



AVALIAÇÃO HIDRO-SEDIMENTOLÓGICA NO CANAL DE ITAJURÚ - LAGOA  
DE ARARUAMA-RJ, DEVIDO A SOBRELEVAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR  
POR MUDANÇA CLIMÁTICA

Paulo José Sigauíque

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Rio de Janeiro

Maio de 2013

AVALIAÇÃO HIDRO-SEDIMENTOLÓGICA NO CANAL DE ITAJURÚ - LAGOA  
DE ARARUAMA-RJ, DEVIDO A SOBRELEVAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR  
POR MUDANÇA CLIMÁTICA

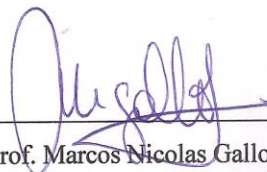
Paulo José Sigaúque

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

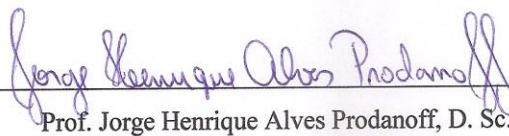
Examinada por:



Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph. D.



Prof. Marcos Nicolas Gallo, D.Sc.



Prof. Jorge Henrique Alves Prodanoff, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2013

Sigaúque, Paulo José

Avaliação Hidro-sedimentológica no canal de Itajurú-lagoa de Araruama-RJ, devido a sobrelevação do nível médio do mar por mudança climática / Paulo José Sigaúque. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XIV, 109 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 108-109.

1. Avaliação Hidro-sedimentológica 2. Lagoa de Araruama. 3. Modelo de transporte de sedimentos I. Rosman, Paulo Cesar Colonna. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

## AGRADECIMENTOS

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para elaboração desta dissertação.

À minha esposa, Orlanda Simião Alberto, aos meus filhos Shena Paulo Sigaúque e Paulo Junior Sigaúque pela atenção, apoio prestado em todos os momentos com muito carinho e mesmo distante se fizeram presentes.

Aos meus pais: Isabel Alberto Manjate e José Paulo Sigaúque (*In memoriam*), aos meus irmãos Adérito, Jaime e Jacinto.

Ao Ministério de Ciência e Tecnologia de Moçambique e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pelo suporte financeiro durante o desenvolvimento deste trabalho.

A direção do Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação, em especial a Augusto Bata e Cândida Sete.

Aos colegas António da Silva, Clousa Maueua, Inércio Nhamue, Obadias Cossa, Jafar Ruby, Sinibaldo Canhaga, Tomas Muianga e todos os que não foram aqui mencionados, o meu obrigado.

Ao meu orientador, Paulo Rosman pelas ideias, apoio permanente, conhecimento transmitido, pelos primeiros passos no campo da modelagem computacional e disponibilidade oferecida como orientador deste trabalho.

A Marise dos Santos, pelo apoio concedido, desde os primeiros contatos feitos antes da minha vinda ao Brasil, pela atenção e carinho de todos os dias.

Aos Professores Jorge Prodanoff e Marcos Gallo pelas ideias e dicas na realização deste trabalho.

A Nerito Oliveira pelas ideias trocadas durante o período do mestrado.

Aos meus colegas da Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica, Anton, Daniel, Mário, Izabel, Ernesto, Laissa, Jesus, Taoan, Ludmila, Eduardo, Bruna R. e Bruna F pelas ideias trocadas sobre assuntos de Engenharia Costeira e entre outras coisas.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.).

AVALIAÇÃO HIDRO-SEDIMENTOLÓGICA NO CANAL DE ITAJURÚ - LAGOA DE ARARUAMA-RJ, DEVIDO A SOBRELEVAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR POR MUDANÇA CLIMÁTICA

Paulo José Sigauque

Maio/2013

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Programa: Engenharia Oceânica

O canal de Itajurú, localizado no extremo leste da lagoa de Araruama (Estado do Rio de Janeiro), é o único que faz conexão entre a lagoa de Araruama e o mar, é importante compreender a circulação hidrodinâmica do local, os efeitos dos processos sedimentológicos, bem como estimar a hidrodinâmica e os processos sedimentológicos no futuro, após a variação do NM devido a efeitos de mudanças climáticas.

Este trabalho apresenta resultados sobre um estudo da dinâmica de sedimentos na lagoa de Araruama, com foco na região do canal de Itajurú, considerando o nível médio do mar atual e uma prevista elevação de 0,5 m por conta de mudanças climáticas. O estudo foi realizado com auxílio dos modelos hidrodinâmico e morfodinâmico do SisBaHiA<sup>®</sup>. Os resultados indicam que a lagoa de Araruama é constituída por dois compartimentos hidrodinâmicos, um dominado pela ação da maré, entre a embocadura do canal e o estreito das Perynas, e outro pela ação do vento, região entre estreito de Perynas e o extremo oeste da lagoa. Com o aumento do NM, aumentaram as magnitudes das velocidades de corrente e vazões, como o maior fluxo de transporte de sedimentos de montante para jusante do canal de Itajurú com mais efeito na ponte Feliciano Sodré.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

HYDRO-SEDIMENTOLOGICAL EVALUATION IN ITAJURÚ  
CHANNEL–ARARUAMA LAGOON-RJ, DUE SUPERELEVATION OF THE SEA  
LEVEL BY CLIMATE CHANGE

Paulo José Sigauque

May/2013

Advisor: Paulo Cesar Colonna Rosman

Department: Oceanic Engineering

The Itajurú channel, located in the Eastern side of the Araruama lagoon, Rio de Janeiro state, is the one who makes the connection between Araruama lagoon and the sea. It is important to understand the hydrodynamic circulation of the location and effects of the sedimentological processes, and also estimate of the hydrodynamic and sedimentological processes in the future after the sea level change due to effects of climate change.

This work presents results of a study about sediments dynamics in the Araruama lagoon focusing on the Itajurú channel region considering the present mean sea level and a foreseen sea level rise of 0.5 meters due to climate changes. The study was conducted with the aid of computer modeling for hydrodynamic and morphodynamic in SisBaHiA<sup>®</sup>. The results indicate that Araruama lagoon is composed by two hydrodynamics compartments; one is dominated by the action of the tide between the entrance of the channel and the strait of Perynas, and another one by the action of wind in narrow region between strait of Perynas and western extreme of the lagoon. With sea level rise, the magnitude of current velocities and flow rates is increased and consequently flow of sediment transport from upstream to downstream of Itajurú channel is increased and has more effect in the bridge Feliciano Sodré.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	3
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	4
3.1	Localização e descrição da lagoa de Araruama e canal de Itajurú.....	4
3.2	Características Ambientais.....	6
3.2.1	Aspectos estuarinos.....	7
3.2.2	Clima.....	8
3.2.3	Sedimentos de fundo.....	9
3.3	Transporte de sedimentos.....	13
3.3.1	Processos Sedimentológicos e Morfológicos.....	13
3.3.2	Mecanismos de transporte de sedimentos.....	14
3.4	Elevação do nível do mar.....	15
3.4.1	Causas da variação relativa do nível médio do mar.....	16
3.4.2	Tendência do Nível Médio do Mar no Estado do Rio de Janeiro.....	18
4	METODOLOGIA.....	20
4.1	Sobre Modelagem Computacional.....	20
4.1.1	Domínio de modelagem e batimetria.....	21
4.1.2	Condições de contorno.....	25
4.1.3	Discretização espacial.....	26
4.1.4	Dados de maré.....	28
4.1.5	Vento.....	30
4.1.6	Vazões dos Rios Afluentes.....	34
5	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA.....	36
5.1	Modelo Hidrodinâmico do SisBaHiA.....	36
5.1.1	Equações governantes do modelo 2DH.....	38
5.1.2	Tensões de atrito devido ao vento.....	40
5.1.3	Tensão de atrito no fundo no módulo 2DH.....	40
5.1.4	Condições Iniciais.....	43
5.1.5	Condições de contorno do modelo hidrodinâmico.....	43
5.2	Modelo de Transporte de sedimentos com evolução de batimetria.....	43
5.2.1	Critério de mobilidade de sedimentos.....	44
5.2.2	Cálculo do transporte de sedimentos.....	47
5.3	Fórmulas de cálculo de transporte de sedimentos e vazão sólida potencial.....	49
5.3.1	Fórmula de Engelund e Hansen (1967).....	51
5.4	Atualização da batimetria via modelo morfodinâmico com curva granulométrica.....	52
5.4.1	Cálculo da vazão sólida efetiva.....	56
5.4.2	Equação da continuidade com fundo morfodinâmico.....	60
5.4.3	Sobre as condições de contorno no modelo de transporte de sedimentos.....	60

6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
6.1	Caracterização da circulação hidrodinâmica.....	64
6.1.1	Variação de níveis de água e velocidades de corrente na estação entrada do canal- Período com maré de Sizígia. ....	81
6.1.2	Variação de níveis de água e velocidades de corrente na estação Ponte Feliciano Sodré - Período com maré de Sizígia. ....	83
6.1.3	Variação de níveis de água e velocidades de corrente na estação entrada do canal - Período com maré de quadratura. ....	84
6.1.4	Variação de níveis de água e velocidades de corrente na estação Ponte Feliciano Sodré - Período com maré de quadratura. ....	86
6.1.5	Gráficos com elipses de maré comparando resultados de correntes em situação atual e futura do NM. ....	87
6.1.6	Vazão na seção hidráulica da estação entrada do canal-Periodo de maré de Sizígia. ....	91
6.1.7	Vazão na seção hidráulica da estação Ponte Feliciano Sodré-Periodo de maré de Sizígia. ....	93
6.1.8	Vazão na seção hidráulica da estação entrada do canal-Periodo de maré de Quadratura. ....	95
6.1.9	Vazão na seção hidráulica da estação ponte Feliciano Sodré-Periodo de maré de Quadratura. ....	96
6.2	Resultados do modelo de transporte de sedimentos.....	98
6.2.1	Alterações da batimetria do leito.....	98
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	106
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	108

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da lagoa de Araruama. Mapa Adaptado de Gomes (2009). .....	4
Figura 2. Canal de Itajurú. Fonte: Google Earth – 14/03/2013. ....	6
Figura 3-Compartimentos ambientais da lagoa de Araruama e canal de Itajurú, Fonte: Adaptado BIDEGAIN e BIZERRIL, 2002.....	7
Figura 4. Distribuição espacial dos sedimentos na Lagoa de Araruama. Fonte: BIDEGAIN e BIZERRIL, 2002.....	11
Figura 5. Distribuição granulométrica dos sedimentos no canal de Itajurú e enseada das Palmeiras, fonte: LESSA, <i>apud</i> BIDEGAIN e BIZERRIL, 2002.....	12
Figura 6. Variação do nível médio do mar na Ilha Fiscal, baía de Guanabara, RJ. (Adaptado, NEVES <i>et al.</i> , 2007).....	19
Figura 7. Reprodução das imagens com informações gerais de batimetria da Lagoa de Araruama, cedidas pela UFF à SERLA em dezembro de 2005. ....	22
Figura 8. Em vermelho, mapa com indicação da região do levantamento batimétrico realizado em Maio de 2006, os dados foram cedidos pela SERLA. Fonte: (Coppetec, ROSMAN, 2006). ....	23
Figura 9. Mapa com batimetria geral da Lagoa de Araruama. ....	23
Figura 10. Mapa com detalhe da batimetria referente ao canal de Itajurú. Na estampa inferior mapa representando o detalhe da batimetria da estampa superior.....	24
Figura 11. Mapa base da Lagoa de Araruama mostrando o domínio de modelagem. ....	25
Figura 12. Mapa com malha de elementos finitos utilizada para a discretização espacial do domínio de modelagem. ....	26
Figura 13. Mapa com detalhe da malha no canal de Itajurú, trecho São Pedro de Aldeia e a barra do Canal de Itajurú. ....	27
Figura 14. Curvas de marés geradas por meio de constantes harmônicas da estação maregráfica do Porto do Forno, próximo da embocadura do canal de Itajurú. ....	28
Figura 15. Mapa de localização da estação meteorológica de São Pedro D’Aldeia. ....	31
Figura 16. Estatística da direção do vento. (Coppetec, ROSMAN, 2002).....	31
Figura 17. Distribuição de velocidade e direção do vento entre 1976 e 1997 (Coppetec, ROSMAN, 2002). ....	32
Figura 18. Dados de vento referentes ao mês de Janeiro retratando situação de verão com ventos dominantes de NE. ....	33
Figura 19. Dados de vento referentes ao mês de Janeiro retratando situação de inverno com ventos dominantes de SW. ....	34

Figura 20. Mapa com localização dos principais rios afluentes à lagoa de Araruama.....	35
Figura 21. Variáveis hidrodinâmicas adotadas na formulação matemática do SisBaHiA (ROSMAN, Referência Técnica do SisBaHiA <sup>®</sup> , 2013). .....	37
Figura 22. Mapa de isolinhas de amplitudes das rugosidades equivalentes, $\varepsilon$ , refletindo os tipos de sedimentos no fundo, conforme Figura 4 e Figura 5.....	42
Figura 23. Diagrama de Shields tradicional, Adaptado de DA SILVA e WILSON JR, 2005. ....	45
Figura 24. Diagrama de Shields modificado, no qual a tensão crítica pode ser obtida diretamente das características do sedimento e da água. Adaptado de (ROSMAN, 2012).....	46
Figura 25. Tensão crítica para mobilidade, $\tau_o$ , em função do digrama do grão em unidades $\phi$ . Adaptado de (ROSMAN, 2012). ....	47
Figura 26. Imagem de tela de Modelos de Transporte de Sedimentos do SisBaHiA <sup>®</sup> , destacando na oval vermelha as diferentes opções de fórmulas de transporte por arraste e de transporte total, arraste e suspensão. ....	50
Figura 27. Mapa com localização das estações selecionadas para apresentação dos resultados. ....	63
Figura 28. Variação de níveis ao longo da lagoa nas estações selecionadas da Figura 27. Na estampa superior o resultado com situação atual do NM e inferior com NM futuro.....	66
Figura 29. Variação de níveis entre os cenários com situação atual e futura do NM em 0,5 m– maré de sizígia. ....	68
Figura 30. Variação de níveis entre os cenários com situação atual e futura do NM em 0,5 m – maré de quadratura.....	69
Figura 31. Mapa de circulação hidrodinâmica em instante de preamar de sizígia na embocadura, conforme hora 207 do modelo hidrodinâmico. Na estampa superior o resultado com situação atual do NM e inferior com NM futuro.....	71
Figura 32. Mapa com detalhes de circulação hidrodinâmica no canal de Itajurú em instante de preamar na embocadura, conforme hora 207 do modelo hidrodinâmico. Na estampa superior o resultado com situação atual do NM e inferior com NM projetado. ....	72
Figura 33. Mapa com padrão de correntes em instante de baixamar de sizígia na embocadura, conforme hora 213 do modelo hidrodinâmico. Na estampa superior o resultado com situação atual do NM e inferior com NM futuro.....	73
Figura 34. Mapa com detalhes de circulação hidrodinâmica no canal de Itajurú em instante de baixamar de sizígia na embocadura, conforme hora 213 do modelo hidrodinâmico. Na estampa superior o resultado com situação atual do NM e inferior com NM futuro.....	74

Figura 35. Mapa de circulação hidrodinâmica em instante de preamar de quadratura na embocadura, conforme hora 343.5 do modelo hidrodinâmico. Na estampa superior o resultado com situação atual do NM e inferior com NM futuro. ....	75
Figura 36. Mapa com detalhes de circulação hidrodinâmica no canal de Itajuru em instante de preamar de quadratura na embocadura, conforme hora 343.5 do modelo hidrodinâmico. Na estampa superior o resultado com situação atual do NM e inferior com NM futuro. ....	76
Figura 37. Mapa de circulação hidrodinâmica em instante de baixamar de quadratura na embocadura, conforme hora 348. Na estampa superior o resultado com situação atual do NM e inferior com NM futuro. ....	77
Figura 38. Mapa com detalhes de circulação hidrodinâmica no canal de Itajuru em instante baixamar de quadratura na embocadura, conforme hora 348 do modelo do modelo hidrodinâmico. Na estampa superior o resultado com situação atual do NM e inferior com NM futuro. ....	78
Figura 39. Relação entre as variações de níveis causados pela maré e velocidades de correntes em um sistema de maré sintética idealizada puramente estacionária. As magnitudes de maré estarão defasadas de 90° ( ou 270°) em relação as velocidades das correntes . Fonte: PARKER, 2005 <i>apud</i> DZUALO, 2010. ....	80
Figura 40. Relação entre as variações de níveis causados pela maré e velocidades de correntes em um sistema de maré sintética idealizada puramente progressiva. As magnitudes de maré estarão em fase (ou defasadas de 180°) em relação as velocidades das correntes . Fonte: PARKER, 2005 <i>apud</i> DZUALO, 2010. ....	80
Figura 41. Gráfico comparando magnitude de velocidade das correntes de maré e níveis de água na estação entrada do canal- maré de sizígia. ....	82
Figura 42. Gráfico comparando magnitude de velocidade das correntes de maré e níveis de água na estação ponte Feliciano Sodré- maré de sizígia.....	83
Figura 43. Gráfico comparando magnitude de velocidade das correntes de maré e níveis de água na estação entrada do canal- maré de quadratura.....	85
Figura 44. Gráfico comparando magnitude de velocidade das correntes de maré e níveis de água na estação ponte Feliciano Sodré- maré de quadratura. ....	86
Figura 45. Mapa com localização das estações selecionadas para apresentação dos resultados referentes a elipses de maré. ....	88
Figura 46. Elipses de correntes de maré na estação ponte Feliciano Sodré retratando a situação atual e futura do NM, durante quatro meses, correspondendo ao período da simulação. ....	89
Figura 47. Elipses de correntes de maré na estação enseada de palmeiras retratando a situação atual e futura do NM, durante quatro meses, correspondendo ao período da simulação. ....	89
Figura 48. Elipses de correntes de maré na estação estreito de Perynas retratando a situação atual e futura do NM, durante quatro meses, correspondendo ao período da simulação.....	90

Figura 49. Elipses de correntes de maré na estação meio da lagoa mostrando situação atual e futura do NM, durante quatro meses, correspondendo ao período da simulação.....	90
Figura 50. Séries temporais de vazões na seção hidráulica da estação entrada do canal- situação atual e futura do NM. ....	92
Figura 51. Séries temporais comparando vazões na seção hidráulica da estação entrada do canal em maré de sizígia- situação atual e futura do NM. ....	93
Figura 52. Séries temporais de vazões na seção hidráulica da estação Ponte Feliciano Sodré- situação atual e futura do NM. ....	94
Figura 53. Séries temporais comparando vazões na seção hidráulica da estação Ponte Feliciano Sodré em maré de sizígia- situação atual e futura do NM. ....	95
Figura 54. Séries temporais comparando vazões na seção hidráulica da estação entrada do canal em maré de quadratura- situação atual e futura do NM.....	96
Figura 55. Séries temporais comparando vazões na seção hidráulica da estação ponte Feliciano Sodré em maré de quadratura- situação atual e futura do NM. ....	97
Figura 56. Gráfico com variação da batimetria ao longo do tempo na estação ponte Feliciano Sodré-situação atual e futura do NM.....	99
Figura 57. Mapa com isolinhas de variação acumulada da batimetria no canal de Itajurú com situação atual do NM. Os valores positivos representam erosão e os negativos.....	100
Figura 58. Mapa com isolinhas de variação acumulada da batimetria no canal de Itajurú com situação futura do NM. Os valores positivos representam erosão e os negativos, assoreamento.....	101
Figura 59. Mapa com detalhes de isolinhas de variação acumulada da batimetria no canal de Itajurú com situação atual do NM. Os valores positivos representam erosão e os negativos, assoreamento. ....	102
Figura 60. Mapa com detalhes de isolinhas de variação acumulada da batimetria no canal de Itajurú com situação futura do NM. Os valores positivos representam erosão e os negativos, assoreamento. ....	103
Figura 61. Mapa de localização dos pontos usados na obtenção do gráfico de perfil longitudinal, conforme mostrado na Figura 62. ....	104
Figura 62. Perfil longitudinal representando a alteração batimétrica do canal de Itajurú em situação atual e futura do NM. O traçado do perfil começa no ponto “início” e termina no ponto “final”, v. Figura 61. ....	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados climáticos em Iguaba Grande, região central da lagoa de Araruama, Fonte: Adaptado de BIDEGAIN e BIZERRIL (2002). .....	8
Tabela 2. Características dos sedimentos da lagoa de Araruama, Fonte: BIDEGAIN e BIZERRIL, 2002.....	10
Tabela 3. Detalhes da malha usada na modelagem e domínio discretizado.....	27
Tabela 4. Lista de constantes harmônicas do Porto do Forno utilizadas para obtenção da serie de nível da água, FEMAR (Fundação de Estudos do Mar).....	29
Tabela 5. Tipo de maré e fator de forma (POND e PICKARD, 1983). .....	30
Tabela 6. Vazão média anual dos principais rios afluentes à Lagoa de Araruama <i>Adaptado</i> (CUNHA, 2003). .....	35
Tabela 7. Descrição dos termos mencionados nas equações da quantidade de movimento e de continuidade (Adaptado: ROSMAN, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2012). .....	39
Tabela 8. Valores recomendados para a amplitude da rugosidade equivalente de fundo, $\varepsilon$ , para uso no módulo 2DH do modelo hidrodinâmico. (Adaptado de ABBOT e BASCO (1989) <i>apud</i> ROSMAN, 2013). .....	41
Tabela 9. Valores adotados neste trabalho para % de tolerância de tensão crítica de sedimentos variando de areia muito fina a areia grossa. ....	49
Tabela 10. Variação porcentual entre a média das velocidades de enchente e vazante considerando NM atual e futuro. ....	82
Tabela 11. Variação porcentual entre a média das velocidades de enchente e vazante considerando NM atual e futuro-período de sizígia.....	84
Tabela 12. Variação porcentual entre a média das velocidades de enchente e vazante considerando NM atual e futuro-período de quadratura. ....	85
Tabela 13. Variação porcentual entre a média das velocidades de enchente e vazante considerando NM atual e futuro-estação Ponte Feliciano Sodré.....	87
Tabela 14. Vazão média de picos de vazante e enchente na estação entrada do canal. ....	93
Tabela 15. Vazão média de picos de vazante e enchente na estação ponte Feliciano Sodré .....	95
Tabela 16. Vazão média de picos de vazante e enchente na estação entrada do canal. ....	96
Tabela 17. Vazão média de picos de vazante e enchente na estação ponte Feliciano Sodré. ....	98

## LISTA DE SIGLAS

CPRM	Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEAPM	Instituto de Estudo do Mar Almirante Paulo Moreira
INPH	Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias
IPCC	Intergovernmental Pannel on Climate Change
NM	Nível Médio
UFF	Universidade Federal Fluminense
FEMAR	Fundação de Estudos do Mar
ups	unidade prática de salinidade

## 1 INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

Este trabalho apresenta resultados sobre um estudo da dinâmica de sedimentos na lagoa de Araruama, com foco na região do canal de Itajurú, considerando o nível do mar atual e a possível elevação devido a mudanças climáticas. O estudo foi realizado com auxílio de modelagem computacional. Os modelos utilizados, hidrodinâmico e morfodinâmico, fazem parte do SisBaHiA<sup>®</sup> (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, vide [www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br)). Por meio da ferramenta de modelagem ambiental se busca contribuir com o conhecimento científico referente sobre hidrossedimentologia.

A lagoa de Araruama é um sistema estuarino formado por restingas frontais, com águas interiores hipersalinas, por estar em região onde a altura de precipitação média anual é significativamente inferior à de evaporação. DYER (1997) define um estuário como sendo um corpo de água costeiro semifechado com ligação livre com o oceano aberto, estendendo-se para a montante até o limite da influência da maré, sendo que em seu interior a água do mar é mensuravelmente misturada com a água doce oriunda da drenagem continental.

Conhecer o comportamento, a qualidade e a quantidade do sedimento transportado é importante para estudos ambientais e gestão de recursos hídricos (VANONI, 1977, *apud* CARVALHO, 2008). Dados sedimentométricos são necessários no diagnóstico e busca de solução de vários problemas de engenharia costeira e de recursos hídricos, tais como casos de erosão e assoreamento em canais de navegação e em locais de obras, como pontes e portos. Assoreamentos em maior escala também podem causar problemas de retenção de águas, aumentando a ocorrência de enchentes locais, (CARVALHO, 2008).

A subida do nível médio, NM, associada a mudanças climáticas, vem sendo debatida desde a década de 1970. Geralmente, a ênfase na análise das dinâmicas evolutivas se centra em variações históricas do nível das águas oceânicas, bem como, em projeções que preveem subidas de até 1,0 m no NM por volta de 2100 sendo o valor mais provável de 0,5 m conforme o quarto relatório do IPCC de 2007.

A questão das mudanças climáticas não é nova, porém assumiu um caráter político ainda mais abrangente a partir da divulgação do Quarto Relatório do IPCC em

fevereiro de 2007. Vários estudos têm sido conduzidos no Brasil desde a década de 1980, abordando tópicos como mudanças de parâmetros atmosféricos (e.g. temperatura, precipitação) ou de sistemas meteorológicos, impactos sobre recursos hídricos e zonas costeiras.

Sendo o canal de Itajurú o único que faz conexão entre a lagoa de Araruama e o mar, motiva a compreender a circulação hidrodinâmica do local, os efeitos dos processos sedimentológicos, bem como estimar a hidrodinâmica e os processos sedimentológicos no futuro, após a variação do NM devido a efeitos de mudanças climáticas. Com base nisso é possível prever a navegabilidade no local, relevante para pesca e turismo. Além disso, no âmbito da modelagem, poucos são os trabalhos realizados na região do estudo tendo em vista os processos sedimentológicos, este feito também motivou a realização deste estudo com intuito de fazer avaliação hidro-sedimentológica no canal de Itajurú.

No Brasil, alguns estudos foram realizados sendo reportados sérios problemas relacionados à erosão, além dos problemas recorrentes com inundações no Estado do Rio de Janeiro, em particular. As inundações, juntamente com as enchentes, evidenciam a vulnerabilidade no Rio de Janeiro, que pode ser intensificada com o aumento relativo do nível do mar (NM) e com outras alterações climáticas. Como essa elevação do NM compromete a drenagem das áreas costeiras, a frequência de alagamentos e inundações aumenta. As evidências dessa subida constatadas em todo o mundo, independente de suas causas, demonstram que a avaliação da vulnerabilidade da costa é um fator necessário e estratégico (TAGLIANI *et al.*, 2010).

Esta dissertação divide-se em 8 capítulos, incluindo esta introdução. O capítulo 2 trata dos objetivos do trabalho. No capítulo 3 é feita caracterização da área de estudo. Nos capítulos 4 e 5 são apresentados assuntos relacionados com a metodologia e formulação matemática usada. O capítulo 6 aborda questões sobre resultados e discussão dos resultados. No capítulo 7 discute-se conclusões e recomendações e, por fim, o capítulo 8 apresenta referências bibliográficas utilizadas no estudo.

## **2 OBJETIVOS**

Este trabalho objetiva avaliar aspectos de circulação hidrodinâmica e processos sedimentológicos em curso na Lagoa de Araruama, com foco no Canal de Itajurú, considerando o nível médio do mar atual e uma elevação de 0,5 m por conta de mudanças climáticas.

Para tal, considerando a situação atual com cenários futuros, são comparados e analisados os perfis de linha de água, campo de velocidades, perfis das seções topobatimétricas e distribuição de sedimentos transportados na lagoa de Araruama, focando na região de dinâmica mais acentuada do canal de Itajurú.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Analisar os padrões atuais de circulação hidrodinâmica;
- Comparar os padrões de circulação hidrodinâmica obtidos para situações de níveis médios do mar atual e elevada em 0,5 m;
- Analisar processos sedimentológicos na situação atual e prováveis alterações na batimétrica no canal de Itajurú devido a efeitos de elevação do nível médio do mar.

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo é feita uma descrição da lagoa de Araruama e canal de Itajurú, bem como características ambientais da região do estudo.

#### 3.1 Localização e descrição da lagoa de Araruama e canal de Itajurú

A Lagoa de Araruama, vide Figura 1, situa-se no Estado do Rio de Janeiro, na Região dos Lagos, entre as latitudes de 22°50'S e 22°57' S e entre as longitudes de 42°00' W e 42°44'W. Estende-se pelos municípios de Saquarema, Araruama, Iguaba Grande, São Pedro da Aldeia, Cabo Frio e Arraial do Cabo (BIDEGAIN e BIZERRIL, 2002).

A Lagoa possui uma área de 220 km<sup>2</sup> e profundidade média de 3,0 metros, com pontos que atingem até 19 metros, configurando um volume de 636 milhões de m<sup>3</sup>. A largura máxima é de 14 km e seu comprimento atinge 33 km, com um perímetro de 190 km.

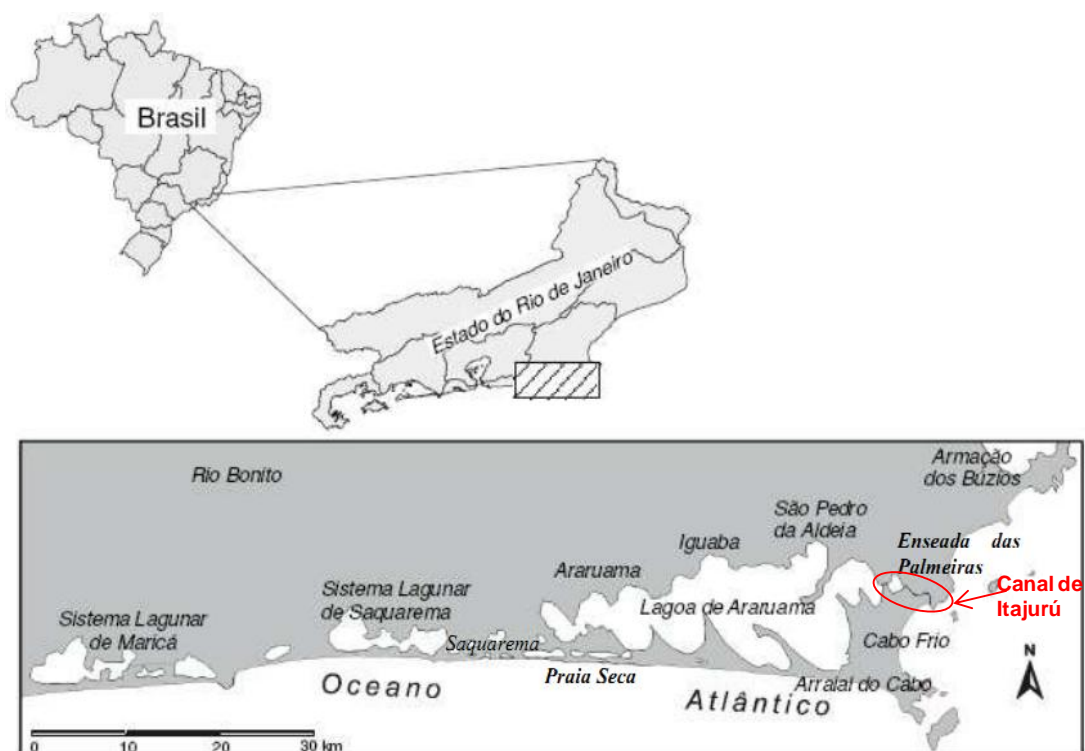


Figura 1. Mapa de localização da lagoa de Araruama. Mapa Adaptado de Gomes (2009).

A face norte da Lagoa é a mais ocupada, compreendendo as zonas urbanas dos municípios de Araruama, Iguaba Grande e São Pedro da Aldeia. Essa região é formada por diversas enseadas separadas por penínsulas, em sua maioria de natureza rochosa. Na porção leste, localiza-se o município de Cabo Frio, cortado pelo Canal de Itajurú. A orla sul é formada por quatro esporões arenosos, que se projetam rumo ao interior da laguna, a partir da Restinga da Massambaba. As porções sudeste e sul integram o município de Arraial do Cabo e, o extremo oeste, o município de Saquarema (GOMES, 2009).

A ligação com o mar se dá através do estreito e raso canal de Itajurú, cuja embocadura encontra-se voltada para o Sul. O canal compreende a região entre a entrada da enseada das Palmeiras e a boca do estuário(v.Figura 2).

O canal de Itajurú está localizado na extremidade leste da lagoa de Araruama, no município de Cabo Frio, tem cerca de 6 km de comprimento e perímetro total de 14 km. É um canal estreito (de 100 a 300 metros de largura) e meândrico.

O canal de Itajurú vem sofrendo uma série de obras e intervenções devidas a processos de urbanização e exploração econômica da região dos grandes Lagos. Atualmente, apesar da embocadura estável devido à sua natureza rochosa, o canal apresenta importantes pontos de diminuição em sua seção hidráulica.

Seguindo da boca do canal para a montante, o primeiro ponto de destaque é junto à barra, ao redor da Ilha do Japonês, onde se observam grandes bancos de areia apontados pelas setas na Figura 2. Seguindo para montante, nas imediações da ponte Feliciano Sodré, encontram-se os destroços da estrutura de uma antiga ponte, deixados dentro do canal. A batimetria nessa seção foi sensivelmente alterada, existindo cotas de 1 (um) metro junto às peças de concreto, com um buraco adjacente da ordem de seis metros.



Figura 2. Canal de Itajuru. Fonte: Google Earth – 14/03/2013.

### 3.2 Características Ambientais

A Lagoa de Araruama é uma laguna hipersalina, de grandes dimensões, que se destaca por suas características fisiográficas singulares na região, devido a uma conjunção de fatores ambientais: a Serra do Mar afasta-se da costa, ocorrendo a incidência de fortes ventos de direção NE e um clima quase semi-árido caracterizado pela evaporação significativamente maior que a precipitação. É a única laguna fluminense que tem uma conexão natural permanente com mar, apresentando ainda as bacias hidrográficas contribuintes um tamanho reduzido em relação ao seu elevado volume d'água (GAVA, 2008).

Na década de 80, estudos realizados por técnicos do INPH e do IEAPM, combinando características hidrológicas, de qualidade da água, de sedimentos e, principalmente, de salinidade, caracterizaram a lagoa de Araruama em três áreas ambientais (Figura 3), a saber:

Área 1: Compreende o canal de Itajuru e a enseada das Palmeiras, desde a sua embocadura até o Baixo Grande, onde passa a ponte da RJ-140. As características físico-químicas são muito parecidas com a do mar.

Área 2: Compreende a região entre o Baixo Grande e o Boqueirão, que corresponde à enseada do Maracanã, com salinidades pouco acima da marinha.

Área 3: Compreende a maior porção da lagoa. Estende-se desde o Boqueirão até a enseada da Ponte dos Leites, com salinidades que chegam a atingir mais de 60 ups na parte central.

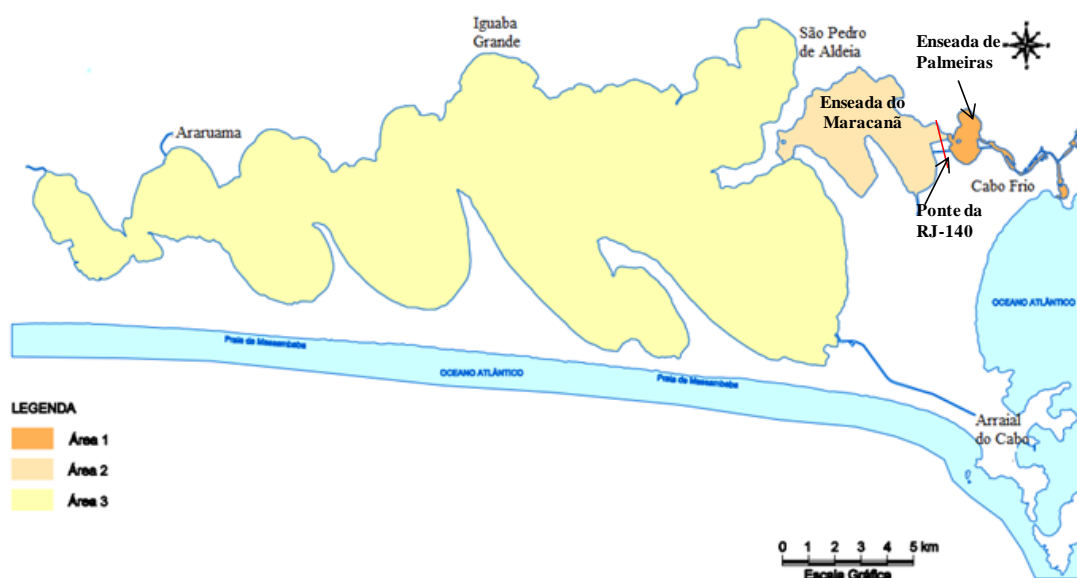


Figura 3-Compartimentos ambientais da lagoa de Araruama e canal de Itajuru, Fonte: Adaptado BIDEGAIN e BIZERRIL, 2002.

### 3.2.1 Aspectos estuarinos

A lagoa de Araruama, quanto à formação, pode ser classificada como um estuário de restinga frontal. Esse tipo de estuário é caracterizado por ter dimensões em planta ( $x$  e  $y$ ) muito maiores que a profundidade ( $z$ ), apresentar um ou mais canais de maré, que podem ser estáveis ou não, e possuir vazão de água doce muito menor que a vazão de água salgada. Geralmente, são formados em regiões de micro-maré (menor que 2 metros), sendo separados do oceano por grandes cordões arenosos. São estuários comumente encontrados em regiões tropicais, onde os ventos exercem maior influência (DYER, 1973, *apud* GOMES, 2009).

É uma lagoa costeira hipersalina, resultado de condições climáticas semi-áridas, pequena dimensão da bacia de drenagem e entrada do tipo sufocada (MIRANDA *et al.*, 2002).

As lagunas do tipo sufocada podem evoluir, conforme as condições hidrometeorológicas, para sistemas marinhos de concentração ou diluição. No primeiro caso, o balanço hídrico negativo (precipitação + descarga fluvial - evaporação < 0) dá origem a um corpo d'água mais salino que a região costeira adjacente, de forma que o balanço precipitação-evaporação desempenha papel importante na circulação hidrodinâmica e na concentração de constituintes (MIRANDA *et al.*, 2002).

Na lagoa de Araruama, o somatório das vazões afluentes é inferior à vazão de evaporação, isto faz com que a lagoa seja um estuário negativo, com salinidade interna superior à do mar.

Considerando a propagação da onda de maré, destaca-se que no canal de Itajurú a onda de maré é predominantemente progressiva, com níveis e correntes praticamente em fase. De realçar que, no interior da lagoa a onda de maré tende a ser do tipo estacionária.

### 3.2.2 Clima

A lagoa de Araruama apresenta dois tipos de clima separados por curta distância: o da parte ocidental pode ser classificado como tropical, enquanto na parte oriental é semi-árido.

Tabela 1. Dados climáticos em Iguaba Grande, região central da lagoa de Araruama, Fonte: Adaptado de BIDEGAIN e BIZERRIL (2002).

	Iguaba Grande
Média Verão (°C)	26.4
Média Inverno (°C)	21.5
Precipitação (mm/ano)	898
Evaporação (mm/ano)	1372

Com base na Tabela 1, observa-se que a evaporação é maior que a precipitação, o que gera um déficit hídrico na maior parte da bacia, resultando em laguna hipersalina configurando assim um estuário negativo.

BARBIÉRI (1975) analisou uma série de dados meteorológicos medidos pela Companhia Nacional de Álcalis, em Arraial do Cabo (estação considerada em Cabo Frio por BARBIÉRI), entre 1971 e 1980 e pela UFF (Universidade Federal Fluminense) no campus de Iguaba Grande, validando, posteriormente, os dados através de uma sequência de 50 anos de medições em Cabo Frio (1931-1980). A partir dessa análise, o autor identificou diferenças sensíveis em relação aos índices de precipitação (altura média anual 20% superior em Iguaba), evaporação (média anual 53% maior em Iguaba), umidade relativa (sempre inferior em Iguaba) e temperaturas máximas e mínimas absolutas (mais extremas e variáveis em Iguaba). As diferenças entre essas duas estações, distantes entre si não mais do que 20 km, configuram na porção oeste (Araruama) o domínio do clima tropical com chuvas intensas no verão e seca no inverno, e na parte leste (Cabo Frio) uma semelhança maior com o clima semi-árido quente, situando-se a Lagoa de Araruama nessa zona de transição (GOMES, 2009).

A atuação de ventos de Nordeste promove o fenômeno de Ressurgência que ocorre na costa de Arraial do Cabo e Cabo Frio. Ressurgência é o processo pelo qual a água fria de profundidade sobe à superfície. As maiores precipitações ocorrem entre outubro e abril, atingindo um mínimo em Julho e Agosto. O vento de maior frequência, média anual, é o nordeste (37%), predominando durante todo o ano com velocidades entre 4 a 6 m/s, podendo, frequentemente, chegar a 10 m/s. Sopra com maior força nos meses de Setembro a Abril.

### 3.2.3 Sedimentos de fundo

Os sedimentos da lagoa de Araruama e canal de Itajurú foram estudados e mapeados pela CPRM entre 1980 e 1984. A Figura 4 mostra a disposição espacial dos cinco tipos de sedimentos identificados pela CPRM. A Tabela 2 resume as características dos sedimentos identificados. No canal de Itajurú, os sedimentos são, basicamente, constituídos de areia fina e média.

Tabela 2. Características dos sedimentos da lagoa de Araruama, Fonte: BIDEGAIN e BIZERRIL, 2002.

Tipo de Sedimento	Descrição
Areias de fundo de laguna	Cores claras encontram-se entre profundidades de 2,5 a 6,0 metros e contêm alta concentração de conchas. A espessura estimada é de 4 metros.
Areias mistas flúvio-lagunares	Cores cinza e marrom. Silte e argila presentes de 5 a 10%. Situam-se junto à orla norte até a profundidade de 4 metros com espessura máxima de 3 metros.
Vaza orgânica de fundo de lagoa	Lama fluída de cor escura. Por diferença de compactação passa em 0,5 metros a um fluído viscoso. Composta por matéria orgânica coloidal e argilas, rica em carapaças de algas diatomáceas e/ou cianofíceas. Deposita-se nas partes mais profundas da lagoa, em bacias ou canais com mais de 6 metros de profundidade.
Areias de enseada rasa	Cores claras, com alguma presença de conchas. As profundidades vão até 2,5 metros, predominando em áreas muito rasas, com menos de 1 metro de lâmina de água. Ocorre somente na parte sul da lagoa.
Areias de cúspides de laguna	Cores claras. Material fino como argila e silte praticamente ausentes, com teor de conchas variado. Alcançam a espessura de 6 metros e constituem a parte submersa dos esporões.

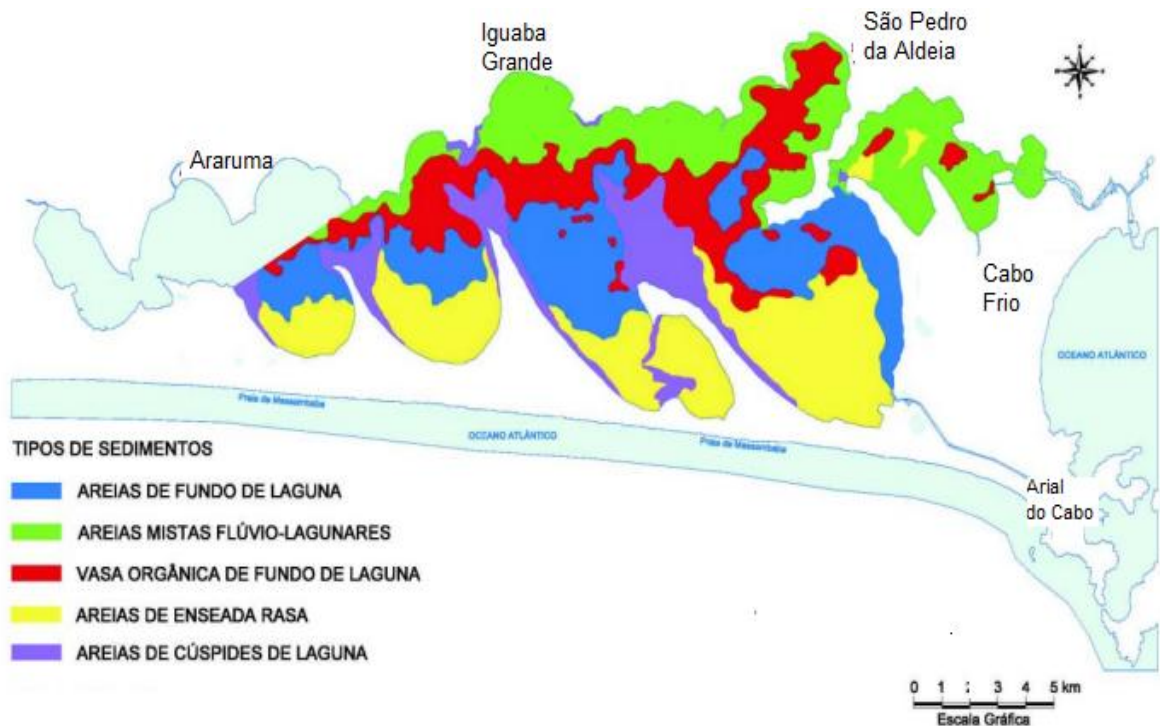


Figura 4. Distribuição espacial dos sedimentos na Lagoa de Araruama. Fonte: BIDEGAIN e BIZERRIL, 2002.

Note que os “tipos de sedimentos” na tabela e mapa anteriores são peculiares ao local. O que efetivamente caracteriza e tipifica sedimentos para estudos de processos sedimentológicos são parâmetros físicos como granulometria e massa específica, entre outros.

Além do levantamento realizado pela CPRM, LESSA efetuou, em 1990, um levantamento granulométrico do fundo do canal de Itajurú. Com o estudo realizado LESSA constatou que no canal predominam areias que variam de muito finas a grossas, conforme mostra a Figura 5.

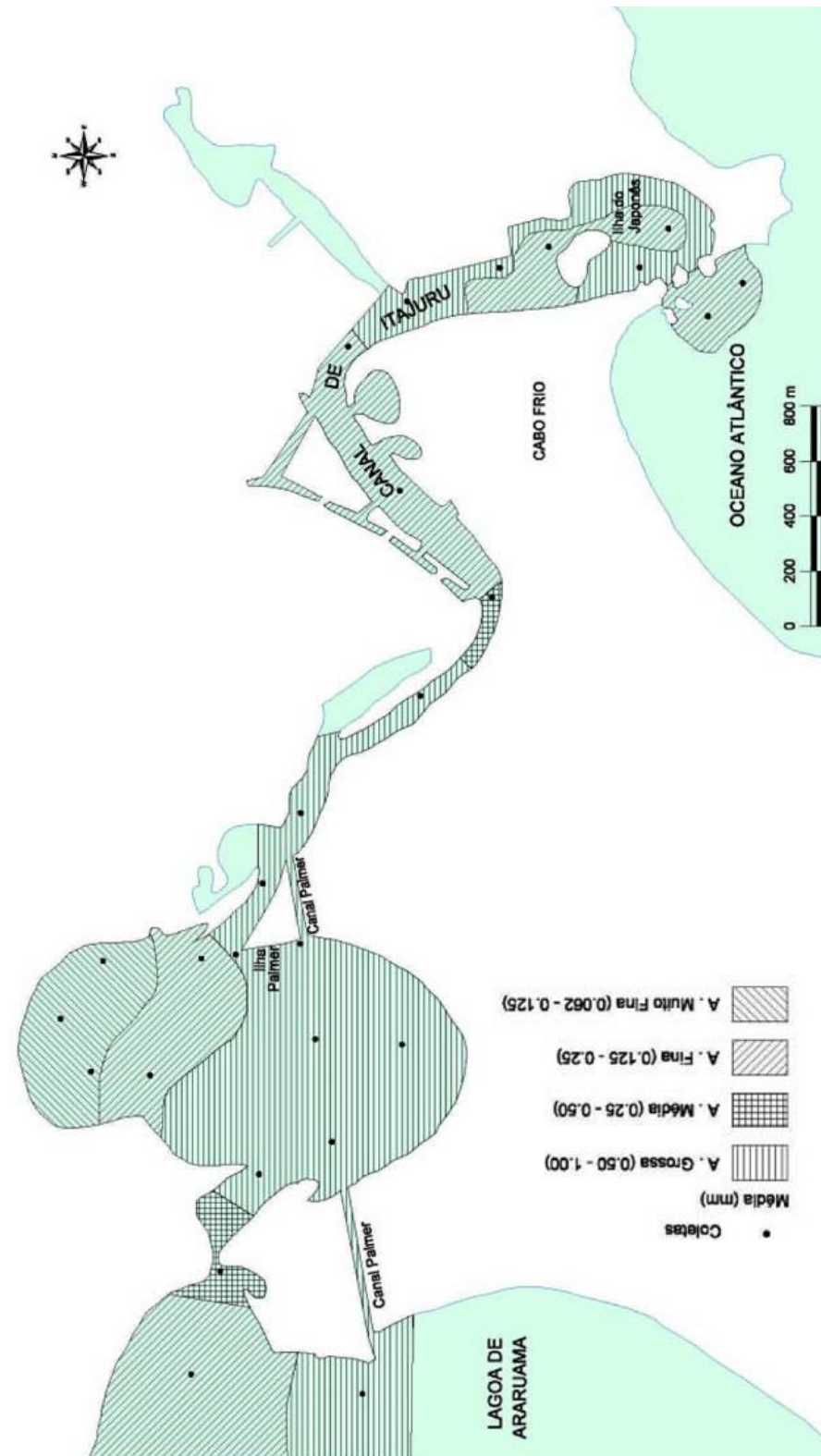


Figura 5. Distribuição granulométrica dos sedimentos no canal de Itajuru e enseada das Palmeiras, fonte: LESSA, *apud* BIDEGAIN e BIZERRIL, 2002.

### **3.3 Transporte de sedimentos**

O transporte de sedimentos e o escoamento na zona costeira são importantes na relação de vários tópicos de engenharia como sedimentação e erosão no entorno de estruturas, preenchimento de canais dragados, mudanças na morfologia próxima à costa e taxas de transportes de sedimentos.

MOTTA (1978) afirma que os sedimentos transportados podem provir de diversas fontes que vão até os estuários. Podem provir da extremidade de montante, trazidos pelas vazões fluviais e resultantes da erosão das bacias contribuintes ou dos próprios leitos fluviais. Podem penetrar pela extremidade marítima, trazidos pelas correntes de maré e de densidades ou até por ondas que entrem no estuário, e provir de transporte litorâneo ou de erosão da plataforma continental. Podem provir de erosão eólica de dunas ou de bancos que a maré cubra e descubra. Podem provir de despejos sólidos de origem industrial ou doméstica ou do retorno de materiais dragados. Podem provir até de decomposição ou dejetos de organismos vivos, marinhos ou fluviais.

#### **3.3.1 Processos Sedimentológicos e Morfológicos**

Segundo MOTTA(1978), os processos sedimentológicos são fenômenos associados a movimento de grãos de sedimentos, desde o desprendimento dos grãos provocados pelos impactos das gotas de chuva na bacia hidrográfica e pela ação dos cursos d'água junto ao leito, ao transporte, à dispersão, sedimentação, deposição, ou seja, até a cessação deste movimento, quando as partículas se depositam no fundo do escoamento.

Os processos morfológicos consistem nas alterações das características geométricas em planta e em perfil ou em seção transversal dos estuários, em consequência de rupturas no equilíbrio dinâmico do transporte de sedimentos. Um curso de água, em geral, pode variar de largura, de profundidade, de declividade e formar meandros. Nos estuários as declividades longitudinais do fundo são muito pequenas, podendo até ser nulas, e uma variação muito comum em planta se dá com as posições e as dimensões dos bancos (MOTTA, 1978).

Para o estudo dos processos sedimentológicos na Lagoa de Araruma com foco no canal de Itajurú analisou-se os parâmetros de mobilidade para diferentes categorias granulométricas existentes no leito.

A análise objetiva avaliar aspectos de circulação hidrodinâmica e processos sedimentológicos em curso na Lagoa de Araruama, com foco no Canal de Itajurú, considerando o nível médio do mar atual e uma elevação de 0,5 m por conta de mudanças climáticas.

### **3.3.2 Mecanismos de transporte de sedimentos**

Os mecanismos de transporte dos sedimentos pela corrente, dependendo de suas propriedades físicas podem se classificar em três tipos principais: Arraste, Saltação e Suspensão.

O arraste é o transporte de sedimentos que se efetua sempre em contato com o leito. Este movimento se processa através de uma série alternada de deslocamentos no sentido do escoamento intercalados por períodos de repouso. Os deslocamentos ocorrem por rolamento, deslizamento ou arrastamento de uma partícula sobre a outra, de modo que haja um contato quase permanente entre as partículas em movimento e as que compõem o leito. Os deslocamentos podem ser positivos, no sentido do escoamento, negativos, no sentido contrário, e nulo, quando a partícula se desloca transversalmente ao escoamento ou quando deixa de se deslocar, quando as tensões tangenciais no leito não são suficientes para manter a partícula em movimento (RUI DA SILVA e WILSON JR, 2005).

A saltação é a modalidade de transporte em que o grão é removido do leito no sentido vertical, atinge uma região onde as velocidades tendem a transportá-lo no sentido do deslocamento, mas retorna ao leito sob efeito do seu peso. Entretanto estes autores afirmam que outros pesquisadores consideram a saltação do ponto de vista das quantidades transportadas, da morfologia de fundo e dependendo do “salto”, incorporadas ao transporte por arraste.

A suspensão é a mobilidade de transporte em que os sedimentos em movimento são sustentados pelas componentes verticais ascendentes das correntes turbulentas e cujo peso próprio não é suficiente para depositá-lo. Como consequência,

este movimento se caracteriza também por uma troca contínua de partículas através de camadas idealizadas do escoamento (RUI DA SILVA e WILSON JR, 2005).

A diferença importante entre o transporte por arraste e em suspensão pode ser observada a partir das propriedades granulométricas dos grãos transportados. Os grãos mais grossos são mais frequentemente encontrados no leito enquanto os grãos mais finos são em sua maioria transportados em suspensão.

O transporte em suspensão é o principal modo de transporte estuarino, responsável pela movimentação de 75 a 95% da carga sólida total. O transporte de arraste no fundo representa a pequena percentagem dos sedimentos transportados que é em torno de 10 a 20%, mas são os que mais interessam analisar quanto ao comportamento dos fundos, pois compõem cerca de 90% do leito estuarino (ALFREDINE e ARASAKI, 2009).

### **3.4 Elevação do nível do mar**

O Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas no seu quarto relatório (IPCC, 2007) apresentou dados que mostram que o nível do mar no globo havia subido 1.3-2.3 mm/ano entre 1961 e 2003, e 2,4-3,8 mm / ano entre 1993 e 2003. Estimativas da subida do nível do mar entre 1980-1999 e 2090-2099 foram entre 0,18 e 0,59 m.

O aumento relativo do mar constitui em uma das questões ambientais mais relevantes na atualidade, tendo em vista as dimensões das suas consequências, não só em termos de abrangência espacial, mas também de variedade de impactos. Tais variações, que ocorrem numa vasta gama de escalas de tempo desde segundos até milhões de anos, constituem importantes consequências das mudanças climáticas pelas quais o planeta passa constantemente, e podem afetar negativamente a ambos os sistemas, ambiental e antrópico.

O nível do mar tem variado ao longo do tempo em relação aos continentes, como é constatado através de estudos geológicos e medições maregráficas. As principais causas da variação relativa do nível médio do mar são: movimentos tectônicos, variações climáticas, utilização humana do solo e subsolo e variações de propriedades físicas da água dos oceanos (e.g., temperatura). Devido ao fato de que os

continentes podem se deslocar tanto vertical quanto horizontalmente, bem como porque alguns fenômenos que causam a variação do nível do mar podem ser de natureza global ou local, convém distinguir as variações do nível do mar quanto ao referencial e quanto à abrangência da área atingida (DA SILVA, 1992).

As variações do nível médio do mar, quanto ao referencial, podem ser:

a) relativas, quando se referirem a um datum localizado na superfície da terra (e.g., o Referencial de Nível (RN) do marégrafo), pois, neste caso, as variações tanto podem ser devidas ao movimento vertical do continente quanto da superfície do mar, ou

b) absolutas, quando forem referidas ao centro da Terra (sistema geocêntrico). Quanto à abrangência da área atingida, as variações do nível médio do mar podem ser:

a) locais, quando forem restritas apenas a uma determinada região (por exemplo, as devidas à subsidência do delta do rio Mississippi);

b) globais, quando se referirem a terra como um todo (por exemplo, as causadas pela expansão térmica da água dos oceanos).

As variações do nível relativo dos oceanos são resultantes de dois tipos de fenômenos, os gerais que provocam alterações eustáticas, os quais são majoritariamente derivados de glaciações e os locais, que não alteram a posição eustática, mas modificam as relações de altitude entre porções continentais e oceano, os quais são derivados de movimentos isostáticos, tectônicos, deformações do geoide (VIEIRA, 1981).

#### 3.4.1 Causas da variação relativa do nível médio do mar

A seguir são enumerados alguns exemplos de fenômenos que provocam a variação do nível médio do mar

**Pressão Atmosférica**, quando a pressão atmosférica aumenta sobre a superfície do mar, o nível d'água neste local diminui, ocorrendo o contrário quando a pressão diminui. Por exemplo, no centro de um ciclone, a pressão atmosférica é mais baixa que na periferia, havendo ali uma elevação do nível do mar.

**Vento**, a tensão tangencial que é exercida pelo vento sobre a superfície do mar provoca uma circulação da massa d'água dos oceanos que, em última análise, traduz-se como elevação ou abaixamento do nível do mar junto à costa, dependendo da direção do vento.

Para descrever este fenômeno, bem como aquele associado à pressão atmosférica, o termo maré meteorológica (*storm surge*) é geralmente usado. Por exemplo, no litoral sul do Rio de Janeiro, ventos fortes de sudoeste provocam elevação do nível do mar (*wind set-up*) enquanto que ventos fortes de nordeste provocam abaixamento do nível do mar (*wind set-down*). A duração deste fenômeno varia desde poucas horas até dois ou três dias (NOGUEIRA, 1992).

**Precipitação e Evaporação**, estes processos causam variações na quantidade de massa d'água nos corpos d'água costeiros, mares e oceanos, com consequências sobre o nível do mar. Em termos globais, acredita-se que haja um balanço entre esses processos, de modo que a quantidade total de água nos mares e oceanos permaneça constante, a menos que haja mudanças climáticas globais (por exemplo, variação da temperatura média da Terra). Em termos regionais, entretanto, pode haver preponderância de um processo em relação a outro.

**Elevação Global da Temperatura**, desde a revolução industrial, a queima de combustíveis fósseis e também a queima de florestas têm lançado na atmosfera quantidades crescentes de dióxido de carbono, que se estima haver provocado um aumento de 10% na concentração deste gás na atmosfera (IPCC, 1990).

O aumento de concentração de dióxido de carbono e alguns outros gases na atmosfera provavelmente irá acelerar a elevação da temperatura global da Terra no próximo século, provocando, através do efeito estufa, a aceleração da taxa de elevação do nível médio do mar. Segundo TITUS (1990) *apud* NOGUEIRA, 1992, se continuar tal tendência de elevação na concentração desses gases na atmosfera, a temperatura global da terra elevar-se-á de 3 a 5°C no final do próximo século.

Existem ainda as mudanças relativas entre continente e mar, resultado de acomodações de terreno, especialmente em áreas estuarinas. Nessas regiões, é necessário um acompanhamento geodésico para estabelecer eventuais adensamentos, onde o terreno ao afundar dá a impressão de que o nível do mar estaria se elevando. Este

fenômeno tem escala temporal da ordem de década. Finalmente existe a variação secular do nível do mar, que está sendo amplamente discutida na imprensa e literatura especializada, que se relaciona ao aquecimento das águas dos oceanos e o derretimento das geleiras continentais, especialmente na Groenlândia e na Antártida.

Além das causas da variação relativa do nível médio do mar, pode se enumerar algumas consequências como: 1) Erosão costeira que destrói praias e afeta a vida útil das obras costeiras, 2) Alteração morfológica de embocaduras e canais de acesso a portos devido a variações do prisma de maré, ou da capacidade de transporte de sedimentos.

#### 3.4.2 Tendência do Nível Médio do Mar no Estado do Rio de Janeiro

NEVES *et al.*, 2007 fizeram um estudo sobre vulnerabilidades no litoral do estado do Rio de Janeiro devido às mudanças climáticas onde no mesmo afirmam que no Brasil há muito tempo faz-se monitoramento contínuo do nível do mar, porém os dados não são referidos a um datum vertical confiável ou materializado através de marcos geodésicos (Referências de Nível), ou faltam as cadernetas de campo dos levantamentos topográficos, ou faltam os registros hidrográficos que permitiriam a recuperação das séries históricas.

A série de dados de nível do mar mais extensa no Estado do Rio de Janeiro foi obtida pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (atualmente Centro Hidrográfico da Marinha – CHM) na Ilha Fiscal. Os valores médios anuais entre 1965 e 2000 estão representados na Figura 6, observando-se que tais valores estão referidos a um datum arbitrário, pois até o momento ainda não foi possível correlacionar os valores de nível do mar com um datum fixo, como o do IBGE.

Torna-se evidente como o nível médio do mar varia de ano para ano, bem como ao longo dos anos. Como é enfatizado por PIRAZZOLI (1986), deve-se obter uma série de dados com duração mínima de 20 anos para se determinar o ciclo nodal da maré astronômica; para se caracterizar efeitos meteorológicos sobre o nível do mar, a Organização Meteorológica Mundial recomenda séries normais de 30 anos; finalmente, para se determinar tendências de longo prazo, a extensão da série deve ter pelo menos 50 anos.

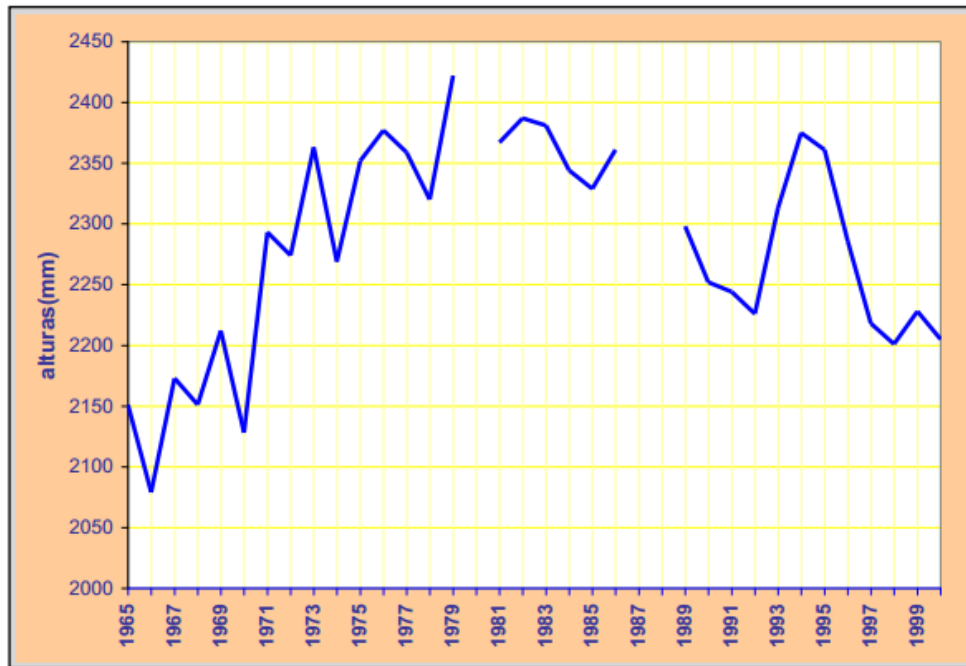


Figura 6. Variação do nível médio do mar na Ilha Fiscal, baía de Guanabara, RJ. (Adaptado, NEVES *et al.*, 2007)

Para o caso do estudo dos processos sedimentológicos na Lagoa de Araruma considerou-se uma suposta variação do nível médio em 0.5 metros a fim de verificar o comportamento morfológico das cotas de fundo na situação atual e futura do nível médio devido a efeitos de mudanças climáticas.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia foi a seguinte: usou-se o modelo computacional e foram feitas simulações para situação atual e futura do NM e depois feitas comparações dos resultados.

Este capítulo discute a implantação dos modelos computacionais, incluindo aspectos como domínios de modelagem e batimetria, caracterização da maré, considerações sobre condições de contorno e ventos, além de outros forçantes como rios.

### 4.1 Sobre Modelagem Computacional

Os modelos computacionais empregados nesta dissertação são referentes ao SisBaHiA<sup>1</sup>, sigla de Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, é um sistema profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação Coppetec, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa da COPPE/UFRJ - Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro. O SisBaHiA vem sendo ampliado desde 1987 e tem sido usado para elaboração de inúmeras dissertações de mestrado e teses de Doutorado, bem como, para variedades de projetos de pesquisa para análise e solução de problemas ambientais.

Segundo ROSMAN *et al.*, (1997), modelos são ferramentas integradoras, sem as quais dificilmente se consegue uma visão da dinâmica dos processos em sistemas ambientais complexos tais como baías e lagoas.

Normalmente, quando se levantam dados ambientais para estudos e projetos, visando o planejamento, gestão ou gerenciamento, obtêm-se séries temporais em uns poucos pontos distribuídos na área a ser estudada. A análise de dados ambientais medidos em pontos isolados pode ser prejudicada se não se tiver uma ideia clara da dinâmica do sistema como um todo.

---

<sup>1</sup> Para mais detalhes sobre o SisBaHiA pode se recorrer a Referência Técnica que pode ser baixada em: <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br>

Modelos são ferramentas indispensáveis aos estudos e projetos, à gestão e ao gerenciamento de corpos de água naturais, pois permitem integrar informações espacialmente dispersas, interpolar informações para regiões nas quais não há medições, ajudar a interpretação de medições feitas em estações pontuais, propiciar entendimento da dinâmica de processos, prever situações simulando cenários futuros. O uso de modelos como ferramentas de previsão inclusive pode ser feito praticamente em tempo real.

#### **4.1.1 Domínio de modelagem e batimetria**

Os mapas disponíveis com o posicionamento das margens foram obtidos de trabalhos recentes sobre a lagoa (Coppetec, ROSMAN, 2006), as atualizações foram feitas recorrendo ao Google Earth. O domínio modelado é mostrado na Figura 9, foi discretizado por elementos finitos quadrangulares conforme apresentado na Figura 12 e Figura 13. Os dados de batimetria são referentes a levantamentos realizados em 2005, por uma equipe da Universidade Federal Fluminense – UFF (Figura 7) e outra disponibilizada pela Secretaria Estadual de Rios e Lagoas - SERLA, em maio de 2006(vide Figura 8).

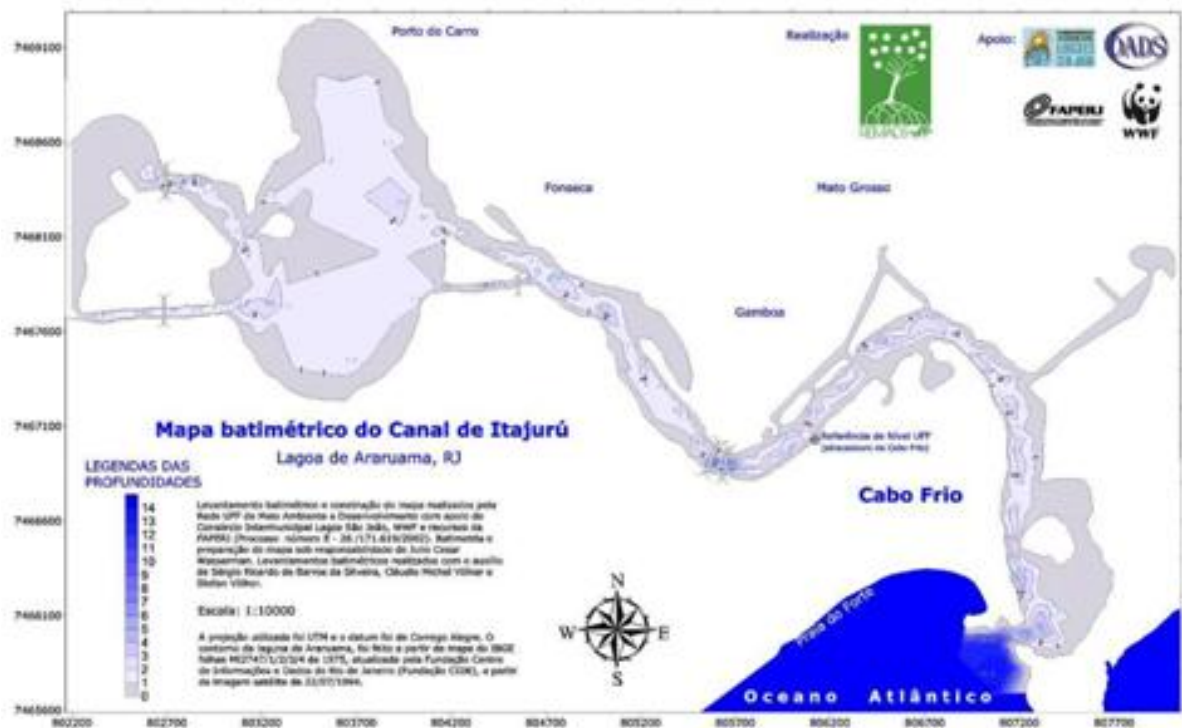
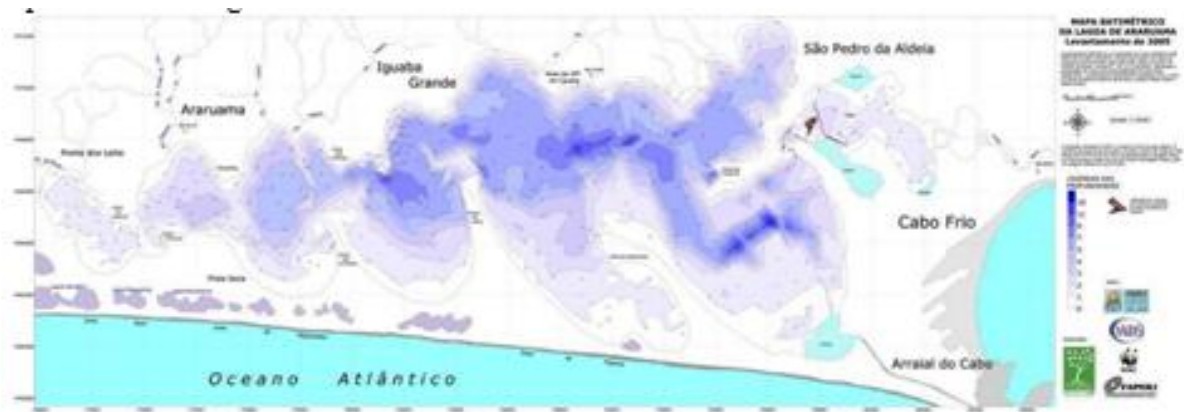


Figura 7. Reprodução das imagens com informações gerais de batimetria da Lagoa de Araruama, cedidas pela UFF à SERLA em dezembro de 2005.

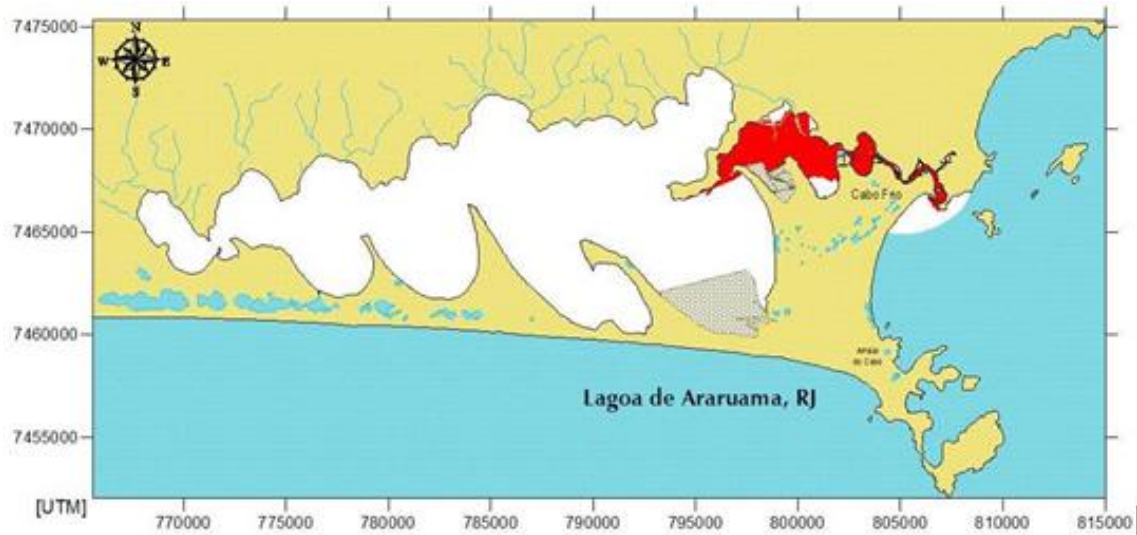


Figura 8. Em vermelho, mapa com indicação da região do levantamento batimétrico realizado em Maio de 2006, os dados foram cedidos pela SERLA. Fonte: (Coppetec, ROSMAN, 2006).

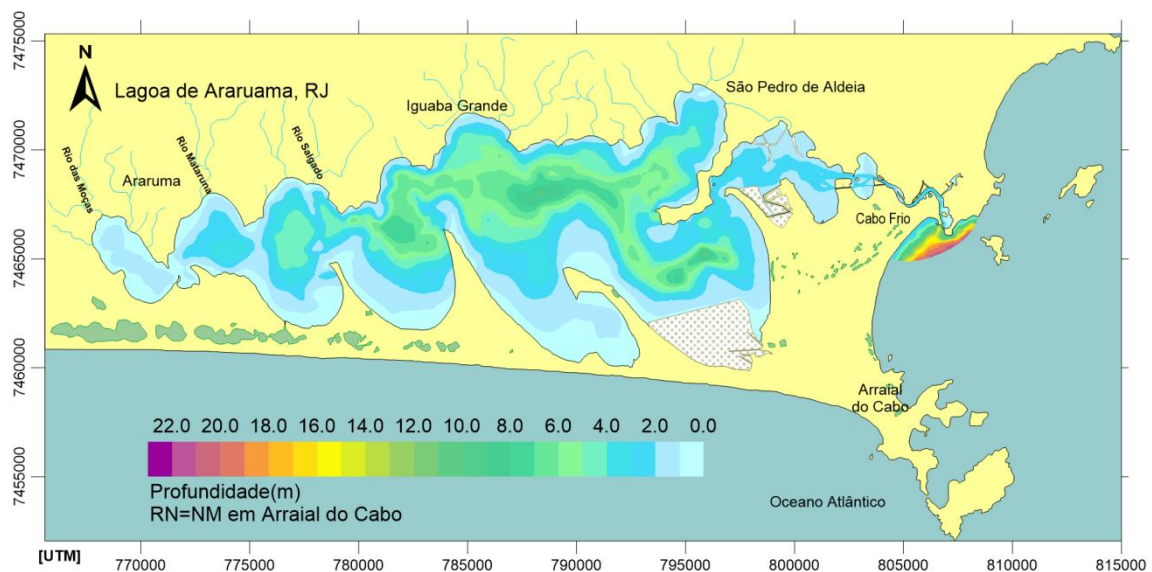


Figura 9. Mapa com batimetria geral da Lagoa de Araruama.

A batimetria está referenciada ao nível médio (NM) em Arraial do Cabo, assim, para ter a mesma referência com as cartas náuticas será necessário retirar 0,66 metros dos valores lidos nos mapas apresentados neste estudo.

As áreas hachuradas representam regiões cercadas, com salinas e marnéis. São regiões estagnadas, fora da zona dinâmica da Lagoa.

A Figura 10 apresenta um detalhe da batimetria na região de interesse, Canal de Itajurú.

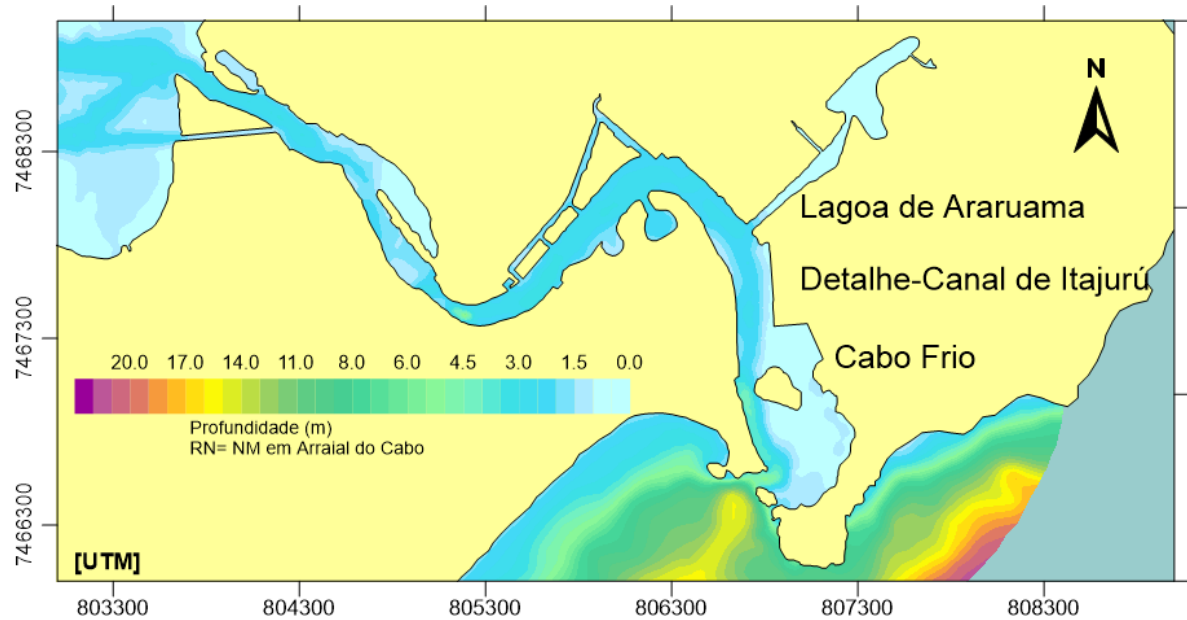
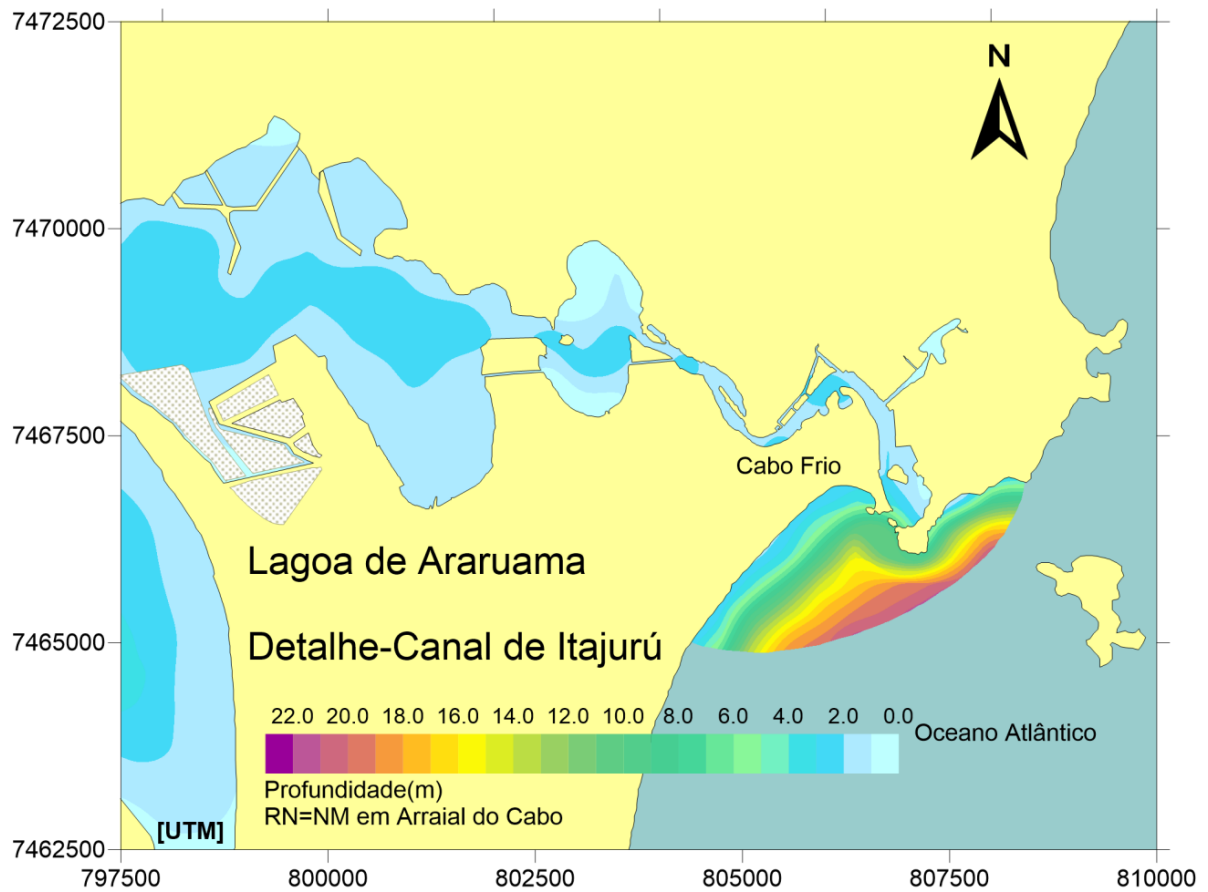


Figura 10. Mapa com detalhe da batimetria referente ao canal de Itajuru. Na estampa inferior mapa representando o detalhe da batimetria da estampa superior.

#### 4.1.2 Condições de contorno

No SisBaHiA, as condições de contorno são de dois tipos: condições de fronteira aberta, ou de fluxo livre, e terrestres, ou de fluxo restrito. As fronteiras abertas caracterizam em geral um encontro das massas de água, com fluxo livre através da linha de fronteira, que representa um limite do modelo e não necessariamente um limite físico do corpo de água. Um exemplo usual de fronteira aberta é a linha que representa a ligação da região costeira de um estuário com o mar aberto, ao longo da qual se impõe condições de níveis de água.

Os contornos terrestres representam margens e seções de rios ou canais que estejam incluídos no domínio de modelagem. Os fluxos através dos contornos terrestres são restritos, usualmente definidos por valores prescritos. Por exemplo, o fluxo que cruza margens é geralmente nulo, os fluxos que cruzam seções fluviais limites do modelo seguem hidrogramas prescritos.

Para obtenção dos contornos atualizados da região de interesse recorreu-se a Google Earth (2012) onde foram obtidas linhas de contorno georeferenciadas. Os contornos utilizados na delimitação do domínio de modelagem, destacado em branco na Figura 11, compõem um mapa base da área de interesse.

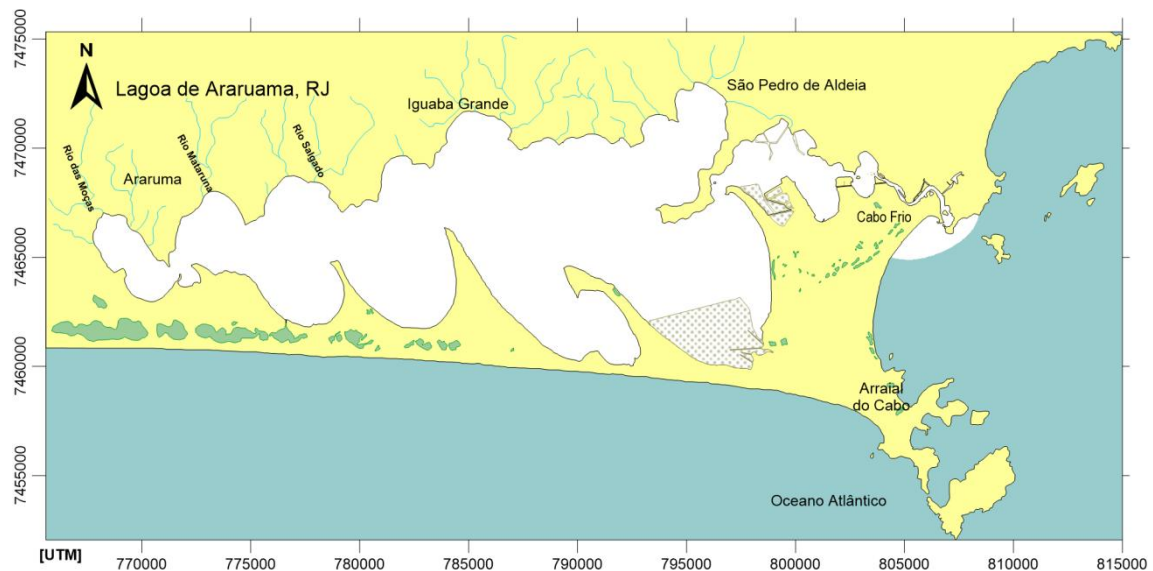


Figura 11. Mapa base da Lagoa de Araruama mostrando o domínio de modelagem.

#### 4.1.3 Discretização espacial

O domínio de modelagem foi discretizado por uma malha de elementos finitos quadrangulares com um total 1150 elementos e 5275 nós. Os nós são pontos de cálculo, representando assim a coluna de água. Na malha, os contornos de terra são demarcados por 1330 nós, os de mar são 29.

Cada elemento é composto por nove nós, sendo constituídos por um nó em cada vértice, compondo assim quatro nós nos vértices. A distribuição dos outros nós é feita no centro de gravidade do elemento e um nó em cada lado do elemento. A malha desenvolvida é mostrada na Figura 12 e Figura 13.

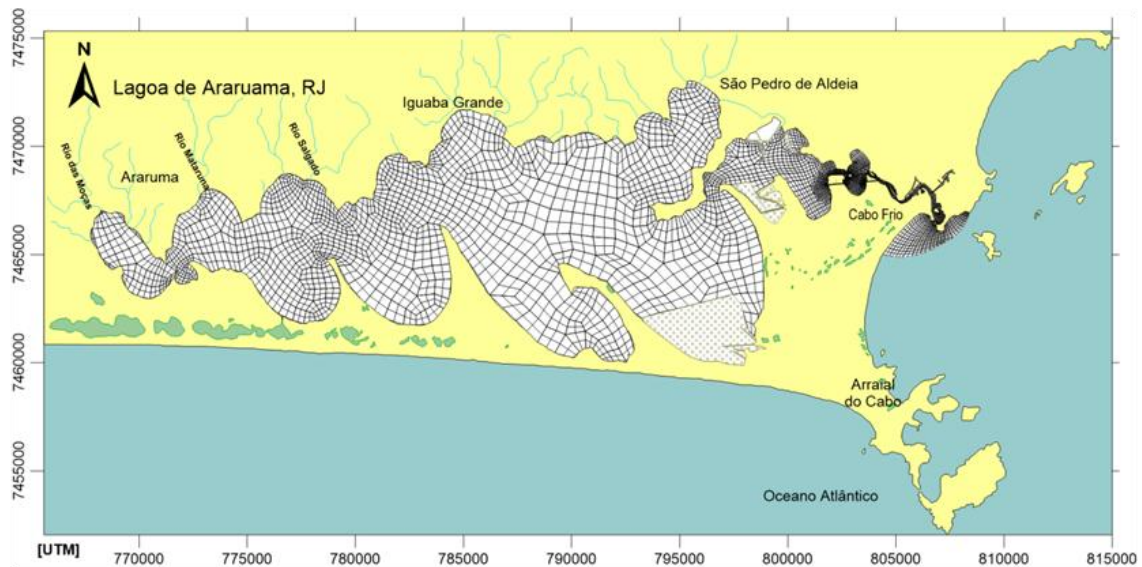


Figura 12. Mapa com malha de elementos finitos utilizada para a discretização espacial do domínio de modelagem.

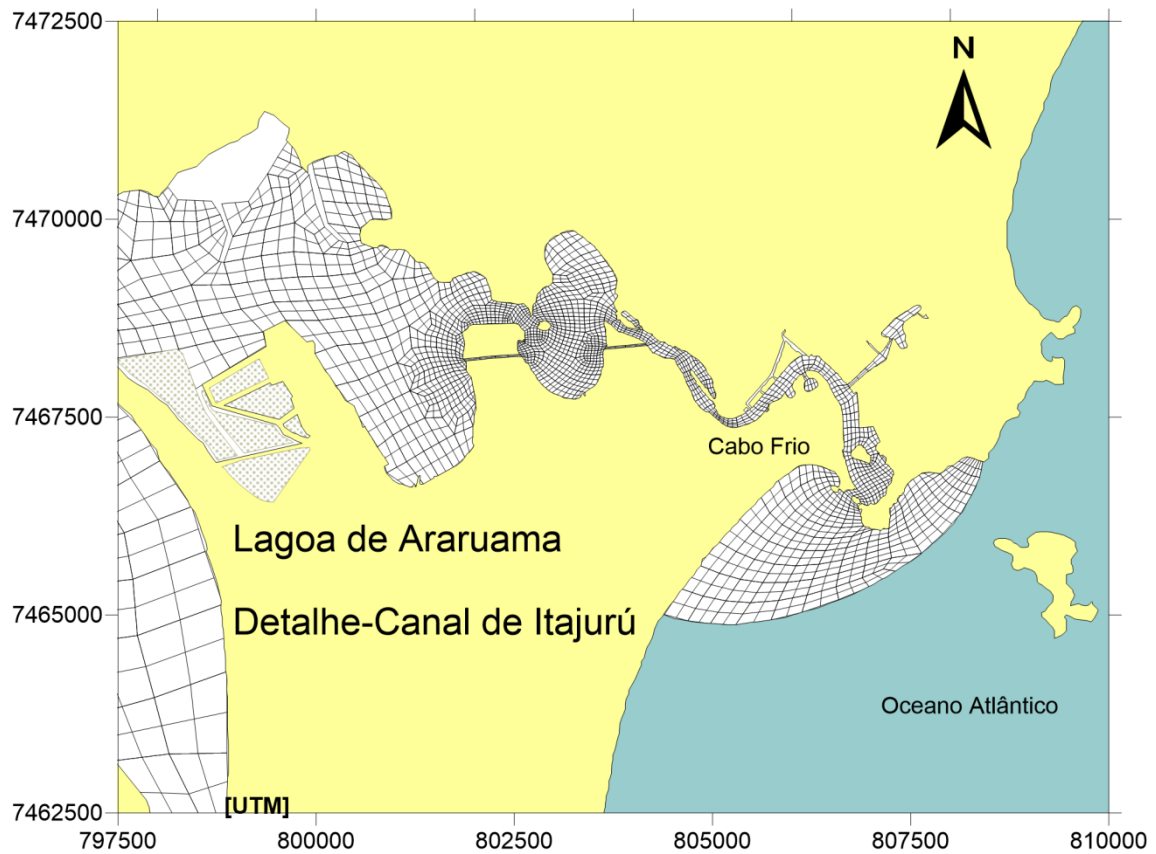


Figura 13. Mapa com detalhe da malha no canal de Itajurú, trecho São Pedro de Aldeia e a barra do Canal de Itajurú.

Tabela 3. Detalhes da malha usada na modelagem e domínio discretizado.

<b>Elementos Totais:</b>	<b>1150</b>
Quadrangulares	1150
Triangulares	0
<b>Nós Totais:</b>	<b>5275</b>
Internos	3918
Contorno Terra	1330
Contorno Aberto	29
Terra/Aberto	2
<b>Domínio Discretizado:</b>	
Área da Malha = 213189538.1 m <sup>2</sup>	
Área no NA Médio = 213189538.307 m <sup>2</sup>	
Volume de Água= 657441392.7 m <sup>3</sup>	
Prof. Média=3.08 m	

#### 4.1.4 Dados de maré

A obtenção da curva de maré foi baseada em constantes harmônicas publicadas pela FEMAR e são referentes à estação maregráfica do Porto do Forno em Arraial do Cabo, na latitude,  $22^{\circ} 58,3' S$ , e longitude,  $42^{\circ} 00,9' W$ .

A variação do nível do mar na embocadura do Canal de Itajurú foi modelada a partir de constantes harmônicas do Porto do Forno, em Arraial do Cabo. A Figura 14 mostra a curva de maré utilizada como condição de contorno do modelo hidrodinâmico, gerada a partir das constantes da Tabela 4. De realçar que o nível de referência corresponde ao nível médio do mar neste local.

Através das constantes harmônicas gerou-se uma série temporal de elevação de nível, maré sintética, para um período de 30 dias, conforme a Figura 14. Tal série é genérica, sem data específica, retratando as amplitudes típicas da maré nas cercanias da embocadura do canal de Itajurú, ao longo de um mês lunar.

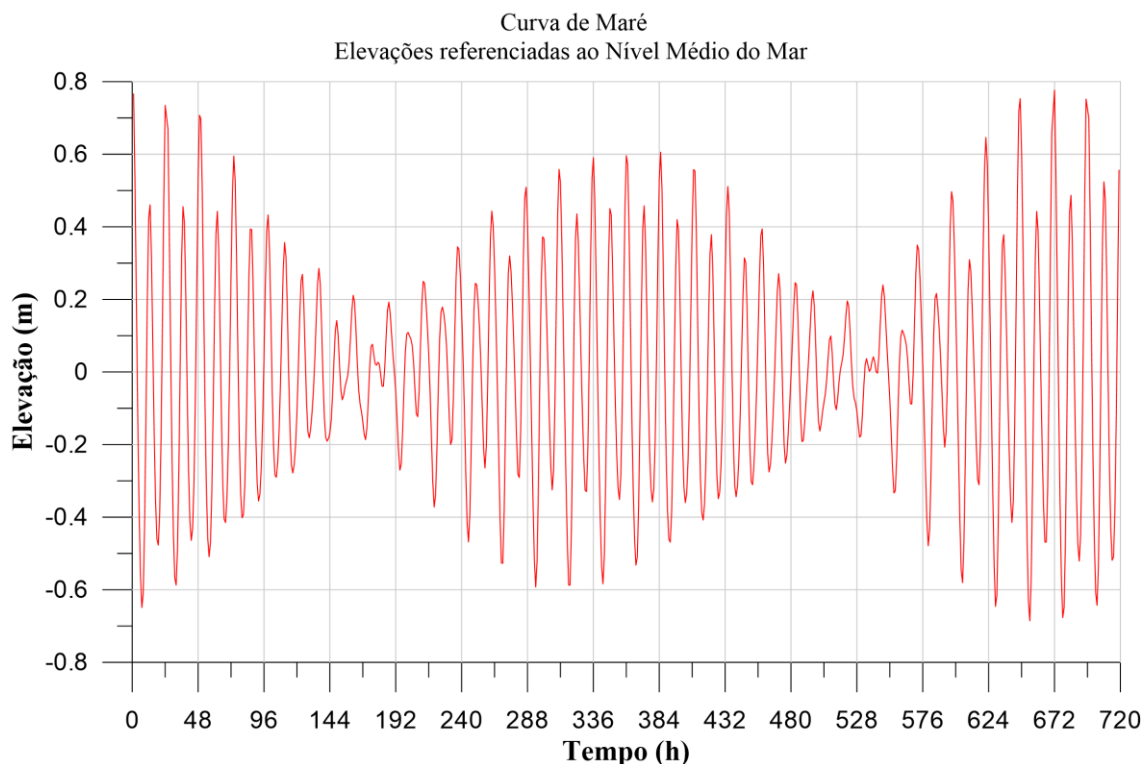


Figura 14. Curvas de marés geradas por meio de constantes harmônicas da estação maregráfica do Porto do Forno, próximo da embocadura do canal de Itajurú.

Tabela 4. Lista de constantes harmônicas do Porto do Forno utilizadas para obtenção da serie de nível da água, FEMAR (Fundação de Estudos do Mar)<sup>2</sup>.

FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR <i>Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras</i>					
<b>Nome da Estação :</b>		<b>ARRAIAL DO CABO - RJ</b>			
<b>Localização :</b>		Enseada dos Anjos - Porto do Forno.			
<b>Organ. Responsável :</b>		DHN / INPH / IEAPM			
<b>Latitude :</b>		22° 58,3' S	<b>Longitude :</b>		42° 00,9' W
<b>Período Analisado :</b>		02/02/82 a 04/03/82		<b>Nº de Componentes :</b> 40	
<b>Análise Harmônica :</b>		Método Almirante Santos Franco			
<b>Classificação :</b>		Maré de Desigualdades Diurnas.			
<b>Estabelecimento do Porto:</b> (HWF&C)		II H 57 min	<b>Nível Médio</b> (Zo):		66 cm acima do NR.
<b>Média das Preamares Superiores (MHHW) :</b>		125 cm acima do NR.	<b>Média das Preamares Inferiores (MLHW) :</b>		106 cm acima do NR.
<b>Média das Baixa-mares Superiores (MHLW) :</b>		22 cm acima do NR.	<b>Média das Baixa-mares Inferiores (MLLW) :</b>		11 cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU <sub>2</sub>	0,7	241
Ssa	-	-	N <sub>2</sub>	4,2	092
Mm	5,7	308	NU <sub>2</sub>	0,8	090
Mf	-	-	M <sub>2</sub>	32,6	078
MTM	9,6	271	L <sub>2</sub>	2,2	092
Msf	0,9	355	T <sub>2</sub>	1,0	088
Q <sub>1</sub>	2,7	075	S <sub>2</sub>	17,2	088
O <sub>1</sub>	1,0	087	K <sub>2</sub>	4,7	089
M <sub>1</sub>	1,4	046	MO <sub>3</sub>	0,2	303
P <sub>1</sub>	1,7	143	M <sub>3</sub>	0,1	218
K <sub>1</sub>	5,4	147	MK <sub>3</sub>	0,4	220
J <sub>1</sub>	1,0	123	MN <sub>4</sub>	0,4	009
OO <sub>1</sub>	0,8	046	M <sub>4</sub>	1,9	025
MNS <sub>2</sub>	1,1	128	SN <sub>4</sub>	0,4	037
2N <sub>2</sub>	0,6	106	MS <sub>4</sub>	1,0	115
<b>Referências de Nível:</b> RN IBGE - No quinto degrau da escada da Igreja em frente ao Porto. RN2 DHN colocado no primeiro pilar do enrocamento do Porto. RN 04 na soleira da porta do Entrepasto de Pesca.					
<b>Obs:</b> Outros Períodos : 13/07/61 a 14/09/61 ; 01/12/71 a 11/07/71 ; 01/03/76 a 01/04/76; 01/09/82 a 30/12/82 ; 15/05/90 a 09/09/90; 01/08/91 a 31/08/91 Existem ainda outras observações no IEAPM Consta das Tábuas das Marés.					
Código BNDO: 50156					

<sup>2</sup> Fonte acessada em 7/03/2013: <http://www.fundacaofemar.org.br/biblioteca/emb/tabelas/183.html>

A maré dominante na região de estudo também pode ser classificada recorrendo ao fator de forma,  $F$ , que é a razão entre a soma das amplitudes ( $K_1+O_1$ ) e ( $M_2+S_2$ ) (POND e PICKARD, 1983), cf. Tabela 5:

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \quad (1)$$

Tabela 5. Tipo de maré e fator de forma (POND e PICKARD, 1983).

Tipo de maré	Fator de Forma( $F$ )
Semi-diurna	0-0,25
Mista, com predominância semi-diurna	0,25-1,5
Mista, com predominância diurna	1,5-3,0
Diurna	>3,0

Recorrendo a Tabela 4 e equação (1), obteve-se o valor de 0,3. Com este resultado constata-se que a maré é do tipo mista com predominância semi-diurna. É um tipo de maré que possui um período dominante no entorno de 12 horas apresentando desigualdades diurnas. De fato, como se vê no gráfico da Figura 14, ao longo de um período diurno, ocorre duas preamares e duas baixa-mares, porém com amplitudes marcadamente distintas entre os ciclos semi-diurnos.

#### 4.1.5 Vento

Os dados de direção e intensidade de ventos utilizados neste estudo são referentes a medições feitas na estação 83759 em São Pedro D'Aldeia (v. Figura 15), localizada na latitude 22°49S e longitude 42°06'W, durante um período de 20 anos (de 12/07/76 a 22/07/97). Os mesmos dados compõem uma série temporal de medições de velocidade e direção do vento referenciada ao norte verdadeiro com intervalos de amostragem de 3 horas.



Figura 15. Mapa de localização da estação meteorológica de São Pedro D'Aldeia.

Com base nos dados fica clara a predominância dos ventos NE, como apresentado na Figura 16. Agrupando-se as direções N-NE-E obtêm-se cerca de 2/3 de todas as ocorrências.

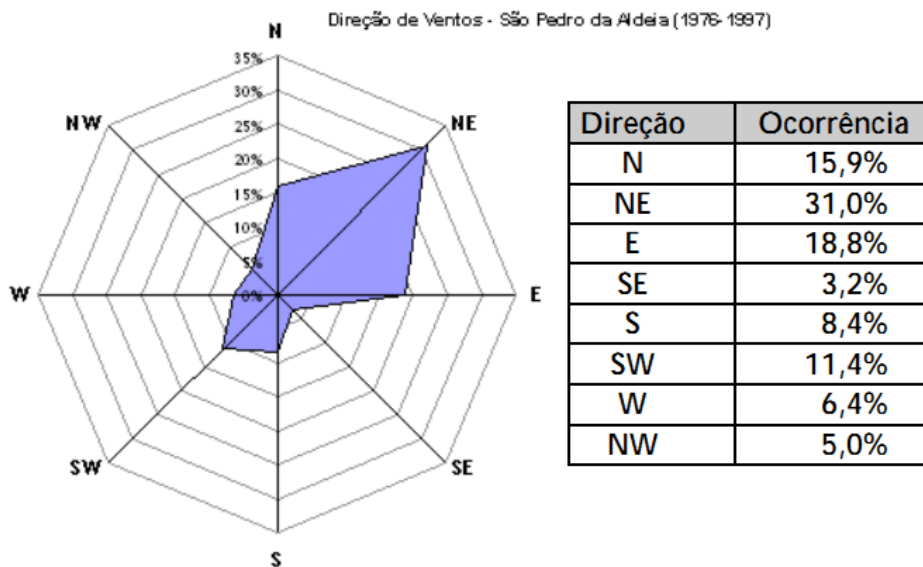


Figura 16. Estatística da direção do vento. (Coppetec, ROSMAN, 2002)

Na Figura 17, estão apresentados para os mesmos dados de vento as distribuições de frequência para diferentes direções e intensidades de vento.

Com base na Figura 17, é notável que os ventos, reinante<sup>3</sup>, bem como, o dominante<sup>4</sup> são ventos de Nordeste. O vento reinante apresenta uma intensidade de 5.0 m/s e o dominante de 10.0 m/s

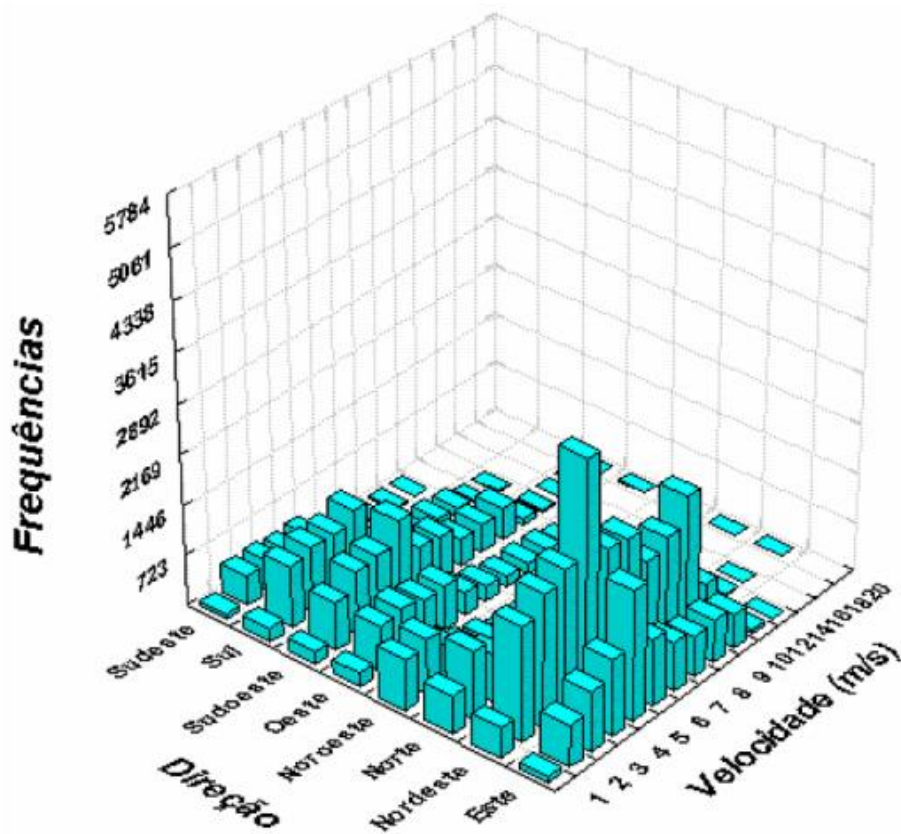


Figura 17. Distribuição de velocidade e direção do vento entre 1976 e 1997 (Coppetec, ROSMAN, 2002).

A Figura 18 e Figura 19 representam condições típicas de vento em situações de verão (condições de ventos usuais de NE) e de inverno (condições de ventos usuais de SW). A velocidade do vento é indicada pelo padrão das cores e as setas representam a direção do vento. De salientar que, os ventos são denominados de acordo com a direção e o sentido de onde provém.

<sup>3</sup> Vento reinante é o vento que possui maior probabilidade de ocorrência em uma direção, ou seja, o de maior frequência.

<sup>4</sup> O vento que apresenta o maior produto entre a frequência e o quadrado da intensidade do vento.

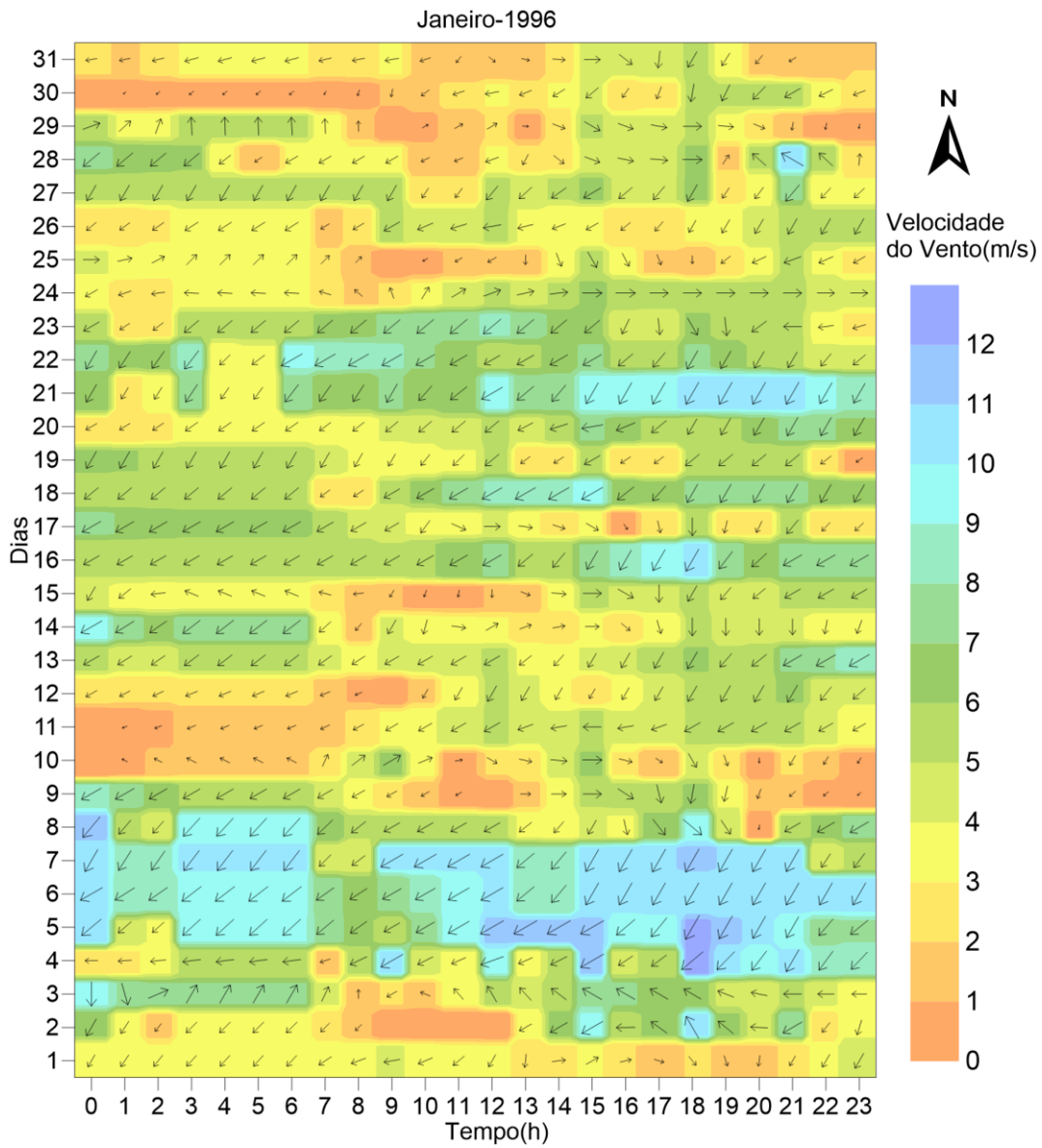


Figura 18. Dados de vento referentes ao mês de Janeiro retratando situação de verão com ventos dominantes de NE.

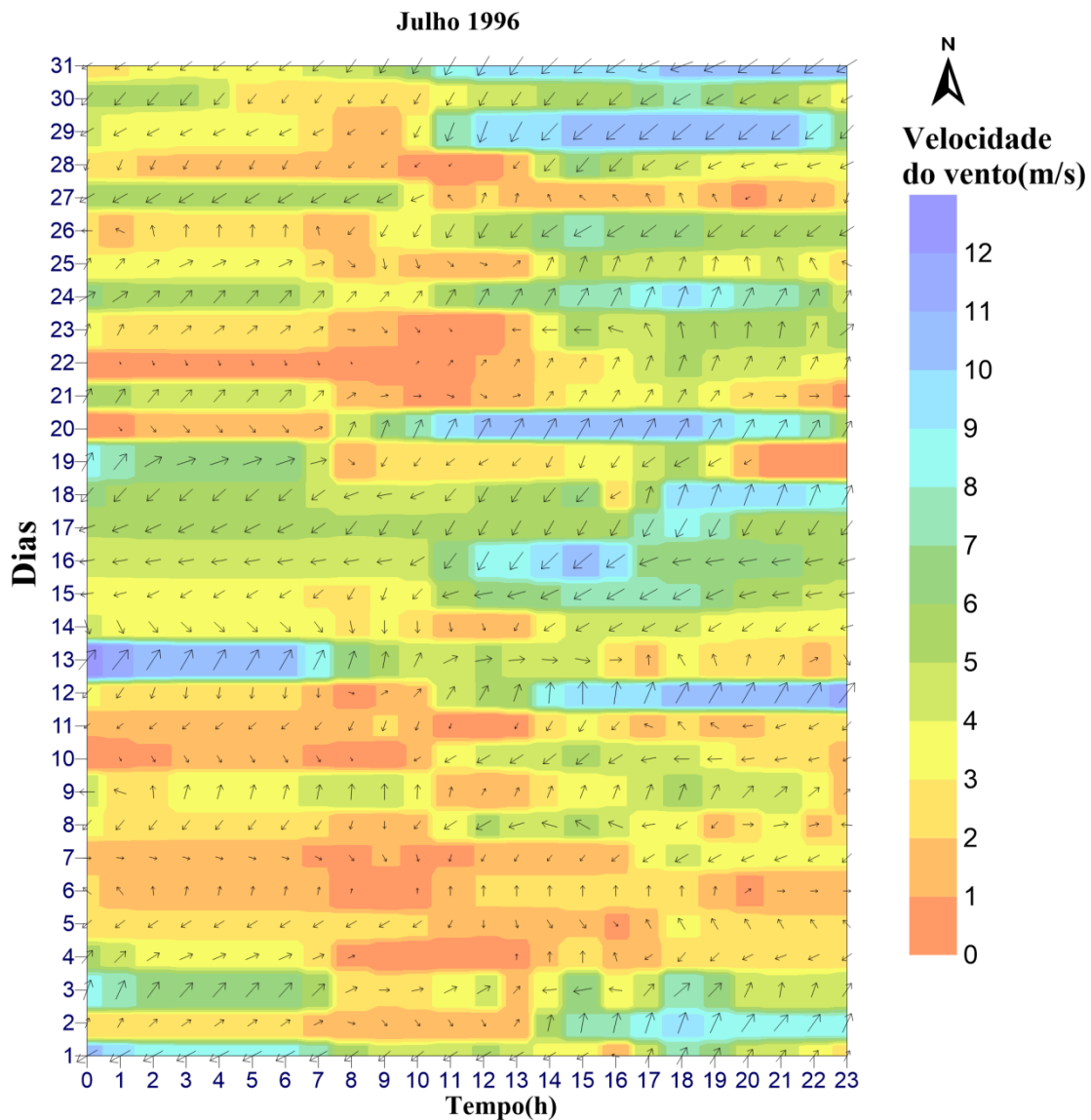


Figura 19. Dados de vento referentes ao mês de Janeiro retratando situação de inverno com ventos dominantes de SW.

#### 4.1.6 Vazões dos Rios Afluentes

As vazões dos rios afluentes foram definidas a partir dos dados de distribuição média das chuvas na região da estação de Cabo Frio, no período de 1961 a 1970, utilizando o método racional<sup>5</sup> (GRIBBIN, 2009) para transformação de chuva em vazão. De entre os rios existentes na lagoa de Araruama foram usados os de maiores vazões, Rio das Moças, Mataruna e Salgado. Os outros rios têm vazões muito menores.

<sup>5</sup> Método racional, surgido na Inglaterra em 1889, é usado para calcular a vazão de pico depois de um evento de chuva. Ele calcula a maior vazão produzida por uma determinada bacia hidrográfica.

A Figura 20 mostra o mapa de localização dos rios das Moças, Mataruna e Salgado.

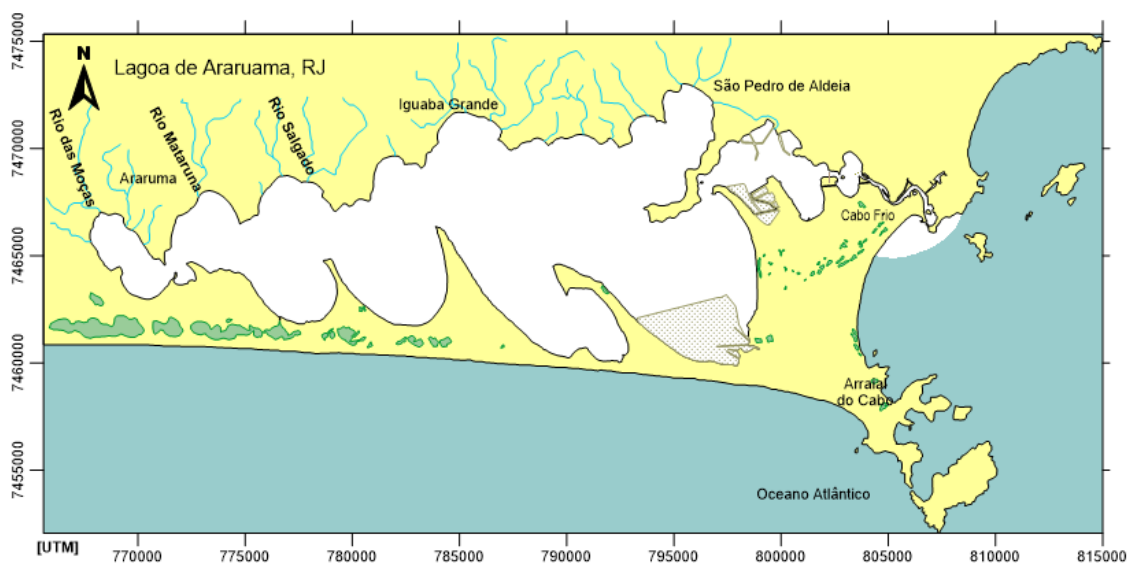


Figura 20. Mapa com localização dos principais rios afluentes à lagoa de Araruama.

As vazões médias dos principais rios afluentes usadas neste trabalho são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6. Vazão média anual dos principais rios afluentes à Lagoa de Araruama Adaptado (CUNHA, 2003).

Rio	Vazão Média (m <sup>3</sup> /s)
Das Moças	1.02
Mataruna	0.51
Salgado	0.32

## 5 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Esta seção apresenta uma breve revisão dos modelos utilizados na simulação, modelo hidrodinâmico e de transportes de sedimentos, respectivamente.

### 5.1 Modelo Hidrodinâmico do SisBaHiA

Análises de hidrodinâmica ambiental tem como base fundamental o modelo hidrodinâmico. Para estudos de processos sedimentológicos com evolução de batimetria, o modelo de transporte de sedimentos e o modelo de circulação hidrodinâmica são acoplados e rodam simultaneamente, já que os efeitos são inter-relacionados.

O modelo hidrodinâmico do SisBaHiA adotado nesse trabalho é otimizado para corpos d'água naturais com escoamentos pouco afetados por baroclinicidade vertical. Na formulação matemática adotada pelo modelo destacam-se as seguintes características:

- Resolve as equações completas de Navier-Stokes considerando a aproximação de águas rasas (aproximação de pressão hidrostática) e a aproximação de Boussinesq<sup>6</sup>;
- Considera a condição de fluido incompressível;
- Aplica a modelagem da turbulência baseada em técnicas de filtragem semelhantes àquelas empregadas na Simulação de Grandes Vórtices (*LES - Large Eddy Simulation*).

O SisBaHiA resolve modelos hidrodinâmicos em dois modos: em três dimensões com campo de velocidades tridimensional (3D); ou promediados na vertical (2DH). O modelo 2DH dá como resultados valores com dimensões  $(x, y, t)$  de elevação da superfície livre e componentes horizontais das velocidades das correntes promediadas na vertical. O modelo 3D dá como resultados valores com dimensões  $(x, y, z, t)$  para as componentes das velocidades das correntes.

Na Figura 21 são mostradas as variáveis adotadas na formulação matemática do SisBaHiA.

---

<sup>6</sup> Extraído do extrato do livro Métodos Numéricos em Recurso Hídricos, “Subsídios para Modelagem de Sistemas Estuarinos”, capítulo 3

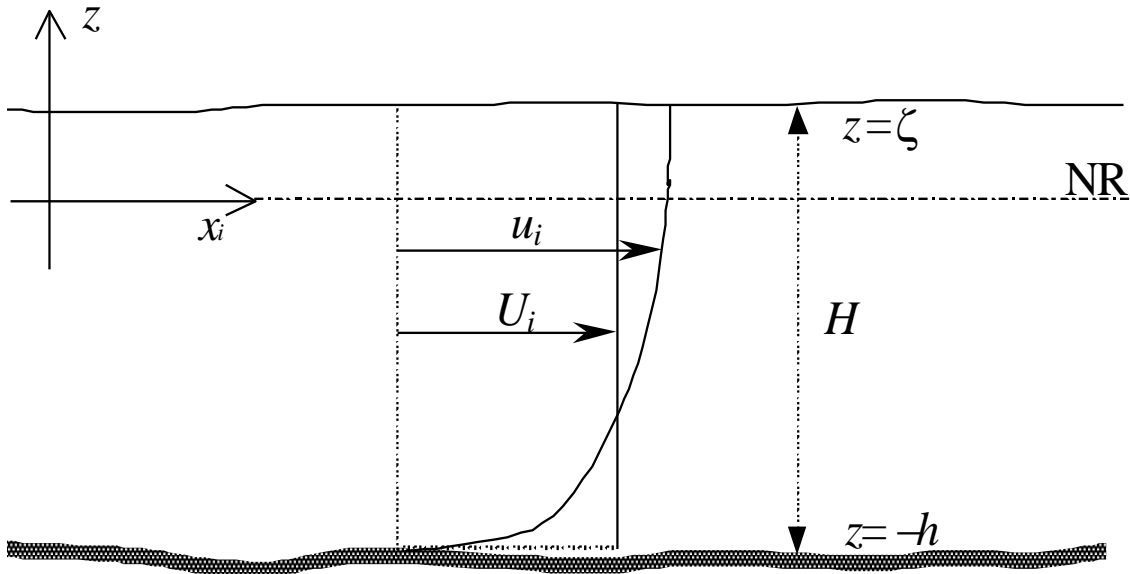


Figura 21. Variáveis hidrodinâmicas adotadas na formulação matemática do SisBaHiA (ROSMAN, Referência Técnica do SisBaHiA<sup>®</sup>, 2013).

Onde:

- NR é o nível de referência;
- $\zeta(x, y, t)$  é a cota ou elevação da superfície livre;
- $h(x, y, t)$  é o negativo da cota do fundo, seguindo a convenção usual para valores de batimetria;
- $H(x, y, t)$  é a altura instantânea da coluna de água;
- $u_i(x, y, z, t)$  é componente da velocidade na direção  $x_i$ ;
- $U_i(x, y, t)$  é a componente na direção  $x_i$  da velocidade promediada na vertical;

As coordenadas e velocidades horizontais são representadas como  $(x, y) \equiv (x_1, x_2)$  e  $(u, v) \equiv (u_1, u_2)$ . A profundidade instantânea  $H = z_{\text{sup.}} - z_{\text{fundo}} = \zeta + h$ , também conhecida de altura da coluna de água. O índice  $i$  representa os eixos  $x$  e  $y$ .

As equações governantes dos modelos bidimensionais na horizontal (2DH) são obtidas por promediação na direção vertical das equações tridimensionais. Assim, no modelo 2DH, as equações governantes do modelo 3D são integradas analiticamente na dimensão vertical. (ROSMAN, *et al.*, 1997).

No endereço [www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br) pode-se baixar a documentação de referência técnica dos modelos, com amplos detalhes sobre as equações governantes dos

modelos 2DH e 3D. O que segue é um resumo focado nos módulos empregados neste trabalho.

### 5.1.1 Equações governantes do modelo 2DH

No modelo 2DH, para cada intervalo de tempo são determinadas as componentes das velocidades médias na vertical, na direção  $x$  e  $y$ ,  $U(x, y, t)$  e  $V(x, y, t)$ , respectivamente, e a elevação da superfície livre,  $z = \zeta(x, y, t)$ . Para tal, são necessárias no mínimo três equações para se determinar as incógnitas. São as equações de quantidade de movimento 2DH nas direções  $x$  e  $y$ , e a equação da continuidade do volume integrada na vertical:

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gH}{2\rho_o} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o H} \left( \frac{\partial(H\bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) \\ & + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_x^S - \tau_x^B) + 2\Phi \sin \theta V - \frac{U}{H} \Sigma q \end{aligned} \quad (2)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gH}{2\rho_o} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o H} \left( \frac{\partial(H\bar{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) \\ & + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_y^S - \tau_y^B) - 2\Phi \sin \theta U - \frac{V}{H} \Sigma q \end{aligned} \quad (3)$$

Onde:

$V; U$  = São as velocidades médias na vertical nas direções  $x$  e  $y$ .

$\tau_x^S; \tau_y^S$  = São as tensões de atrito na superfície livre nas direções  $x$  e  $y$ .

$\tau_x^F; \tau_y^F$  = São as tensões de atrito no fundo nas direções  $x$  e  $y$ .

$\bar{\rho}$  = é a densidade da água promediada na coluna de água.

$\bar{\tau}_{xx}; \bar{\tau}_{xy}; \bar{\tau}_{yy}$  = Tensões turbulentas promediadas na vertical.

$\Sigma q$  = somatório de efeitos de evaporação, precipitação e infiltração.

### 3. Equação da Continuidade integrada na vertical

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \Sigma q \quad (4)$$

A explicação detalhada de cada termo das equações é mostrada na Tabela 7.

Tabela 7. Descrição dos termos mencionados nas equações da quantidade de movimento e de continuidade (Adaptado: ROSMAN, Referência Técnica do SisBaHiA®, 2012).

$\frac{\partial U}{\partial t}$	Representa a aceleração local do escoamento 2DH, o que quer dizer que, 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 zero.
$u \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y}$	Representa a aceleração advectiva do escoamento, i. e., em um determinado instante, esses termos representam o balanço dos fluxos advectivos, 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 lugares onde o nível de água é mais baixo.
$-\frac{1}{\rho_0} g \int_z^{\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz$	Representa a variação da pressão hidrostática na direção $x$ (gradiente de pressão), devido às diferenças de densidade. Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força escoamento de lugares onde a água é mais densa para lugares onde a água é menos densa.
$\frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial (H \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (H \tau_{xy})}{\partial y} \right)$	Representa a resultante das tensões dinâmicas turbulentas 2DH no escoamento i.e., em um determinado instante, representam o balanço dos fluxos difusivos médios na vertical, por unidade de área, de quantidade de movimento na direção $x$ , por unidade de massa. Por exemplo, esses termos são responsáveis pela geração de vórtices horizontais em zonas de recirculação.
$2\Phi \sin \theta V$	Representa a aceleração de Coriolis de corrente 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, por exemplo.
$\frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^s)$	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.

$-\frac{1}{\rho_o H}(\tau_x^B)$	<p>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.</p>
$\frac{U}{H}\Sigma q = \frac{U}{H}(q_P - q_E + q_I)$	<p>Representa efeitos na quantidade de movimento devidos a variações de massa em função dos fluxos, por unidade de área, de precipitação, <math>q_P</math>, de evaporação <math>q_E</math> e infiltração <math>q_I</math>, por unidade de área.</p>

### 5.1.2 Tensões de atrito devido ao vento

O atrito na superfície livre devido ao vento é definido por:

$$\tau_i^S = \rho_{ar} C_D W_{10}^2 \cos \phi_i ; [i = 1,2] \quad (5)$$

Onde,  $\tau_i^S$  é a tensão de atrito na superfície livre devido ao vento na direção  $x_i$ ,  $\rho_{ar}$  é a massa específica do ar,  $W_{10}$  (m/s) é a velocidade do vento local medida 10 metros acima da superfície livre,  $\phi_i$  é o ângulo entre o vetor de velocidade do vento local e a direção  $x_i$ .  $C_D = (0.80 + 0.065W_{10}) \times 10^{-3}$  é o coeficiente de arraste do vento.

### 5.1.3 Tensão de atrito no fundo no módulo 2DH

A tensão de atrito no fundo é um parâmetro importante para a modelagem hidrodinâmica e hidrossedimentológica, pois tem influência direta no cálculo de níveis e correntes, e ainda mais intensamente no cálculo das vazões sólidas.

A tensão de atrito no fundo  $\tau_i^B$  na direção  $x_i$  é calculada através de:

$$\tau_i^B = \rho_o \beta U_i [i = 1,2] \quad (6)$$

Onde  $\rho_o$  é a massa específica da água;  $U_i$  é a velocidade média na coluna d'água e o parâmetro  $\beta$  é calculado por:

$$\beta = \frac{g}{C_h^2} \sqrt{U^2 + V^2} \quad (7)$$

Onde o coeficiente de Chézy,  $C_h$ , é calculado pela expressão:

$$C_h = 18 \log_{10} \left( \frac{12H}{2\varepsilon} \right) = 18 \log_{10} \left( \frac{6H}{\varepsilon} \right) \quad (8)$$

Acima,  $2\varepsilon$  é a altura da rugosidade equivalente do fundo, sendo  $\varepsilon$  a amplitude. Os valores para  $\varepsilon$  recomendados são dados na Tabela 8.

Tabela 8. Valores recomendados para a amplitude da rugosidade equivalente de fundo,  $\varepsilon$ , para uso no módulo 2DH do modelo hidrodinâmico. (Adaptado de ABBOT e BASCO (1989) *apud* ROSMAN, 2013).

Leito de sedimentos com rugas	Amplitude da rugosidade
Predominância de siltes e finos	$0.0001\text{m} < \varepsilon < 0.0100\text{m}$
Predominância de areias finas	$0.007\text{m} < \varepsilon < 0.0150\text{m}$
Predominância de areias médias	$0.0100\text{m} < \varepsilon < 0.0300\text{m}$
Predominância de areias grossas	$0.0250\text{m} < \varepsilon < 0.0500\text{m}$
Predominância de areias muito grossas	$0.0400\text{m} < \varepsilon < 0.0800\text{m}$

Na região de interesse, os fundos são de sedimentos com predominância de areias finas a grossas, conforme mostra a Figura 4 e Figura 5. Portanto, as amplitudes das rugosidades equivalentes ficam na faixa de  $0.0001 \text{ m} < \varepsilon < 0.0800 \text{ m}$ , como indica o mapa de isolinhas de  $\varepsilon$  na Figura 22.

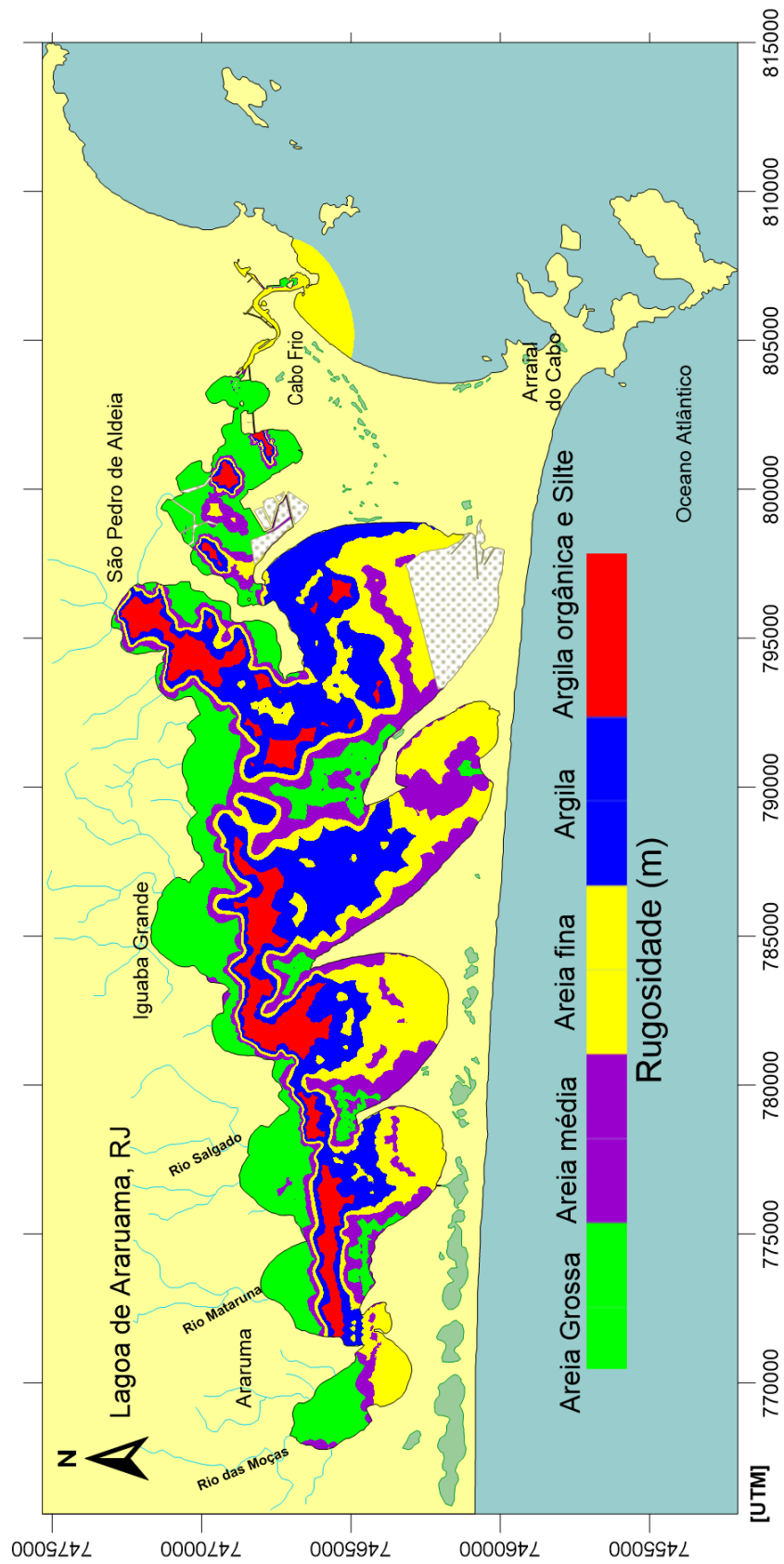


Figura 22. Mapa de isolinhas de amplitudes das rugosidades equivalentes,  $\epsilon$ , refletindo os tipos de sedimentos no fundo, conforme Figura 4 e Figura 5.

#### 5.1.4 Condições Iniciais

As condições iniciais do modelo hidrodinâmico 2DH são: os valores de elevação da superfície livre,  $\zeta$ , e as componentes de velocidade 2DH,  $U$  e  $V$ , no instante inicial de simulação,  $t_0$ , para todos os nós do domínio.

Uma vez que não se tinha nenhum resultado prévio adequado para ser usado como condição inicial, foi prescrita uma condição inicial considerando os valores das velocidades  $U$  e  $V$  iguais a zero e elevação uniforme para todos nós igual 0,028 m. A razão da escolha desse valor deve-se ao fato da maré no canal de Itajurú ser do tipo progressivo, este tipo de maré as velocidades se anulam no torno nível médio.

#### 5.1.5 Condições de contorno do modelo hidrodinâmico

Segundo ROSMAN, *et al.*,(2012),a existência e unicidade de uma solução para as equações de águas rasas, que formam o modelo matemático hidrodinâmico de um determinado corpo de água, é rigorosamente dependente de um grupo consistente de condições iniciais e de contorno.

Com a finalidade de simular padrões de circulação existentes na região de estudo, foram criados cenários diferentes no modelo hidrodinâmico do SisBaHiA. Os cenários que foram criados contêm forçantes (maré, vazões fluviais e ventos) que contribuem para a circulação das águas na lagoa de Araruama. A descrição das forçantes foi feita na seção 4.1.4, 4.1.5 e 4.1.6.

## 5.2 Modelo de Transporte de sedimentos com evolução de batimetria<sup>7</sup>

O modelo disponibilizado no SisBaHiA<sup>®</sup>, é um modelo para cálculo da erosão, transporte e deposição de sedimentos em corpos d'água. Pode funcionar desacoplado ou acoplado ao modelo hidrodinâmico. Quando usado de modo desacoplado da hidrodinâmica objetiva apenas obter estimativas de vazões sólidas, para condições hidrodinâmicas independentes. Quando acoplado, permite simulações hidro-sedimentológicas, com evolução morfodinâmica do fundo. Neste caso, os modelos hidrodinâmico e sedimentológico têm vinculação com retro alimentação, pois as alterações de batimetria interferem na hidrodinâmica e vice-versa. As metodologias

---

<sup>7</sup> Partes do texto desta seção são adaptadas da Referência Técnica do SisBaHiA<sup>®</sup>, Rosman *et. al* (2012).

empregadas variam em função do tipo de sedimentos, coesivos ou não, forma do corpo d'água, escalas temporais e espaciais de interesse.

Um modelo acoplado usado resolve a equação da continuidade de volume de água, equação de conservação da quantidade de movimento, equação de transporte de sedimento e a equação de continuidade da massa de sedimentos, em simultâneo (SUMMER e WALLING, 2002).

Lembrando que o foco deste trabalho está no canal de Itajurú, que apresenta fundos arenosos, v. Figura 5, usou-se o modelo de transporte de sedimentos não-coesivos acoplado ao modelo hidrodinâmico, de modo a simular as alterações de batimetria devido a alterações nos agentes hidrodinâmicos.

### 5.2.1 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,  $\tau_c$ . Valores da tensão de arraste no leito,  $\tau_o$ , 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.

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

$$\Psi = \frac{u_*^2}{g(S_s - 1)d} = \frac{\tau_o}{\rho_o g(S_s - 1)d} = \frac{\tau_o}{\gamma_a(S_s - 1)d} = f\left(\underbrace{\frac{du_*}{v}}_{R_*}\right) \quad ; \quad S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_a} \quad (9)$$

onde:

$R_*$  = Número de Reynolds do grão

$\tau_o$  = Tensão de arrasto no leito

$\gamma_s$  = Peso específico do grão =  $g\rho_s$

$\gamma_a$  = Peso específico da água =  $g\rho_o$

$g$  = Aceleração da gravidade

$\rho_o$  = Massa específica da água

$\rho_s$  = Massa específica do sedimento

$u_*$  = Velocidade de atrito no leito

$\nu$  = Viscosidade cinemática da água

$S_s$  = Gravidade específica

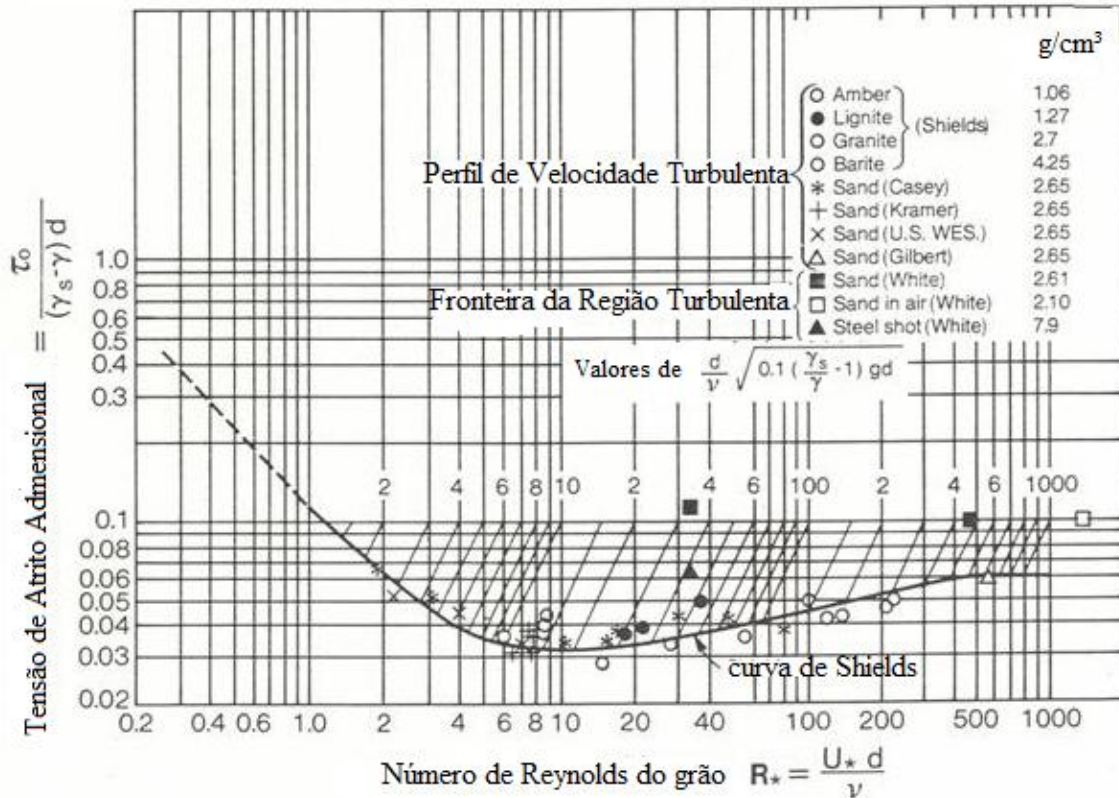


Figura 23. Diagrama de Shields tradicional, Adaptado de DA SILVA e WILSON JR, 2005.

O critério de transporte adotado nos modelos do SisBaHiA<sup>®</sup> considera um efeito probabilístico na decisão de haver ou não transporte quando a tensão no fundo  $\tau_o$  tem valor próximo ao valor crítico  $\tau_c$ . Dada à variabilidade da forma e tamanho dos grãos de sedimentos naturais, o valor da tensão crítica de mobilidade para um dado grão de referência pode ser interpretado como o valor para o qual a probabilidade de mobilidade ou deposição é 50%.

Uma vez que o emprego do tradicional diagrama de Shields, Figura 23, acarreta em um processo iterativo, pois a tensão de atrito no leito,  $\tau_o = \rho u_*^2$ , aparece tanto no eixo das abscissas como no das ordenadas. Para evitar o processo iterativo adota-se na Figura 24 um diagrama modificado, MADSEN e GRANT (1976), no qual a

tensão crítica pode ser obtida diretamente a partir da caracterização do sedimento e da água.

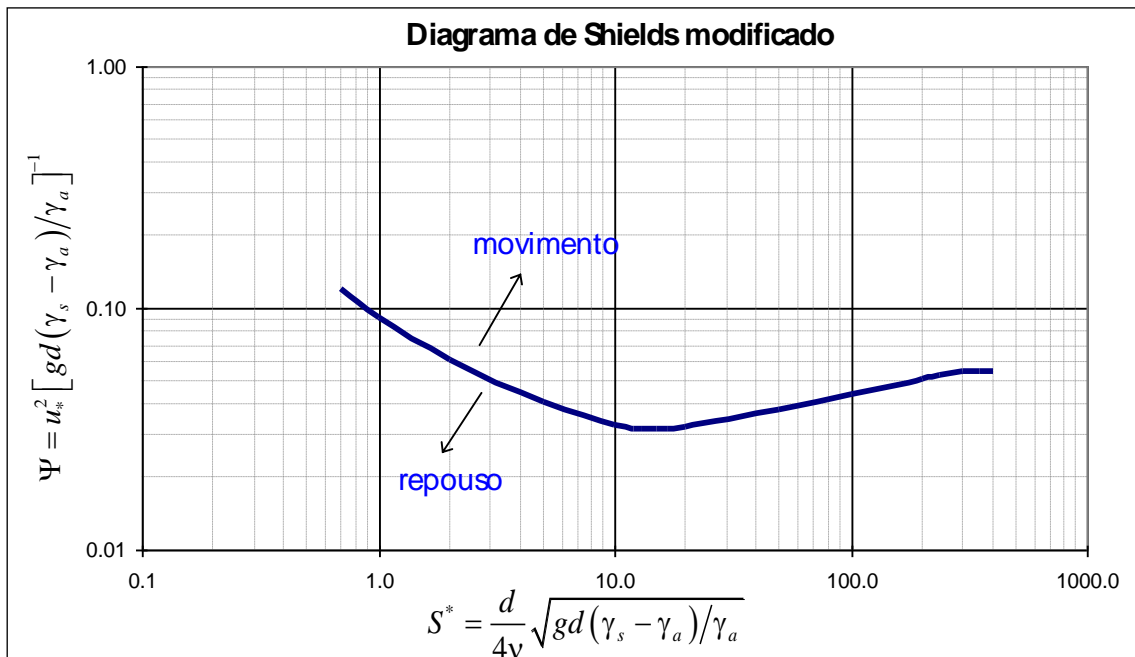


Figura 24. Diagrama de Shields modificado, no qual a tensão crítica pode ser obtida diretamente das características do sedimento e da água. Adaptado de (ROSMAN, 2012).

As tensões críticas de mobilidade para diferentes granulométricas de sedimentos não coesivos são obtidas através do diagrama de Shields apresentado na Figura 24. A curva no diagrama representa o valor crítico do parâmetro de Shields,  $\Psi_c$ , a partir do qual se calcula a tensão crítica no fundo,  $\tau_c$ , para a qual o grão de sedimento passaria a ter mobilidade.

As características físicas da água e do sedimento são definidas pela variável  $S^*$ . A variável é obtida pela fórmula seguinte:

$$S^* = \frac{d}{4\nu} \sqrt{gd(\rho_s - \rho) / \rho} \quad (10)$$

Na Figura 25 é mostrado um gráfico representativo de valores de  $\tau_o$  calculados para água salgada com sedimentos com diâmetros em unidades  $\phi$ .

A unidade  $\phi$ , expressa pela fórmula (11), é outra maneira padrão de classificação de tamanhos de grãos.

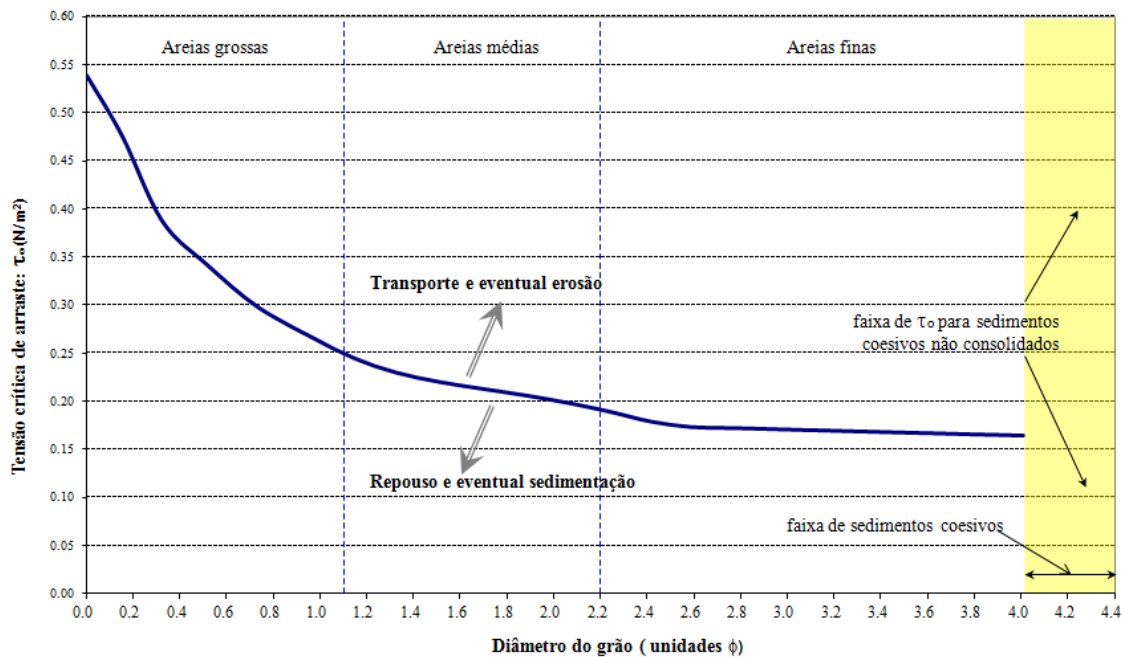


Figura 25. Tensão crítica para mobilidade,  $\tau_o$ , em função do digrama do grão em unidades  $\phi$ . Adaptado de (ROSMAN, 2012).

No cálculo das tensões que deram origem a Figura 25, considerou-se,  $\rho_o = 1025 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu = 1.19\text{E}-6 \text{ m}^2/\text{s}$  e  $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ . Para fazer a conversão das unidades de diâmetro ( $\phi$ ) dos sedimentos em milímetros, usou-se a seguinte relação:

$$\phi = -\ln(d[\text{mm}]) / \ln(2) \quad (11).$$

### 5.2.2 Cálculo do transporte de sedimentos

Segundo ROSMAN (2012), na natureza o limite para o movimento incipiente não é bem definido, pois os sedimentos apresentam diversas irregularidades de forma e tamanho. Assim, deve-se interpretar o valor de  $\Psi_c$ , como um valor de probabilidade 50% de ocorrer movimento ou não, havendo uma faixa de incerteza com tolerância  $\alpha$ . De fato, como se observa na Figura 23, há uma nuvem de pontos no entorno da linha pontilhada que define  $\Psi_c$ . Deste modo, ao invés de um valor crítico preciso, há uma faixa de movimento incipiente definida por  $\Psi_c \pm \alpha$ .

Para incorporar este efeito probabilístico, define-se um fator de tolerância  $\alpha$  de modo que, para um dado tamanho de grão em um dado tempo:

1. Se a tensão no fundo exercida pelo escoamento,  $\tau_o$ , 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, estes se depositariam, e os sedimentos em repouso assim permaneceriam.
2. Contrariamente, se ocorrer  $\tau_o$  de modo 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 seguinte 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.

Note que se  $\Psi/\Psi_c = 1$  a probabilidade de erosão e transporte ou de sedimentação é de 50%. À medida que  $\Psi/\Psi_c$  se aproxima de  $(1 - \alpha)$  a probabilidade de erosão e transporte diminui até 0%, e à medida que  $\Psi/\Psi_c$  se aproxima de  $(1 + \alpha)$  a probabilidade aumenta até 1, ou 100%.

Com um valor de  $\alpha$  diferente de zero simula-se a incerteza que existe na determinação de  $\Psi_c$  ou do equivalente  $\tau_c$ . Como  $\Psi_c$  é estimado através da curva do parâmetro de Shields, que é ajustada a valores experimentais, o valor de  $\alpha$  representa a amplitude da nuvem de dados experimentais, como se pode observar na Figura 23.

Destaca-se que com a utilização do fator de tolerância  $\alpha$ , incorpora-se também um efeito de continuidade entre diferentes faixas granulométricas. Para este estudo os valores de % de tolerância,  $\alpha$ , adotados são mostrados na Tabela 9, com granulometria variando de areias muito finas a muito grossas.

Tabela 9. Valores adotados neste trabalho para % de tolerância de tensão crítica de sedimentos variando de areia muito fina a areia grossa.

Sedimento	Diâmetro Mediano (mm)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidade	Tensão Crítica (N/m <sup>2</sup> )	% de Tolerância
Areia Fina Fina	0.062	2500	0.4	0.154	2.32
Areia Fina	0.125	2500	0.4	0.160	6.34
Areia Média	0.250	2400	0.4	0.176	6.73
Areia Grossa	0.500	2200	0.4	0.196	6.05

### 5.3 Fórmulas de cálculo de transporte de sedimentos e vazão sólida potencial

Sabe-se que as diferentes fórmulas de transporte de sedimentos foram desenvolvidas, calibradas e validadas para condições específicas. Utilizando fórmulas diferentes para condições semelhantes obtêm-se taxas de transporte que podem diferir significativamente. Portanto, há que se ter cuidado na escolha das fórmulas a serem usadas dependendo do problema que se deseja solucionar, SIMONS e SENTÜRK (1992), DA SILVA e WILSON JR. (2002).

Como ilustra a Figura 26, nos modelos de transporte de sedimentos do SisBaHiA<sup>®</sup>, pode-se escolher diferentes fórmulas de transporte de sedimentos por arraste, ou pelo fundo, e total, pelo fundo e em suspensão. Com tais fórmulas calcula-se a vazão sólida potencial, isto é, a vazão sólida máxima de um dado sedimento que o escoamento fluido teria capacidade de transportar, supondo disponibilidade ilimitada do sedimento.

Considerando que no canal de Itajurú as correntes passam de 1.0 m/s e os sedimentos vão de areia muito fina a grossa, certamente haverá transporte de sedimentos por arraste e em suspensão. Conseqüentemente fórmulas de transporte total são mais adequadas. Das opções disponibilizadas pelo SisBaHiA<sup>®</sup>, adotou-se a de Engelund e Hansen, devido à sua reconhecida validade e grau de coerência com valores experimentais e de campo. Em dezembro de 2010 foram publicados no *Journal of the American Water Resources Association* – (Vol. 46, No. 6) os seguintes trabalhos de SAEED KHORRAM S. & MUSTAFA E., comparando dezenas de fórmulas de transporte sólido.:

1. A SENSITIVITY ANALYSIS OF TOTAL-LOAD PREDICTION PARAMETERS IN STANDARD SEDIMENT TRANSPORT EQUATIONS.
2. MOST INFLUENTIAL PARAMETERS FOR THE BED-LOAD SEDIMENT FLUX EQUATIONS USED IN ALLUVIAL RIVERS.

Nas tabelas comparativas apresentadas nos trabalhos acima, constata-se que a fórmula de Engelund e Hansen, empregada nas simulações descritas neste trabalho, fica especialmente bem colocada. Para transporte de areias a fórmula de Engelund e Hansen aparece como a mais coerente para transporte de fundo, dominante no canal de Itajurú, e a segunda mais coerente para transporte total, sendo a diferença para a primeira colocada, (ACKERS e WHITE) muito pequena. Segundo tais autores, a fórmula de Engelund e Hansen dá resultados coerentes para sedimentos na faixa de 0,08 mm a 45,0 mm. Trata-se de uma faixa bem mais ampla que a originalmente usada em sua calibração inicial, e perfeita, ente adequada para os sedimentos do canal de Itajurú.

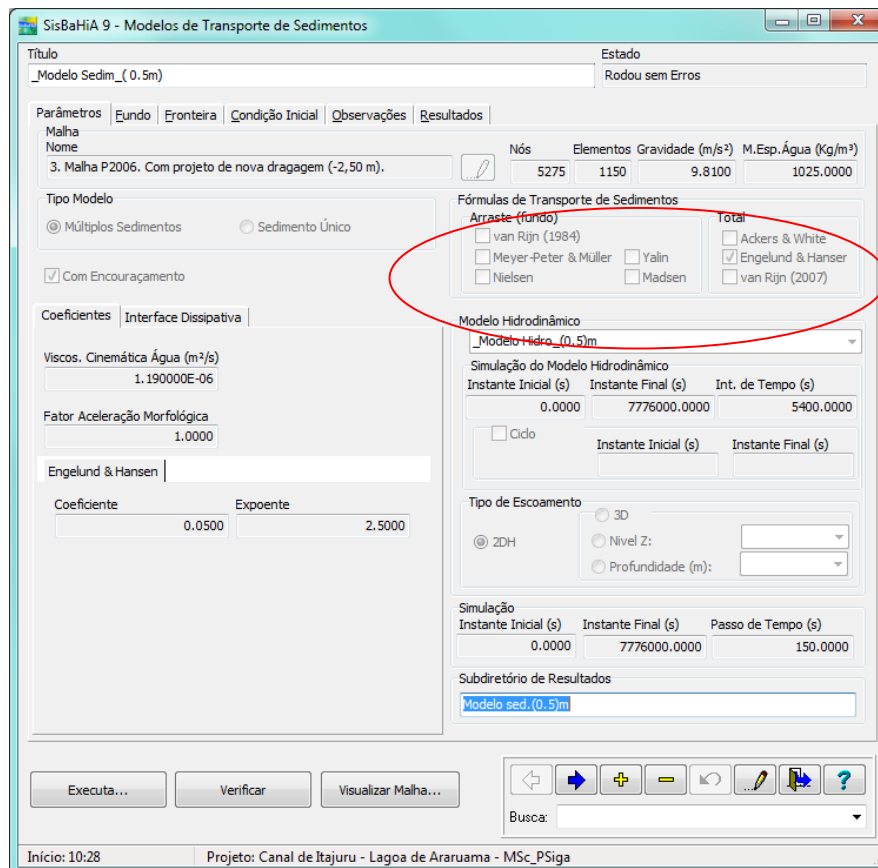


Figura 26. Imagem de tela de Modelos de Transporte de Sedimentos do SisBaHiA<sup>®</sup>, destacando na oval vermelha as diferentes opções de fórmulas de transporte por arraste e de transporte total, arraste e suspensão.

### 5.3.1 Fórmula de Engelund e Hansen (1967)

A fórmula de Engelund-Hansen para transporte total, arraste e suspensão, foi desenvolvida com base em dados experimentais, cf. Guy *et al.* (1966), em canal com 2,4 m de largura e 45,7 m de comprimento. Foram realizados testes com quatro diferentes tipos de sedimentos arenosos com diâmetros médios de 0,19 mm, 0,27 mm, 0,45 mm e 0,93 mm. O desvio padrão para a classe de sedimentos mais finos foi de 1,3 e para os demais foi 1,6. Trata-se de uma das fórmulas mais utilizadas para corpos de água costeiros como estuários e canais de maré. Veja “Engelund, F. and E. Hansen, 1967. *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*. Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark”:

$$q_s^* = \begin{cases} \frac{0,05}{c_f} (\tau_o^*)^{5/2} & \text{se } \tau_o^* > \tau_c^* \\ 0 & \text{se } \tau_o^* < \tau_c^* \end{cases} \quad (12)$$

Onde  $c_f$  é o coeficiente de atrito no fundo definido no modelo hidrodinâmico. Conforme exposto na seção 5.1.3, pode-se obter  $c_f$  através das seguintes expressões:

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

O asterisco no canto direito superior da variável indica grandezas adimensionais, calculadas como:

$$q_s^* = \frac{q_s}{d \sqrt{g(S_s - 1)} d} \quad (14)$$

$$\tau^* = \frac{\tau_o}{g(\rho_s - \rho_o) d} \quad (15)$$

Onde:

$q_s$  = Vazão sólida em m<sup>3</sup>/s/m, neste caso vazão total de arraste + suspensão.

$\rho_s$  = Massa específica do sedimento do leito.

$d_{50}$  = Diâmetro 50% na curva granulométrica.

$V$  = Velocidade média na coluna de água (2DH).

No SisBaHiA<sup>®</sup>, a fórmula de Engelund e Hansen presume o coeficiente 0,05 e o expoente 5/2 como na equação original, porém, o usuário pode calibrar a fórmula para melhor ajuste a dados de campo, alterando os valores presumidos.

Para detalhes sobre outras fórmulas de transporte sólido, consulte a Referência Técnica do SisBaHiA<sup>®</sup>, ROSMAN *et. al.* (2012).

#### **5.4 Atualização da batimetria via modelo morfodinâmico com curva granulométrica<sup>8</sup>**

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 do fundo e a cota da camada não erodível mais abaixo. Um valor inicial  $S_{E0}$  tem que ser prescrito para todos os pontos do modelo.

Em geral, valores de  $S_{E0}$  são desconhecidos. Em locais de fundo não erodível, por exemplo, leito rochoso ou de concreto como em rampas a jusante de barragens, prescrever valor nulo é usual. Em locais com fundos de sedimentos, se não houver dados, o usuário terá que prescrever valores de  $S_{E0}$  inferidos ou convenientes, como condição inicial. Valores de  $S_{E0}$  podem ser estimados considerando valores de velocidades de correntes obtidas de modelagens prévias feita com fundo fixo. Em locais com velocidades mais intensas é provável que  $S_{E0}$  seja menor, pois a capacidade erosiva seria maior.

Na entrada de dados iniciais para a modelagem de um dado domínio, deve-se definir, *a priori*, o total de classes de sedimentos,  $M$ , a ser considerada no modelo. Na criação de uma dada classe  $m$  de sedimentos, o SisBaHiA<sup>®</sup> atribui um número interno e um nome automático sequencial, , e.g., Sed-1, Sed-2...Sed- $m$ ...Sed- $M$ . O usuário pode alterar os nomes da forma que achar melhor, por exemplo: *Areia muito fina, Areia fina, Areia média...Areia grossa*. Admite-se um máximo de  $M = 10$  classes.

O máximo número de classes de sedimentos  $M = 10$  é mais que suficiente, considerando que a prescrição de valores adequados do parâmetro  $\alpha$ , i.e., o percentual

---

<sup>8</sup> Esta seção e subseções foram extraídas da Referência Técnica do SisBaHiA<sup>®</sup>, ROSMAN (2012)

da faixa de tolerância para tensão crítica de mobilidade, produz um efeito de continuidade entre as diferentes faixas. Tal parâmetro está discutido na seção 5.2.2. Usualmente  $M = 5$  já é suficiente.

Todas as classes serão automaticamente colocadas em todos os pontos da malha do domínio, devendo o usuário prover os seguintes valores pertinentes a cada classe:

- $d_{50}$  = Diâmetro mediano em [mm] – usual entre 0.05 e 5.0.
- $\rho$  = Massa específica em [kg/m<sup>3</sup>] – usual entre 1400 e 2700.
- $p$  = Porosidade – usual entre 0.2 e 0.5.
- $\tau_c$  = Tensão crítica de mobilidade em [N/m<sup>2</sup>].
- $\alpha$  = Percentual da faixa de tolerância para  $\tau_c$

**Entrada de Curvas Granulométricas:** No instante inicial, em cada ponto da malha, a curva granulométrica local é dada para o modelo através da prescrição dos percentuais de cada uma das  $M$  classes de sedimentos no ponto. Portanto, uma curva granulométrica será representada por  $M$  classes, tendo cada classe uma fração equivalente  $f_m$ , de modo que:

$$\sum_{m=1}^M f_m(x, y, t) = 1.0 \quad (16)$$

Se em um ponto a altura erodível  $S_{E0}$  for nula, pode-se adotar  $f_m = 1.0/M$  para todas as classes. Caso contrário, o usuário definirá em cada ponto<sup>9</sup> o valor de  $f_m$ , i.e., fração de sedimento com diâmetro mediano  $d_{50m}$ . Todos os pontos sempre têm registro das  $M$  classes de sedimentos do domínio, mesmo que o valor de  $f_m$  seja ‘zero’ para uma dada classe no ponto.

No instante inicial,  $t_0$ , o modelo calcula o estoque inicial de sedimentos de cada classe  $S_{E0m}$ , em cada ponto:

$$S_{E0m}(x, y) = f_m S_{E0}(x, y) \quad (17)$$

---

<sup>9</sup> Na interface do modelo há ferramentas que facilitam prescrever tais dados por regiões do domínio.

Note que os valores de  $S_{E0m}$  também correspondem às alturas erodíveis, limite de cada classe de sedimentos, que somadas correspondem ao limite total em cada local:

$$\sum_{m=1}^M S_{E0m}(x, y) = S_{E0}(x, y) \quad (18)$$

Ao longo do tempo, o estoque de sedimentos, ou altura erodível remanescente de cada classe de sedimentos será dada por:

$$S_{Em}(x, y, t) = \max[S_{E0m}(x, y) + DS_{Em}(x, y, t); 0] \quad (19)$$

A variação acumulada da altura erodível de cada sedimento,  $DS_{Em}$ , define a ordem de erosão, possibilitando o processo de encouraçamento. Note que  $DS_{Em}$  é sempre medido em relação ao topo original do terreno  $S_{E0}$ . A classe de sedimentos com maior  $S_{E0} + DS_{Em}$  indicará qual classe de sedimentos estará por cima, e dependendo da espessura, formando uma couraça clássica no caso de ser também o sedimento com maior  $d_{50}$ . Para o cálculo, os valores de  $DS_{Em}$  devem ser ordenados do maior para o menor, sendo o maior designada por  $DS_{E1}$ , em seguida  $DS_{E2}$ , etc. A classe  $m$  a ser computada primeiro será a do sedimento com maior altura  $DS_{E1}$ , e terá uma camada superficial com espessura dada pela diferença  $(S_{E0} + DS_{E1}) - (S_{E0} + DS_{E2}) = DS_{E1} - DS_{E2}$ .

Em um dado instante, o procedimento para calcular a variação do estoque, ou altura erodível, de cada classe de sedimento  $S_{Em}$  das diversas classes tem que iniciar pela classe de sedimentos com maior valor de  $DS_{Em}$ . E, continuar para as demais classes de sedimentos seguindo a ordem decrescente de valores de  $DS_{Em}$ .

A equação de balanço de massa para cada classe de sedimento permite calcular a variação temporal de  $S_{Em}$ , e pode ser escrita como:

$$(1 - p_m) \frac{\partial S_{Em}}{\partial t} + \left( \frac{\partial q_{smx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{smy}}{\partial y} \right) = 0 \therefore \frac{\partial S_{Em}}{\partial t} = - \frac{1}{1 - p_m} \left( \frac{\partial q_{smx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{smy}}{\partial y} \right) \quad (20)$$

**Observação:** na formulação implementada no SisBaHiA com apenas um tipo de sedimento, a equação é escrita em termos da cota negativa do fundo  $h(x, y, t) = -z_{\text{fundo}}$ . No caso, a equação correspondente fica com sinal trocado:

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

Onde a vazão sólida efetiva  $q_{sm}$  está decomposta nas componentes  $x$  e  $y$ . O cálculo de  $q_{sm}$  leva em conta a fração disponível de sedimento, conforme apresentado na seção 5.4.1. Em termos discretos, em um passo de tempo  $\Delta t$ , a expressão acima torna-se:

$$\Delta S_{Em}^{n+1} = -\Delta t \frac{1}{1-p_m} \left( \frac{\partial q_{smx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{smy}}{\partial y} \right)^{n+1/2} \quad (21)$$

**Observação:** na formulação implementada no SisBaHiA com apenas um tipo de sedimento, a equação é escrita em termos da cota negativa do fundo  $h(x,y,t) = -z_{\text{fundo}}$ . No caso, a equação correspondente fica com sinal trocado:

$$\Delta h^{n+1} = \Delta t \frac{1}{1-p} \left( \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} \right)^{n+1/2} \quad (22)$$

Onde  $n$  indica o tempo discretizado escrito como  $t = n\Delta t$ .

Uma vez computado o valor de  $\Delta S_{Em}^{n+1}$  para todas as classes, atualiza-se as seguintes variáveis, seguindo a ordem:

1. Variação cumulativa da altura de cada classe de sedimentos,  $DS_{Em}$ :

$$DS_{Em}^{n+1} = \max \left( DS_{Em}^n + \Delta S_{Em}^{n+1}; -S_{E0m} \right) \quad (23)$$

2. Estoque de cada classe sedimento, ou altura erodível remanescente,  $S_{Em}$ :

$$S_{Em}^{n+1} = S_{E0m} + DS_{Em}^{n+1} \quad (24)$$

3. Fração disponível de cada classe de sedimento,  $e_m$ :

$$S_T = \sum_{m=1}^M S_{Em}^{n+1} \quad (\text{Estoque total remanescente})$$

$$|?) \left\{ \begin{array}{l} S_T > 0 \rightarrow e_m^* = S_{Em}^{n+1} / S_T \rightarrow e_m^{n+1} = e_m^* / \sum_{m=1}^M e_m^* \\ S_T = 0 \rightarrow e_m^{n+1} = e_m^n \end{array} \right. \quad (25)$$

No instante inicial, a fração disponível de cada classe de sedimento será  $e_m = f_m$ .

4. A batimetria, definida pela posição da superfície do fundo  $S_F \equiv \zeta + h(x, y, t) = 0$ , é atualizada pela equação abaixo, onde  $h_0$  é o valor inicial de  $h$  na malha, e  $F_{am}$  é o fator de aceleração morfológica:

$$h^{n+1} = h_0 + F_{am} \delta h^{n+1} \rightarrow \delta h^{n+1} = -\sum_{m=1}^m DS_{Em} \quad (26)$$

Lembre que a cota do fundo é dada por  $z = -h(x, y, t)$ , por isso o sinal (-) na frente do somatório é necessário, pois  $DS_{Em} > 0$  significa assoreamento e  $DS_{Em} < 0$  erosão.

**Sobre uso do fator de Aceleração Morfológica:** O uso do  $F_{am} > 1.0$  permite se estimar a evolução morfológica do fundo de modo acelerado, porém há que saber usar.

*Embora os resultados finais de evolução batimétrica através de modelagem de  $N$  ciclos hidro-sedimentológicos, com  $F_{am} = 1.0$ , sejam similares aos resultados de modelagem de 1 ciclo com  $F_{am} = N$ , os resultados intermediários não são comparáveis.*

O problema está em variações cíclicas. Se as condições hidro-sedimentológicas impostas ao modelo forem constantes os resultados intermediários também seriam comparáveis. Porém, resultados intermediários não são comparáveis quando há ciclos, como é usual em estudos de corpos de água naturais, que estão sujeitos a grande variabilidade hidro-sedimentológica com épocas de cheia e estiagem. Vale realçar que para este estudo não foi usado o fator de aceleração morfológica.

#### 5.4.1 Cálculo da vazão sólida efetiva

Na equação (21), a vazão sólida efetiva  $q_s$ , decomposta nas componentes  $x$  e  $y$ , é computada como:

$$q_{sm} = \min(q_{pm}, q_{dm}) \quad (27)$$

Onde  $q_{pm}$  é a vazão sólida potencial para o sedimento caracterizado por  $d_{50m}$  calculada por uma das fórmulas apresentadas na seção anterior, e  $q_{dm}$  é a vazão sólida disponível no fundo em função do estoque de sedimentos da classe  $m$  no local. Em um dado ponto, só precisa calcular  $q_{dm}$ , se  $q_{pm} > 0$  e  $e_m > 0$ . Caso contrário,  $q_{sm} = 0$ .

A determinação de  $q_{dm}$  é uma questão chave para os efeitos de encouraçamento. No instante inicial, ou se todos os valores de  $DS_{Em}$  forem iguais calcula-se:

$$\text{Neste caso, } q_{sm} = \min(e_m q_{pm}, q_{dm})$$

- Vazão sólida disponível<sup>10</sup> do sedimento  $m$ :

$$|?) \left\{ \begin{array}{l} DS_{Em} \geq 100d_{50m} \rightarrow q_{dm} = e_m q_{pm} \\ DS_{Em} < 100d_{50m} \rightarrow q_{dm} = e_m q_{pm} (DS_{Em}/100d_{50m}) \end{array} \right. \quad (28)$$

Na expressão acima e nas similares para as demais camadas,  $q_{dm}$  será igual a  $q_{pm}$  desde que haja no fundo um estoque mínimo com espessura de  $100d_{50m}$ . Por exemplo, para areia com diâmetro de 0.25 mm, equivale a um estoque com espessura mínima de 2.5 cm. Na medida em que o estoque mínimo é erodido, a vazão disponível diminui linearmente com o estoque existente. Em locais com fundo inicial sem camada erodível, o estoque inicial seria nulo e conseqüentemente  $q_{dm} = 0$ . Em tais locais,  $q_{dm}$  aumentaria linearmente com a espessura da camada de sedimentos que estiver se formando pelo transporte sobre o fundo não erodível.

Quando houver valores de  $DS_{Em}$  diferenciados a vazão disponível será computada pelo seguinte processo, seguindo em ordem decrescente de  $DS_{Em}$ :

- ❖ Verificação do estoque disponível na primeira camada de espessura  $DS_{E1} - DS_{E2}$ . Supondo que haja  $K1$  classes de sedimentos com  $DS_{E1}$ , deve-se computar para cada uma das classes de sedimentos  $m$  de 1 a  $K1$  da camada:

- Vazão sólida potencial do sedimento  $m$  na primeira camada:

$$q_{p12m} = q_{pm} e_m / \sum_{j=1}^{K1} e_j \quad (29)$$

- Vazão sólida disponível<sup>11</sup> do sedimento  $m$  na primeira camada:

<sup>10</sup> Originalmente a estimação da vazão sólida disponível era feita pela expressão  $q_{dm} = (1 - p_m) S_{Em} / \Delta t$ , porém esta formulação fica dependente do passo de tempo do modelo de sedimentos, e pode trazer inconsistências se  $\Delta t$  for grande.

<sup>11</sup> Originalmente calculado como  $q_{d12m} = \frac{DS_{E1} - DS_{E2}}{\Delta t} (1 - p_m) e_m / \sum_{j=1}^{K1} e_j$ , porém esta formulação fica dependente do passo de tempo do modelo de sedimentos, e pode trazer inconsistências se  $\Delta t$  for grande.

$$DS_{12} = (DS_{E1} - DS_{E2})(1 - p_m) e_m / \sum_{j=1}^{K1} e_j \therefore \quad (30)$$

$$|?) \left\{ \begin{array}{l} DS_{12} \geq 100d_{50m} \rightarrow q_{d12m} = q_{p12m} \\ DS_{12} < 100d_{50m} \rightarrow q_{d12m} = q_{p12m} (DS_{12}/100d_{50m}) \end{array} \right.$$

- Se no ponto de cálculo  $q_{d12m} \geq q_{p12m}$  para os  $K1$  sedimento da primeira camada, só estes estarão disponíveis para transporte, caracterizando efeito de encouraçamento. Neste caso, e de modo similar nos demais explicados a seguir, o efeito de encouraçamento só deve ser considerado efetivo se houver uma mínima espessura de sedimentos de um tipo cobrindo os demais, caso contrário deve-se incluir os tipos de sedimentos da camada abaixo. Note que  $K1$  é o limite do contador genérico  $j$  sem valor definido, provavelmente, quase sempre será 1.

**Sobre mecanismos de encouraçamento:** O algoritmo considera que pode haver encouraçamento se ocorrer  $(DS_{E1} - DS_{E2}) em > \text{máx}[1.0\text{mm}, 4 \times d_{50m}]$ , neste caso, os sedimentos da camada inferior ficam bloqueados e cessa o transporte. O valor 1.0 mm acima não impede, mas dificulta eventos de encouraçamento por sedimentos muito finos, que, em geral, não são comuns. A explicação acima usa a espessura entre as camadas 1 e 2 como exemplo, porém o algoritmo vale para qualquer camada. No modelo, a opção de considerar ou não efeitos de encouraçamento é opcional.

- ❖ Caso contrário, se  $q_{d12m} < q_{p12m}$  para algum dos  $K1$  sedimentos da primeira camada, há que incluir a camada seguinte, que contém os tipos de sedimentos da classe com  $S_{E1}$  e os da classe com  $S_{E2}$ . Supondo que haja  $K2$  classes de sedimentos na segunda camada de espessura  $S_{E2} - S_{E3}$ , deve-se computar para cada uma das classes de sedimentos  $m$  de 1 a  $K2$  da camada:

- Vazão sólida potencial do sedimento  $m$  na segunda camada:

$$q_{p23m} = q_{pm} e_m / \sum_{j=1}^{K2} e_j \quad (31)$$

- Vazão sólida disponível do sedimento  $m$  na segunda camada:

$$DS_{23} = (DS_{E2} - DS_{E3})(1 - p_m) e_m / \sum_{j=1}^{K2} e_j \therefore$$

$$|?) \left\{ \begin{array}{l} DS_{23} \geq 100d_{50m} \rightarrow q_{d23m} = q_{p23m} \\ DS_{23} < 100d_{50m} \rightarrow q_{d23m} = q_{p23m} (DS_{23}/100d_{50m}) \end{array} \right. \quad (32)$$

- Se no ponto de cálculo  $q_{d23m} \geq q_{p23m} - q_{d12m}$  para os  $K2$  sedimento da segunda camada, só estes estarão disponíveis para transporte, e as camadas seguintes estão fora do processo.
- ❖ Caso contrário, repete-se o passo anterior incluindo mais uma camada sucessivamente até, se necessário, chegar à penúltima camada ( $M - 1$ ), com  $K(M - 1)$  classes de sedimentos:

- Vazão sólida potencial do sedimento  $m$  na penúltima camada :

$$q_{p(M-1)Mm} = q_{pm} e_m / \sum_{j=1}^{KM-1} e_j \quad (33)$$

- Vazão sólida disponível do sedimento  $m$  na penúltima camada:

$$DS_{(M-1)M} = (DS_{E(M-1)} - DS_{EM})(1 - p_m) e_m / \sum_{j=1}^{KM-1} e_j \therefore$$

$$|?) \left\{ \begin{array}{l} DS_{(M-1)M} \geq 100d_{50m} \rightarrow q_{d(M-1)Mm} = q_{p(M-1)Mm} \\ DS_{(M-1)M} < 100d_{50m} \rightarrow q_{d(M-1)Mm} = q_{p(M-1)Mm} (DS_{(M-1)M} / 100d_{50m}) \end{array} \right. \quad (34)$$

- Se no ponto de cálculo  $q_{d(M-1)Mm} \geq q_{p(M-1)Mm} - q_{d12m} - q_{d23m} - \dots - q_{d(M-2)(M-1)m}$  para os  $K(M - 1)$  sedimento da penúltima camada, só estes estarão disponíveis para transporte, ultima camada está fora do processo.
- ❖ Caso contrário há que se verificar o estoque incluindo a camada  $M$ , que é a ultima, com altura  $S_{EM}$ , e  $M$  classes de sedimentos:

- Vazão sólida potencial do sedimento  $m$  na última camada:

$$q_{pMm} = q_{pm} e_m \quad (35)$$

- Vazão sólida disponível do sedimento  $m$  na última camada:

$$DS_{EM} = S_{EM} (1 - p_m) e_m \therefore$$

$$|?) \left\{ \begin{array}{l} DS_{EM} \geq 100d_{50m} \rightarrow q_{dMm} = q_{pMm} \\ DS_{EM} < 100d_{50m} \rightarrow q_{dMm} = q_{pMm} (DS_{EM} / 100d_{50m}) \end{array} \right. \quad (36)$$

$$q_{dMm} = \frac{S_{EM}}{\Delta t} (1 - p_m) e_m \quad (37)$$

Na última camada há todas as  $M$  classes de sedimentos, por isso o somatório em  $j$  das frações de cada classe é igual a 1.0.

#### 5.4.2 Equação da continuidade com fundo morfodinâmico

Com  $h$  variável no tempo, a equação da continuidade integrada na vertical, é escrita como:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \Sigma q \quad (38)$$

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

#### 5.4.3 Sobre as condições de contorno no modelo de transporte de sedimentos

No modelo de transporte de sedimentos, seja no modo acoplado ou desacoplado há dois tipos de condição de contorno que podem ser aplicadas a qualquer ponto do contorno:

- **Tipo 0:** em pontos tipo 0, adota-se condições de equilíbrio no contorno, considerando as  $M$  classes de sedimentos pertinentes ao domínio. No caso, a proporção das diferentes classes de sedimentos será a definida nas condições iniciais para o nó de contorno. Condição de equilíbrio implica em que a vazão sólida no ponto para cada uma das  $M$  classes de sedimento será igual à vazão sólida potencial de cada sedimento, na proporção da curva granulométrica prescrita. Este é o tipo presumido para os pontos de fronteira, e recomenda-se ser mantido para todos os pontos de fronteira em que não haja afluxo hidrodinâmico.
- **Tipo 1:** em pontos tipo 1, aplica-se as vazões sólidas normais à fronteira prescritas para cada uma das  $M$  classes de sedimentos pertinentes ao domínio. Note que, como nos demais modelos do SisBaHiA<sup>®</sup>, eventuais valores constantes colocados no ponto serão adicionados aos valores variáveis prescritos.

- **Tipo 2:** similar ao Tipo 0, porém com batimetria permanente, i.e.  $\delta h = 0$ . Este caso é importante para pontos onde se prescreve curva chave hidrodinâmica, com níveis e vazões líquidas, deixando a vazão sólida em equilíbrio. Como a vazão nodal é o produto da coluna de água,  $H = \zeta + h$ , pela velocidade  $2DH$ , se houver variação de batimetria, poderá haver variação de vazão nodal. *Recomenda-se este tipo para pontos com afluxos hidrodinâmicos e vazão sólida de equilíbrio.*
- **Tipo 3:** similar ao Tipo 1, porém com batimetria permanente, i.e.  $\delta h = 0$ . Este caso é importante para pontos onde se prescreve curva chave hidrodinâmica e sedimentológica, com imposição de níveis, vazões líquidas e vazões sólidas. Como a vazão nodal é o produto da coluna de água,  $H = \zeta + h$ , pela velocidade  $2DH$ , se houver variação de batimetria, poderá haver variação de vazão nodal. *Recomenda-se este tipo para pontos com afluxos hidrodinâmicos nos quais se queira prescrever vazões sólidas.*

No 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 5.2.2. 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.

No tipo 1 a vazão sólida normal à fronteira é prescrita para cada uma das  $m$  classes de sedimentos do domínio. Esta opção é útil quando se tem a disposição dados obtidos em campo ou dados provenientes de outro modelo. 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. Esta abordagem pode ser muito útil em modelos a jusante de usinas hidrelétricas, onde o transporte de sedimentos na usina é nulo, ou muito reduzido.

Uma consequência comum na 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.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados sobre caracterização hidrodinâmica e transporte de sedimentos obtidos na modelagem computacional e é feita uma caracterização com cenários de sizígia e quadratura em situação atual e futura do NM.

Na apresentação dos resultados são incluídos gráficos de séries temporais em alguns pontos selecionados ao longo do sistema lagunar. Os pontos são chamados de estações e suas posições são vistas na Figura 27. Com intuito de representar as particularidades do sistema lagunar com foco no canal de Itajurú foram posicionadas seis estações.

Das estações posicionadas, a estação entrada do canal é uma estação de controle fundamental, na estação ponte F. Sodré. Sodré ocorre velocidades intensas, dinâmica vigorosa de sedimentos, com buracos e escavações.

As estações Palmeiras, Perynas e final da lagoa foram escolhidas para caracterizar os diferentes setores da lagoa.

A exposição dos resultados nas estações selecionadas ajudará na análise comparativa dos mesmos para as situações atual e futura do NM.

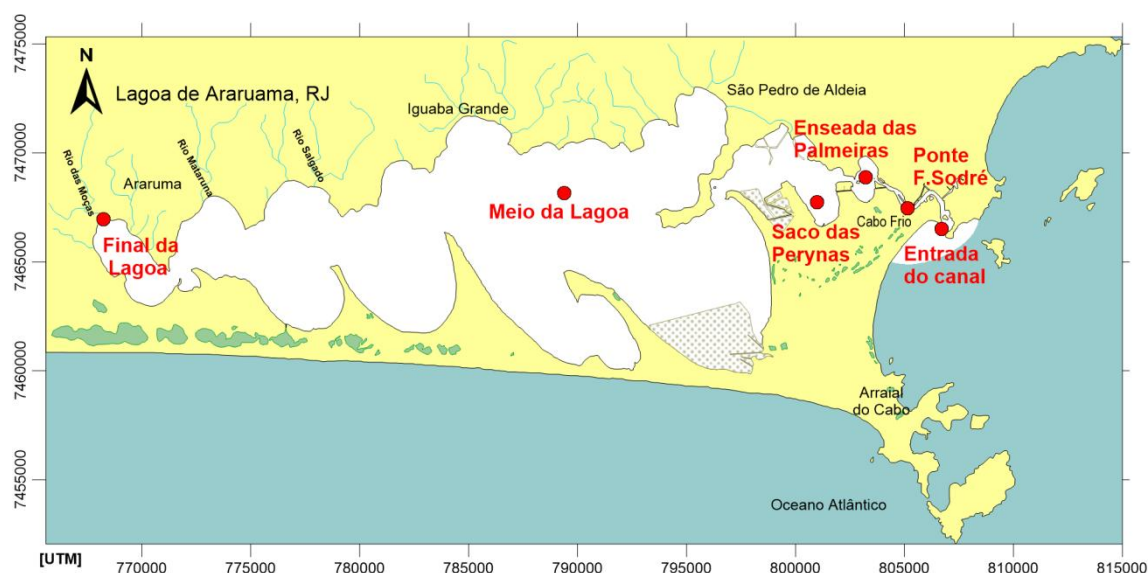


Figura 27. Mapa com localização das estações selecionadas para apresentação dos resultados.

A sequência da apresentação dos resultados segue: Primeiro é feita a caracterização da circulação hidrodinâmica considerando a lagoa de Araruama no geral, e depois discute-se os resultados em uma maré de sizígia e quadratura para instantes de preamar e baixamar em situações atual e futura do NM.

Em seguida, são apresentados e discutidos resultados do modelo de transporte de sedimentos.

## **6.1 Caracterização da circulação hidrodinâmica**

Neste item, são descritos e analisados padrões de circulação hidrodinâmica. A análise considerou duas situações. A primeira com situação atual do NM. A segunda representa uma situação futura, no qual o nível médio varia em 0, 5 m.

Como mostra a Figura 28, as oscilações de nível de água na lagoa de Araruama dependem basicamente de marés e ventos, esses fatores influenciam a circulação no canal de Itajurú e interior da lagoa. Este feito corrobora com o estudo realizado por LESSA (1990) sobre dinâmica da maré e transporte de sedimentos no canal de Itajurú, no qual identificou este acontecimento.

Nas estações escolhidas representando o interior da lagoa (enseada de Palmeiras, saco de Perynas, meio da lagoa, final da lagoa), verifica-se flutuações nas linhas de níveis devido a forte intensidade dos ventos no interior da lagoa.

Apesar da forte variação da maré na entrada do canal e na estação Ponte Feliciano de Sodré (Figura 28), nota-se que na medida em que a maré se dirige em direção ao interior da lagoa (estação do meio da lagoa) vai perdendo força passando a atingir uma amplitude de aproximadamente 0.4 metros na estação enseada de Palmeiras. A partir da estação saco das Perynas em direção ao meio da lagoa à variação do nível tem como forçante dominante o vento, sendo menos notáveis os efeitos de maré astronômica.

O fato do canal de Itajurú ter uma configuração meândrica e estreita que se associa a diminuição hidráulica ocorre expressiva perda de carga no escoamento quando a onda de maré se propaga em direção ao interior da lagoa.

A onda de maré entra no canal com grande energia, por sua vez, essa energia vai se perdendo devido ao atrito de fundo desde a embocadura do canal até o estreito das Perynas. Por sua vez devido ao fato da seção hidráulica alargada no estreito de Perynas, contribui para diminuição da amplitude da onda.

O atrito de fundo dissipa parte da energia da maré, reduzindo assim a amplitude e a corrente de maré.

Na Figura 28 nota-se que as elevações máximas e mínimas atingidas durante o período de modelagem na situação atual e futura do NM são respectivamente: máximas 64 cm, 116 cm e mínimas -70 cm e -20 cm. Este fato era de se esperar, pois, a elevação do NM fará com que a área da seção hidráulica aumente, bem como as magnitudes das correntes.

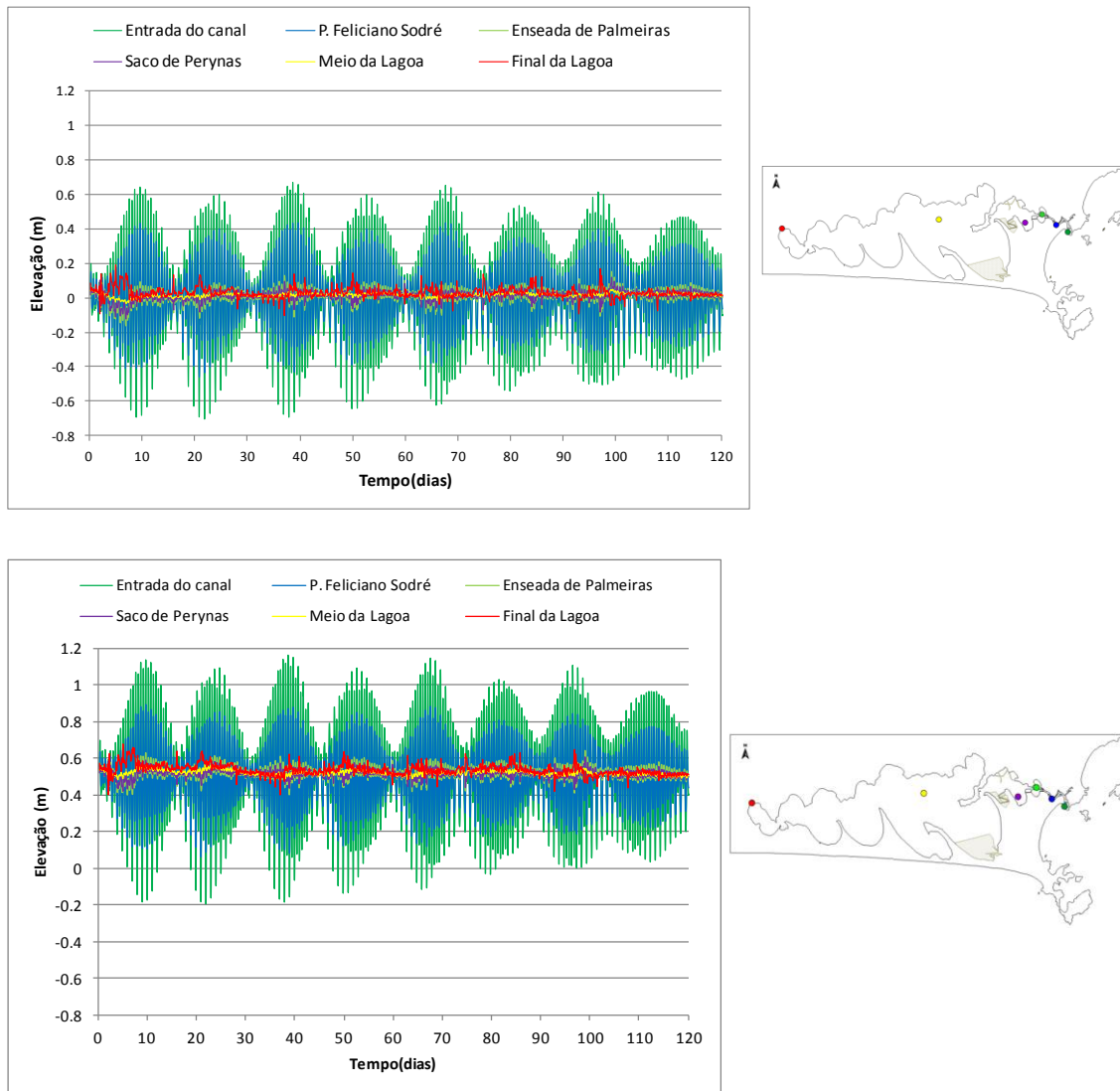


Figura 28. Variação de níveis ao longo da lagoa nas estações selecionadas da Figura 27. Na estampa superior o resultado com situação atual do NM e inferior com NM futuro.

Partindo da Figura 28 são extraídos cenários de sizígia (Figura 29) e quadratura (Figura 30) a fim de ilustrar situações de enchente e vazante em momentos escolhidos para preamar e baixamar com intuito de auxiliar na caracterização hidrodinâmica do sistema lagunar de Araruama com foco no canal de Itajurú.

Com os resultados, nota-se que na situação futura tanto em sizígia como quadratura a tendência é de ter maior variação de níveis em relação à situação atual (vide Figura 29 e Figura 30). Verifica-se nas estações enseada de Palmeiras, saco de Perynas, meio da lagoa e final da lagoa que os níveis de água tendem a estar acima do nível médio futuro.

Um estudo realizado por LESSA (1990) no canal de Itajurú, lagoa de Araruama, confirma este feito. No mesmo trabalho além de ter verificado que o nível médio lagunar esteve mais alto do que o nível médio do mar constatou maior predominância de correntes de vazante e magnitudes maiores para as correntes de enchente.

Os períodos escolhidos para ilustrar sizígia (entre oitavo dia e nono dia da simulação) e quadratura (entre décimo quarto e décimo quinto dia da simulação) fazem parte do tempo da simulação e correspondem a dois ciclos de maré para cada cenário. As simulações foram feitas em um período de quatro meses, período pelo qual o modelo sedimentológico começou a entrar em estabilidade. O início da simulação foi no dia 01/01/2012.

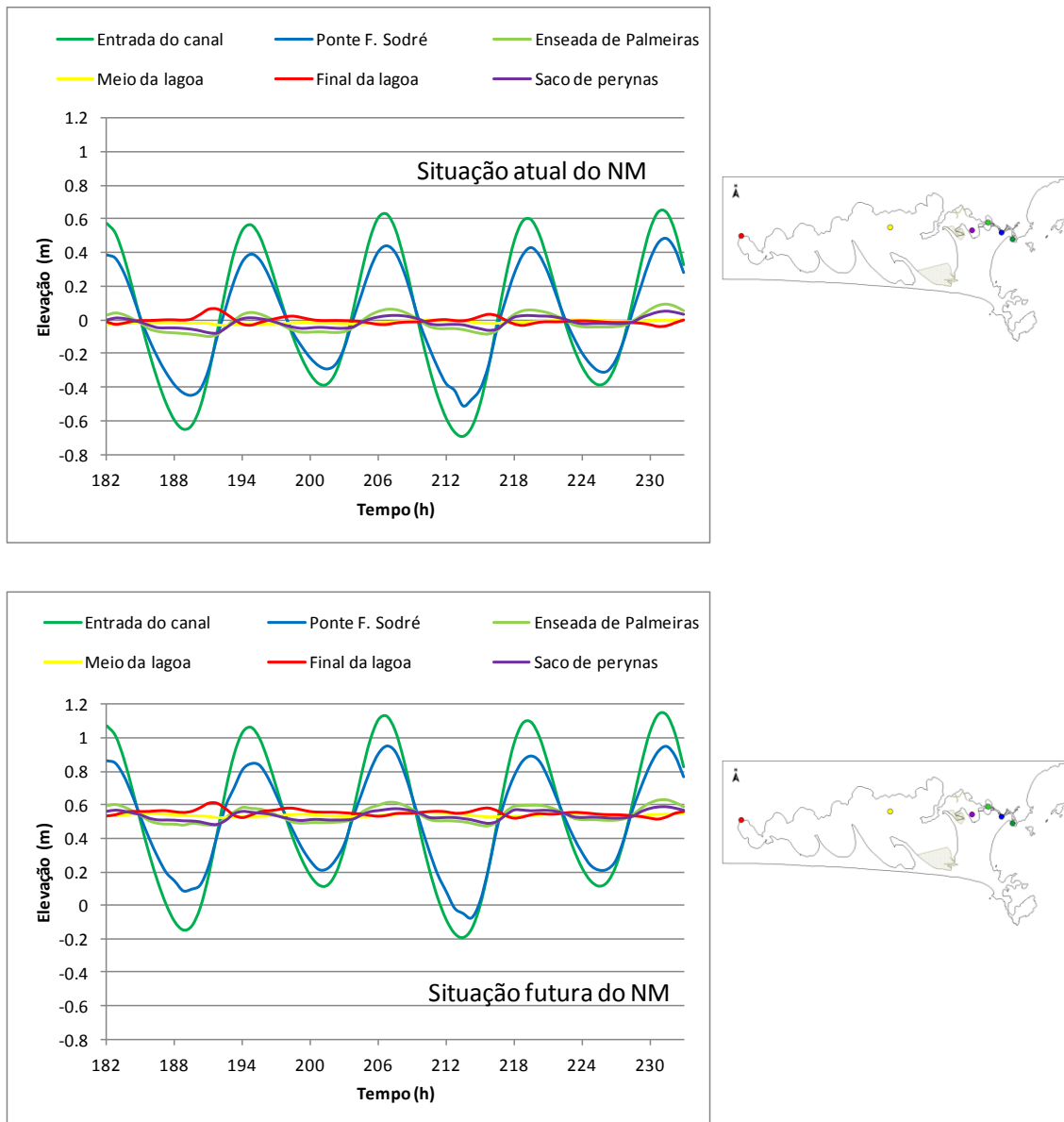


Figura 29. Variação de níveis entre os cenários com situação atual e futura do NM em 0,5 m– maré de sizígia.

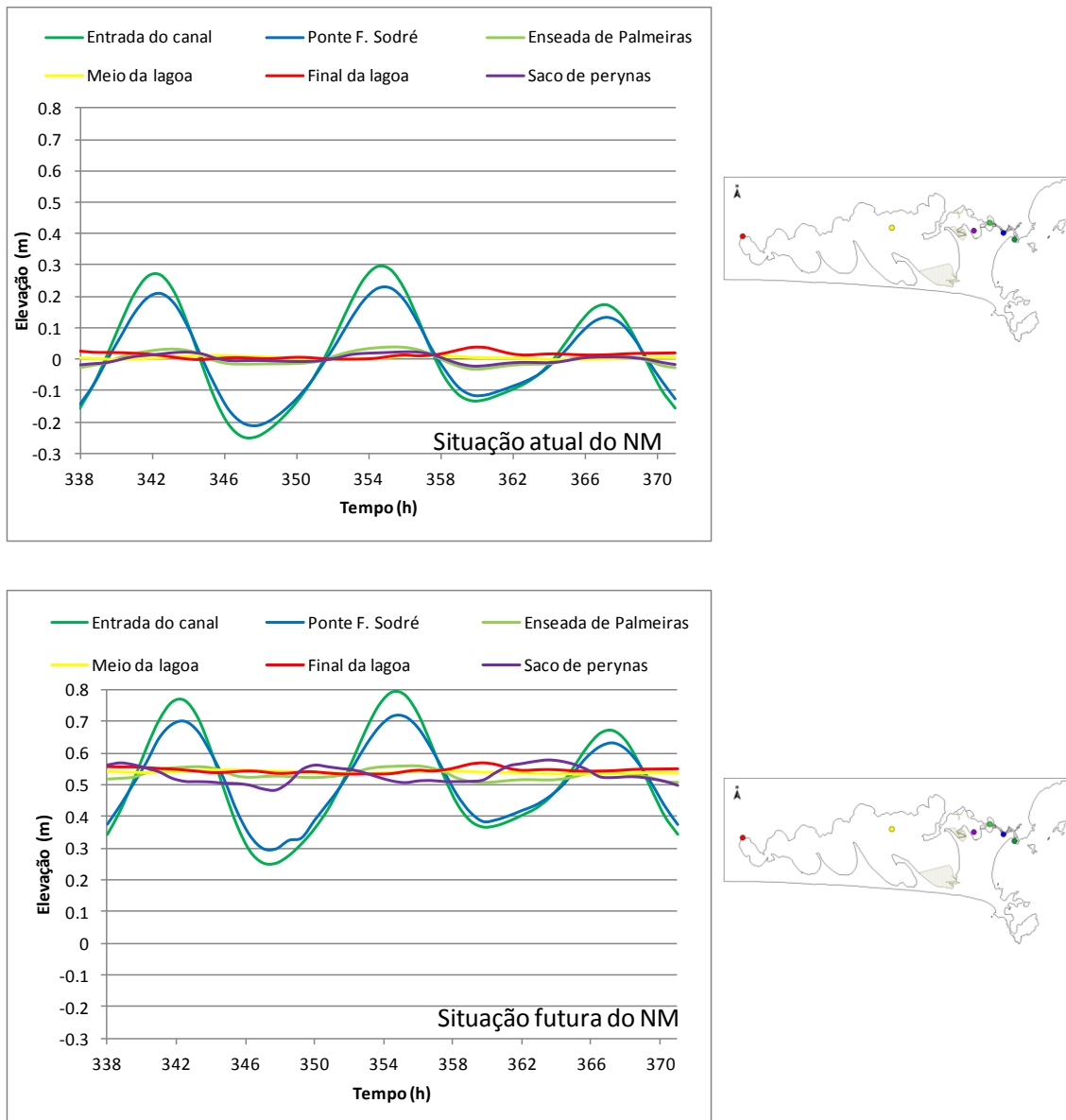


Figura 30. Variação de níveis entre os cenários com situação atual e futura do NM em 0,5 m – maré de quadratura.

Para ilustração de situações de enchente e vazante em forma de mapas com isolinhas de correntes em maré de sizígia e quadratura, apresenta-se de Figura 31 a Figura 38 mapas de circulação hidrodinâmica geral da lagoa de Araruama e em detalhes para o canal de Itajurú destacando preamar e baixamar para situação atual e futura do NM.

Com base nas figuras é possível observar que o domínio das correntes é no canal de Itajurú com tendência a enfraquecer no interior da lagoa. Nota-se ainda em mapas com detalhe do canal de Itajurú que o fluxo se direciona para o interior do canal

em momento de preamar e em momento de baixamar o fluxo esta direcionado para embocadura.

Sendo a circulação no interior da Lagoa dominada pela ação dos ventos, nota-se com base na Figura 31, Figura 33, Figura 35 e Figura 37, que a diferença entre os padrões de correntes nas duas situações são menos significantes, porém a que realçar que a região do canal de Itajurú é dominada pela ação das marés, na mesma região as correntes são mais intensas (v. Figura 32, Figura 34, Figura 36 e Figura 38).

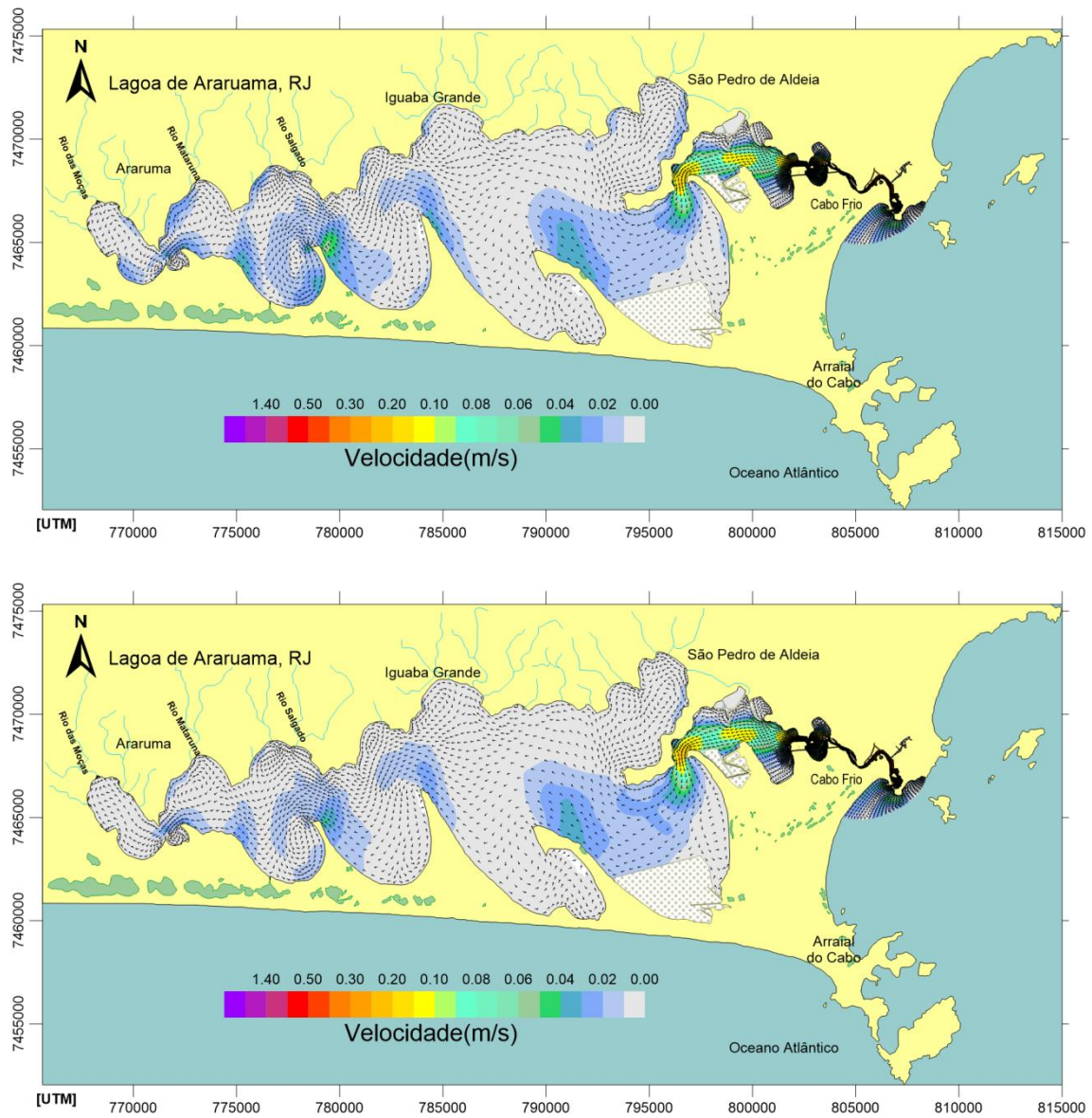


Figura 31. Mapa de circulação hidrodinâmica em instante de preamar de sizígia na embocadura, conforme hora 207 do modelo hidrodinâmico. Na estampa superior o resultado com situação atual do NM e inferior com NM futuro.

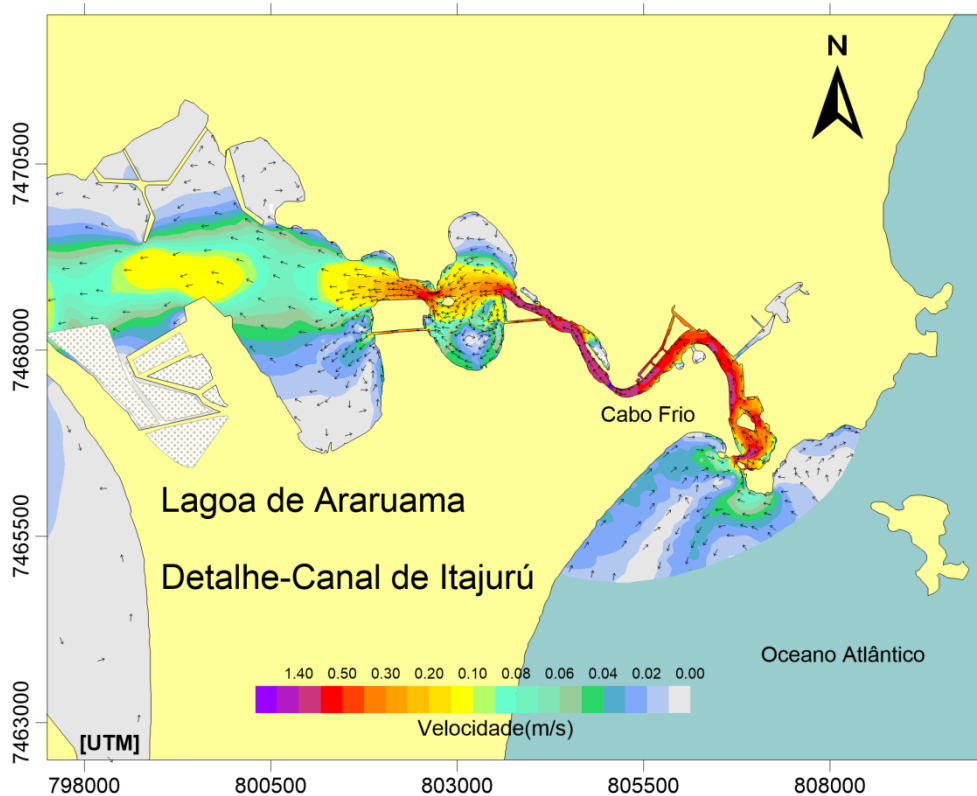
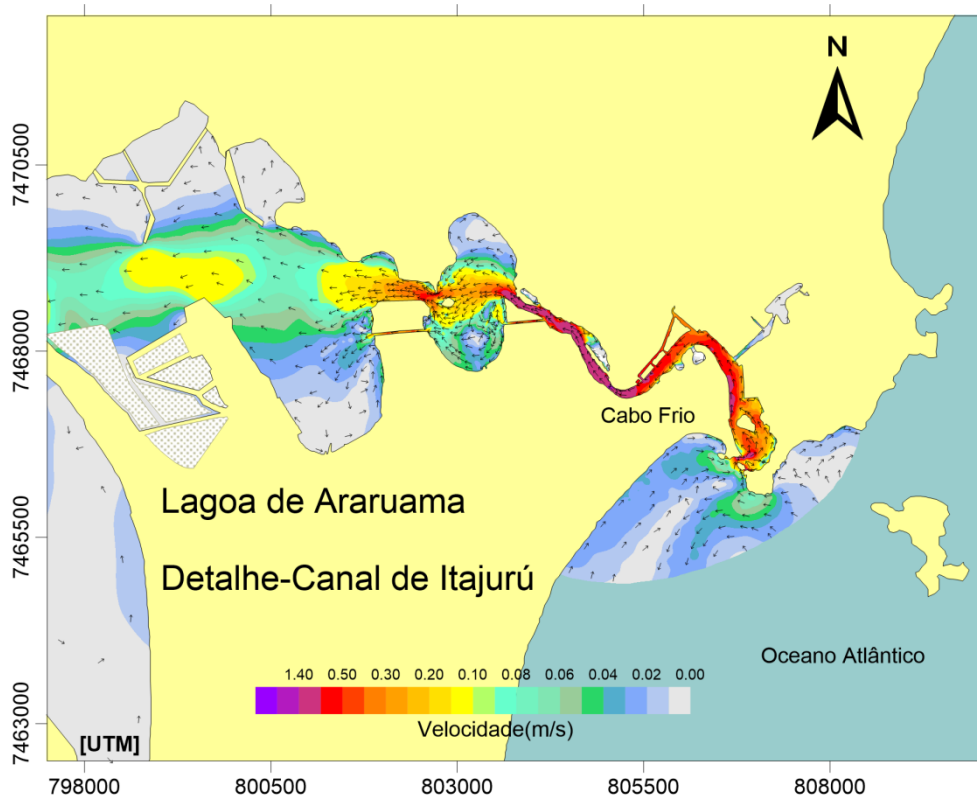


Figura 32. Mapa com detalhes de circulação hidrodinâmica no canal de Itajuru em instante de preamar na embocadura, conforme hora 207 do modelo hidrodinâmico. Na estampa superior o resultado com situação atual do NM e inferior com NM projetado.

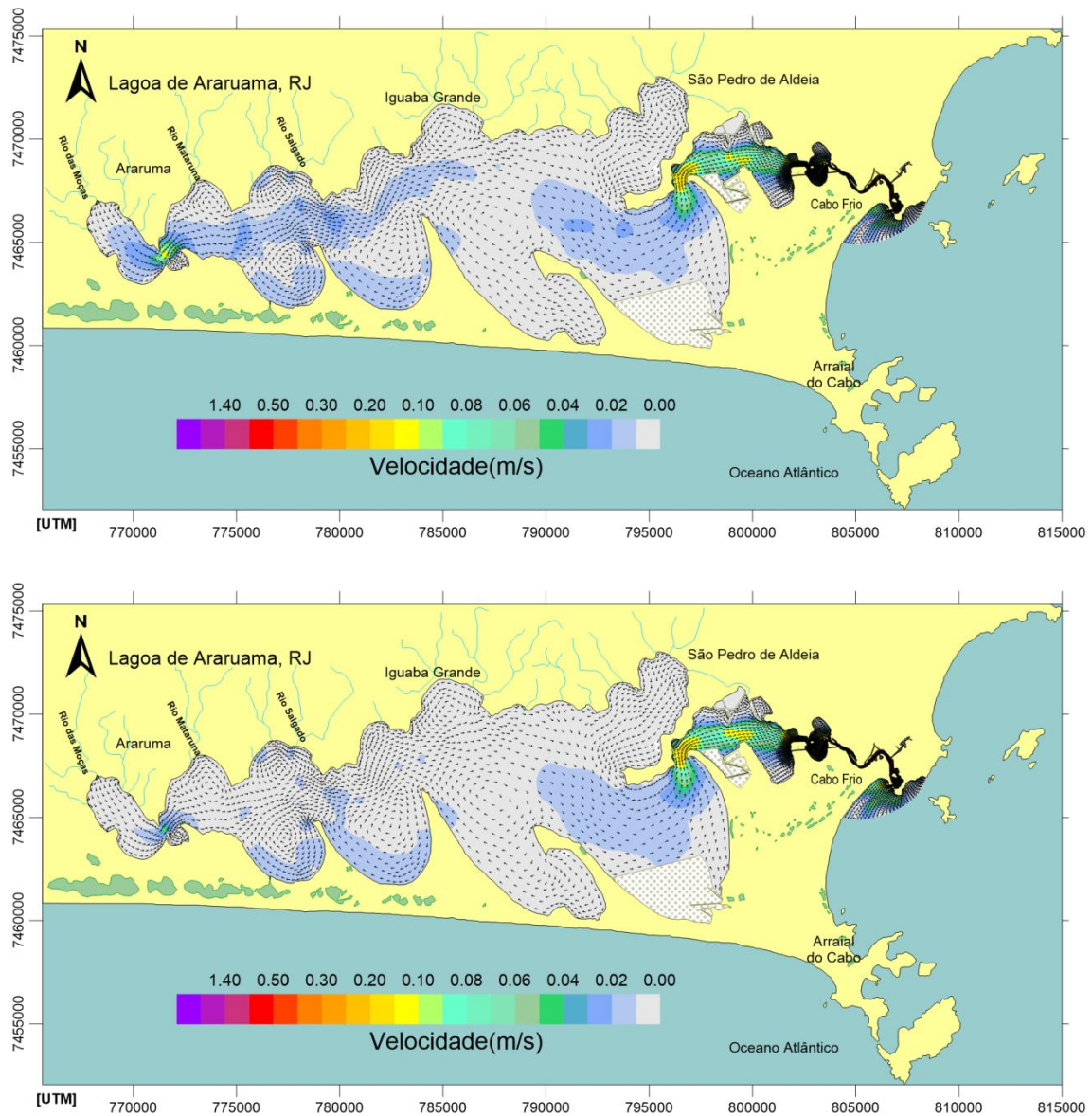


Figura 33. Mapa com padrão de correntes em instante de baixamar de sizígia na embocadura, conforme hora 213 do modelo hidrodinâmico. Na estampa superior o resultado com situação atual do NM e inferior com NM futuro.

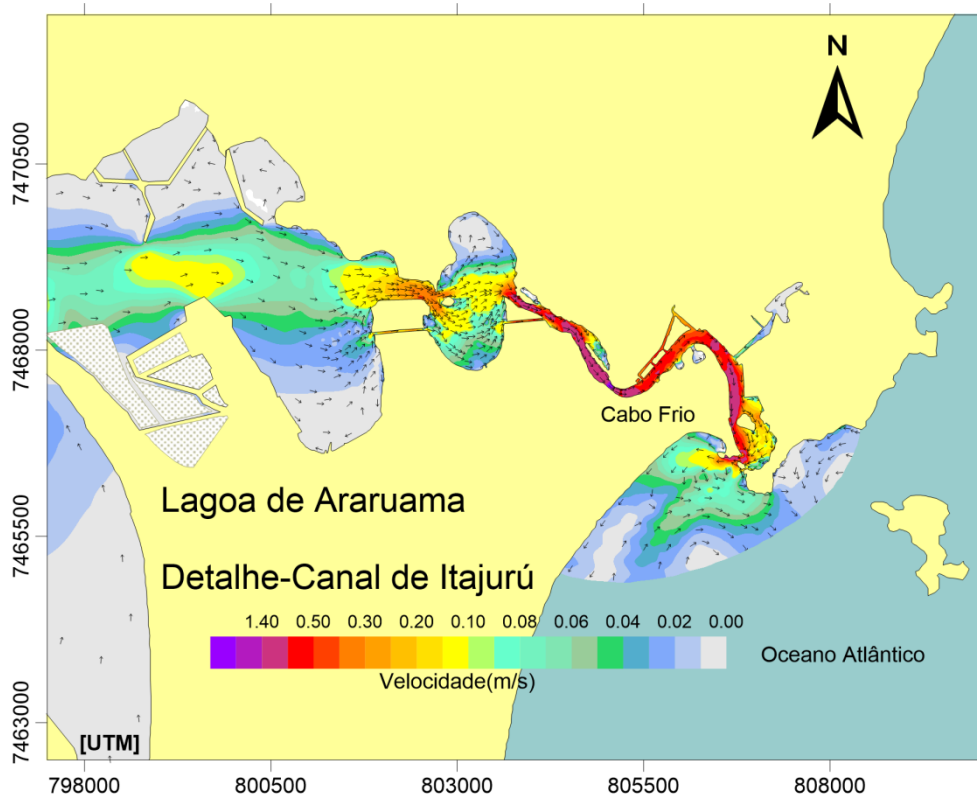
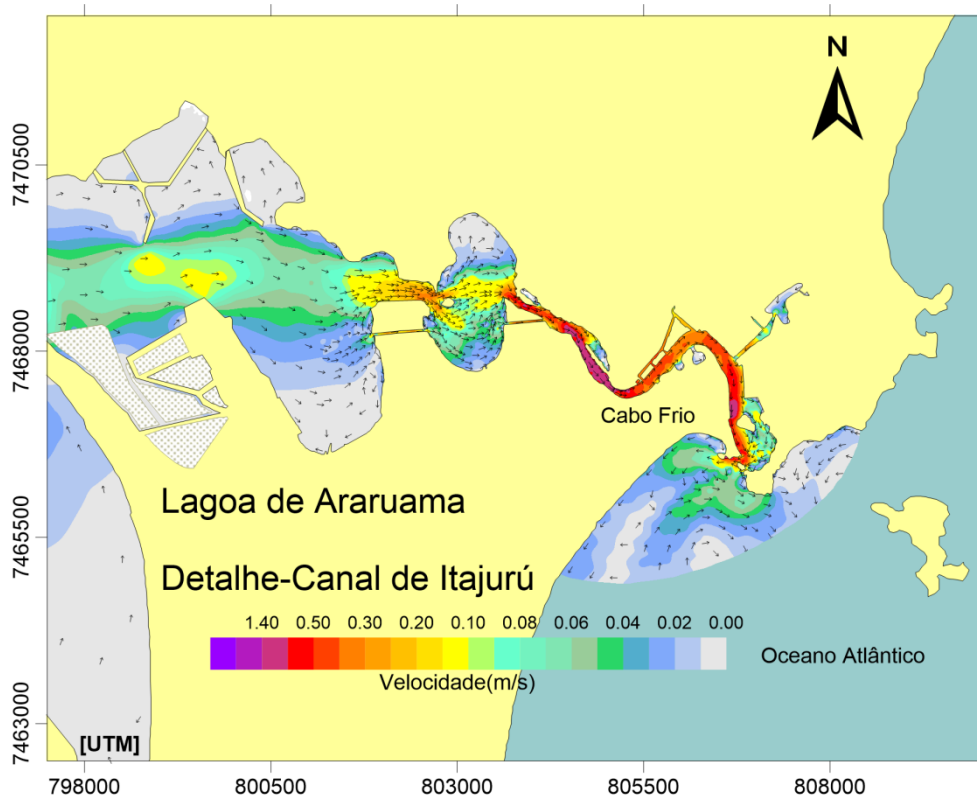


Figura 34. Mapa com detalhes de circulação hidrodinâmica no canal de Itajuru em instante de baixamar de sizigia na embocadura, conforme hora 213 do modelo hidrodinâmico. Na estampa superior o resultado com situação atual do NM e inferior com NM futuro.

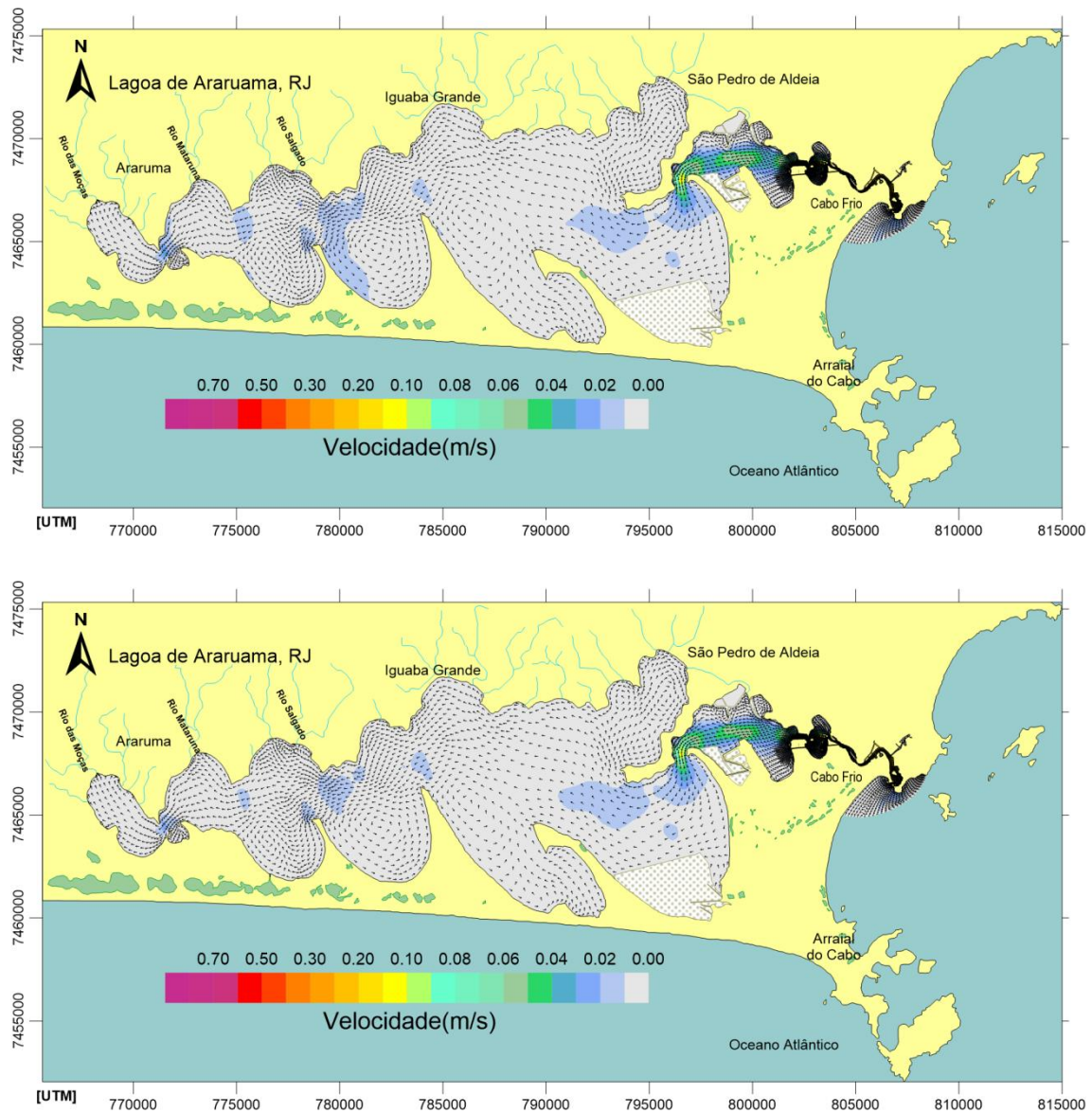


Figura 35. Mapa de circulação hidrodinâmica em instante de preamar de quadratura na embocadura, conforme hora 343.5 do modelo hidrodinâmico. Na estampa superior o resultado com situação atual do NM e inferior com NM futuro.

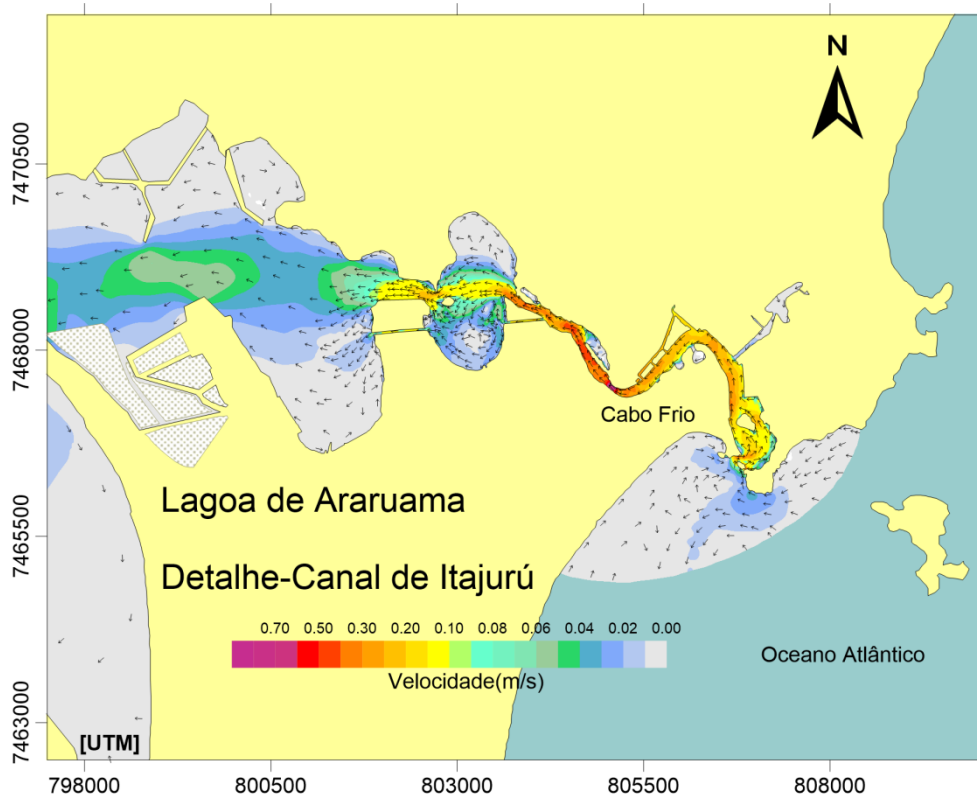
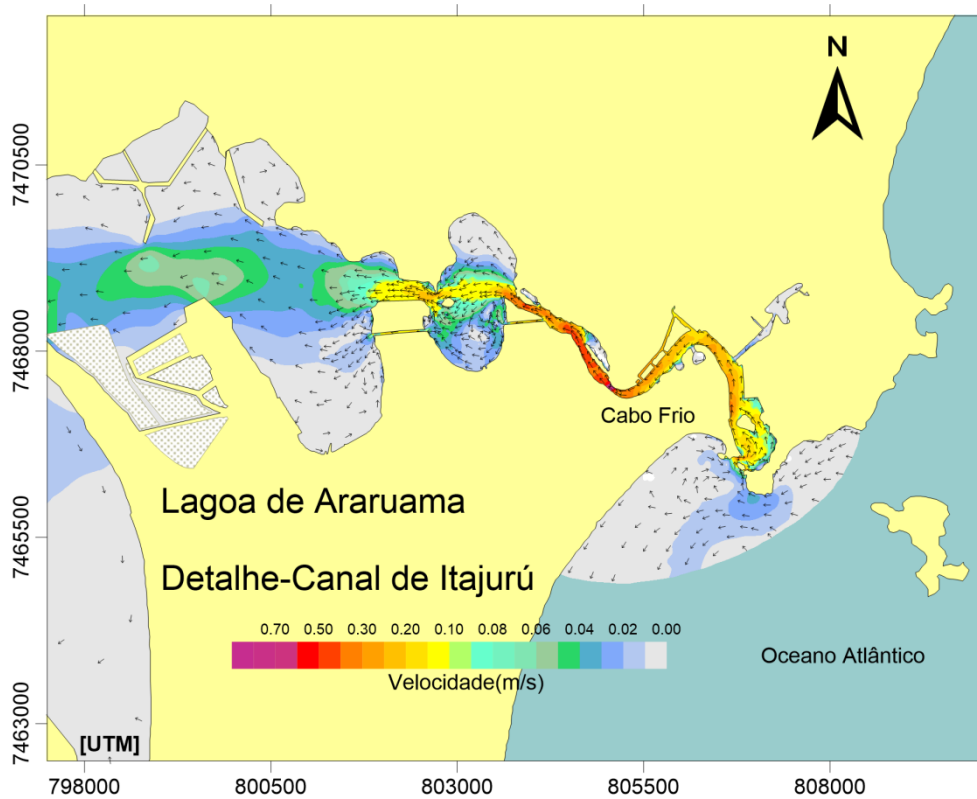


Figura 36. Mapa com detalhes de circulação hidrodinâmica no canal de Itajuru em instante de preamar de quadratura na embocadura, conforme hora 343.5 do modelo hidrodinâmico. Na estampa superior o resultado com situação atual do NM e inferior com NM futuro.

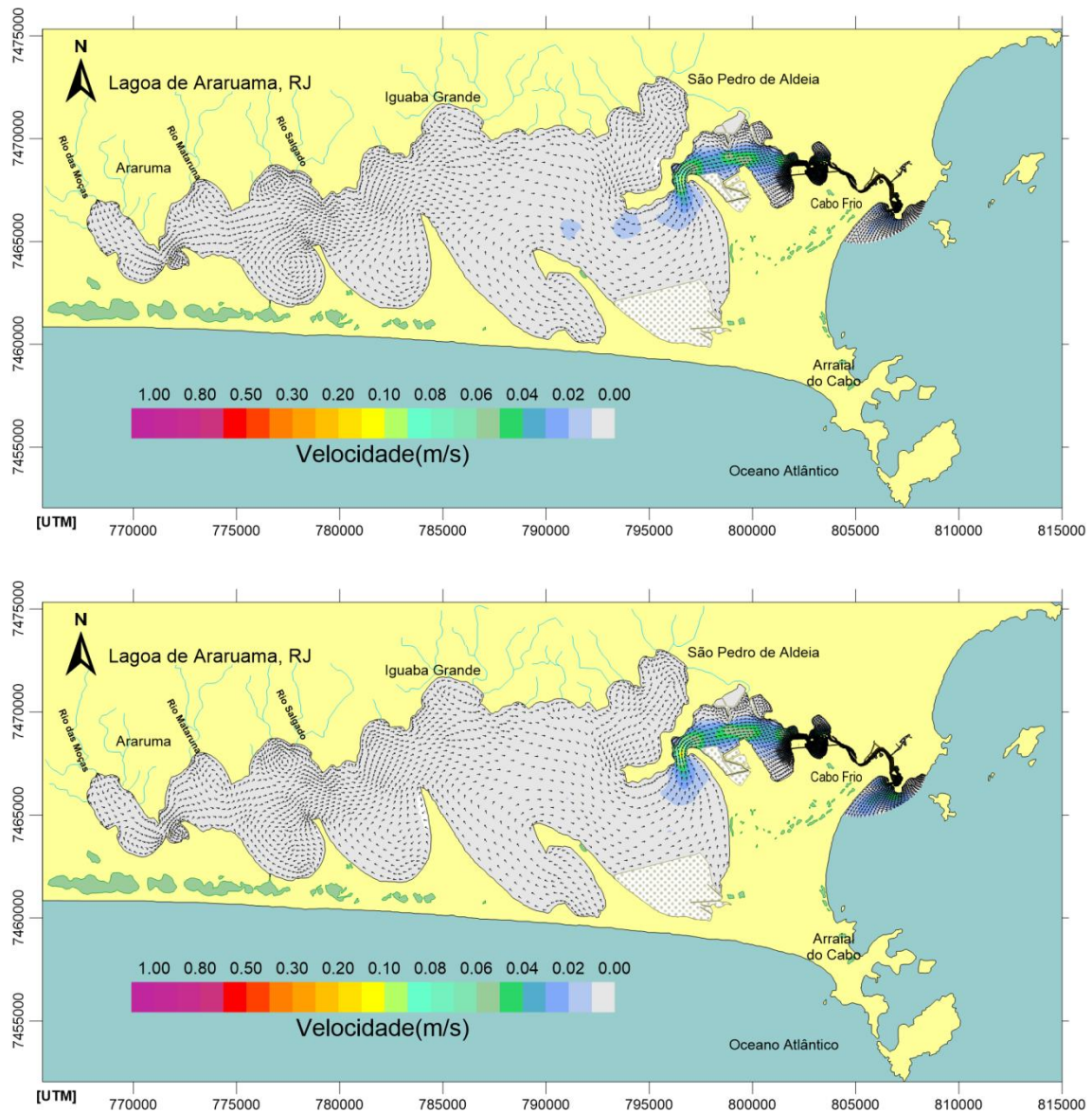


Figura 37. Mapa de circulação hidrodinâmica em instante de baixamar de quadratura na embocadura, conforme hora 348. Na estampa superior o resultado com situação atual do NM e inferior com NM futuro.

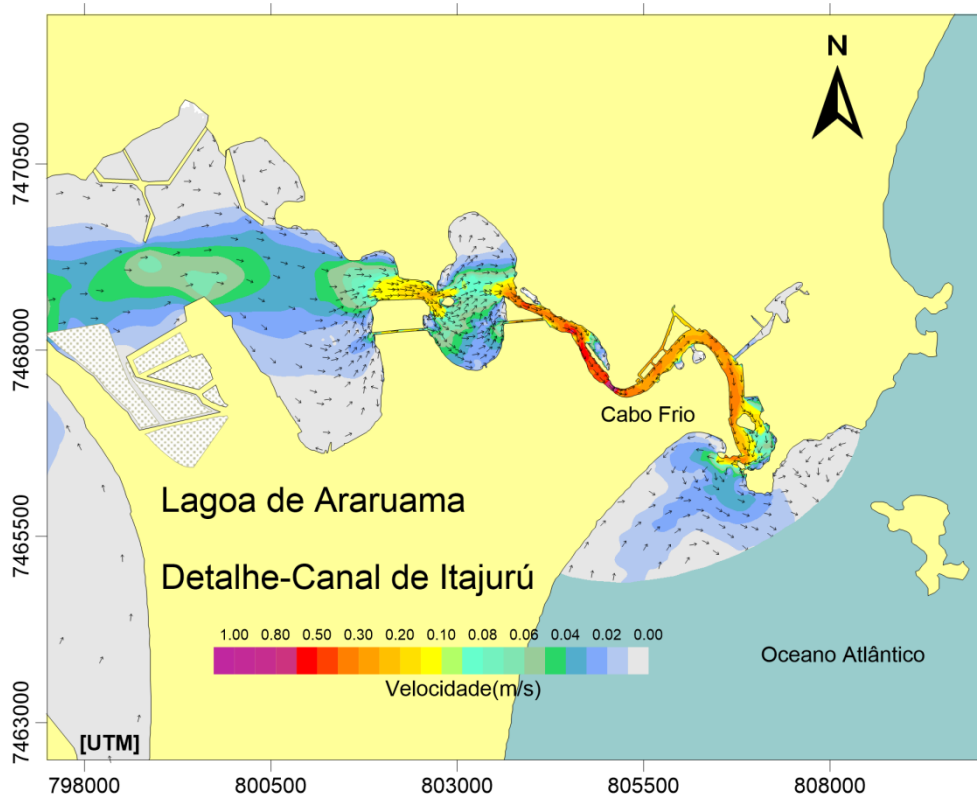
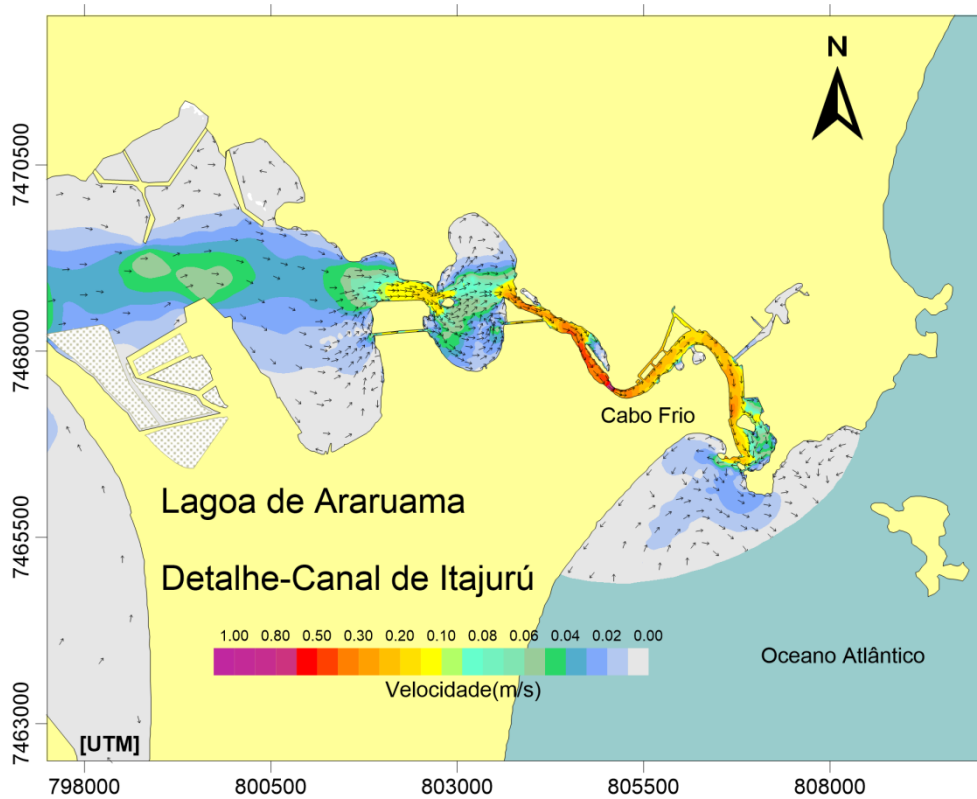


Figura 38. Mapa com detalhes de circulação hidrodinâmica no canal de Itajuru em instante baixamar de quadratura na embocadura, conforme hora 348 do modelo do modelo hidrodinâmico. Na estampa superior o resultado com situação atual do NM e inferior com NM futuro.

Quanto à propagação da onda de maré, destaca-se que a maré de vazante dura mais tempo em relação à de enchente, sendo o tempo de duração de vazante maior em aproximadamente uma hora.

Verifica-se ainda que os níveis e correntes estão quase em fase, as correntes tem máximos de velocidade próximos aos instantes de preamar e baixamar. Por sua vez, as estofas de enchente e vazante ocorrem próximas dos instantes de níveis médios da maré. Tal fato caracteriza marés do tipo progressivo, usual em canais de sistemas lagunares.

Destaca-se que, em marés progressivas, as correntes de enchente iniciam no nível médio de enchente, atingem a máxima intensidade na preamar e terminam no nível médio de vazante. Já as correntes de vazante começam no nível médio de vazante, tem máximas velocidades na baixamar e terminam no nível médio de enchente. Consequentemente, nos canais, a seção hidráulica média durante as enchentes pode ser significativamente maior que a seção hidráulica média durante as vazantes. De fato, nas enchentes a seção hidráulica tem nível médio entre a preamar e o NM da maré, já nas vazantes tal nível fica entre a baixamar e NM da maré. A grosso modo, a diferença entre as seções hidráulicas médias das enchentes e das vazantes é equivalente à amplitude da maré (metade da altura) na seção multiplicada pela largura da seção no NM da maré.

Como contrapartida, vale lembrar que as marés estacionárias (v. Figura 39), mais comuns em áreas costeiras abertas e baías, apresentam correntes de enchente entre baixamar e preamar e as de vazantes entre preamar e baixamar. Portanto, os níveis médios de enchentes e vazantes são equilibrados e, consequentemente, as seções hidráulicas de enchente e vazante são similares.

O desequilíbrio entre seções hidráulicas de enchente e vazante nas marés estacionárias, maior nas enchentes que nas vazantes, causa dois efeitos hidrodinâmicos de modo a equilibrar os fluxos de enchente e vazante. Primeiro, as correntes de vazante tendem a ser mais intensas que as de enchente, e segundo a duração da enchente tende a ser mais curta que as de vazante. Porém, não é incomum que um dos efeitos se destaque. De qualquer modo, a consequência é uma dominância na capacidade de transporte sólido nas correntes de vazantes sobre as de enchente.

A Figura 39 e Figura 40 ilustram o comportamento da maré estacionária e progressiva, os gráficos servem de auxílio na identificação das do tipo de maré discutida para cenários de sizígia e quadratura para o estudo.

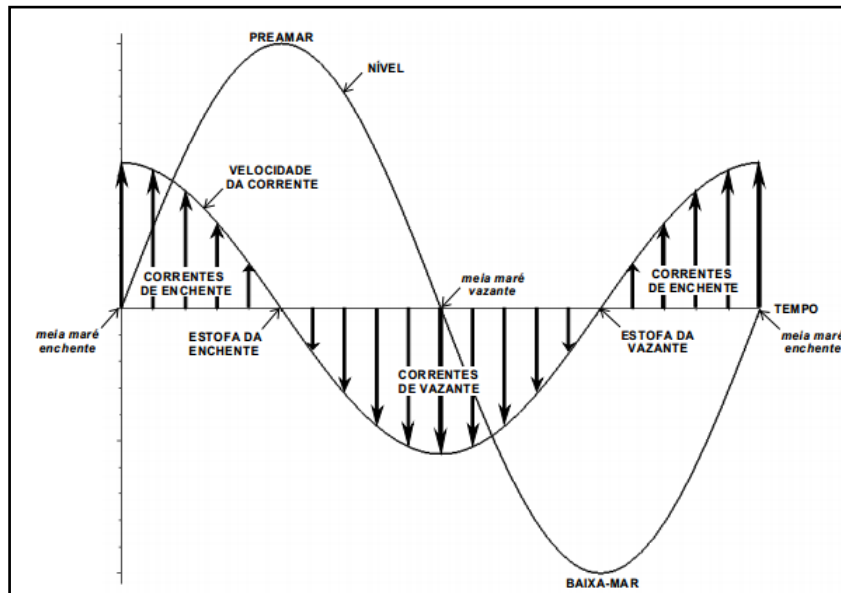


Figura 39. Relação entre as variações de níveis causados pela maré e velocidades de correntes em um sistema de maré sintética idealizada puramente estacionária. As magnitudes de maré estarão defasadas de  $90^\circ$  ( ou  $270^\circ$ ) em relação as velocidades das correntes . Fonte: PARKER, 2005 *apud* DZUALO, 2010.

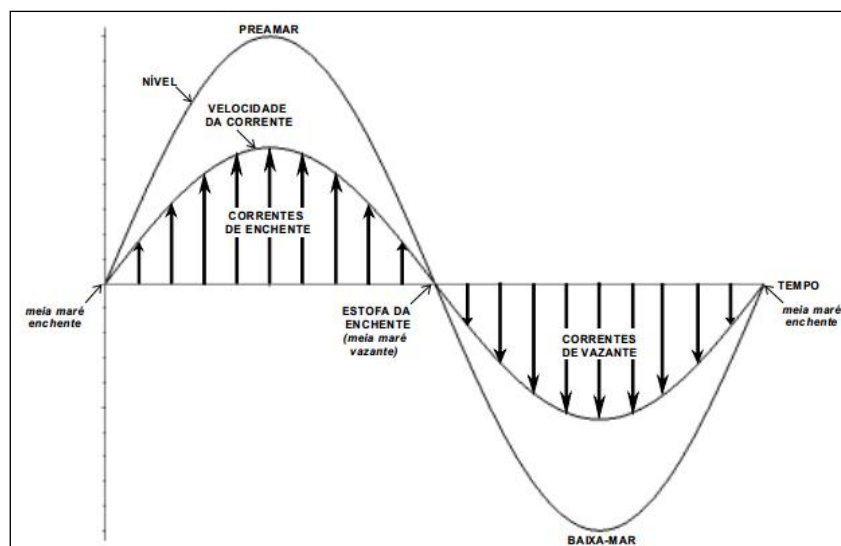


Figura 40. Relação entre as variações de níveis causados pela maré e velocidades de correntes em um sistema de maré sintética idealizada puramente progressiva. As magnitudes de maré estarão em fase (ou defasadas de  $180^\circ$ ) em relação as velocidades das correntes . Fonte: PARKER, 2005 *apud* DZUALO, 2010.

Com o intuito de mostrar as variações de níveis e velocidades de correntes no canal de Itajurú, apresenta-se da Figura 41 a Figura 44 com gráficos de variação temporal nas estações entrada do canal e ponte Feliciano Sodré para sizígia e de quadratura, respectivamente.

#### **6.1.1 Variação de níveis de água e velocidades de corrente na estação entrada do canal- Período com maré de Sizígia.**

Apresenta-se na Figura 41 um gráfico comparativo de níveis e correntes. O período selecionado corresponde a uma maré de sizígia. Verifica-se por meio do gráfico que, o fluxo das correntes de vazante é maior em relação ao de enchente considerando a situação atual e futura do NM. Vale realçar que, a onda de maré no canal de Itajurú é do tipo progressivo<sup>12</sup> e as correntes máximas de enchente e vazante ocorrem na preamar e baixamar, respectivamente.

As velocidades máximas de enchente e vazante para a situação atual e futura são respectivamente, 27, 28, 23 e 34 cm/s. As elevações variam de -0.69 m a 0.62 m e de -0.19 m a 1.14 m para situação atual e futura do NM, respectivamente.

A onda de maré é tipicamente progressiva com níveis e correntes em fase, os níveis máximos ocorrem próximo ao instante das correntes máximas.

---

<sup>12</sup> . Quando a onda de maré é progressiva, as estofas de enchente e de vazante ocorrem nas meias marés verticais, isto é, ocorrem com cerca de 3 horas de atraso em relação às estofas de preamar e baixamar, quando nível da maré está no valor médio.

Estofa é o instante em que cessa o movimento em um sentido e começa o movimento no sentido oposto. As marés têm componentes verticais e horizontais. A variação de níveis é a maré vertical e as correntes de enchente e de vazante representam a maré horizontal. Os movimentos verticais de subida e descida de nível cessam na estofa de preamar e de baixamar respectivamente. Os movimentos horizontais das correntes de enchente e de vazante cessam, respectivamente, nas estofas de enchente e de vazante.

Entrada  
do Canal

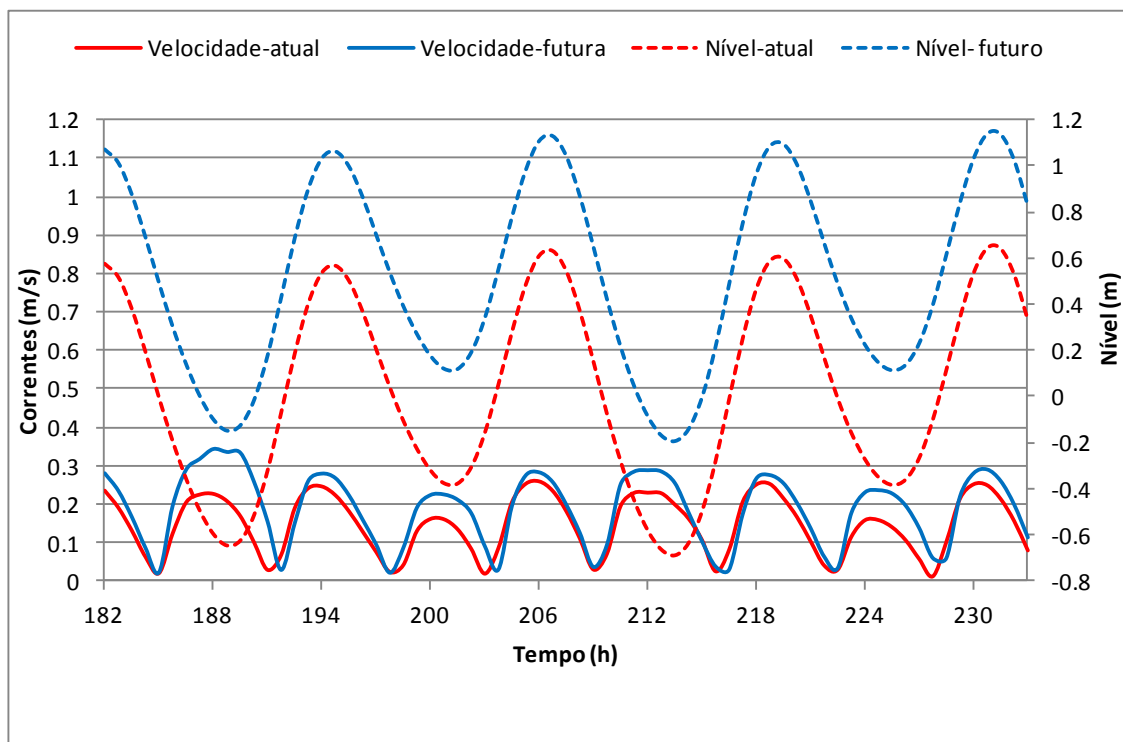


Figura 41. Gráfico comparando magnitude de velocidade das correntes de maré e níveis de água na estação entrada do canal- maré de sizígia.

Para ilustrar uma situação de enchente e vazante foi selecionado o momento localizado no tempo 207 h e 213 h do modelo hidrodinâmico (conforme Figura 41) que corresponde à preamar e baixar mar na embocadura do canal de Itajurú.

Comparando o aumento médio da média das magnitudes das correntes de enchente e vazante entre a situação atual e futura do NM, observa-se um aumento na magnitude de correntes de enchente em 12% e de vazante em 69%, v. Tabela 10.

Tabela 10. Variação percentual entre a média das velocidades de enchente e vazante considerando NM atual e futuro.

Estação	Velocidade média(m/s)				Porcentagem (%)	
	Atual	Futura	Atual	Futura		
	Enchente	Enchente	Vazante	Vazante	Enchente	Vazante
Entrada do canal	0.25	0.28	0.16	0.27	12	69

### 6.1.2 Variação de níveis de água e velocidades de corrente na estação Ponte Feliciano Sodré - Período com maré de Sizígia.

As variações de níveis e correntes para são mostrados no gráfico da Figura 42. O período selecionado corresponde a uma maré de sizígia. Observa-se um aumento na magnitude das correntes em relação as da estação entrada do canal, no qual a velocidade máxima atingida é de 0,34 m/s, na estação ponte Feliciano Sodré a máxima atingida é de 1.19 m/s.

Quanto à propagação da onda de maré, nota-se na estação ponte Feliciano o comportamento da onda do tipo progressivo, os níveis e correntes se encontram na maioria do tempo em fase.

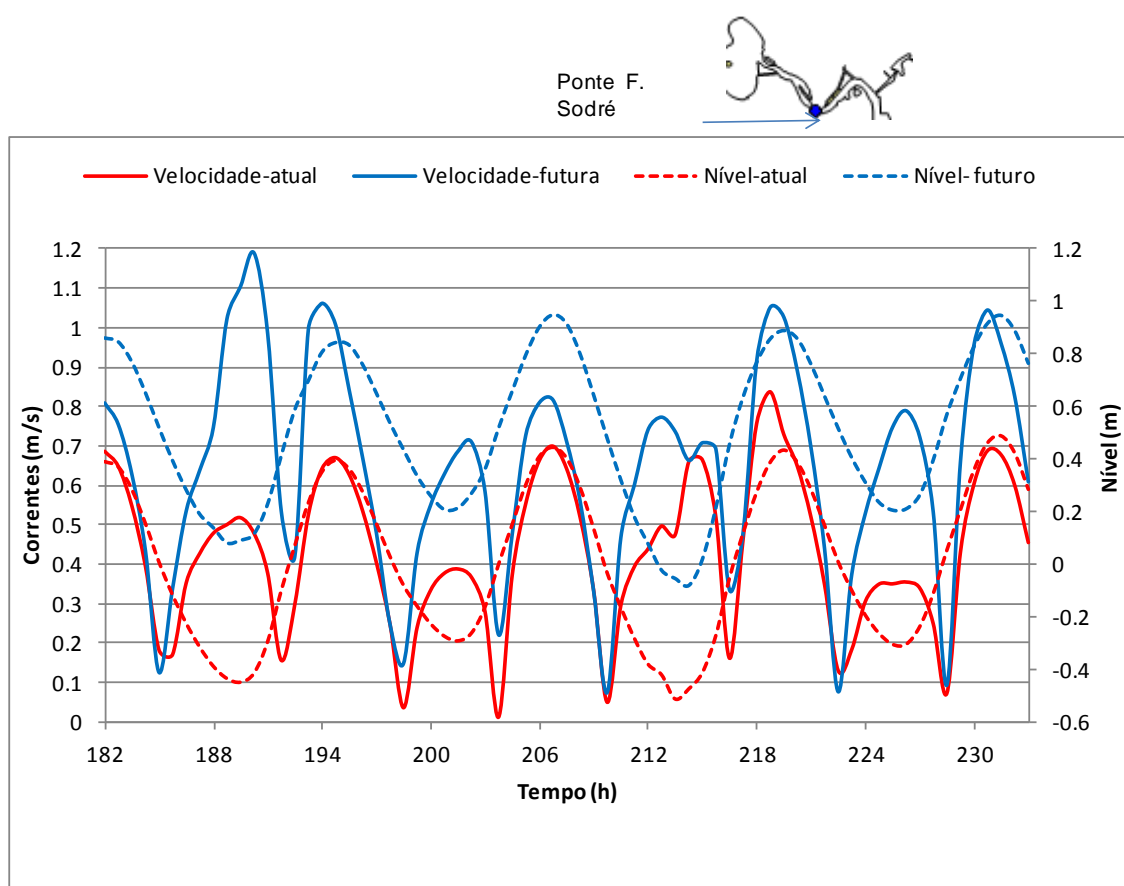


Figura 42. Gráfico comparando magnitude de velocidade das correntes de maré e níveis de água na estação ponte Feliciano Sodré- maré de sizígia.

Para ilustrar uma situação de enchente e vazante foi selecionado o momento localizado no tempo 207 h e 213 h do modelo hidrodinâmico que corresponde à preamar e baixar mar na embocadura do canal de Itajurú. Com base neste momento são feitas

comparações em termos de aumento médio na magnitude das correntes da situação atual para a projetada do NM. Verifica-se um aumento em 54% na magnitude das correntes de enchente e 77% nas de vazante (v. Tabela 11).

Tabela 11. Variação percentual entre a média das velocidades de enchente e vazante considerando NM atual e futuro-período de sizígia.

Estação	Velocidade média(m/s)				Porcentagem (%)	
	Atual	Futura	Atual	Futura		
	Enchente	Enchente	Vazante	Vazante	Enchente	Vazante
Entrada do canal	0.68	1.05	0.44	0.78	54	77

Fazendo análise geral dos resultados da Figura 41 e Figura 42, verifica-se maior tendência de duração de correntes de vazante em relação às de enchente, essa maior porcentagem de correntes de vazante contribui para que haja maior tendência de transporte de sedimentos de montante para jusante.

A seguir apresenta-se a Figura 43 e Figura 44 para ilustrar situações de variação de níveis e correntes em uma maré de quadratura. Os gráficos são referentes as estações entrada do canal e ponte Feliciano Sodré.

No período escolhido para representar a maré de quadratura, nota-se que quanto à propagação da onda de maré o tempo de duração de vazante é superior que o da enchente e a maré é do tipo progressiva. As máximas correntes de vazante e enchente ocorrem próximo ao tempo de baixar mar e preamar, respectivamente.

### 6.1.3 Variação de níveis de água e velocidades de corrente na estação entrada do canal - Período com maré de quadratura.

A fim de ilustrar a variação de níveis e correntes correspondendo uma maré com período de quadratura apresenta-se Figura 43.

As velocidades máximas de enchente e vazante para a situação atual e futura são respectivamente, 13, 15, 12 e 19 cm/s. As elevações variam de -0.25 a 0.29 m e de 0.25 a 0.79 m para situação atual e futura do NM, respectivamente. .

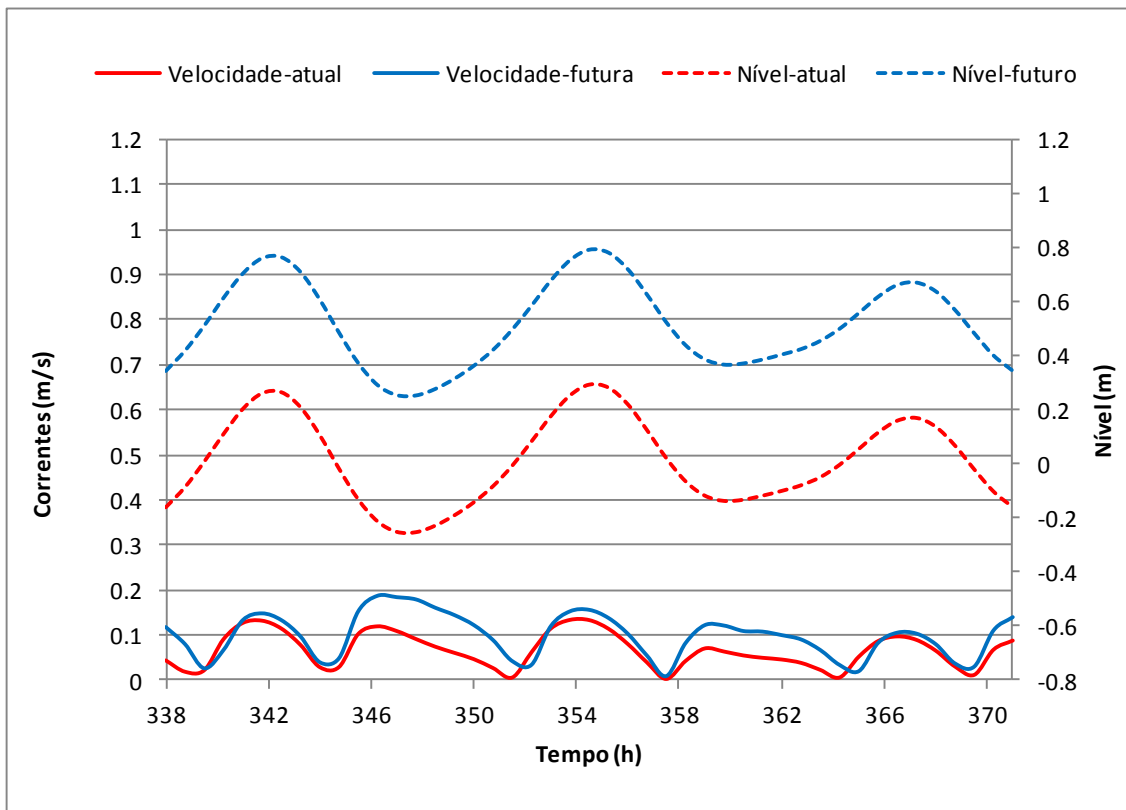
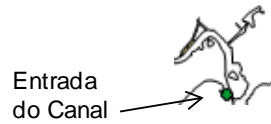


Figura 43. Gráfico comparando magnitude de velocidade das correntes de maré e níveis de água na estação entrada do canal- maré de quadratura.

Para ilustrar uma situação de enchente e vazante foi selecionado o momento localizado no tempo 343.5 h e 348 h do modelo hidrodinâmico que corresponde à preamar e baixar mar na embocadura do canal de Itajurú. Com o momento selecionado são feitas comparações em termos de aumento médio na magnitude das correntes da situação atual para a projetada do NM. Verifica-se um ganho de magnitude média de correntes na vazante em aproximadamente 60% e 15% na enchente, v. Tabela 12.

Tabela 12. Variação porcentual entre a média das velocidades de enchente e vazante considerando NM atual e futuro-período de quadratura.

Estação	Velocidade média(m/s)				Porcentagem (%)	
	Atual	Futura	Atual	Futura	Enchente	Vazante
	Enchente	Enchente	Vazante	Vazante		
Entrada do canal	0.13	0.15	0.10	0.16	15	60

#### 6.1.4 Variação de níveis de água e velocidades de corrente na estação Ponte Feliciano Sodré - Período com maré de quadratura.

A seguir apresenta-se a Figura 44 com gráficos retratando diferenças de níveis e correntes entre condições da situação atual e da situação futura do NM em uma maré de quadratura.

As velocidades máximas de enchente e vazante para a situação atual e futura são respectivamente, 39, 69, 28 e 89 cm/s. As elevações variam de -0.21 a 0.22 m e de 0.30 a 0.72 m para situação atual e futura do NM, respectivamente. .

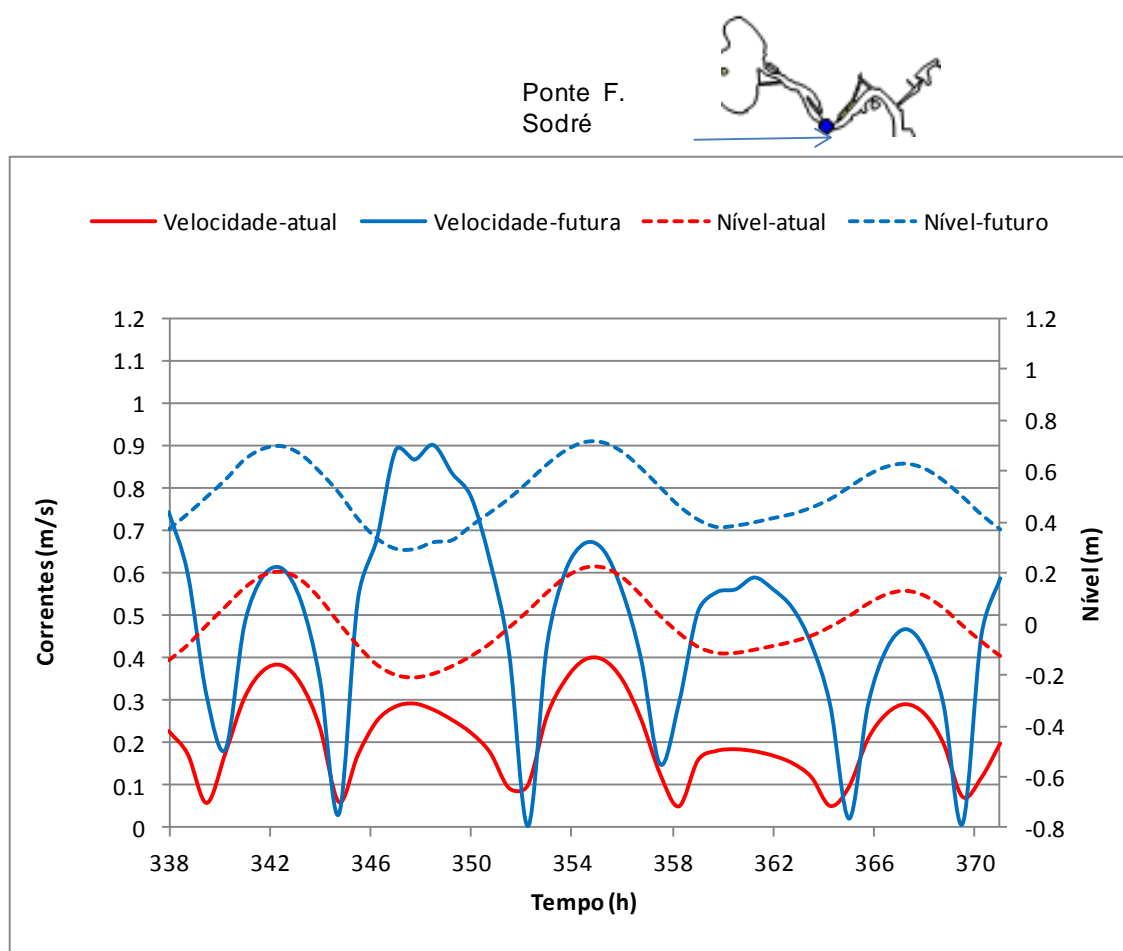


Figura 44. Gráfico comparando magnitude de velocidade das correntes de maré e níveis de água na estação ponte Feliciano Sodré- maré de quadratura.

Para ilustrar uma situação de enchente e vazante foi selecionado o momento localizado no tempo 343.5 h e 348 h do modelo hidrodinâmico que corresponde à preamar e baixar mar na embocadura do canal de Itajurú. Com o momento selecionado são feitas comparações em termos de aumento médio na magnitude das correntes da

situação atual para a futura do NM. Há um ganho de magnitude média de correntes na vazante em aproximadamente 208% e para enchente em 64%.

Tabela 13. Variação porcentual entre a média das velocidades de enchente e vazante considerando NM atual e futuro-estação Ponte Feliciano Sodré.

Estação	Velocidade média(m/s)				Porcentagem (%)	
	Atual	Futura	Atual	Futura		
	Enchente	Enchente	Vazante	Vazante	Enchente	Vazante
Ponte F. Sodré	0.39	0.64	0.24	0.74	64	208

Analisando os resultados de forma geral através das componentes de velocidade, observa-se que houve predominância de correntes de vazante tanto em cenário de sizígia como de quadratura, as maiores velocidades ocorreram em período de sizígia.

#### 6.1.5 Gráficos com elipses de maré comparando resultados de correntes em situação atual e futura do NM.

Apresenta-se da Figura 46 a Figura 49, gráfica com elipses de maré comparando os resultados de correntes obtidos na situação atual e futura do NM nas estações ponte Feliciano Sodré, enseada de palmeiras, estreito de Perynas e meio da lagoa.

Os resultados dos gráficos correspondem ao tempo total de simulação (quatro meses). As estações selecionadas para o efeito são mostradas na Figura 45.

A escolha dessas estações foi com intuito de avaliar a variação das correntes no sistema lagunar, cabe realçar que a estação ponte Feliciano Sodré é um ponto importante, pois se encontra num local onde ocorreram as maiores velocidades.

Outro ponto importante é a estação estreito de Perynas por separar os principais compartimentos hidrodinâmicos do sistema lagunar de Araruama e se encontra num local de estrangulamento.

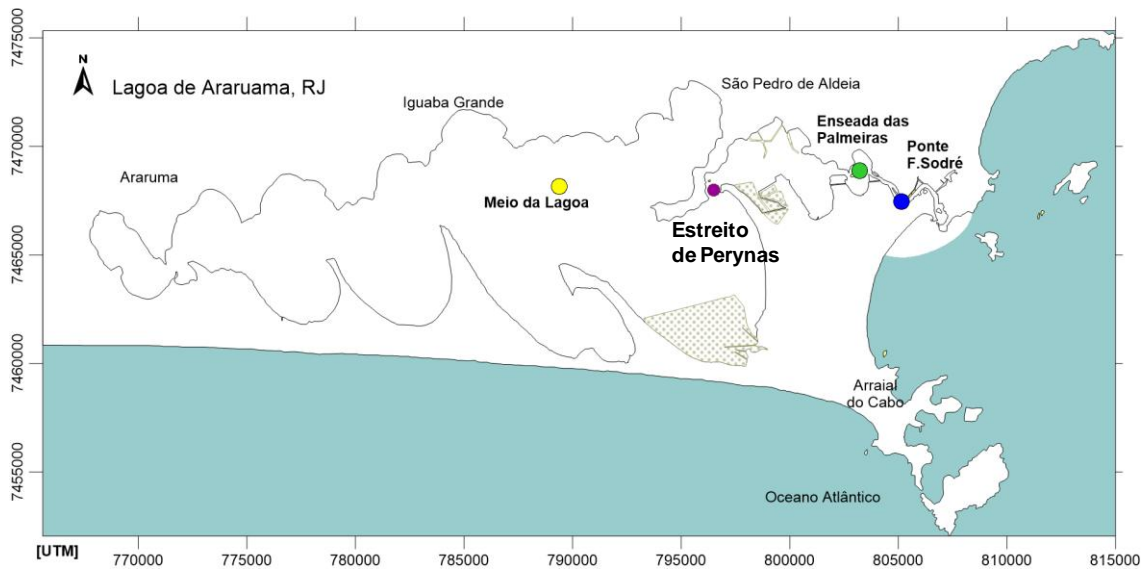


Figura 45. Mapa com localização das estações selecionadas para apresentação dos resultados referentes a elipses de maré.

Fazendo uma análise dos resultados de forma geral para o período da simulação, notou-se um aumento de velocidades de correntes em situação na situação futuro em comparação com a atual. O maior feito foi na estação ponte Feliciano Sodré, esse aumento das velocidades de correntes contribuiu para maior dinâmica sedimentar. Destaca-se uma permanência das correntes tanto em situação atual e futura do NM.

Fazendo análise por estação, destaca-se para o gráfico com elipses de correntes de maré na estação ponte Feliciano Sodré (v. Figura 46) aumento maior de velocidades no sentido predominante da componente vertical e horizontal persistindo a direção tanto na situação atual e futura. O aumento de velocidades reflete grande mobilidade de sedimentos, as correntes alteram o fundo e mudam a batimetria.

Na estação enseada de Palmeiras (Figura 47), nota-se uma modificação no sentido predominante da componente vertical de velocidade em função do aumento NM.

Na estação estreito de Perynas, nota-se que nas duas situações, não houve alteração significativa no sentido predominante da componente vertical e horizontal das velocidades. Em termos de magnitudes das correntes, verifica-se uma diminuição na situação futura.

Na estação que representa o meio da lagoa nota-se magnitudes baixas de correntes contribuindo para pouca dinâmica sedimentar.

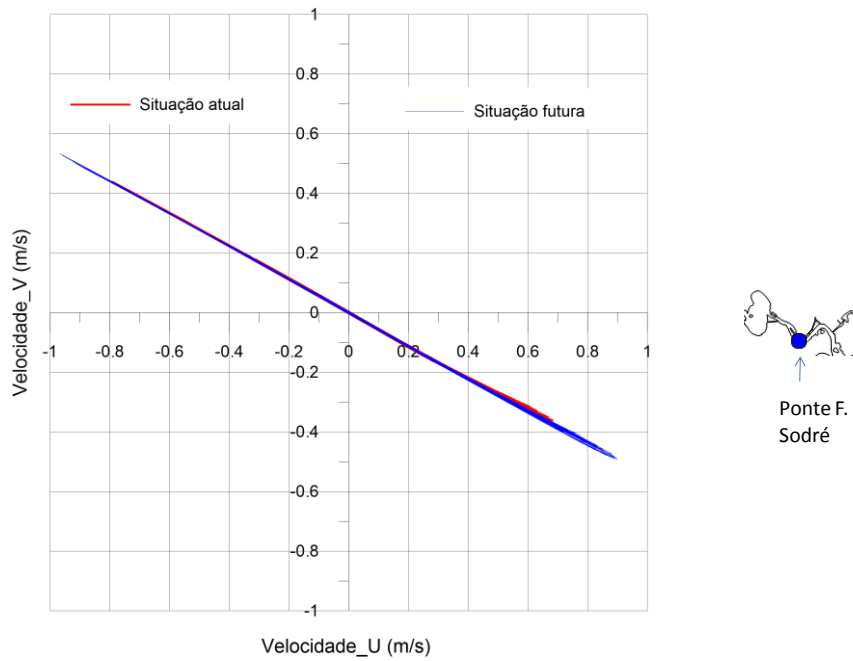


Figura 46. Elipses de correntes de maré na estação ponte Feliciano Sodré retratando a situação atual e futura do NM, durante quatro meses, correspondendo ao período da simulação.

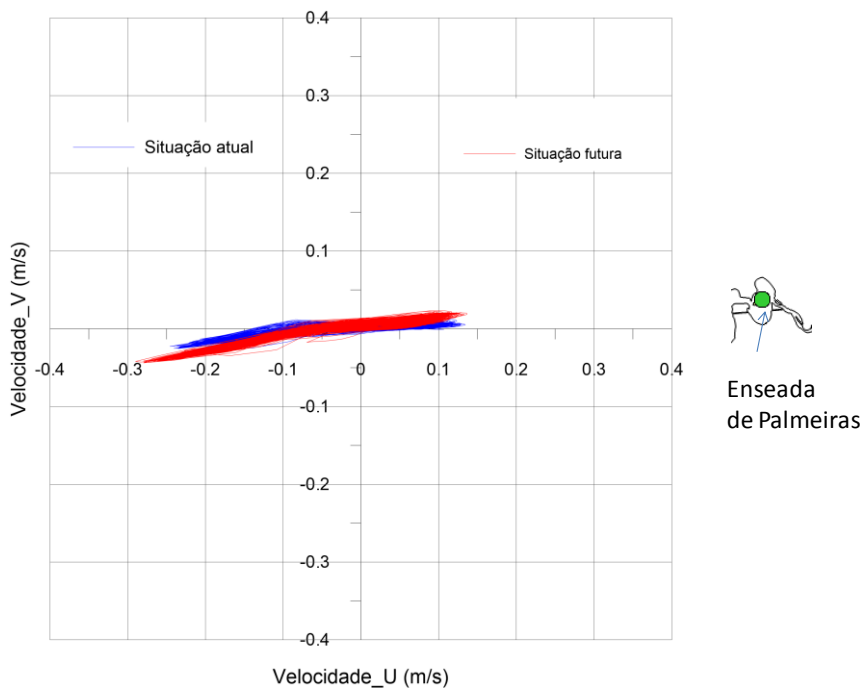


Figura 47. Elipses de correntes de maré na estação enseada de palmeiras retratando a situação atual e futura do NM, durante quatro meses, correspondendo ao período da simulação.

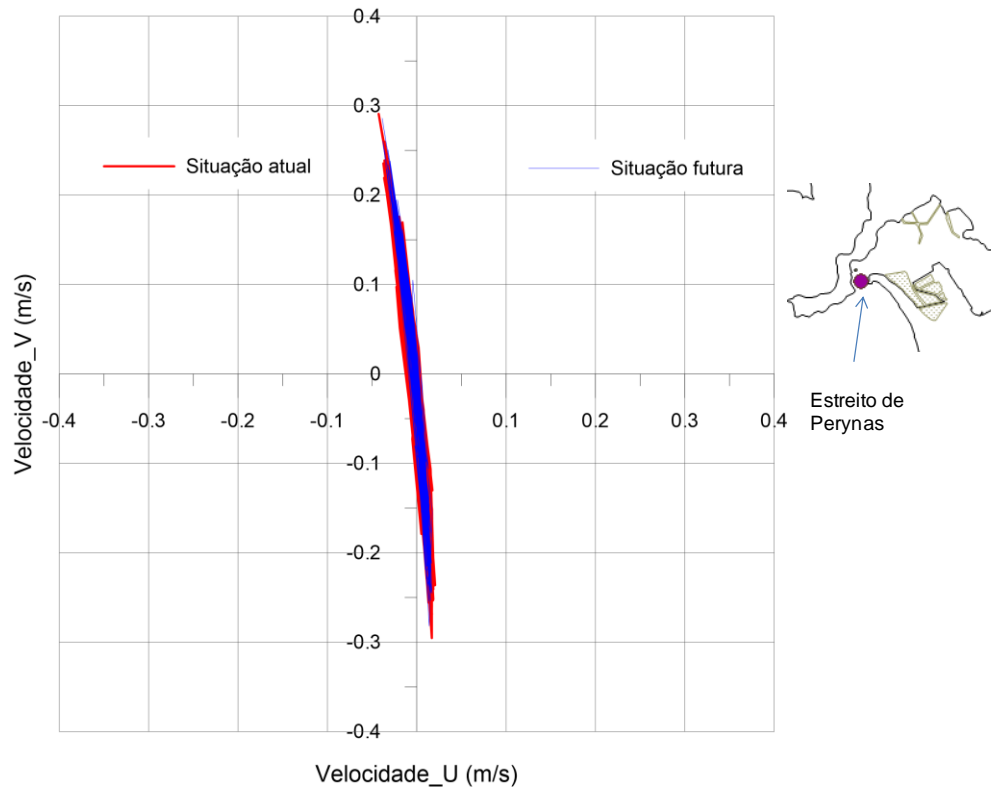


Figura 48. Elipses de correntes de maré na estação estreito de Perynas retratando a situação atual e futura do NM, durante quatro meses, correspondendo ao período da simulação.

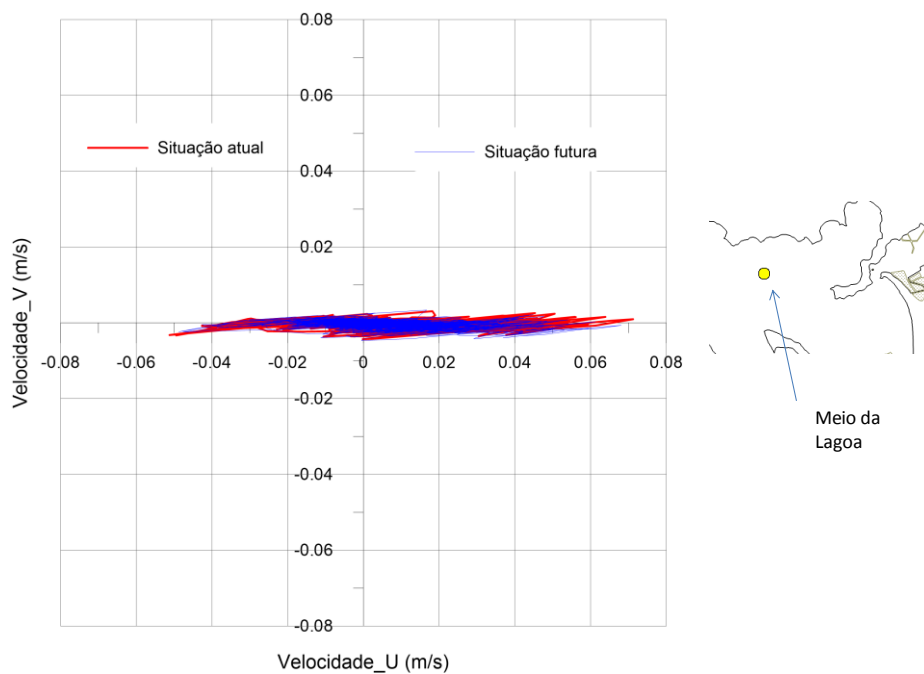


Figura 49. Elipses de correntes de maré na estação meio da lagoa mostrando situação atual e futura do NM, durante quatro meses, correspondendo ao período da simulação.

De modo a exemplificar os resultados referentes às vazões líquidas no sistema lagunar na situação atual e futura do NM, apresenta-se de Figura 50 a Figura 55, resultados que ilustram cenários com vazão líquida obtidas nas seções hidráulicas das estações entrada do canal, ponte Feliciano Sodré e enseada de Palmeiras.

Para cada seção hidráulica são apresentadas figuras com gráficos correspondendo os 120 dias da simulação, em seguida são feitas análises dos resultados considerando cenários com marés de sizígia e quadratura com o mesmo tempo usado na caracterização hidrodinâmica (vide Figura 29 e Figura 30). Neste período total de simulação o modelo sedimentológico se encontrou em estabilidade.

No estudo dos processos sedimentológicos no canal de Itajurú foram analisados parâmetros de mobilidade para as diferentes categorias granulométricas (areia fina, média e grossa) existentes no leito.

#### **6.1.6 Vazão na seção hidráulica da estação entrada do canal-Período de maré de Sizígia.**

Apresenta-se na Figura 50 o gráfico comparando vazões na estação entrada do canal considerando situação atual e projetada do NM. O período em destaque corresponde ao período da simulação de modelagem (120 dias) compondo sizígias e quadraturas. Verifica-se nesta estação um aumento de vazões com aumento do NM. Valores positivos são enchentes e negativos são vazantes.

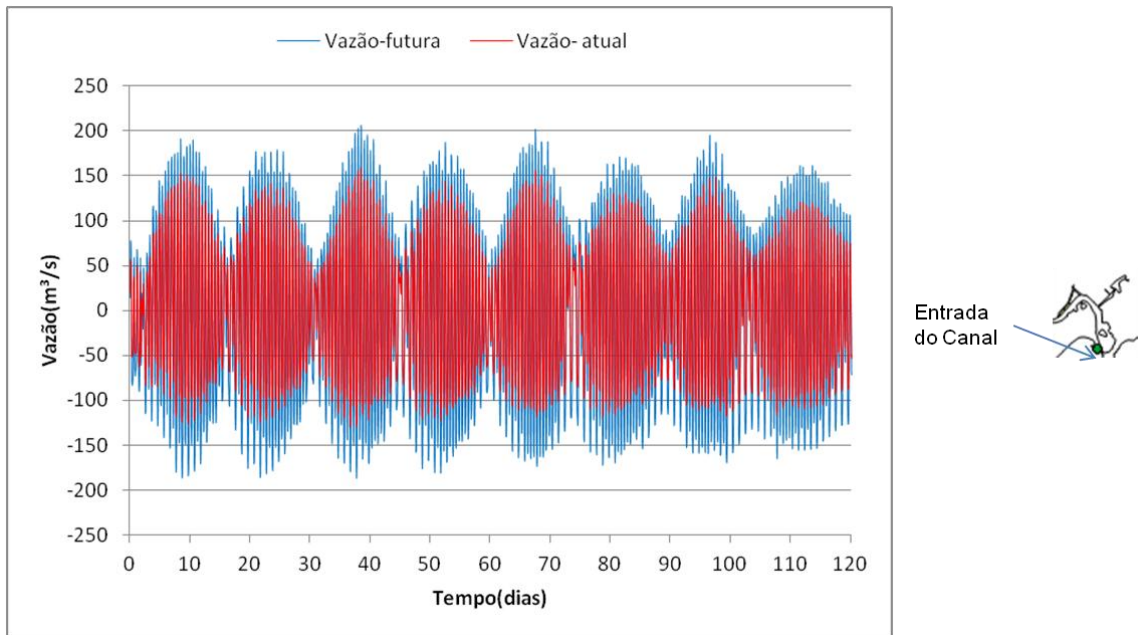


Figura 50. Séries temporais de vazões na seção hidráulica da estação entrada do canal- situação atual e futura do NM.

A fim de ilustrar uma situação de enchente e vazante foi selecionado da Figura 50 o momento localizado no tempo 207 h e 213 h do modelo hidrodinâmico que corresponde à preamar e baixar mar (v. Figura 51) na embocadura do canal de Itajurú em maré de sizígia.

Da Figura 51 são extraídos os picos das vazões correspondendo à enchente e vazante em situação atual e futura do NM. Com base nesses valores foram feitas médias dos picos de vazão de enchente e vazante para a situação atual e futura (vide Tabela 14). São feitas comparações em termos de aumento médio na magnitude das vazões da situação atual para a futura do NM.

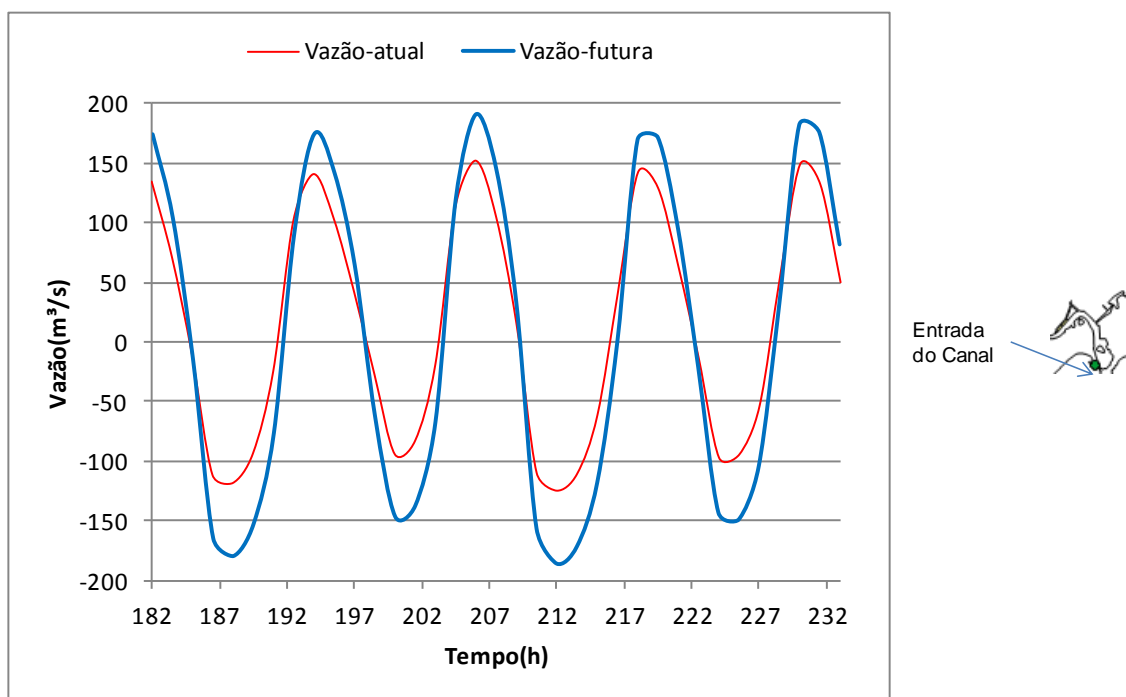


Figura 51. Séries temporais comparando vazões na seção hidráulica da estação entrada do canal em maré de sizígia- situação atual e futura do NM.

Os resultados mostram um aumento na magnitude de vazões em 52% nas correntes máximas de vazante e em 25% nas correntes máximas de enchente, v. Tabela 14.

Tabela 14. Vazão média de picos de vazante e enchente na estação entrada do canal.

Estação	Vazão média(m <sup>3</sup> /s)				Porcentagem (%)	
	Atual	Futura	Atual	Futura	Enchente	Vazante
	Enchente	Enchente	Vazante	Vazante		
Entrada do canal	<b>142.25</b>	<b>177.69</b>	<b>107.84</b>	<b>164.35</b>	<b>25</b>	<b>52</b>

### 6.1.7 Vazão na seção hidráulica da estação Ponte Feliciano Sodré-Período de maré de Sizígia.

Apresenta-se na Figura 52, um gráfico comparando as vazões na estação da ponte Feliciano Sodré em situação atual e futura do NM. O período em destaque corresponde a cento e vinte dias compondo sizígias e quadraturas. Com aumento do NM, houve aumento das vazões. As vazões com sinal positivo representam enchentes e negativos vazantes.

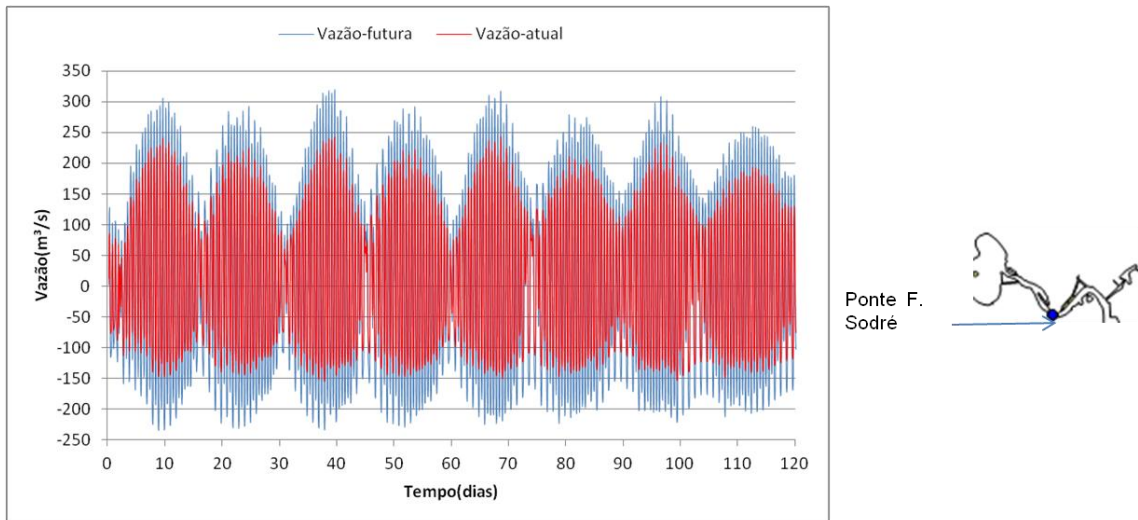


Figura 52. Séries temporais de vazões na seção hidráulica da estação Ponte Feliciano Sodré- situação atual e futura do NM.

A fim de ilustrar uma situação de enchente e vazante na seção hidráulica da estação ponte Feliciano Sodré é considerado o momento localizado no tempo 207 h e 213 h do modelo hidrodinâmico que corresponde à preamar e baixar mar (v. Figura 53) na embocadura do canal de Itajurú. O momento escolhido é referente a um período de maré de sizígia.

Com base nos gráficos da Figura 53 foram feitas médias dos picos de vazão de enchente e vazante em separado considerado a situação atual e futura. As médias feitas são mostradas na Tabela 15.

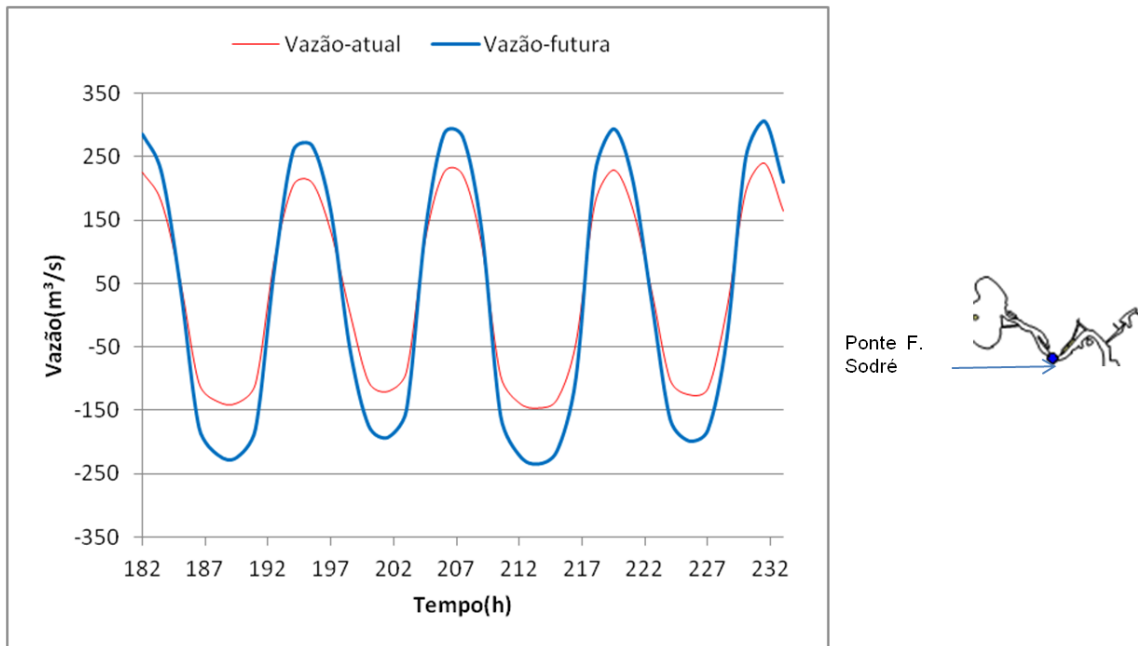


Figura 53. Séries temporais comparando vazões na seção hidráulica da estação Ponte Feliciano Sodré em maré de sizígia- situação atual e futura do NM.

Os dados da Tabela 15 mostram um aumento porcentual na magnitude de vazões líquidas em 53% na corrente máxima de vazante e aumento em cerca 27% na corrente máxima de enchente. Os resultados são extraídos da Figura 53.

Tabela 15. Vazão média de picos de vazante e enchente na estação ponte Feliciano Sodré

Estação	Vazão média(m <sup>3</sup> /s)				Porcentagem (%)	
	Atual	Futura	Atual	Futura	Enchente	Vazante
	Enchente	Enchente	Vazante	Vazante		
Ponte F. Sodré	<b>221.79</b>	<b>281.22</b>	<b>136.45</b>	<b>208.38</b>	<b>27</b>	<b>53</b>

### 6.1.8 Vazão na seção hidráulica da estação entrada do canal-Período de maré de Quadratura.

A fim de ilustrar uma situação de enchente e vazante foi selecionado o momento localizado no tempo 343.5 h e 348 h do modelo hidrodinâmico que corresponde à preamar e baixar mar na embocadura do canal de Itajurú. De referir que esses momentos são extraídos da Figura 50.

As horas 343.5 e 348 correspondem ao décimo quarto dia no gráfico mostrado na Figura 51. Com base neste momento são feitas comparações em termos de aumento médio na magnitude das vazões sólidas da situação atual para a futura do NM.

Observa-se um aumento na magnitude de vazões em 53% na corrente máxima de vazante e em 29% na corrente máxima de enchente, conforme Figura 54, nos momentos 343.5 h e 348 h.

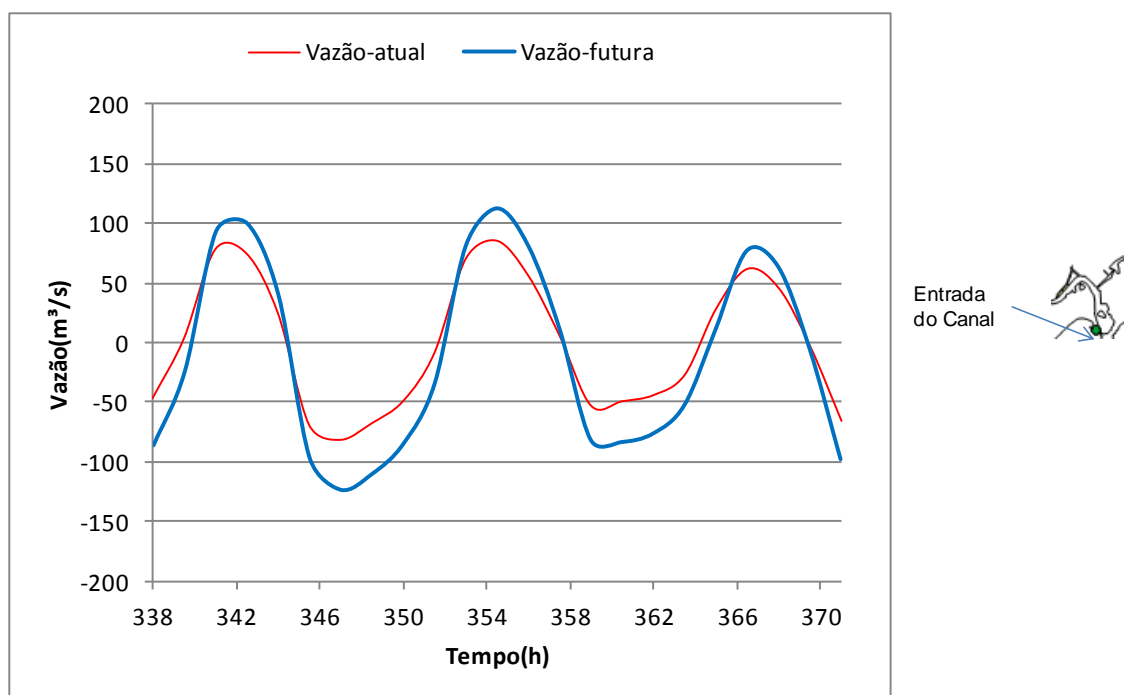


Figura 54. Séries temporais comparando vazões na seção hidráulica da estação entrada do canal em maré de quadratura- situação atual e futurado NM.

Tabela 16. Vazão média de picos de vazante e enchente na estação entrada do canal.

Estação	Vazão média(m <sup>3</sup> /s)				Porcentagem (%)	
	Atual	Futura	Atual	Futura	Enchente	Vazante
	Enchente	Enchente	Vazante	Vazante		
Entrada do canal	<b>81.87</b>	<b>105.77</b>	<b>67.63</b>	<b>103.42</b>	<b>29</b>	<b>53</b>

### 6.1.9 Vazão na seção hidráulica da estação ponte Feliciano Sodré-Período de maré de Quadratura.

Para representar uma situação de enchente e vazante foi selecionado o momento localizado no tempo 343.5 h e 348 h do modelo hidrodinâmico que

corresponde à preamar e baixar mar na embocadura do canal de Itajurú. Os momentos são extraídos da Figura 50.

As horas 343.5 e 348 correspondem ao décimo quarto dia no gráfico mostrado na Figura 55. Com base neste momento são feitas comparações em termos de aumento médio na magnitude das vazões sólidas da situação atual para a projetada do NM.

Observa-se um aumento na magnitude de vazões em 57% na corrente máxima de vazante e em 30 % na corrente máxima de enchente, conforme Figura 55, nos momentos 343.5 h e 348 h. A porcentagem de aumento é mostrada na Tabela 17.

Nota-se ainda nesta estação ocorreram maiores vazões em relação às outras em quadratura, bem como para maré de sizígia. É nesta estação onde se registraram as maiores velocidades obtida durante a simulação.

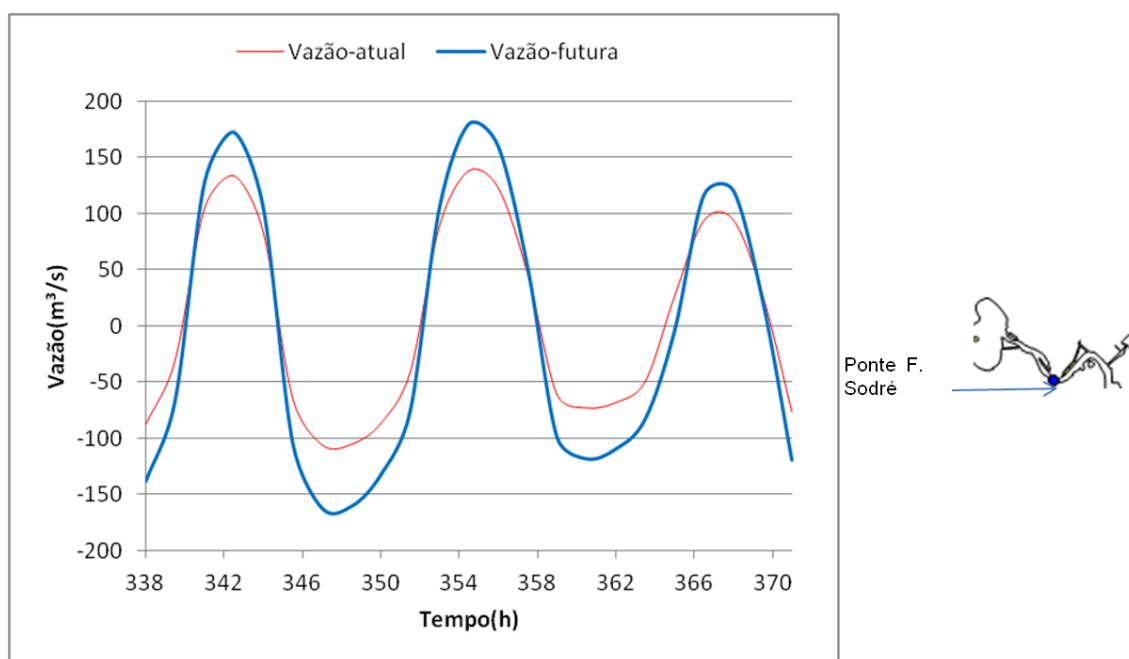


Figura 55. Séries temporais comparando vazões na seção hidráulica da estação ponte Feliciano Sodré em maré de quadratura- situação atual e futura do NM.

Tabela 17. Vazão média de picos de vazante e enchente na estação ponte Feliciano Sodré.

Estação	Vazão média(m <sup>3</sup> /s)				Porcentagem (%)	
	Atual	Futura	Atual	Futura	Enchente	Vazante
	Enchente	Enchente	Vazante	Vazante		
Ponte F. Sodré	<b>135.7</b>	<b>176.54</b>	<b>89.85</b>	<b>140.59</b>	<b>30</b>	<b>57</b>

De forma geral, verificou-se que durante o período de simulação (quatro meses) que o fluxo de vazante durou mais tempo que o de enchente. Por sua vez, as correntes de vazante são as que tiveram mais ganho em termos de magnitudes, estes resultados corroboram com os apresentados por LESSA (1991) no estudo feito sobre dinâmica de maré e transporte de sedimentos no canal de Itajurú.

## 6.2 Resultados do modelo de transporte de sedimentos

Neste item são apresentados os resultados do modelo de transporte de sedimentos representando a situação atual e futura do nível médio, os mesmos são referentes de Itajurú.

### 6.2.1 Alterações da batimetria do leito

Os resultados das alterações da batimetria do leito foram obtidos com auxílio do modelo de transporte de sedimentos que durante a simulação esteve acoplado ao modelo hidrodinâmico. As figuras que se seguem ilustram alterações batimetria correspondendo às situações de nível médio atual e futuro.

Para melhor ilustração dos resultados que representam a alteração batimétrica ao longo do tempo, são apresentadas na mesma figura, gráficos representando a alteração batimétrica (delta h) na situação atual e futura do NM. (v. Figura 56).

Vale salientar que são apresentados apenas gráficos temporais ilustrando a alteração batimétrica na estação ponte Feliciano Sodré, pois é nesta estação onde os processos sedimentológicos tiveram maior efeito e nas outras estações esses processos foram insignificantes.

Na situação futura do NM, houve maior persistência de assoreamento durante o período considerado da simulação, 120 dias, período pelo qual o modelo

morfodinâmico tendeu a estabilidade. Os sinais, positivo e negativo na Figura 56 representam erosão e assoreamento, respectivamente.

A que realçar que pelo fato das imediações da ponte Feliciano Sodré ter destroços da estrutura de uma ponte antiga contribui para maior tendência de assorear, além disso, em termos de batimetria existem nas imediações cotas de cerca de 1 metro junto às peças de concreto com um buraco adjacente da ordem de seis metros.

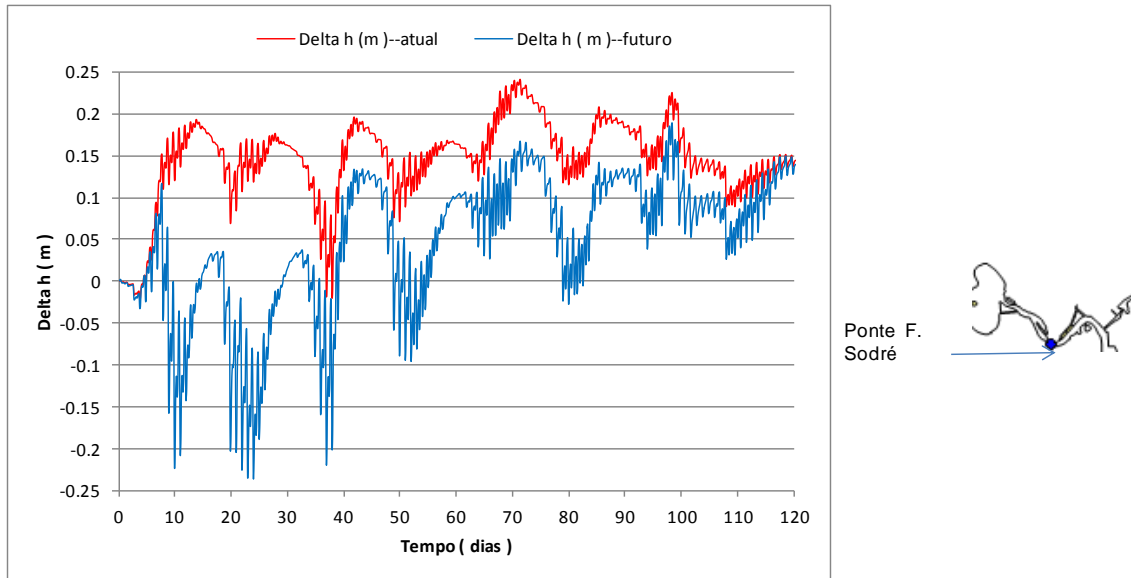


Figura 56. Gráfico com variação da batimetria ao longo do tempo na estação ponte Feliciano Sodré-situação atual e futura do NM.

Apresenta-se da Figura 57 a Figura 60, mapas com isolinhas de alteração batimétrica do fundo (delta h) correspondendo ao período da simulação.

As isolinhas de alteração batimétrica aparecem com valores positivos e negativos representando a erosão e assoreamento, respectivamente. A erosão (processo de remoção dos materiais pelos agentes de transporte) contribui no aumento da batimetria e assoreamento (processo de acumulo dos materiais) fazendo com que haja diminuição da batimetria do fundo.

Os gráficos mostram que as maiores variações da batimetria ocorreram próximo à ponte Feliciano Sodré (vide Figura 2) com maior percentagem de ocorrência de correntes de vazante em relação às de enchente (conforme discutido na seção 6.1). Este feito contribui para que haja maior tendência de transporte de sedimentos de montante para jusante vazante do canal de Itajurú.

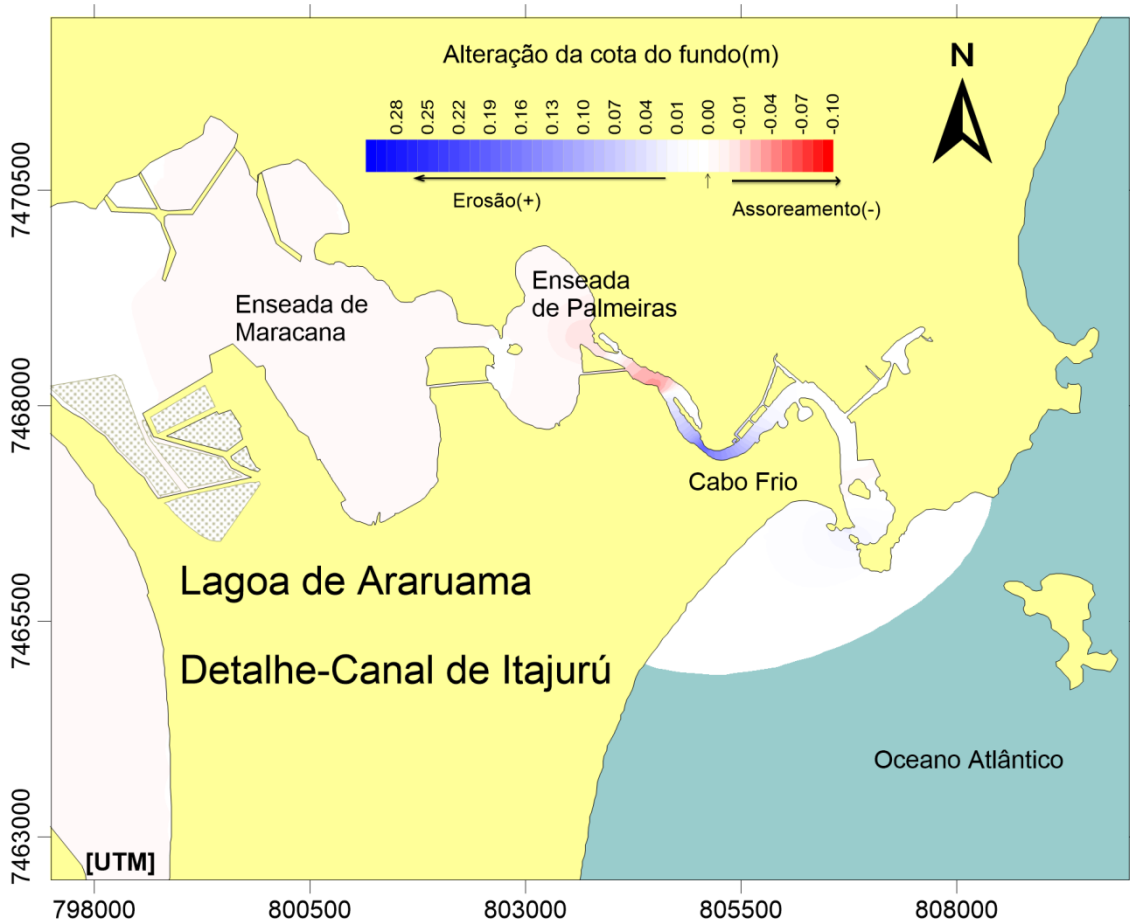


Figura 57. Mapa com isolinhas de variação acumulada da batimetria no canal de Itajurú com situação atual do NM. Os valores positivos representam erosão e os negativos.

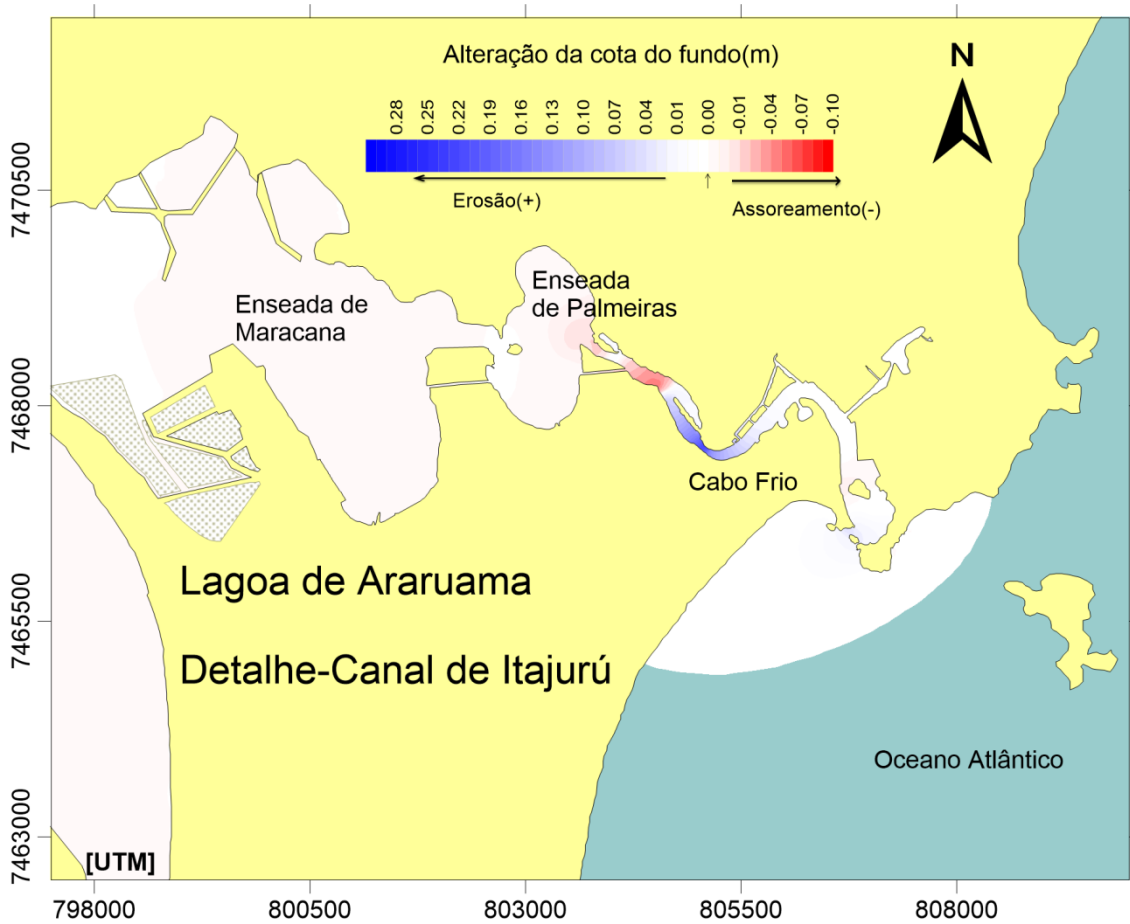


Figura 58. Mapa com isolinhas de variação acumulada da batimetria no canal de Itajurú com situação futura do NM. Os valores positivos representam erosão e os negativos, assoreamento.

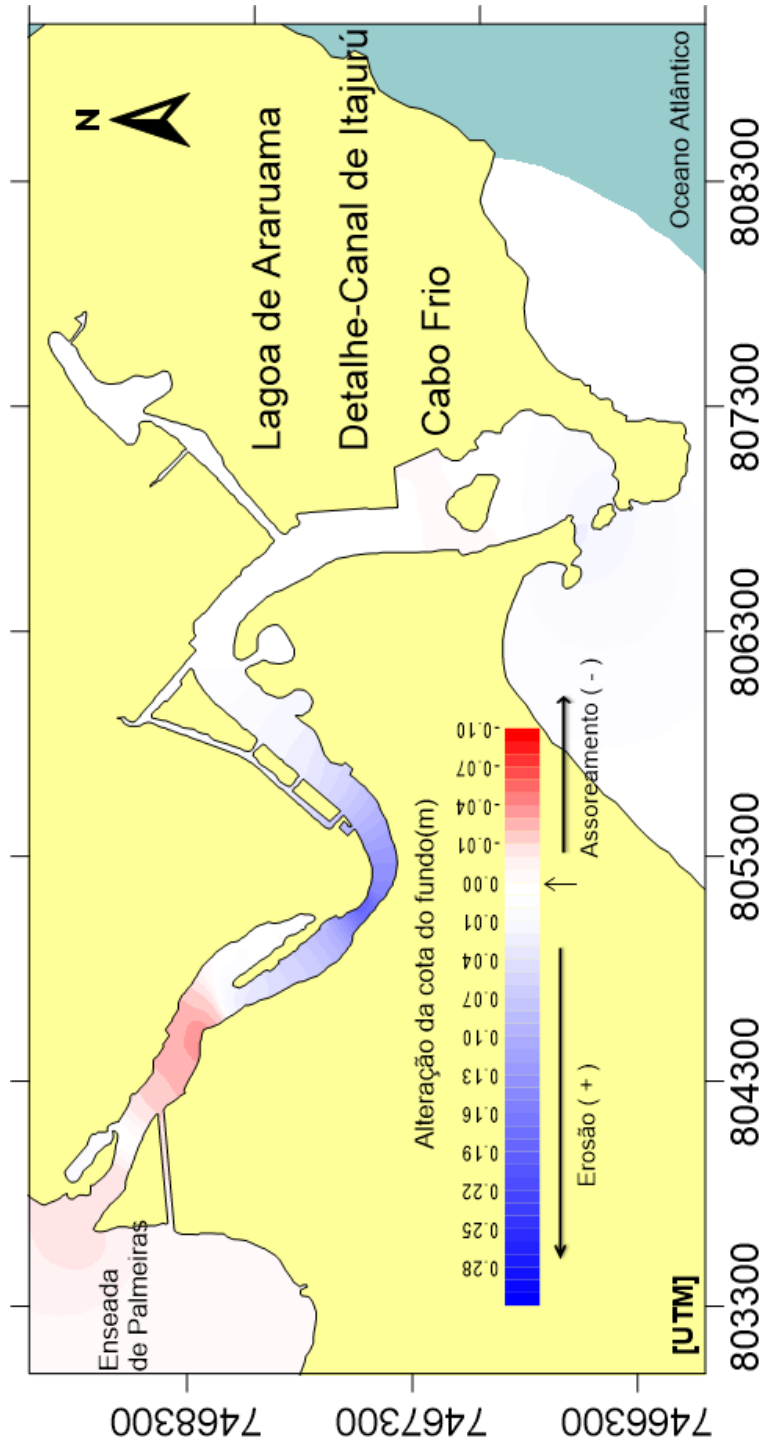


Figura 59. Mapa com detalhes de isolinhas de variação acumulada da batimetria no canal de Itajuru com situação atual do NM. Os valores positivos representam erosão e os negativos, assoreamento.

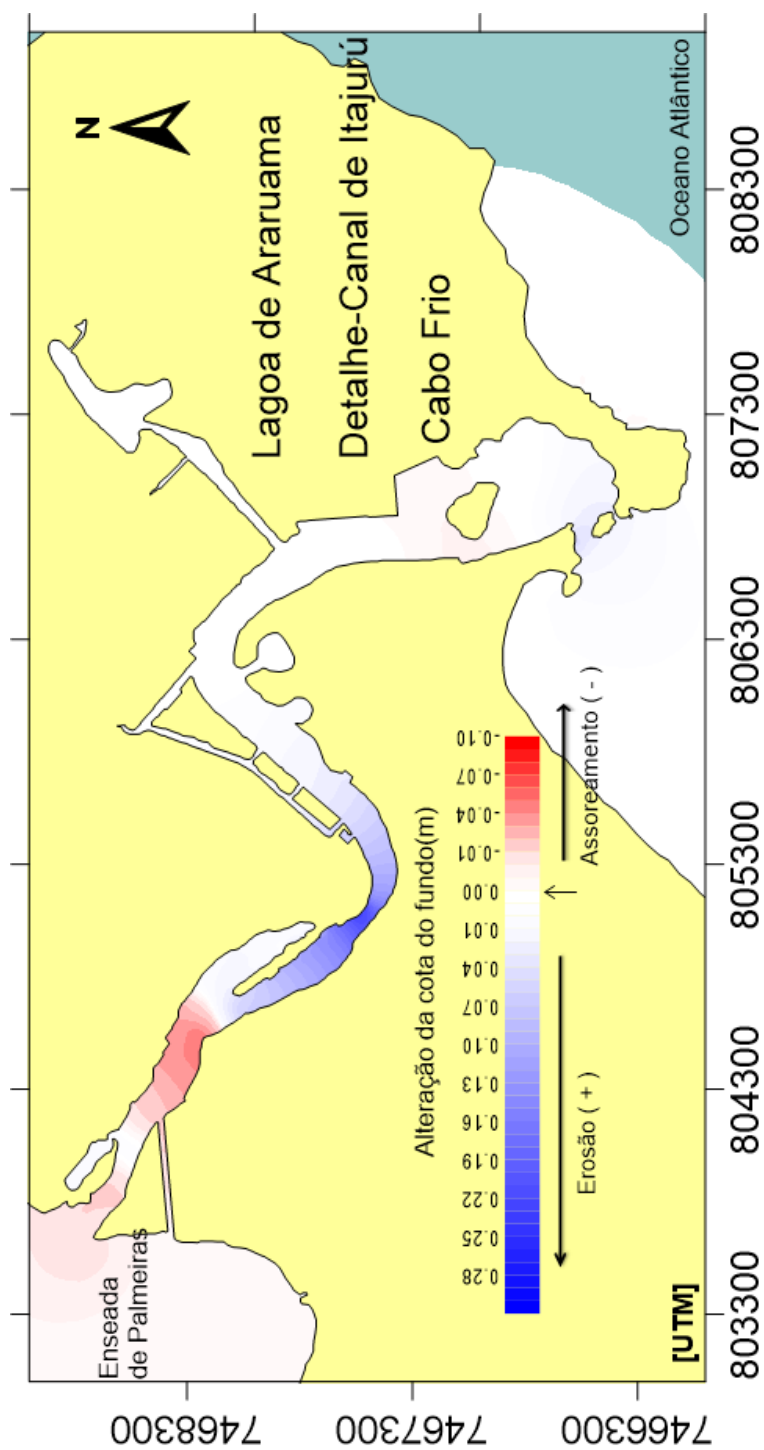


Figura 60. Mapa com detalhes de isolinhas de variação acumulada da batimetria no canal de Itajuru com situação futura do NM. Os valores positivos representam erosão e os negativos, assoreamento.

Com intuito de representar a alteração a alteração batimétrica em forma de perfil longitudinal na região propensa a erosão e assoreamento, apresenta-se a Figura 61 e Figura 62.

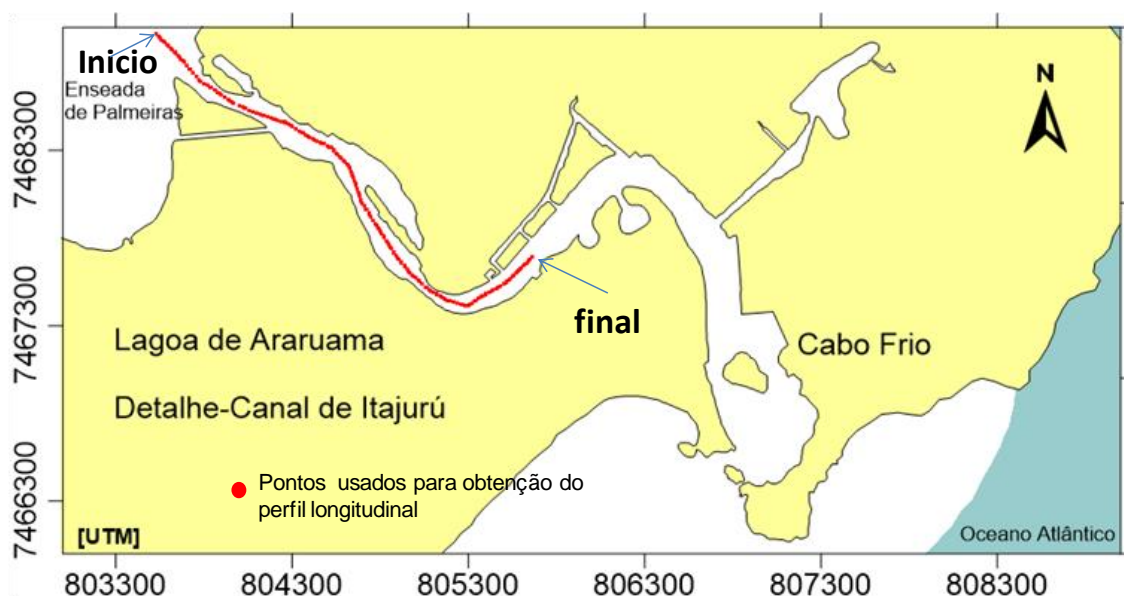


Figura 61. Mapa de localização dos pontos usados na obtenção do gráfico de perfil longitudinal, conforme mostrado na Figura 62.

A Figura 62 mostra a alteração batimétrica durante o período da simulação, quatro meses. Na mesma figura, observa-se maior erosão na situação futura do NM em comparação com à situação atual. Este feito é devido ao aumento das velocidades (vide seção 6.1), bem como de vazões líquidas (conforme discutido de seção 6.1.6 a 6.1.9). Os valores positivos e negativos representam erosão e assoreamento, respectivamente.

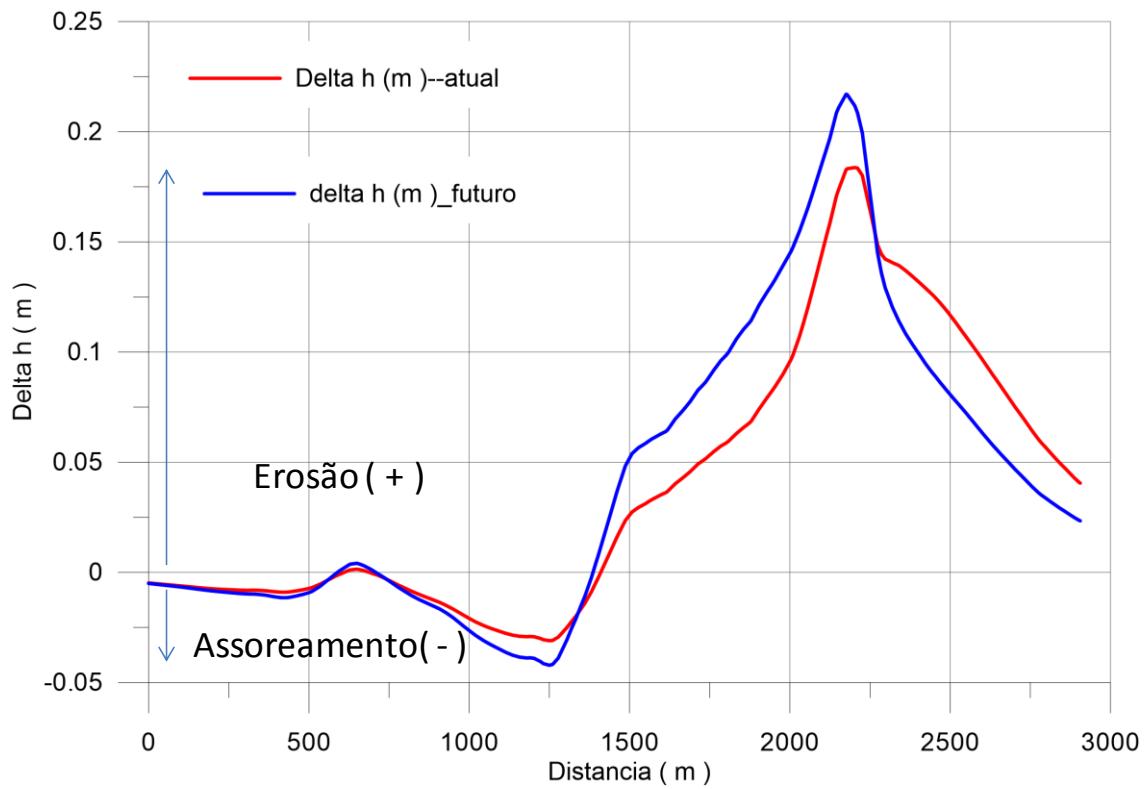


Figura 62. Perfil longitudinal representando a alteração batimétrica do canal de Itajurú em situação atual e futura do NM. O traçado do perfil começa no ponto “início” e termina no ponto “final”, v. Figura 61.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados confirmam que a lagoa de Araruama é constituída por dois compartimentos hidrodinâmicos, um dominado pela ação da maré, entre a embocadura do canal e o estreito das Perynas, e outro pela ação do vento, região entre estreito de Perynas e o extremo oeste da lagoa. Este feito corrobora com os resultados apresentados por em estudos passados por ROSMAN (2002), GAVA (2008) e GOMES(2010).

Sobre a circulação hidrodinâmica conforme discutido na 6.1, os resultados mostraram que a variação da maré é mais intensa na estação entrada do canal e estação Ponte Feliciano de Sodré e na medida em que a maré se dirige em direção ao interior da lagoa (estação do meio da lagoa) vai perdendo força passando a atingir uma amplitude de aproximadamente 0.4 metros na estação enseada de Palmeiras. Onde por sua vez, a partir da estação saco das Perynas em direção ao meio da lagoa à variação do nível tem como forçante dominante o vento, sendo menos notáveis os efeitos de maré astronômica.

Ainda sobre a circulação hidrodinâmica, o aumento do NM contribuiu no aumento das magnitudes das velocidades de corrente e vazões, sendo a maior porcentagem de ocorrência dessas magnitudes durante a vazante contribuindo assim para o maior fluxo de transporte de sedimentos de montante (parte oeste da lagoa) para jusante (parte leste da lagoa).

Com os resultados obtidos e referentes à situação atual e futura do NM, verifica-se uma mudança dos padrões da circulação hidrodinâmica fazendo com que haja aumento de velocidades de correntes em locais com maior tendência de erosão e menores velocidades em locais propensas a assorear. Esta tendência é mostrada na Tabela 11, na qual, com base nas comparações feitas considerando a magnitude das correntes da situação atual para a projetada do NM verificou-se um aumento em 54% na magnitude das correntes de enchente e 77% nas de vazante, os resultados se referem à estação ponte Feliciano Sodré em período de sizígia, esta estação foi usada como referência uma vez que é nela onde ocorreram as maiores velocidades.

Em termos de vazão, houve maiores magnitudes na situação futura do NM em relação à situação atual. As maiores vazões ocorreram nas proximidades da Ponte Feliciano Sodré o que contribuiu para maior tendência de sedimentação e erosão.

Sobre elipses de maré conforme discutido na seção 6.1.5, verificou-se no gráfico com elipses de correntes de maré na estação ponte Feliciano Sodré (v. Figura 46) um aumento maior de velocidades no sentido predominante da componente vertical. O aumento de velocidades reflete grande mobilidade de sedimentos, as correntes alteram o fundo e mudam a batimetria. Do outro, para as restantes estações (enseada de Palmeiras, meio da lagoa e estreito de Perynas) as velocidades de correntes foram menores, tanto na situação atual, bem como na situação futura do NM, este feito reflete uma região de pouca dinâmica sedimentar.

A que considerar que os resultados obtidos neste estudo apenas refletem no valor mais provável de subida do NM em 0,5 m conforme o quarto relatório do IPCC de 2007, assim, pode se concluir que os impactos das mudanças climáticas aqui encontrados podem ser mínimos, pois, o valor da subida do nível médio utilizado neste estudo não corresponde máximo projetado pelo IPCC em 2007 que é até cerca de 1 m.

O aumento do NM devido às mudanças climáticas traria novos padrões de circulação hidrodinâmica fazendo com que as velocidades das correntes se tornem mais intensas, bem como, variação batimétrica no canal de Itajurú com maior efeito na região da ponte Feliciano Sodré.

Os resultados obtidos são referentes à probabilidade de tais efeitos, porém, a que realçar que há necessidade de se fazer estudos mais detalhados e com maior abrangência.

Para boa precisão nos resultados dos modelos, hidrodinâmico e morfodinâmico, recomenda-se:

- ❖ Que os dados topobatimétricos e de caracterização da granulometria do sedimento sejam mais precisos, pois a hidrodinâmica e morfodinâmica dependem fortemente da batimetria, geometria do corpo de água e da granulometria do sedimento.
- ❖ Uma avaliação mais detalhada dos processos sedimentológicos na região do estudo considerando estudos permanentes de monitoramento do NM para se confrontar com as estimativas da elevação do NM previstas pelo IPCC.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFREDINI, P., ARASAKI, E., Obras e Gestão de Portos e Costas. A técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental. 2ª ed. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo – Brasil. pp. 81 - 195; 255 p., 2009.
- ASSAD FREITAS et al., 2009, curso de noções básicas de modelagem computacional e de dispersão de poluentes, 1 ed, Rio de Janeiro
- ASSAD, L. P. F., MANO, M. F., DECCO, H. T., JUNIOR, A. R. T., LANDAU, L. Noções Básicas de Modelagem Hidrodinâmica Computacional e de Dispersão de Poluentes, Rio de Janeiro, 2009.
- BOSBOOM, J., STIVE, M. J. F, Coastal Dynamics I, Holanda, 2011
- CARVALHO, N. O., Hidrossedimentologia Prática. -2ª ed. rev. atual. e ampliada. -Rio de Janeiro, 2008. P., 73
- COUTINHO, N. M. Relatório de Impacto Ambiental, Dragagem Parcial do Canal de Itajurú e Reurbanização Marginal na Enseada das Palmeiras, Cabo Frio, RJ, 2001.
- CUNHA, B. C. A., 2003, uma análise do sistema lagunar de Araruama com enfoque hidrodinâmico, Dissertação de mestrado, COPPE-UFRJ, RJ, Brasil.
- DA ALMEIDA, A. B., ROSMAN, P. C. C., EIGER, S. Métodos Numéricos em Recursos Hídricos. 3. ed. Porto Alegre: ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1997. Cap. 3, p.
- DA SILVA, G. N., 1992, Variação ao longo período do nível médio do mar: causas, consequências e metodologias de análise, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DA SILVA, R. C. V. E WILSON JR, G., Hidráulica Fluvial, Vol. II, COPPE/UFRJ, 2005.
- DE SOUZA, A. L. R., 2010, Estudo do Movimento Incipiente de Sedimentos Não Coesivos em Escoamentos com Superfície Livre, Dissertação de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A.; Coastal Processes with and Engineering application, Cambridge University, England, 2004. .
- DYER, KEITH. R., Estuaries, A Physical Introduction, 2nd Edition, Institute of Marine Studies of Plymouth, UK, 1997.
- ENGELUND, F. and E. HANSEN, 1967. A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark
- FREDSOE, J.; DEIGAARD, R. Mechanics of coastal sediment transport.
- GAVA, G. L, Avaliação de Renovação de Águas na Lagoa de Araruama – RJ via abertura de canal com o mar no extremo oeste, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

- GOMES, N. F. 2009, p. 5, Análises de Circulação Hidrodinâmica e de Transporte de sal em um Estuário Hipersalino: Lagoa de Araruama, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Intergovernmental Panel On Climate Change (1990). Changing Climate and the Coast
- IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp., 2007.
- LESSA, C. GUILHERME, “Dinâmica de maré e transporte de sedimentos no canal de Itajuru”, Revista Brasília de Geociências, 21 (4): 378-386 Dezembro de 1991.
- MADSEN O. S. and GRANT. W D 1976. “Quantitative Description of Sediment Transport by Waves - Proceedings, Fifteenth International Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers. Vol. 2. pp 1093—1112.
- MIRANDA, L. B., CASTRO, B. M., KJERFVE, B. Princípios de Oceanografia Física de Estuários. Editora da Universidade de São Paulo, Brasil, 2002.
- MOTTA, V. F., Processos Sedimentológicos em Estuários. Nota Técnica, Área de Engenharia Costeira, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1978.
- NEVES, C. F., MUELE. D. E., VALENTINI, E. M., ROSMAN, P. C. C, Estudo de Vulnerabilidades no Litoral do Estado do Rio de Janeiro devido às Mudanças Climáticas, 2007.
- NZUALO, T. N. M. 2010, Estudo Hidrodinâmico e Ambiental do Estuário da Beira, Dissertação de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- PIRAZZOLI, P.A. (1986). Secular Trends of Relative Sea Level (RSL) Changes Indicated
- PRIMO, P. B. da S. e BIZERRIL, C. S R. S. F. – “Lagoa de Araruama”, Projeto Planágua Semads / GTZ, 2002.
- RIBEIRO, F. L. B. DA SILVA, R. C. V. EHRlich, M., TELLES, B. F. O; Relatório Final de Modelagem da Lagoa de Araruama, PEC-1894, Fundação COPPETEC-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.
- ROSMAN, P. C. C. (editor) - Referência Técnica do SisBaHiA 9.1 - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. www.sisbahia.coppe.ufrj.br. COPPE/UFRJ, 2012.
- SIMONS, D. B., SENTÜRK, F., Sediment Transport Technology, Water and Sediment Dynamics, Colorado, USA, 1992.
- TAGLIANI, C. R., CALLIARI, L. J., TAGLIANI, P. R., ANTIQUEIRA, J. A. Vulnerability to sea level rise of an estuarine island in southern Brazil. Quaternary and Environmental Geosciences, v. 01, n. 1: 18-24, 2010.
- VIERIA, P.C, Variações do nível marinho, Rev.IG, São Paulo, 2(1): 39-58, jan/jun. 1981. Vols. 1 e 2.