Oceânicas Adjacentes através da Modelagem Computacional*. Rio de Janeiro: Escola Politécnica/UFRJ.
- Miguez, M. G. (2001). *Modelo Matemático de Células de Escoamento*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- O Rio de Antigamente. (2012). Acesso em 25 de Maio de 2012, disponível em <http://oriodeantigamente.blogspot.com.br/2011/01/canal-do-mangue.html>
- Portal Brasil. (2010). *Copa 2014 - Desafios e legados*. Acesso em Maio de 2012, disponível em <http://multimedia.brasil.gov.br/cidades/rio-de-janeiro/portos.html>
- Prefeitura do Rio de Janeiro. (2012). Acesso em Fevereiro de 2012, disponível em Portal GEO: <http://portalgeo.rio.rj.gov.br/portalgeo/index.asp>
- Rosman, P. C. (2011). *Referência Técnica do SisBaHiA®*. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC.
- Rosman, P. C. (2011). *Relatório de Modelagem de Processos Sedimentológicos na Região do Canal do Manguê Porto do Rio de Janeiro - RJ*. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC.
- Siqueira, L. F., & Queiroz, R. S. (2012). *Estudo para Revitalização do Sistema Lagunar Piratininga-Itaipu com Auxílio da Modelagem Computacional*. Rio de Janeiro: Escola Politécnica/UFRJ.