

ESTUDO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DO LAGO GUAÍBA
CONTRATO Nº 22/2018

PRODUTO 03 - RELATÓRIO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE
SEDIMENTOS DO BAIXO JACUÍ – MÓDULO II

REALIZAÇÃO:



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

EXECUÇÃO:

RHA
RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAIS
ENGENHARIA

CURITIBA - PR
JUNHO/2019

ESTUDO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DO LAGO GUAÍBA**CONTRATO Nº 22/2018****Emissão Inicial**

Rev.	Data	Elaborado por	Verificado por	Autorizado por	CREA Responsável Técnico	CE
0	27/05/2019	TM; JG	LMC; AP	CSG	67059-D	AE
1	24/06/2019	TM; JG	LMC; AP	CSG	67059-D	AF

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 Meio 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

Estagiária em Geografia Thais Regina Paes

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. LOCALIZAÇÃO ÁREA DE ABRANGÊNCIA DA MODELAGEM HIDROLÓGICA (EM DESTAQUE).....	13
FIGURA 3. DISTRIBUIÇÃO MENSAL DAS VAZÕES Q_{95} , Q_{90} , Q_{85} E MÉDIA	13
FIGURA 4. LOCALIZAÇÃO DAS SEÇÕES DE MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOMÉTRICO NO RIO JACUÍ.....	14
FIGURA 5. BALANÇO EROÇÃO / DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS NOS GM 185, 186 E 187 NO PERÍODO MAIO DE 2016 A NOVEMBRO DE 2016.....	16
FIGURA 6. BALANÇO BATIMÉTRICO SEMESTRAL ENTRE NOVEMBRO DE 2016 E MAIO DE 2017	16
FIGURA 7. BALANÇO BATIMÉTRICO SEMESTRAL ENTRE MAIO DE 2017 E NOVEMBRO DE 2017	17
FIGURA 8. LOCALIZAÇÃO ÁREA DE ESTUDO – HARTMANN et al. 2010.....	18
FIGURA 9. LOCALIZAÇÃO PERFIS DE ADCP – HARTMANN et al. 2010 (TRAÇADO EM VERMELHO REPRESENTAM ÁREAS COM PROCESSOS EROSIVOS).....	18
FIGURA 10 -DEFINIÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA(ζ), PROFUNDIDADE(h) E PROFUNDIDADE TOTAL (H).....	21
FIGURA 11 - EXEMPLO DE ORGANIZAÇÃO DAS CAMADAS EM COORDENADAS σ e coordenadas z	22
FIGURA 12. FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DAS ETAPAS DE EXECUÇÃO DO MÓDULO II E III	26
FIGURA 13. LINHA DE COSTA DO TRECHO FINAL DO BAIXO JACUÍ.....	27
FIGURA 14. GRADE NUMÉRICA GERADA PARA A ÁREA DE INTERESSE COM O AUXÍLIO DO MODELO NUMÉRICO DELFT3D	28
FIGURA 15. PONTOS SECOS	28
FIGURA 16. DADOS BATIMÉTRICOS – AHSUL (2013).....	28
FIGURA 17. BATIMETRIA.....	29
FIGURA 18. ORTOGONALIDADE.....	29
FIGURA 19. RESOLUÇÃO	30
FIGURA 20. LOCALIZAÇÃO PONTOS DE OBSERVAÇÃO	30
FIGURA 21. LOCALIZAÇÃO SEÇÕES DE OBSERVAÇÃO	31
FIGURA 22. LOCALIZAÇÃO ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS	31
FIGURA 23 - LOCALIZAÇÃO DOS CONTORNOS DO MODELO DO BAIXO JACUÍ.....	32
FIGURA 24. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – DE 01 DE JANEIRO DE 1975 A 31 DE DEZEMBRO DE 2005 – CONTORNO JACUÍ (SETA INDICA A VAZÃO MÁXIMA DO PERÍODO).....	37
FIGURA 25. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – DE 01 DE JANEIRO DE 1975 A 31 DE DEZEMBRO DE 2005 – CONTORNO TAQUARI-ANTAS (SETA INDICA A VAZÃO MÁXIMA DO PERÍODO)	37
FIGURA 26. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 1984 – CONTORNO JACUÍ.....	38
FIGURA 27. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 1984 – CONTORNO TAQUARI-ANTAS.....	38
FIGURA 28. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 1984 – CONTORNO CAÍ	39
FIGURA 29. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 1984 – CONTORNO SINOS.....	39
FIGURA 30. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 1984 – CONTORNO GRAVATAÍ.....	40

FIGURA 31. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2001 – CONTORNO JACUÍ	40
FIGURA 32. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2001 – CONTORNO TAQUARI-ANTAS	41
FIGURA 33. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2001 – CONTORNO CAÍ	41
FIGURA 34. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2001 – CONTORNO SINOS	42
FIGURA 35. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2001 – CONTORNO GRAVATAÍ	42
FIGURA 36. SÉRIE TEMPORAL DE NÍVEL MODELADO X NÍVEL –SÃO JERÔNIMO 1984	44
FIGURA 37. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE – MÁXIMA VAZÃO NO CONTORNO JACUÍ	45
FIGURA 38. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE – BAIXA VAZÃO NO CONTORNO JACUÍ < 1000 m ³ /s	46
FIGURA 39. MAPA DE EROÇÃO / SEDIMENTAÇÃO – MÁXIMA VAZÃO NO CONTORNO JACUÍ	46
FIGURA 40. MAPA DE EROÇÃO / SEDIMENTAÇÃO – BAIXA VAZÃO NO CONTORNO JACUÍ < 1000 m ³ /s	47
FIGURA 41. SÉRIE TEMPORAL DE NÍVEL OBSERVADO E MODELADO – 2001 – ESTAÇÃO SÃO JERÔNIMO	47
FIGURA 42. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE – MÁXIMA VAZÃO NO CONTORNO TAQUARI-ANTAS	48
FIGURA 43. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE – BAIXA VAZÃO NO CONTORNO TAQUARI-ANTAS < 1000 m ³ /s	49
FIGURA 44. MAPA DE EROÇÃO / SEDIMENTAÇÃO – MÁXIMA VAZÃO NO CONTORNO TAQUARI-ANTAS	49
FIGURA 45. MAPA DE EROÇÃO / SEDIMENTAÇÃO – BAIXA VAZÃO NO CONTORNO TAQUARI-ANTAS < 1000 m ³ /s	50
FIGURA 46. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2008 – CONTORNO JACUÍ	51
FIGURA 47. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2008 – CONTORNO TAQUARI-ANTAS	51
FIGURA 48. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2008 – CONTORNO CAÍ	52
FIGURA 49. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2008 – CONTORNO SINOS	52
FIGURA 50. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2008 – CONTORNO GRAVATAÍ	53
FIGURA 51. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE –VAZÃO BAIXA	54
FIGURA 52. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE –VAZÃO ALTA	55
FIGURA 53. MAPA DE EROÇÃO / SEDIMENTAÇÃO – MÁXIMA VAZÃO – EM DESTAQUE: PRINCIPAIS ÁREAS DE DEPOSIÇÃO EM CONCORDÂNCIA COM O TRABALHO DE HATMANN (2017).	55
FIGURA 54. CONCENTRAÇÃO DE SILTE / ARGILA EM SUSPENSÃO – PERÍODO DE BAIXA VAZÃO	57
FIGURA 55. CONCENTRAÇÃO DE SILTE / ARGILA EM SUSPENSÃO – PERÍODO DE VAZÃO ALTA	57
FIGURA 56. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE PARA OS PERÍODOS DE VAZÕES BAIXAS < 1000 m ³ /s	58
FIGURA 57. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE PARA OS PERÍODOS DE VAZÕES ALTAS > 5000 m ³ /s	58

FIGURA 58. SÉRIE TEMPORAL diária DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO JACUÍ – 01/01/1976 A 31/12/2005 - calibração.....	62
FIGURA 59. SÉRIE TEMPORAL diária DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO TAQUARI-ANTAS – 01/01/1976 A 31/12/2005 - calibração.....	62
FIGURA 60. SÉRIE TEMPORAL diária DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO CAÍ – 01/01/1976 A 31/12/2005 - calibração.....	63
FIGURA 61. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA– CONTORNO SINOS – 01/01/1976 A 31/12/2005 - calibração.....	63
FIGURA 62. SÉRIE TEMPORAL diária DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO GRAVATAÍ – 01/01/1976 A 31/12/2005 - calibração.....	64
FIGURA 63. SÉRIE TEMPORAL diária DE DESCARGA LÍQUIDA e sólida – CONTORNO JACUÍ – 01/01/2006 A 31/12/2015 - validação.....	65
FIGURA 64. SÉRIE TEMPORAL diária DE DESCARGA LÍQUIDA e sólida – CONTORNO TAQUARÍ-ANTAS – 01/01/2006 A 31/12/2015 - validação.....	66
FIGURA 65. SÉRIE TEMPORAL diária DE DESCARGA LÍQUIDA e sólida– CONTORNO CAÍ – 01/01/2006 A 31/12/2015 - validação.....	66
FIGURA 66. SÉRIE TEMPORAL diária DE DESCARGA LÍQUIDA e sólida – CONTORNO SINOS – 01/01/2006 A 31/12/2015 - validação.....	67
FIGURA 67. SÉRIE TEMPORAL diária DE DESCARGA LÍQUIDA e sólida – CONTORNO GRAVATAÍ – 01/01/2006 A 31/12/2015 - Validação.....	67
FIGURA 68. POSIÇÃO DOS DADOS BATIMÉTRICOS OBTIDOS EM CAMPO	71
FIGURA 69. CARTAS NÁUTICAS.....	71
FIGURA 70. DADOS BATIMÉTRICOS OBTIDOS DE CARTAS NÁUTICAS E DADOS IN SITU	72
FIGURA 71. BATIMETRIA INTERPOLADA PARA O BAIXO JACUÍ	72
FIGURA 72. LOCALIZAÇÃO DA SEÇÃO PARA COMPARAÇÃO DOS DADOS DE BATIMETRIA OBTIDOS EM CAMPO E INTERPOLADOS PELO MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D	73
FIGURA 73. PERFIL LONGITUDINAL COM INFORMAÇÕES BATIMÉTRICAS OBTIDAS EM CAMPO	73
FIGURA 74. PERFIL BATIMÉTRICO INTERPOLADO PELO MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D	74
FIGURA 75. LOCALIZAÇÃO DOS DADOS DE BATIMETRIA OBTIDOS EM CAMPO E DE CARTAS NÁUTICAS (CONTORNO EM PRETO)	74
FIGURA 76. LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES	75
FIGURA 77. ENTRADA PARA A CONDIÇÃO DE CONTORNO RIO JACUÍ: SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA e sólida – ESTAÇÃO 85400000 DONA FRANCISCA.....	76
FIGURA 78. ENTRADA PARA A CONDIÇÃO DE CONTORNO RIO TAQUARI: SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA e sólida – ESTAÇÃO 86510000 MUÇUM.....	76
FIGURA 79. ENTRADA PARA A CONDIÇÃO DE CONTORNO RIO CAÍ: SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA – ESTAÇÃO 87170000 BARCO DO CAÍ.....	77
FIGURA 80. ENTRADA PARA A CONDIÇÃO DE CONTORNO RIO DOS SINOS: SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA – ESTAÇÃO 87380000 CAMPO BOM.....	77
FIGURA 81. LOCALIZAÇÃO DOS DADOS DE SEDIMENTO DE FUNDO OBTIDOS EM CAMPO E LOCALIZAÇÃO DO MONITORAMENTO EM RELAÇÃO À GRADE UTILIZADA PARA ESTE ESTUDO	78
FIGURA 82. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DO MONITORAMENTO HIDROSSEDIMENTOMÉTRICO DO RIO JACUÍ (2017) PONTO JUSANTE 1A (CÍRCULO EM PRETO).....	79
FIGURA 83. TAXA DE EROSIÃO/SEDIMENTAÇÃO SIMULADA NO PONTO DE MONITORAMENTO JUSANTE 1A.....	79

FIGURA 84. VELOCIDADE MÉDIA SIMULADA NO PONTO DE MONITORAMENTO JUSANTE 1A	80
FIGURA 85. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA CONTORNOS RIO JACUÍ E RIO TAQUARÍ.....	80
FIGURA 86. DINÂMICA DE SEDIMENTAÇÃO SIMULADA – GEOMETRIA 1	81
FIGURA 87. DINÂMICA DE SEDIMENTAÇÃO SIMULADA – GEOMETRIA 2	81

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. VALORES DO DIÂMETRO MÉDIOS DAS PARTÍCULAS (D50) OBSERVADOS PARA CADA POSTO NAS DIFERENTES CAMPANHAS.....	15
TABELA 2. RELAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRANSPORTE MÉDIO DE MATERIAL EM SUSPENSÃO AO LONGO DE CADA PERFIL E TOTAL MÉDIO DE MATERIAL QUE TRANSITOU NA ÁREA.....	19
TABELA 3 - ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS.....	31
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.	32
TABELA 5. LISTA DE ESTAÇÕES DA ANA COM RÉGUAS LINIMÉTRICAS NO TRECHO MODELADO.	33
TABELA 6. PARÂMETROS UTILIZADOS NO MODELO HIDRODINÂMICO DO BAIXO JACUÍ	35
TABELA 7. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DAS SÉRIES TEMPORAIS DE DESCARGA LÍQUIDA -CALIBRAÇÃO - 1984.....	43
TABELA 8. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DAS SÉRIES TEMPORAIS DE DESCARGA SÓLIDA -CALIBRAÇÃO - 1984.....	43
TABELA 9. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DAS SÉRIES TEMPORAIS DE DESCARGA LÍQUIDA -CALIBRAÇÃO - 2001.....	43
TABELA 10. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DAS SÉRIES TEMPORAIS DE DESCARGA SÓLIDA -CALIBRAÇÃO - 2001.....	43
TABELA 11. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS, COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E COEFICIENTE NASH - 2001.....	45
TABELA 12. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS, COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E COEFICIENTE NASH - 2001.....	48
TABELA 13. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DAS SÉRIES TEMPORAIS DE DESCARGA LÍQUIDA -VALIDAÇÃO - 2008.....	53
TABELA 14. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DAS SÉRIES TEMPORAIS DE DESCARGA SÓLIDA -VALIDAÇÃO - 2008.....	53
TABELA 15. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DAS SÉRIES TEMPORAIS, DE DESCARGA LÍQUIDA, UTILIZADAS NO CONTORNO DO MODELO BAIXO JACUÍ - CALIBRAÇÃO	64
TABELA 16. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DAS SÉRIES TEMPORAIS, DE DESCARGA SÓLIDA, UTILIZADAS NO CONTORNO DO MODELO BAIXO JACUÍ - CALIBRAÇÃO	64
TABELA 17. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DAS SÉRIES TEMPORAIS, DE DESCARGA LÍQUIDA, UTILIZADAS NO CONTORNO DO MODELO BAIXO JACUÍ - VALIDAÇÃO	68
TABELA 18. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DAS SÉRIES TEMPORAIS, DE DESCARGA SÓLIDA, UTILIZADAS NO CONTORNO DO MODELO BAIXO JACUÍ - VALIDAÇÃO	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO BAIXO JACUÍ	12
3	MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D	20
3.1	DELFT3D – FLOW	20
3.2	DELFT3D – SED	23
4	MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DO BAIXO JACUÍ - MÓDULO II	26
4.1	IMPLEMENTAÇÃO DO DELFT3D	27
4.1.1	GRADE NUMÉRICA	27
4.1.2	INTERPOLAÇÃO BATIMÉTRICA	28
4.1.3	PROPRIEDADES DA GRADE NUMÉRICA	29
4.1.4	FORÇANTE METEOROLÓGICA	31
4.1.5	CONDIÇÕES DE CONTORNO	32
4.2	DADOS OBSERVADOS PARA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	33
4.3	CALIBRAÇÃO DO DELFT3D	33
4.4	VALIDAÇÃO DO DELFT3D	34
4.5	PARÂMETROS UTILIZADOS	35
5	CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO-SEDIMENTOLÓGICO DO BAIXO JACUÍ	36
5.1	DADOS DE ENTRADA	37
5.2	RESULTADOS CALIBRAÇÃO	43
5.2.1	RESULTADOS CALIBRAÇÃO ANO 1984	43
5.2.2	RESULTADOS CALIBRAÇÃO ANO 2001	47
6	VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO DO BAIXO JACUÍ	51
6.1	DADOS DE ENTRADA	51
6.2	RESULTADOS VALIDAÇÃO	54
7	ANÁLISES DE DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS COESIVOS	56
8	CONCLUSÕES	59
9	CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA O MÓDULO III	61
9.1	DADOS DE ENTRADA	61
10	VALIDAÇÃO	65
10.1	DADOS DE ENTRADA	65
	REFERÊNCIAS	69
	APÊNDICE	71
	VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO	72
	INTERPOLAÇÃO BATIMÉTRICA	72
	SIMULAÇÃO TESTE	74

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).

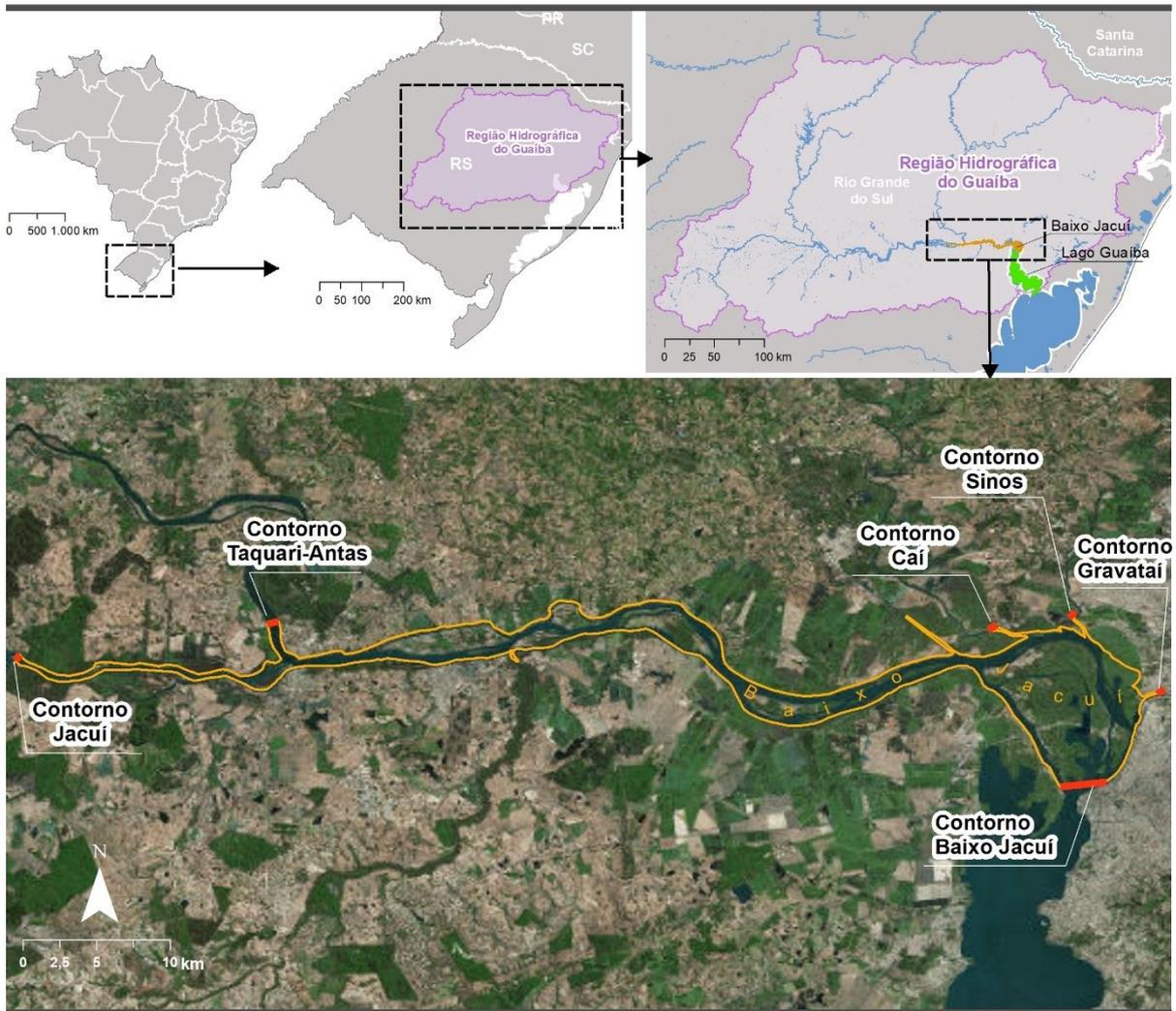
A circulação da água é determinante na dinâmica de deposição e erosão de sedimentos no fundo do corpo de água e está diretamente relacionada à velocidade do escoamento, refletindo em áreas com diferentes granulometrias e, portanto, com potenciais distintos para mineração (DA PAZ et al., 2005).

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 associados e fundamental para o planejamento dos aproveitamentos dos recursos hídricos de uma região (SIVIERO E COIADO, 1999).

O objetivo principal do presente trabalho é realizar um estudo capaz de simular o regime de fluxos de vazão e sedimentos no trecho final do Baixo Jacuí (Subtrecho A) (FIGURA 1), simulando a dinâmica de erosão, deposição e transporte dos sedimentos produzidos nas bacias afluentes a este trecho de rio (Alto Jacuí, Vacacaí-Vacacaí Mirim, Pardo, Taquari-Antas, Sinos, Caí e Gravataí). Para isto, foi realizada a modelagem numérica, com o auxílio do modelo hidrodinâmico Delft3D, do trecho de interesse. Os dados de entrada (descarga líquida e descarga sólida) são provenientes da modelagem hidrológica realizada com o modelo MGB, dados de velocidade e direção do vento, batimetria e tipo de sedimento de fundo foram utilizados como condições de contorno do modelo.

Esta atividade fornecerá a série de vazões e concentrações de sedimentos que serão usadas como condição de contorno de montante na modelagem hidrodinâmica e de transporte de sedimentos do Lago Guaíba – Módulo III.

FIGURA 1. LOCALIZAÇÃO ÁREA DE ESTUDO



2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO BAIXO JACUÍ

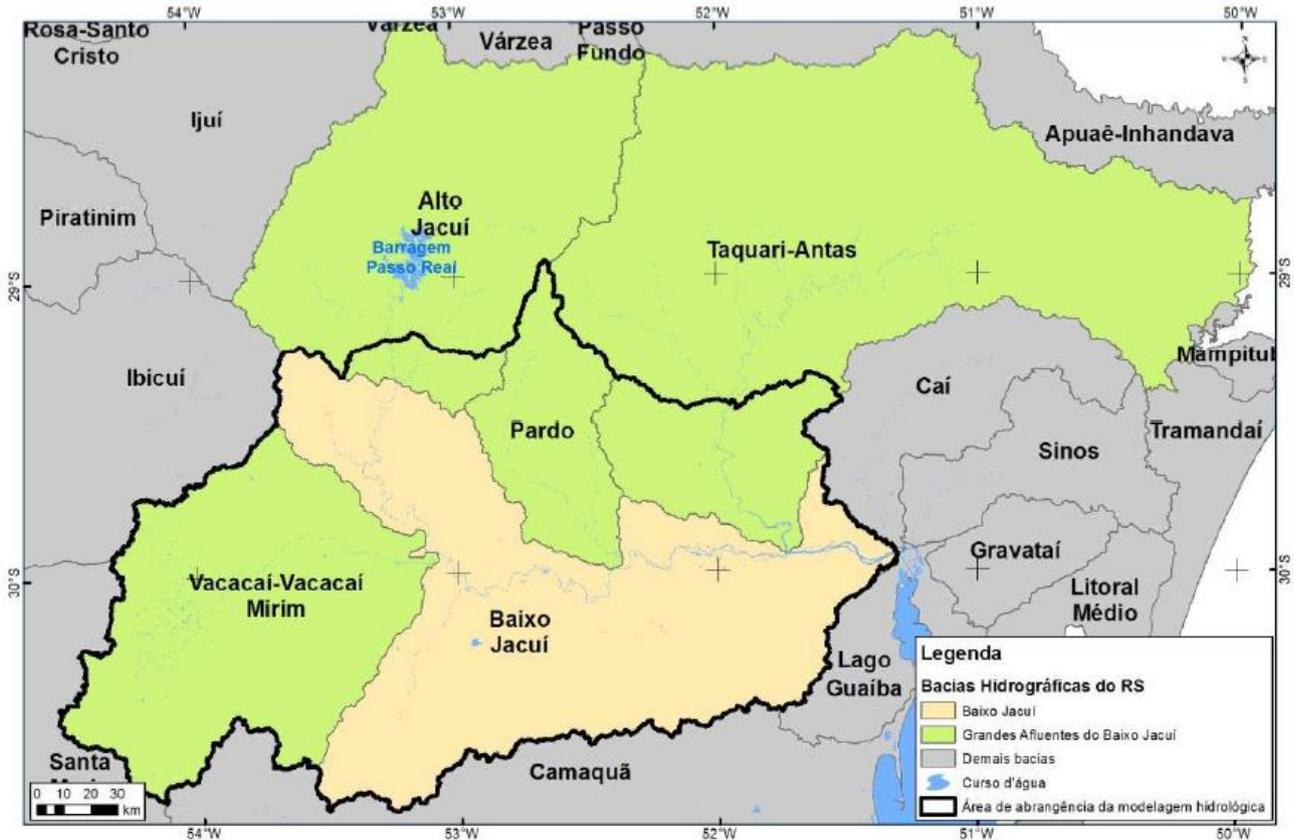
A área de drenagem do rio Jacuí corresponde a 25% da área total do estado do Rio Grande do Sul, apresentando uma área de 71.600 km². As nascentes do rio Jacuí estão presentes em uma altitude de 730 m, localizadas no planalto gaúcho. O rio Jacuí possui um comprimento total de aproximadamente de 710 km e vazão média de 452 m³/s (LIMA et al., 2007). Dentre seus afluentes destaca-se o rio Taquari, com uma área de 10.900 km² (ANDRADE NETO et al., 2012). No delta do rio Jacuí desaguam os rios Caí, Sinos e Gravataí. Juntos, os rios Jacuí, Caí, Sinos e Gravataí constituem os formadores do Lago Guaíba (DA PAZ et al., 2005).

Não existe muita informação sobre a dinâmica e monitoramento da região de interesse, a maioria dos estudos realizados concentram-se na região de mineração, sendo muitas vezes realizados por ou em conjunto com a SOMAR Sociedade Mineradora. A SOMAR é uma empresa que atua a 40 anos com mineração de areia no leito do rio Jacuí, suas áreas de concessão abrangem os municípios de Triunfo, Charqueadas e São Jerônimo, e estendem-se, longitudinalmente, por 22km do rio (SOMAR, 2019). Com isto, este trabalho também utilizará os dados de monitoramento dos processos minerários licenciados, para suas análises. A seguir são apresentados alguns estudos do trecho do Baixo Jacuí analisado.

A disponibilidade hídrica da bacia do Baixo Jacuí, foi avaliada pela empresa Engeplus (Processo Administrativo nº 011108-0500/12-0), no Relatório Técnico 3 - Consolidação do diagnóstico da bacia - TOMO II (2015). A avaliação de disponibilidade de água foi realizada com base em séries históricas de dados hidrológicos de estações de monitoramento, e complementada utilizando técnicas de modelagem hidrológica e regionalização de parâmetros do modelo hidrológico. Os resultados da avaliação da disponibilidade hídrica foram utilizados para a elaboração do balanço hídrico, avaliação da qualidade das águas superficiais e da água subterrânea.

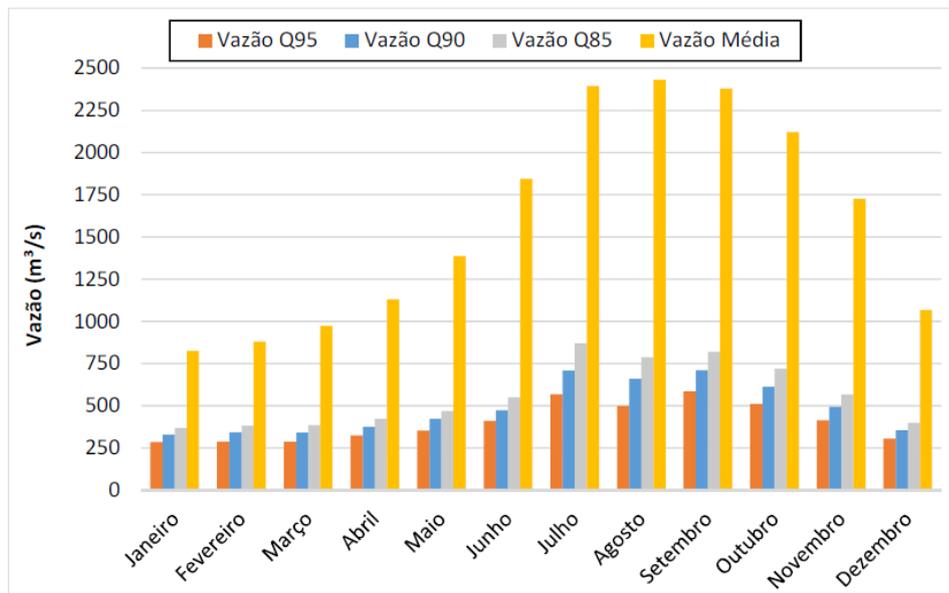
Utilizando a vazão estimada a partir da modelagem hidrológica no MGB-IPH, para a região (FIGURA 2), foi analisado o cenário de vazão natural, que corresponde a situação em que não existem retiradas de água significativas nas grandes bacias afluentes e que as mesmas liberam toda a sua vazão para o rio Jacuí. A FIGURA 3 apresenta os resultados de distribuição mensal nas descargas líquidas médias, Q₈₅, Q₉₀ e Q₉₅ do exutório da bacia. As vazões mais baixas ocorreram nos meses de dezembro a março e ocorreu uma alta variação das descargas líquidas médias durante o ano.

FIGURA 2. LOCALIZAÇÃO ÁREA DE ABRANGÊNCIA DA MODELAGEM HIDROLÓGICA (EM DESTAQUE)



FONTE: Engeplus. RT3 - Relatório Técnico 3 - Consolidação do diagnóstico da bacia - TOMO II (2015)

FIGURA 3. DISTRIBUIÇÃO MENSAL DAS VAZÕES Q_{95} , Q_{90} , Q_{85} E MÉDIA



FONTE: RT3 – Engeplus. Relatório Técnico 3 - Consolidação do diagnóstico da bacia - TOMO II (2015)

Com relação a dinâmica sedimentar da região, o relatório de monitoramento hidrossedimentométrico do rio Jacuí, do ano de 2017, apresentou uma síntese das atividades do monitoramento realizado nesse rio, no trecho correspondente aos Grupamentos Mineiros (GM) nº 185, 186 e 187 da empresa SOMAR – Sociedade Mineradora Ltda.

Durante o monitoramento ocorreram medições de descarga líquidas, sólidas em suspensão e sólidas de arrasto ao longo do rio Jacuí (FIGURA 4). As maiores descargas sólidas totais foram observadas no mês de agosto de 2017, com média de aproximadamente 12.700 toneladas por dia, sendo estimada a proporção média de 99,2% de sedimentos em suspensão e 0,8% de sedimentos do leito. Já as menores descargas sólidas foram observadas no mês de novembro de 2017, com média de aproximadamente 1500 toneladas por dia, sendo 100% dos sedimentos em suspensão (nº processo 5028_16-9, 2017).

FIGURA 4. LOCALIZAÇÃO DAS SEÇÕES DE MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOMÉTRICO NO RIO JACUÍ



FONTE: Modificado de Relatório de monitoramento hidrossedimentométrico do rio Jacuí – SOMAR (2017)

As campanhas foram realizadas nos meses de fevereiro (23 a 24/02), maio (16 a 18/05), agosto (15 a 16/08) e novembro (20 a 21/11), onde também ocorreram coletas de sedimento de fundo. A TABELA 1 apresenta os valores do diâmetro médio das partículas (D50) observados para cada posto nas diferentes campanhas.

TABELA 1. VALORES DO DIÂMETRO MÉDIOS DAS PARTÍCULAS (D50) OBSERVADOS PARA CADA POSTO NAS DIFERENTES CAMPANHAS

Data	Posto	D50 (mm)	Granulometria (ABNT)
Fev-17	Arroio dos Ratos	0,96	Areia grossa
Fev-17	Montante	0,13	Areia fina
Mai-17	Montante	0,35	Areia média
Ago-17	Montante	0,44	Areia média
Nov-17	Montante	0,39	Areia média
Mai-17	Jusante 1A	0,35	Areia média
Ago-17	Jusante 1A	0,15	Areia fina
Nov-17	Jusante 1A	0,23	Areia média
Mai-17	Jusante 1B	0,60	Areia grossa
Ago-17	Jusante 1B	0,34	Areia média
Nov-17	Jusante 1B	0,46	Areia média
Mai-17	Jusante 2A	0,40	Areia média
Ago-17	Jusante 2A	0,68	Areia grossa
Nov-17	Jusante 2A	0,33	Areia média
Mai-17	Jusante 2B	0,55	Areia média
Ago-17	Jusante 2B	0,35	Areia média
Nov-17	Jusante 2B	0,31	Areia média
Fev-17	Jusante	0,15	Areia fina
Mai-17	Jusante	0,45	Areia média
Ago-17	Jusante	0,28	Areia média
Nov-17	Jusante	0,25	Areia média

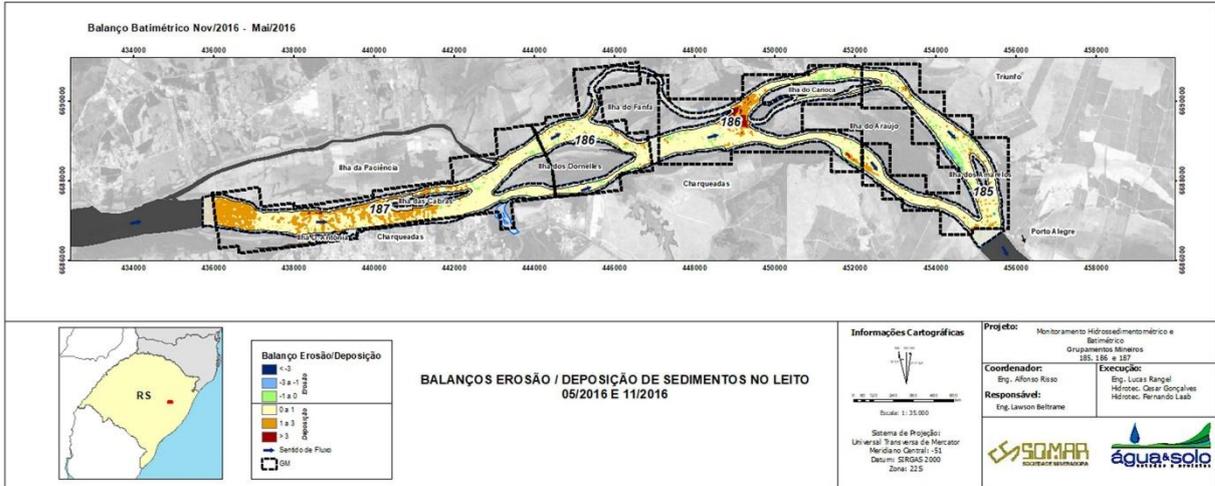
FONTE: Relatório de monitoramento hidrossedimentométrico do rio Jacuí – SOMAR (2017)

O estudo ainda avaliou o balanço batimétrico e o balanço de erosão/deposição para a área de estudo. A abordagem tomada para estimar o transporte de sedimentos na área de estudo foi o cruzamento dos levantamentos batimétricos executados entre maio de 2016 e novembro de 2017.

A sobreposição espacial das grades regulares dos levantamentos batimétricos, nas diferentes datas, permitiu identificar uma dinâmica semestral dos locais onde ocorrem deposição de sedimentos, erosão ou permaneceram estáveis entre os dois levantamentos.

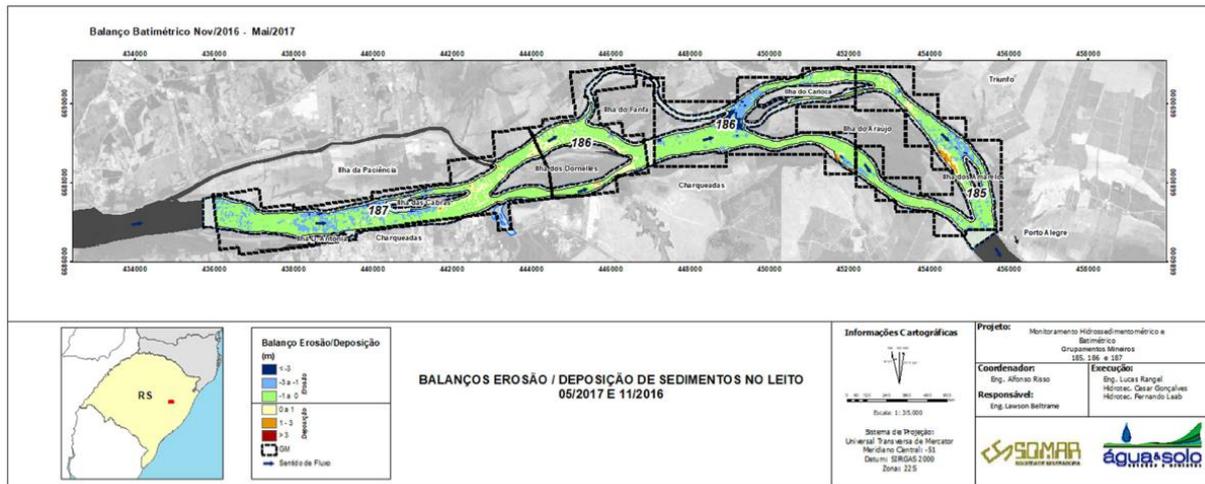
As FIGURA 5, FIGURA 6 e FIGURA 7 apresentam as diferenças de aporte e retirada de sedimentos, no trecho fluvial, para os períodos 05/2016 e 11/2016; 11/2016 e 05/2017; e 05/2017 e 11/2017, respectivamente.

FIGURA 5. BALANÇO EROSIÃO / DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS NOS GM 185, 186 E 187 NO PERÍODO MAIO DE 2016 A NOVEMBRO DE 2016



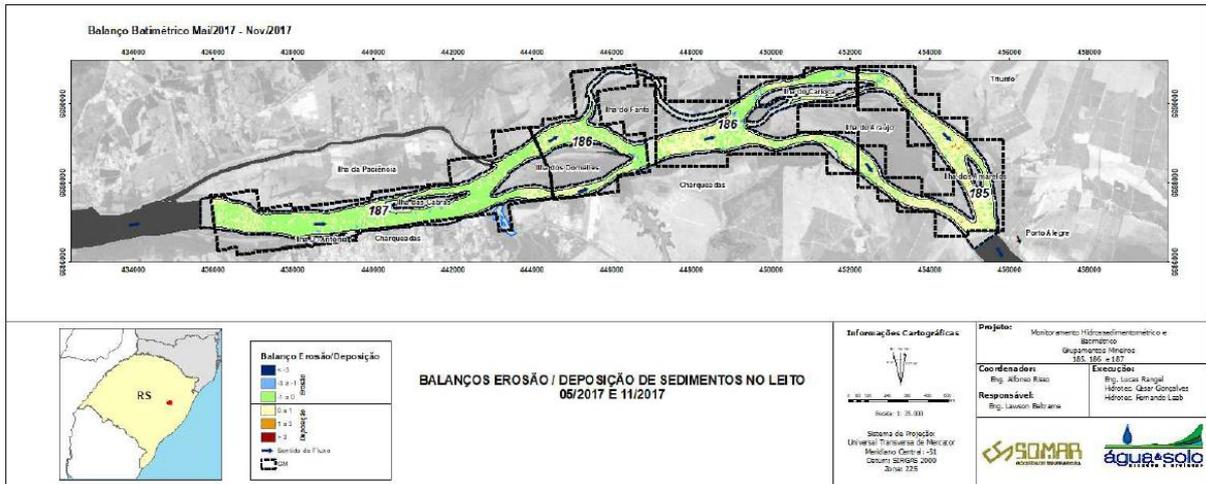
FONTE: Relatório de monitoramento hidrossedimentométrico do rio Jacuí – SOMAR (2017)

FIGURA 6. BALANÇO BATIMÉTRICO SEMESTRAL ENTRE NOVEMBRO DE 2016 E MAIO DE 2017



FONTE: Relatório de monitoramento hidrossedimentométrico do rio Jacuí – SOMAR (2017)

FIGURA 7. BALANÇO BATIMÉTRICO SEMESTRAL ENTRE MAIO DE 2017 E NOVEMBRO DE 2017

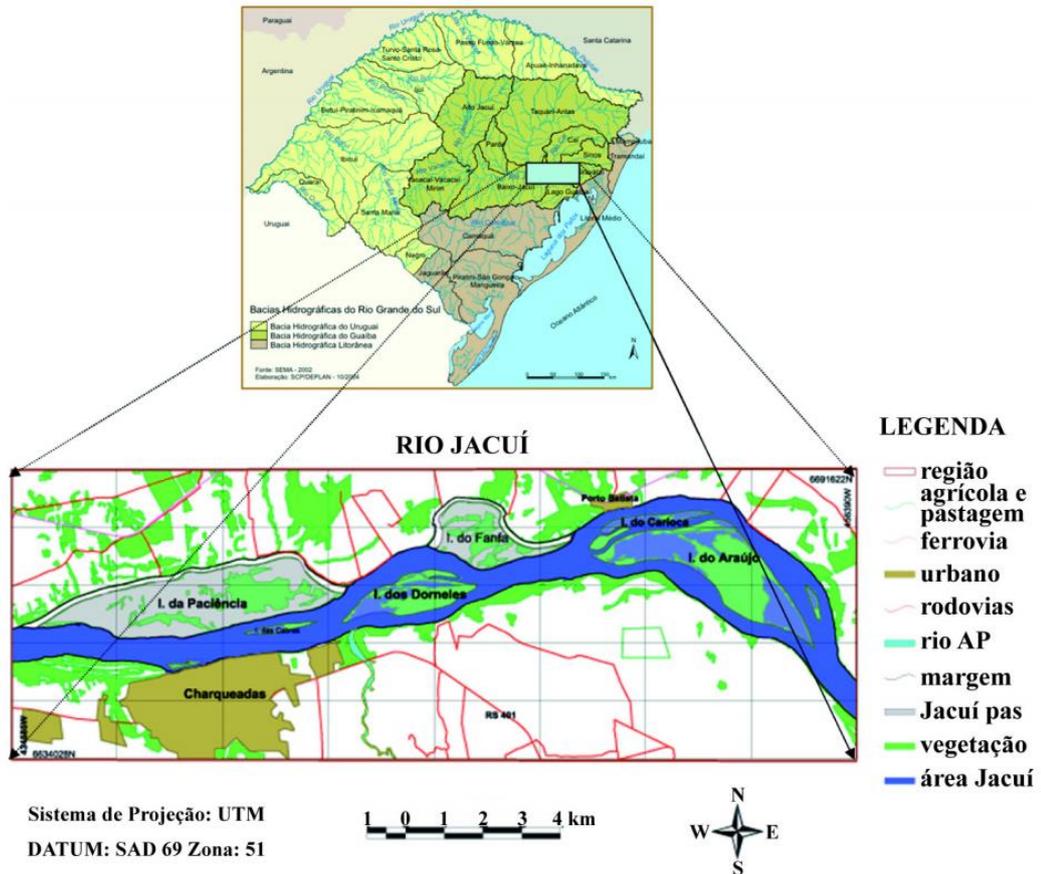


FONTE: Relatório de monitoramento hidrossedimentométrico do rio Jacuí – SOMAR (2017)

Hartmann e colaboradores (2010), com o auxílio da mineradora SOMAR, verificaram o fluxo de descarga líquida e sólida na área destinada a mineração do Baixo Jacuí (FIGURA 8). Os autores analisaram o transporte de material, reposição e erosão no trecho do baixo do rio Jacuí, próximo a cidade de Charqueadas, utilizando informações coletadas de um perfilador acústico de velocidades (ADCP), de amostras de água e de sedimentos de fundo em um período de enchente em novembro de 2008 (06 e 07 de novembro de 2008). Foram realizados 14 perfis verticais transversais com o uso do ADCP (FIGURA 9) e, para análise do material em suspensão, coletadas 89 amostras de águas nos mesmos locais das seções de ADCP. Os resultados encontrados são apresentados na TABELA 2.

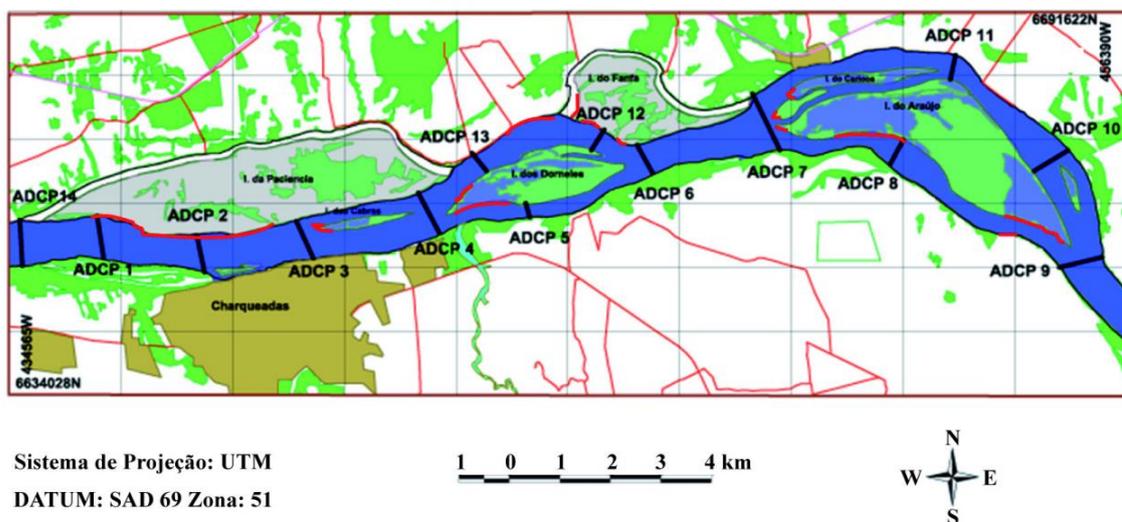
Os autores concluem que os dados de corrente e as concentrações de material em suspensão permitiram calcular um transporte em média de cerca de 378 ton/hora de material, material este que deve ser transportado para o Guaíba, para a Laguna dos Patos e para o litoral. O solo da região é plano constituído de sedimentos quaternários originados de material fluvial recente não pedregoso ou rochoso. A cobertura sedimentar da região possui granulometria onde predominam os sedimentos grosseiros, de areia fina a grossa, e dependendo da área de grânulos. O fluxo de velocidade de corrente registrado possui energia para erodir e transportar sedimentos grosseiros, que de certa forma tem condições para repor o estoque arenoso da área analisada (HARTMANN, et al. 2010).

FIGURA 8. LOCALIZAÇÃO ÁREA DE ESTUDO – HARTMANN et al. 2010



FONTE: HARTMANN et al. (2010)

FIGURA 9. LOCALIZAÇÃO PERFIS DE ADCP – HARTMANN et al. 2010 (TRAÇADO EM VERMELHO REPRESENTAM ÁREAS COM PROCESSOS EROSIVOS)



FONTE: HARTMANN et al. (2010)

TABELA 2. RELAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRANSPORTE MÉDIO DE MATERIAL EM SUSPENSÃO AO LONGO DE CADA PERFIL E TOTAL MÉDIO DE MATERIAL QUE TRANSITOU NA ÁREA

Perfil de ADCP Nº	Velocidade Média da Corrente (cm/s)	Material em Suspensão Total (mg/l)	Transporte Total Material na Seção (ton/hora)
01	49,85	23,00	319
02	69,25	29,15	382
03	66,99	31,20	398
04	60,94	33,18	465
05	70,00	37,00	280
06	136,68	27,00	748
07	50,44	27,38	458
08	61,38	18,64	143
09	62,00	18,78	376
10	49,60	41,49	285
11	54,11	Não medido	Não medido
12	72,32	Não medido	Não medido
13	69,51	Não medido	Não medido
14	57,76	21,69	308

FONTE: Adaptado de HARTMANN et al. (2010)

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, com exceção do módulo WAVE que só necessita da grade e das condições de contorno, após implementado o modelo hidrodinâmico é possível também utilizar os outros módulos para realizar diferentes estudos.

Para o propósito deste estudo serão utilizados os módulos FLOW e SED, com o intuito de analisar o comportamento da hidrodinâmica fluvial e do transporte de sedimentos nos locais de interesse.

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);

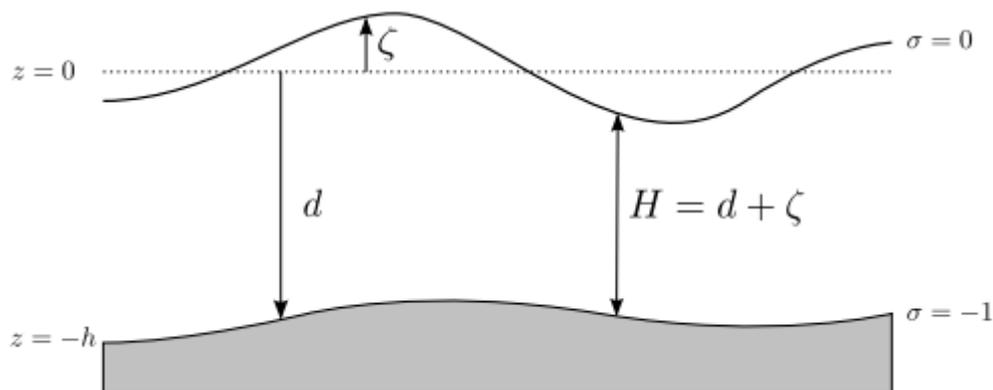
ζ → Elevação da superfície livre acima do plano de referência (m);

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 10).

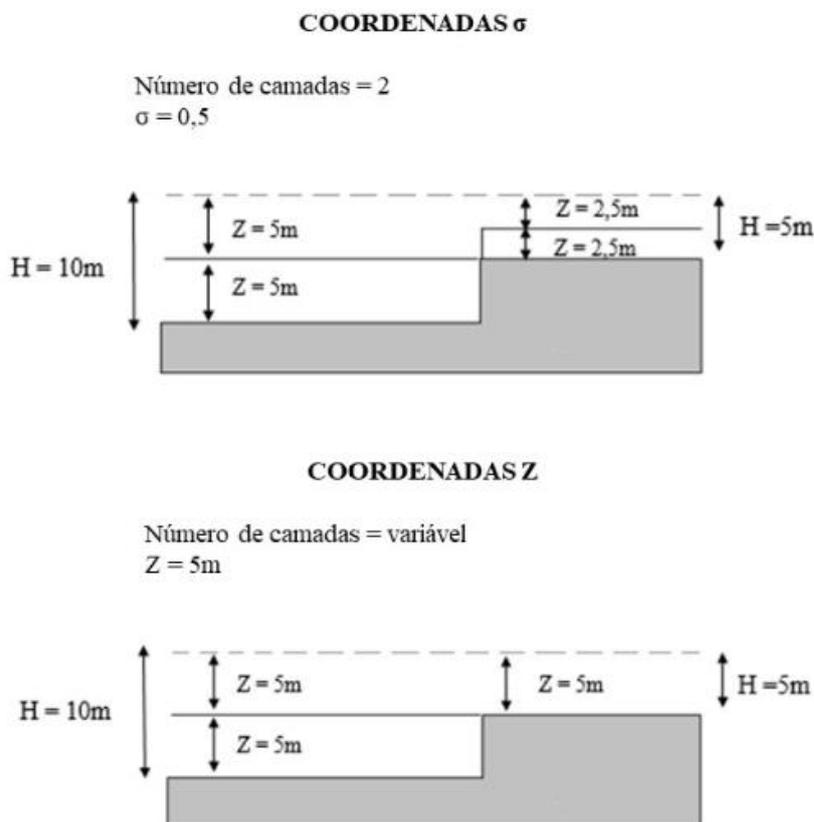
FIGURA 10 -DEFINIÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA(ζ), PROFUNDIDADE(h) E PROFUNDIDADE TOTAL (H)



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 11) 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.

FIGURA 11 - EXEMPLO DE ORGANIZAÇÃO DAS CAMADAS EM COORDENADAS σ E COORDENADAS Z



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.

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 (DELTAES, 2012).

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

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

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):

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

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

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

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.

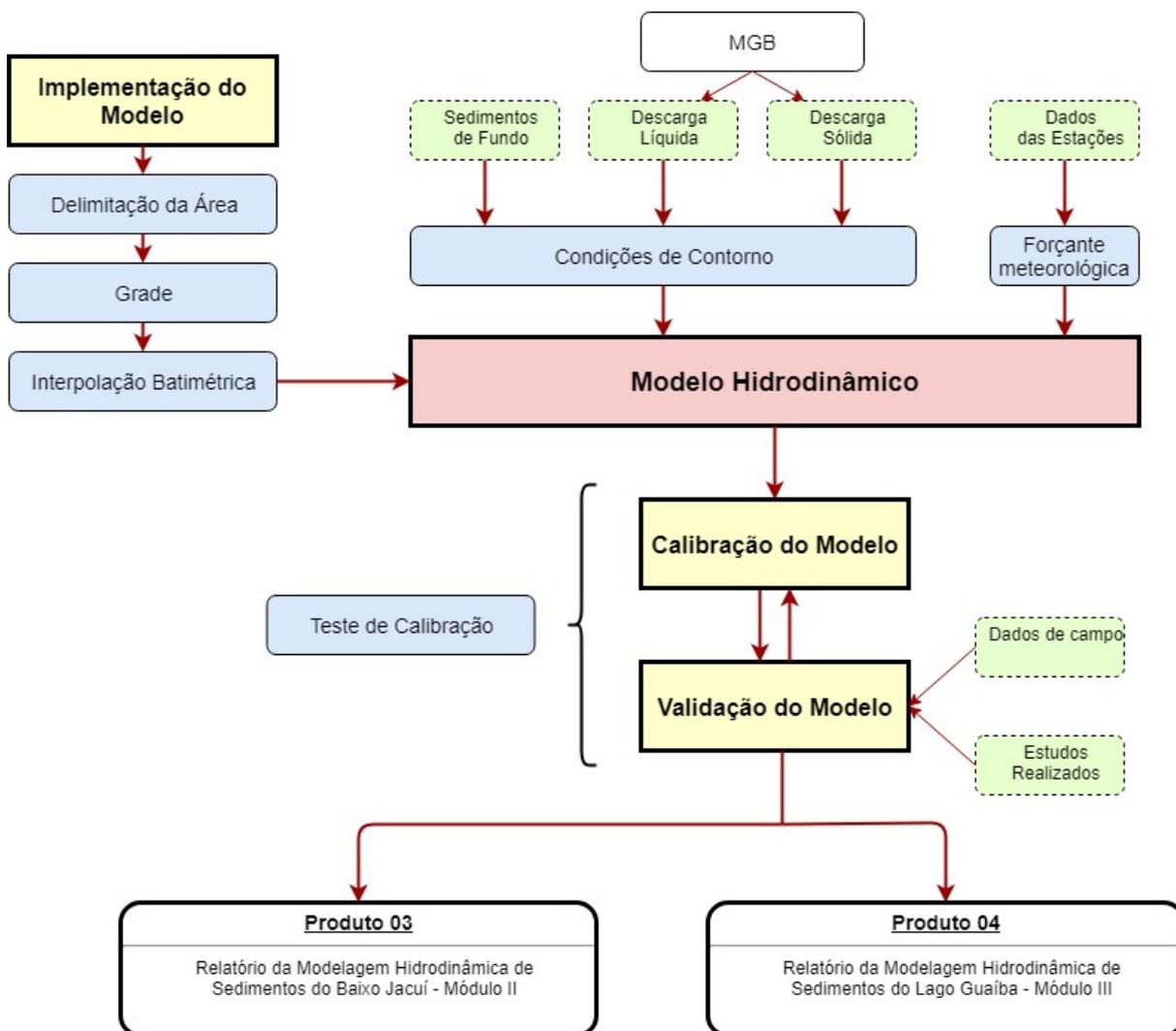
A concentração no fundo da célula de referência sofre uma aproximação para conseguir quantificar a massa de sedimento que integrará o transporte por suspensão e a massa que será incorporada ao transporte pelo leito, mais detalhes podem ser vistos em Deltaires (2012).

4 MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DO BAIXO JACUÍ - MÓDULO II

No Módulo II é proposto um modelo numérico hidrodinâmico capaz de simular o regime de fluxos de vazão e sedimentos no trecho final do Baixo Jacuí, simulando a dinâmica de erosão, deposição e transporte de sedimentos.

O produto do Módulo II fornecerá a série de descargas líquidas e concentrações de sedimentos que serão usadas como condição de contorno de montante na modelagem hidrodinâmica do Lago Guaíba (Módulo III). A FIGURA 12 apresenta o fluxograma simplificado das etapas de execução do Módulo II e III.

FIGURA 12. FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DAS ETAPAS DE EXECUÇÃO DO MÓDULO II E III



4.1 IMPLEMENTAÇÃO DO DELFT3D

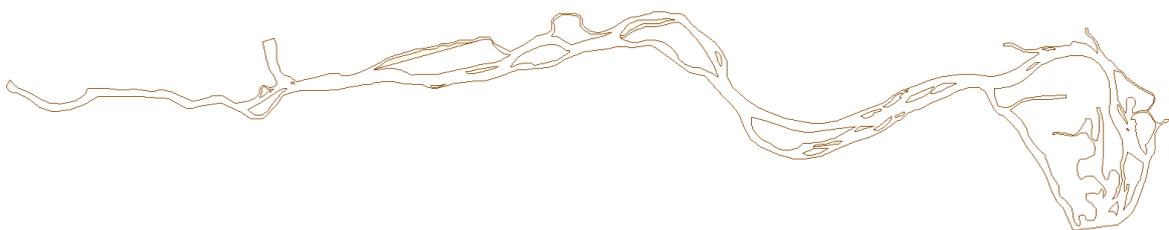
A configuração de modelos numéricos, de forma geral, passa necessariamente por uma sequência de preparação de dados de entrada necessários para a sua implementação. Para o caso de modelos hidrodinâmicos, a sequência de informações necessárias a serem definidas são:

- 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 13) 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 14). A posição e orientação da grade deve representar os canais principais de fluxo de água, o contorno de ilhas e a costa. 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 (FIGURA 15).

FIGURA 13. LINHA DE COSTA DO TRECHO FINAL DO BAIXO JACUÍ.



FONTE: Adaptado de SEMA/RS 2018

FIGURA 14. GRADE NUMÉRICA GERADA PARA A ÁREA DE INTERESSE COM O AUXÍLIO DO MODELO NUMÉRICO DELFT3D

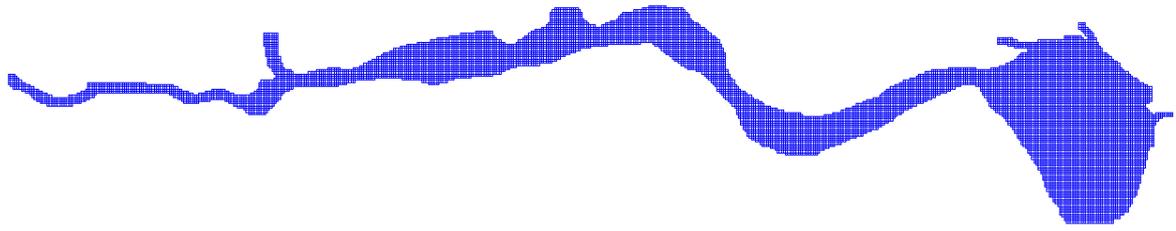
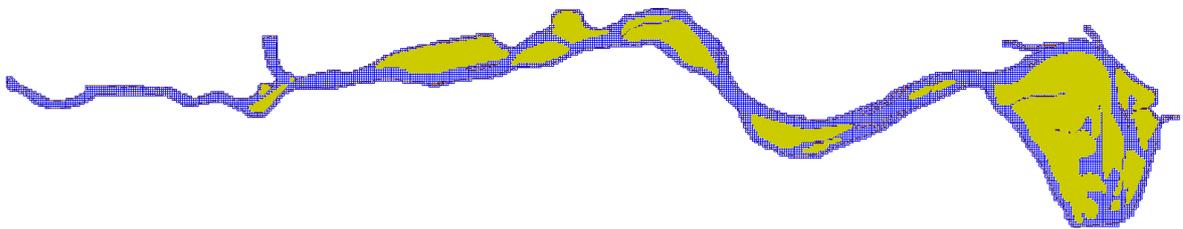


FIGURA 15. PONTOS SECOS



4.1.2 INTERPOLAÇÃO BATIMÉTRICA

Com a construção da grade numérica, dados batimétricos obtidos em campo foram interpolados para a malha. Os dados de campo utilizados foram coletados pela Administração Hidroviária do Sul AHSUL, nos meses de abril e maio de 2013. A FIGURA 16 apresenta a localização dos dados batimétricos para a extensão modelada do Baixo Jacuí. Na FIGURA 17 é apresentada a batimetria interpolada, pelo Delft3D, para a grade.

FIGURA 16. DADOS BATIMÉTRICOS – AHSUL (2013)

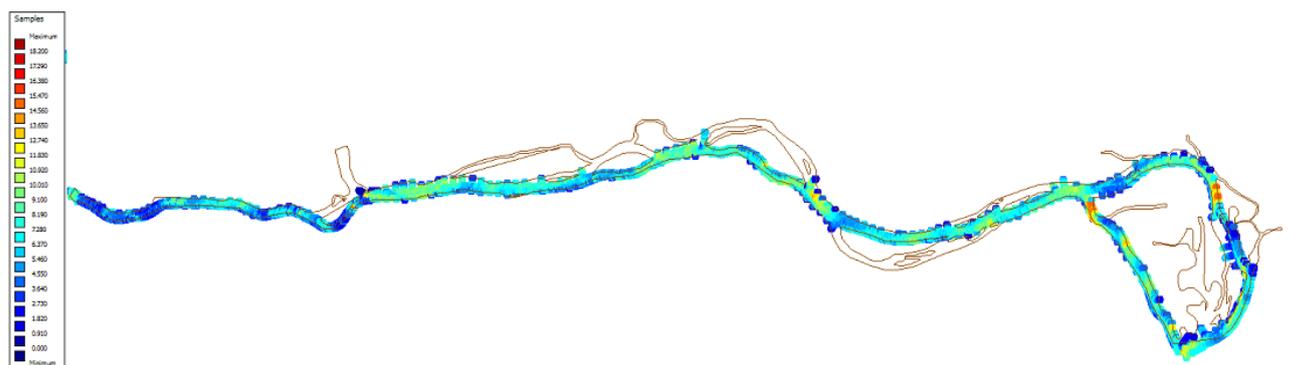
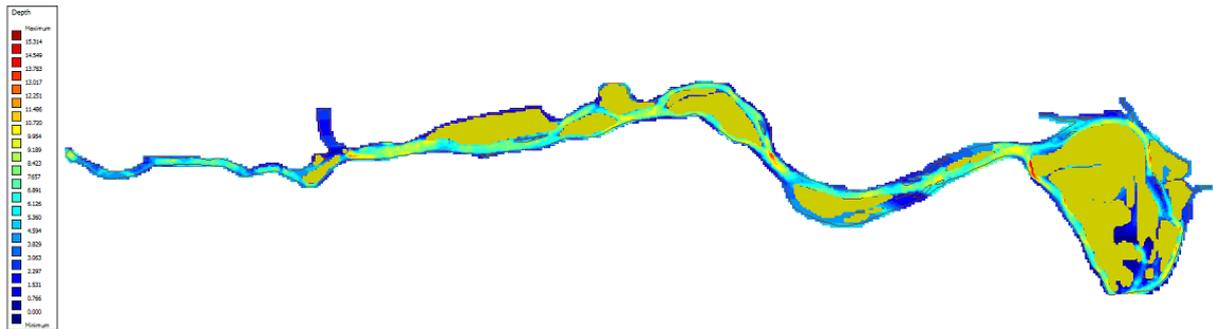


FIGURA 17. BATIMETRIA



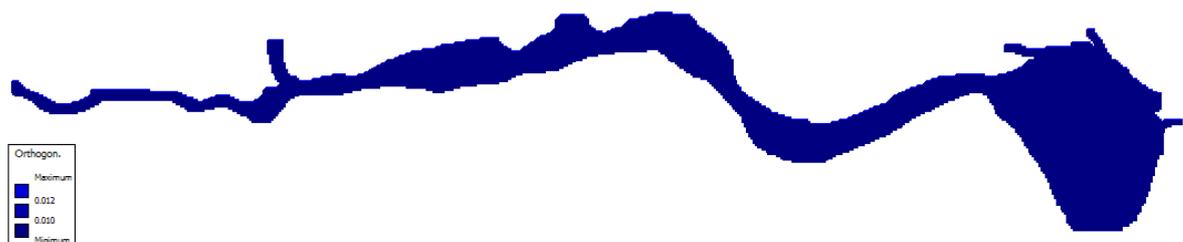
4.1.3 PROPRIEDADES DA GRADE NUMÉRICA

4.1.3.1 Ortogonalidade

O modelo Delft3D utiliza solução numérica das equações diferenciais baseadas em técnicas de diferenças finitas, sendo assim a grade numérica caracteriza-se como sendo uma grade cartesiana ou ortogonal de diferenças finitas. Na nomenclatura utilizada na descrição desse modelo, os autores utilizaram um sistema de coordenadas onde os elementos de grade na direção x foram denominados por M e os elementos de grade na direção y foram denominados por N . Em relação a um sistema de coordenadas geográfico, os elementos de grade M se encontram alinhados com o eixo Leste – Oeste, enquanto os elementos de grade na direção N se encontram alinhados com o eixo Norte – Sul.

Uma vez que esse modelo adota um sistema numérico baseado em grades de diferenças finitas, para evitar erros numéricos, o ângulo entre as direções M e N precisa necessariamente ser o mais ortogonal possível, ou seja, o mais próximo de 90° . Erros numéricos provocados em pontos da grade que possuem elementos não ortogonais traduzem-se em gradientes de pressão e, conseqüentemente, em campos de velocidade não realistas. A medida de ortogonalidade utilizada pelo Delft3D é o ângulo, ou o cosseno do ângulo, entre as linhas de grade nas direções M e N . O erro na direção do gradiente de pressão é proporcional ao valor do cosseno desviado de zero. Valores de ortogonalidade inferiores a 0,04 são recomendados, sendo o erro no termo da advecção proporcional ao valor da ortogonalidade. Os valores de ortogonalidade, para a grade analisada, variaram de 0 a 0,012 (FIGURA 18).

FIGURA 18. ORTOGONALIDADE



4.1.3.2 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, especialmente em áreas de interesse, 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 representar a geometria dos rios que desaguam na área de estudo a resolução da grade utilizada no presente estudo é de 125 metros (FIGURA 19). Se tratando de uma grade regular, todos os pontos de grade apresentam a mesma resolução ($R = 125$).

FIGURA 19. RESOLUÇÃO



4.1.3.3 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 20 apresenta a localização dos pontos de observação e a FIGURA 21 a localização das seções. A escolha seguiu o critério de posição de estações da ANA, com dados de nível de água (ver seção 4.2), e de pontos com informações de estudos já realizados na região (ver seção 0).

FIGURA 20. LOCALIZAÇÃO PONTOS DE OBSERVAÇÃO



FIGURA 21. LOCALIZAÇÃO SEÇÕES DE OBSERVAÇÃO



4.1.4 FORÇANTE METEOROLÓGICA

Séries históricas de intensidade e direção do vento, em frequência diária, foram utilizadas como forçantes do modelo hidrodinâmico Delft3D. Foram analisadas duas estações meteorológicas (TABELA 3) localizadas em Porto Alegre – RS (FIGURA 22), pertencentes ao INMET, sendo que apenas a Estação Meteorológica Porto Alegre – RS possui dados históricos de velocidade e direção do vento.

TABELA 3 - ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS

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

FIGURA 22. LOCALIZAÇÃO ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS



Os dados existentes, do período de 04/12/2006 às 15:00 horas a 20/11/2018 às 12:00 horas, 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	Mai	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

4.1.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para a modelagem do Baixo Jacuí foram utilizadas cinco entradas de dados (Contorno Jacuí, Contorno Taquari-Antas, Contorno Caí, Contorno Sinos e Contorno Gravataí), consideradas condições de contorno do modelo, e um contorno aberto (Contorno Baixo Jacuí) que servirá como saída do Baixo Jacuí e entrada para o modelo hidrodinâmico do Lago Guaíba (Módulo III). A FIGURA 23 apresenta a localização dos contornos do modelo.

Os dados de descarga líquida e descarga sólida inseridos nos contornos foram obtidos da modelagem hidrológica realizada com o modelo MGB (Módulo I). Os dados foram disponíveis 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).

FIGURA 23 - LOCALIZAÇÃO DOS CONTORNOS DO MODELO DO BAIXO JACUÍ



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 5), 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).

TABELA 5. LISTA DE ESTAÇÕES DA ANA COM RÉGUAS LINIMÉTRICAS NO TRECHO MODELADO.

Estação	Latitude	Longitude	Início dos Dados	Status
São Jerônimo	-29,95	-51,72	12/31/1925	Com dados
Foz do Rio Jacuí 57	-29,96	-51,32	1/31/1971	Sem dados
Ilha da Pintada	-30,03	-51,25	1/31/1982	Com dados

4.3 CALIBRAÇÃO DO DELFT3D

Para que o modelo apresente o melhor desempenho computacional e ao mesmo tempo represente as condições naturais da região de interesse, após a implementação, é necessário realizar a calibração. Simulações testes são realizadas com o intuito de analisar a resposta do modelo, para os parâmetros de grade, forçantes e de contorno inseridas, e comparadas com dados observados em campo (validação). A quantidade de testes realizada depende da análise da comparação dos dados simulados e dos dados observados e sempre após a calibração é realizada uma tentativa de validação do modelo, até que se atinjam os resultados esperados. Os principais testes realizados são:

- Teste de limitações de processamento: Para atender as demandas do estudo é necessária a geração de uma grade que atenda tanto os requisitos de resolução espacial e temporal, quanto de capacidade de processamento do Delft3D e da máquina utilizada. Grades muito extensas e com um número muito grande de pontos aumentam significativamente o tempo de processamento das simulações e geram erros no programa.
- Teste do passo de tempo: A escolha do passo de tempo utilizado influencia diretamente no tempo de simulação do modelo. A partir da análise do número de Courant (fornecido pelo Delft3D nas saídas das simulações) é possível aumentar ou diminuir o passo de tempo do modelo. O que pode contribuir para reduzir o tempo de processamento das simulações.

Geralmente, o número de Courant (Cr) não deve apresentar valores altos, tendo valores próximos de 1, mas por problemas de pequenas variações no espaço e tempo, o número de Courant pode ser assumido substancialmente maior (DELTARES, 2012).

$$Cr = \Delta t \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}\right)} \left(|\vec{u}| + \sqrt{gH}\right)$$

Onde:

C_r → Número de Courant;

Δt → Passo de tempo (s);

Δx → Espaçamento médio longitudinal dos nós da malha (m);

Δy → Espaçamento médio transversal dos nós da malha (m);

$\left| \frac{\rightarrow}{v} \right|$ → Módulo da velocidade da corrente (em geral na prática, este valor é desprezível por ser muito menor que $_gH$);

H → Profundidade média local (m);

g → Aceleração da gravidade (m/s^2).

- Estabilização: Todo modelo numérico necessita de um período de simulação para que entre em equilíbrio, chamado de período de aquecimento do modelo, após este período o modelo se estabiliza e é possível a utilização dos resultados para as respectivas análises.
- Rugosidade de Fundo: Em modelos hidrodinâmicos o efeito da rugosidade de fundo, sobre o nível de água e os campos de velocidade, é simulado através dos coeficientes de atrito. O Delft3D permite a escolha de um entre três métodos para o processo de dissipação, que podem ser os modelos de Chezy, Manning ou White-Colebrook.

4.4 VALIDAÇÃO DO DELFT3D

Via de regra séries temporais da elevação da coluna da água, geradas por estações hidrológicas localizadas em rios e por marégrafos instalados em estuários, são as informações mais utilizadas na comparação entre os resultados obtidos com a utilização de modelos hidrodinâmicos e a realidade. Isso deve-se ao fato de o nível ser a variável hidrológica mais facilmente medida e o seu conhecimento fornece informações confiáveis de outras variáveis hidrodinâmica de interesse, como a direção e a intensidade do campo de velocidade de correntes. Com isso é possível afirmar que se modelo hidrodinâmico é capaz de reproduzir o comportamento da elevação da superfície livre das massas de água, outras variáveis hidrodinâmicas também serão reproduzidas com precisão.

A validação dos resultados de transporte de sedimento em suspensão e de fundo se configura uma tarefa mais complexa, uma vez que esse tipo de informação é, em sua grande maioria, é restrito a medidas pontuais realizadas em campanhas que não possuem regularidade temporal. Ou seja, a indisponibilidade de séries temporais contínuas, desse tipo de informação, impossibilita uma validação criteriosa dos resultados das modelagens matemáticas.

Com isso a validação foi realizada com base nos volumes de sedimento fornecidos como condição de contorno na entrada do domínio do modelo hidrodinâmico. Torna-se então possível

certificar-se de que os volumes de sedimentos transportados pelo modelo Delft3D são compatíveis com os volumes de sedimento oriundos da bacia hidrográfica do Jacuí. Além disso, todos os dados disponíveis, gerados em campanhas de monitoramento e em estudos na área do rio Jacuí e no Lago Guaíba serão utilizados na validação do modelo de transporte de sedimento.

4.5 PARÂMETROS UTILIZADOS

Após os testes necessários para calibração do modelo hidrodinâmico, descritos na seção 4.3, definem-se os parâmetros físicos finais para realização das simulações. Os parâmetros de grade, temporais, físicos, sedimentos não coesivos, sedimentos coesivos, condições iniciais e coeficientes de arrasto do vento são apresentados na TABELA 6.

TABELA 6. PARÂMETROS UTILIZADOS NO MODELO HIDRODINÂMICO DO BAIXO JACUÍ

Parâmetros de Grade	
Sistemas de Coordenadas	Cartesiano
Números de Pontos na Direção M	546
Números de Pontos na Direção N	105
Resolução	125 m
Latitude de referência	-29°
Orientação da Grade	0°
Parâmetros Temporais	
Passo de Tempo	0.5 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)	U=0.03; V=0.03 (constante)
Viscosidade Horizontal Turbulenta	1 m ² /s
Viscosidade Horizontal de Difusividade	10 m ² /s
Coefficientes de Arrasto do Vento	
Coefficiente	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 Sedimento Coesivo	
Densidade Específica	2100 kg/m ³
Densidade do Leito Seco	500 kg/m ³
Velocidade de Afundamento	0,125 mm/s

5 CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO-SEDIMENTOLÓGICO DO BAIXO JACUÍ

A calibração de modelos hidrodinâmicos consiste na definição dos conjuntos de parâmetros físicos que melhor reproduzam os campos hidrodinâmicos medidos (campos de velocidade e nível d'água), nesse sentido é essencial que o período de calibração contemple situações hidrológicas extremas (períodos de altas vazões e de baixas vazões) não importando o quão longo é a série temporal utilizada. O importante é obter simulações estáveis para os períodos de maiores vazões, ou seja, se um determinado conjunto parâmetros físicos do modelo é capaz de reproduzir situações hidrológicas extremas ele será capaz de simular corretamente todo o padrão hidrológico encontrado no local.

Durante o processo de calibração foi observado que o passo de tempo de integração foi o parâmetro limitante para simulações de longos períodos. Isso ocorreu porque o passo de tempo, como anteriormente citado, está diretamente relacionado ao número do Courant. Os períodos de alta vazão implicam em campos de velocidades elevados e por consequência necessita de uma diminuição no passo de tempo para manter o número de Courant dentro dos limites de estabilidade do modelo. Utilizando uma máquina com processador I7 com 4 núcleos disponíveis para realizar a simulação, o passo de tempo de integração para o modelo hidrodinâmico do Baixo Jacuí foi de 0,5 minutos, resultando em 24 horas para simular um ano. Este tempo de processamento inviabilizou as simulações dos períodos de dados disponíveis para a calibração de 30 anos e dos 9 anos para a validação.

Devido a isto, para calibração do modelo hidrossedimentológico do Baixo Jacuí foram selecionados dois anos (1984 e 2001) de maior atividade hidrológica (picos máximos de descarga líquida) com base nos dois rios, Jacuí e Taquari – Antas, de maior influência no trecho modelado.

A FIGURA 24 e a FIGURA 25 apresentam as séries temporais de descarga líquida e descarga sólida para os contornos Jacuí e Taquari-Antas, respectivamente, para o período de 01/01/1975 a 31/12/2005. Observa-se que o período de maior vazão, de 10.656 m³/s, para o Jacuí ocorreu no dia 23/05/1984, no mesmo dia a descarga sólida foi de 167.031 toneladas. Para o contorno Taquari-Antas a vazão máxima de 13.112 m³/s ocorreu no dia 03/10/2001, neste dia a descarga sólida foi de 122.400 toneladas.

FIGURA 24. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – DE 01 DE JANEIRO DE 1975 A 31 DE DEZEMBRO DE 2005 – CONTORNO JACUÍ (SETA INDICA A VAZÃO MÁXIMA DO PERÍODO)

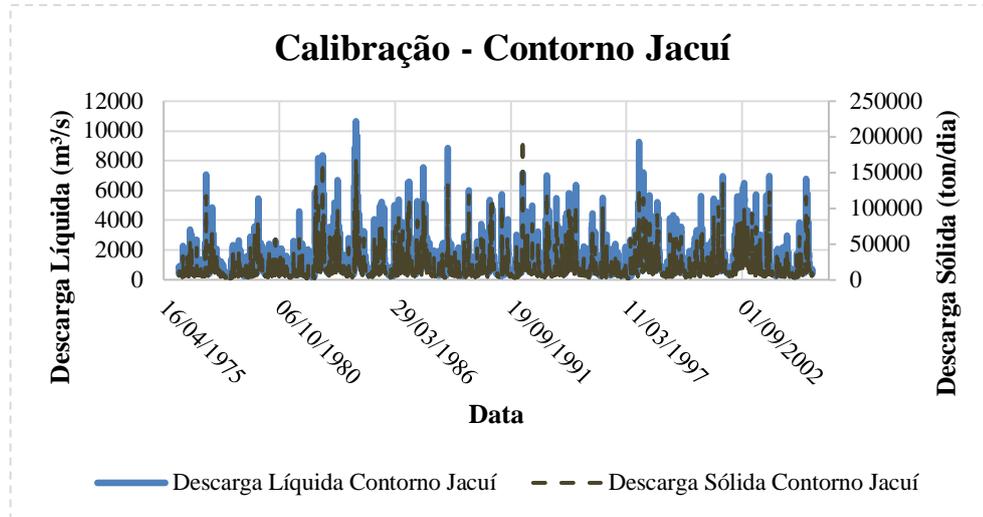
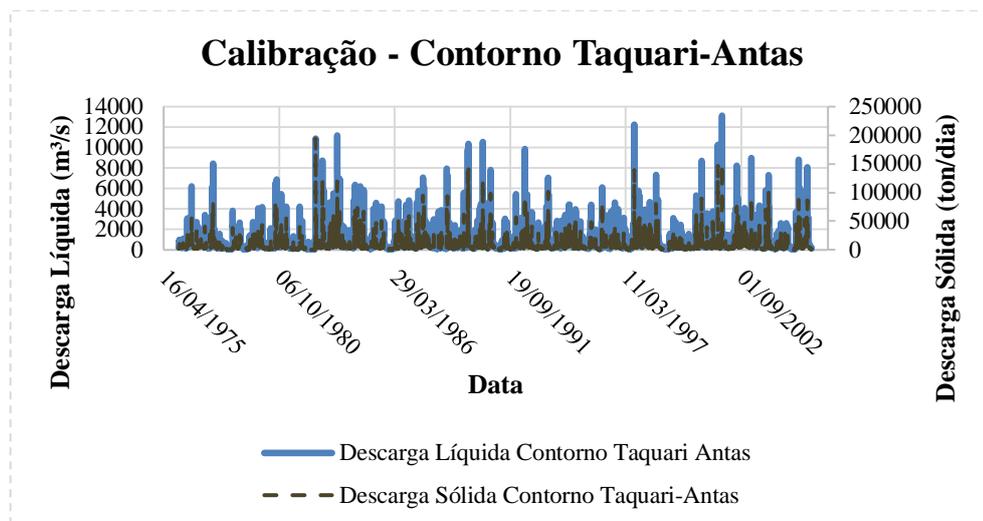


FIGURA 25. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – DE 01 DE JANEIRO DE 1975 A 31 DE DEZEMBRO DE 2005 – CONTORNO TAQUARI-ANTAS (SETA INDICA A VAZÃO MÁXIMA DO PERÍODO)



5.1 DADOS DE ENTRADA

Com base na literatura disponível (TABELA 1) os dados de descarga sólida inseridos nos contornos correspondem a classe de sedimentos não coesivos. As séries temporais de descarga líquida e sólida para cada um dos contornos de entrada de dados no modelo, para os anos de 1984 e 2001, são apresentadas a seguir:

FIGURA 26. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 1984 – CONTORNO JACUÍ

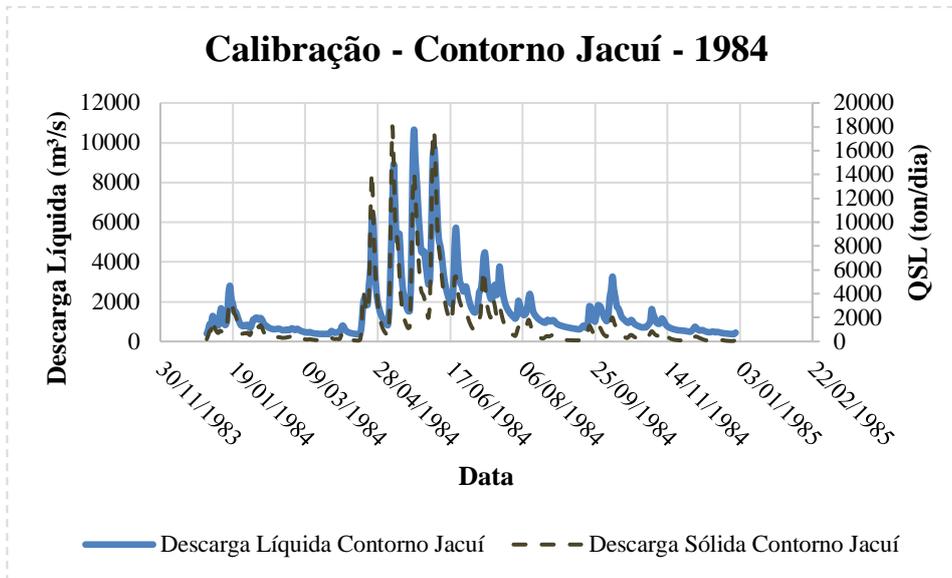


FIGURA 27. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 1984 – CONTORNO TAQUARI-ANTAS

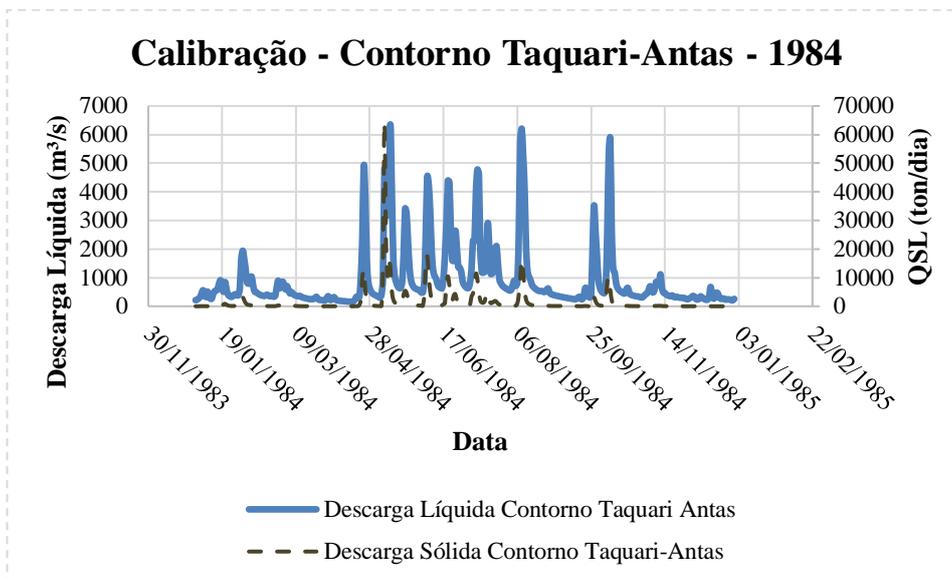


FIGURA 28. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 1984 – CONTORNO CAÍ

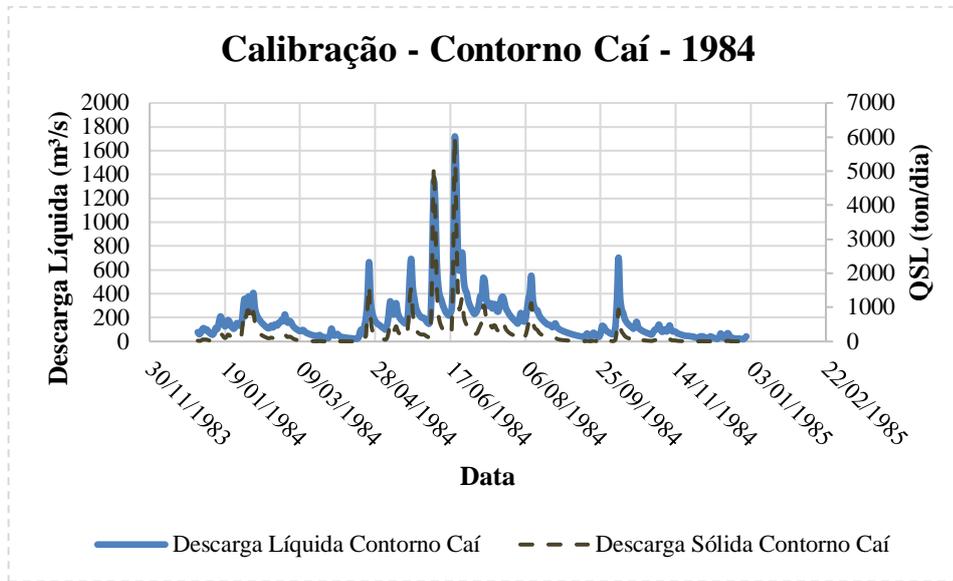


FIGURA 29. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 1984 – CONTORNO SINOS

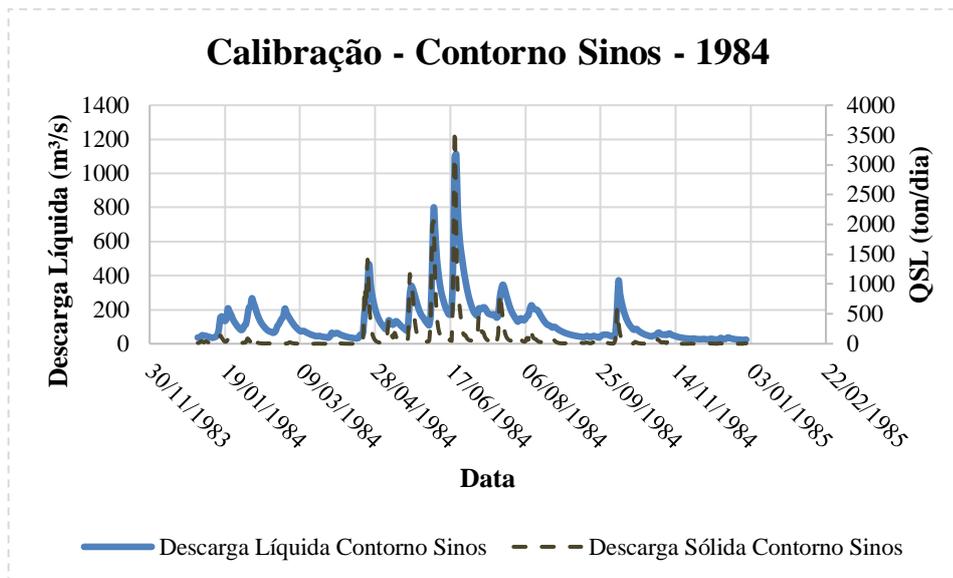


FIGURA 30. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 1984 – CONTORNO GRAVATAÍ

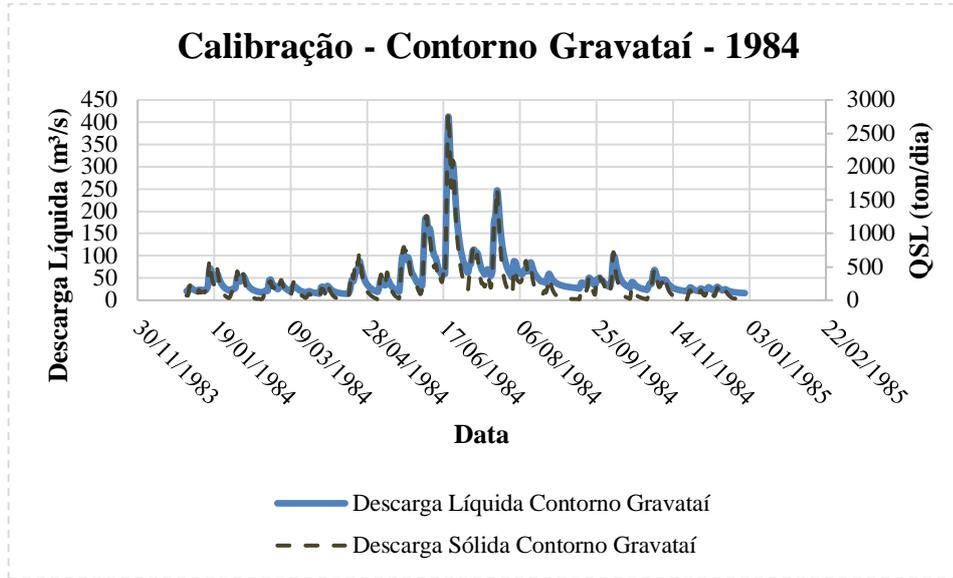


FIGURA 31. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2001 – CONTORNO JACUÍ

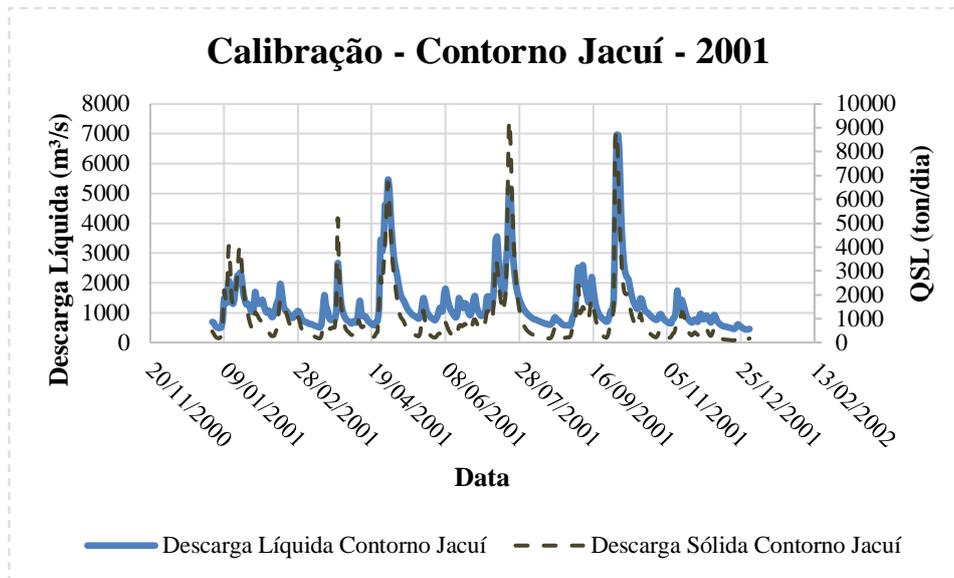


FIGURA 32. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2001 – CONTORNO TAQUARI-ANTAS

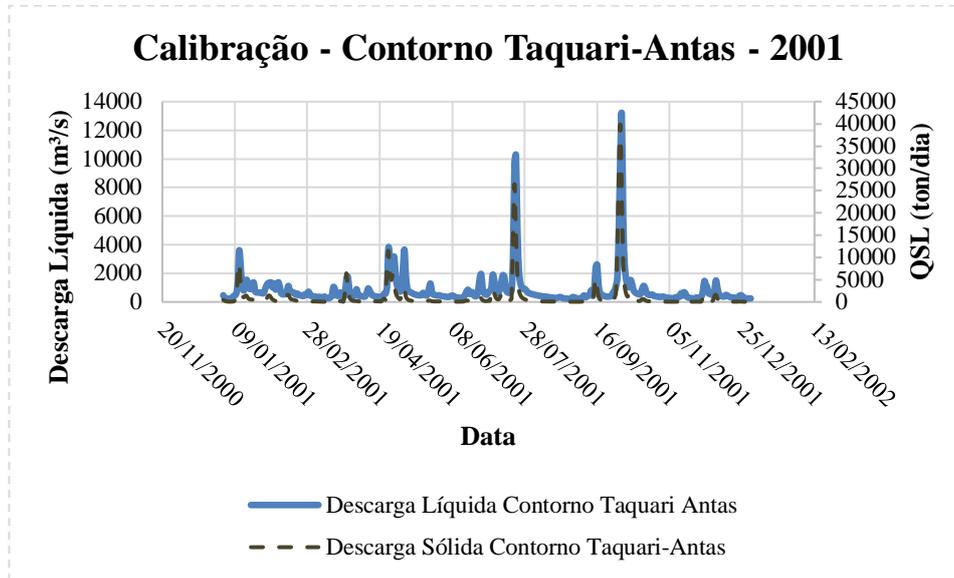


FIGURA 33. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2001 – CONTORNO CAÍ

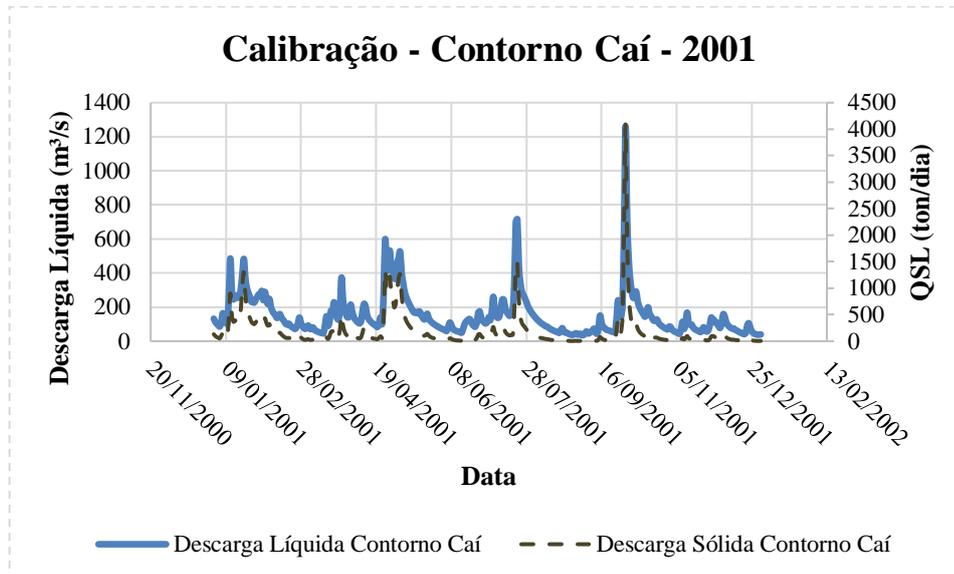


FIGURA 34. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2001 – CONTORNO SINOS

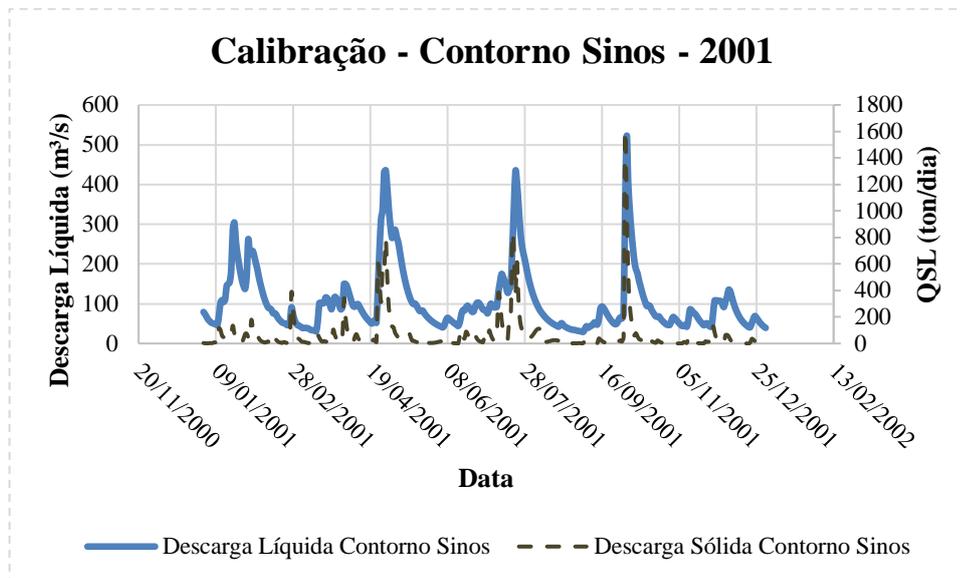
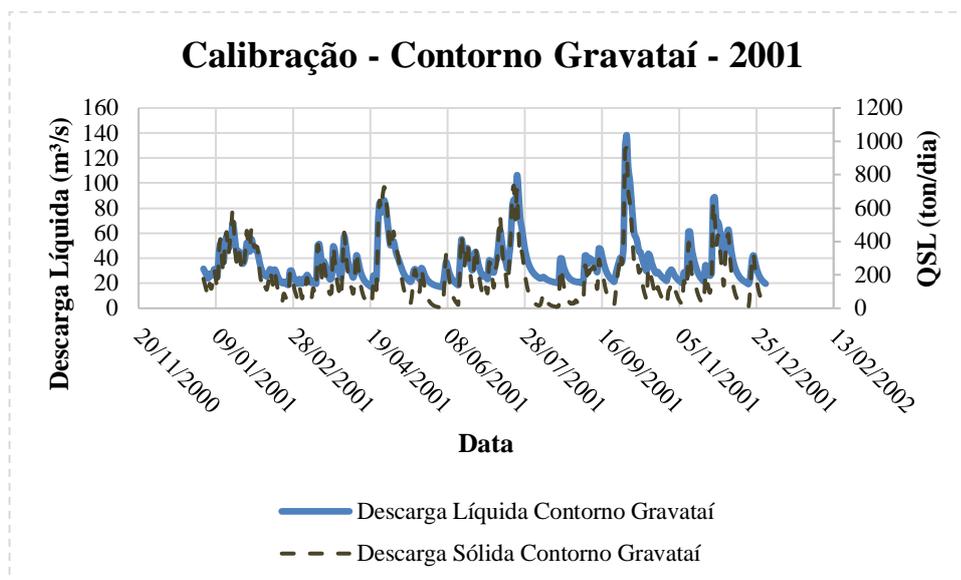


FIGURA 35. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2001 – CONTORNO GRAVATAÍ



As análises estatísticas das séries temporais de descarga líquida e descarga sólida utilizadas nos contornos para o ano de 1984 são apresentadas na TABELA 7 e TABELA 8. Para o ano de 2001 as séries temporais são apresentadas na TABELA 9 e TABELA 10, para a descarga líquida e sólida, respectivamente. Para respeitar as condições de conservação de massa, no Contorno Baixo Jacuí (contorno aberto) foi utilizada uma série temporal de nível de água com valor constante (nível de referência do modelo = 0 m).

TABELA 7. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DAS SÉRIES TEMPORAIS DE DESCARGA LÍQUIDA - CALIBRAÇÃO - 1984

Descarga líquida (m ³ /s)	Contorno Jacuí	Contorno Taquari Antas	Contorno Caí	Contorno Sinos	Contorno Gravataí
Máxima	10656,42	6357,22	1685,96	1112,59	406,91
Média	1625,02	925,59	176,36	129,30	50,56
Mínima	361,29	157,85	18,68	22,31	14,62
Q90	450,12	250,52	37,06	31,29	19,97

TABELA 8. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DAS SÉRIES TEMPORAIS DE DESCARGA SÓLIDA - CALIBRAÇÃO - 1984

Descarga sólida (ton/dia)	Contorno Jacuí	Contorno Taquari Antas	Contorno Caí	Contorno Sinos	Contorno Gravataí
Máxima	17944,76	64145,46	5971,29	3595,47	2775,00
Média	1660,55	1427,46	250,72	105,97	256,57
Mínima	38,50	2,60	0,21	0,05	6,43
Q90	105,76	13,68	4,13	1,16	24,55

TABELA 9. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DAS SÉRIES TEMPORAIS DE DESCARGA LÍQUIDA - CALIBRAÇÃO - 2001

Descarga líquida (m ³ /s)	Contorno Jacuí	Contorno Taquari Antas	Contorno Caí	Contorno Sinos	Contorno Gravataí
Máxima	9202,80	39853,63	4097,31	1568,21	960,50
Média	1055,82	1079,50	185,87	63,05	195,54
Mínima	86,60	22,80	3,60	0,16	4,89
Q90	217,61	52,75	10,61	1,83	30,25

TABELA 10. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DAS SÉRIES TEMPORAIS DE DESCARGA SÓLIDA - CALIBRAÇÃO - 2001

Descarga sólida (ton/dia)	Contorno Jacuí	Contorno Taquari Antas	Contorno Caí	Contorno Sinos	Contorno Gravataí
Máxima	13112,20	1260,43	522,29	138,40	522,29
Média	841,01	153,01	104,54	36,16	104,54
Mínima	221,82	35,28	29,43	17,07	29,43
Q90	284,86	52,11	43,08	20,90	43,08

5.2 RESULTADOS CALIBRAÇÃO

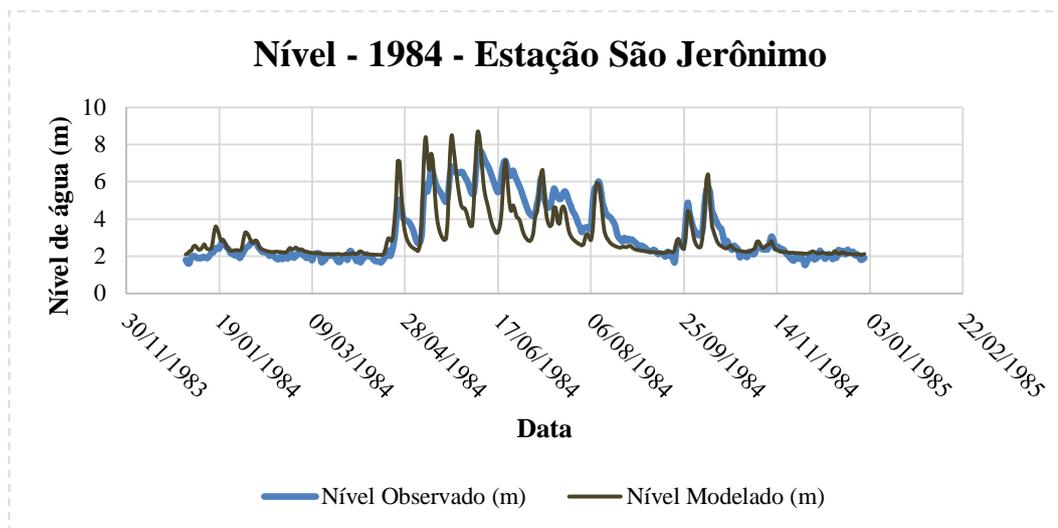
5.2.1 RESULTADOS CALIBRAÇÃO ANO 1984

A FIGURA 36 apresenta a comparação entre o nível modelado e o nível observado para um ponto de observação localizado próximo à estação hidrológica da ANA em São Jerônimo. Um aspecto desse resultado a ser ressaltado é a capacidade do modelo responder em fase com os dados observados. Baseado no gráfico é possível verificar a reprodução concomitante dos picos de cheia, bem como a consistência nos valores durante os períodos de baixas vazões, observados no início da série temporal. O fato do modelo ser capaz de reproduzir mais corretamente os períodos de baixas vazões do que os

períodos de alta estão relacionados diretamente ao modelo digital batimétrico utilizado. Ou seja, para o modelo computacional, a menor célula (resolução da grade) é de 125 m², com isso o modelo não “enxerga” detalhes do terreno que possam interferir no escoamento.

Pelo resultado observado para o período de cheia, região central do gráfico, o modelo responde corretamente e atinge valores de níveis compatíveis com o monitorado, mas rebaixa mais rápido do que a realidade, mostrando que na realidade, as inundações são retidas por períodos de tempo mais longos. Deve haver geometrias do terreno, que a resolução do modelo não é capaz de representar, que no processo de inundação retém água por períodos mais longos. O fato é que mesmo que se tenha disponível levantamentos topográficos e batimétricos de altíssima resolução, como os dados de levantamento LIDAR, que entrega modelos digitais de terreno com resolução submétrica, não seria possível resolver todas essas inconsistências, uma vez que o principal limitante em modelagem matemática, acaba sendo a resolução espacial e temporal das grades numéricas que deve se adequar à capacidade computacional dos computadores disponíveis.

FIGURA 36. SÉRIE TEMPORAL DE NÍVEL MODELADO X NÍVEL –SÃO JERÔNIMO 1984



Observa-se que mesmo com as dificuldades em se conseguir que um modelo que reproduza 100% dos dados observados, os índices de desempenho do modelo apresentaram valores elevados, como pode ser verificado na TABELA 11.

TABELA 11. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS, COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E COEFICIENTE NASH - 2001

Nível d'água (m)	Observado	Modelado
Máximo	7,64	8,6
Médio	3,3	3,0
Mínimo	1,5	2,1
Coefficiente de Correlação (Pearson)	0,85	
Coefficiente de Nash	0,72	

A FIGURA 37 apresenta a distribuição espacial do campo de velocidade modelado, obtido com o conjunto de parâmetros que melhor reproduziu o campo de elevação para o ano de 1984. Os resultados obtidos mostram que o modelo responde com máximas velocidade da ordem de 3 m/s para vazões superiores a 8000 m³/s no contorno do rio Jacuí, e como era de se esperar, uma vez que a principal forçante é justamente a descarga líquida afluyente nos quatro pontos do contorno aberto, existe uma perfeita simetria entre o aumento da descarga líquida e o aumento dos valores do campo de velocidade. Esse fato também se torna evidente nos resultados apresentados na FIGURA 38, onde a reposta do modelo a valores de baixas vazões, inferiores a 1000 m³/s no contorno do rio Jacuí, apresenta velocidades inferiores a 0,5 m/s em todo o domínio do modelo.

FIGURA 37. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE – MÁXIMA VAZÃO NO CONTORNO JACUÍ

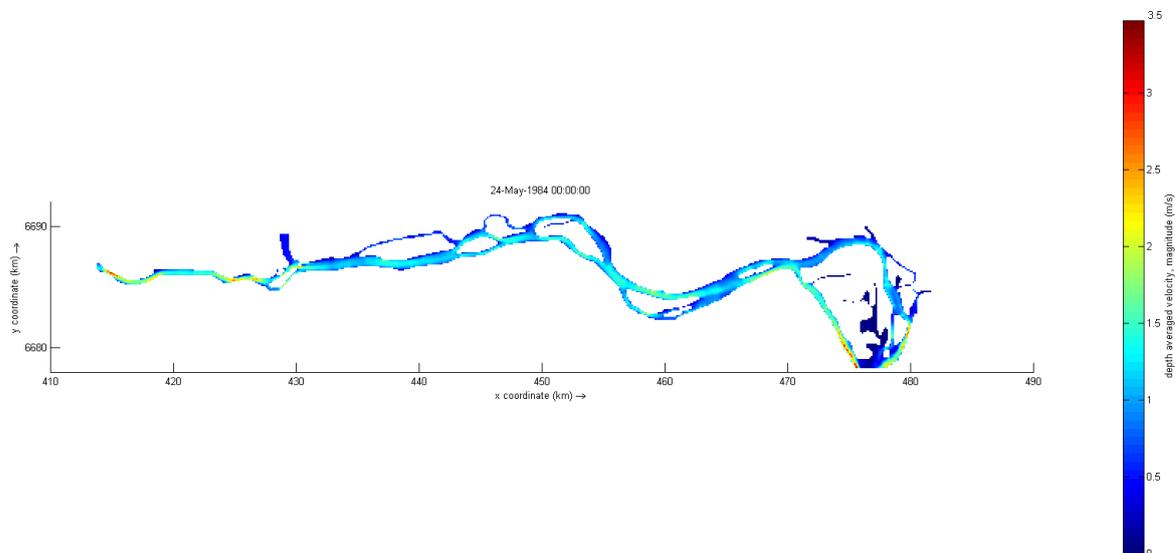
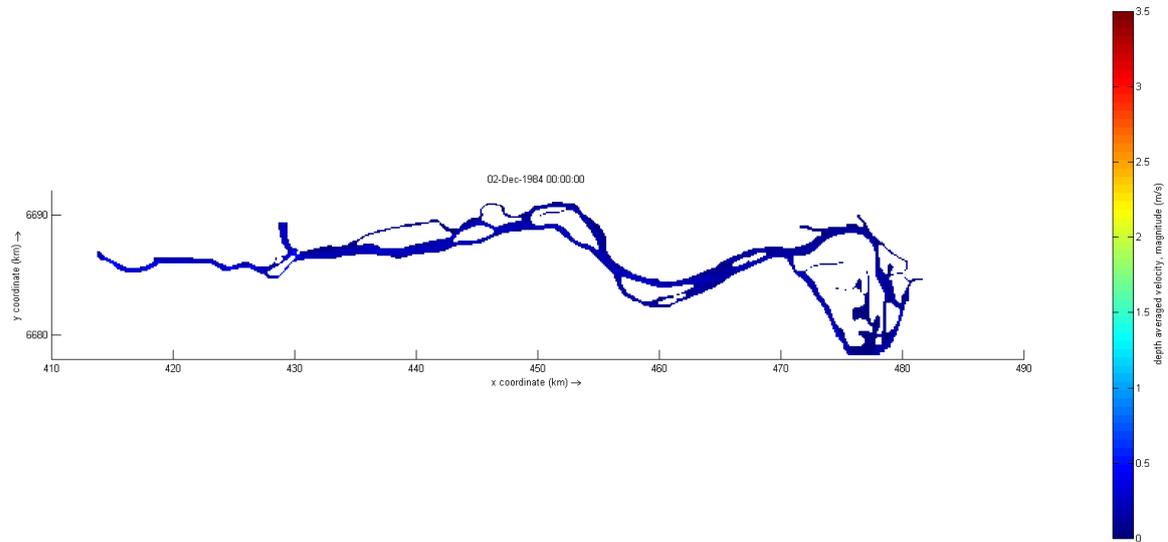


FIGURA 38. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE – BAIXA VAZÃO NO CONTORNO JACUÍ < 1000 m³/s



A FIGURA 39 apresenta a distribuição espacial das áreas de erosão/deposição obtida com a modelagem para o ano de 1984. Como comentado anteriormente, esse resultado foi gerado forçando o modelo hidrodinâmico e de transporte de sedimento, com a descarga líquida e sólida gerada pelo modelo hidrológico MGB. Assim, com base em uma primeira análise qualitativa, o resultado do modelo para o transporte de um sedimento com características de areia média ($D_{50} = 150 \mu\text{m}$), apresentou áreas preferenciais de deposição de areia condizente com o trabalho realizado por Hartmann (2017) (FIGURA 5, FIGURA 6 e FIGURA 7), onde ocorrem as retiradas de areia por empresas mineradoras.

FIGURA 39. MAPA DE EROSIÃO / SEDIMENTAÇÃO – MÁXIMA VAZÃO NO CONTORNO JACUÍ

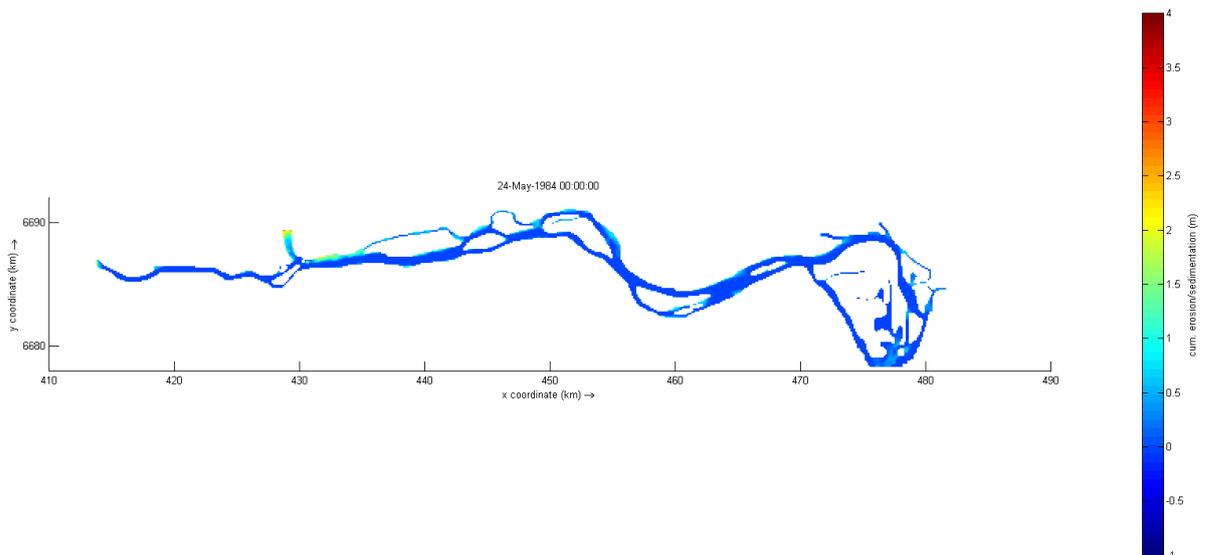
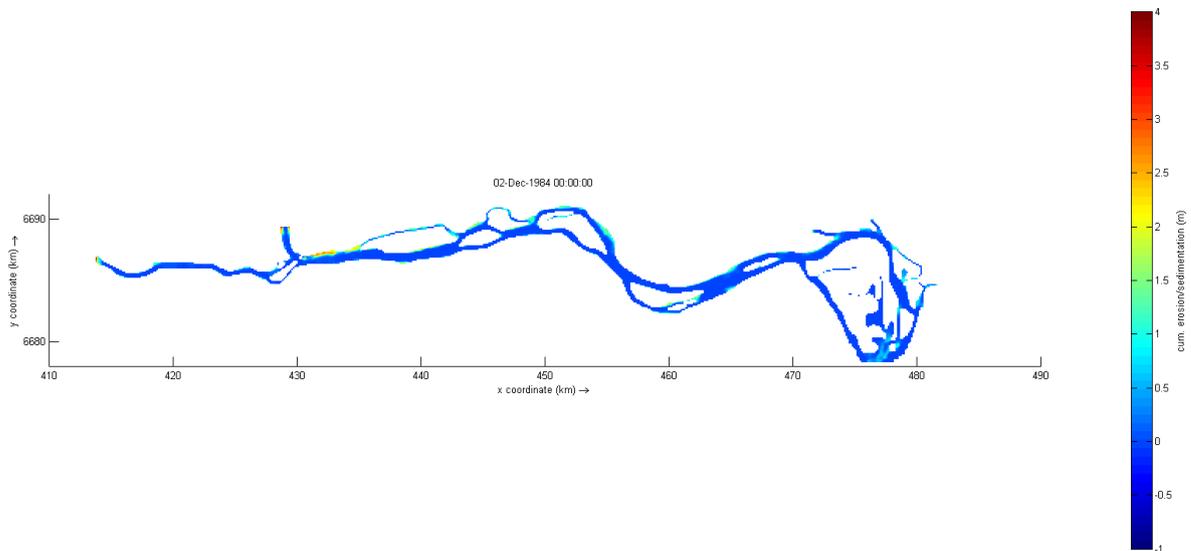


FIGURA 40. MAPA DE EROSIÃO / SEDIMENTAÇÃO – BAIXA VAZÃO NO CONTORNO JACUÍ < 1000 m³/s



5.2.2 RESULTADOS CALIBRAÇÃO ANO 2001

Para o ano de 2001, ano em que ocorreu o pico de máxima vazão para o rio Taquari-Antas no mês de outubro, as saídas de nível respondem ao perfil encontrado nos dados observados. Os dados modelados apresentam valores um pouco acima dos dados observados, porém quando analisados os coeficientes de correlação (TABELA 12) das duas séries temporais a modelagem é considerada satisfatória.

FIGURA 41. SÉRIE TEMPORAL DE NÍVEL OBSERVADO E MODELADO – 2001 – ESTAÇÃO SÃO JERÔNIMO

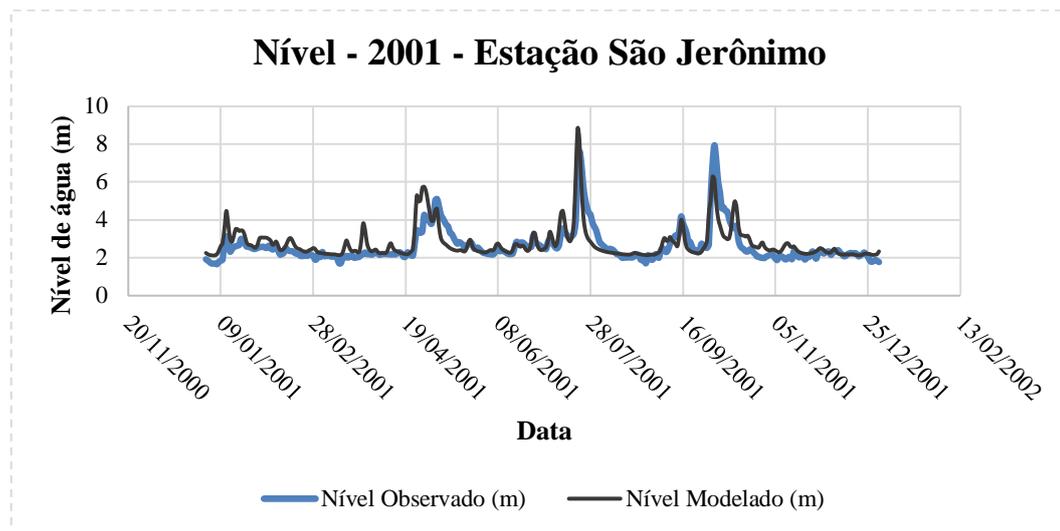


TABELA 12. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS, COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON E COEFICIENTE NASH - 2001

Nível d'água (m)	Observado	Modelado
Máximo	7,94	8,82
Médio	2,63	2,77
Mínimo	1,66	2,12
Coefficiente de Correlação (Pearson)	0,78	
Coefficiente de Nash	0,56	

Os campos de velocidades (FIGURA 42 e FIGURA 43), como o esperado, seguem as variações de entrada de descarga líquida no sistema. Apresentando maiores velocidades nos períodos de cheia e as menores velocidades nos períodos de vazão baixa. Com relação a dinâmica de erosão/sedimentação, nota-se deposição de sedimentos nas mesmas áreas de deposição apresentadas por SOMAR (2017). Apesar de ocorrer um aumento na taxa de erosão quando ocorrem períodos de cheia (FIGURA 44), a alta energia das ondas também consegue carregar sedimentos ao longo do trecho analisado, criando áreas de deposição de sedimento. Em períodos de vazões baixas (FIGURA 45) o transporte de sedimento se mante, de uma maneira geral, estável.

FIGURA 42. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE – MÁXIMA VAZÃO NO CONTORNO TAQUARI-ANTAS

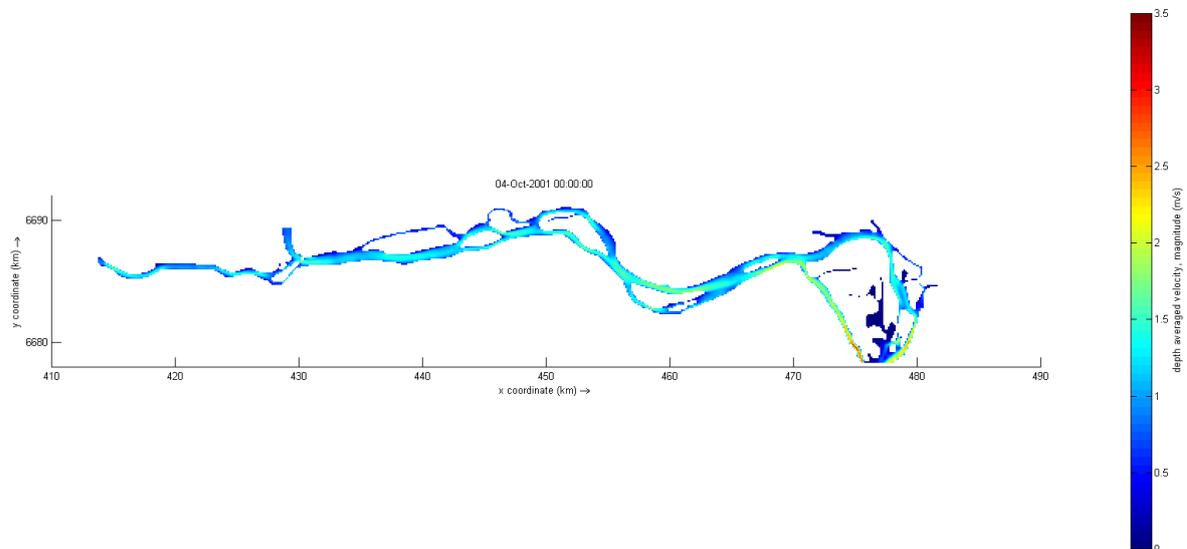


FIGURA 43. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE – BAIXA VAZÃO NO CONTORNO TAQUARI-ANTAS < 1000 m³/s

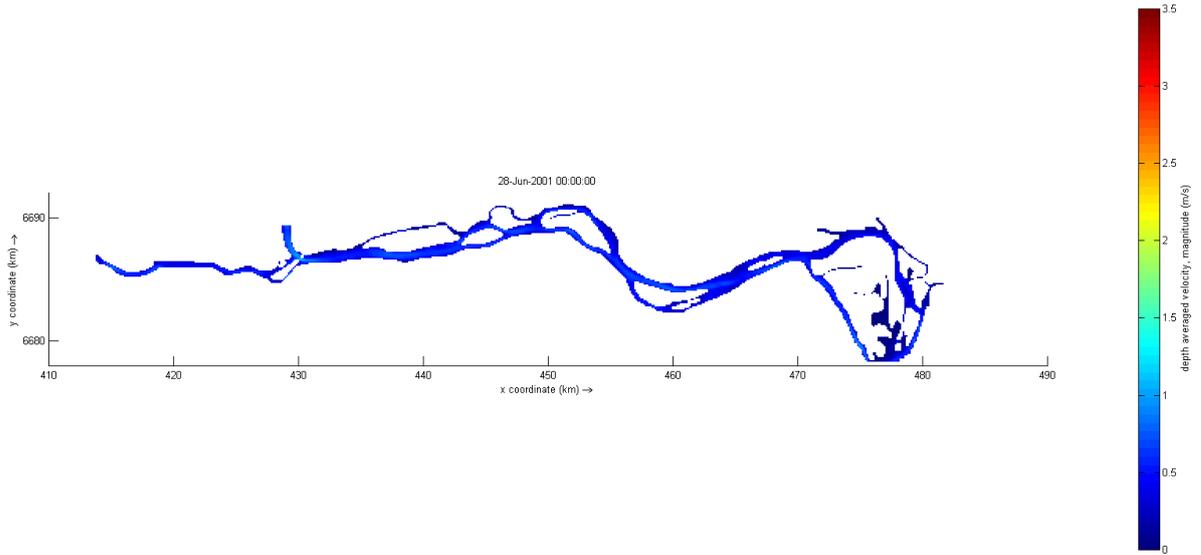


FIGURA 44. MAPA DE EROSIÃO / SEDIMENTAÇÃO – MÁXIMA VAZÃO NO CONTORNO TAQUARI-ANTAS

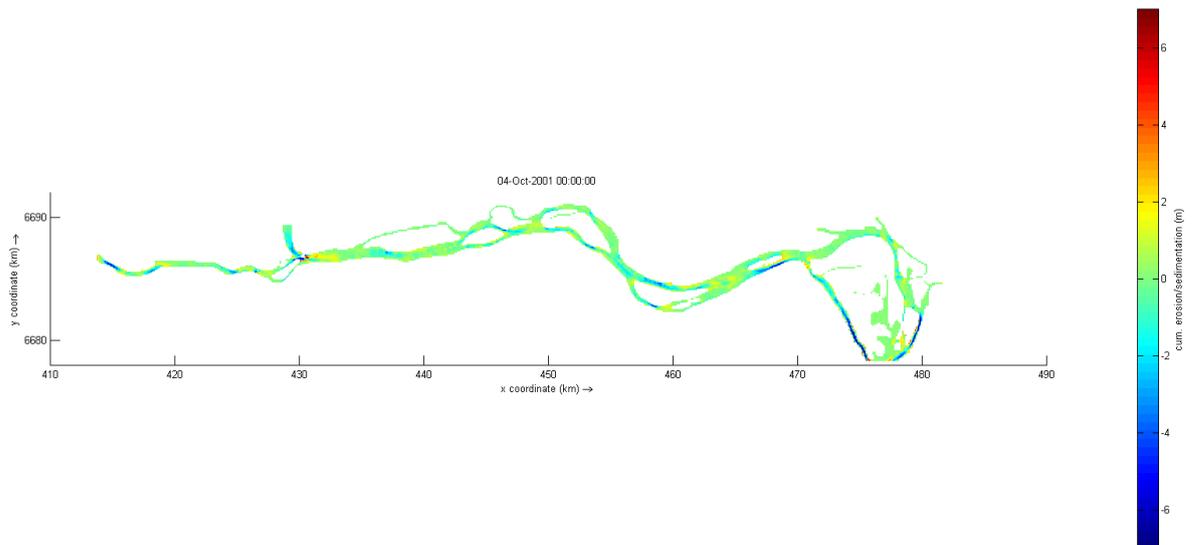
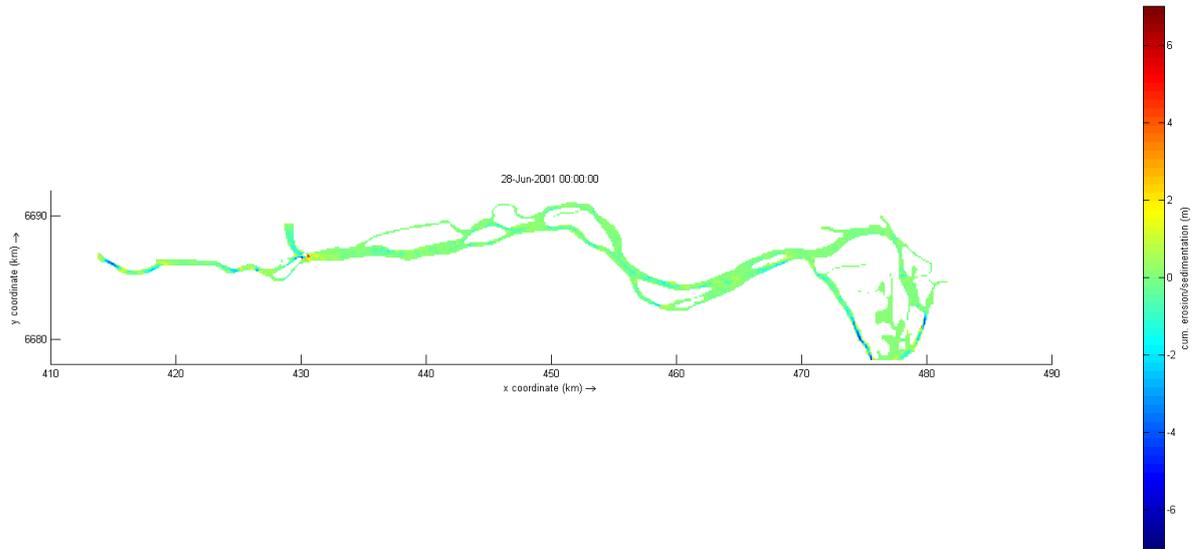


FIGURA 45. MAPA DE EROSIÃO / SEDIMENTAÇÃO – BAIXA VAZÃO NO CONTORNO TAQUARI-ANTAS < 1000 m³/s



6 VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DO BAIXO JACUÍ

6.1 DADOS DE ENTRADA

As séries temporais de descarga líquida e sólida para cada um dos contornos de entrada de dados no modelo, para o ano de 2008, são apresentadas a seguir:

FIGURA 46. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2008 – CONTORNO JACUÍ

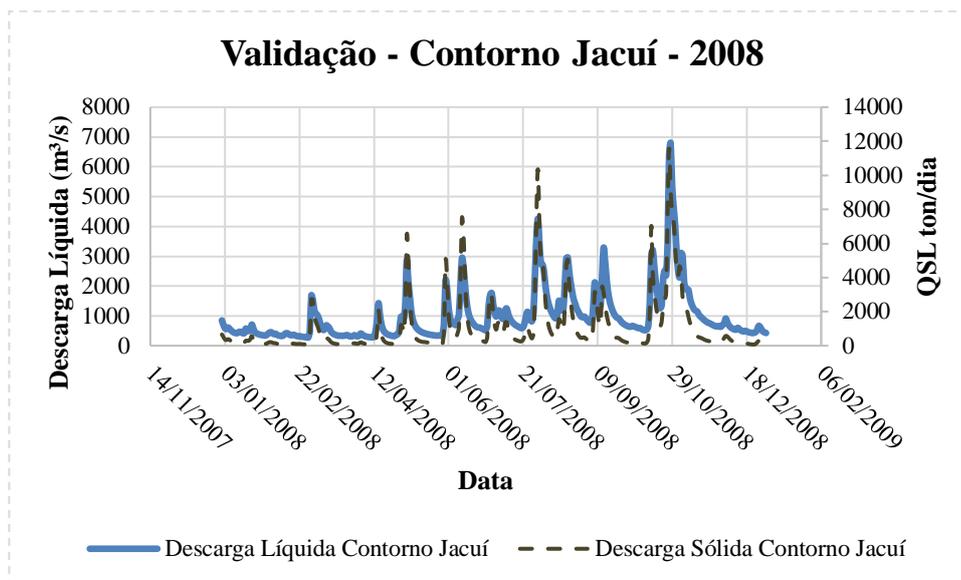


FIGURA 47. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2008 – CONTORNO TAQUARI-ANTAS

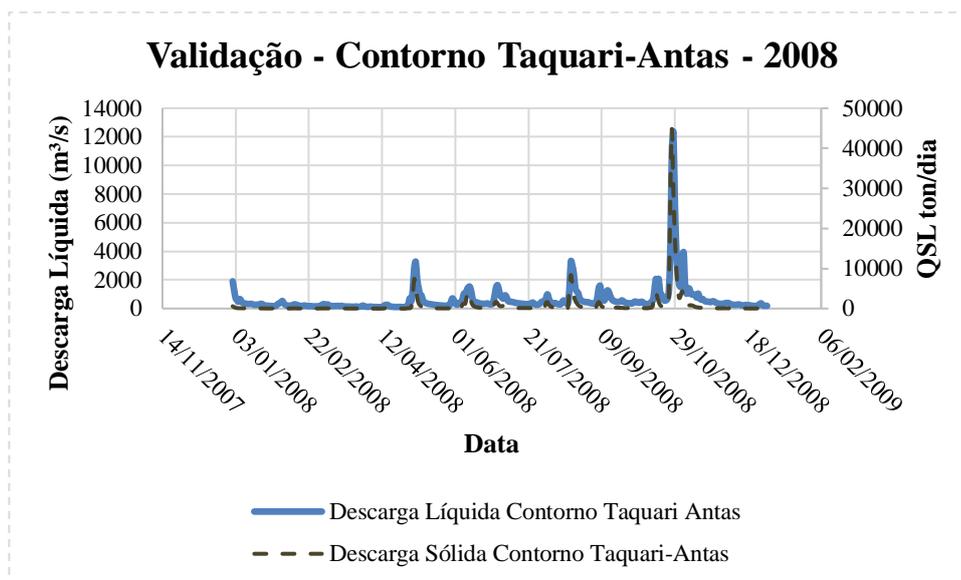


FIGURA 48. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2008 – CONTORNO CAÍ

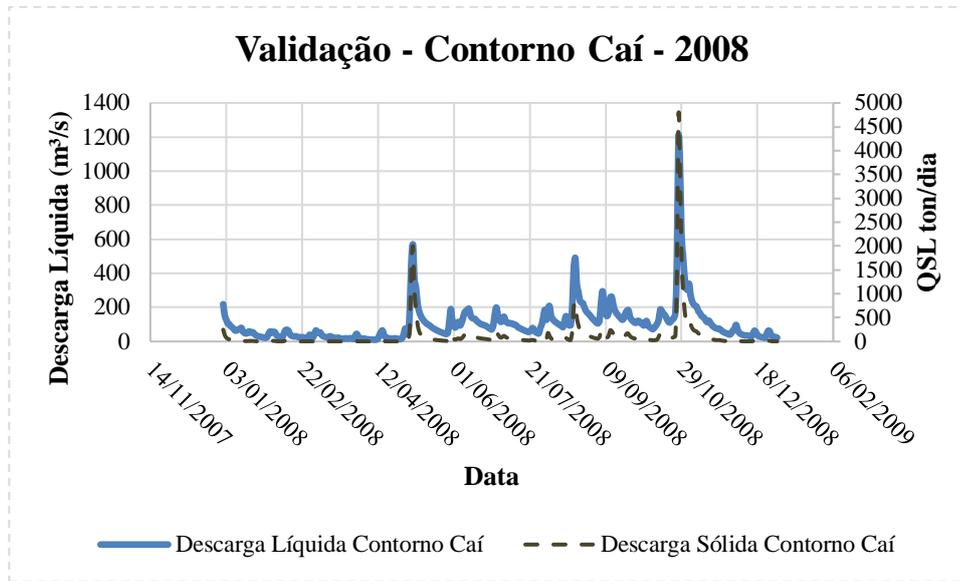


FIGURA 49. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2008 – CONTORNO SINOS

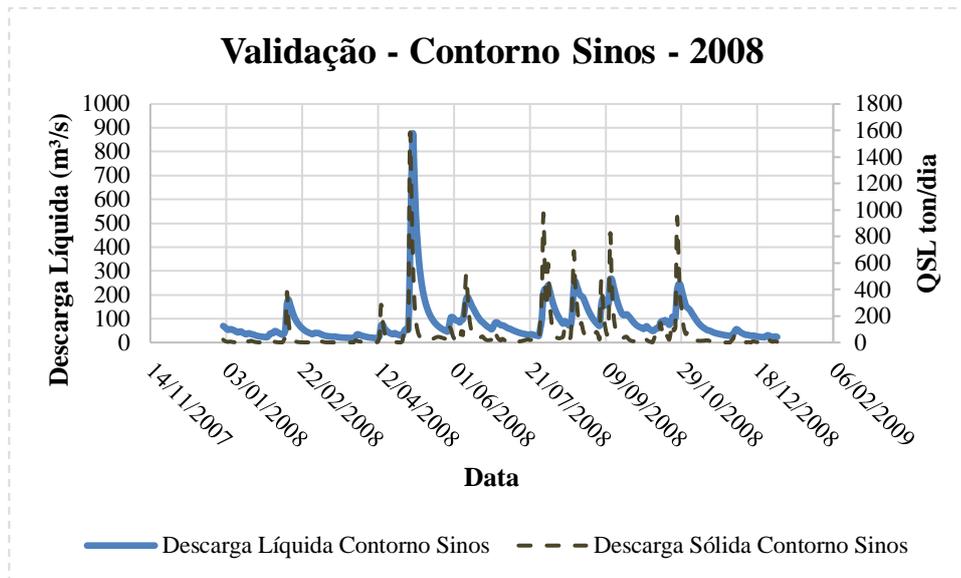
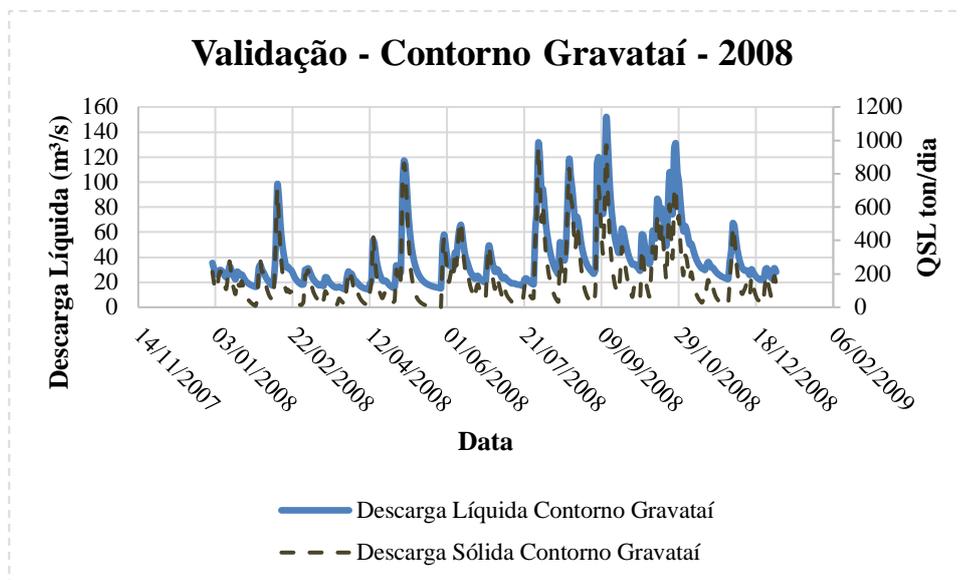


FIGURA 50. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E DESCARGA SÓLIDA – 2008 – CONTORNO GRAVATAÍ



Os valores máximos, médios, mínimos e o Q_{90} das séries temporais de descarga líquida e sólidas utilizadas nos contornos são apresentadas na TABELA 13 e TABELA 14, respectivamente.

TABELA 13. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q_{90} DAS SÉRIES TEMPORAIS DE DESCARGA LÍQUIDA - VALIDAÇÃO - 2008

Descarga líquida (m³/s)	Contorno Jacuí	Contorno Taquari Antas	Contorno Cai	Contorno Sinos	Contorno Gravataí
Máxima	6801,93	12336,84	1193,40	877,34	151,46
Média	1002,38	618,32	105,90	85,72	39,21
Mínima	280,92	101,34	10,05	18,45	14,45
Q90	341,76	151,24	21,52	24,69	17,81

TABELA 14. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q_{90} DAS SÉRIES TEMPORAIS DE DESCARGA SÓLIDA - VALIDAÇÃO - 2008

Descarga sólida (ton/dia)	Contorno Jacuí	Contorno Taquari Antas	Contorno Cai	Contorno Sinos	Contorno Gravataí
Máxima	11576,89	44838,82	4715,42	1540,66	971,67
Média	1059,45	801,94	112,08	67,18	182,60
Mínima	70,95	1,52	0,00	0,11	2,72
Q90	110,86	11,00	0,63	0,82	26,54

6.2 RESULTADOS VALIDAÇÃO

O ano de 2008 foi selecionado para validação, devido a existência do estudo realizado por Hartmann (2010) com o auxílio da empresa SOMAR, o que possibilita uma análise de comparação dos resultados modelados com os dados observados.

Hartmann e colaboradores (2010) realizaram seções transversais de ADCP (ver seção 2) após um período de inundação que ocorreu na região. No dia 06/10/2008 as vazões de entrada do Baixo Jacuí eram baixas como apresentadas na FIGURA 46 e FIGURA 47. Os autores observaram velocidades de correntes baixas de no máximo 1m/s (TABELA 2), o mesmo ocorreu para as velocidades modeladas, como apresentada na FIGURA 51. A FIGURA 52 mostra o campo de velocidade das correntes para o período de vazão máxima, tanto no Contorno Jacuí quanto para o Contorno Jacuí.

Com relação a dinâmica de erosão/sedimentação, a FIGURA 53 mostra com destaque a região de estudo do trabalho de Hartmann (2017) e das análises feitas pela mineradora SOMAR, nota-se deposição de sedimentos nas mesmas áreas de deposição apresentadas na literatura (FIGURA 5), regiões circuladas indicam as principais zonas de deposição em acordo com o encontrado por Hartmann (2017). É complicado avaliar as taxas de sedimentação de cada local, já que existem apenas informações pontuais, porém o modelo mostrou-se satisfatório para a análise da dinâmica sedimentar do trecho final do Baixo Jacuí – RS.

FIGURA 51. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE –VAZÃO BAIXA

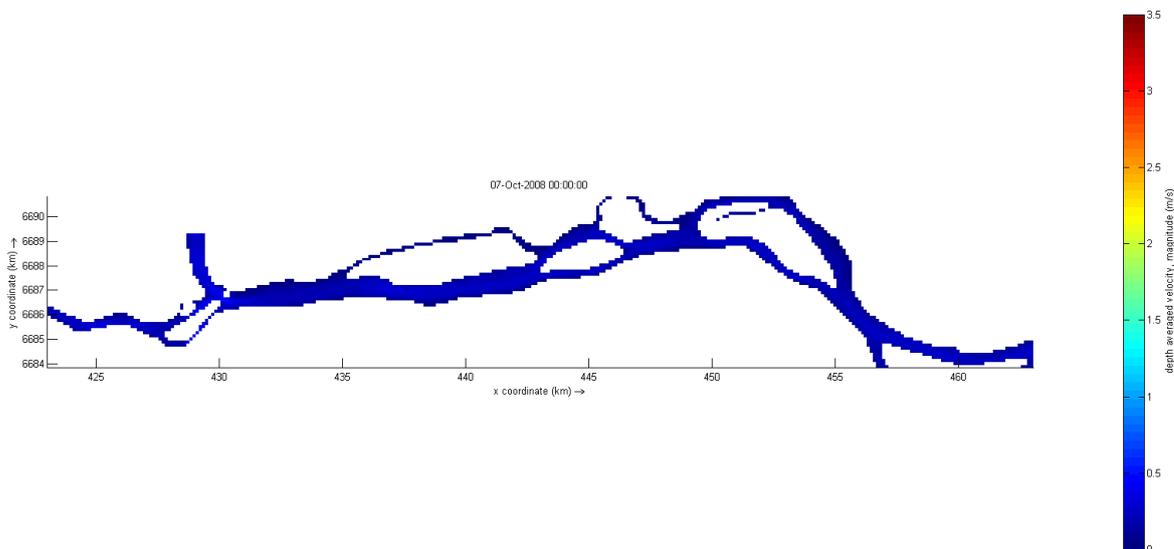


FIGURA 52. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE –VAZÃO ALTA

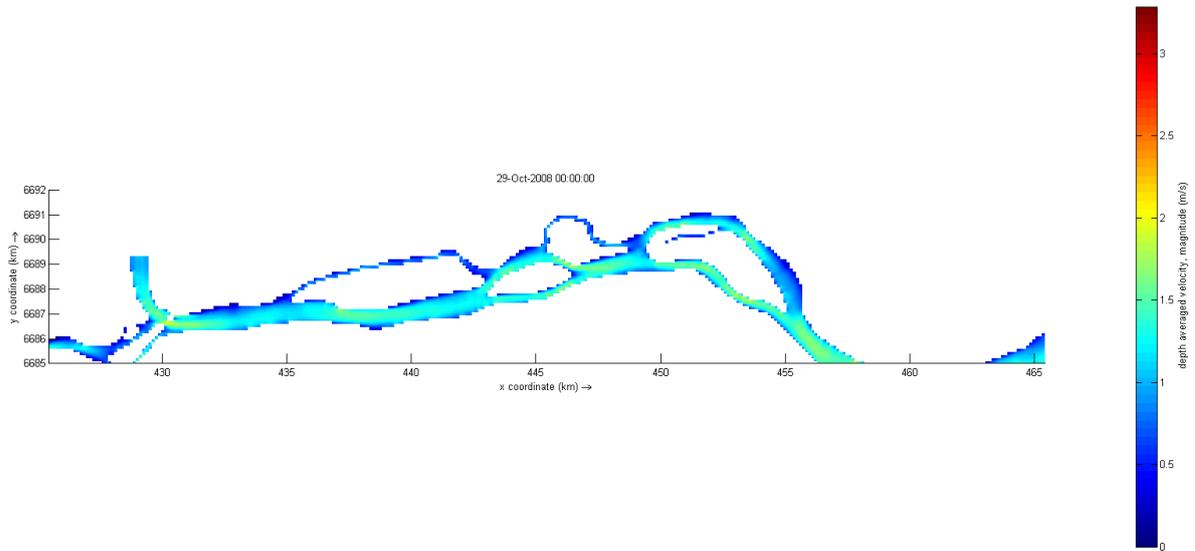
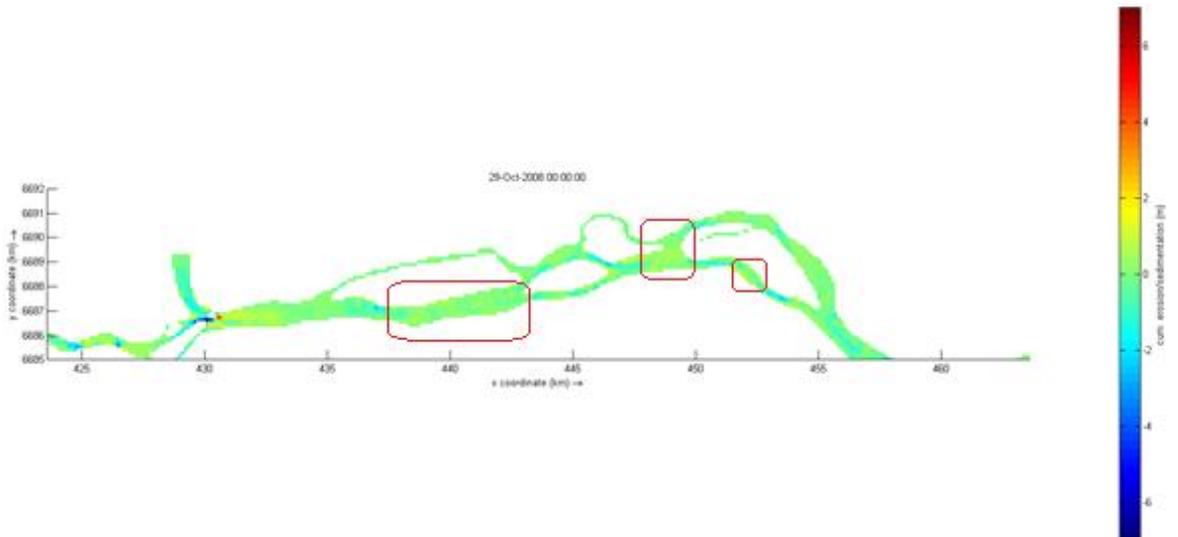


FIGURA 53. MAPA DE EROSIÃO / SEDIMENTAÇÃO – MÁXIMA VAZÃO – EM DESTAQUE: PRINCIPAIS ÁREAS DE DEPOSIÇÃO EM CONCORDÂNCIA COM O TRABALHO DE HATMANN (2017).



7 ANÁLISES DE DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS COESIVOS

Como apresentado no capítulo 4, dados de descarga líquida e de descarga sólida foram inseridos em cinco pontos de entrada na área modelada. A descarga sólida, gerada pelo modelo MGB, fornece a quantidade em toneladas por dia de sedimento, composta por sedimentos finos (argila e silte) e sedimentos mais grossos (areias). Dos resultados da modelagem hidrológica foi realizada a distinção entre esses dois tipos de sedimento, separando-os entre descarga de leito - QSL (para os sedimentos grossos) e descarga de sedimento em suspensão - QSS (para silte e argila), que a princípio não se depositaria no leito do rio.

Uma vez que o trecho modelado apresenta geometria que possibilita a desaceleração do fluxo e conseqüentemente áreas de baixa energia, onde podem ocorrer a deposição de sedimentos, inclusive os mais finos como silte e argila, foram realizadas simulações com dois tipos de sedimentos, areia média e argila. A concentração do sedimento 1, areia média, foi obtida da série temporal de sedimentos do leito (QSL) e os valores de concentração de argila e silte (sedimento 2) foram extraídos da série temporal de sedimentos em suspensão (QSS).

O experimento foi realizado para o ano de 1984, que apresentou um período (janeiro a abril) de baixas vazões para todos os cinco pontos de entrada e períodos de vazões elevadas, superiores a 10.000 m³/s no Rio Jacuí. A FIGURA 54 mostra a distribuição espacial da concentração de sedimentos coesivos (silte e argila) para toda a área modelada, onde pode ser observado que para os períodos de vazão menos intensas, inferiores a 1000 m³/s na entrada do rio Jacuí, a concentração de sedimento em suspensão é máxima nas entradas dos rios Jacuí e Taquari, atingindo valores máximos pouco superiores a 0,16 kg/m³. Observe que essa pluma de sedimento em suspensão se estende por aproximadamente por 45 km a partir da entrada principal, localizada no rio Jacuí. A partir do km 450, centro da área até a desembocadura, início do lago Guaíba, a concentração de sedimento em suspensão se anula. Por outro lado, períodos com descargas elevadas (FIGURA 55), superiores 5000 m³/s, observados entre maio e junho de 1984 no rio Jacuí, produzem campos de corrente intensos, que transportam sedimento em suspensão na coluna da água até o ponto de conexão como o lago Guaíba, onde observa-se concentrações de sedimentos da ordem de 0,05 kg/m³.

FIGURA 54. CONCENTRAÇÃO DE SILTE / ARGILA EM SUSPENSÃO – PERÍODO DE BAIXA VAZÃO

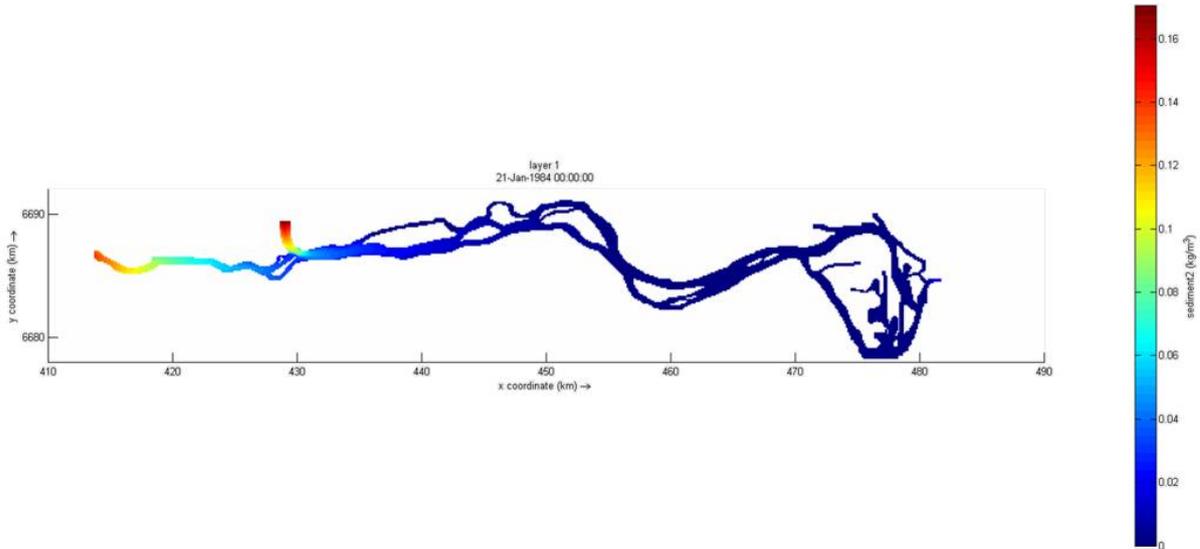
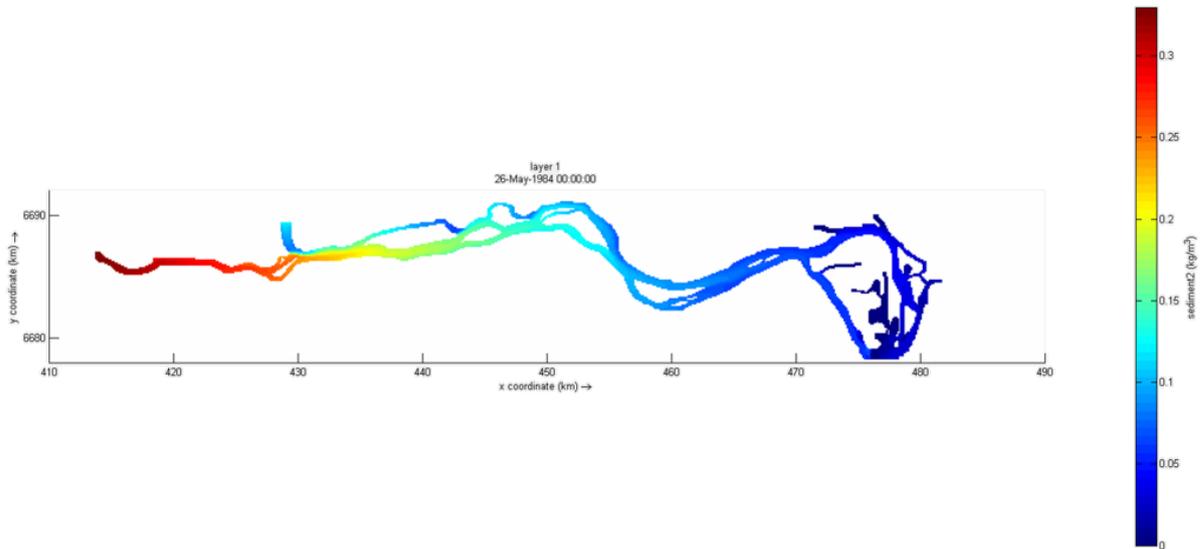


FIGURA 55. CONCENTRAÇÃO DE SILTE / ARGILA EM SUSPENSÃO – PERÍODO DE VAZÃO ALTA



A FIGURA 56 e FIGURA 57, apresentam a magnitude do campo de corrente para os dias de 21 de Janeiro e 26 de maio de 1984, respectivamente, mesmos dias da análise da concentração de sedimento em suspensão. Podemos verificar que as descargas mais intensas geraram velocidades de ordem de 2,5 m/s (FIGURA 57), enquanto que para o início do ano, onde as descargas ficaram abaixo de 1000 m³/s na entrada do domínio pelo rio Jacuí, as máximas velocidades não superam 1.2 m/s (FIGURA 56). Observe que para o período de vazões altas, a maior parte do domínio apresenta valores entre 1,0 e 1,5 m/s.

FIGURA 56. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE PARA OS PERÍODOS DE VAZÕES BAIXAS < 1000 m³/s

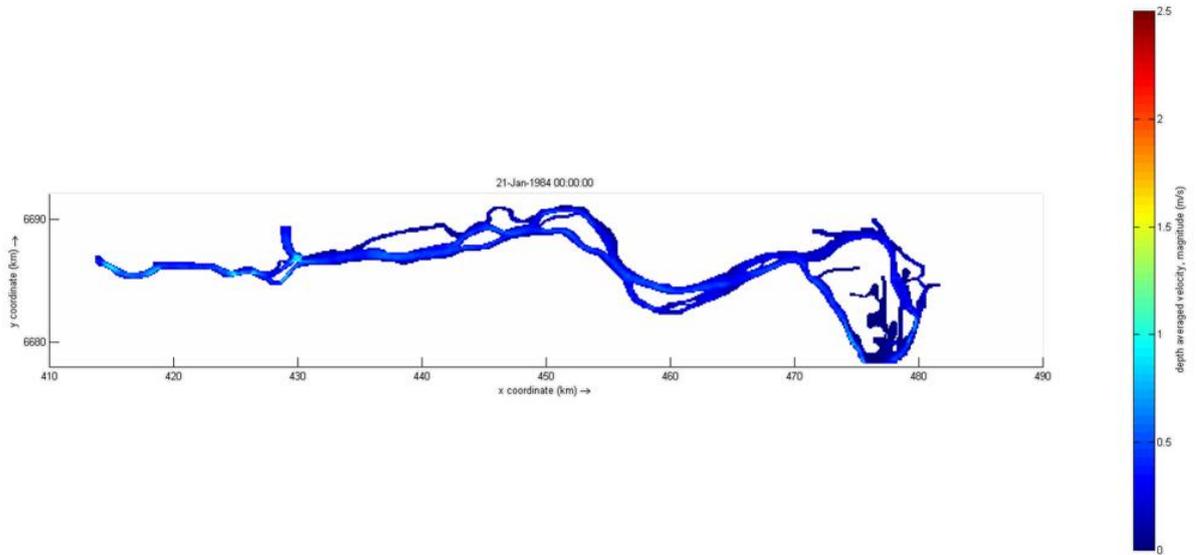
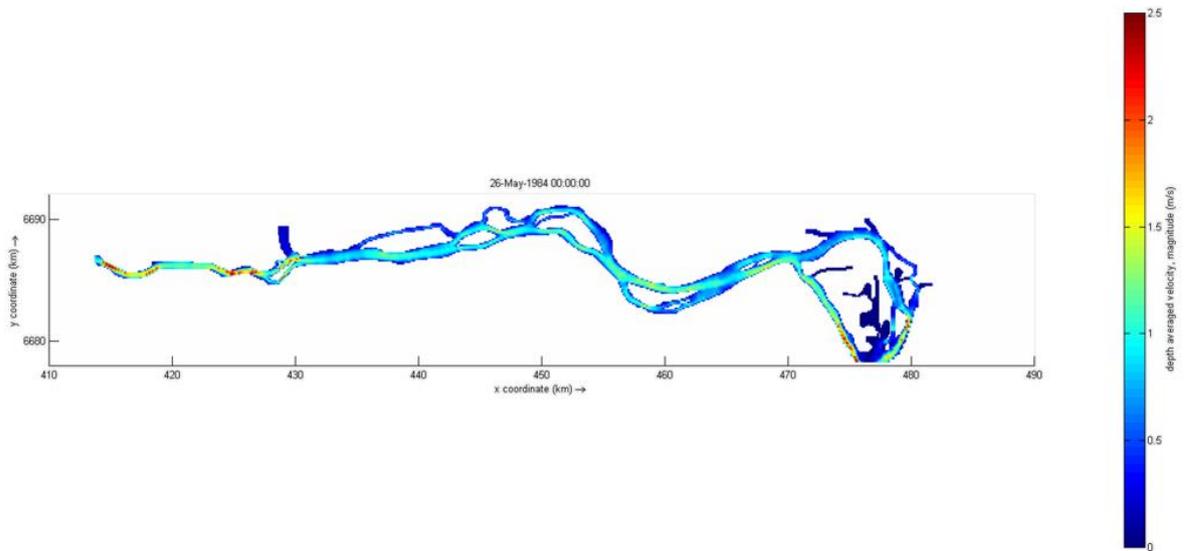


FIGURA 57. MAGNITUDE DO CAMPO DE VELOCIDADE PARA OS PERÍODOS DE VAZÕES ALTAS > 5000 m³/s



8 CONCLUSÕES

O principal objetivo dessa fase desse projeto foi a implementação do modelo hidrodinâmico e de transporte de sedimento para o trecho de aproximadamente 65 km do rio Jacuí, incluindo a região do delta na entrada do Lago Guaíba. Os anos de 1984 e 2001 foram utilizados para representarem estados hidrológicos característicos do período disponível, e o ano de 2008 foi utilizado para efetuar comparações com base em informações de características hidrodinâmicas extraídas de relatórios e artigos disponibilizados pela SEMA-RS.

Os resultados hidrodinâmicos obtidos para os períodos de calibração mostraram que o modelo respondeu adequadamente às forçantes representativas do estado hidrológico observado. A comparação entre os níveis modelados e observados para os períodos de calibração mostraram que o modelo se encontra em fase com os dados observados, apresentando coeficientes estáticos que mostram boa aderência. Dificuldades em representar o modelo digital topobatimétrico, devido a limitações de resolução da grade numérica, prejudica a correta representação do tempo que uma determinada área leva escoar toda a área inundada nos períodos de altas vazões. Para os períodos de baixas descargas, quando não ocorre o extravasamento da calha do rio, o modelo foi capaz de reproduzir com perfeição o nível da lâmina da água.

Uma vez que o modelo reproduzir adequadamente o campo de elevação da área de interesse como consequência direta, o campo de velocidade, que é uma das variáveis mais importantes em estudos de transporte de sedimentos, também foi bem representado. As análises dos campos espaciais da intensidade da velocidade mostraram que em períodos de máximas descargas, que apresentam valores superiores a 8000 m³/s normalmente observadas durante os meses de inverno, geraram fluxos com intensidade superiores a 3,0 m/s, e valores mínimos da ordem de 0,5 m/s para períodos hidrológicos que apresentaram vazões inferiores a 1000 m³/s no contorno do rio Jacuí.

A resposta do modelo de transporte de sedimento aos fatores hidrológicos e aos campos hidrodinâmicos correspondentes mostrou que sedimentos com granulometria da ordem de 150 µm são transportados principalmente por arraste de fundo. No entanto, quando são observadas vazões intensas, superiores 8000 m³/s, ocorre a suspensão de areia e consequente transporte pela coluna da água como pode ser observado no evento de maio de 1984 (FIGURA 56), onde podemos observar o alcance da pluma de areia em suspensão, provocada por descargas elevadas no rio Jacuí. A dinâmica de erosão e deposição de sedimentos ocorreu em concordância com outros estudos já realizados, demonstrando que os dados batimétricos utilizados representam adequadamente a geometria do rio.

A análise do transporte de sedimentos coesivos, que se caracterizam por serem mais leves e por isso permanecem em suspensão por um período mais longo, mostrou comportamento análogo ao

observado nas análises da areia. Ou seja, para os períodos de vazões baixas, sedimentos do tipo silte e argila, quanto entram no sistema através do contorno do rio Jacuí, permanecem em suspensão por aproximadamente 25 km. A partir desse ponto, não é mais possível observar concentrações significativas desse tipo de sedimento em suspensão na coluna da água. Por outro lado, quando as condições hidrológicas favorecem descargas superiores a 6000 m³/s, a pluma de sedimento mais fino permanece em suspensão, atravessando toda a extensão do rio, até atingir o contorno aberto no lago Guaíba.

9 CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA O 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. O produto do Módulo II fornecerá a série de descargas líquidas e concentrações de sedimentos que serão usadas como condição de contorno de jusante na modelagem hidrodinâmica do Lago Guaíba (Módulo III).

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. Como também, deve ser capaz de simular a dinâmica de sedimentos que possam sofrer ressuspensão após extração de areia no leito do lago.

Para a implementação do Módulo III, serão 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.

9.1 DADOS DE ENTRADA

Para a calibração serão utilizados dados de vazão líquida e sólida simuladas pelo modelo hidrológico MGB, implementado para a região de interesse. Dados de descarga líquida, em frequência diária do período de 01/01/1975 a 31/12/2005, foram obtidos para os cinco contornos (Contorno Jacuí, Taquari-Antas, Caí, Sinos e Gravataí) do trecho analisado e serão inseridos no modelo hidrodinâmico do Módulo II. As saídas (Contorno Baixo Jacuí) serão então inseridas no Módulo III.

As séries temporais de vazão líquida e descarga sólida e as tabelas com os valores máximos mínimos, médios e Q90 para o período de 01/01/1975 a 31/12/2005 são apresentadas a seguir:

FIGURA 58. SÉRIE TEMPORAL DIÁRIA DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO JACUÍ – 01/01/1976 A 31/12/2005 - CALIBRAÇÃO

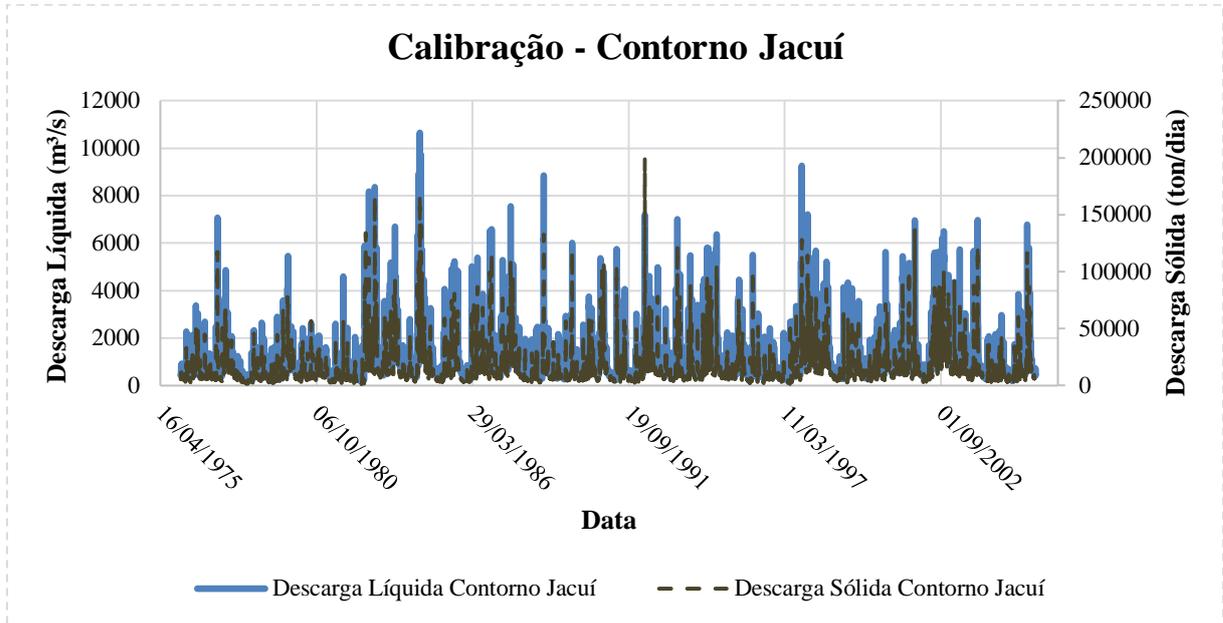


FIGURA 59. SÉRIE TEMPORAL DIÁRIA DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO TAQUARI-ANTAS – 01/01/1976 A 31/12/2005 - CALIBRAÇÃO

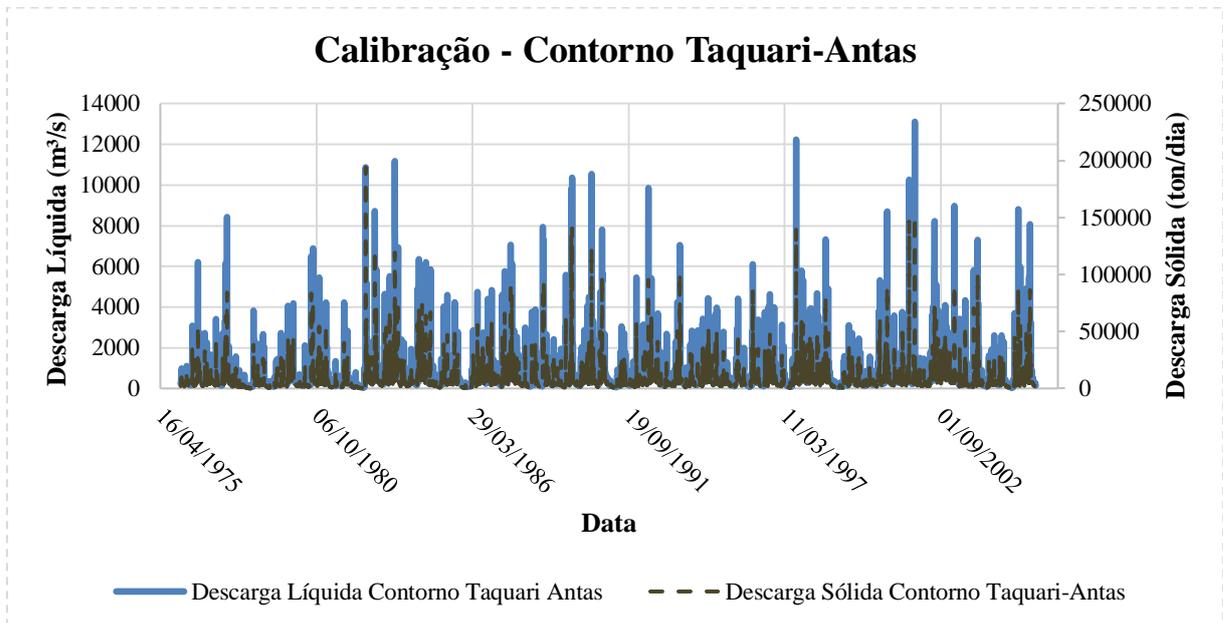


FIGURA 60. SÉRIE TEMPORAL DIÁRIA DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO CAÍ – 01/01/1976 A 31/12/2005 - CALIBRAÇÃO

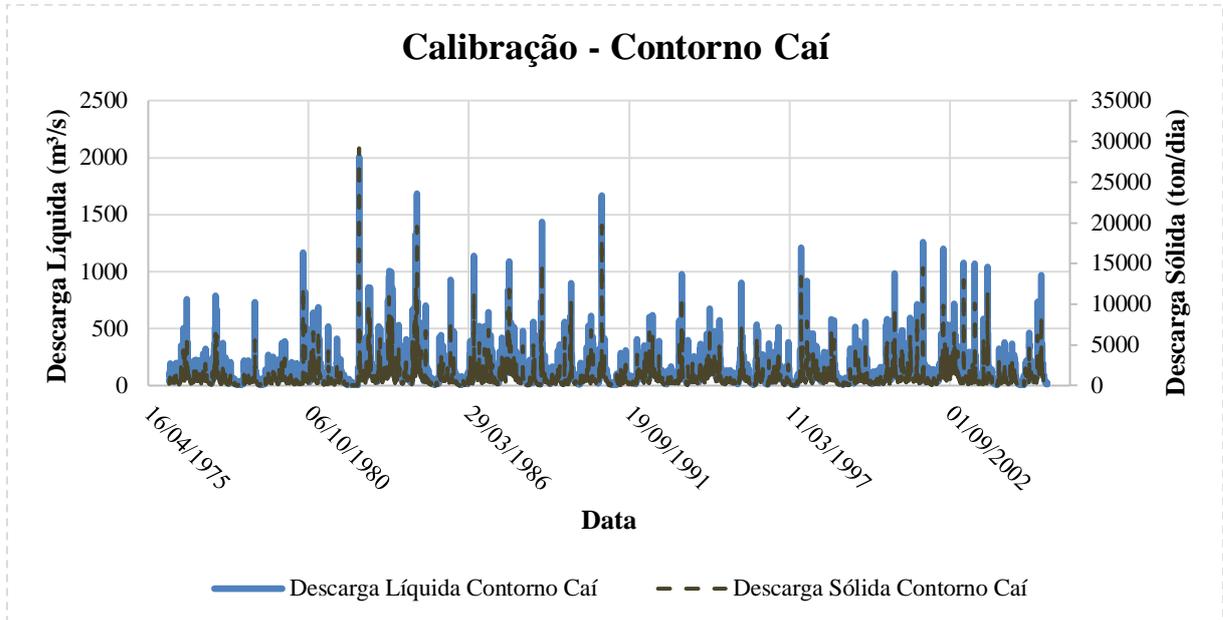


FIGURA 61. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO SINOS – 01/01/1976 A 31/12/2005 - CALIBRAÇÃO

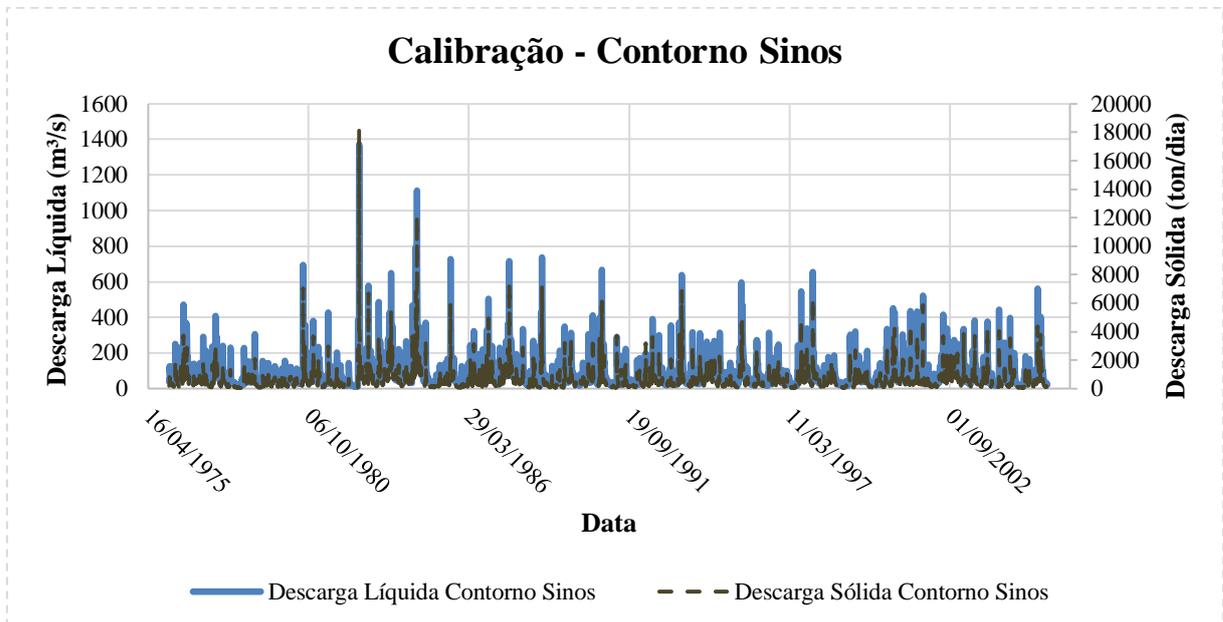


FIGURA 62. SÉRIE TEMPORAL DIÁRIA DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO GRAVATAÍ – 01/01/1976 A 31/12/2005 - CALIBRAÇÃO

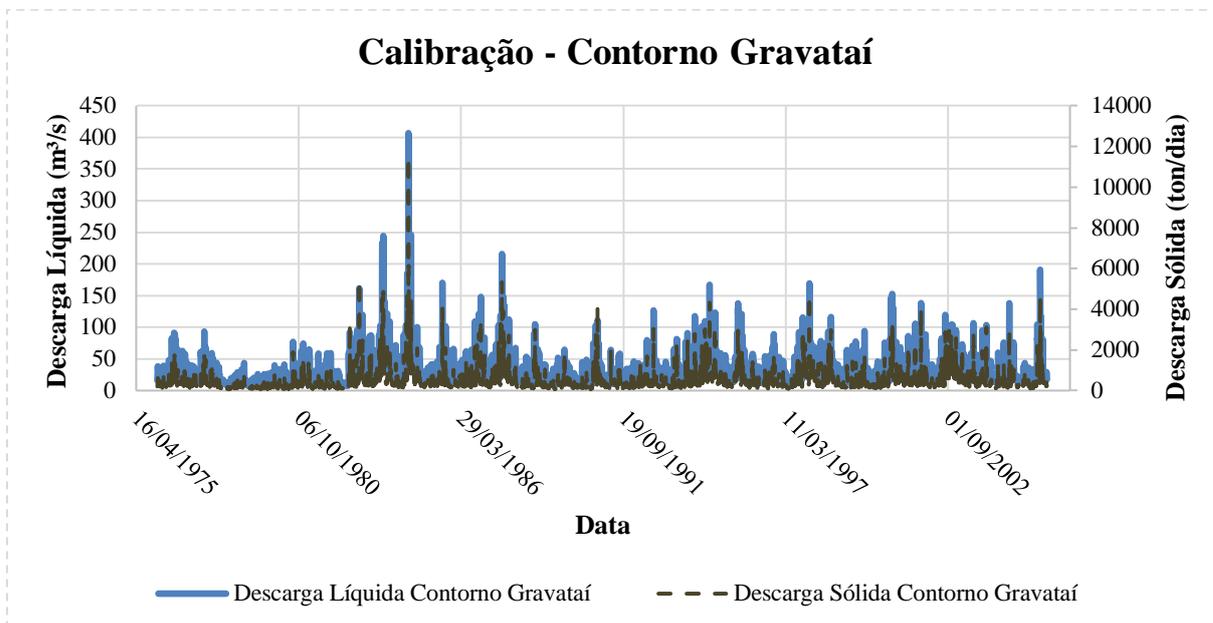


TABELA 15. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DAS SÉRIES TEMPORAIS, DE DESCARGA LÍQUIDA, UTILIZADAS NO CONTORNO DO MODELO BAIXO JACUÍ - CALIBRAÇÃO

Descarga líquida (m³/s)	Contorno Jacuí	Contorno Taquari Antas	Contorno Caí	Contorno Sinos	Contorno Gravataí
Máxima	10656,42	13112,20	2007,63	1371,69	406,91
Média	1075,74	690,82	120,75	87,05	29,72
Mínima	182,94	41,16	3,13	11,18	7,01
Q90	359,18	155,05	22,74	24,05	12,44

TABELA 16. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DAS SÉRIES TEMPORAIS, DE DESCARGA SÓLIDA, UTILIZADAS NO CONTORNO DO MODELO BAIXO JACUÍ - CALIBRAÇÃO

Descarga sólida (ton/dia)	Contorno Jacuí	Contorno Taquari Antas	Contorno Caí	Contorno Sinos	Contorno Gravataí
Máxima	199061,35	194100,24	29177,52	18228,20	11484,47
Média	14538,32	7180,80	874,15	567,07	468,07
Mínima	1190,94	214,28	11,10	30,33	61,64
Q90	3824,37	1189,11	107,39	109,69	142,38

10 VALIDAÇÃO

10.1 DADOS DE ENTRADA

Para a validação serão utilizados dados de vazão líquida e sólida simuladas pelo modelo hidrológico MGB, implementado para a região de interesse. Dados de descarga líquida, em frequência diária do período de 01/01/2006 a 31/12/2015, foram obtidos para os cinco contornos (Contorno Jacuí, Taquari-Antas, Caí, Sinos e Gravataí) do trecho analisado e serão inseridos no modelo hidrodinâmico do Módulo II. As saídas (Contorno Baixo Jacuí) serão então inseridas no Módulo III.

As séries temporais de vazão líquida e descarga sólida e as tabelas com os valores máximos mínimos, médios e Q90 para o período de 01/01/2006 a 31/12/2015 são apresentadas a seguir:

FIGURA 63. SÉRIE TEMPORAL DIÁRIA DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO JACUÍ – 01/01/2006 A 31/12/2015 - VALIDAÇÃO

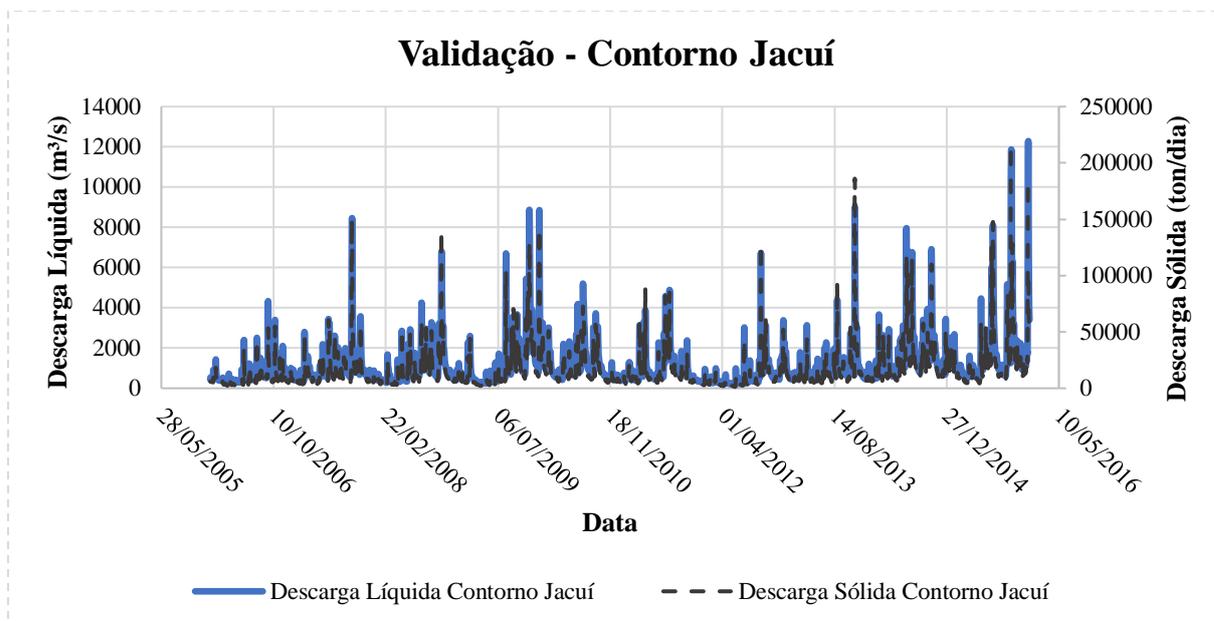


FIGURA 64. SÉRIE TEMPORAL DIÁRIA DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO TAQUARÍ-ANTAS – 01/01/2006 A 31/12/2015 - VALIDAÇÃO

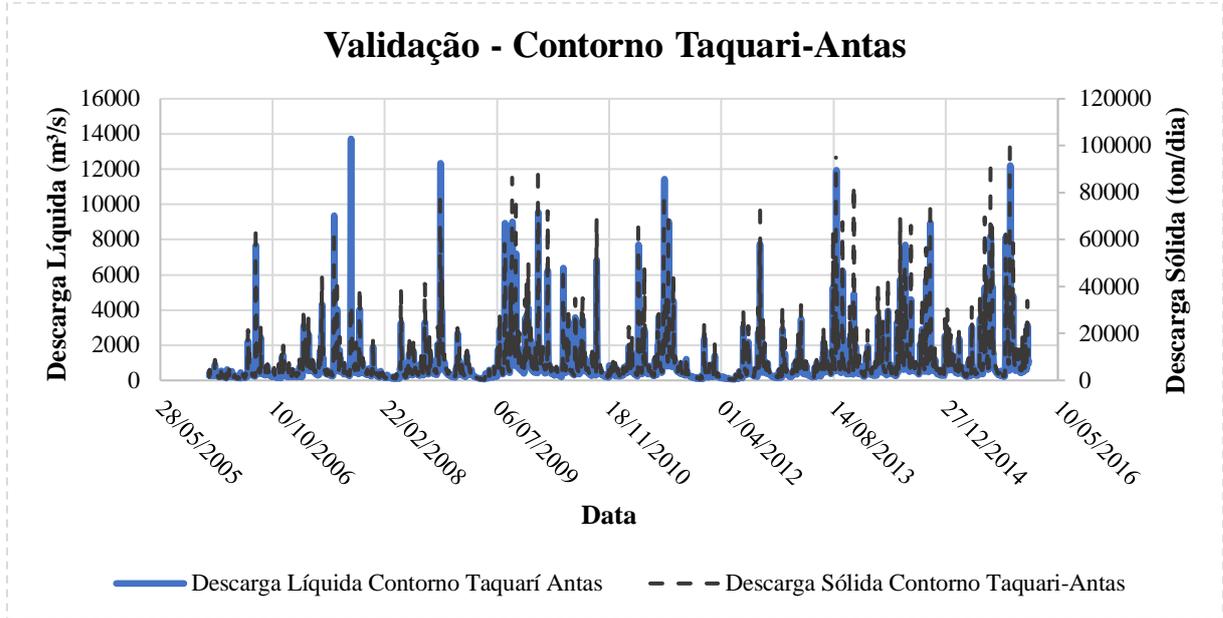


FIGURA 65. SÉRIE TEMPORAL DIÁRIA DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO CAÍ – 01/01/2006 A 31/12/2015 - VALIDAÇÃO

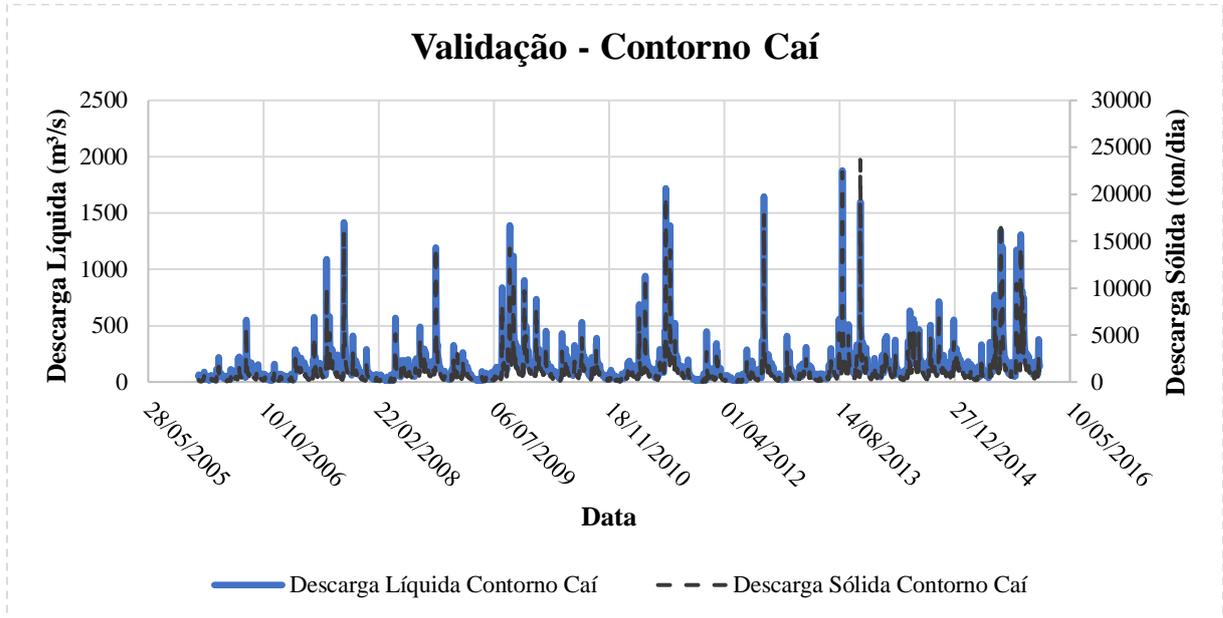


FIGURA 66. SÉRIE TEMPORAL DIÁRIA DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO SINOS – 01/01/2006 A 31/12/2015 - VALIDAÇÃO

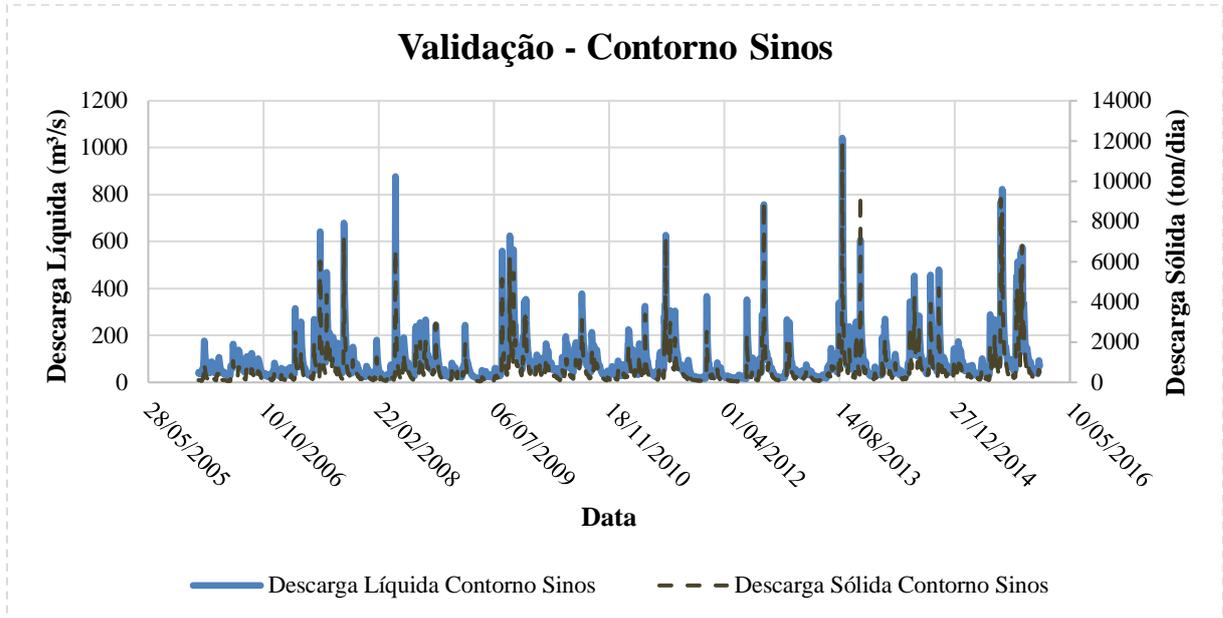


FIGURA 67. SÉRIE TEMPORAL DIÁRIA DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – CONTORNO GRAVATAÍ – 01/01/2006 A 31/12/2015 - VALIDAÇÃO

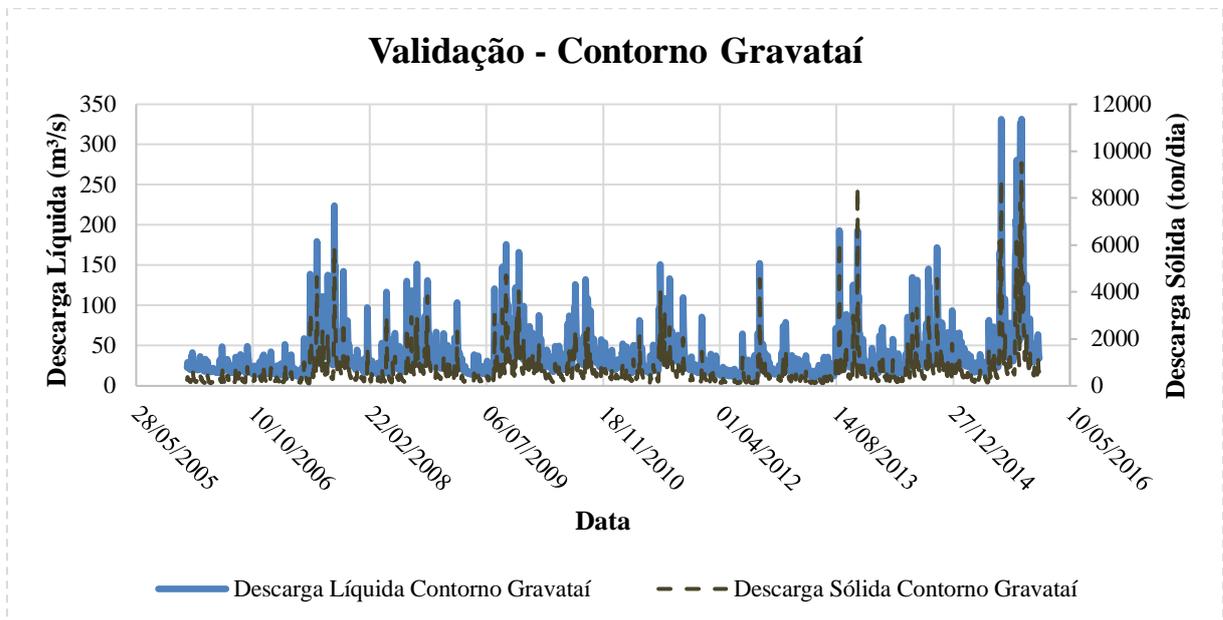


TABELA 17. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DAS SÉRIES TEMPORAIS, DE DESCARGA LÍQUIDA, UTILIZADAS NO CONTORNO DO MODELO BAIXO JACUÍ - VALIDAÇÃO

Descarga líquida (m³/s)	Contorno Jacuí	Contorno Taquari Antas	Contorno Caí	Contorno Sinos	Contorno Gravataí
Máxima	12288,14	13720,97	1877,62	1041,39	331,60
Média	1123,87	795,09	132,24	91,72	38,55
Mínima	186,77	54,71	6,81	13,47	11,04
Q90	365,04	186,07	25,92	25,39	16,20

TABELA 18. VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS, MÍNIMOS E Q90 DAS SÉRIES TEMPORAIS, DE DESCARGA SÓLIDA, UTILIZADAS NO CONTORNO DO MODELO BAIXO JACUÍ - VALIDAÇÃO

Descarga sólida (ton/dia)	Contorno Jacuí	Contorno Taquari Antas	Contorno Caí	Contorno Sinos	Contorno Gravataí
Máxima	214265,41	105465,01	23673,47	11903,98	9494,87
Média	15095,48	7426,36	995,29	611,56	636,24
Mínima	1261,35	254,53	20,93	37,09	90,64
Q90	3823,15	1432,76	136,45	111,36	173,74

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.
- 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. WL | Delft Hydraulics, 2012.
- 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.
- 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.

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

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

APÊNDICE

Nesta seção serão apresentados testes preliminares realizados com o modelo hidrodinâmico do Baixo Jacuí.

Análise da Interpolação Batimétrica

Com a construção da grade numérica, dados batimétricos, obtidos em campo e de cartas náuticas, foram interpolados para a malha. Os dados de campo utilizados foram coletados pelo Plano Metropolitano de Proteção de Cheias da Metroplan (Fundação Estadual de Planejamento Metropolitano e Regional).

FIGURA 68. POSIÇÃO DOS DADOS BATIMÉTRICOS OBTIDOS EM CAMPO

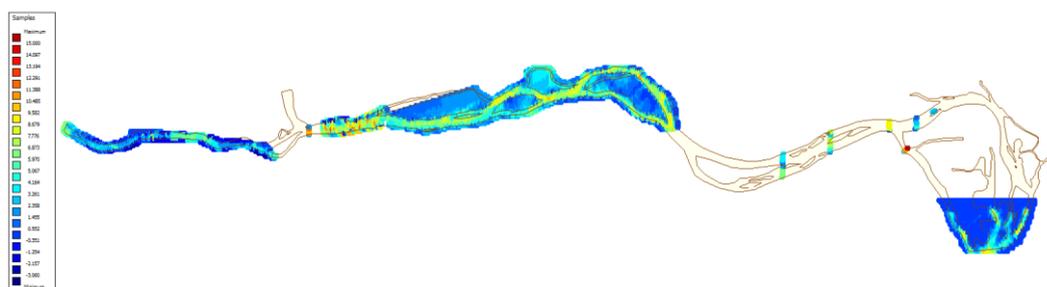


FIGURA 69. CARTAS NÁUTICAS

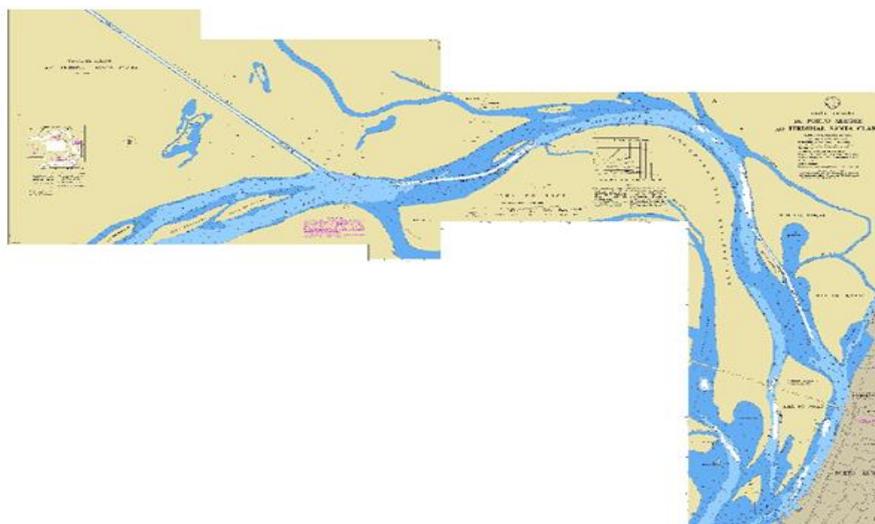
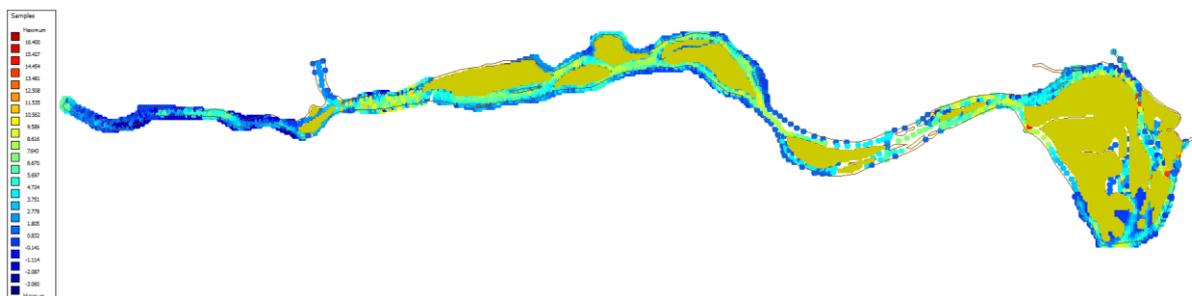
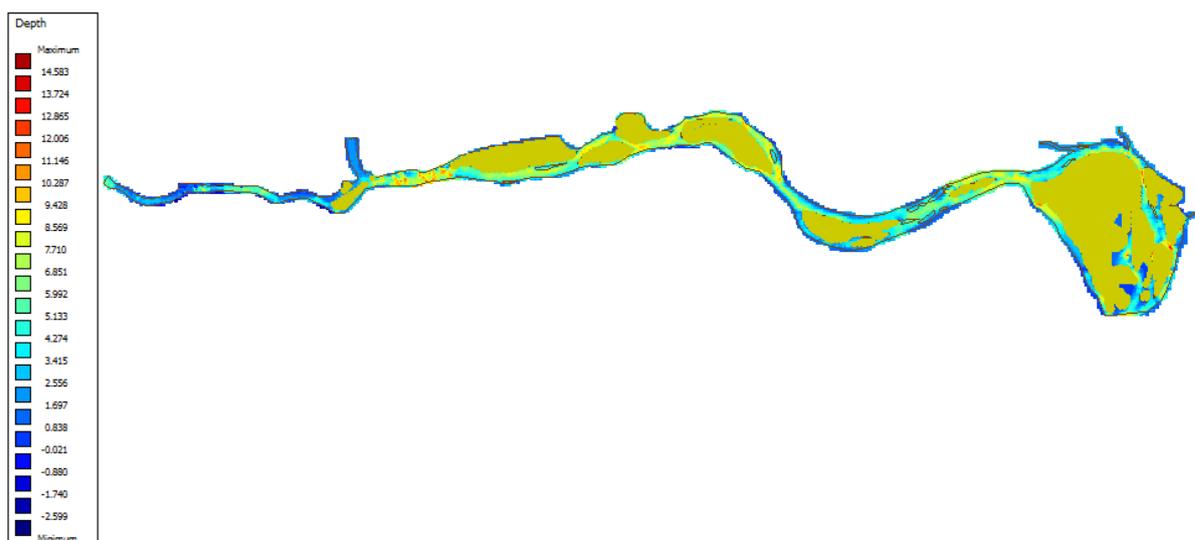


FIGURA 70. DADOS BATIMÉTRICOS OBTIDOS DE CARTAS NÁUTICAS E DADOS IN SITU



Após a aplicação de diversos procedimentos de refinamento e de remanejamento das linhas de grade, os dados batimétricos são interpolados através da aplicação de três diferentes métodos. Devido ao tamanho e geomorfologia da área de estudo, o processo de interpolação pode ser realizado com a definição de apenas um polígono englobando todo o domínio, sendo os métodos de interpolação triangular, média entre células adjacentes e difusão interna empregados de maneira subsequente.

FIGURA 71. BATIMETRIA INTERPOLADA PARA O BAIXO JACUÍ

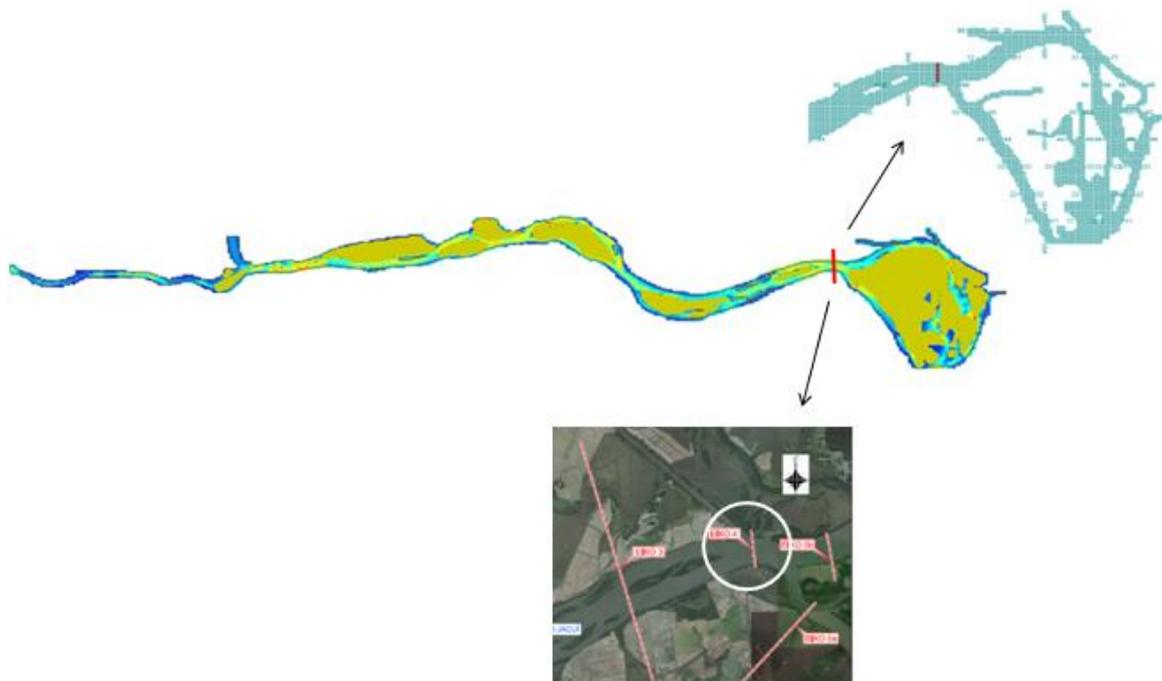


VERIFICAÇÃO DE DESEMPENHO

INTERPOLAÇÃO BATIMÉTRICA

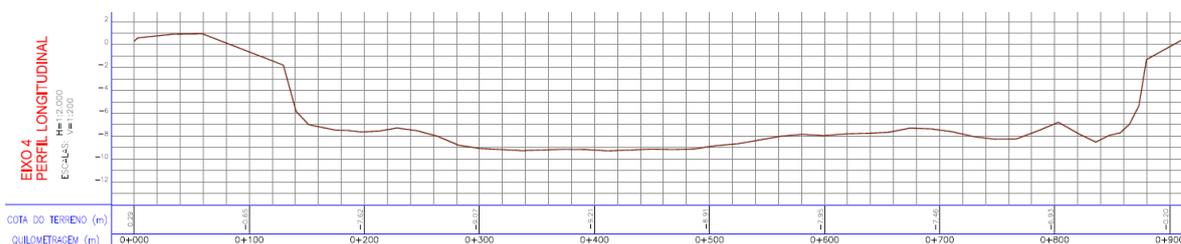
A fim de verificar a interpolação batimétrica realizada pelo Delft3D, foi selecionada uma seção transversal onde existem informações coletadas em campo e comparadas com o mesmo segmento na grade desenvolvida para a modelagem. A FIGURA 72 apresenta a localização da seção na grade numérica e no trecho rio onde, no dia 19/10/2015, foi realizado o levantamento batimétrico para o Estudo e Projeto Conceitual de Proteção Contra Cheias do Delta do Jacuí em Eldorado do Sul – RS (2015).

FIGURA 72. LOCALIZAÇÃO DA SEÇÃO PARA COMPARAÇÃO DOS DADOS DE BATIMETRIA OBTIDOS EM CAMPO E INTERPOLADOS PELO MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D



Nas FIGURA 73 e FIGURA 74 são apresentados os perfis longitudinais de profundidade obtidas em campo e interpolado pelo modelo, respectivamente. Observa-se que o modelo, respondeu de maneira satisfatória, sendo capaz de representar a profundidade máxima encontrada em campo (cerca de 10 metros). Porém, não reproduziu as menores profundidades (entre 2 e 3 metros) nas bordas da seção topobatimétrica. Importante ressaltar que, os dados inseridos no modelo, nesta região (FIGURA 75), eram escassos e obtidos em diferentes períodos, o que pode contribuir para as diferenças encontradas nas imagens.

FIGURA 73. PERFIL LONGITUDINAL COM INFORMAÇÕES BATIMÉTRICAS OBTIDAS EM CAMPO



FONTE: Estudo e Projeto Conceitual de Proteção Contra Cheias do Delta do Jacuí em Eldorado do Sul – RS (2015).

FIGURA 74. PERFIL BATIMÉTRICO INTERPOLADO PELO MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D

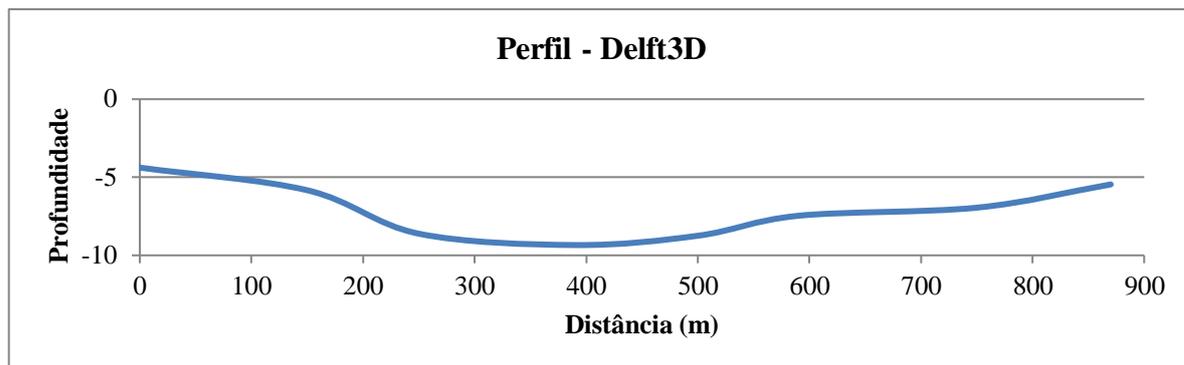
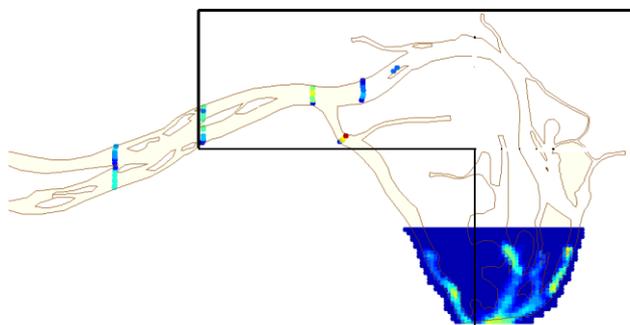


FIGURA 75. LOCALIZAÇÃO DOS DADOS DE BATIMETRIA OBTIDOS EM CAMPO E DE CARTAS NÁUTICAS (CONTORNO EM PRETO)



SIMULAÇÃO TESTE

Dados de Entrada

Para verificar o desempenho do modelo hidrossedimentológico implementado, foi realizado uma simulação teste para o período de 01/01/1979 00:00 a 31/12/1979 00:00, onde foi analisada a dinâmica de transporte de sedimentos.

Para a simulação teste foram utilizados dados de vazão líquida, disponíveis nas estações da Agência Nacional de Águas (ANA) (FIGURA 76). Foram inseridas entradas de dados em quatro contornos do modelo (Contorno Jacuí, Contorno Taquari-Antas, Contorno Caí, Contorno Sinos) (FIGURA 23), onde existem estações com dados disponíveis. Importante ressaltar que a localização das estações não corresponde à mesma localização das condições de contorno. Apenas nas estações Dona Francisca (8540000) e Muçum (86510000) dados de vazão sólida estavam disponíveis, então, a entrada de sedimentos no sistema ocorreu pelo Contorno Jacuí e Contorno Taquari-Antas.

As séries de vazão líquida e vazão sólida da estação fluviométrica Dona Francisca, entrada para o Contorno Jacuí, para o período simulado são apresentadas na FIGURA 77. As séries de vazão líquida e sólida da estação pluviométrica Muçum, entrada para o Contorno Taquarí, para o período simulado são apresentadas na FIGURA 78, respectivamente. A FIGURA 79 apresenta a série temporal de vazão líquida da estação Barco do Caí, entrada para o Contorno Caí e a FIGURA 80 apresenta a série de vazão líquida da estação pluviométrica Campo Bom, utilizada como dados entrada para o modelo no Contorno Sinos.

FIGURA 76. LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES

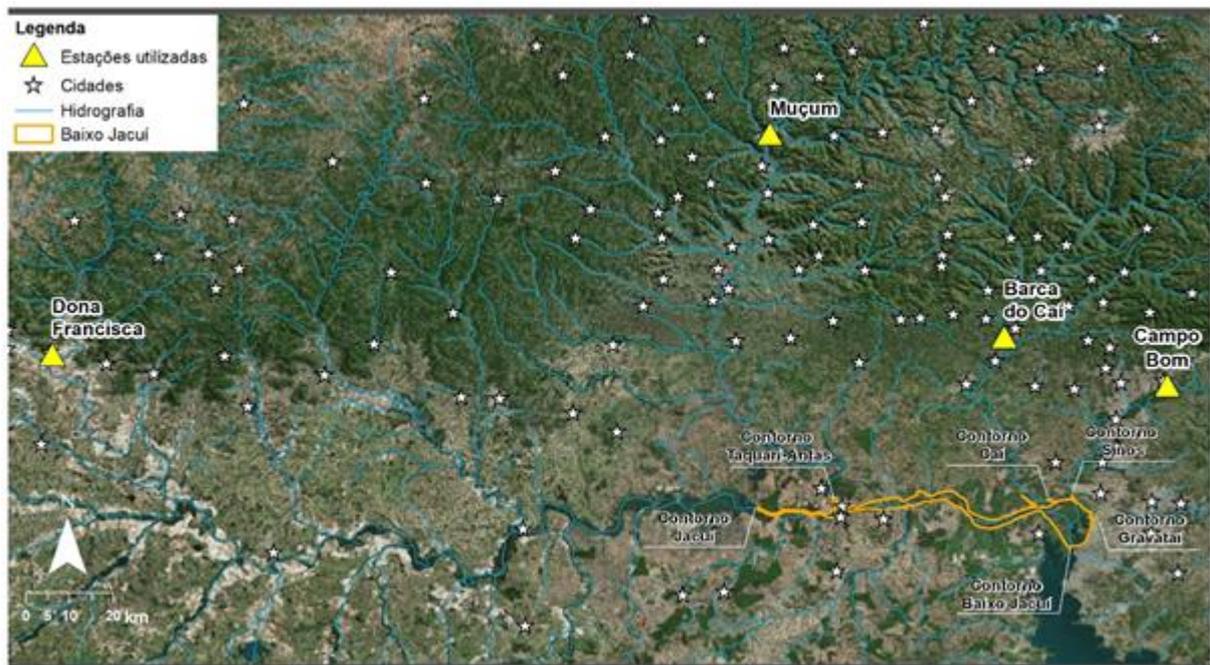


FIGURA 77. ENTRADA PARA A CONDIÇÃO DE CONTORNO RIO JACUÍ: SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – ESTAÇÃO 85400000 DONA FRANCISCA

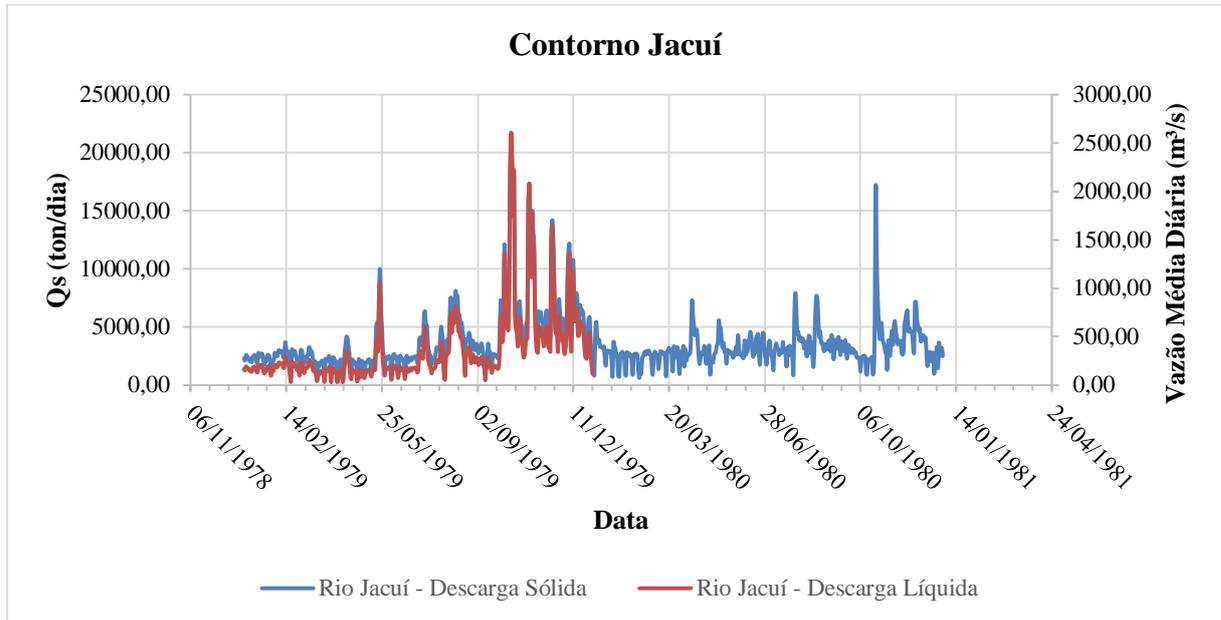


FIGURA 78. ENTRADA PARA A CONDIÇÃO DE CONTORNO RIO TAQUARI: SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA – ESTAÇÃO 86510000 MUÇUM

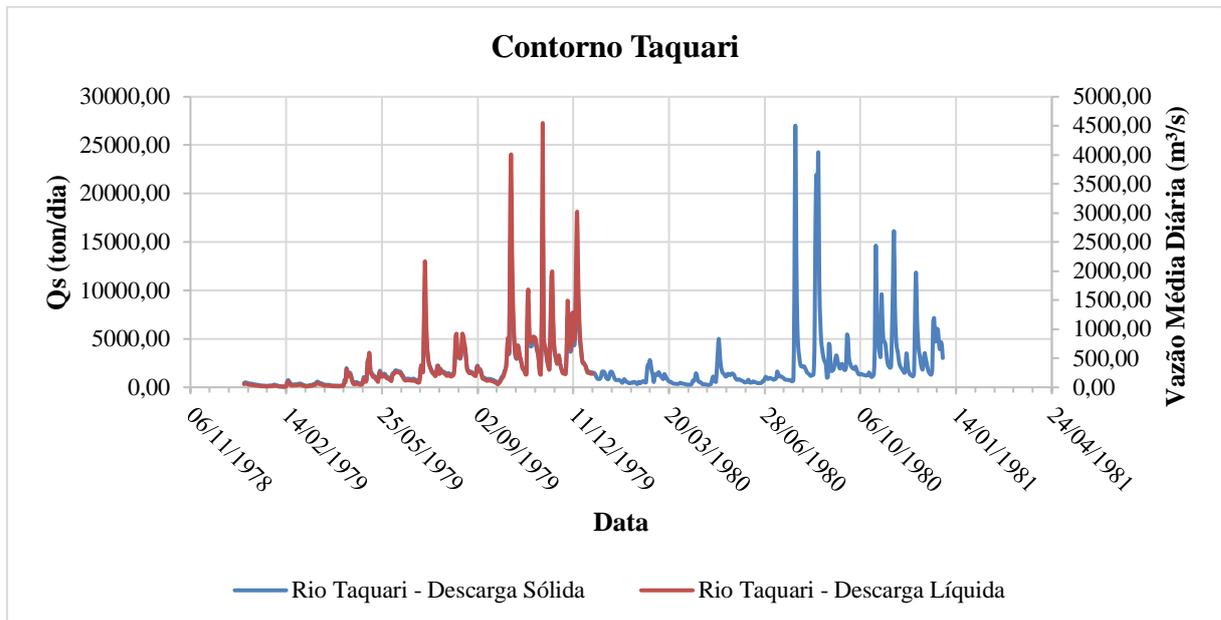


FIGURA 79. ENTRADA PARA A CONDIÇÃO DE CONTORNO RIO CAÍ: SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA – ESTAÇÃO 87170000 BARCO DO CAÍ

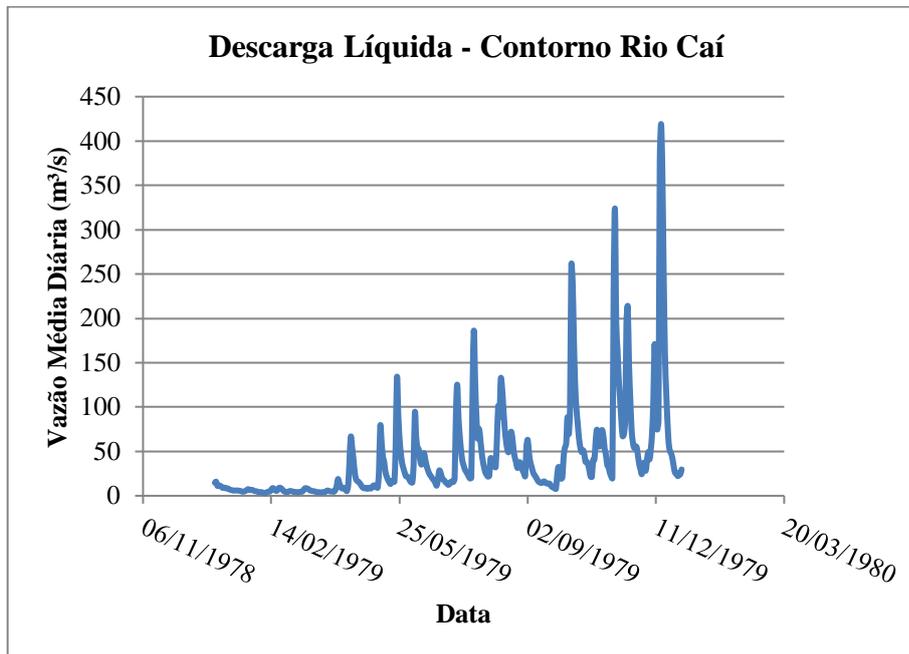
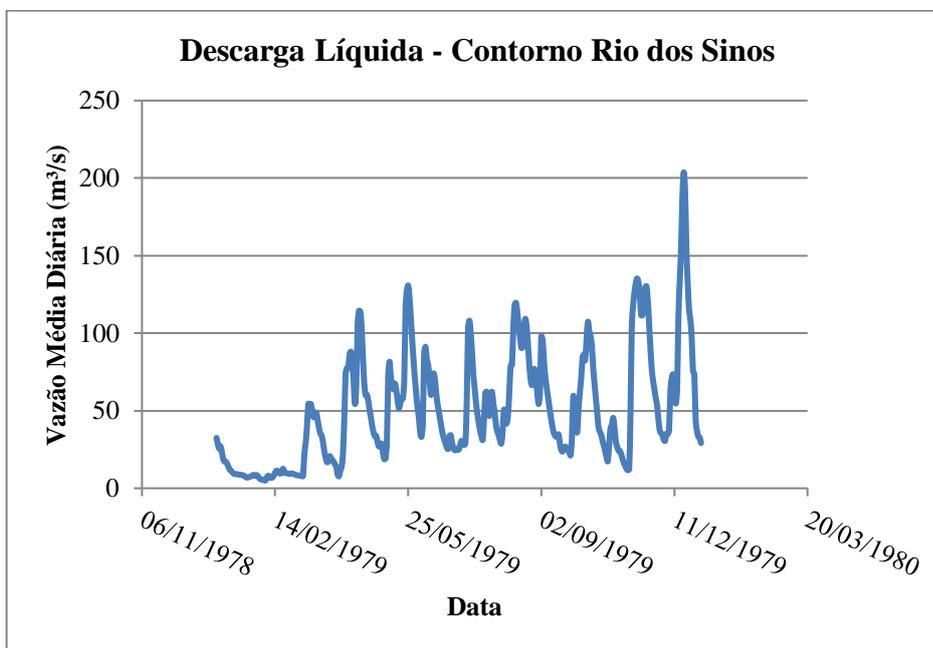


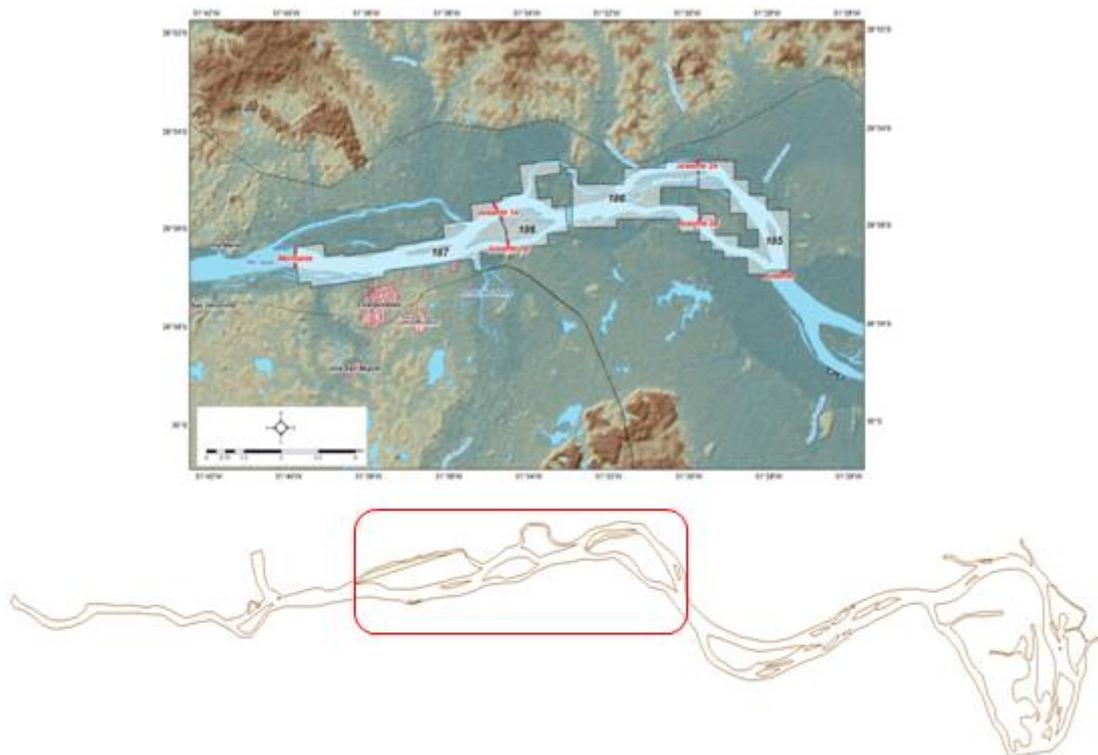
FIGURA 80. ENTRADA PARA A CONDIÇÃO DE CONTORNO RIO DOS SINOS: SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA – ESTAÇÃO 87380000 CAMPO BOM



As informações de contorno de fundo (tipos de sedimento) inseridas no modelo foram obtidas do relatório de monitoramento hidrossedimentométrico do rio Jacuí do ano de 2017. No trecho analisado

(FIGURA 81) foram descritos três tipos de areia: Areia Fina, Areia Média e Areia Grossa. Os tipos de sedimentos encontrados durante o monitoramento foram interpolados para todo comprimento de grade.

FIGURA 81. LOCALIZAÇÃO DOS DADOS DE SEDIMENTO DE FUNDO OBTIDOS EM CAMPO E LOCALIZAÇÃO DO MONITORAMENTO EM RELAÇÃO À GRADE UTILIZADA PARA ESTE ESTUDO

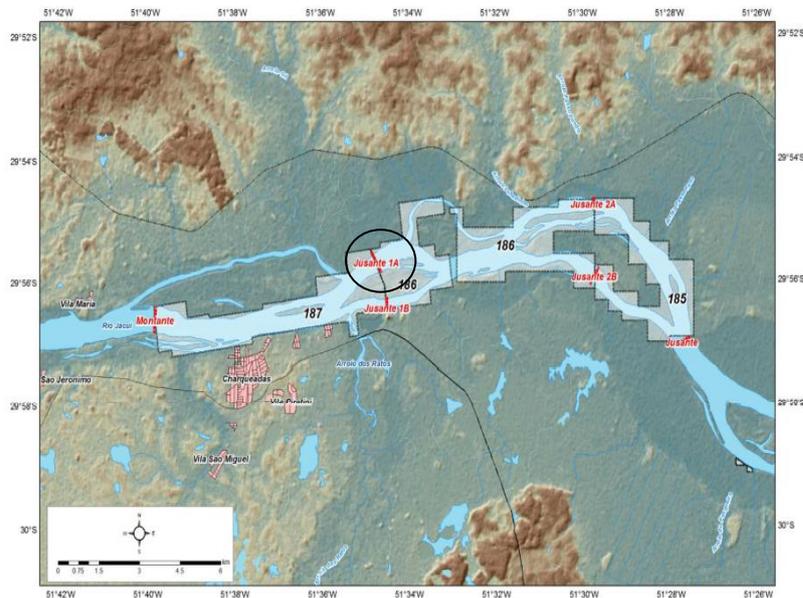


FONTE: Relatório de monitoramento hidrossedimentométrico do rio Jacuí (2017)

Simulação

Para analisar a sensibilidade do modelo à ação das condições de contorno foi selecionado um ponto para avaliação do balanço de erosão e deposição de sedimentos e do campo de velocidade. A FIGURA 82 apresenta a localização do ponto escolhido (Ponto Jusante 1A), que ocorreu com base no estudo de monitoramento hidrossedimentométrico do rio Jacuí (2017).

FIGURA 82. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DO MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOMÉTRICO DO RIO JACUÍ (2017) PONTO JUSANTE 1A (CÍRCULO EM PRETO)



FONTE: Relatório de monitoramento hidro sedimentométrico do rio Jacuí (2017)

A taxa de erosão/deposição simulada no ponto de monitoramento Jusante 1A é apresentada na FIGURA 83. Observa-se que, ao longo dos três primeiros trimestres do ano, não ocorrem alterações no volume de sedimento de fundo no ponto analisado. No último trimestre ocorre um acúmulo rápido de sedimentos na região (1,2 cm). Analisando os dados de velocidade, simulada no local (FIGURA 84), também é possível notar a variação do campo de velocidade durante o ano, atingindo os maiores valores ao final do ano de 1979.

FIGURA 83. TAXA DE EROSÃO/SEDIMENTAÇÃO SIMULADA NO PONTO DE MONITORAMENTO JUSANTE 1A

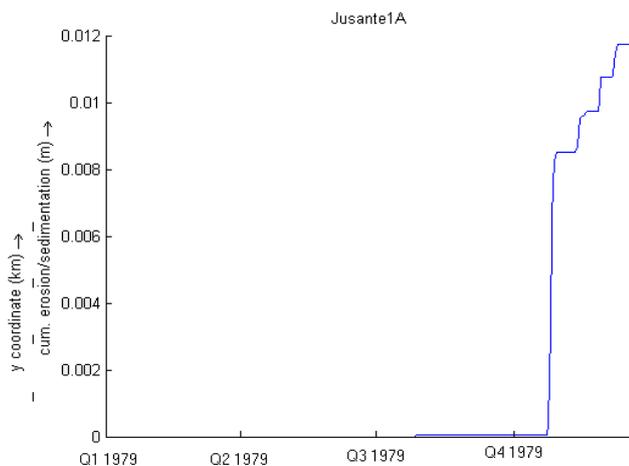
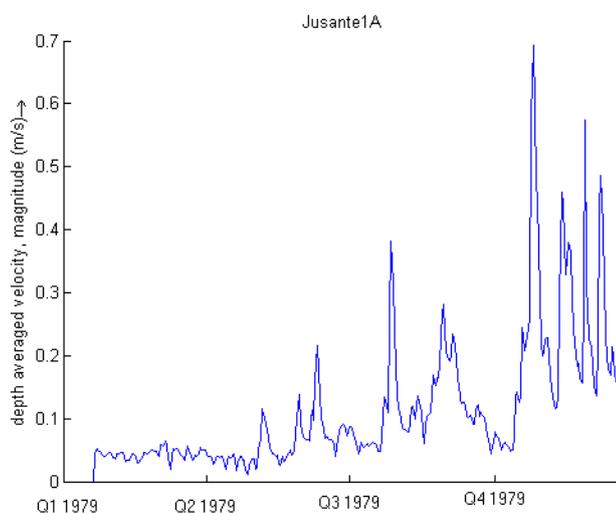
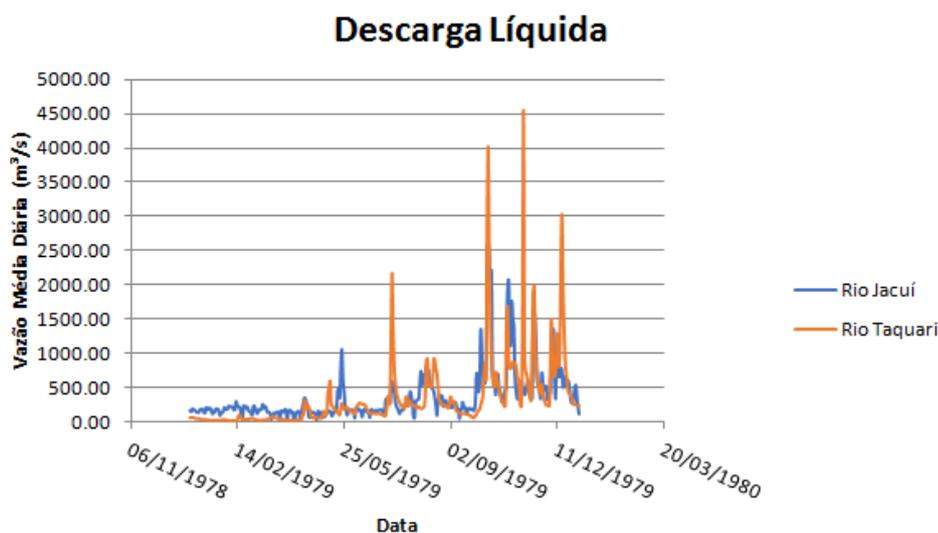


FIGURA 84. VELOCIDADE MÉDIA SIMULADA NO PONTO DE MONITORAMENTO JUSANTE 1A



A fim de entender os resultados encontrados, foram analisadas as duas estações que servem como condição de contorno para o ponto estudado. A FIGURA 84 apresenta a série temporal de descarga líquida das estações Dona Francisca (Contorno Jacuí) e Muçum (Contorno Taquarí). Observa-se que ao final do ano ocorre um aumento significativo na entrada de descarga líquida nas duas estações, mesmo período em que ocorre o aumento de deposição de sedimentos e aumento da velocidade das correntes. Esta análise demonstra que o modelo responde de maneira satisfatória a ações das forçantes de entrada.

FIGURA 85. SÉRIE TEMPORAL DE DESCARGA LÍQUIDA CONTORNOS RIO JACUÍ E RIO TAQUARÍ



Durante os testes foi possível notar que, em um ponto próximo ao encontro das águas do Rio Taquari com o Rio Jacuí, ocorria uma grande deposição de sedimentos, cerca de 4 metros ao final da

simulação de um ano (FIGURA 86). Nesta região não se tinha dados de batimetria coletados em campo (ver seção 0), as informações batimétricas utilizadas pelo modelo foram interpoladas durante a implementação do modelo pelo Delft3D. Após a interpolação a profundidade no local era de cerca de 2 metros.

Devido a isto, foi realizada uma nova simulação onde, manualmente a batimetria foi alterada para 5 metros de profundidade. A FIGURA 87 apresenta os resultados desta nova simulação, onde nota-se que com o aumento da profundidade a taxa de deposição no local passou de 4 metros para 3 metros. Demonstrando a importância da batimetria na resposta hidrodinâmica do Baixo Jacuí.

FIGURA 86. DINÂMICA DE SEDIMENTAÇÃO SIMULADA – GEOMETRIA 1

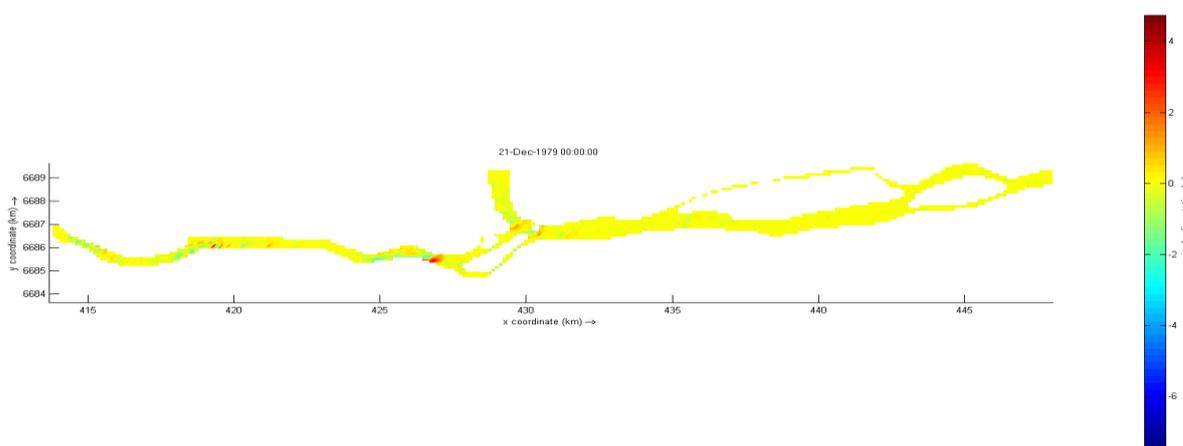
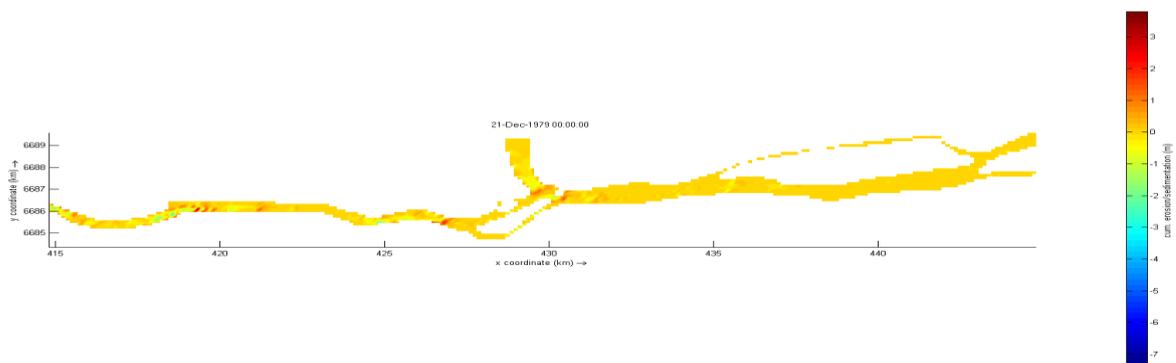


FIGURA 87. DINÂMICA DE SEDIMENTAÇÃO SIMULADA – GEOMETRIA 2



Conclusão

O modelo hidrodinâmico implementado para a região do Baixo Jacuí foi capaz de responder às variações na forçantes de entrada, apresentando picos de velocidade e de deposição de sedimentos quando ocorreu um aumento significativo na entrada de vazão líquida e sólida no sistema.

Após análise das simulações realizadas, constatou-se a necessidade de dados batimétricos em toda a área de interesse, para uma melhor compreensão da dinâmica de transporte sedimentar no corpo hídrico analisado.