

ESTUDO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DO LAGO GUAÍBA
CONTRATO Nº 22/2018

PRODUTO 04 - RELATÓRIO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA E
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DO LAGO GUAÍBA – MÓDULO III

REALIZAÇÃO:



GOVERNO DO ESTADO
RIO GRANDE DO SUL
SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE
E INFRAESTRUTURA

EXECUÇÃO:

RHA
RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAIS
ENGENHARIA

CURITIBA - PR
SETEMBRO/2019

ESTUDO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DO LAGO GUAÍBA

CONTRATO Nº 22/2018

Emissão Inicial

Rev.	Data	Elaborado por	Verificado por	Autorizado por	CREA Responsável Técnico	CE
3	25/09/2019	TM; JG	AP	CSG	67059-D	AF
2	23/09/2019	TM; JG	AP	CSG	67059-D	AF
1	22/08/2019	TM; JG	AP	CSG	67059-D	AE
0	12/07/2019	TM; JG	AP	CSG	67059-D	AE

CE – Códigos de emissão

AE Aprovado para emissão **AF** Aprovação final **VS** Versão preliminar **CD** Cancelado

**GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA (SEMA/RS)**

Av. Borges de Medeiros, nº 261, 14º andar
Centro Histórico, Porto Alegre – RS – Brasil

Secretário de Estado do Ambiente e Infraestrutura
Artur Lemos Júnior

Fiscal titular de acompanhamento e execução do contrato
Amanda Wajnberg Fadel

Fiscal suplente de acompanhamento e execução do contrato
Fernando Comerlato Scottá

RHA ENGENHARIA E CONSULTORIA SS LTDA

Rua Voluntários da Pátria, 400 – 14º andar
CEP 80020-000 - Centro - Curitiba - PR - Brasil
Tel./Fax +55 41 3232 0732 - www.rhaengenharia.com.br

REPRESENTANTE LEGAL

Candice Schauffert Garcia

Engenheira Civil
Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental
csgarcia@rhaengenharia.com.br

EQUIPE PERMANENTE

Coordenadora Geral, Técnico e Administrativo

Eng.^a Civil, M.Sc., Candice Schauffert Garcia

Engenheiro de Recursos Hídricos 1

Eng.^o Civil, M.Sc., Laertes Munhoz da Cunha

Engenheiro de Recursos Hídricos 2

Eng.^a Civil, M.Sc., Márian da Costa Rohn

Coordenadora Executiva

Eng.^a Ambiental, Esp., Andréia Pedroso

Técnica em Sistemas de Informações Geográficas

Geógrafa Karine Krunn

Auxiliar Administrativo

Veridiana Dias da Cruz

EQUIPE COMPLEMENTAR

Físico, Dr., José Eduardo Gonçalves

Oceanógrafa, M.Sc., Tábata Fernanda Vilas Boas de Miranda

Engenheiro Ambiental, M.Sc., Hugo de Oliveira Fagundes

Engenheira Ambiental, Renata Barão Rossoni

Geógrafo, Dr., Rodrigo Marcos Souza

Eng.^a Sanitarista e Ambiental, Kássia Regina Bazzo

DADOS CONTRATUAIS

Contrato nº 22/2018 de 17 de setembro de 2018

Ordem de Início dos Serviços nº CT-0290 de 13/11/2017.

Processo administrativo eletrônico nº 18/0500-0000570-8.

Partes: Estado do Rio Grande do Sul, por intermédio da Secretaria de Meio Ambiente e Infraestrutura, e RHA Engenharia e Consultoria SS Ltda.

Objeto: Contratação de serviços de empresa especializada para prestação de serviços de Estudo Hidrossedimentológico do Lago Guaíba.

Vigência: 06 meses a partir da data definida na Ordem de Início dos Serviços (com aditamento de prazo de 06 meses).

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. LOCALIZAÇÃO ÁREA DE ESTUDO	11
FIGURA 2. MAPA HIPSobatimétrico DO LAGO GUAÍBA E ÁREAS ADJACENTES	12
FIGURA 3. SEGMENTAÇÃO DO LAGO GUAÍBA COM BASE NO PADRÃO DE CIRCULAÇÃO DA ÁGUA.....	13
FIGURA 4. AGRUPAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE ACORDO COM A ENERGIA DEPOSICIONAL DO SISTEMA (adaptado de ECOPLAN, 2016).....	14
FIGURA 5. VARIAÇÃO SAZONAL DA CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO – LAGO GUAÍBA E LAGUNA DOS PATOS – 2008 a 2015..	15
FIGURA 6. MAPA DE ISÓPACA LAGO GUAÍBA	16
FIGURA 7. MAPA DE AMBIENTES DEPOSICIONAIS	17
FIGURA 8. DEFINIÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA (ζ), PROFUNDIDADE (h) E PROFUNDIDADE TOTAL (H)	19
FIGURA 9. EXEMPLO DE ORGANIZAÇÃO DAS CAMADAS EM COORDENADAS σ e COORDENADAS z	21
FIGURA 10. FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DAS ETAPAS DE EXECUÇÃO DO MÓDULO II E III.....	26
FIGURA 11. LINHA DE COSTA DO LAGO GUAÍBA.....	28
FIGURA 12. GRADE NUMÉRICA GERADA PARA A ÁREA DE INTERESSE COM O AUXÍLIO DO MODELO NUMÉRICO DELFT3D	28
FIGURA 13. LOCALIZAÇÃO PONTOS SECOS	29
FIGURA 14. DADOS BATIMÉTRICOS.....	30
FIGURA 15. BATIMETRIA.....	31
FIGURA 16. RESOLUÇÃO DA GRADE.....	32
FIGURA 17. LOCALIZAÇÃO PONTOS DE OBSERVAÇÃO	33
FIGURA 18. LOCALIZAÇÃO ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS.....	35
FIGURA 19. LOCALIZAÇÃO DOS CONTORNOS DO MODELO DO LAGO GUAÍBA	36
FIGURA 20. SÉRIE TEMPORAL DE NÍVEL DE ÁGUA ESTAÇÃO ARAMBARÉ (87540000) – 01/10/1984 A 31/12/2015.....	37
FIGURA 21. LOCALIZAÇÃO DADOS DE SEDIMENTOS DE FUNDO DISPONÍVEIS – COLETA 1: SCOTTÁ (2018), COLETA 2: ANDRADE (2018)	38
FIGURA 22. DISTRIBUIÇÃO DOS COEFICIENTE DE MANNING NA GRADE	41
FIGURA 23. MAPA DE RUGOSIDADE INTERPOLADO PARA A GRADE – MANNING	42
FIGURA 24. LOCALIZAÇÃO ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS - ANA.....	43
FIGURA 25. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO BAIXO JACUÍ - CALIBRAÇÃO	46
FIGURA 26. SÉRIE TEMPORAL DE NÍVEL DE ÁGUA – CONTORNO LAGUNA DOS PATOS - CALIBRAÇÃO.....	46
FIGURA 27. SÉRIE TEMPORAL NÍVEL DE ÁGUA OBSERVADO x SIMULADO – ESTAÇÃO CRISTAL – 1985.....	48
FIGURA 28. SÉRIE TEMPORAL NÍVEL DE ÁGUA OBSERVADO x SIMULADO – ESTAÇÃO IPANEMA - 1990.....	49
FIGURA 29. SÉRIE TEMPORAL NÍVEL DE ÁGUA OBSERVADO x SIMULADO – ESTAÇÃO PONTA DOS COATIS - 2004	50
FIGURA 30. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE	51
FIGURA 31. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE	52
FIGURA 32. MAPA DE EROSIÃO / SEDIMENTAÇÃO – PERÍODO DE CALIBRAÇÃO.....	53
FIGURA 33. SÉRIE TEMPORAL DE EROSIÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO AREIA_G – ALTA DEPOSIÇÃO	54
FIGURA 34. SÉRIE TEMPORAL DE EROSIÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO LAMA_3	55

FIGURA 35. SÉRIE TEMPORAL DE EROÇÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO DEPOSIÇÃO.....	55
FIGURA 36. SÉRIE TEMPORAL DE EROÇÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO AREIA_G_3 – ALTA EROÇÃO.....	56
FIGURA 37. SÉRIE TEMPORAL DE EROÇÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO EROÇÃO.....	56
FIGURA 38. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO BAIXO JACUÍ - VALIDAÇÃO	58
FIGURA 39. SÉRIE TEMPORAL DE NÍVEL DE ÁGUA – CONTORNO LAGUNA DOS PATOS - VALIDAÇÃO	58
FIGURA 40. SÉRIE TEMPORAL NÍVEL DE ÁGUA OBSERVADO x SIMULADO – ESTAÇÃO CRISTAL - 2009	59
FIGURA 41. SÉRIE TEMPORAL NÍVEL DE ÁGUA OBSERVADO x SIMULADO – ESTAÇÃO IPANEMA - 2010.....	60
FIGURA 42. SÉRIE TEMPORAL NÍVEL DE ÁGUA OBSERVADO x SIMULADO – ESTAÇÃO PONTA DOS COATIS - 2011	61
FIGURA 43. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE	62
FIGURA 44. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE	63
FIGURA 45. MAPA DE EROÇÃO / SEDIMENTAÇÃO – PERÍODO DE VALIDAÇÃO.....	65
FIGURA 46. SÉRIE TEMPORAL DE EROÇÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO AREIA_G – ALTA DEPOSIÇÃO	66
FIGURA 47. SÉRIE TEMPORAL DE EROÇÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO LAMA_3	66
FIGURA 48. SÉRIE TEMPORAL DE EROÇÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO DEPOSIÇÃO.....	67
FIGURA 49. SÉRIE TEMPORAL DE EROÇÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO AREIA_G_3 – ALTA EROÇÃO.....	67
FIGURA 50. SÉRIE TEMPORAL DE EROÇÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO EROÇÃO.....	68
FIGURA 51. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA DO ANO DE 2006 – PERÍODO DE BAIXA VAZÃO.....	69
FIGURA 52. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA DO ANO DE 2015 – PERÍODO DE ALTA VAZÃO.....	69
FIGURA 53. MAPA DE EROÇÃO / DEPOSIÇÃO – PERÍODO DE BAIXA DESCARGA LÍQUIDA	71
FIGURA 54. MAPA DE EROÇÃO / DEPOSIÇÃO – PERÍODO DE ALTA DESCARGA LÍQUIDA	72
FIGURA 55. TRANSPORTE EM SUSPENSÃO DE SEDIMENTO COESIVOS (SILTE E ARGILA) VAZÃO MÁXIMA DO PERÍODO = 26139,39 m ³ /s	74
FIGURA 56. TRANSPORTE EM SUSPENSÃO DE SEDIMENTO NÃO-COESIVOS (AREIA MÉDIA A GROSSA).....	75
FIGURA 57. TRANSPORTE DE FUNDO DE SEDIMENTO NÃO-COESIVOS (AREIA).....	76
FIGURA 58. TRANSPORTE EM SUSPENSÃO DE SEDIMENTO COESIVOS (SILTE E ARGILA) - DESCARGA LÍQUIDA = 1070,65 m ³ /s	77
FIGURA 59. TRANSPORTE EM SUSPENSÃO DE SEDIMENTO NÃO-COESIVOS (AREIA).....	78
FIGURA 60. TRANSPORTE DE FUNDO DE SEDIMENTO NÃO-COESIVOS (AREIA).....	79
FIGURA 61. TESTE TRANSPORTE EM SUSPENSÃO DE AREIA – DESCARGA LÍQUIDA = 26139,39 m ³ /s – AREIA FINA - DESCARGA DE AREIA = 275913,1 ton	80

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. EQUAÇÕES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS CONSIDERADAS NO MODELO DELFT3D	24
TABELA 2. RELAÇÃO DE INFORMAÇÕES DISPONÍVEIS POR PONTO DE OBSERVAÇÃO	33
TABELA 3. ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS	34
TABELA 4. MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS DA CLIMATOLOGIA DA INTENSIDADE DO VENTO (m/s) DO PERÍODO DE 04/12/2006 A 20/11/2018 – ESTAÇÃO PORTO ALEGRE – RS	34
TABELA 5. DADOS SEDIMENTO DE FUNDO – RUGOSIDADE	39
TABELA 6. LISTA DE ESTAÇÕES DA ANA COM RÉGUAS LINIMÉTRICAS NO TRECHO MODELADO	43
TABELA 7. PARÂMETROS UTILIZADOS MODELO HIDRODINÂMICO DO LAGO GUAÍBA	44
TABELA 8. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DA SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO BAIXO JACUÍ - CALIBRAÇÃO	47
TABELA 9. VALORES MÁXIMO, MÉDIO E MÍNIMO DA SÉRIE TEMPORAL DE NÍVEL – CONTORNO LAGUNA DOS PATOS - CALIBRAÇÃO	47
TABELA 10. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS, COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E COEFICIENTE NASH – ESTAÇÃO CRISTAL – PERÍODO DE CALIBRAÇÃO	48
TABELA 11. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS, COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E COEFICIENTE NASH – ESTAÇÃO IPANEMA – PERÍODO DE CALIBRAÇÃO	49
TABELA 12. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS, COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E COEFICIENTE NASH – ESTAÇÃO PONTA DOS COATIS - PERÍODO DE CALIBRAÇÃO	50
TABELA 13. TAXAS DE EROSIÃO / DEPOSIÇÃO POR PONTO – PERÍODO DE CALIBRAÇÃO	57
TABELA 14. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DA SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO BAIXO JACUÍ - VALIDAÇÃO.....	58
TABELA 15. VALORES MÁXIMO, MÉDIO E MÍNIMO DA SÉRIE TEMPORAL DE NÍVEL – CONTORNO LAGUNA DOS PATOS - VALIDAÇÃO	59
TABELA 16. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS, COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E COEFICIENTE NASH – ESTAÇÃO CRISTAL – PERÍODO TOTAL DE VALIDAÇÃO	60
TABELA 17. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS, COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E COEFICIENTE NASH – ESTAÇÃO IPANEMA - PERÍODO TOTAL DE VALIDAÇÃO	60
TABELA 18. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS, COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E COEFICIENTE NASH – ESTAÇÃO PONTA DOS COATIS - PERÍODO TOTAL DE VALIDAÇÃO	61
TABELA 19. TAXAS DE EROSIÃO / DEPOSIÇÃO POR PONTO – PERÍODO DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	68
TABELA 20. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DA SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – ANO DE 2006 - PERÍODO DE BAIXA VAZÃO	69
TABELA 21. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DA SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – ANO DE 2015 - PERÍODO DE ALTA VAZÃO	70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO LAGO GUAÍBA	11
3	MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D	18
3.1	DELFT3D – FLOW	18
3.2	DELFT3D – SED	21
3.3	DELFT3D – WAVE	24
4	MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DO LAGO GUAÍBA - MÓDULO III	25
4.1	IMPLEMENTAÇÃO DO DELFT3D	26
4.1.1	GRADE NUMÉRICA	27
4.1.2	INTERPOLAÇÃO BATIMÉTRICA	29
4.1.3	PROPRIEDADES DA GRADE NUMÉRICA	31
4.1.4	FORÇANTE METEOROLÓGICA	34
4.1.5	CONDIÇÕES DE CONTORNO	35
4.2	DADOS OBSERVADOS PARA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	42
4.3	PARÂMETROS UTILIZADOS	44
5	CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DO LAGO GUAÍBA	45
5.1	DADOS DE ENTRADA - CALIBRAÇÃO	45
5.2	RESULTADOS CALIBRAÇÃO	47
6	VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DO LAGO GUAÍBA	57
6.1	DADOS DE ENTRADA – VALIDAÇÃO	57
6.2	RESULTADOS VALIDAÇÃO	59
7	ANÁLISE DAS TAXAS DE EROÇÃO E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS EM CONDIÇÕES DE ALTA E BAIXA DESCARGA LÍQUIDA	68
8	ANÁLISE DE DEPOSIÇÃO/TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COESIVOS E NÃO-COESIVOS	73
9	CONCLUSÕES	81
10	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

O comportamento hidrodinâmico de um corpo de água desempenha um papel de destaque nos ecossistemas aquáticos, influenciando diretamente a distribuição espacial da biota aquática, bem como a dinâmica de nutrientes, poluentes e sedimentos (DA PAZ et al., 2005). Com relação ao balanço de transporte de sedimentos, este se caracteriza por ser um fenômeno complexo, que depende de processos erosivos que ocorrem nas vertentes da bacia e no leito e margens dos rios, que fornecem material, e este material, por sua vez, depende da energia do fluxo para ser transportado. A combinação dessas variáveis, fornecimento de material e energia do fluxo, resulta em uma dinâmica sedimentar com grande variação no tempo e no espaço (SANTOS et al., 2001).

A circulação da água é determinante na dinâmica de deposição e erosão de sedimentos no fundo do corpo de água e está diretamente relacionada à velocidade do escoamento, refletindo em áreas com diferentes granulometrias e, portanto, com potenciais distintos para mineração (DA PAZ et al., 2005).

Neste sentido, a utilização de modelos numéricos para a geração de simulações hidrodinâmicas tem possibilitado substancial aumento na capacidade de análise de corpos de água. Os modelos integram e extrapolam informações a partir de medições, favorecem o preenchimento de lacunas deixadas por falhas nos registros de campo e descrevem os processos hidrossedimentológicos, permitindo uma análise com maiores detalhes dessas regiões (MIRANDA, 2016). Além disso, é uma importante ferramenta de apoio para análises sobre o estado de degradação dos ambientes e fundamental para o planejamento dos aproveitamentos dos recursos hídricos de uma região (SIVIERO E COIADO, 1999).

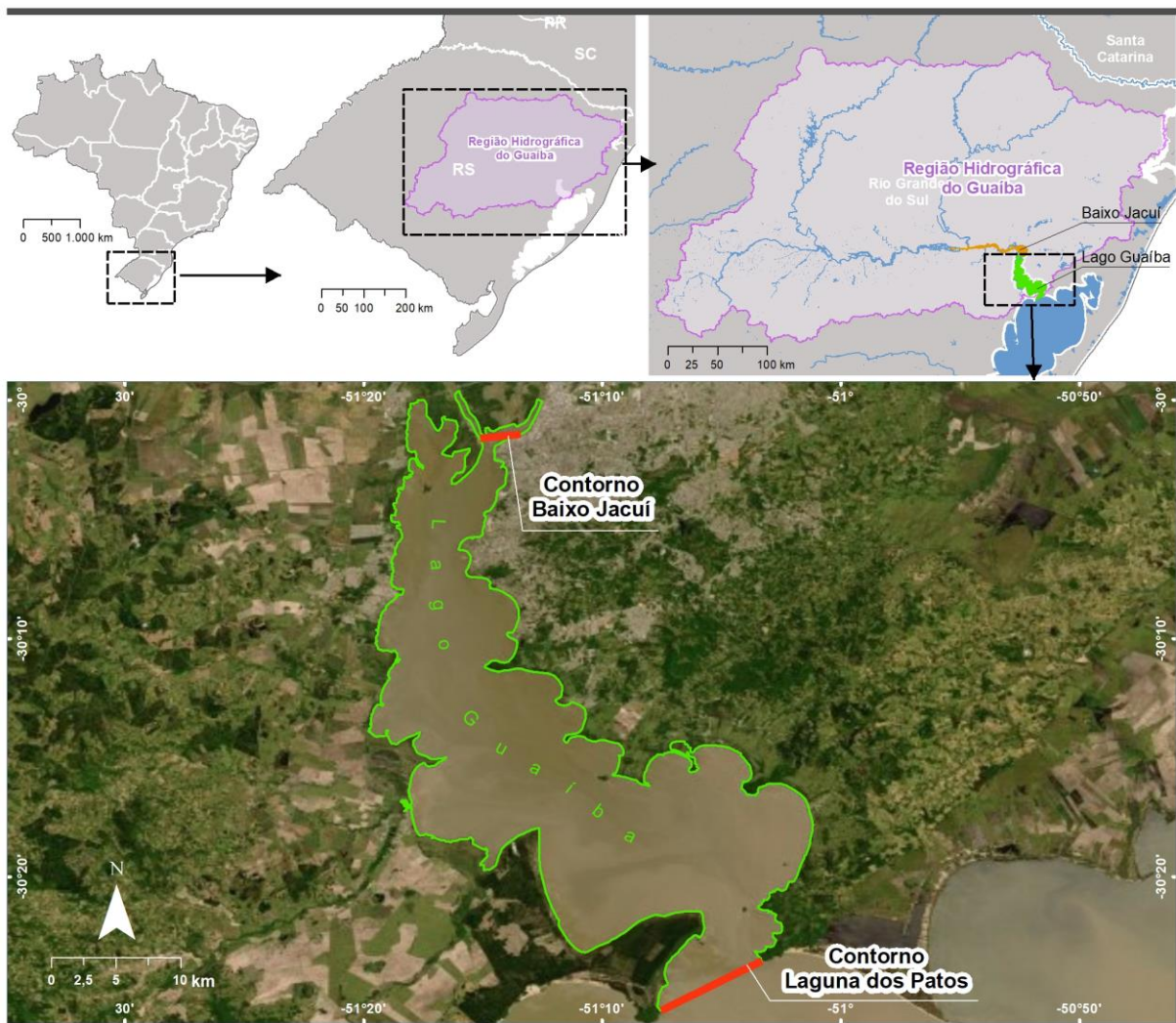
O objetivo principal do presente trabalho foi realizar um estudo capaz de simular o regime de fluxos de vazão e sedimentos no Lago Guaíba, simulando a dinâmica de erosão, deposição e ressuspensão de sedimentos. Para isto, foi realizada a modelagem numérica, com o auxílio do modelo hidrodinâmico Delft3D, na área de interesse. Os dados de entrada (descarga líquida e descarga sólida) são provenientes da modelagem hidrodinâmica realizada no trecho final do Baixo Jacuí (Módulo II). Dados de velocidade e direção do vento, nível d'água da Laguna dos Patos, altura, período e direção de ondas, batimetria e tipo de sedimento de fundo também são utilizados como condições de contorno do modelo.

Esta atividade fornece as zonas de tendência erosiva e deposicional, a estimativa de tempo e volumes de reabastecimento do material removido de áreas de interesse do Lago Guaíba.

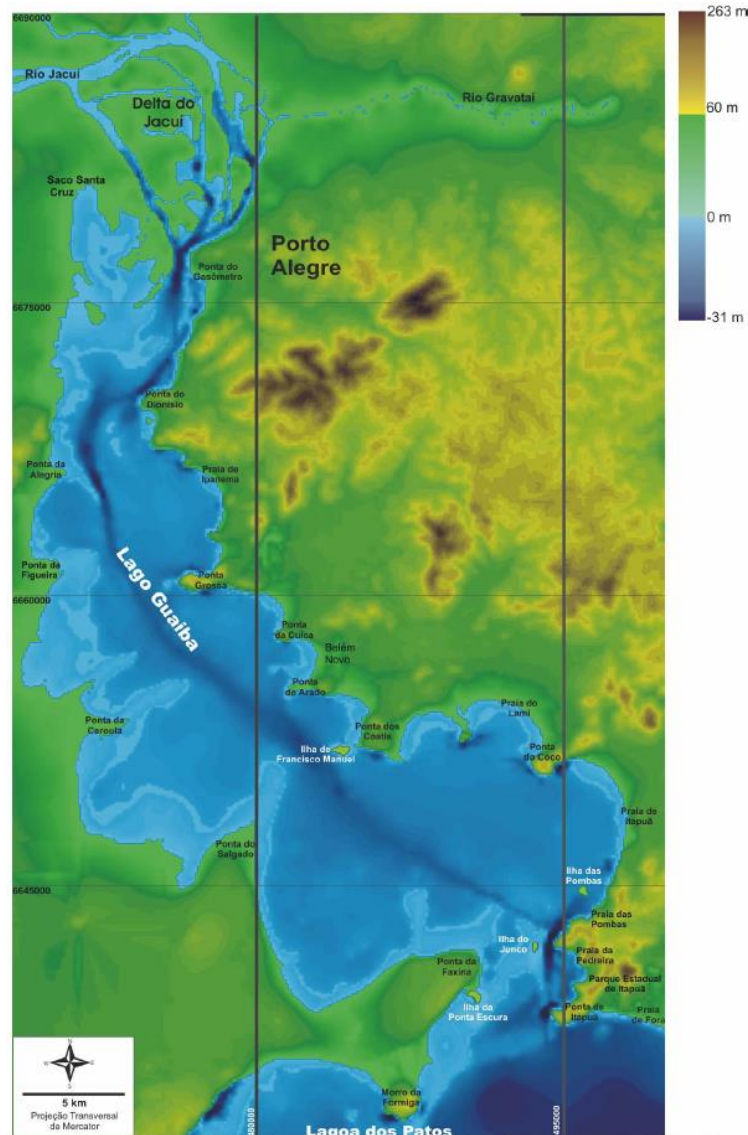
2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO LAGO GUAÍBA

O Lago Guaíba ($29^{\circ}55' - 30^{\circ}24' S$; $51^{\circ}01' - 51^{\circ}20' W$), do Tupi-guarani *baía de todas as águas*, (NICOLODI, 2007) localiza-se na região metropolitana de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul, sendo o principal manancial responsável pelo abastecimento hídrico da região (ANDRADE, 2018). A FIGURA 1 apresenta a localização do Lago Guaíba.

FIGURA 1. LOCALIZAÇÃO ÁREA DE ESTUDO



Desde o delta do Rio Jacuí, onde desembocam os rios Jacuí, Caí, Sinos e Gravataí, até o seu encontro com a Laguna dos Patos, o Lago Guaíba possui 436 km² de superfície líquida espalhados por 50 km de extensão e 19 km de largura máxima. A profundidade média é de 2 m, atingindo o valor máximo próximo à Ilha do Junco, com 31 m (FIGURA 2) (NICOLODI, 2007). O Lago Guaíba responde por aproximadamente 61% da entrada de água na Laguna dos Patos, apresentando uma descarga média de 1500 m³/s (VAZ et al., 2006).

FIGURA 2. MAPA HIPSOBATIMÉTRICO DO LAGO GUAÍBA E ÁREAS ADJACENTES

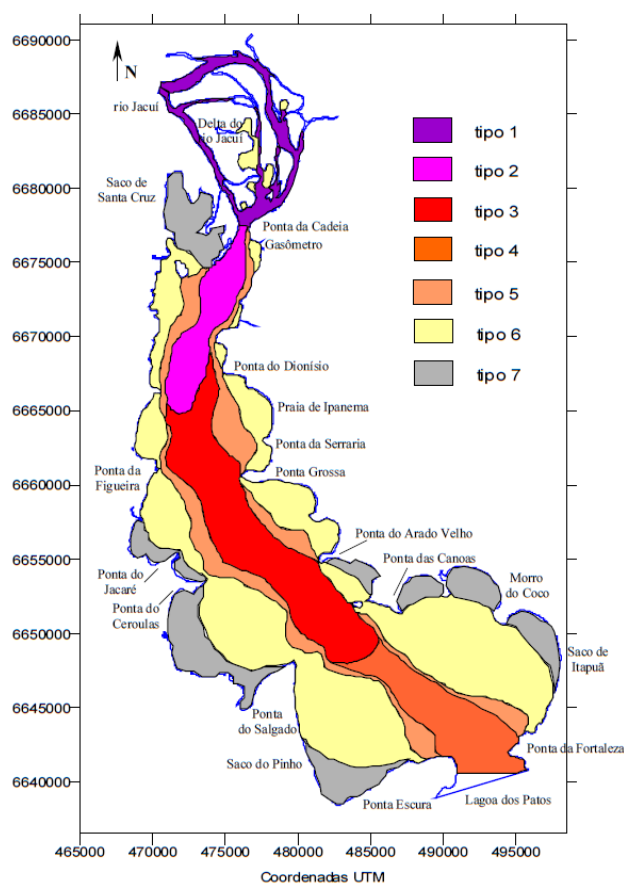
FONTE: NICOLODI (2017)

PAZ e colaboradores (2005) utilizaram um modelo hidrodinâmico bidimensional para simular os fluxos do Lago Guaíba, com o intuito de identificar os padrões de circulação da água e estabelecer o seu zoneamento hidrodinâmico. Segundo os autores, os resultados possibilitaram classificar o Lago Guaíba em sete tipos de áreas que apresentaram respostas ou comportamentos hidrodinâmicos semelhantes (FIGURA 3), descritos a seguir:

- Tipo 1: Afluentes formadores do Guaíba. Apresenta velocidade do escoamento em torno de 0,1 m/s.
- Tipo 2: Região de desembocadura do escoamento afluente do Delta do Jacuí. Apresenta as velocidades do escoamento mais elevadas de todo o lago.

- Tipo 3: Prolongamento da região 2, mantendo-se pelo centro do lago (canal de navegação), com leve inflexão ao final. Apresenta velocidades altas, porém inferiores às da região 2.
- Tipo 4: Continuação do canal de navegação, até a Laguna dos Patos. Apresenta velocidades inferiores as encontradas no Tipo 3.
- Tipo 5: Adjacências do canal de navegação, estendendo-se por todo canal, onde ocorre a mudança significativa na velocidade do escoamento em relação ao canal.
- Tipo 6: Áreas de baixas velocidades (em torno de 0,03 m/s) que ocupam a maior região do lago, situando-se entre o canal de navegação e as margens. O escoamento flui paralelo à margem do lago, seguindo sua forma.
- Tipo 7: Zonas de estagnação dos fluxos (quando comparadas as outras regiões) apresentam velocidades inferiores a 0,01 m/s. Devido à própria configuração da margem e à presença de pontas, como as Pontas do Ceroulas e do Salgado, os menores fluxos ocorrem nestas áreas abrigadas.

FIGURA 3. SEGMENTAÇÃO DO LAGO GUAÍBA COM BASE NO PADRÃO DE CIRCULAÇÃO DA ÁGUA

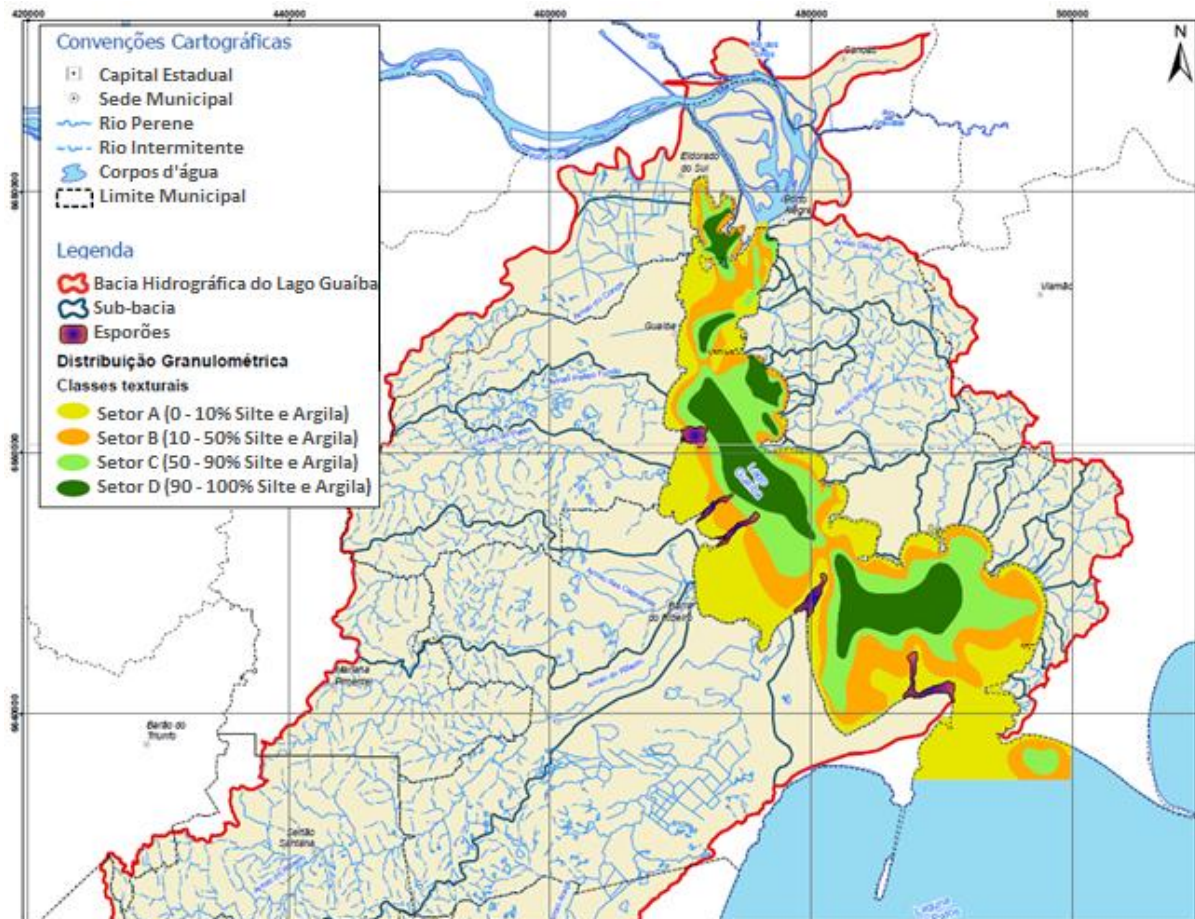


FONTE: PAZ et al. (2005)

Scottá (2018) verificou a predominância das correntes presentes no Lago Guaíba de Norte para Sul, sugerindo declividade do canal. Este fato foi confirmado pelas formas de fundo encontradas no lago e indicou um comportamento fluvial do corpo de água. Apesar de o Guaíba ser classificado oficialmente como lago, o autor conclui que esse sistema possui predomínio de comportamento de rio.

Com relação aos sedimentos, o estudo realizado por Bachi e colaboradores (2000) permitiu o zoneamento dos sedimentos do leito do lago em quatro setores, A, B, C e D, tendo o conteúdo de areia contido para cada setor em: 90 a 100%; 50 a 90%, 10 a 50% e 0 a 10%, respectivamente. Este zoneamento está apresentado na FIGURA 4, adaptado do Plano de Bacia Hidrográfica do Lago Guaíba (ECOPLAN, 2016). Segundo o estudo, há uma maior deposição de silte, argila e matéria orgânica a partir da isóbata de 3 m, sendo o fundo arenoso na linha costeira.

FIGURA 4. AGRUPAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE ACORDO COM A ENERGIA DEPOSICIONAL DO SISTEMA (adaptado de ECOPLAN, 2016)

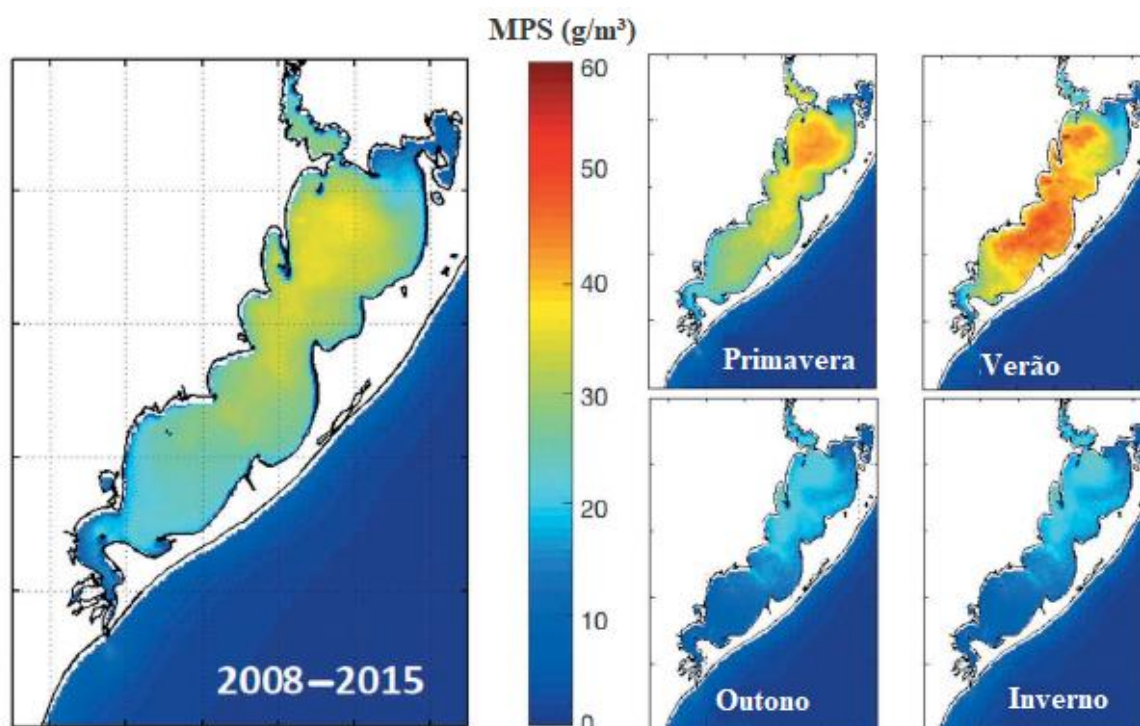


FONTE: MODIFICADO DE BACHI et al. (2000); ECOPLAN (2016)

A descarga de sedimentos do Lago Guaíba para a Laguna dos Patos é consistida basicamente por silte e argila (TOLDO, 1994). Tavora e colaboradores (2019) analisaram a variação sazonal (de 2008 a 2015) da concentração média de material particulado em suspensão (MPS) que

desagua na Laguna dos Patos. A FIGURA 5 apresenta a média de MPS na primavera, verão, outono e inverno. A análise das imagens sugere que águas altamente turvas são formadas durante a primavera no Lago Guaíba e dispersam-se ao sul ao longo da laguna, diminuindo gradativamente com a distância. No outono e inverno a pluma de MPS concentra-se no Lago Guaíba e aos seus arredores. As águas apresentam maior turbidez nos meses de verão, meses que também apresentam maior pluviosidade.

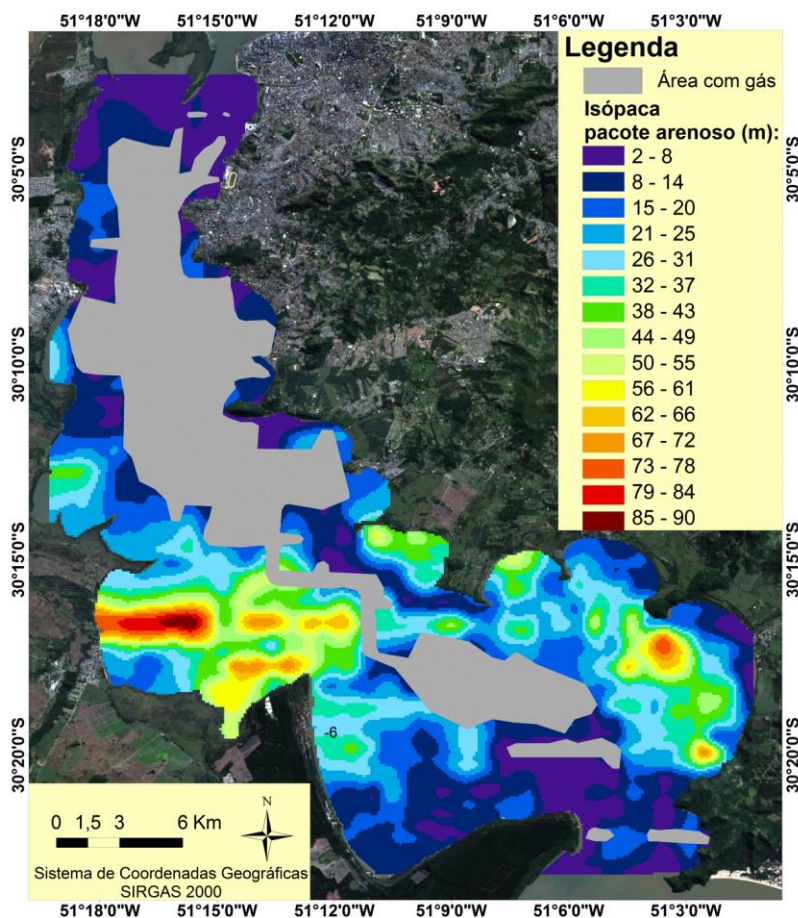
FIGURA 5. VARIAÇÃO SAZONAL DA CONCENTRAÇÃO MÉDIA DE MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO – LAGO GUAÍBA E LAGUNA DOS PATOS – 2008 a 2015



FONTE: MODIFICADO DE TAVORA et al. (2019)

O Relatório do Levantamento Geofísico com Sísmica de Alta Resolução na Área do Lago Guaíba – RS (Nº01.HID.021/18-RE.001- R0), realizado por Belov (2019), contrato nº 18/2018, analisa a espessura do pacote sedimentar na região. A FIGURA 6 apresenta o mapa de isópacas do Lago Guaíba. As espessuras variam de 2 a 90 m, estando as maiores espessuras concentradas principalmente na região centro-sudoeste (variando de 26 a 90 m). As menores espessuras (2-8 m e 8-14 m) foram encontradas nas margens da região norte, margens do extremo sul e sudeste. Áreas com a presença de gases nos sedimentos, o que causa impenetrabilidade acústica, impossibilitaram a obtenção de informações sobre o pacote sedimentar (BELOV, 2019).

FIGURA 6. MAPA DE ISÓPACA LAGO GUAÍBA

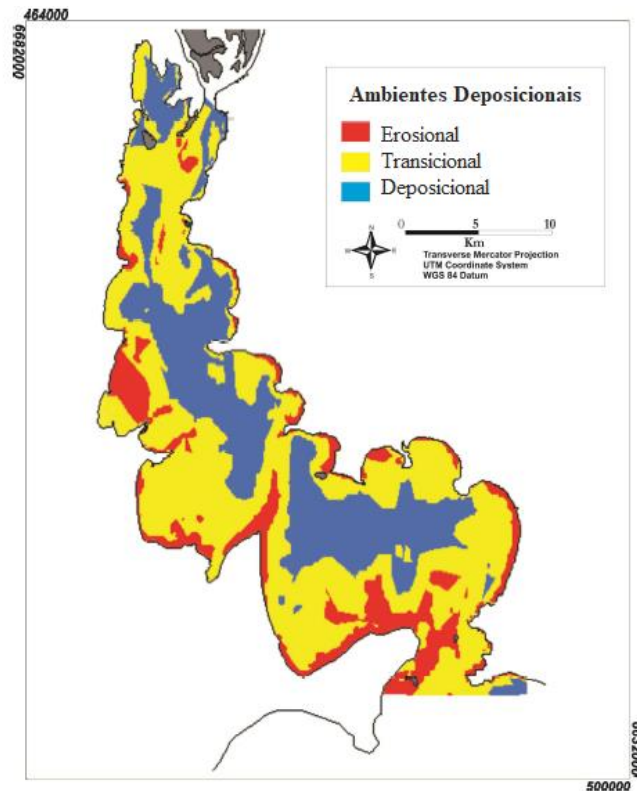


FONTE: BELOV (2019)

Nicolodi, Toldo e Farina (2013) analisaram as características das ondas incidentes no Lago Guaíba e suas relações com a ressuspensão de sedimentos de fundo. De maneira geral, o padrão de ondas segue as condições de vento (intensidade e direção) atuantes no lago, atingindo valores máximos de altura de ondas aproximadamente 1 ou 2 horas após a velocidade de pico dos ventos. As alturas de ondas variaram entre 0,05 e 0,55 m, com as alturas mais significativas ocorrendo quando ventos do quadrante S e SE e com velocidades superiores a 7 m/s atingem o Lago Guaíba. Os períodos das ondas variaram entre 0,8 e 1,8 segundos. A geometria e a geomorfologia do lago também são fatores determinantes no tamanho das ondas, principalmente em locais onde há a presença de cordões de areias, que reduzem a energia das ondas, resultando em menores alturas de ondas.

Unindo informações sobre a hidrodinâmica, padrões de ondas e a dinâmica sedimentar do Lago Guaíba, Nicolodi e colaboradores (2013) ainda classificaram os ambientes deposicionais e erosionais do lago. A FIGURA 7 apresenta o mapa com as regiões, classificadas em três ambientes: Fundo Depositional, Fundo Transicional e Fundo Erosional. Segundo os autores, os ambientes possuem forte relação com a batimetria do lago.

FIGURA 7. MAPA DE AMBIENTES DEPOSICIONAIS



FONTE: MODIFICADO DE NICOLODI (2013)

O ambiente deposicional é predominante no domínio (51%), delimitando áreas com baixa energia, o que favorece a deposição de sedimentos finos, que não são ressuspensos, os quais estão depositados nas regiões mais profundas e no canal principal. O fundo transicional, por sua vez, abrange 41% da área do lago e representa um ambiente de baixa energia, na maior parte do tempo, com substrato de argila e areia, refletindo a transição entre as áreas de baixa e alta energia. Os sedimentos desta região podem ser remobilizados em determinadas situações de erosão associados a condições de ondas geradas por ventos com velocidades iguais ou superiores a 11 m/s. O ambiente erosional representa apenas 8% da área do lago, sendo o fundo composto predominantemente por areia, uma vez que os sedimentos finos são constantemente remobilizados e reinseridos na coluna d'água, devido a ação das ondas.

O Lago Guaíba pode ser considerado como um grande receptor de sedimentos, uma vez que as áreas deposicionais são mais extensas quando comparadas com as áreas erosionais. Porém, os processos de erosão ocorrem, principalmente, devido à ressuspensão de sedimentos, forçados por ondas de baixa altura e frequência, geralmente em ambientes com profundidades inferiores a 1,5 m (NICOLODI et al., 2013).

3 MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D

O modelo hidrodinâmico Delft3D, desenvolvido pela Deltares, Instituto de Pesquisa Holandês, é composto por um conjunto de programas (módulos), com capacidade de simulação de escoamentos de massas de águas superficiais. Possui uma estrutura flexível que simula fluxos em duas ou três dimensões (2D ou 3D), assim como ondas, qualidade da água, ecologia, transporte de sedimento e morfologia do fundo, com a capacidade de interação entre estes processos.

Os módulos que compõem o Delft3D são: FLOW (Hidrodinâmico); WAVE (Ondas); SED (transporte de sedimentos); MOR (Morfodinâmica); WAQ (Qualidade de água); PART (Traçadores); ECO (Ecologia) e CHEM (Química). Esses módulos possuem ferramentas de pré-processamento, processamento e pós-processamento, o que facilita o trabalho de implementação de modelos para uma região específica (HYDRAULICS, 2014). Sendo o módulo FLOW base para as análises depois de implementado o modelo hidrodinâmico é possível também utilizar os outros módulos para realizar diferentes estudos. Com exceção do módulo WAVE que necessita apenas da grade e das condições de contorno, sem necessidade do campo hidrodinâmico.

Para o propósito deste estudo serão utilizados os módulos FLOW, SED e WAVE, com o intuito de analisar o comportamento da hidrodinâmica fluvial, transporte de sedimentos e a dinâmica de erosão e deposição de sedimentos.

3.1 DELFT3D – FLOW

O Delft3D-FLOW foi desenvolvido para uma série de aplicações, podendo ser utilizado para: estudos de correntes geradas por marés (forçante barotrópica) e/ou ventos; gradientes horizontais de densidade gerados pelo balanço entre as águas doces dos rios e salgadas do oceano; transporte de materiais dissolvidos e poluentes, além de circulações em regiões costeiras, permitindo a simulação com barreiras físicas, como ilhas e obras costeiras.

O Delft3D-FLOW simula processos hidrodinâmicos resolvendo as equações de Navier-Stokes e da conservação da massa, para fluidos incompressíveis, além da equação do transporte de massa para cada constituinte de qualidade da água ou de processos nos sedimentos.

O módulo hidrodinâmico FLOW é capaz de realizar simulações em 2D ou 3D de fluxos instáveis, sendo usado para prever fluxos em áreas costeiras, estuários, rios, lagoas e lagos. Se o fluido é verticalmente homogêneo, é utilizado um modelo 2D, onde é considerada apenas uma camada do fluido. Já nas situações em que os campos de fluxos mostram variações significativas na vertical é utilizado um modelo 3D (HYDRAULICS, 2014).

O Delft3D aplica a chamada transformação da coordenada σ ou profundidade adimensional, de modo a tornar a dimensão vertical independente da profundidade e, desta forma, evitar que os elementos de grades interceptem a topografia do fundo (MIRANDA et al., 2002). A coordenada σ é definida como:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H}$$

Onde:

z → Coordenada vertical no espaço físico (m);

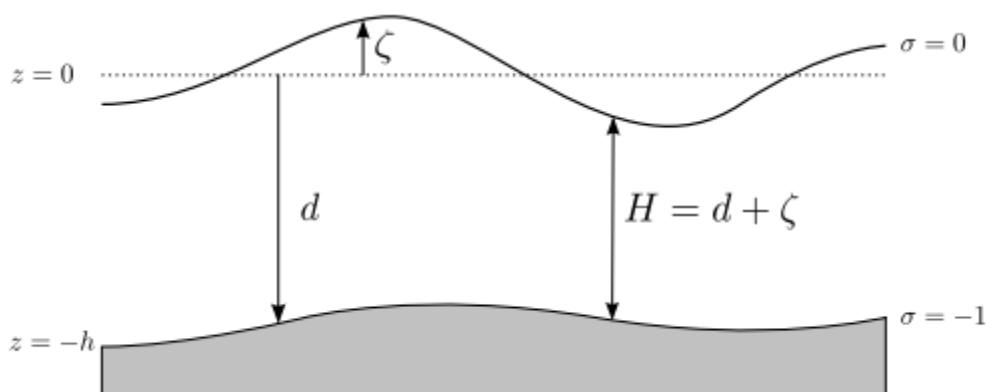
ζ → Elevação da superfície livre acima do plano de referência (m);

d → Profundidade da coluna d'água abaixo do plano de referência (m);

H → Profundidade total da coluna d'água (m).

Sendo considerado no fundo $\sigma = -1$; $z = -h$ e na superfície livre $\sigma = z = 0$ (FIGURA 8).

FIGURA 8. DEFINIÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA (ζ), PROFUNDIDADE (h) E PROFUNDIDADE TOTAL (H)



FONTE: HYDRAULICS (2014)

No sistema de coordenadas σ , o número de camadas no plano vertical é o mesmo em todos os locais, diferente da coordenadas Z , (FIGURA 9) e para cada camada um conjunto de equações de conservação é resolvido. Ou seja, o sistema de coordenadas σ , permite manter o número de camadas na vertical, não importando as variações da profundidade na coluna d'água no local.

As equações governantes para um fluido incompressível de superfície livre são relacionadas com as leis de conservação da física: Conservação da massa e conservação de *momentum*. Como já citado, as equações são derivadas do sistema de equações de Navier-Stokes para um fluido incompressível de superfície livre. As equações do movimento e da continuidade, integradas na vertical, são resolvidas levando em conta as aproximações para águas rasas de Boussinesq. Os campos

de velocidade e de elevação da superfície são obtidos pela solução da equação de Navier-Stokes abaixo e da continuidade (HYDRAULICS, 2014; BERNARDO, 2013; LOPES, 2010).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu_H \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu_V \frac{\partial u}{\partial z} \right]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu_H \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu_V \frac{\partial v}{\partial z} \right]$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho(x, y, z)g$$

Onde:

x, y, z → Coordenadas espaciais.

u, v, w → Componentes de velocidade nas direções x, y e z (m.s-1);

t → Tempo (s);

f → Parâmetro de Coriolis $f = 2\Omega \text{seno}\theta$, onde Ω é a taxa de rotação e θ a latitude;

g → Aceleração da gravidade (m/s²);

H → Altura da coluna d'água (m);

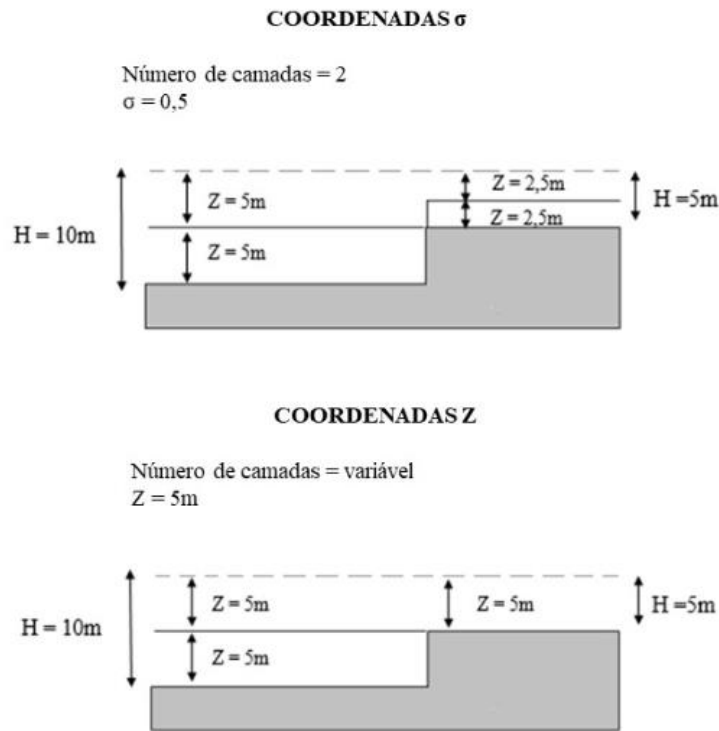
ρ → Densidade do fluido (kg.m-3);

P → Pressão hidrostática (N.m-1);

$\nu_H \nu_V$ → Viscosidade turbulenta na horizontal e na vertical, respectivamente.

As saídas deste módulo consistem, principalmente, do campo de corrente (temporal e espacialmente variável) e da elevação da superfície livre da água.

FIGURA 9. EXEMPLO DE ORGANIZAÇÃO DAS CAMADAS EM COORDENADAS σ E COORDENADAS Z



3.2 DELFT3D - SED

Para os cálculos de transporte de sedimentos, o modelo numérico analisa as características do leito, assim como a concentração de sedimentos em suspensão. Esses sedimentos podem ser coesivos (sedimentos contendo proporções de significativas de argilas, cuja propriedades eletromagnéticas fazem com que o sedimento se una. Ex.: lama), não-coesivos (Ex.: areia) ou a combinação de ambos.

A equação da advecção-difusão (balanço de massa), empregada no transporte de sedimentos, é representado no modelo pela equação abaixo (DELTARES, 2012).

$$\frac{\partial(d + \zeta)c}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \left\{ \frac{\partial[\sqrt{G\eta\eta}(d + \zeta)uc]}{\partial \xi} + \frac{\partial[\sqrt{G\xi\xi}(d + \zeta)vc]}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial wc}{\partial \sigma}$$

$$= \frac{(d + \zeta)}{\sqrt{G\xi\xi}\sqrt{G\eta\eta}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(D_H \frac{\sqrt{G\eta\eta}}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(D_H \frac{\sqrt{G\xi\xi}}{\sqrt{G\xi\xi}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) \right\} + \frac{1}{(d + \zeta)} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_V \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) - \lambda_d(d + \zeta)c + S_{fs}$$

Onde,

D_H → Coeficiente de difusão horizontal;

D_V → Coeficiente de difusão vertical;

λ_d → Primeira ordem do processo de deposição;

S_{fs} → Termo “fonte” e “sumidouro” por unidade de área, devido à entrada ou saída de fluxo, detalhado em (DELTARES, 2012).

O modelo considera que a velocidade de sedimentação sofre efeito por conta da concentração. Nesse tipo de sistema, a velocidade sedimentação W_s é determinada pela velocidade de queda, na mistura fluido/sedimento, em função da concentração de sedimentos (RIJN e WALSTRA, 2003). A equação abaixo mostra a relação considerada para um sedimento l :

$$W_s^{(l)} = 1 - \frac{c_s^{tot}}{c_{ref}} W_{s,0}^{(l)}$$

Onde,

c_{ref} → Concentração de referência (dado de entrada);

c_s^{tot} → Concentração total, a partir da massa total de sedimentos;

$W_{s,0}^{(l)}$ → Velocidade de sedimentação específica para a fração de sedimentos (l).

Os coeficientes de difusão turbulenta para o sedimento ($\varepsilon_{s,x}, \varepsilon_{s,y}, \varepsilon_{s,z}$) dependem das características do escoamento (nível de turbulência) e influência de ondulações no fundo (em decorrência de cisalhamento). Para cada uma das interfaces que delimitam as camadas, obtêm-se os coeficientes de viscosidade turbulenta, como resultado de um submodelo de turbulência fechado (RIJN e WALSTRA, 2003).

O Delft3D apresenta diferentes submodelos de turbulência. Nesse estudo será utilizado o submodelo, mais utilizado na literatura (SILVA, 2004), conhecido como modelo de turbulência $k - \varepsilon$. Utilizando o submodelo de turbulência $k - \varepsilon$, o coeficiente de difusão turbulenta para o sedimento (ε_s) pode ser obtido diretamente dos coeficientes de difusão turbulenta do fluido (ε_f) resultante do modelo de fechamento turbulento (DELTARES, 2012).

Os processos de erosão e sedimentação dependem do nível energético, o qual é uma função do volume de água e da descarga líquida. Quanto mais energético é o fluxo de água, maior a probabilidade de erodir o fundo e suas laterais. Em contrapartida, a perda parcial (ou temporária) de energia estimula a sedimentação de uma parcela do material em suspensão. Sedimentos coesivos e sedimentos não-coesivos apresentam comportamentos distintos para essas situações. Para frações de sedimentos coesivos, os fluxos entre a corpo d'água e o leito, são calculados conforme as formulações de Partheniades-Krone (DELTARES, 2012):

$$E^{(l)} = M^{(l)} S(\tau_{cw}, \tau_{cr,e}^{(l)}) \rightarrow \text{Fluxo Erosivo}$$

$$D^{(l)} = W_s^{(l)} c_b^l S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d}^{(l)}) \rightarrow \text{Fluxo de Deposição}$$

$$c_b^l = c^{(l)} \left(z = \frac{\Delta z_b}{z}, t \right) \rightarrow \text{Concentração média próxima a camada de fundo}$$

Onde,

$E^{(l)}$ → Fluxo erosivo (kg/m²/s), para fração de sedimento l ;

$M^{(l)}$ → Parâmetro erosivo (kg/m²/s), para fração de sedimento l , definido pelo usuário;

$S(\tau_{cw}, \tau_{cr,e}^{(l)})$ → Função do passo de erosão;

$D^{(l)}$ → Fluxo de deposição (kg/m²/s);

$W_s^{(l)}$ → Velocidade de sedimentação (m/s), para fração de sedimento l ;

c_b^l → Concentração média de sedimento próximo à camada de fundo, para fração de sedimento l ;

$S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d}^{(l)})$ → Função do passo de deposição.

τ_{cw} → Tensão média de cisalhamento no leito devido a correntes e ondas;

$\tau_{cr,e}^{(l)}$ → Tensão de cisalhamento crítica para erosão (N/m²), para fração de sedimento l ;

$\tau_{cr,d}^{(l)}$ → Tensão de cisalhamento crítica para deposição (N/m²), para fração de sedimento l .

Para frações de sedimentos não-coesivos a transferência de sedimentos entre o transporte pelo leito e o transporte em suspensão é modelada usando termos de “sumidouro” e “fonte”, que agem na camada próxima ao fundo, gerando uma camada de referência, denominada altura de referência de Van Rijn (DELTAIRES, 2012). As concentrações em camadas inferiores a essa são rapidamente ajustadas a da camada de referência.

A concentração no fundo da célula de referência sofre uma aproximação para conseguir quantificar a massa de sedimento que integrará o transporte por suspensão e a massa que será incorporada ao transporte pelo leito, mais detalhes podem ser vistos em Deltaires (2012).

O modelo de transporte de sedimento utilizado pelo sistema de modelagem Delft3D é capaz de calcular tanto o transporte de sedimento em suspensão quanto o transporte de fundo. Via de regra, a maior do transporte em suspensão é composta por sedimentos coesivos, somente uma pequena fração é composta por sedimentos não coesivos. Por outro lado, a maior parte do sedimento não coesivo é transportado pelo fundo.

A TABELA 1 apresenta o conjunto de equações disponíveis no Delft3D para efetuar a estimativa do transporte de sedimento, tanto em suspensão como no fundo. Observe que algumas das equações estimam somente o transporte total, não fazendo distinção entre transporte de fundo e em suspensão, e ainda observa-se que em alguns casos as equações não modelam o efeito das ondas, como é o caso das equações propostas por Engelund-Hansen (1967), Meyer-Peter-Muller (1948), General Formula, Van Rijn (1984), Ashida-Michiue(1974) e Wilcok-Crowe (2003).

As equações que que representam o transporte de sedimento sofreram avanços ao longo do tempo, a equação mais atual, apresentada na TABELA 1, é o modelo de transporte de sedimento de fundo em suspensão proposto por Van Rijn em 2007. O sistema de modelagem hidrodinâmica e de transporte de sedimentos Delft3D, utiliza como fórmula padrão a mais atual, ou seja, Van Rijn (2007), justamente por ser a formulação mais atual e que melhor representa o transporte de sedimento em corpos hídricos.

TABELA 1. EQUAÇÕES DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS CONSIDERADAS NO MODELO DELFT3D

Equação	Transporte de Fundo	Ondas
Van Rijn (2007)	Transporte de Fundo + suspensão	S
Van Rijs (1993)	Transporte Total	S
Engelund-Hansen (1967)	Transporte Total	N
Meyer-Peter-Muller (1948)	Transporte Total	N
General Formula	Transporte de Fundo + suspensão	N
Biker (1971)	Transporte de Fundo + suspensão	S
Van Rijn (1984)	Transporte de Fundo + suspensão	N
Soulsby/Van Rijn	Transporte de Fundo + suspensão	S
Soulsby	Transporte de Fundo + suspensão	S
Ashida-Michiue(1974)	Transporte Total	N
Wilcok-Crowe (2003)	Transporte de Fundo	N

FONTE: DELTARES (2012)

3.3 DELFT3D - WAVE

Para a análise de propagação de ondas, geradas por ventos e interações entre ondas, o Delft3D -WAVE pode ser utilizado. Para simular a ação de ondas em corpos de água, o modulo WAVE do Delft3D utiliza o modelo de ondas SWAN (Simulating WAVes Nearshore).

O modelo SWAN foi desenvolvido pela Universidade de Tecnologia de Delft na Holanda, possui domínio público e é classificado com um modelo padrão para modelagem de ondas próximas à costa e para estudos de proteção costeira. Devido a isto, a Deltares integrou o modelo SWAN no módulo de ondas (WAVE) do Delft3D (DELTARES, 2014).

O modelo SWAN calcula a evolução de ondas em ambientes com águas profundas, intermediárias e rasas. Avalia também a propagação das ondas devido à ação de correntes e da profundidade e representa os processos de geração de ondas por ventos, dissipação, atrito com o fundo, quebra de ondas devido à profundidade e interações não lineares entre ondas (DELTARES, 2014).

No SWAN as ondas são descritas com espectro de densidade bidimensional de ação das ondas, mesmo quando fenômenos não lineares dominam (por exemplo: na zona de *surf*). A razão para usar o espectro em condições altamente não lineares é que, mesmo em tais condições, é possível prever com precisão razoável a distribuição espectral das ondas (embora possa não ser suficiente para descrever as ondas estatisticamente). O espectro considerado no SWAN é o espectro de ação de densidade $N(\sigma, \theta)$ em vez do espectro de densidade de energia $E(\sigma, \theta)$, visto que na presença de correntes, a densidade de ação é conservada, enquanto a densidade de energia não. A frequência relativa σ (conforme observado em um referencial se movendo com a velocidade da corrente) e a direção de onda θ (direção normal a crista da onda de cada componente espectral) são as variáveis independentes. A densidade de ação é igual à densidade de energia dividida pela frequência relativa: $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$. Este espectro pode variar no tempo e no espaço (DELTARES, 2014).

No modelo SWAN, a evolução do espectro de ondas é descrita pela equação de balanço de ação espectral, que para as coordenadas cartesianas é:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma}$$

O primeiro termo, no lado esquerdo da equação, representa a taxa local de mudança de ação da densidade no tempo. O segundo e terceiro termos representam a propagação da ação em termos geográficos (com velocidades de propagação c_x e c_y nas direções x e y , respectivamente). O quarto termo representa as mudanças da frequência relativa devido às variações nas profundidades e correntes (com velocidade de propagação c_σ em σ). O quinto termo representa a refração induzida pela profundidade e pelas correntes (com velocidade de propagação c_θ em θ). O termo S ($= S(\sigma, \theta)$) no lado direito da equação é o termo fonte em termos de energia de densidade, representando os efeitos de geração, dissipação e interações onda-onda não lineares (DELTARES, 2014).

4 MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DO LAGO GUAÍBA - MÓDULO III

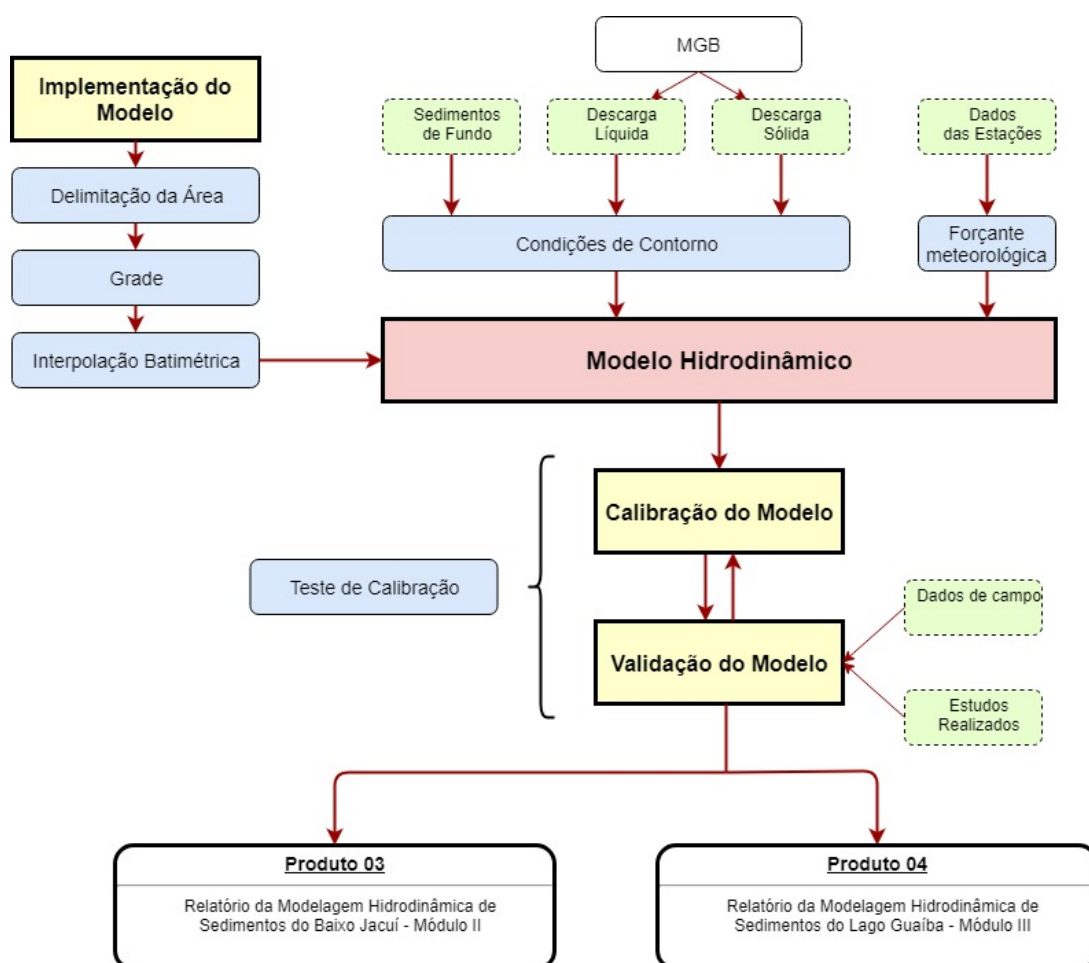
No Módulo III é proposto um modelo hidrodinâmico capaz de simular o regime de fluxos de vazão e sedimentos do Lago Guaíba, simulando a dinâmica de erosão, deposição e transporte de sedimentos. As séries de descargas líquidas e sólidas que foram usadas como condição de contorno de montante na modelagem hidrodinâmica do Lago Guaíba (Módulo III) são produtos do Módulo II.

O modelo do Módulo III determinará zonas de tendência erosiva e deposicional, e estimará o tempo e volumes de reabastecimento do material removido das áreas de interesse. Também deve ser capaz de simular a dinâmica de sedimentos que possam sofrer ressuspensão após extração de areia no

leito do lago. A dinâmica de sedimentos reinseridos na coluna de água será apresentada no Relatório de Cenários (P05).

Para a implementação do Módulo III, foram realizadas duas simulações com o modelo hidrodinâmico do Baixo Jacuí (Módulo II), com o intuito de gerar uma série temporal para calibração do Módulo III, de 01/01/1975 a 31/12/2005, e uma série temporal para a validação de 01/01/2006 a 31/12/2015. A FIGURA 10 apresenta o fluxograma simplificado das etapas de execução do Módulo II e III.

FIGURA 10. FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DAS ETAPAS DE EXECUÇÃO DO MÓDULO II E III



4.1 IMPLEMENTAÇÃO DO DELFT3D

A configuração de modelos numéricos, de forma geral, passa necessariamente por uma sequência de preparação de dados de entrada necessários para a sua implementação. Para o caso de modelos hidrodinâmicos, a sequência de informações necessárias a serem definidas são:

- 1- Delimitação do contorno da área de interesse;
- 2- Geração da grade numérica e interpolação dos pontos batimétricos;
- 3- Definição das forçantes a serem impostas;
- 4- Definição das condições de contorno

4.1.1 GRADE NUMÉRICA

O primeiro passo para a construção da grade numérica é a definição dos limites externos do domínio de interesse. Com base no contorno da área de estudo (linha de costa) (FIGURA 11) obtido da cartografia, atualizada em 2018, disponibilizada pela Secretaria de Meio Ambiente e Infraestrutura (SEMA/RS), em coordenadas UTM, foi criada uma grade retangular para o domínio de interesse. Após inserir informações como coordenadas UTM de início da grade, número de pontos nas direções X e Y, resolução dos pontos de grade e posição e orientação da malha, a grade numérica foi gerada automaticamente pelo programa (FIGURA 12). A posição, orientação e resolução da grade deve representar os canais principais de fluxo de água, o contorno de ilhas, a costa, como também ser representativa para o objetivo do estudo a ser realizado. Desta forma, são realizados experimentos até que se encontre uma grade, com resolução e número de pontos, ideal para a área modelada. Após a construção da grade, pontos secos são então inseridos para representar as porções de terra e ilhas existentes na área de estudo, e que são representativas na resolução da grade (FIGURA 13).

FIGURA 11. LINHA DE COSTA DO LAGO GUAÍBA



FONTE: Adaptado de SEMA/RS 2018

FIGURA 12. GRADE NUMÉRICA GERADA PARA A ÁREA DE INTERESSE COM O AUXÍLIO DO MODELO NUMÉRICO DELFT3D

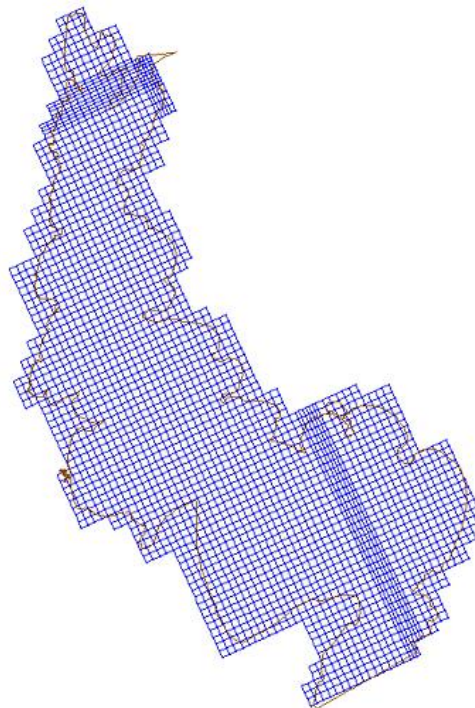
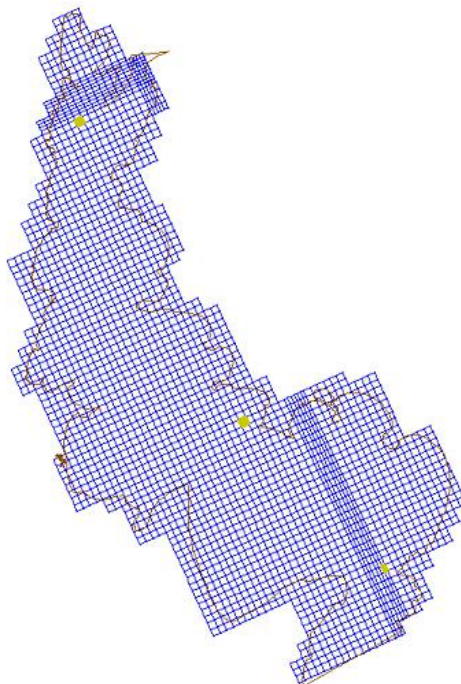


FIGURA 13. LOCALIZAÇÃO PONTOS SECOS

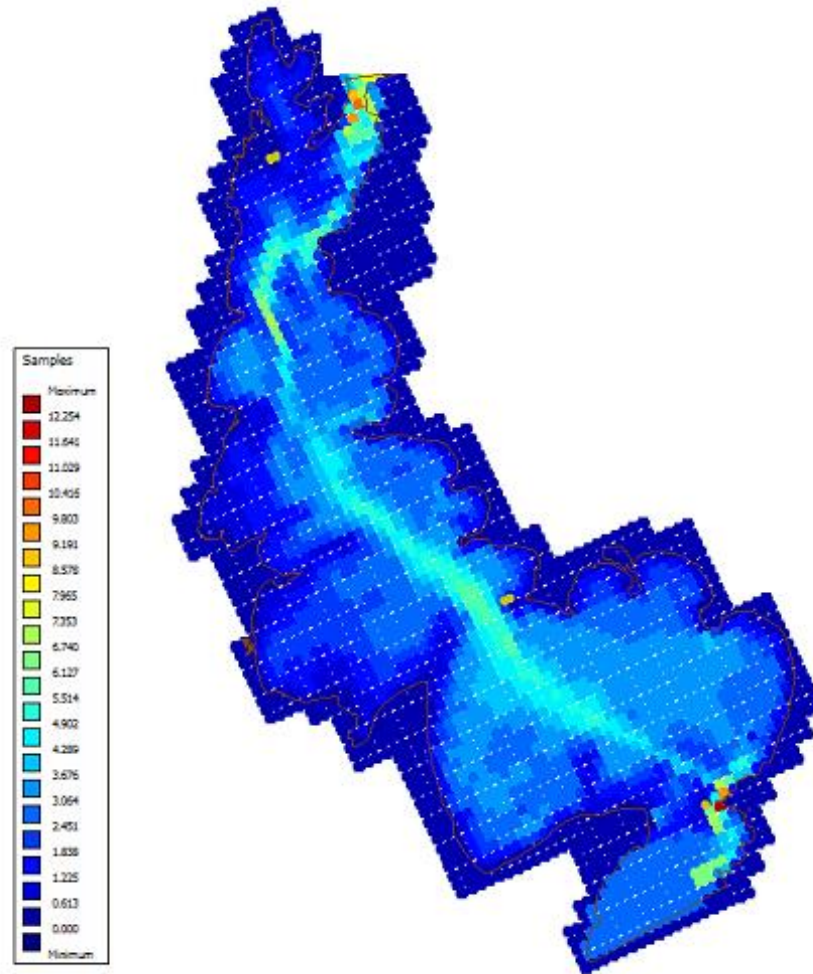


Os três pontos secos inseridos na grade representam, de norte para sul, a Ilha das Pombas, Ilha Francisco Manoel e Ilha do Junco.

4.1.2 INTERPOLAÇÃO BATIMÉTRICA

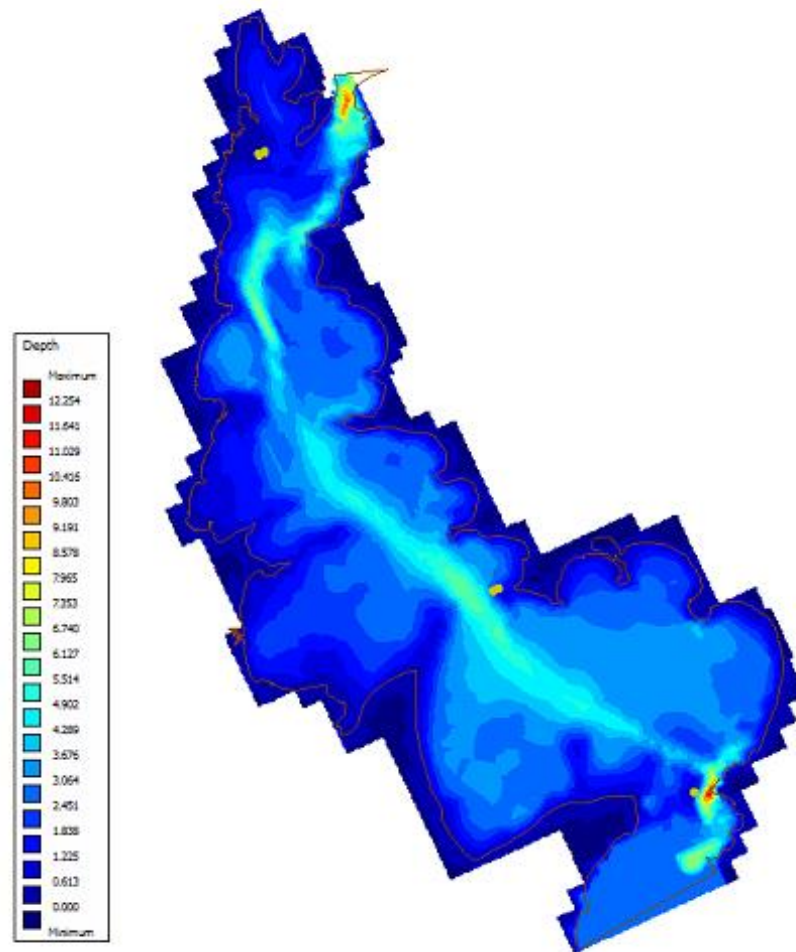
Com a construção da grade numérica, dados batimétricos, coletados por Nicolodi (2007), são interpolados para a malha. A FIGURA 14 apresenta as informações disponíveis para a área de interesse. A FIGURA 15 apresenta a batimetria interpolada para o domínio.

FIGURA 14. DADOS BATIMÉTRICOS



FONTE: DADOS DE BATIMETRIA DE NICOLODI (2007).

FIGURA 15. BATIMETRIA



4.1.3 PROPRIEDADES DA GRADE NUMÉRICA

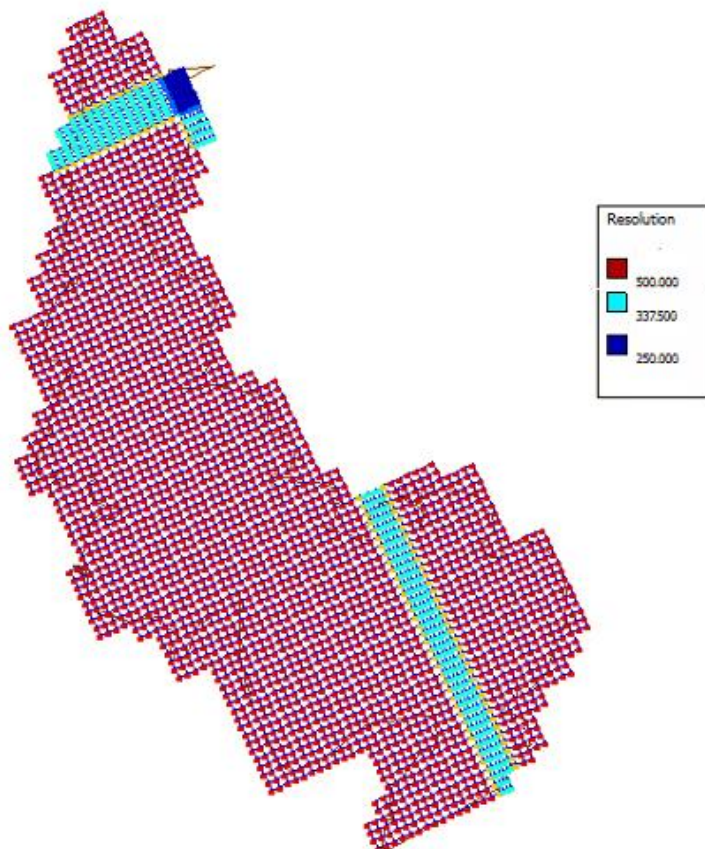
4.1.3.1 Resolução

A resolução da grade numérica é indicada pela raiz quadrada da área da célula da grade ($R = \sqrt{A}$, sendo A a área da célula da grade) e deve apresentar valores capazes de representar os processos hidrodinâmicos e a geometria do local, onde há a necessidade de resultados mais precisos, levando-se em conta que o tamanho de uma célula não pode ser maior que 1,4 vezes o tamanho da célula adjacente (RIBAS, 2004).

Para melhor representar a geometria final do Rio Jacuí (conexão com o Lago Guaíba) a grade foi refinada para células de 250 m. Os tons em azul, apresentados na FIGURA 16, mostram a área de refinamento.

O processo de refinamento local do Delft3D faz com que todos os pontos nas direções X ou Y, da área selecionada, sejam também refinados. Devido a isto, alguns pontos apresentam a resolução de 337,5 m, e os demais pontos da grade possuem resolução de 500 m (FIGURA 16).

FIGURA 16. RESOLUÇÃO DA GRADE



4.1.3.2 Pontos de Observação

Para análise das saídas do modelo, além do contorno aberto, é possível inserir pontos e seções de observação. A localização fica a critério do operador, que geralmente seleciona pontos onde existem informações para comparações dos resultados do modelo com os dados observados em campo. A FIGURA 17 apresenta a localização dos pontos de observação. A escolha seguiu o critério de posição de estações da ANA com dados de nível de água (ver seção 4.3), e de pontos com informações de estudos já realizados na região (ver seção 2 e FIGURA 21). A TABELA 2 apresenta a relação de pontos e as informações disponíveis em cada ponto.

FIGURA 17. LOCALIZAÇÃO PONTOS DE OBSERVAÇÃO



TABELA 2. RELAÇÃO DE INFORMAÇÕES DISPONÍVEIS POR PONTO DE OBSERVAÇÃO

Ponto de observação	Informação Disponível
Areia_F	Dados de sedimento de fundo – Areia fina
Areia_F_2	Dados de sedimento de fundo – Areia fina
Areia_F_3	Dados de sedimento de fundo – Areia fina
Areia_G	Dados de sedimento de fundo – Areia grossa / Ponto de controle
Areia_G_2	Dados de sedimento de fundo – Areia grossa
Areia_G_3	Dados de sedimento de fundo – Areia grossa / Ponto de controle
Areia_M	Dados de sedimento de fundo – Areia média
Cristal	Série temporal de nível de água
Deposição	Área com dinâmica deposicional / Dados de sedimento de fundo – Lama
Entrada	Ponto de controle para avaliação do desempenho do modelo no contorno
Erosão	Área com dinâmica erosional

Ponto de observação	Informação Disponível
Ipanema	Série temporal de nível de água
Lama	Dados de sedimento de fundo – Lama
Lama_3	Dados de sedimento de fundo – Lama
Ponta	Série temporal de nível de água
Saída	Ponto de controle para avaliação do desempenho do modelo no contorno

FONTE: Dados de sedimento de fundo - Andrade (2018) e Scottá (2018); áreas de erosão e deposição – Nicolodi (2013); séries de nível – Agência Nacional de Águas.

4.1.4 FORÇANTE METEOROLÓGICA

Séries históricas de intensidade e direção do vento foram utilizadas como forçantes do modelo hidrodinâmico Delft3D. Foram analisadas duas estações meteorológicas (TABELA 3) localizadas em Porto Alegre – RS (FIGURA 18), pertencentes ao INMET, sendo que apenas a Estação Meteorológica Porto Alegre – A801 possui dados históricos de velocidade e direção do vento.

TABELA 3. ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS

Estação	Latitude	Longitude	Status
Porto Alegre – A801	-30,053536°	-51,174766°	Com dados
Porto Alegre – RS	-30,016667°	-51,216667°	Sem dados

Os dados existentes, do período de 04/12/2006 às 15:00 horas a 20/11/2018 às 12:00 horas, em frequência diária, foram consistidos, para eliminação de dados espúrios e preenchimento de falhas, e então foi realizada a climatologia horária do período para uso como forçante no modelo hidrodinâmico. Para cada hora de cada ano, foi realizada a média das intensidades e direção do vento e então obteve-se uma série temporal anual (TABELA 4) com as médias horárias do período analisado.

TABELA 4. MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIAS DA CLIMATOLOGIA DA INTENSIDADE DO VENTO (M/S) DO PERÍODO DE 04/12/2006 A 20/11/2018 – ESTAÇÃO PORTO ALEGRE – RS

	Jan	Fev	Mar	Abril	Maió	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Máxima	3,433	3,267	2,755	2,545	2,508	2,200	2,533	2,818	3,000	2,825	3,073	3,017
Mínima	0,442	0,390	0,309	0,400	0,442	0,350	0,292	0,536	0,642	0,550	0,330	0,492
Média	1,659	1,566	1,533	1,279	1,212	1,150	1,273	1,450	1,647	1,700	1,742	1,727

FIGURA 18. LOCALIZAÇÃO ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS



4.1.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO

A área modelada do Lago Guaíba possui dos contornos abertos denominados: Contorno Baixo Jacuí e Contorno Laguna dos Patos, sendo a entrada e a saída de dados do modelo, respectivamente. A FIGURA 19 apresenta a localização dos contornos.

As principais forças que governam a circulação no interior do Guaíba são a descarga líquida, oriunda da drenagem do Rio Jacuí, forças meteorológicas, ação de ondas e a variação de nível gerada por forças astronômicas, na conexão com a Laguna dos Patos. Assim, para reproduzir o comportamento hidrodinâmico no interior do Guaíba, é necessário impor essas forças nos contornos. Ou, seja, ao Norte descarga líquida e sólida oriunda do Baixo Jacuí, no Sul, o comportamento oscilatório do nível de água e a ação de ondas e na superfície livre a ação dos ventos.

FIGURA 19. LOCALIZAÇÃO DOS CONTORNOS DO MODELO DO LAGO GUAÍBA



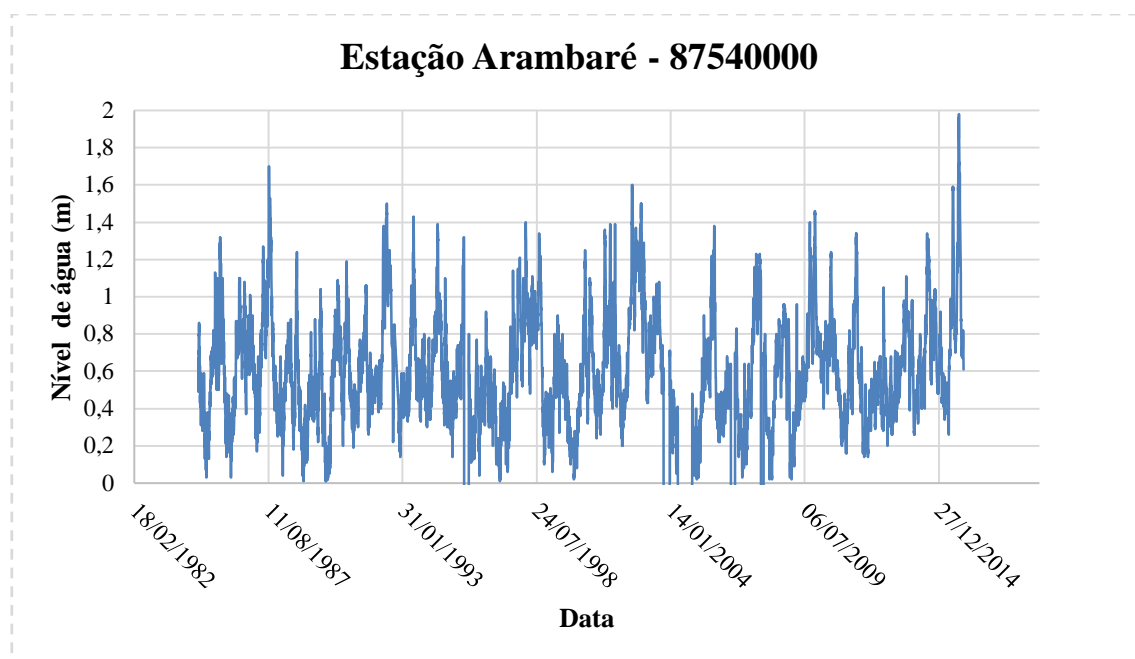
Os dados de descarga líquida e descarga sólida inseridos no contorno “Baixo Jacuí” foram obtidos da modelagem hidrodinâmica e de transporte de sedimentos do trecho final do Baixo Jacuí (Módulo II). Os dados foram simulados em dois períodos, para a calibração do modelo (de 01 de janeiro de 1975 a 31 de dezembro de 2005) e para a validação (de 01 de janeiro de 2006 a 31 de dezembro de 2015).

Para o contorno de conexão com a Laguna dos Patos (Contorno Laguna dos Patos) foram inseridas duas forçantes: Nível de água e características de ondas.

Os dados de nível foram obtidos da estação da Agência Nacional de Águas (ANA) 87540000 – Arambaré, estação localizada no interior da Laguna dos Patos (-30,5424; -51,2934), mais próxima do contorno do modelo FIGURA 24. A FIGURA 20 apresenta a série temporal de nível observado na estação Arambaré.

No banco de dados da ANA, os registros da estação Arambaré tem início em outubro de 1984, e são compostos de duas leituras diárias, nos horários 07:00 e 17:00. Essa série temporal foi consistida para eliminação de dados espúrios, então o valor médio diário foi calculado para ser utilizado como forçante no contorno. Devido a disponibilidade dos dados de nível, para o contorno Laguna dos Patos, a simulação para o período de calibração ocorreu de 01/10/1984 a 31/12/2005.

FIGURA 20. SÉRIE TEMPORAL DE NÍVEL DE ÁGUA ESTAÇÃO ARAMBARÉ (87540000) – 01/10/1984 A 31/12/2015

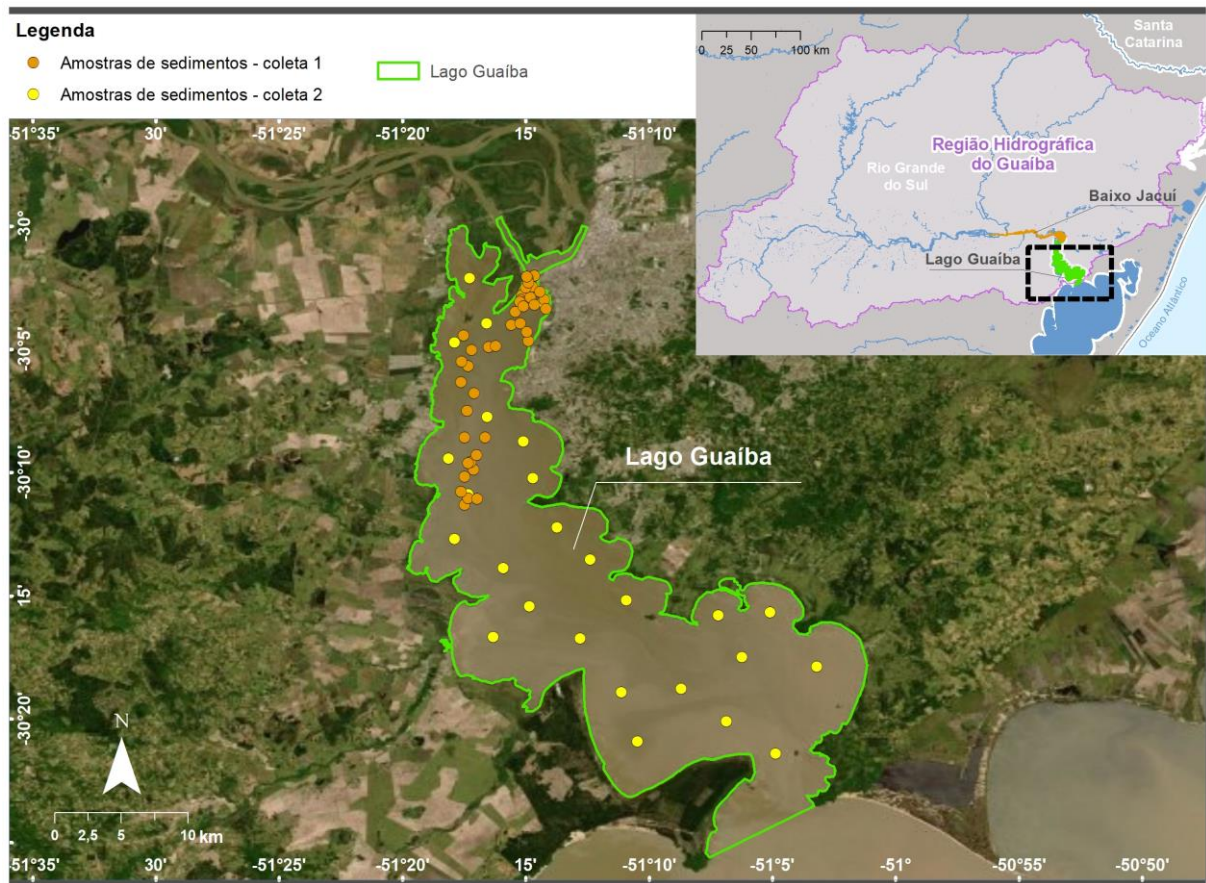


Os dados de altura, período e direção de onda foram obtidos com base no estudo realizado por Nicolodi (2013). Foram inseridos os valores máximos encontrados pelo autor (TABELA 7), de maneira constante, tanto para o período de calibração, como o de validação.

A condição de contorno de fundo foi interpolada com base nos dados de sedimento coletados, por Andrade (2018) e Scottá (2018) (FIGURA 21). A partir da localização das informações disponíveis foi gerado o mapa de rugosidade para o lago, utilizando a Equação de Manning. A TABELA 5 apresenta os dados coletados, indicando os autores responsáveis, e o valor do Manning associado. Os pontos foram classificados de acordo com o tipo de sedimento que apresentou maior concentração e os coeficientes de Manning foram inseridos com base no trabalho de Bellos e colaboradores (2018). A FIGURA 22 apresenta a localização dos pontos na grade e o valor do Manning associado a cada ponto e a FIGURA 23 apresenta o mapa de rugosidade interpolado.

Além do mapa de rugosidade, a informação de uma camada de sedimento de 15 metros de altura foi inserida como condição de contorno de fundo. Esta camada foi inserida para que, após a validação do Módulo III, seja possível realizar as simulações dos cenários (Produto 05) de retirada de sedimento do fundo por ação antrópica. O valor foi escolhido com base na profundidade máxima que será retirado sedimento.

**FIGURA 21. LOCALIZAÇÃO DADOS DE SEDIMENTOS DE FUNDO DISPONÍVEIS –
COLETA 1: SCOTTÁ (2018), COLETA 2: ANDRADE (2018)**



FONTE: DISPONIBILIZADOS POR ANDRADE (2018) E SCOTTÁ (2018)

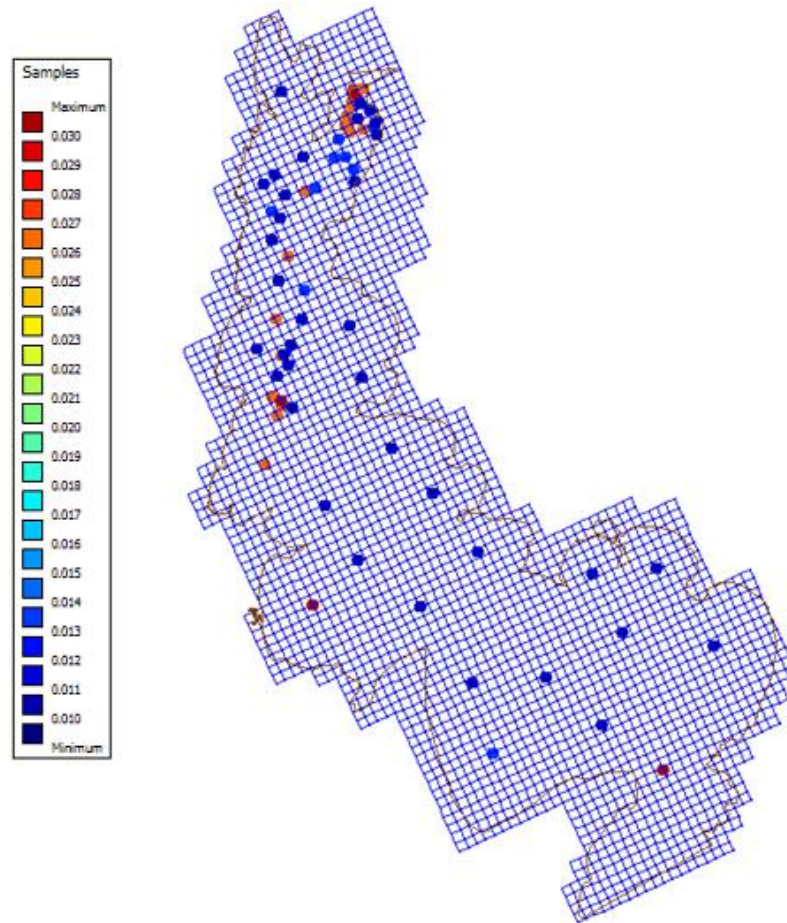
TABELA 5. DADOS SEDIMENTO DE FUNDO – RUGOSIDADE

Ponto	Latitude	Longitude	Autor	Areia	Silte e Argila	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Classificação*	N Manning
				%						
1	-30,04	-51,288	Andrade	0,5	99,5	0,1	0	0,4	SA	0,01
2	-30,07	-51,276		5,6	94,4	0,3	0	5,3	SA	0,01
3	-30,08	-51,298		3,1	96,9	0,3	0	2,8	SA	0,01
4	-30,04	-51,248		89,5	10,5	79	0	10,5	AG	0,03
5	-30,05	-51,238		79,8	16,6	35,8	0	44	AF	0,012
6	-30,13	-51,276		82,7	17,4	18,7	0	64	AF	0,012
7	-30,15	-51,252		10,8	89,2	0,2	0	10,6	SA	0,01
8	-30,17	-51,245		0,8	99,1	0,1	0	0,7	SA	0,01
9	-30,16	-51,302		2,1	97,9	0,5	0	1,6	SA	0,01
10	-30,18	-51,289		93,3	3,5	87,4	0	5,9	AG	0,03
11	-30,21	-51,298		92,8	7,1	43,8	0	49	AM	0,026
12	-30,23	-51,265		0,7	99,3	0,1	0	0,6	SA	0,01
13	-30,2	-51,229		1,3	98,7	0,1	0	1,2	SA	0,01
14	-30,23	-51,207		4,2	95,8	0,3	0	3,9	SA	0,01
15	-30,25	-51,182		15,5	84,5	2,6	0	12,9	SA	0,01
16	-30,26	-51,248		20,6	79,4	2,6	0	18	SA	0,01
17	-30,28	-51,272		91,3	8,6	52,7	0	38,6	AG	0,03
18	-30,28	-51,213		24,9	75,1	10,9	0	14	SA	0,01
19	-30,26	-51,12		6,7	93,3	0,9	0	5,8	SA	0,01
20	-30,26	-51,085		2,3	97,7	0,1	0	2,2	SA	0,01
21	-30,3	-51,053		30,5	69,5	8,5	0	22	SA	0,01
22	-30,29	-51,104		1,8	98,2	0,4	0	1,4	SA	0,01
23	-30,35	-51,174		88,3	11,7	9,6	0	78,7	AF	0,012
24	-30,32	-51,186		6,4	93,6	1,1	0	5,3	SA	0,01
25	-30,33	-51,115		2,9	97,2	0,5	0	2,4	SA	0,01
26	-30,31	-51,145		1,7	98,3	0,2	0	1,5	SA	0,01
27	-30,36	-51,081		73	26,9	54,7	0	18,3	AG	0,03
28	-30,03	-51,244	Scottá	66,26	33,15	9,05	44,73	10,66	AM	0,026
29	-30,07	-51,292		10,09	89,57	0	0	0,76	SA	0,01
30	-30,14	-51,292		97,89	0,91	13,6	72,6	6,19	AM	0,026
31	-30,17	-51,291		0,91	99	0,2	0,38	0,32	SA	0,01
32	-30,19	-51,291		91,92	5,76	29,55	48,56	8,55	AM	0,026
33	-30,16	-51,285		4,59	95,4	0	0,46	0,95	SA	0,01
34	-30,16	-51,287		5,81	93,81	0,17	0,26	0,75	SA	0,01
35	-30,18	-51,289		63,82	28,79	10,42	27,63	18,4	AM	0,026
36	-30,16	-51,289		90,1	7,18	3,53	65,25	20,29	AM	0,026
37	-30,09	-51,289		2,05	97,68	0	0,27	0,22	SA	0,01
38	-30,09	-51,294		86,27	13,44	2,66	9,1	70,07	AF	0,012
39	-30,11	-51,294		2,25	97,54	0	0,53	1,09	SA	0,01

Ponto	Latitude	Longitude	Autor	Areia	Silte e Argila	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Classificação*	N Manning
40	-30,18	-51,294	Scottá	92,28	0	18,73	43,18	24,74	AM	0,026
41	-30,08	-51,287		39,25	60,15	0	0,52	5,24	SA	0,01
42	-30,11	-51,285		85,67	14,01	8,7	52,76	14,78	AM	0,026
43	-30,08	-51,275		98,53	1,34	7,01	71,26	18,85	AM	0,026
44	-30,08	-51,248		38,09	51,66	7,2	9,28	11,25	SA	0,01
45	-30,15	-51,283		15,53	84,44	0,64	1,45	3,75	SA	0,01
46	-30,18	-51,283		20,79	79,11	0,58	1,6	7,12	SA	0,01
47	-30,14	-51,277		26,4	73,16	0	0	7,94	SA	0,01
48	-30,12	-51,29		32,51	66,85	0	0	3,2	SA	0,01
49	-30,08	-51,27		84,92	14,87	0,16	6,36	66,21	AF	0,012
50	-30,07	-51,26		84,42	17,24	0,92	6,14	72,06	AF	0,012
51	-30,05	-51,253		87,6	12,17	0,56	46,98	38,54	AM	0,026
52	-30,05	-51,253		73,64	26,22	0,21	42,27	28,67	AM	0,026
53	-30,05	-51,252		99,93	0	0	77,65	20,72	AM	0,026
54	-30,07	-51,254		90,56	8,45	19,98	23,71	37,9	AF	0,012
55	-30,05	-51,247		1,07	98,91	0	0	0,88	SA	0,01
56	-30,04	-51,246		29,51	70,29	2,45	9,69	10,47	SA	0,01
57	-30,05	-51,237		0	100	0	0	0	SA	0,01
58	-30,04	-51,25		99,89	0,4	39,98	51,95	3,74	AM	0,026
59	-30,05	-51,244		95,33	4,67	13,03	31,82	17,83	AM	0,026
60	-30,06	-51,257		99,47	0,53	0	17,84	87,21	AF	0,012
61	-30,05	-51,254		99,49	0,51	0,65	54,96	36,56	AM	0,026
62	-30,04	-51,249		95,13	0	35,52	48,01	4,81	AM	0,026
63	-30,05	-51,252		99,15	0,11	17,38	65,09	11,08	AM	0,026
64	-30,07	-51,249		99,48	0,33	3,73	25,08	69,68	AF	0,012
65	-30,06	-51,237		5,24	94,76	0	0,11	0,45	SA	0,01
66	-30,04	-51,241		0	100	0	0	0	SA	0,01
67	-30,04	-51,249		99,87	0	26,2	18,93	3,53	AG	0,03
68	-30,04	-51,248		98,21	0	22,81	64,12	6,66	AM	0,026
69	-30,03	-51,249		96,94	0	43,61	31,51	2,02	AG	0,03

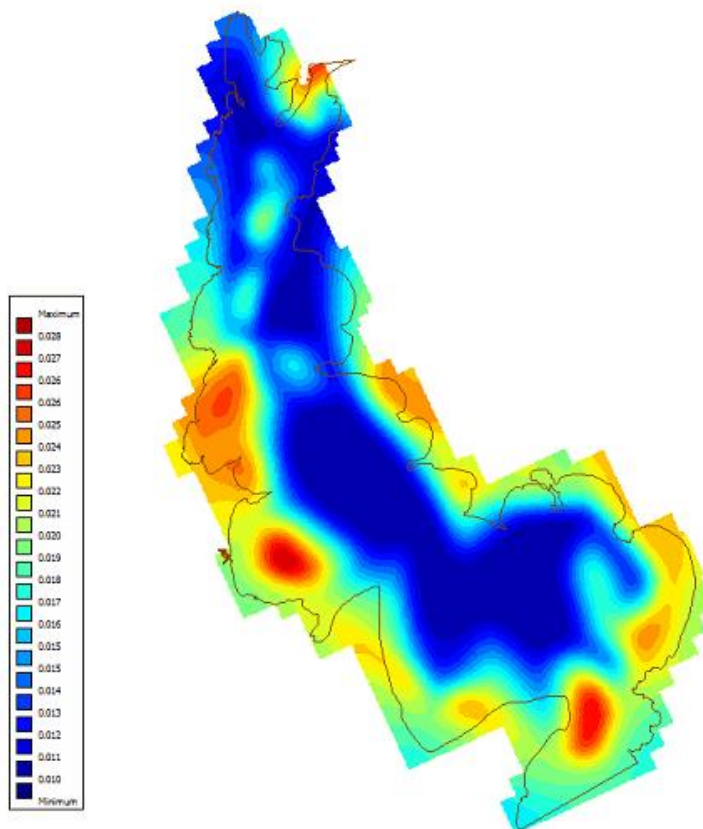
* AS = Silte e Argila; AG = Areia Grossa; AM = Areia Média; AF = Areia Fina

FIGURA 22. DISTRIBUIÇÃO DOS COEFICIENTE DE MANNING NA GRADE



FONTE: DISPONIBILIZADOS POR ANDRADE (2018) E SCOTTÁ (2018)

FIGURA 23. MAPA DE RUGOSIDADE INTERPOLADO PARA A GRADE – MANNING



4.2 DADOS OBSERVADOS PARA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

Para calibração e validação do modelo, foram utilizados dados de nível d'água da Agência Nacional de Águas (ANA) (TABELA 6), dados de velocidade das correntes de estudos da região (ver Capítulo 2) e informações de áreas de erosão e sedimentação, também de estudos realizados na área de interesse (ver Capítulo 2).

A FIGURA 24 apresenta a localização das estações fluviométrica da ANA, são apresentadas apenas as estações com dados disponíveis. As estações Cristal, Ipanema e Ponta dos Coatis foram utilizadas para controle e calibração do modelo, enquanto a estação Arambaré foi utilizada como condição de contorno do modelo. Na TABELA 6 são listadas todas as estações registradas, com régua linimétrica, na região de interesse com a informação de disponibilidade ou não de dados.

FIGURA 24. LOCALIZAÇÃO ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS - ANA

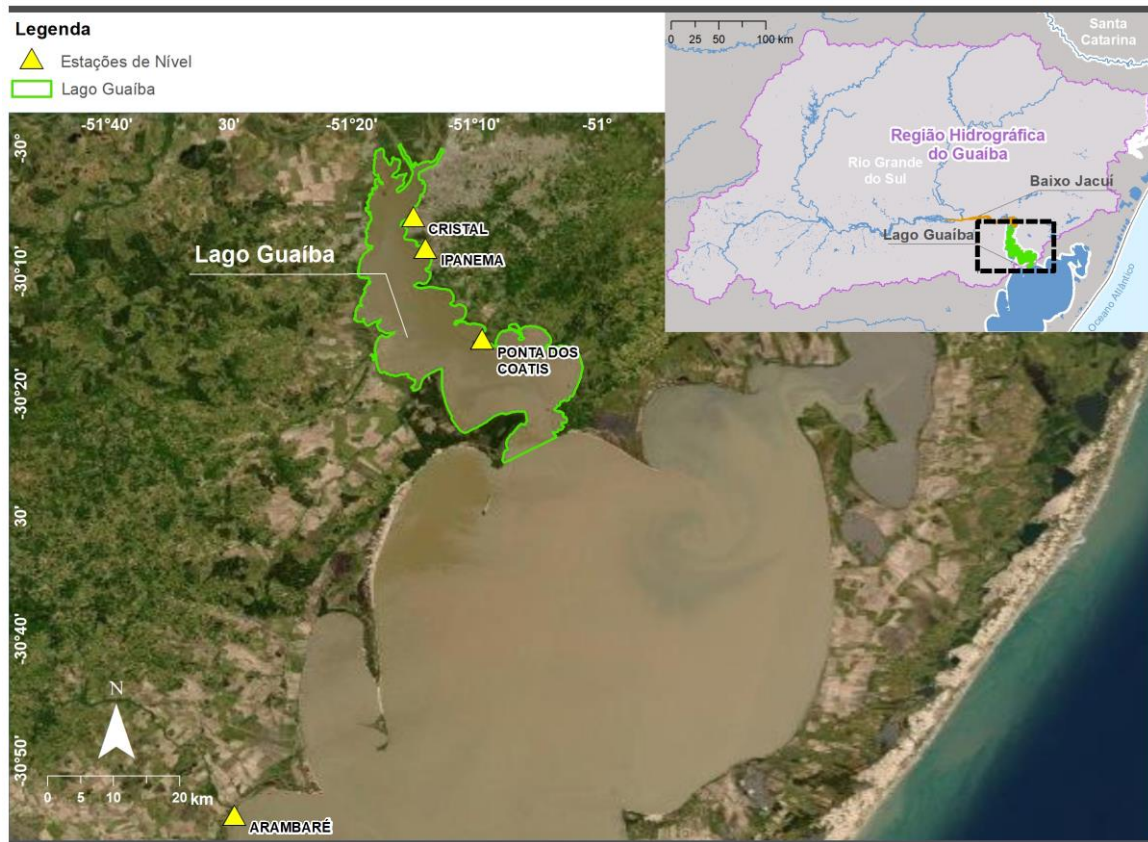


TABELA 6. LISTA DE ESTAÇÕES DA ANA COM RÉGUAS LINIMÉTRICAS NO TRECHO MODELADO

Estação	Latitude	Longitude	Início dos Dados	Status
Cais do Mauá - 87450004	-30,0211	-51,2211	-	Sem dados
Cristal – 87460007	-30,533	-51,1457	01/01/1984	Com dados
Ilha da Pintada - 87450005	-30,0306	-51,2522	-	Sem dados
Ipanema – 87460120	-30,8708	-51,1358	01/05/1984	Com dados
Ponta da Fortaleza - 87500080	-30,3500	-51,0500	-	Sem dados
Ponta dos Coatis - 87500020	-30,1533	-51,9200	01/10/1984	Com dados
Ponta Grossa - 87460220	-30,1886	-51,2425	-	Sem dados

4.3 PARÂMETROS UTILIZADOS

Após a calibração do modelo hidrodinâmico, definem-se os parâmetros físicos finais para realização das simulações. Os parâmetros de grade, temporais, físicos, sedimentos não coesivos, sedimentos coesivos, condições iniciais, coeficientes de arrasto do vento e características das ondas utilizadas são apresentados na TABELA 7.

As informações de viscosidade horizontal turbulenta, viscosidade horizontal de difusividade e os coeficientes de arrasto do vento, permaneceram com os valores padrões do modelo hidrodinâmico Delft3D. As informações de campo de ondas, inseridas no Contorno Laguna dos Patos, foram estabelecidas conforme estudo realizado por Nicolodi (2013).

TABELA 7. PARÂMETROS UTILIZADOS MODELO HIDRODINÂMICO DO LAGO GUAÍBA

Parâmetros de Grade	
Sistemas de Coordenadas	Cartesiano
Números de Pontos na Direção M	52
Números de Pontos na Direção N	102
Resolução	Variável
Latitude de referência	-33
Orientação da Grade	0°
Número de Camadas na Vertical	5
Resolução Camada 1	10 % (da profundidade)
Resolução Camada 2	15 % (da profundidade)
Resolução Camada 3	50 % (da profundidade)
Resolução Camada 4	15 % (da profundidade)
Resolução Camada 5	10 % (da profundidade)
Parâmetros Temporais	
Passo de Tempo	3 minutos
Data de Referência – Calibração	01-01-1975
Data de Referência - Validação	01-01-2006
Estabilização do Modelo	3 meses
Condições Iniciais	
Nível de água	0 m
Concentração de Sedimentos	0 kg/m ³
Parâmetros Físicos	
Gravidade	9.81 m/s ²
Densidade da Água	1000 kg/m ³
Densidade do Ar	1 kg/m ³
Rugosidade (Manning)	Variável
Viscosidade Horizontal Turbulenta	1 m ² /s
Viscosidade Horizontal de Difusividade	10 m ² /s
Coefficientes de Arrasto do Vento	
Coeficiente	Velocidade do Vento
0,00063	0 m/s
0,00723	100 m/s
Parâmetros Sedimento Não Coesivo	
Densidade Específica	2650 kg/m ³
Densidade do Leito Seco	1600 kg/m ³
Diâmetro Médio do Sedimento (D50)	150 µm

Parâmetros de Grade	
Parâmetros Sedimento Coesivo	
Densidade Específica	2100 kg/m ³
Densidade do Leito Seco	500 kg/m ³
Velocidade de Afundamento	0,125 mm/s
Parâmetros das Ondas	
Altura	0,55 m
Período	1,8 s
Direção	130°

5 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DO LAGO GUAÍBA

Para a implementação do Módulo III, e obtenção dos dados de entrada do modelo hidrodinâmico e de transporte de sedimentos do Lago Guaíba, foi realizada uma simulação com o modelo hidrodinâmico do Baixo Jacuí (Módulo II), para o período de 01/01/1975 a 31/12/2005, com o intuito de obter a série temporal de descarga líquida e descarga sólida para calibração do Módulo III.

Para o contorno de conexão com a Laguna dos Patos (Contorno Laguna dos Patos) foram utilizados dados de nível da estação da ANA 87540000 – Arambaré, estação localizada no interior da laguna, mais próxima do contorno do modelo. Devido a disponibilidade dos dados de nível, para o contorno Laguna dos Patos, não foi possível atender o período de calibração solicitado no TR (01/01/1976 a 31/12/2005). Portanto, a simulação para o período de calibração teve início em 01/10/1984 e finalizou em 31/12/2005.

5.1 DADOS DE ENTRADA - CALIBRAÇÃO

Para a calibração foram utilizados dados de vazão líquida e sólida simuladas pelo modelo hidrodinâmico e de transporte de sedimentos do Baixo Jacuí (Módulo II). Dados de descarga líquida e sólida (FIGURA 25), em frequência diária do período de 01/10/1984 a 31/12/2005, foram obtidos para o contorno de entrada do Módulo III (Contorno Baixo Jacuí) e inseridos no modelo hidrodinâmico do Lago Guaíba.

No contorno Laguna dos Patos (FIGURA 19) foi inserido a série temporal de nível de água da estação fluviométrica da ANA – Arambaré. A FIGURA 26 apresenta o nível utilizado para o período de calibração (01/10/1984 a 31/12/2005). Além dos dados de nível, características de ondas (altura, período e direção), descritas na TABELA 7, foram inseridas como forçante do modelo no contorno.

Nas TABELA 8 e TABELA 9 estão disponíveis os valores máximos, médios, mínimos das séries temporais do Contorno Baixo Jacuí e Contorno Laguna dos Patos, respectivamente.

FIGURA 25. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO BAIXO JACUÍ - CALIBRAÇÃO

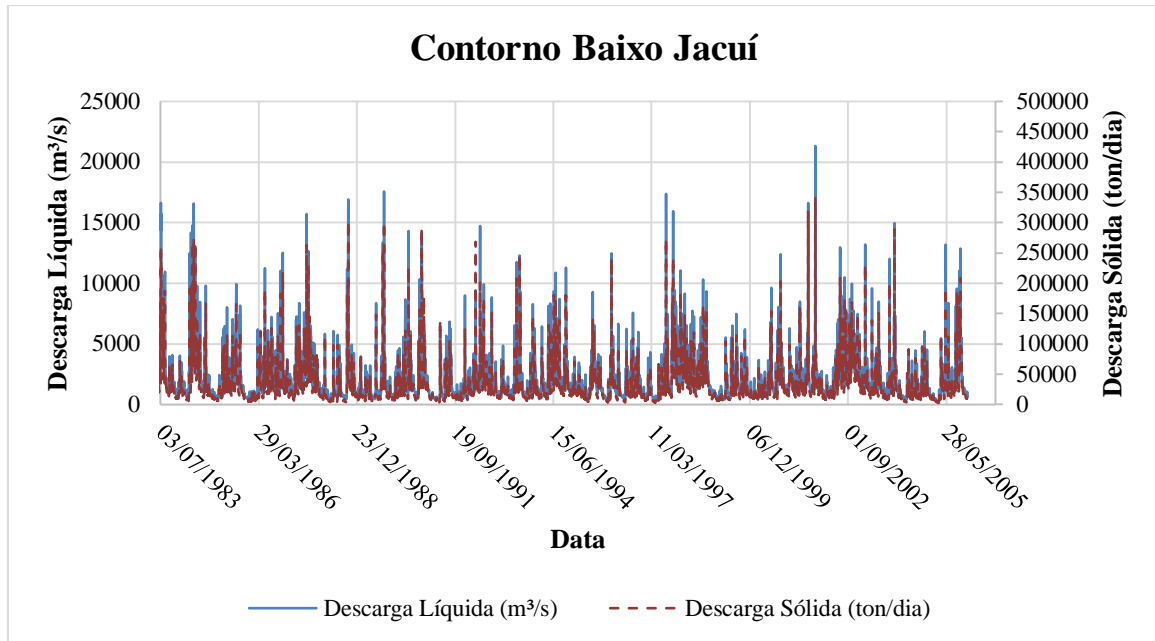


FIGURA 26. SÉRIE TEMPORAL DE NÍVEL DE ÁGUA – CONTORNO LAGUNA DOS PATOS - CALIBRAÇÃO

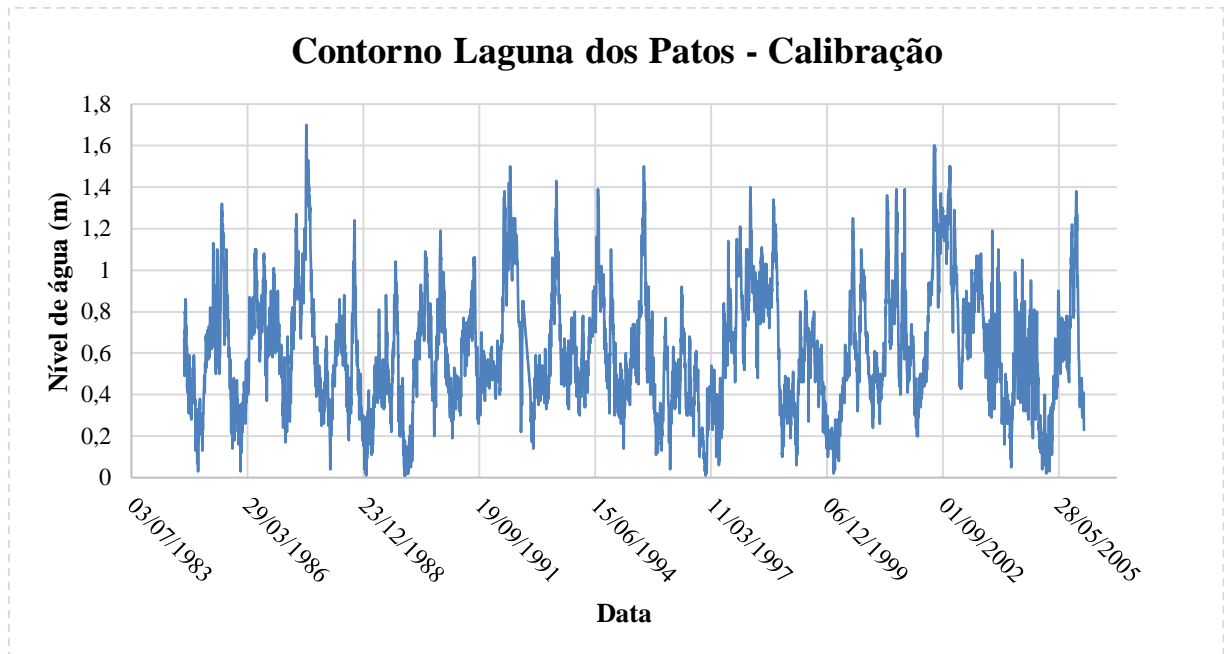


TABELA 8. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DA SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO BAIXO JACUÍ - CALIBRAÇÃO

Contorno Baixo Jacuí	Descarga líquida (m ³ /s)	Descarga sólida (ton/dia)
Máxima	21330,53	341339,21
Média	2004,08	31164,39
Mínima	258,20	2337,25
Q90	609,40	8229,825

TABELA 9. VALORES MÁXIMO, MÉDIO E MÍNIMO DA SÉRIE TEMPORAL DE NÍVEL – CONTORNO LAGUNA DOS PATOS - CALIBRAÇÃO

Contorno Laguna dos Patos	Nível (m)
Máximo	1,70
Média	0,61
Mínimo	0,01

5.2 RESULTADOS CALIBRAÇÃO

Para a calibração foram utilizadas três estações da ANA, localizadas no interior do Lago Guaíba para comparação dos dados de nível de água simulados com os dados observados. A FIGURA 27, FIGURA 28 e FIGURA 29 apresentam a série temporal de nível de água observado nas estações Cristal, Ipanema e Ponta dos Coatis, respectivamente, e os dados simulados em pontos da grade correspondente a localização das estações. Para melhor visualização dos resultados são apresentados apenas o período de um ano das simulações.

A TABELA 10, TABELA 11 e TABELA 12 apresentam as informações estatísticas para todo o período de calibração (01/10/1984 a 31/12/2005) dos pontos Cristal, Ipanema e Ponta dos Coatis, respectivamente. Após a calibração do modelo e utilização dos parâmetros, apresentados na TABELA 7, o modelo apresentou resultados satisfatórios. As séries temporais simuladas correspondem as séries observadas em ordem de grandeza e em fase e os coeficientes de Nash-Sutcliffe são superiores a 0,7 em todos os pontos de controle.

FIGURA 27. SÉRIE TEMPORAL NÍVEL DE ÁGUA OBSERVADO x SIMULADO – ESTAÇÃO CRISTAL – 1985

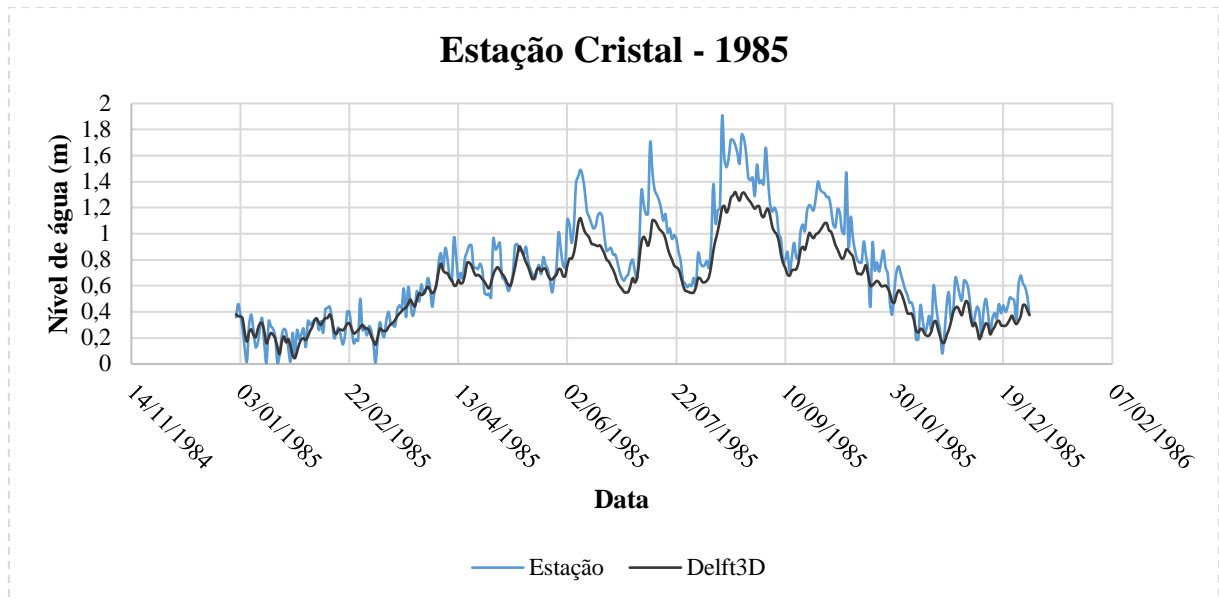


TABELA 10. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS, COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E COEFICIENTE NASH – ESTAÇÃO CRISTAL – PERÍODO DE CALIBRAÇÃO

Nível d'água (m)	Observado	Simulado
Máximo	2,49	2,19
Médio	0,83	0,61
Mínimo	0,01	0,00
Coefficiente de Correlação (Pearson)	0,93	
Coefficiente de Nash	0,75	

FIGURA 28. SÉRIE TEMPORAL NÍVEL DE ÁGUA OBSERVADO x SIMULADO – ESTAÇÃO IPANEMA - 1990

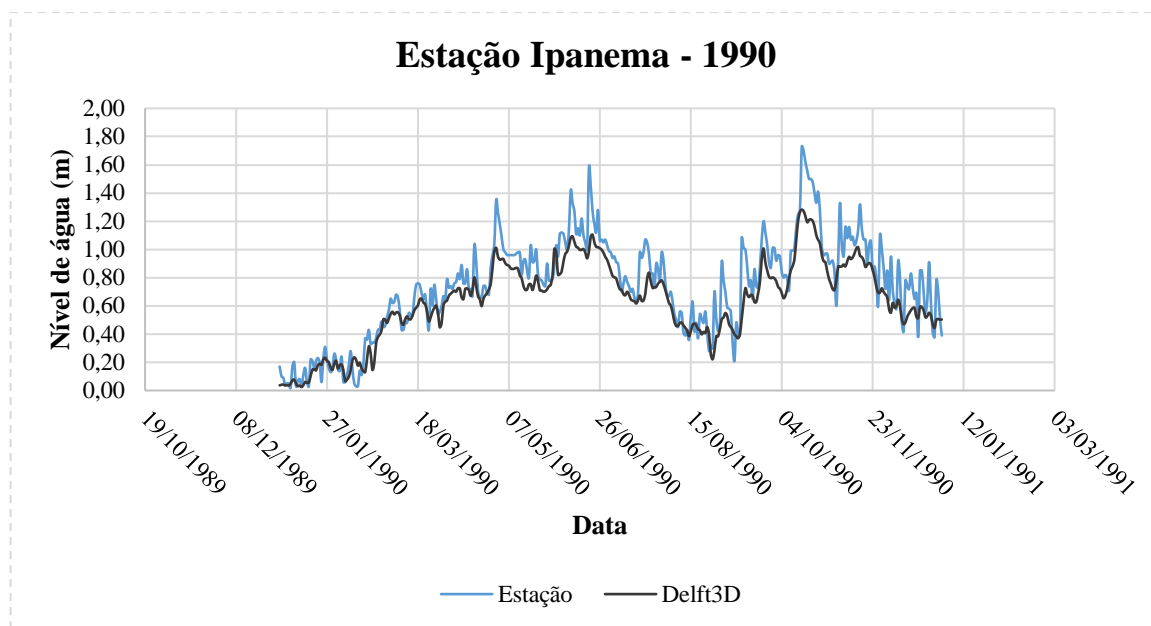


TABELA 11. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS, COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E COEFICIENTE NASH – ESTAÇÃO IPANEMA – PERÍODO DE CALIBRAÇÃO

Nível d'água (m)	Observado	Simulado
Máximo	2,09	1,71
Médio	0,72	0,63
Mínimo	0,00	0,02
Coefficiente de Correlação (Pearson)	0,94	
Coefficiente de Nash	0,82	

FIGURA 29. SÉRIE TEMPORAL NÍVEL DE ÁGUA OBSERVADO x SIMULADO – ESTAÇÃO PONTA DOS COATIS - 2004

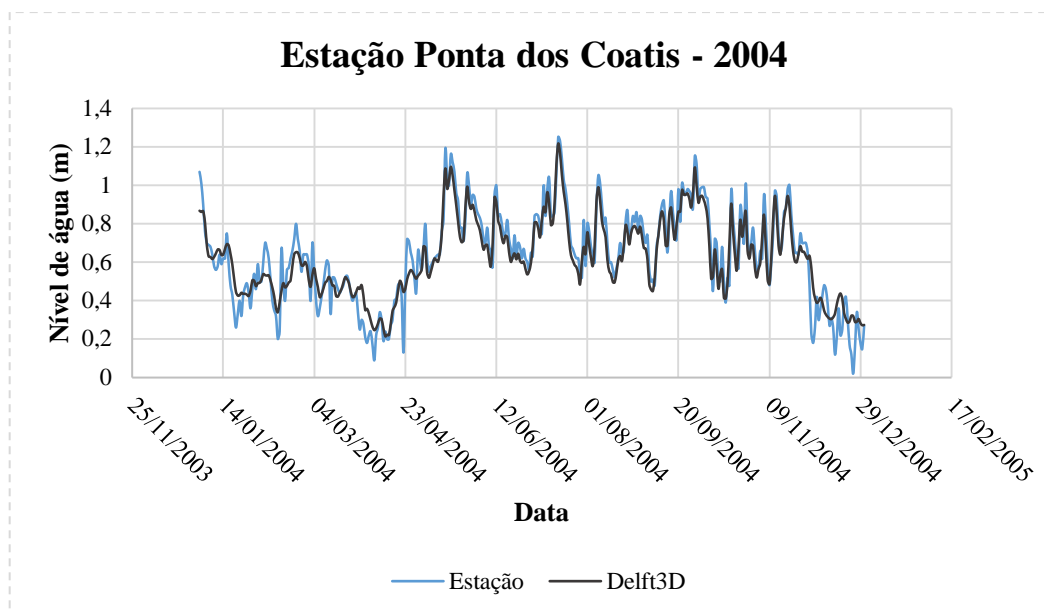


TABELA 12. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS, COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E COEFICIENTE NASH – ESTAÇÃO PONTA DOS COATIS - PERÍODO DE CALIBRAÇÃO

Nível d'água (m)	Observado	Simulado
Máximo	2,02	1,70
Médio	0,78	0,62
Mínimo	0,01	0,02
Coefficiente de Correlação (Pearson)	0,94	
Coefficiente de Nash	0,87	

A FIGURA 30 e FIGURA 31 apresentam os campos de velocidade nos picos de máxima e mínima descarga líquida, respectivamente. Observa-se que as maiores velocidades do lago ocorrem próximo ao delta do Rio Jacuí, apresentando velocidades de até 2,5 m/s. Velocidades elevadas, quando comparadas com o resto do domínio, também ocorrem no canal de navegação. Em regiões abrigadas são encontradas velocidades da ordem de até 0,2 m/s.

Com a diminuição da entrada de água, na mínima vazão do período (FIGURA 31), ocorre uma desaceleração significativa da velocidade das correntes no lago. Porém, ainda é possível observar velocidades mais elevadas a montante do Lago Guaíba e no canal de navegação. O padrão apresentado pelo modelo hidrodinâmico do Lago Guaíba é consistente com a caracterização hidrodinâmica do Guaíba (FIGURA 3), presente na literatura.

FIGURA 30. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE

VAZÃO MÁXIMA DO PERÍODO = 21330,53 m³/s

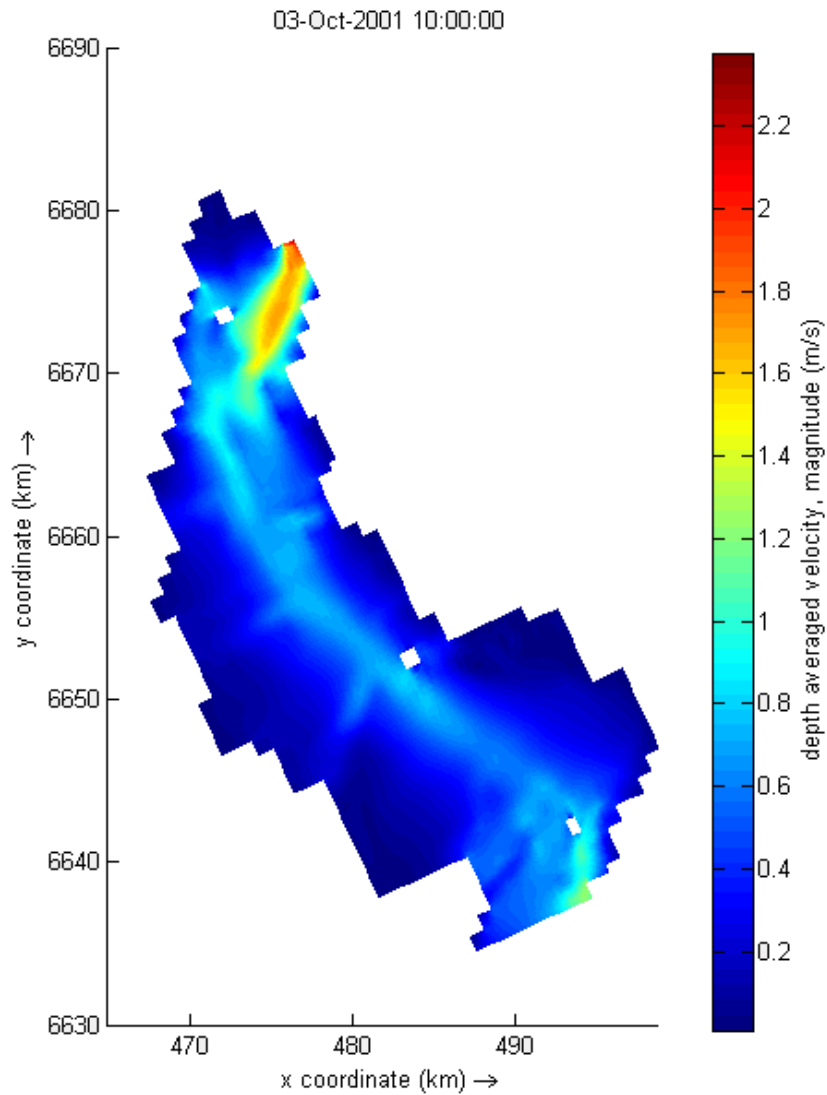
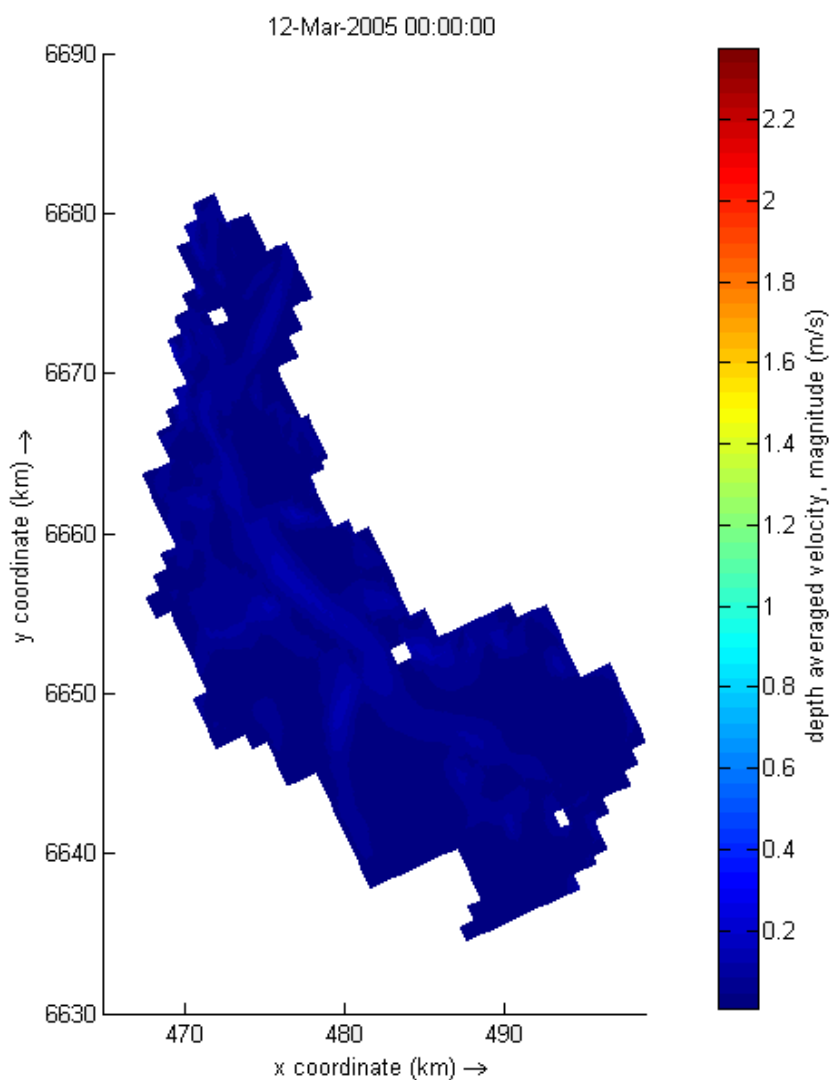


FIGURA 31. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE

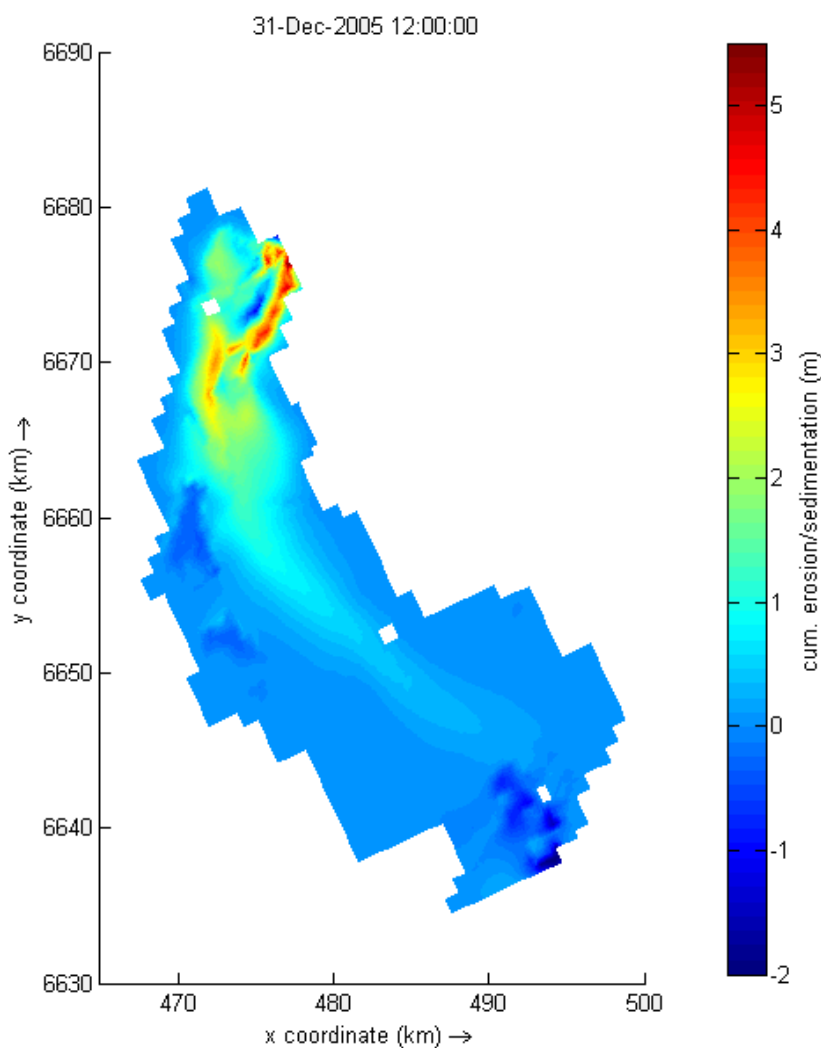
VAZÃO MÍNIMA DO PERÍODO = 259,30 m³/s



O mapa da dinâmica de erosão e sedimentação para o período de calibração é apresentado na FIGURA 32. Para melhor compreensão, a camada de sedimentos disponível no fundo, condição de contorno de fundo, foi subtraída das imagens. Ou seja, as taxas de deposição e retirada de sedimentos (coesivos e não coesivos) observadas na figura, representam a dinâmica sedimentar devido a entrada de sedimentos oriundos do Rio Jacuí durante todo o período simulado (01/10/1984 a 31/12/2005). A influência de períodos de seca e de alta descarga líquida, na quantidade de sedimentos retirados ou depositados no Guaíba, é apresentada no Capítulo 7.

O Lago Guaíba caracterizou-se essencialmente como um ambiente deposicional, apresentando-se estável em sua maior parte. Como resposta a entrada de água e sólidos, áreas de deposição concentraram-se na entrada do sistema, deslocando até o interior do lago. Regiões de erosão ocorreram próximas da margem esquerda e na desembocadura do domínio. Após pouco mais de 20 anos, com as condições impostas nos contornos, a máxima deposição no Lago Guaíba foi de 5,5 m e a retirada máxima de sedimentos foi de 2 m. Os resultados encontrados concordam com o estudo realizado por Nicolodi (2013), apresentado na seção 2.

FIGURA 32. MAPA DE EROSIÃO / SEDIMENTAÇÃO – PERÍODO DE CALIBRAÇÃO



Com base nos ambientes de deposição e erosão, presentes na literatura, foram inseridos pontos de observação (FIGURA 17) para análise da dinâmica sedimentar. Na FIGURA 33, FIGURA 34 e FIGURA 35 são apresentados os pontos onde ocorrem deposição de sedimentos, na FIGURA 36 e FIGURA 37 são apresentados os pontos de erosão de sedimentos.

O modelo correspondeu com a realidade, se apresentando estável no início da simulação, após tem início o processo de deposição (valores positivos) ou de erosão (valores negativos). O processo de erosão ocorre intercalado com momentos de estabilidade. As variações nas séries temporais estão relacionadas com as variações nas entradas de descarga líquida e sólida no sistema e conforme os pontos se localizam mais distantes dos contornos é possível notar a diminuição nas taxas de deposição e erosão. A TABELA 13 apresenta a taxa anual de erosão ou deposição de sedimentos para cada ponto.

FIGURA 33. SÉRIE TEMPORAL DE EROSIÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO AREIA_G – ALTA DEPOSIÇÃO

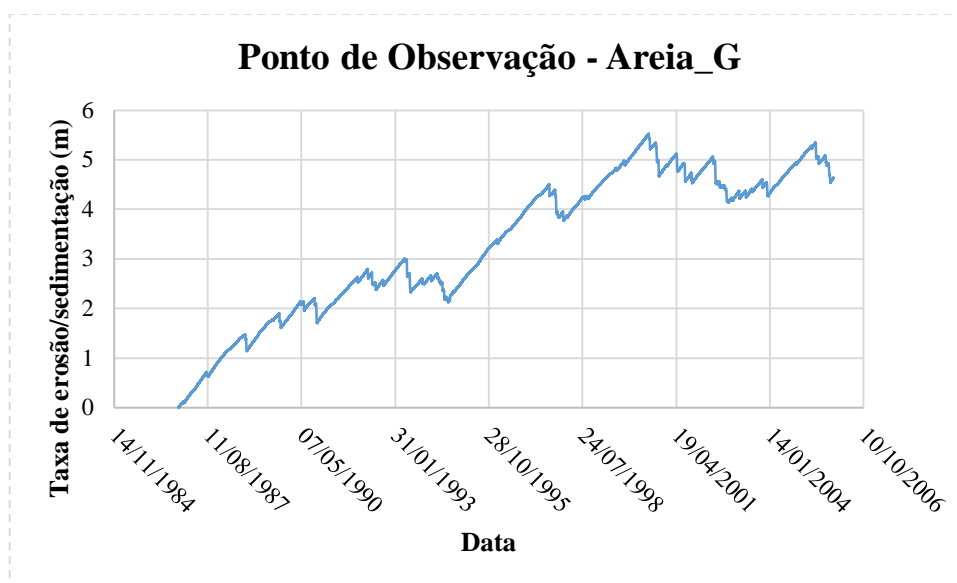


FIGURA 34. SÉRIE TEMPORAL DE EROSIÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO LAMA_3

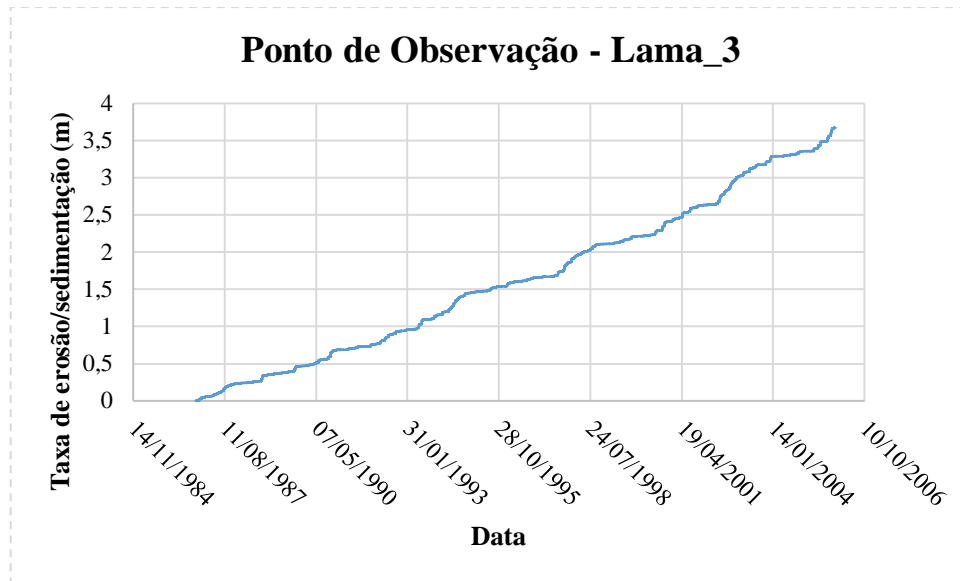


FIGURA 35. SÉRIE TEMPORAL DE EROSIÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO DEPOSIÇÃO

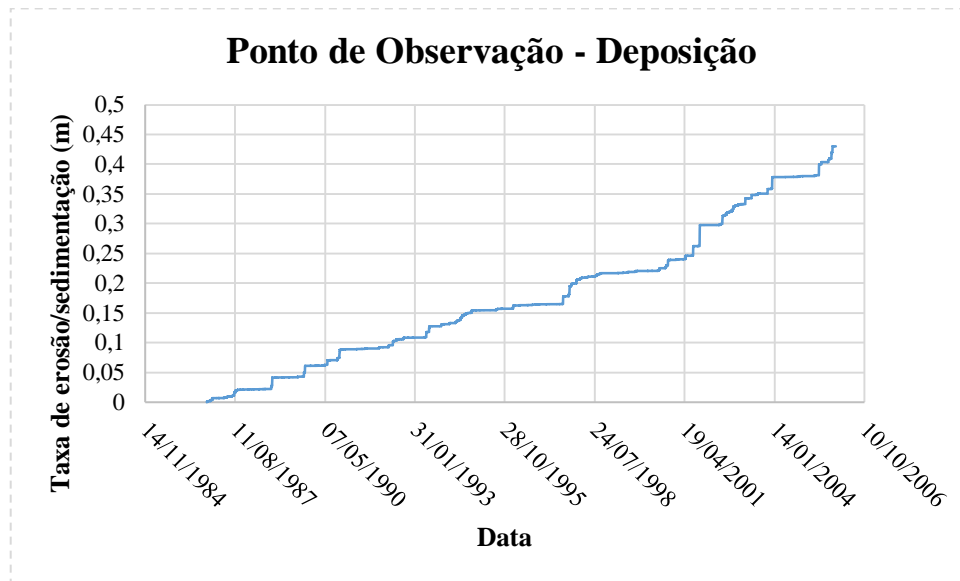


FIGURA 36. SÉRIE TEMPORAL DE EROSIÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO AREIA_G_3 – ALTA EROSIÃO

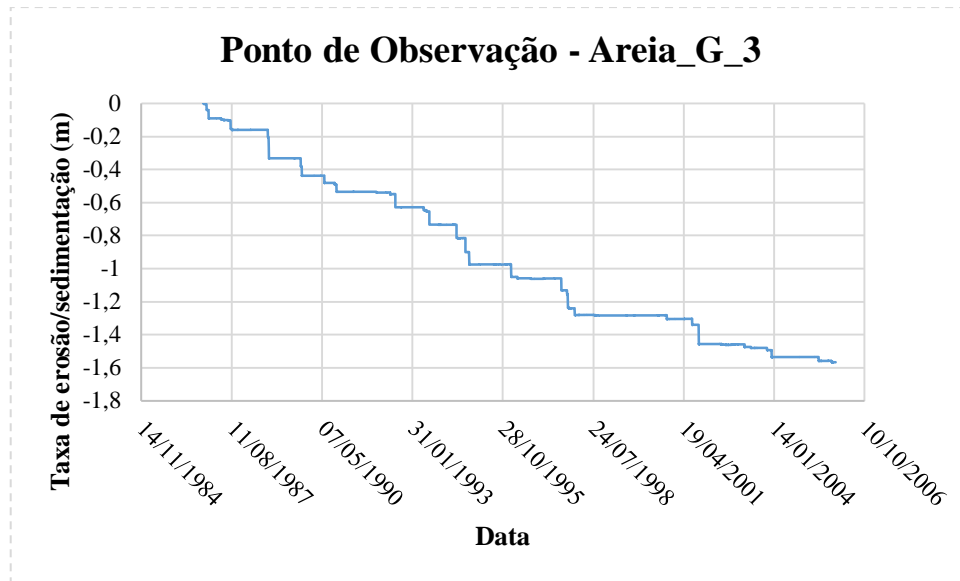


FIGURA 37. SÉRIE TEMPORAL DE EROSIÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO EROSIÃO

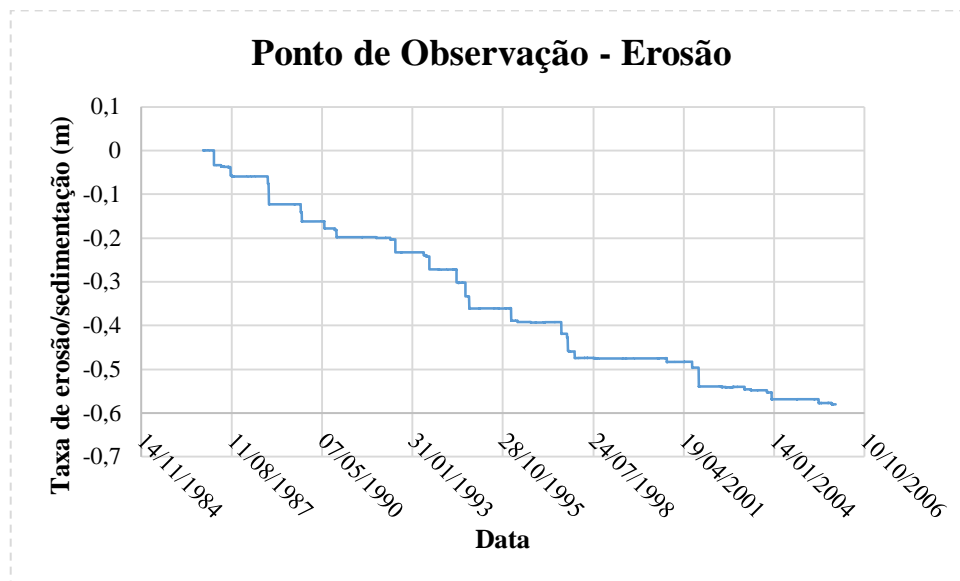


TABELA 13. TAXAS DE EROSIÃO / DEPOSIÇÃO POR PONTO – PERÍODO DE CALIBRAÇÃO

Ponto	Taxa/ano	Classificação
Areia_G	0,25	Alta deposição
Lama_3	0,20	Deposição
Deposição	0,02	Deposição
Areia_G_3	-0,08	Alta erosão
Erosão	-0,03	Erosão

6 VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DO LAGO GUAÍBA

Para a obtenção dos dados de entrada do modelo hidrodinâmico e de transporte de sedimentos do Lago Guaíba, foi realizada uma simulação com o modelo hidrodinâmico do Baixo Jacuí (Módulo II), com o intuito de obter a série temporal de descarga líquida e descarga sólida.

Para o contorno de conexão com a Laguna dos Patos (Contorno Laguna dos Patos) foram utilizados dados de nível da estação da ANA 87540000 – Arambaré, estação localizada no interior da laguna, mais próxima do contorno do modelo, em conjunto com campo de ondas.

6.1 DADOS DE ENTRADA – VALIDAÇÃO

Para a validação foram utilizados dados de vazão líquida e sólida simuladas pelo modelo hidrodinâmico e de transporte de sedimentos do Baixo Jacuí (Módulo II). Os dados, em frequência diária do período de 01/01/2006 a 31/12/2015, foram obtidos para o contorno de entrada do Módulo III (Contorno Baixo Jacuí) e inseridos no modelo hidrodinâmico do Lago Guaíba (FIGURA 38).

No contorno Laguna dos Patos foram inseridos dados de nível de água (FIGURA 39) da estação fluviométrica Arambaré, também para o período de 01/01/2006 a 31/12/2015 e um campo de ondas constante com amplitude máxima de onda de 0,55 m, período de 1,8 segundos e direção de 130° (TABELA 7). Na TABELA 14 e TABELA 15 são apresentadas as informações estatísticas da série temporal do Contorno Baixo Jacuí e Contorno Laguna dos Patos, respectivamente.

FIGURA 38. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO BAIXO JACUÍ - VALIDAÇÃO

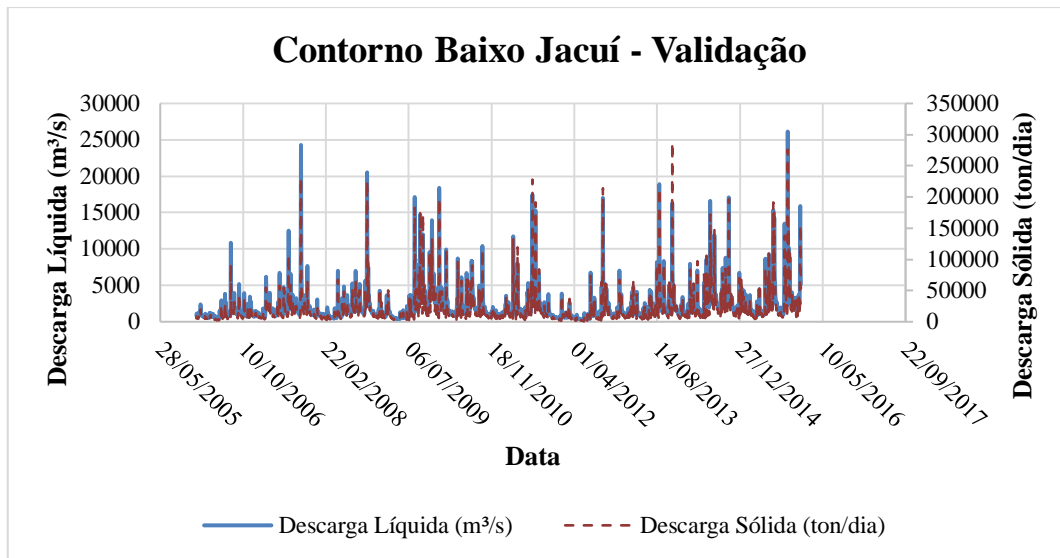


FIGURA 39. SÉRIE TEMPORAL DE NÍVEL DE ÁGUA – CONTORNO LAGUNA DOS PATOS - VALIDAÇÃO

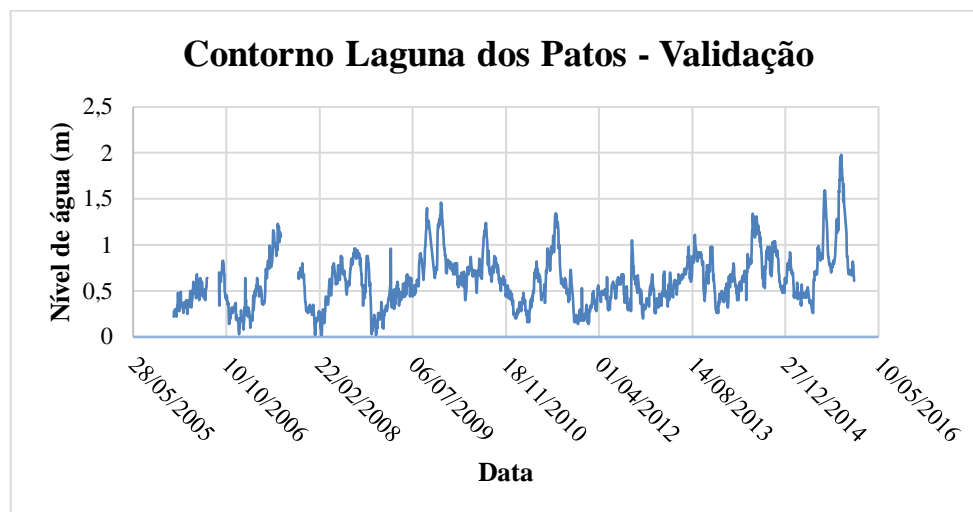


TABELA 14. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DA SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO BAIXO JACUÍ - VALIDAÇÃO

Contorno Baixo Jacuí	Descarga líquida (m³/s)	Descarga sólida (ton/dia)
Máxima	26139,39	287561,32
Média	2181,48	19231,41
Mínima	274,44	580,66
Q90	672,35	4510,8

TABELA 15. VALORES MÁXIMO, MÉDIO E MÍNIMO DA SÉRIE TEMPORAL DE NÍVEL – CONTORNO LAGUNA DOS PATOS - VALIDAÇÃO

Contorno Laguna dos Patos	Nível (m)
Máximo	1,98
Média	0,61
Mínimo	0,02

6.2 RESULTADOS VALIDAÇÃO

A comparação entre dados observados e simulados, nos pontos de controle são apresentadas na FIGURA 40, FIGURA 41 e FIGURA 42 para as estações Cristal, Ipanema e Ponta dos Coatis, respectivamente. Para melhor visualização dos resultados são apresentados apenas o período de um ano das simulações.

A TABELA 16, TABELA 17 e TABELA 18 apresentam as informações estatísticas para todo o período de validação (01/01/2006 a 31/12/2015) dos pontos Cristal, Ipanema e Ponta dos Coatis, respectivamente. Após a calibração do modelo e utilização dos parâmetros, apresentados na TABELA 7, o modelo apresentou resultados satisfatórios. As séries temporais simuladas correspondem as séries observadas em ordem de grandeza e em fase e os coeficientes de Nash-Sutcliffe variaram entre 0,75 e 0,86 nos pontos de controle.

FIGURA 40. SÉRIE TEMPORAL NÍVEL DE ÁGUA OBSERVADO x SIMULADO – ESTAÇÃO CRISTAL - 2009

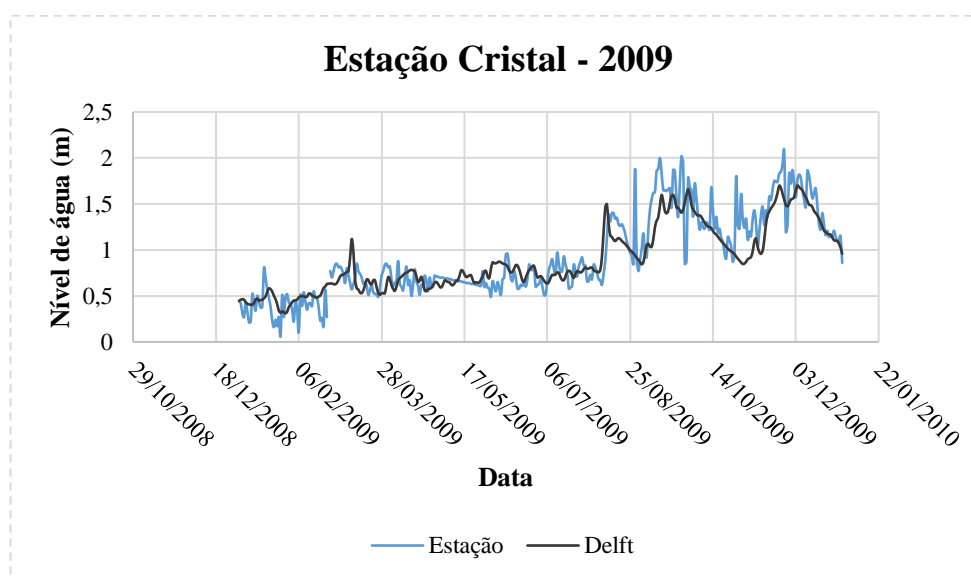


TABELA 16. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS, COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E COEFICIENTE NASH – ESTAÇÃO CRISTAL – PERÍODO TOTAL DE VALIDAÇÃO

Nível d'água (m)	Observado	Simulado
Máximo	2,56	1,63
Médio	0,83	0,62
Mínimo	0,02	0,03
Coefficiente de Correlação (Pearson)	0,87	
Coefficiente de Nash	0,75	

FIGURA 41. SÉRIE TEMPORAL NÍVEL DE ÁGUA OBSERVADO x SIMULADO – ESTAÇÃO IPANEMA - 2010

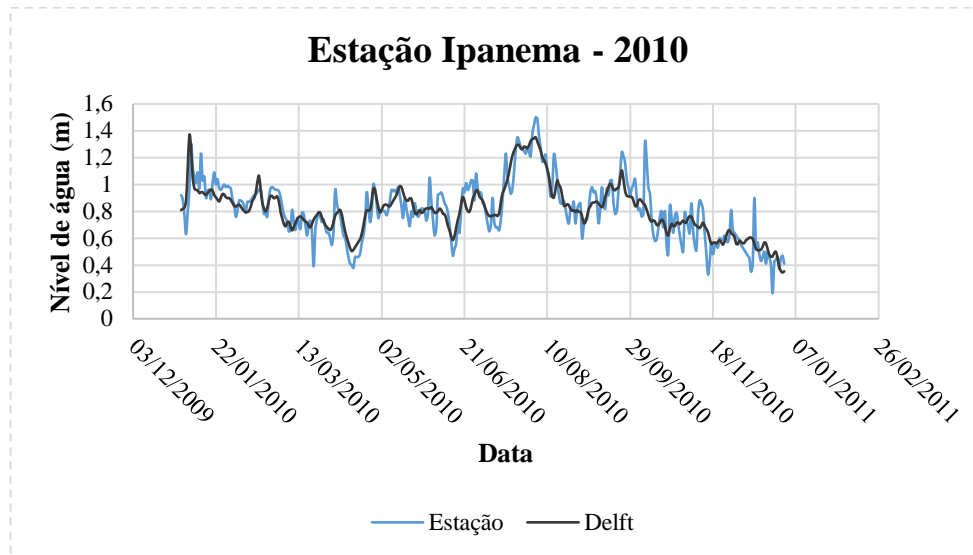


TABELA 17. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS, COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E COEFICIENTE NASH – ESTAÇÃO IPANEMA - PERÍODO TOTAL DE VALIDAÇÃO

Nível d'água (m)	Observado	Simulado
Máximo	2,11	1,5
Médio	0,72	0,61
Mínimo	0,01	0,03
Coefficiente de Correlação (Pearson)	0,93	
Coefficiente de Nash	0,86	

FIGURA 42. SÉRIE TEMPORAL NÍVEL DE ÁGUA OBSERVADO x SIMULADO – ESTAÇÃO PONTA DOS COATIS - 2011

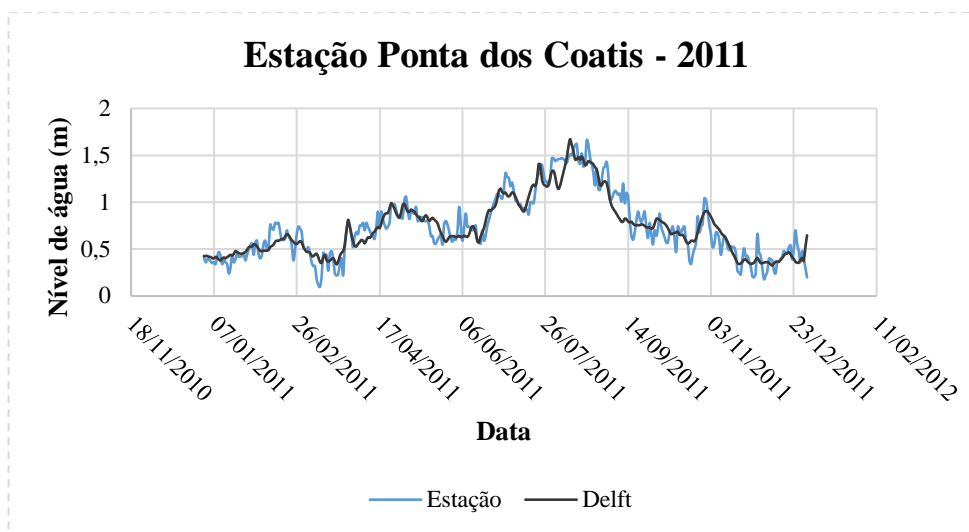


TABELA 18. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS, COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E COEFICIENTE NASH – ESTAÇÃO PONTA DOS COATIS - PERÍODO TOTAL DE VALIDAÇÃO

Nível d'água (m)	Observado	Simulado
Máximo	2,24	1,50
Médio	0,79	0,60
Mínimo	0,03	0,02
Coefficiente de Correlação (Pearson)	0,93	
Coefficiente de Nash	0,86	

Com relação aos resultados do campo de velocidade para o período de validação, o modelo apresenta, os maiores valores na entrada do domínio, desembocadura do Rio Jacuí, e ao logo do canal de navegação. À medida que o domínio se expande, o fluxo forçado pela descarga do Jacuí perde energia e as velocidades apresentam os menores valores.

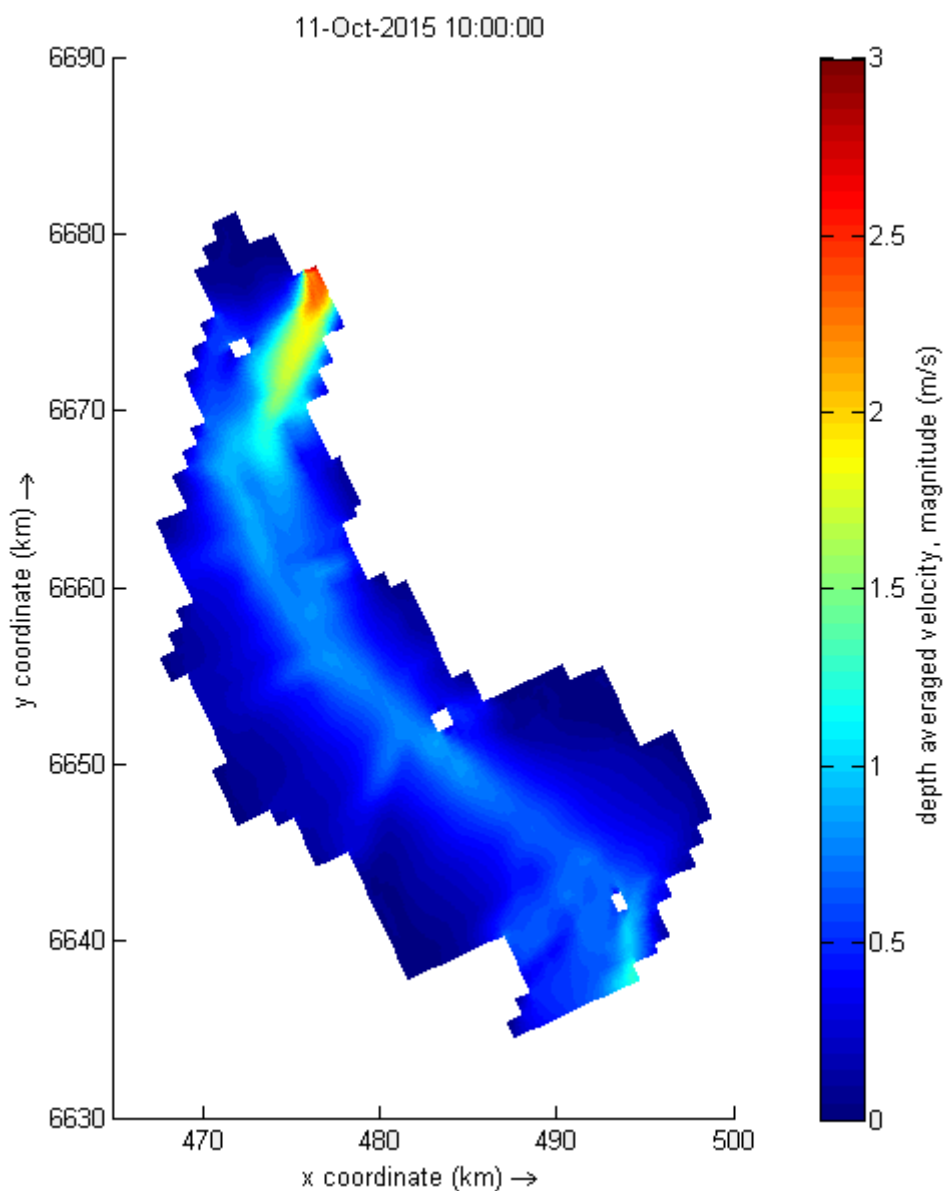
A FIGURA 43 apresenta o mapa do campo de velocidade para o dia 11 de outubro de 2015, quando a vazão atingiu o valor máximo de 26139,39 (TABELA 14), durante o período de validação (01/01/2006 a 31/12/2015). Como comentado anteriormente, os fluxos mais intensos ocorrem próximos a desembocadura do Rio Jacuí, apresentando velocidades entre 2,5 e 3,0 m/s. A corrente segue o fluxo do lago, e atinge velocidades entre 1,5 e 2,0 m/s no canal de navegação na entrada do Guaíba. Conforme o corpo d'água se expande, as maiores velocidades continuam ocorrendo ao longo

do canal de navegação, porém com velocidades da ordem de 1,0 m/s. Próximo às margens, em áreas abrigadas, as velocidades apresentam os menores valores de cerca de 0,02 m/s.

O interessante de analisar a variação espacial do campo de velocidade é que se espera que exista uma forte correlação entre esses ambientes de baixa energia, com as áreas de deposição de sedimento.

FIGURA 43. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE

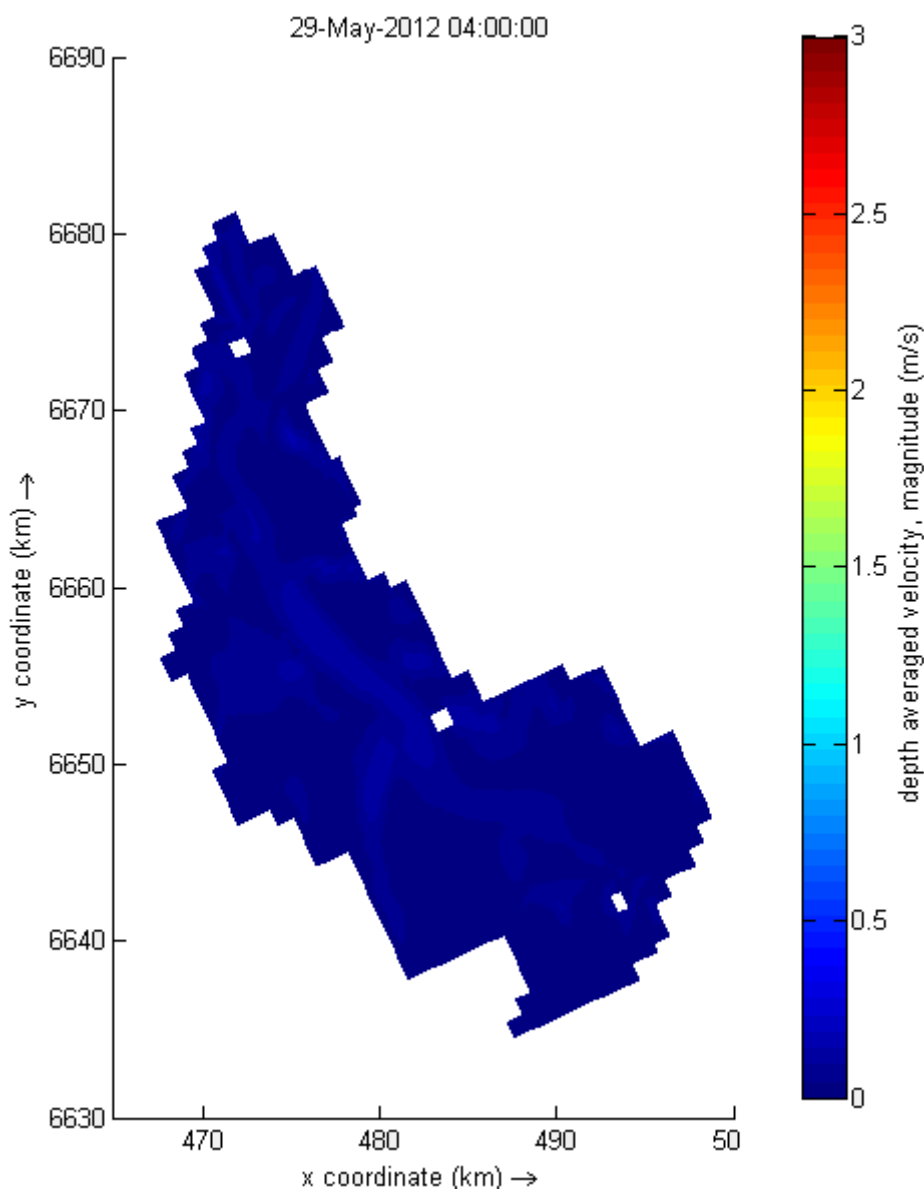
VAZÃO MÁXIMA DO PERÍODO = 26139,39 m³/s



A FIGURA 44 mostra o campo de velocidade para o dia 29 de maio de 2012, quando as vazões descarregadas pelo Jacuí não ultrapassam 275 m³/s, ou seja, período de vazões extremamente baixas. Da mesma forma que para os momentos de elevadas descargas os fluxos se concentram preferencialmente no canal de navegação, mas para os cenários de baixas descargas, as velocidades mais intensas não superaram 0,2 m/s.

FIGURA 44. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE

VAZÃO MÍNIMA DO PERÍODO = 274,45 m³/s



A FIGURA 45 apresenta o mapa de erosão/sedimentação para o período de validação. Assim como para o período de calibração, na validação também foram encontrados ambientes erosionais e deposicionais conforme descritos na literatura (FIGURA 7). As áreas de deposição ocorreram desde a montante do Lago Guaíba chegando próximo da desembocadura do lago, sendo as áreas próximas a desembocadura do Delta do Jacuí com a maior acúmulo de sedimentos, cerca de 3,5 metros ao longo dos 10 anos simulados.

Com relação aos ambientes erosionais, devido as condições de ondas impostas no modelo, estes ocorreram de maneira mais pronunciada próximo a margem esquerda e desembocadura do lago. A retirada de sedimentos destes locais chegou a 1 m. Regiões de estabilidade, onde não ocorreram erosão ou deposição, representam a maior parte do lago.

Importante lembrar que, a taxa de sedimento erodida ou depositada no mapa apresentado corresponde a condição total das simulações, ou seja, desde o início da modelagem no dia 01/01/2006 até o dia 31/12/2015, representado na imagem. A influência de períodos de seca e de alta descarga líquida, na quantidade de sedimentos retirados ou depositados no Guaíba, será apresentada no Capítulo 7.

As séries temporais de variação da taxa de sedimentação nos pontos de controle são apresentadas a seguir:

Na FIGURA 46, FIGURA 47 e FIGURA 48 são apresentados os pontos onde ocorrem deposição de sedimentos, na FIGURA 49 e FIGURA 50 são apresentados os pontos de erosão de sedimentos. O modelo repetiu o padrão encontrado para a calibração, demonstrando áreas de deposição e erosão em regiões já destacadas na literatura. As variações encontradas nas séries temporais estão relacionadas com as variações nas entradas de descarga líquida e sólida no sistema e conforme os pontos se localizam mais distantes dos contornos é possível notar a diminuição nas taxas de deposição e erosão. O aumento abrupto de deposição de sedimentos no ponto Areia_G (FIGURA 46), ponto mais próximo do Contorno Baixo Jacuí, ocorre após a máxima vazão de 26139,39 m³/s no dia 11/10/2015.

FIGURA 45. MAPA DE EROÇÃO / SEDIMENTAÇÃO – PERÍODO DE VALIDAÇÃO

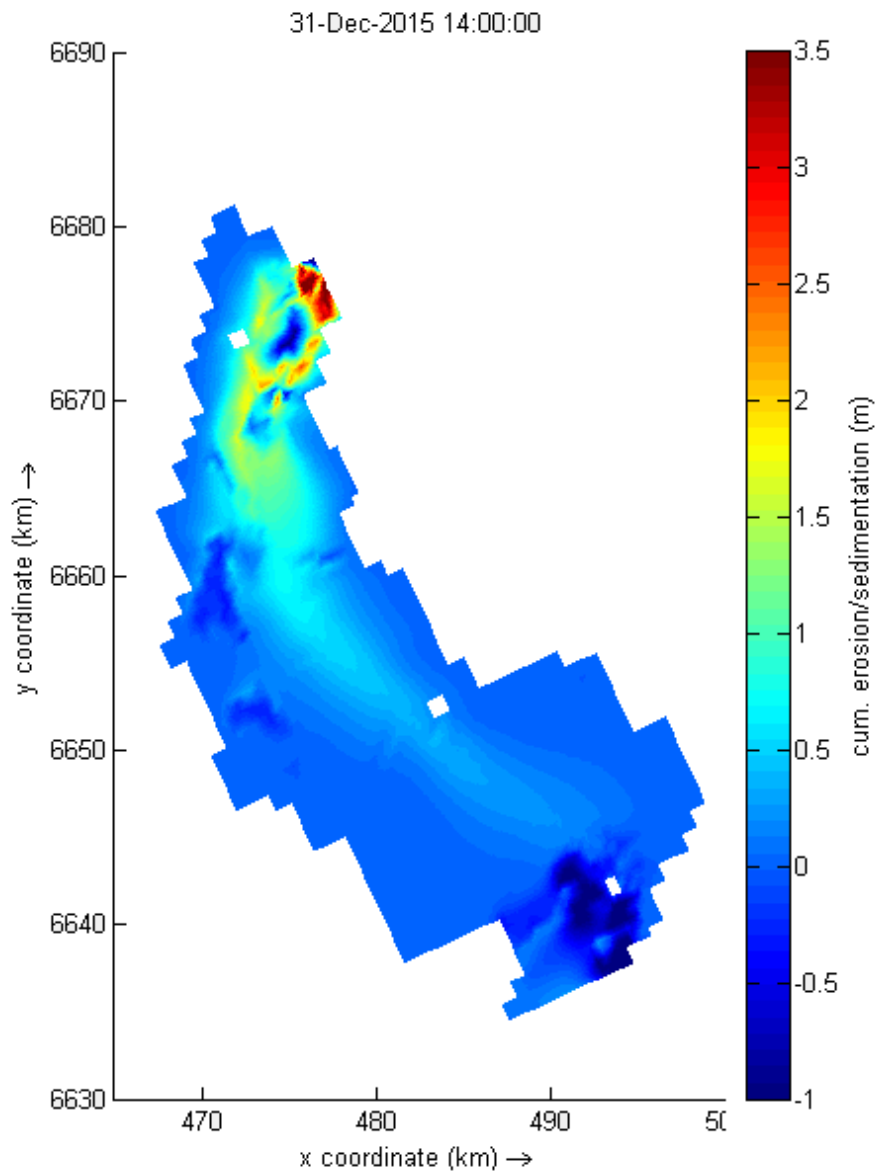


FIGURA 46. SÉRIE TEMPORAL DE EROSIÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO AREIA_G – ALTA DEPOSIÇÃO

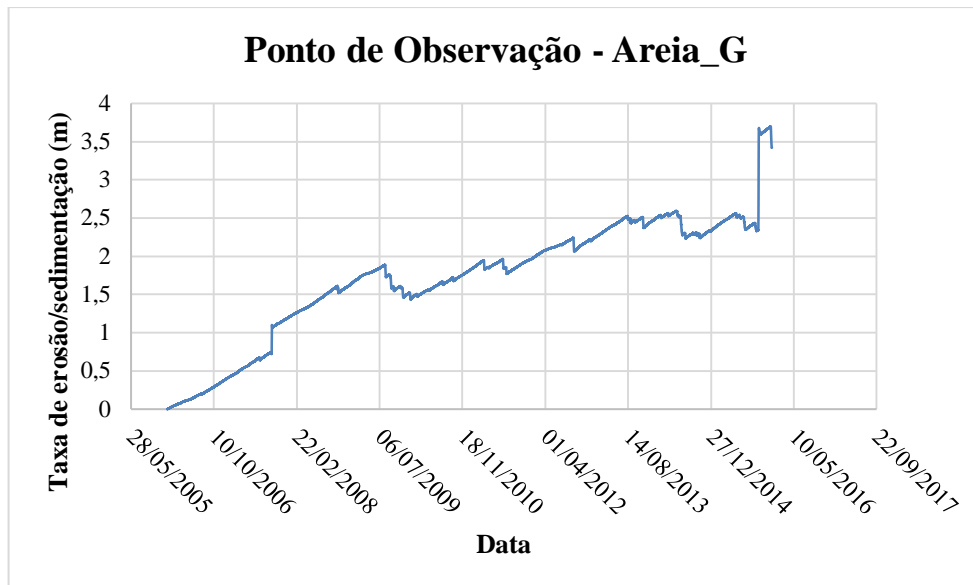


FIGURA 47. SÉRIE TEMPORAL DE EROSIÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO LAMA_3

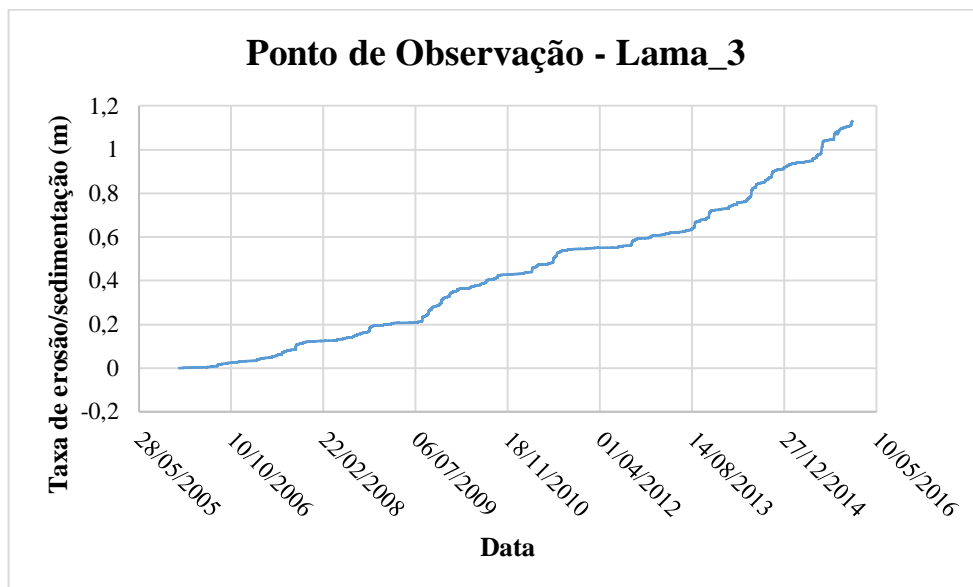


FIGURA 48. SÉRIE TEMPORAL DE EROSIÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO DEPOSIÇÃO

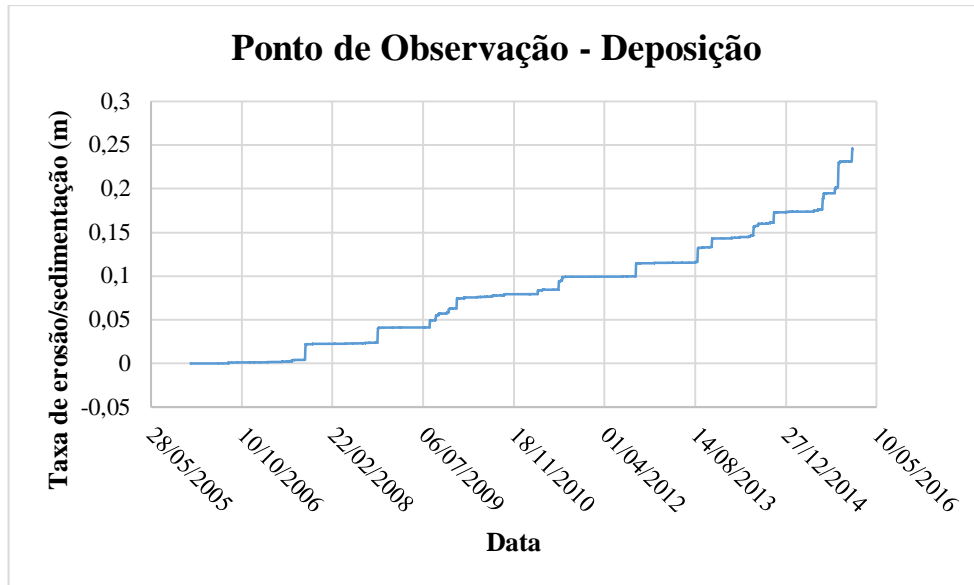


FIGURA 49. SÉRIE TEMPORAL DE EROSIÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO AREIA_G_3 – ALTA EROSIÃO

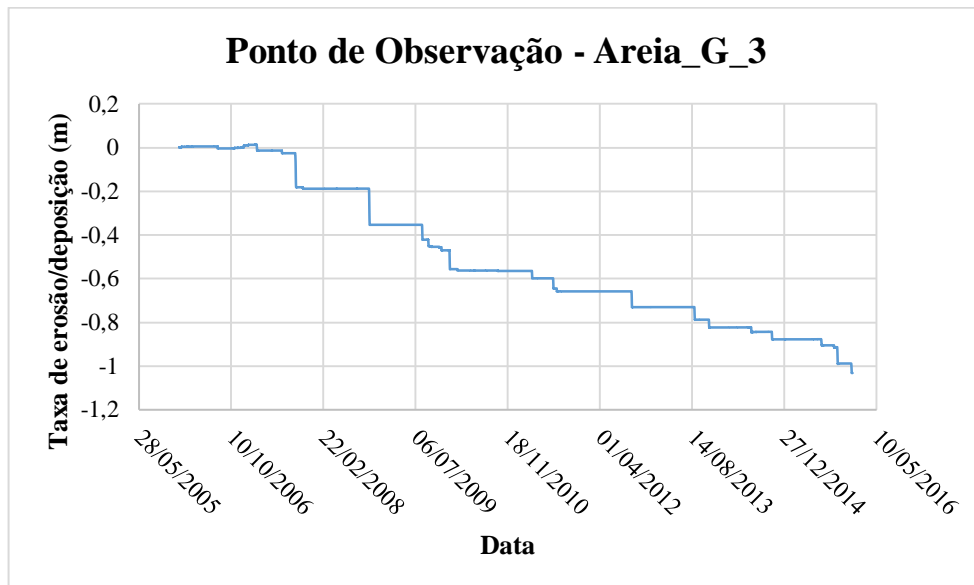
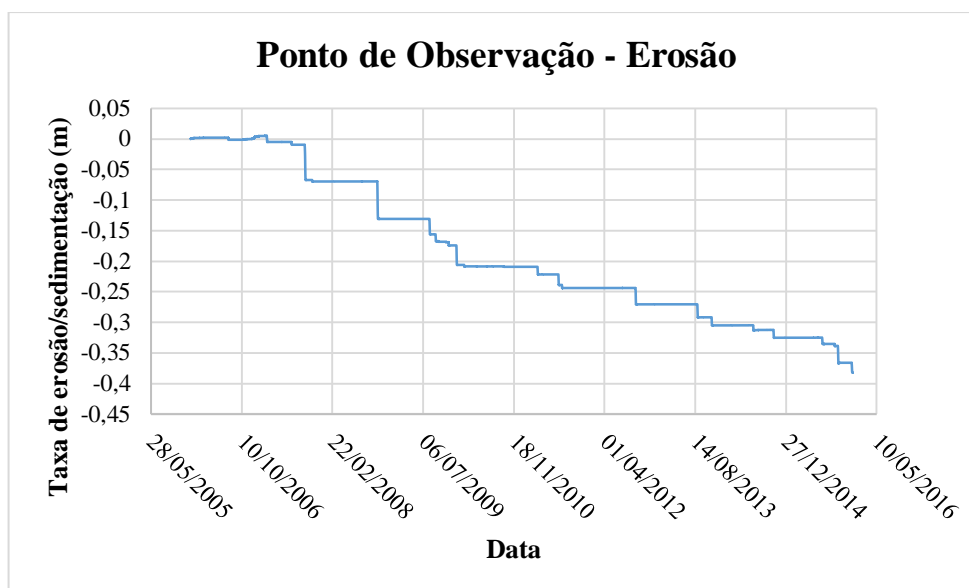


FIGURA 50. SÉRIE TEMPORAL DE EROSIÃO / SEDIMENTAÇÃO – PONTO DE OBSERVAÇÃO EROSIÃO



Para comparação, a TABELA 19 apresenta a taxa anual de erosão ou deposição de sedimentos para cada ponto no período de calibração e validação. A taxa de deposição no ponto Deposição não apresentou variação entre as simulações, as taxas de erosão nos pontos Areia_G_3 e erosão passaram de -0,08 e -0,03 para -0,10 e -0,04, respectivamente. A maior variação ocorreu nos pontos de deposição Areia_G e Lama_3, onde a taxa de deposição no ano passou de 0,25 e 0,20 para 0,34 e 0,11, respectivamente.

TABELA 19. TAXAS DE EROSIÃO / DEPOSIÇÃO POR PONTO – PERÍODO DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Ponto	Taxa/ano - Calibração	Taxa/ano - Validação	Classificação
Areia_G	0,25	0,34	Alta deposição
Lama_3	0,20	0,11	Deposição
Deposição	0,02	0,02	Deposição
Areia_G_3	-0,08	-0,10	Alta erosão
Erosão	-0,03	-0,04	Erosão

7 ANÁLISE DAS TAXAS DE EROSIÃO E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS EM CONDIÇÕES DE ALTA E BAIXA DESCARGA LÍQUIDA

Para avaliar a influência da descarga líquida na dinâmica sedimentar do Lago Guaíba, foram realizadas simulações para dois períodos. Um ano caracterizado por apresentar descargas líquidas baixas e um ano com condição de vazões altas, 2006 e 2015, respectivamente. A FIGURA 51 e

FIGURA 52 apresentam as séries temporais de descarga líquida e sólida para cada ano. Na TABELA 20 e TABELA 21 são apresentadas as informações estatísticas.

FIGURA 51. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA DO ANO DE 2006 – PERÍODO DE BAIXA VAZÃO

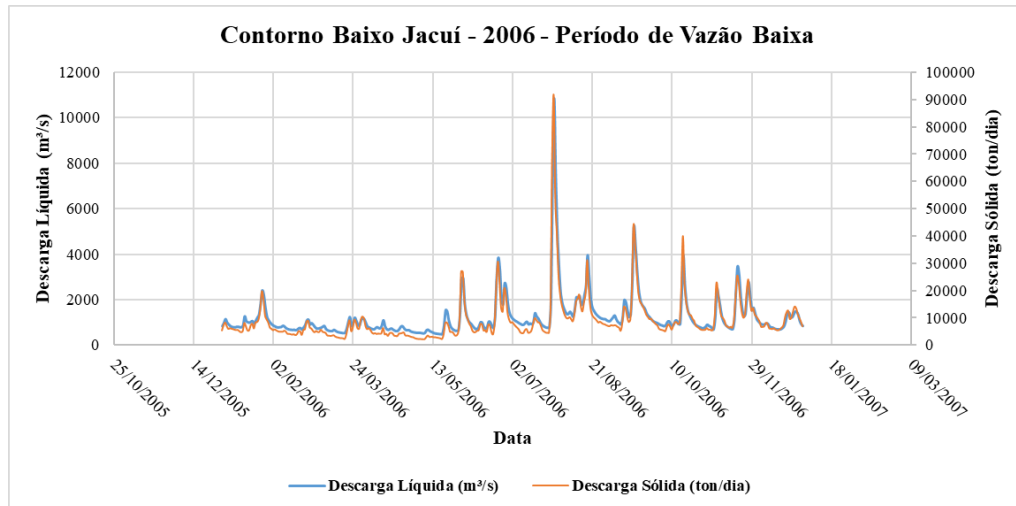


FIGURA 52. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA DO ANO DE 2015 – PERÍODO DE ALTA VAZÃO

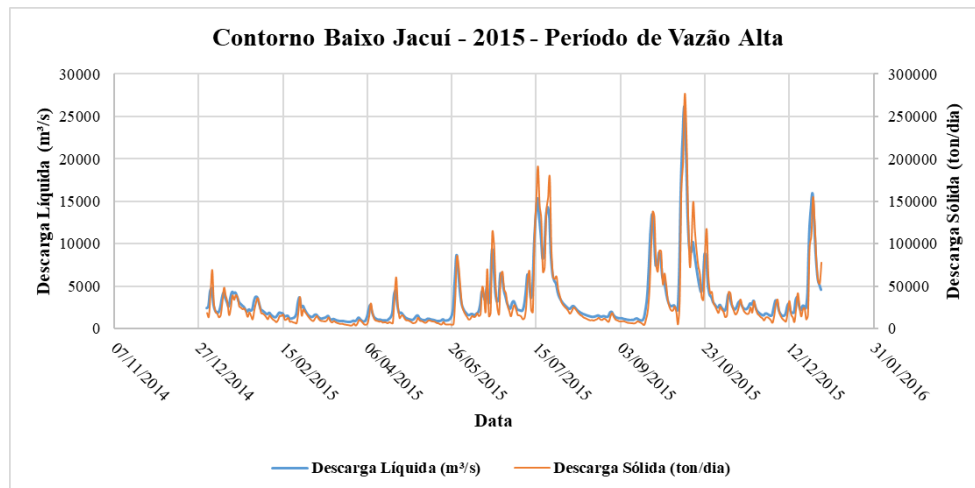


TABELA 20. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DA SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – ANO DE 2006 - PERÍODO DE BAIXA VAZÃO

2006	Descarga Líquida (m³/s)	Descarga Sólida (ton/dia)
Máxima	10862,58	91642,15
Média	1227,02	9159,37
Mínima	472,77	2232,72
Q90	645,50	3612,15

TABELA 21. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DA SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – ANO DE 2015 - PERÍODO DE ALTA VAZÃO

2015	Descarga Líquida (m³/s)	Descarga Sólida (ton/dia)
Máxima	26139,39	275913,07
Média	3333,99	31061,80
Mínima	803,12	4297,73
Q90	1053,52	7433,14

Em ambas as condições as áreas de maior deposição apresentam-se na entrada no Lago Guaíba, seguindo em direção ao centro do lago. Em condições de alta descarga (FIGURA 54) as áreas de deposição ocorrem por quase toda a extensão do canal de navegação. As áreas de erosão na desembocadura do lago foram evidenciadas no ano de 2015.

Ao final de um ano de simulação, com condição de baixa descarga líquida (FIGURA 53) a deposição máxima foi de 0,3 m e a máxima erosão foi de 0,1 m. Enquanto que para o período de vazão alta (FIGURA 54) a máxima deposição foi de 0,6 m e a máxima retirada de sedimentos foi de 0,4 m. Os resultados encontrados demonstram a importância da descarga líquida na dinâmica sedimentar do Lago Guaíba.

Como já descrito na literatura, a ação das ondas é o fator determinante para que ocorra erosão no interior do Lago Guaíba, as ondas interagem com o fundo do lago ressuspensando os sedimentos que estavam depositados. Com o aumento da descarga líquida, que conseqüentemente aumenta a velocidade das correntes, os sedimentos suspensos na coluna de água podem ser carregados mais facilmente pelo fluxo de água, intensificando o processo de erosão.

Os maiores valores de deposição encontrados para o ano de 2015 (alta descarga) estão associados a maior entrada de descarga sólida no sistema.

FIGURA 53. MAPA DE EROSIÃO / DEPOSIÇÃO – PERÍODO DE BAIXA DESCARGA LÍQUIDA

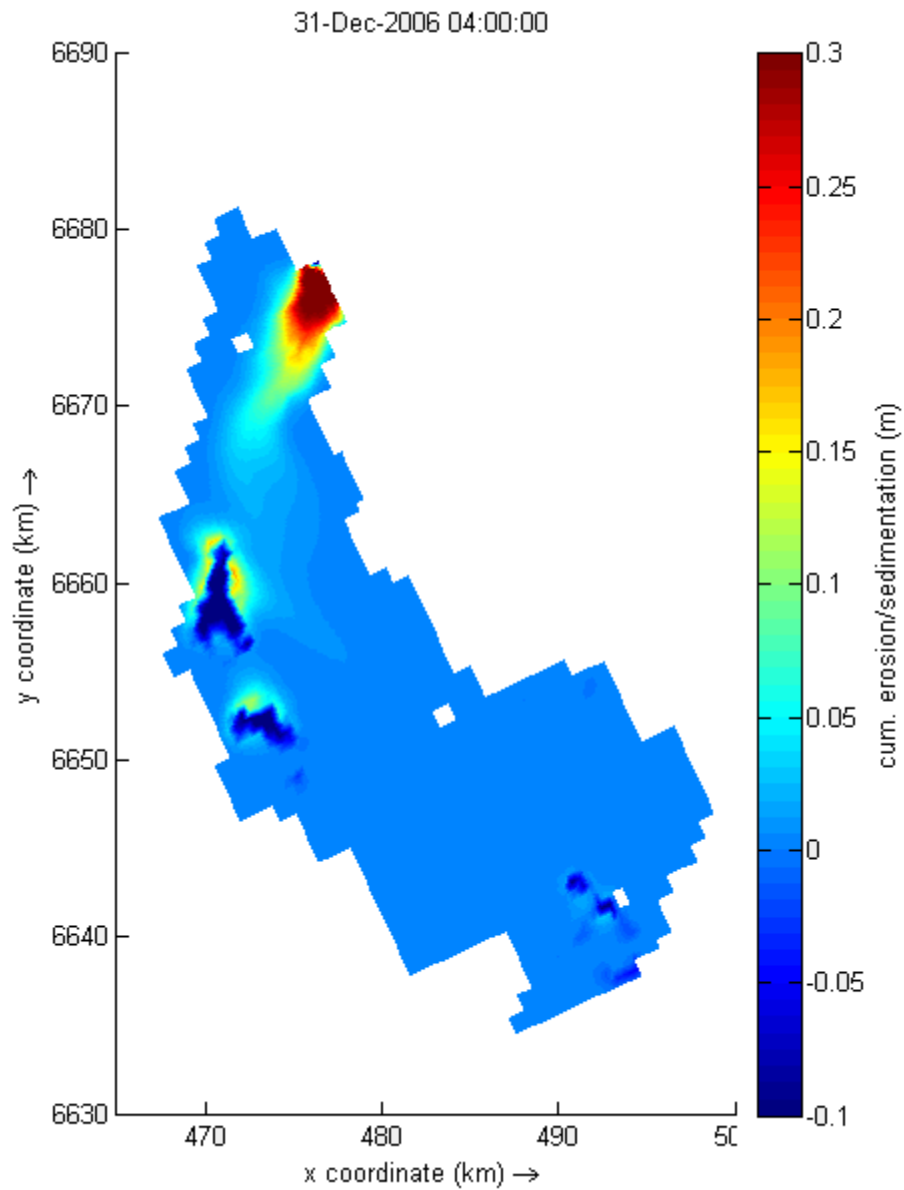
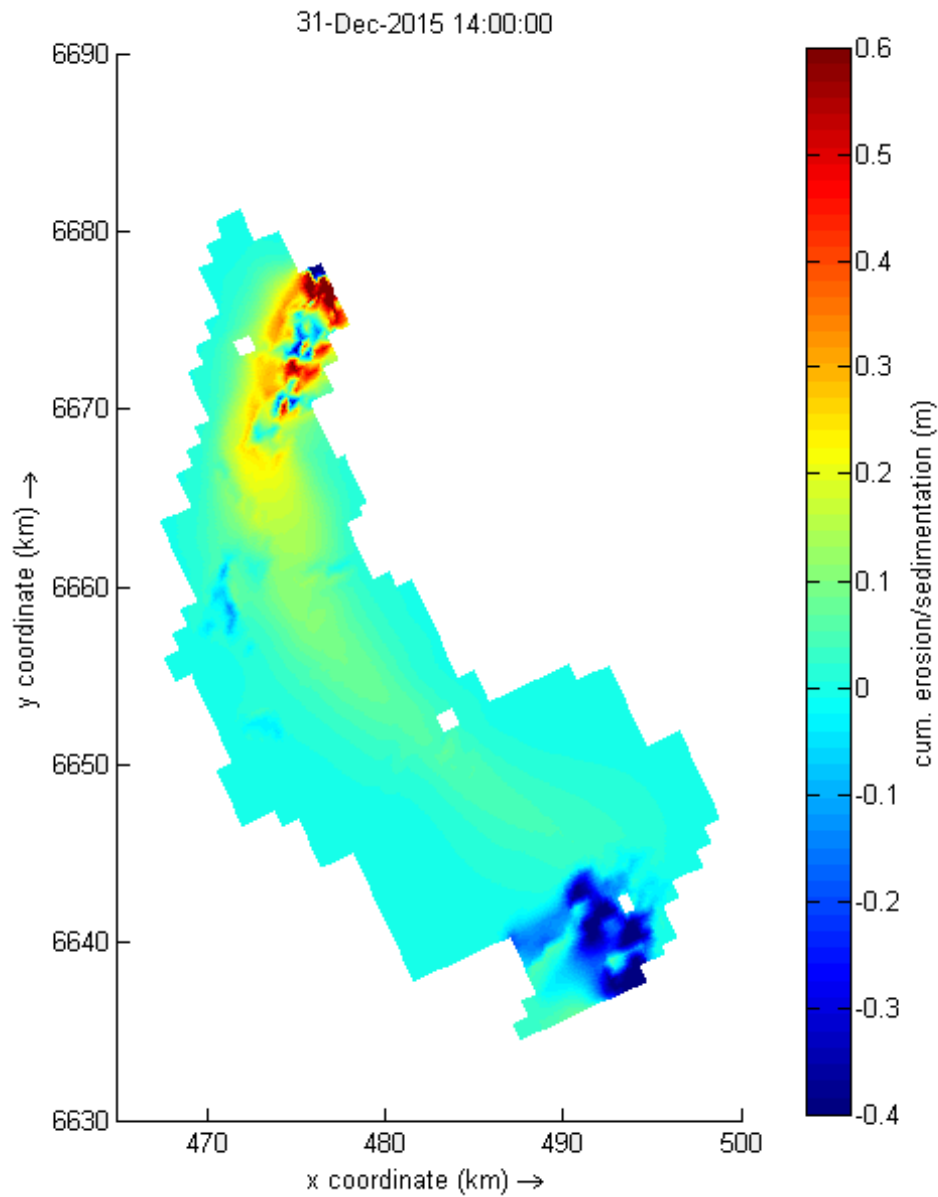


FIGURA 54. MAPA DE EROÇÃO / DEPOSIÇÃO – PERÍODO DE ALTA DESCARGA LÍQUIDA



8 ANÁLISE DE DEPOSIÇÃO/TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COESIVOS E NÃO-COESIVOS

Estudos sobre o tipo de sedimento de fundo na Laguna dos Patos revelaram que praticamente toda a região é dominada pela presença de sedimentos coesivos, basicamente silte e argila. Ou seja, a pouca areia, oriunda do Jacuí, que entra no domínio do Lago Guaíba, deposita-se e não é transportada para a laguna. Para analisar o transporte dos sedimentos que entram no Guaíba através do Rio Jacuí, foram realizadas simulações com sedimentos coesivos e sedimentos com granulometria característica de areia média a grossa e fina.

A primeira análise ocorreu para as condições naturais do Lago Guaíba, descarga líquida e sólida conforme as saídas do Módulo II, com entrada de sedimentos coesivos (silte e argila) e areia de granulometria de média a grossa. Os resultados obtidos mostram que em situações de descargas elevadas (FIGURA 55), os sedimentos coesivos são transportados em suspensão ao longo do eixo principal do domínio, chegando ao limite Sul, onde se encontra a conexão com a Lagoa dos Patos. Este processo também foi observado por Tavora e colaboradores (2019). No dia 11/10/2015 a concentração de sedimentos coesivos em suspensão apresentou valores acima de $0,7 \text{ kg/m}^3$ na entrada do lago e cerca de $0,6 \text{ kg/m}^3$ saíam do sistema em direção a Laguna dos Patos. Devido a sua baixa granulometria e alta energia das correntes, não foi observado transporte de fundo significativo de sedimentos coesivos no período.

Ao contrário dos sedimentos coesivos, a concentração de sedimentos não-coesivos (areia) em suspensão na coluna de água (FIGURA 56), para a mesma situação de fluxo intenso, ocorre somente no extremo norte do domínio, e por um curto espaço, voltando a se depositar em seguida. Devido a isto, a concentração de sedimentos não-coesivos em suspensão na entrada do Lago Guaíba foi a maior, apresentando valores da ordem de 2 kg/m^3 . Para o transporte de fundo de sedimentos não-coesivos (FIGURA 57) foi possível observar pequenas porções de areia até mais da metade da extensão do lago. O valor médio para o transporte de fundo na entrada do lago foi de $6 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}}$.

Em condições de descarga baixa ($1070,65 \text{ m}^3/\text{s}$), os sedimentos coesivos em suspensão concentraram-se próximo a desembocadura do Jacuí (FIGURA 58). Não foi possível observar transporte em suspensão (FIGURA 59) e de fundo (FIGURA 60) de areia.

FIGURA 55. TRANSPORTE EM SUSPENSÃO DE SEDIMENTO COESIVOS (SILTE E ARGILA) VAZÃO MÁXIMA DO PERÍODO = 26139,39 m³/s

ENTRADA DE SEDIMENTOS COESIVOS NO CONTORNO = 230397,5 ton

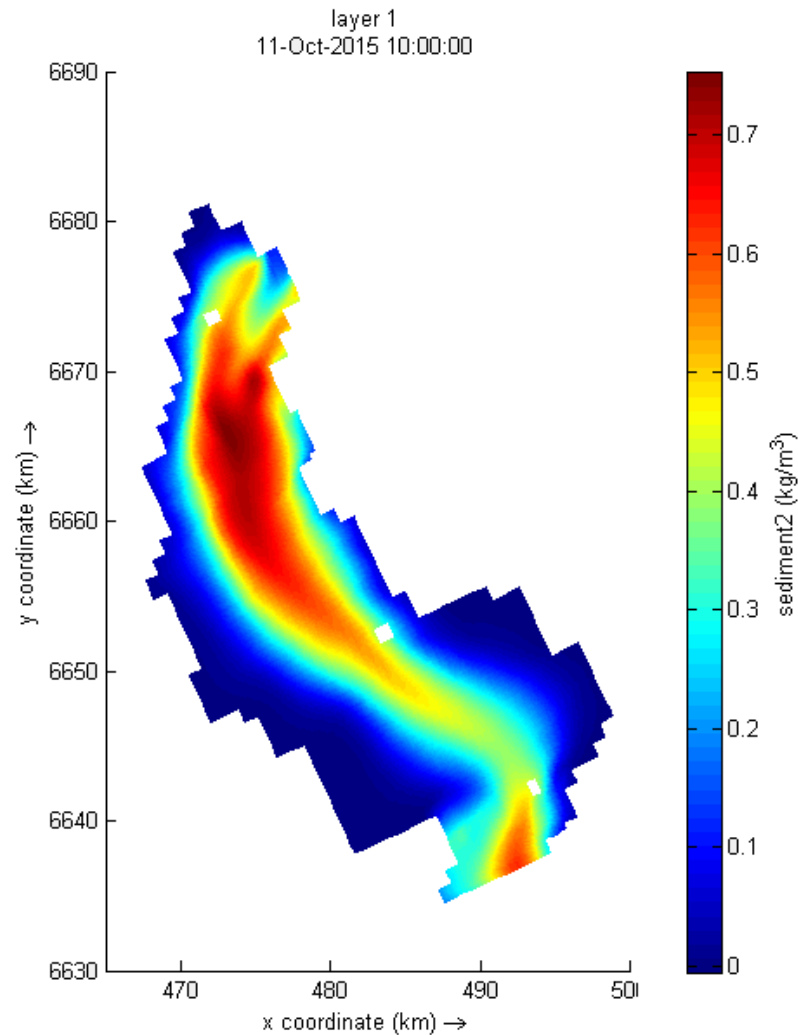


FIGURA 56. TRANSPORTE EM SUSPENSÃO DE SEDIMENTO NÃO-COESIVOS (AREIA MÉDIA A GROSSA)

VAZÃO MÁXIMA DO PERÍODO = 26139,39 m³/s

ENTRADA DE AREIA NO CONTORNO = 45515,6 ton

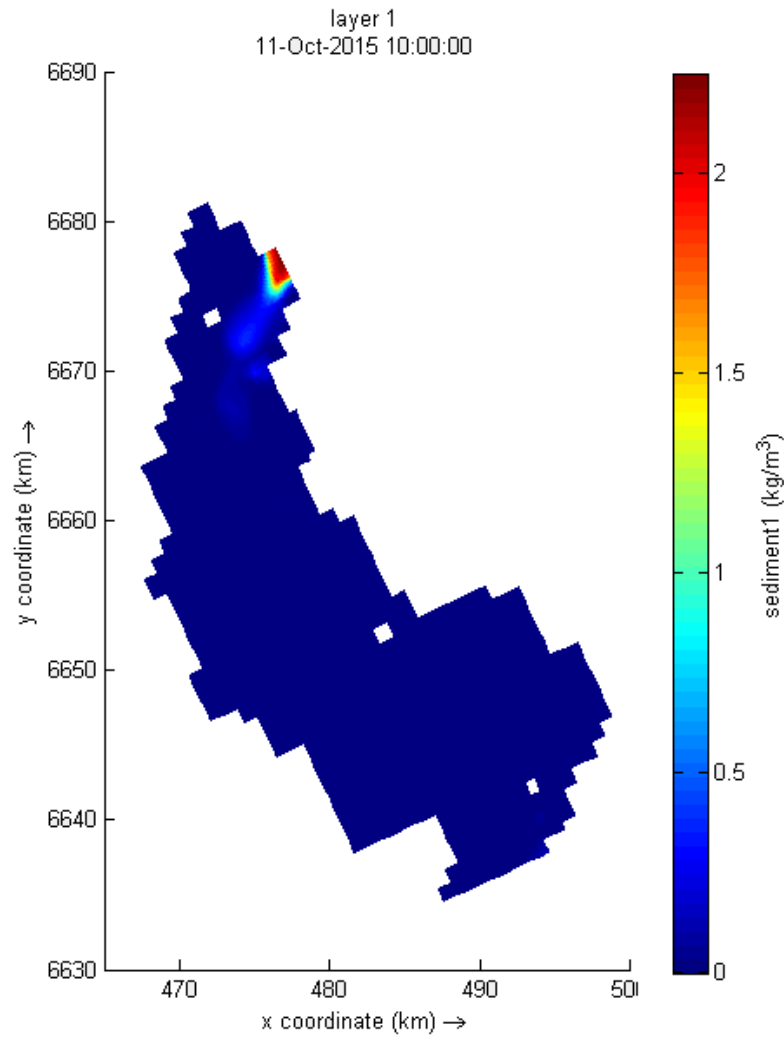


FIGURA 57. TRANSPORTE DE FUNDO DE SEDIMENTO NÃO-COESIVOS (AREIA)

VAZÃO MÁXIMA DO PERÍODO = 26139,39 m³/s

ENTRADA DE AREIA NO CONTORNO = 45515,6 ton

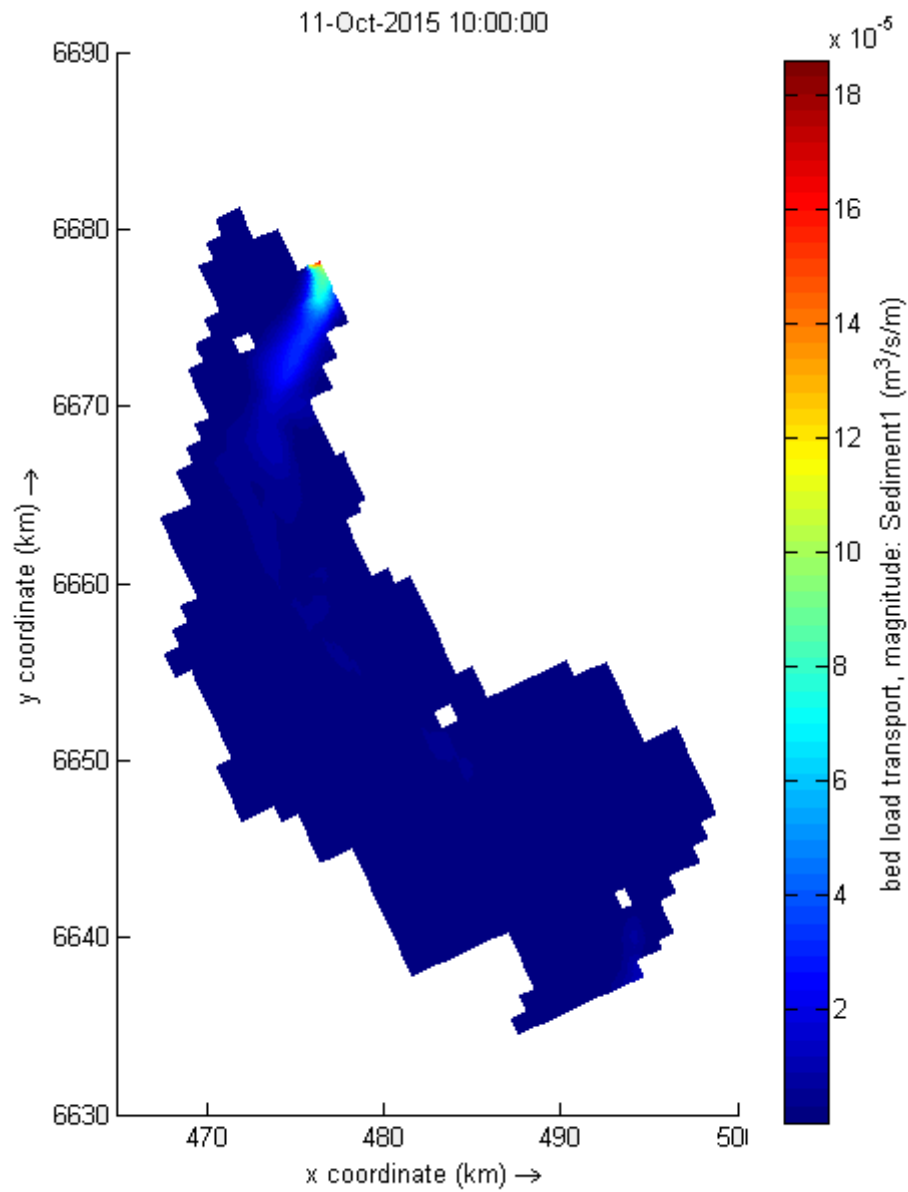


FIGURA 58. TRANSPORTE EM SUSPENSÃO DE SEDIMENTO COESIVOS (SILTE E ARGILA) - DESCARGA LÍQUIDA = 1070,65 m³/s

ENTRADA DE SEDIMENTOS COESIVOS NO CONTORNO = 6563,2 ton

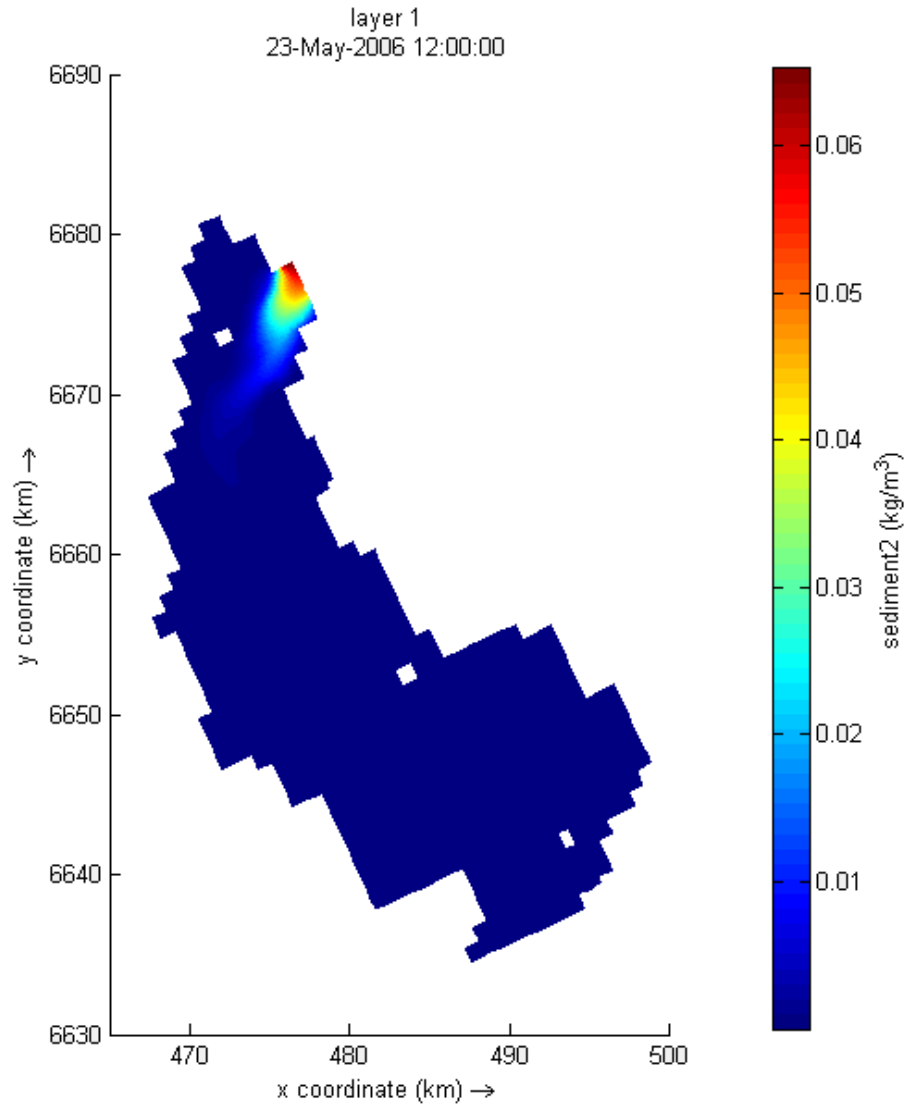


FIGURA 59. TRANSPORTE EM SUSPENSÃO DE SEDIMENTO NÃO-COESIVOS (AREIA)

DECARGA LÍQUIDA = 1070,65 m³/s

ENTRADA DE AREIA NO CONTORNO = 547,4 ton

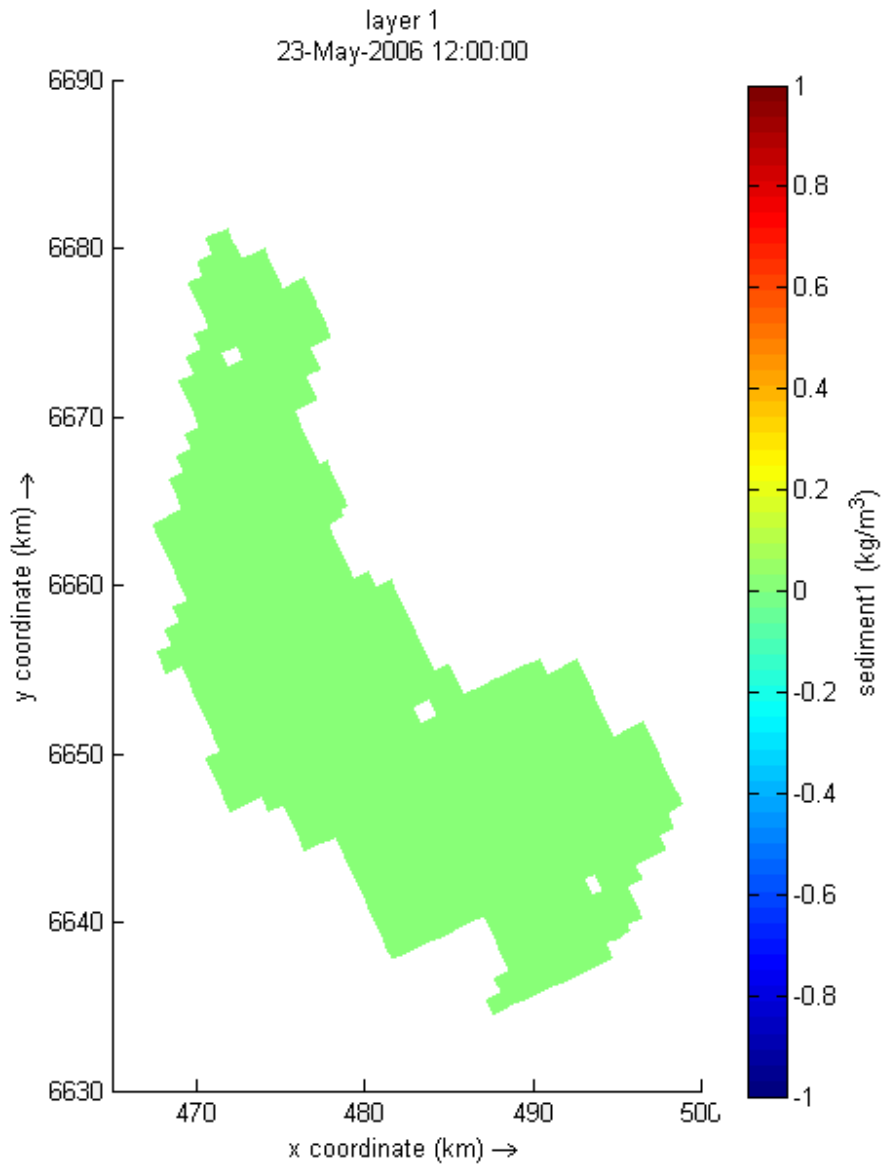
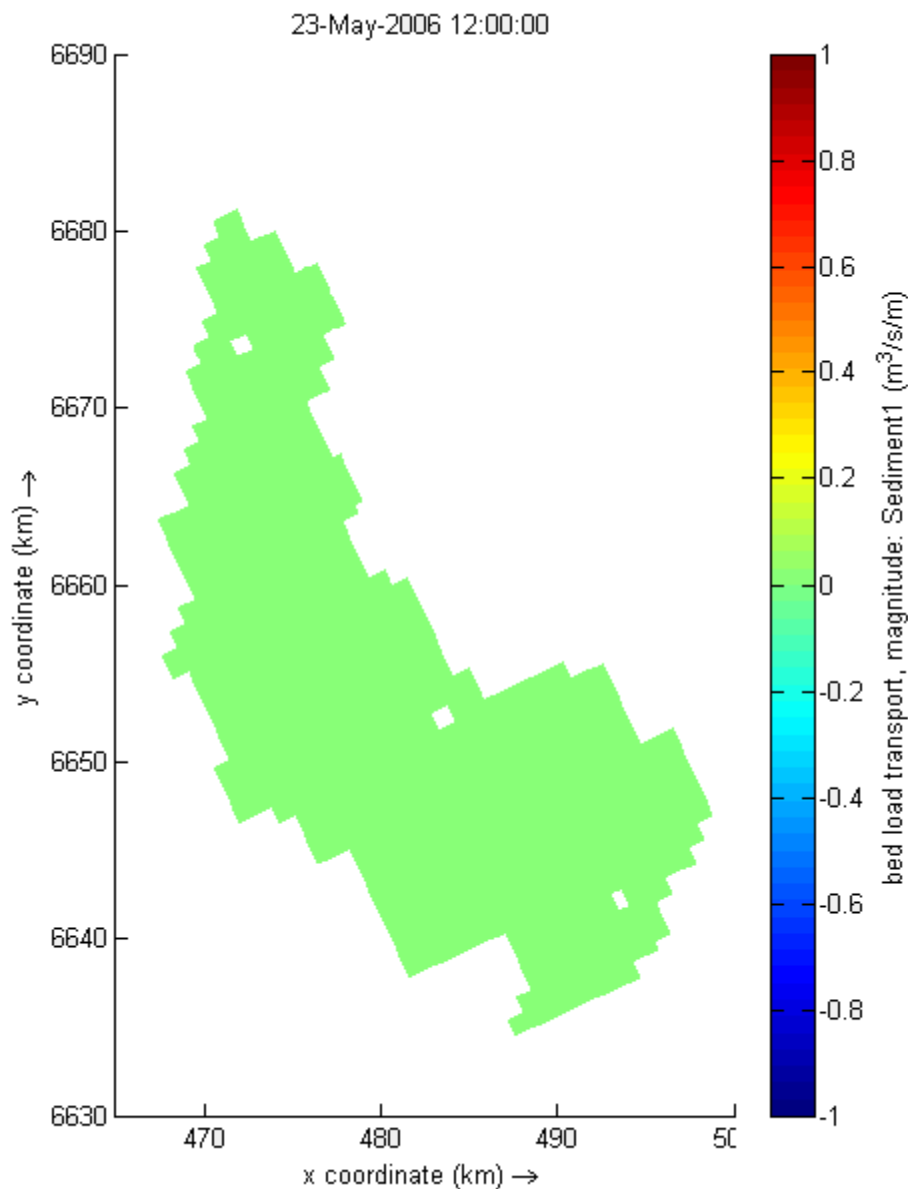


FIGURA 60. TRANSPORTE DE FUNDO DE SEDIMENTO NÃO-COESIVOS (AREIA)

DECARGA LÍQUIDA = 1070,65 m³/s

ENTRADA DE AREIA NO CONTORNO = 547,4 ton

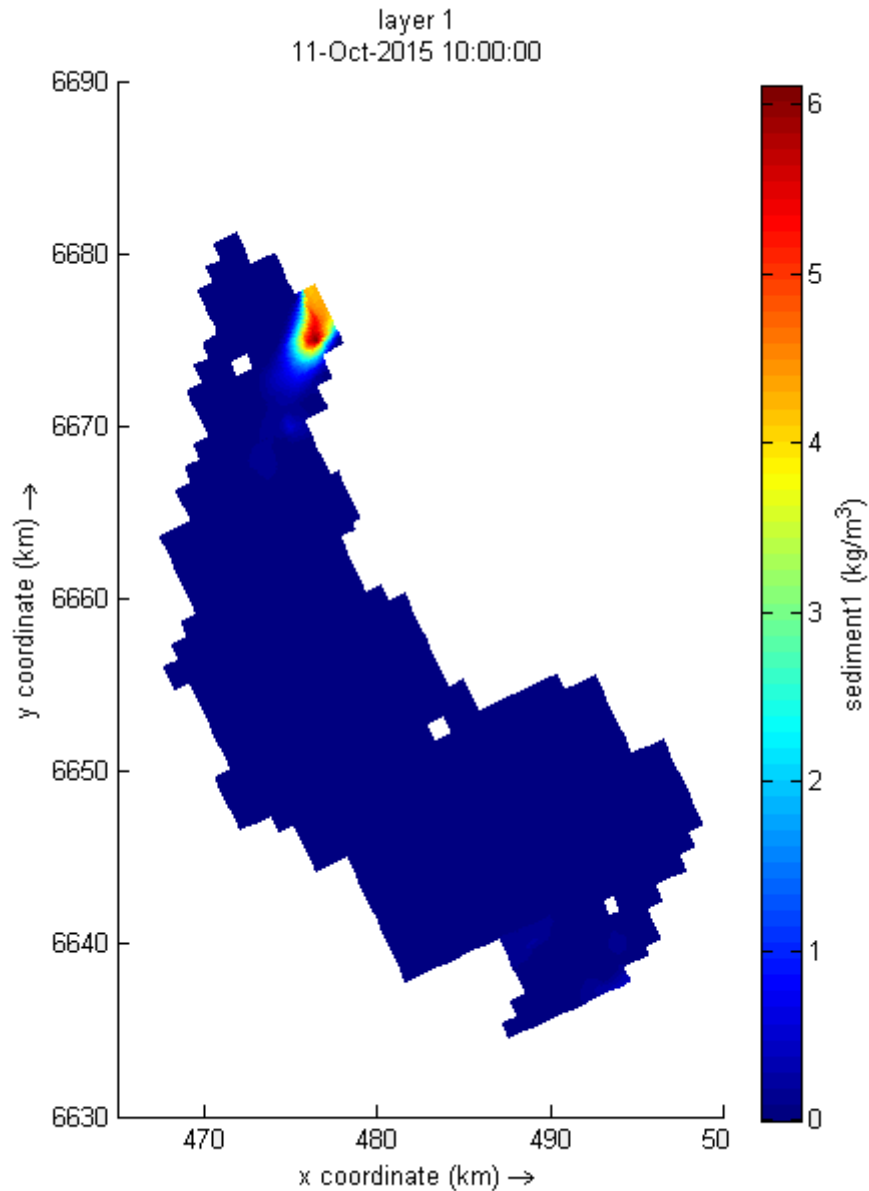


Para avaliar o comportamento de areias com menor granulometria, foram realizados testes simulando apenas a entrada de areia fina no sistema. Mesmo os sedimentos não-coesivos mais leves, caracterizados por areias finas, não são transportados por longas distâncias. A comparação da pluma de sedimento em suspensão representada pela FIGURA 56 (areia média a grossa), com a pluma de areia fina (FIGURA 61), mostra que o sedimento mais leve continua limitado ao Norte do domínio. Esse fato está de acordo com as informações de distribuição de sedimento de fundo no Lago Guaíba,

onde coletas realizadas evidenciaram presença de areia no limite Norte, a jusante da desembocadura do Rio Jacuí.

Não foram observadas alterações no transporte de fundo de areia fina, quando comparado com o transporte de areia média a grossa.

FIGURA 61. TESTE TRANSPORTE EM SUSPENSÃO DE AREIA – DESCARGA LÍQUIDA = 26139,39 m³/s – AREIA FINA - DESCARGA DE AREIA = 275913,1 ton



9 CONCLUSÕES

A hidrodinâmica e o transporte de sedimentos coesivos e não coesivos foram simulados para a área do Lago Guaíba. As principais forçantes consideradas nas simulações foram as descargas líquidas e sólidas, oriundas do Rio Jacuí, forçantes meteorológicas e o campo de ondas. As ondas foram introduzidas no domínio de duas formas: (a) no contorno Sul, através da especificação de sua direção predominante e altura significativa; (b) através da imposição de um campo de vento constante, com intensidade de 10m/s e direção Sul.

Os resultados obtidos mostram que o principal meio de transporte dos dois tipos de sedimento é o transporte em suspensão e se dá em momentos de descargas elevadas, superiores a 8.000 m³/s. Os sedimentos mais pesados (areia) se depositam na porção mais ao norte do domínio e seu transporte, em momentos de elevadas descargas, provoca seu espalhamento, mesmo assim as maiores concentrações de areia no fundo, ficam restritas ao extremo norte do domínio, ocorrendo em menor proporção na região central do lago.

As velocidades mais intensas, superiores a 2,0 m/s, provocadas pelas vazões extremas, geram o transporte dos sedimentos mais leves, coesivos, por todo o domínio, até a conexão com a Laguna dos Patos, onde ocorre a sua expulsão para fora do domínio desse modelo.

Com base nas forçantes utilizadas para gerar a circulação hidrodinâmica no interior no Guaíba, não foi observado o transporte de sedimentos mais pesados para fora do domínio. A energia dos fluxos gerados não é suficiente para remobilizar a areia e transportá-la até o limite da fronteira Sul.

Em simulações onde não foram consideradas o campo de ondas como forçante, não se observou nenhum ponto de erosão. Com a introdução do campo de ondas, duas importantes área de erosão, localizadas na margem direita, e uma no limite sul, próxima à conexão com a Laguna dos Patos, foram observadas. Com isso, conclui-se que as ondas desempenham um importante papel na remobilização do sedimento de fundo no Lago Guaíba.

Nas simulações com ondas foram considerados ventos com intensidades entre 7 e 10 m/s e os resultados mostram que as erosões mais importantes surgem somente com ventos Sul, e com intensidade da ordem de 10 m/s, que geram ondas com altura significativa da ordem de 0,5 m. Importante salientar que às áreas de erosão, localizadas na margem direita, surgem em função das ondas geradas localmente pela ação dos ventos. As ondas oriundas da Laguna dos Patos, que entram no sistema pelo contorno Sul, perdem energia e se limitam a provocar erosões no domínio Sul do Guaíba.

Como comentado anteriormente, as duas principais áreas de erosão foram observadas na margem direita do Guaíba, sendo que a mais importante possui dimensão da ordem de 6000 m². As séries temporais geradas nos pontos de monitoramento localizados na margem direita, apontam para perdas de sedimentos a uma taxa de 0,03 m por mês.

As áreas de baixa energia, localizadas nas duas margens do canal de navegação, coincidem com as áreas de deposição de sedimento mencionadas na literatura, principalmente os sedimentos mais leves. As séries temporais geradas pelos pontos de monitoramento localizados nessas áreas apontam para uma taxa deposição da ordem de 0,02 m por mês. Entretanto deve-se salientar que essas taxas foram obtidas para uma situação de campo de ondas específica. Para situações, onde as forças do campo de ondas não permaneçam constantes ao longo do tempo, essas taxas de erosão/deposição certamente poderão variar. Além do campo de ondas, o aumento da descarga líquida demonstrou ser determinante para as variações nas taxas de erosão/deposição.

10 REFERÊNCIAS

- ANDRADE NETO, J. S.; RIGON, L. T.; TOLDO JR., E. E.; SCHETTINI, C. A. F.; Descarga sólida em suspensão do sistema fluvial do Guaíba, RS, e sua variabilidade temporal. **Pesquisas em Geociências**, 39 (2): 161-171, maio/ago, 2012.
- ANDRADE, L. C. **Impactos do ambiente urbano na poluição dos sedimentos do lago Guaíba**. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2018.
- BACHI, F. A.; BARBOZA, E. G.; TOLDO JÚNIOR, E. E. **Sedimentação do Guaíba – RS**. Centro de Estudos em Geologia Costeira e Oceânica (CECO) – Instituto de Geociências/Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.
- BELOV. **Relatório do Levantamento Geofísico com Sísmica de Alta Resolução na Área do Lago Guaíba – RS**. Contrato nº 18/2018. RELATÓRIO: N°01.HID.021/18-RE.001- R0. 2019.
- BELLOS, V.; NALBANTIS, I.; TSAKIRIS, G. **Friction modeling of flood flow simulations**. Journal of Hydraulic Engineering, v. 144, n. 12, p. 04018073, 2018.
- BERNARDO, J. W. Y. **Interpretation and Applicability of Residence Times in Reservoirs**. Curitiba. Dissertação de Mestrado. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Universidade Federal do Paraná. 2013.
- DA PAZ, A. R.; DE MOURA REIS, L. G.; LIMA, H. V. C. Uso de Modelagem Hidrodinâmica Visando a Segmentação de Corpos d'água Rasos para Enquadramento: O Caso do Lago Guaíba (RS). In: **XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. 2005.
- DELTARES. User Manual - Delft3D - FLOW. WL | Delft Hydraulics, 2012.
- DELTARES. User Manual - Delft3D - WAVE. WL | Delft Hydraulics, 2014.
- ECOPLAN. **PHB – Plano da Bacia Hidrográfica do Lago Guaíba. RS – Relatório Final Síntese e SIG – Revisão 1**. Processo Administrativo N° 12618-0500/12-0. Abril 2016.
- ENGEPLUS. Relatório Técnico 3: Consolidação do diagnóstico da bacia - RT3 (Tomo I) Edição Revisada., **Planejamento da Bacia Hidrográfica do Baixo Jacuí, Fases “A”, “B” e “C”**., Estado do Rio Grande do Sul, Secretaria do Meio Ambiente, Departamento de Recursos Hídricos. Processo Administrativo nº 011108-0500/12-0. fevereiro 2015.
- HARTMANN, C.; BULLA, L. A. S.; FELLINI, B. D. "Uso do ADCP na avaliação do fluxo e no transporte de sedimentos no baixo rio Jacuí, Charqueadas, RS/Brasil." **GRAVELV8 N1.**, 2010.
- HYDRAULICS, Delft. **Delft3D-Flow user's manual: simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments**. WL Delft Hydraulics, Netherland, 2014.
- LIMA, J. E. F. W.; LOPES, W. T. A.; CARVALHO, N. D. O.; SILVA, E. M. D.; VIEIRA, M. R. Fluxo de sedimentos em suspensão no exutório de grandes bacias hidrográficas em território brasileiro. In: **VII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**. 2007.

LOPES, G. M. **Aplicação de um modelo numérico hidrodinâmico para as Baías de Paranaguá e Antonina-PR**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2010.

MIRANDA, L., B de; CASTRO, B.M de; KJERFVE, Björn. **Princípios de oceanografia física de estuários**. São Paulo: EDUSP, 2002.

MIRANDA, T., Resposta da Hidrodinâmica do Complexo Estuarino de Paranaguá –PR a Sistemas Frontais. **Dissertação de mestrado**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná. 2016.

NICOLODI, J. L. O padrão de ondas no Lago Guaíba e sua influência nos processos de sedimentação. Porto Alegre, 179p. **Tese de Doutorado**, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2007.

NICOLODI, J. L., TOLDO JR, E. E.; FARINA, L. **Dynamic and resuspension by waves and sedimentation pattern definition in low energy environments: guaíba lake (Brazil)**. Brazilian Journal of Oceanography, 61(1), pp.55-64. 2013.

PAZ, A. R.; REIS, L. G. M.; LIMA, H. V. C. **Uso de modelagem hidrodinâmica visando a segmentação de corpos d'água rasos para enquadramento: o caso do Lago Guaíba (RS)**. In: XVI Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa, 20 a 24 de novembro de 2005.

RIBAS, T. M. **Implementação de modelo numérico para estudo hidrodinâmico das baías de Antonina e Paranaguá- PR**. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2004.

RIJN, L. C. VAN; WALSTRA, D. J. R. **Modelling of Sand Transport in Delft3D**. WL | Delft Hydraulics, 2003.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E. LAUTERT, L. F. **Hidrometria Aplicada**. LACTEC, Curitiba. 2001.

SCOTTÁ, F. C. **A Hidrodinâmica e Sedimentologia do Rio Guaíba Analisados por Sensores Geoacústicos e Orbitais**. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Geociências – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2018.

SILVA, M. A. D. L.; TEIXEIRA, P. R. D. F. Estudo de dois aplicativos para solução de escoamento de fluidos com superfície livre. In: **SEMENGO - Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica**. Rio Grande: FURG, 2004.

SIVIERO, M. R. L.; COIADO, E. M. A. produção de sedimentos a montante de uma seção no rio Atibaia associada à descarga sólida transportada. Anais do **XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Belo Horizonte, MG. 1999.

SOMAR. **Relatório de Monitoramento Hidrossedimentométrico no Rio Jacuí** – Grupamentos Mineiros nº 185, 186 e 187. Janeiro 2017.

SOMAR. Sociedade Mineradora. Disponível em: <<http://somarmineradora.com.br/empresa/quem-somos/>> Acesso em 06 de maio de 2019.

TAVORA, J., FERNANDES, E. H., THOMAS, A. C., WEATHERBEE, R.; SCHETTINI, C. A. **The influence of river discharge and wind on Patos Lagoon, Brazil, Suspended Particulate Matter**. International Journal of Remote Sensing, 40(12), pp.4506-4525. 2019.

TOLDO J. E. E. Sedimentação, Predição do Padrão de Ondas e Dinâmica Sedimentar da Antepraia e Zona de Surfe do Sistema Lagunar da Lagoa dos Patos, RS. Porto Alegre, 178 p. Tese de Doutorado, Programa de Pós graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1994

VAZ, A. C.; MÖLLER JR., O. O.; ALMEIDA, T. L. 2006. Análise quantitativa da descarga dos rios afluentes da Lagoa dos Patos. Atlântica 28: 13–23. 2006.