

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

CAMILA BERGMANN GOULART

INCERTEZAS ASSOCIADAS AOS DADOS DE ENTRADA EM MODELAGEM DE
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E A DIFERENTES TÉCNICAS DE GESTÃO DE
SEDIMENTOS – ESTUDO DE CASO DA UHE AIMORÉS

PORTO ALEGRE

2020

CAMILA BERGMANN GOULART

INCERTEZAS ASSOCIADAS AOS DADOS DE ENTRADA EM MODELAGEM DE
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E A DIFERENTES TÉCNICAS DE GESTÃO DE
SEDIMENTOS – ESTUDO DE CASO DA UHE AIMORÉS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como
requisito parcial à obtenção do grau de mestra.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan

PORTO ALEGRE

2020

Goulart, Camila Bergmann
INCERTEZAS ASSOCIADAS AOS DADOS DE ENTRADA EM
MODELAGEM DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E A DIFERENTES
TÉCNICAS DE GESTÃO DE SEDIMENTOS - ESTUDO DE CASO DA
UHE AIMORÉS / Camila Bergmann Goulart. -- 2020.
123 f.
Orientador: Fernando Mainardi Fan.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. Sedimentos em reservatórios. 2. Transporte de
sedimentos. 3. Modelagem computacional. I. Fan,
Fernando Mainardi, orient. II. Título.

CAMILA BERGMANN GOULART

INCERTEZAS ASSOCIADAS AOS DADOS DE ENTRADA EM MODELAGEM DE
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E A DIFERENTES TÉCNICAS DE GESTÃO DE
SEDIMENTOS – ESTUDO DE CASO DA UHE AIMORÉS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como
requisito parcial à obtenção do grau de mestra.

Porto Alegre, 19 de fevereiro de 2020.

Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan – UFRGS
Orientador

Prof. Dr. Tobias Bernward Bleninger – UFPR
Examinador

Prof. Dr. Mauricio Dai Prá – UFRGS
Examinador

Prof. Dr. Gean Paulo Michel – UFRGS
Examinador

RESUMO

A geração de energia elétrica por usinas hidrelétricas representa grande parte da matriz energética mundial. No Brasil, cerca de 65% da energia elétrica é gerada por hidrelétricas. A construção de barragens gera diversos efeitos no curso d'água, entre eles a retenção de sedimentos que antes eram transportados pelo rio. Estes sedimentos acumulados, dentre outros efeitos, podem levar ao assoreamento do reservatório e de tomadas d'água, diminuindo a vida útil. Devido a isso, estudos são feitos sobre técnicas de gestão de sedimentos, tanto para evitar a acumulação de sedimentos dentro dos reservatórios, quanto para recuperar volumes já perdidos. Esta pesquisa visou avaliar as incertezas associadas aos parâmetros de entrada na modelagem de transporte de sedimentos no reservatório da UHE Aimorés e às diferentes técnicas de gestão de sedimentos em reservatórios, por meio de cenários com diferentes rebaixamentos de nível do reservatório, equações de transporte, granulometrias e camadas de sedimentos. Para isso, foi utilizado o estudo de caso da UHE Aimorés, utilizando o modelo Delft3D-FLOW, com modelagem bidimensional. Todos os parâmetros influenciaram significativamente no volume de sedimentos mobilizados, impactando os resultados de erosão e deposição. De todos, a camada inicial de sedimentos depositados foi o parâmetro que gerou maiores alterações. De maneira geral, os resultados mostram que as incertezas nos parâmetros de entrada superam as incertezas entre as técnicas (diferentes rebaixamentos), apresentando grandes variações quando avaliado o uso de diferentes equações de transporte.

Palavras-chave: *flushing, pass-through, transporte de sedimentos, gestão de sedimentos.*

ABSTRACT

Power generation by hydroelectric plants represents a large part of the world's energy matrix. In Brazil, about 65% of electricity is generated by hydroelectric plants. The construction of dams generates various effects on the watercourse, among them the retention of sediments that were previously carried by the river. These accumulated sediments, among other effects, can lead to silting of the reservoir and water intakes, reducing their useful life. Due to this, studies are carried out on sediment management techniques, to avoid sediment accumulation within reservoirs and to recover volumes already lost. This research aimed to evaluate the uncertainties associated with the input parameters in the modeling of sediment transport in the reservoir of the Aimorés HPP and the different techniques of sediment management in reservoirs, through scenarios with different reservoir level lowering, transport equations, granulometry, and thickness of the initial sediment layer. The case study of Aimorés HPP was used, using the Delft3D-FLOW model (two-dimensional modeling). All parameters significantly influenced the volume of mobilized sediments, impacting the erosion and deposition results. Among all, the initial layer of deposited sediment was the parameter that generated the greatest changes. In general, the results show that the uncertainties in the input parameters outweigh the uncertainties between the techniques (different subsidence), presenting large variations when evaluating the use of different transport equations.

Keywords: *flushing, pass-through, sediment transport, sediment management.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que fizeram parte deste trabalho, direta ou indiretamente. Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan, por toda a paciência, dedicação e motivação, que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho e me abriram portas para seguir. Ao Prof. Dr. Tobias Bernward Bleninger, pela disponibilidade e interesse, recebendo-me em seu grupo de pesquisa e me ajudando com o seguimento do trabalho.

Aos meus colegas do HGE, com quem dividi tanto momentos de alegria, quanto de frustração. Em especial à Renata, que esteve ao meu lado do início ao fim deste estudo, sempre com palavras encorajadoras e motivadoras.

Aos meus pais, por tudo que me propiciaram desde pequena e que me permitiu chegar até aqui. Também pelas palavras encorajadoras e por sempre me lembrarem do meu potencial.

À Capes, pela bolsa ofertada ao final do período do mestrado, que permitiu a conclusão do trabalho e uma dose extra de motivação.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Distribuições verticais dos sedimentos passíveis de serem encontradas em um curso d'água. Adaptado de <i>Subcommittee on Sedimentation</i> , 1963.....	24
Figura 2. Estrutura vertical de reservatórios (MORRIS; FAN, 1998).....	25
Figura 3 Formação delta típica (AHN, 2011).....	28
Figura 4. Tipos básicos de formação de depósitos em reservatórios (AHN, 2011).	29
Figura 5. Curvas de eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios segundo Brune (1963), adaptada de Carvalho (2008).	30
Figura 6. Curva de eficiência de retenção de sedimentos segundo Churchill (1948), adaptada de Carvalho (2008).....	30
Figura 7. Armazenamento global atual e estimado (ANNANDALE et al., 2018).....	31
Figura 8. Classificação das estratégias de gestão de sedimentos (adaptado de KONDOLF et al, 2014).....	32
Figura 9. Esquema com as duas configurações do flushing em reservatórios: (a) pressure flushing; (b) empty flushing (adaptado de WANG; HU, 2009).....	33
Figura 10. Representação esquemática da operação do <i>sluicing</i> . (Adaptado de KONDOLF et al, 2014).....	35
Figura 11. Variação temporal típica das concentrações de sedimentos na região do reservatório Três Gargantas (gráfico superior) e operação dos níveis do reservatório (gráfico inferior) para controle de sedimentação (WANG; HU, 2009).....	35
Figura 12. Correntes de turbidez (adaptado de MORRIS; FAN, 1998).....	36
Figura 13. Diferença entre <i>bypass</i> e <i>pass-through</i> (adaptado de MORRIS; FAN, 1998).....	37
Figura 14. Definição de nível d'água (ζ), profundidade (h) e profundidade total (H). Adaptado de DELTARES, 2014.	44
Figura 15. Sistemas de coordenadas σ (esquerda) e Z (direita). Adaptado de DELTARES, 2014.	45
Figura 16. Seleção da camada k _{mx} , onde a é a altura de referência de Van Rijn. Adaptada de (DELTARES, 2014).	48
Figura 17. Localização da bacia do rio Doce, onde está localizada a UHE Aimorés.	52
Figura 18. Localização da UHE Aimorés.....	53
Figura 19. Curva cota x volume do reservatório da UHE Aimorés, dezembro de 2016 (ONS, 2019).....	54
Figura 20. Reservatório da UHE Aimorés, barragem principal.	55

Figura 21. Canal de adução da UHE Aimorés.	55
Figura 22. Casa de força da UHE Aimorés.	56
Figura 23. Reservatório da UHE Aimorés, após o rompimento da barragem de rejeitos em Mariana.....	57
Figura 24. Vazão x deplecionamento do reservatório da UHE Aimorés durante a operação de <i>pass-through</i> realizada em fevereiro de 2018. (CARVALHO, 2018).....	58
Figura 25. Fluxograma da metodologia.....	59
Figura 26. Bancos de sedimentos localizados no reservatório de Aimorés, a montante, próximo ao município de Resplendor (CARVALHO, 2018)	61
Figura 27. Fluxograma simplificado das etapas da modelagem.....	62
Figura 28. Batimetria interpolada.	63
Figura 29. Localização das condições de contorno do modelo.	64
Figura 30. Diferenças dos níveis em Aimorés obtidos no modelo (DELFT3D) e observados (SIN).	70
Figura 31. Vazões vertidas em Aimorés obtidas no modelo (DELFT) e observadas (SAR)..	70
Figura 32. Vazões turbinadas em Aimorés obtidas no modelo (DELFT) e observadas (SAR).	70
Figura 33. Campo de velocidades no interior do reservatório no dia de maior vazão afluyente (21/12/2008). Magnitude variando de 0,1 m/s (azul escuro) a 2 m/s (vermelho).	71
Figura 34. Localização das seções analisadas nos diferentes ensaios.	72
Figura 35. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_4.....	73
Figura 36. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_1.5 (foco no reservatório).....	73
Figura 37. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_4 (foco no reservatório).....	74
Figura 38. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_5 (foco no reservatório).....	74
Figura 39. Alterações do leito na seção R3 para os três cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, rebaixamento de 1,5 m; verde, rebaixamento de 4 m, vermelho, rebaixamento de 5m). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento, para cada rebaixamento.	76
Figura 40. Alterações do leito na seção R11 para os três cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, rebaixamento de 1,5 m; verde, rebaixamento de 4 m, vermelho,	

rebaixamento de 5m). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.	76
Figura 41. Alterações do leito na seção R17 para os três cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, rebaixamento de 1,5 m; verde, rebaixamento de 4 m, vermelho, rebaixamento de 5m). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.	77
Figura 42. Concentração de sedimentos coesivos durante a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_1.5.	78
Figura 43. Concentração de sedimentos coesivos durante a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_4.	78
Figura 44. Concentração de sedimentos coesivos durante a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_5.	79
Figura 45. Concentração de sedimentos coesivos (em kg.m^{-3}) após o vertedouro para os diferentes rebaixamentos (em vermelho, 5 m; em verde, 4 m; em azul, 1,5).	79
Figura 46. Concentração de sedimentos coesivos durante a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_1.5 (foco no reservatório).	81
Figura 47. Concentração de sedimentos coesivos durante a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_4 (foco no reservatório).	81
Figura 48. Concentração de sedimentos coesivos durante a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_5 (foco no reservatório).	82
Figura 49. Concentração de sedimentos coesivos na seção R3 (montante) do reservatório, para os três rebaixamentos de nível (azul, 1,5 m; verde, 4 m; vermelho, 5 m).	83
Figura 50. Concentração de sedimentos na seção R17 (jusante) do reservatório, para os três rebaixamentos de nível (azul, 1,5 m; verde, 4 m; vermelho, 5 m).	83
Figura 51. Taxa de transporte de leito durante a operação de gestão de sedimentos (21 de dezembro) do cenário VR_3_A_1.5.	84
Figura 52. Taxa de transporte de leito durante a operação de gestão de sedimentos (21 de dezembro) do cenário VR_3_A_4.	85
Figura 53. Taxa de transporte de leito durante a operação de gestão de sedimentos (21 de dezembro) do cenário VR_3_A_5.	85
Figura 54. Transporte de leito a montante do reservatório para os três cenários de rebaixamento (vermelho, 5 m; verde, 4 m; azul, 1,5 m).	86
Figura 55. Transporte de em trecho intermediário reservatório para os três cenários de rebaixamento (vermelho, 5 m; verde, 4 m; azul, 1,5 m).	86

Figura 56. Concentração de sedimentos não coesivos no interior do reservatório com o rebaixamento de 1,5 m.....	87
Figura 57. Concentração de sedimentos não coesivos no interior do reservatório com o rebaixamento de 4 m.....	88
Figura 58. Concentração de sedimentos não coesivos no interior do reservatório com o rebaixamento de 5 m.....	88
Figura 59. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário MPM_3_A_4.....	90
Figura 60. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário EH_3_A_4.....	90
Figura 61. Alterações do leito na seção R3 para os três cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, VR; verde, MPM, vermelho, EH). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.	91
Figura 62. Alterações do leito na seção R11 para os três cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, VR; verde, MPM, vermelho, EH). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.	92
Figura 63. Taxa de transporte de leito durante a operação de gestão de sedimentos (21 de dezembro) do cenário VR_3_A_4.....	93
Figura 64. Taxa de transporte de leito durante a operação de gestão de sedimentos (21 de dezembro) do cenário MPM_3_A_4.....	93
Figura 65. Taxa de transporte de leito durante a operação de gestão de sedimentos (21 de dezembro) do cenário EH_3_A_4.	94
Figura 66. Transporte de leito em seção a montante do reservatório (R3), para as três equações de transporte (azul, VR; verde, MPM; vermelho, EH).....	94
Figura 67. Transporte de leito em seção na porção intermediária do reservatório (R11), para as três equações de transporte (azul, VR; verde, MPM; vermelho, EH).	95
Figura 68. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_1_A_4.....	96
Figura 69. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_4.....	96
Figura 70. Alterações do leito na seção R3 para os dois cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, 1 m; vermelho, 3 m). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.	97

Figura 71. Alterações do leito na seção R7 para os dois cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, 1 m; vermelho, 3 m). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.	98
Figura 72. Alterações do leito na seção R11 para os dois cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, 1 m; vermelho, 3 m). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.	98
Figura 73. Concentração de sedimentos não coesivos no interior do reservatório no cenário com 1m de camada de sedimentos.	99
Figura 74. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_4.....	100
Figura 75. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_B_4.....	100
Figura 76. Alterações do leito na seção R3 para os dois cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, granulometria A; vermelho, granulometria B). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.	101
Figura 77. Alterações do leito na seção R7 para os dois cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, granulometria A; vermelho, granulometria B). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.	101
Figura 78. Alterações do leito na seção R11 para os dois cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, granulometria A; vermelho, granulometria B). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.	102
Figura 79. Transporte de leito em seção a montante do reservatório (R7), para as duas granulometrias utilizadas (azul, 0,125mm; vermelho, 0,396 mm).....	103
Figura 80. Transporte de leito em seção na parte intermediária (R11) do reservatório, para as duas granulometrias utilizadas (azul, 0,125mm; vermelho, 0,396 mm).....	103
Figura 81. Deposição e erosão média e máxima resultantes dos diferentes cenários com a equação de Van Rijn.....	104
Figura 82. Erosão e deposição máxima e média obtidas nos cenários de diferentes equações.	106
Figura 83. Incertezas entre os cenários analisados.	108
Figura 84. Erosão e deposição no teste de sensibilidade A.	119
Figura 85. Erosão e deposição no teste de sensibilidade B.	120
Figura 86. Erosão e deposição no teste de sensibilidade C.	120
Figura 87. Erosão e deposição no teste de sensibilidade D.	121

Figura 88. Erosão e deposição no teste de sensibilidade E.	121
Figura 89. Erosão e deposição no teste de sensibilidade F.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Fórmulas de transporte de sedimentos não coesivos suportada pelo modelo Delft3D-FLOW. Adaptado de (DELTARES, 2014).	49
Tabela 2. Ficha técnica da UHE Aimorés (CBDB, 2009).....	54
Tabela 3. Caracterização do sedimento depositado no reservatório da UHE Aimorés. Adaptado de Carvalho, 2018.....	60
Tabela 4. Dados da estação meteorológica (INMET, 2019);	64
Tabela 5. Cenários de simulação utilizados.	68
Tabela 6. Parâmetros obtidos pela análise de sensibilidade.	69
Tabela 7. Valores de erosão/deposição máximos e médios dos cenários com a equação de Van Rijn.	71
Tabela 8. Erosão e deposição máximas e médias para os diferentes rebaixamentos.	75
Tabela 9. Concentrações máximas e médias do sedimento coesivo a jusante do barramento para os diferentes rebaixamentos.	77
Tabela 10. Variação percentual da concentração entre os cenários.	80
Tabela 11. Concentrações máximas e médias no interior do reservatório durante a operação de gestão de sedimentos.	80
Tabela 12. Concentrações máximas e médias nas quatro seções analisadas do reservatório durante a operação de gestão de sedimentos.	84
Tabela 13. Transporte de leito máximo e médio para os diferentes rebaixamentos, em três seções do reservatório.	87
Tabela 14. Erosão e deposição máximas e médias para as diferentes equações utilizadas.....	89
Tabela 15. Aumento/diminuição percentual entre os valores máximos e médios dos cenários com diferentes equações.....	91
Tabela 16. Transporte de leito máximo e médio, referentes às três equações utilizadas, nas seções selecionadas.....	95
Tabela 17. Erosão e deposição máximas e médias para os cenários com diferentes camadas iniciais de sedimentos.....	97
Tabela 18. Erosão e deposição máximas e médias no interior do reservatório para os cenários com diferentes granulometrias.	100
Tabela 19. Transporte de leito máximo e médio, referentes às duas granulometrias utilizadas, nas seções selecionadas.	104
Tabela 20. Relações entre deposição e erosão dos 12 cenários com equação de Van Rijn ...	105

Tabela 21. Testes de sensibilidade realizados. 119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de águas

EH – Engelund-Hansen

MPM – Meyer-Peter & Muller

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

SAR – Sistema de Acompanhamentos de Reservatórios

SIN – Sistema Interligado Nacional

UHE – Usina hidrelétrica

VR – Van Rijn

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
2	OBJETIVOS.....	22
2.1.	Objetivo Geral.....	22
2.2.	Objetivos Específicos	22
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1.	Processos Hidrossedimentológicos.....	23
3.2.	Hidrodinâmica e transporte de sedimentos	25
3.3.	Depósitos de sedimentos em Reservatórios.....	27
3.4.	Estratégias de Gestão de Sedimentos.....	32
3.4.1.	<i>Flushing</i>	33
3.4.2.	<i>Pass-through</i>	34
3.4.3.	<i>Bypass</i> de sedimentos	37
3.4.4.	Dragagem.....	38
3.5.	Modelagem de sedimentos em reservatórios	38
3.5.1.	HEC-RAS	40
3.5.2.	SSIIM	40
3.5.3.	GSTARS.....	41
3.5.4.	MIKE.....	42
3.5.5.	DELFT3D.....	42
3.6.	Analogia com estudos de rompimento de barragem.....	50
3.7.	Estudo de caso	52
4	METODOLOGIA.....	59
4.1.	Coleta de dados	59
4.1.1.	Batimetria do reservatório	59
4.1.2.	Vazão, nível e concentração de sedimentos	59
4.1.3.	Dados sedimentológicos	60

4.1.4.	Informações das operações já realizadas no reservatório	60
4.2.	Modelagem hidrodinâmica	61
4.2.1.	Implementação do modelo.....	62
4.2.2.	Condições de contorno	63
4.2.1.	Sensibilidade numérica do modelo hidrodinâmico	65
4.2.2.	Validação dos níveis do modelo hidrodinâmico.....	66
4.3.	Modelagem de sedimentos.....	66
4.3.1.	Ensaio equações de transporte	66
4.3.2.	Ensaio rebaixamento de nível d'água.....	67
4.3.3.	Ensaio camada de sedimentos	67
4.3.4.	Ensaio granulometria.....	67
4.4.	Resumo dos Cenários.....	67
4.5.	Análise dos resultados	68
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
5.1.	Sensibilidade numérica do modelo	69
5.2.	Modelo hidrodinâmico.....	69
5.3.	Modelagem de sedimentos.....	71
5.3.1.	Ensaio rebaixamento de nível d'água.....	72
5.3.2.	Ensaio das equações de transporte.....	88
5.3.3.	Ensaio de camadas de sedimentos	95
5.3.4.	Ensaio de granulometrias	99
5.4.	Resumo dos resultados.....	104
6	CONCLUSÕES	109
7	TRABALHOS FUTUROS	112
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
	ANEXO A. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE.....	119

1 INTRODUÇÃO

O efeito de uma barragem sobre o escoamento afluente é o de reduzir a sua velocidade, depositando sedimentos a montante e causando erosão a jusante. Este efeito depende das características das barragens, em que quanto maior a relação entre o volume útil e a vazão média afluente (tempo de residência), maior o efeito mencionado anteriormente. Essa retenção leva à perda de volume útil do reservatório (assoreamento), implicando em menor geração de energia e, conseqüentemente, diminuição do fluxo de caixa. A jusante, além da erosão, outro efeito preocupante é a falta de nutrientes disponível no curso. Uma vez que muitos nutrientes presentes na água se ligam aos sedimentos, sendo transportados em conjunto ao longo do rio, a retenção desses nutrientes a montante tem um grande impacto no ecossistema a jusante da barragem (KONDOLF et al., 2014).

Segundo Hauer et al. (2018), estima-se que 25% dos próximos investimentos mundiais em energias renováveis seja delegado à hidroeletricidade, principalmente pelo elevado potencial na América Latina, África e países como a China. Contudo, devido à falta de conhecimento sobre os processos hidrossedimentológicos, problemas como a deposição, o tratamento e a dinâmica dos sedimentos nos rios são desafios que podem frear substancialmente o mercado da hidroeletricidade (HAUER et al., 2018).

Mais de 65% da matriz de energia elétrica do Brasil é composta pela energia gerada pelas hidrelétricas (EPE, 2019). Até março de 2018, eram previstas 21 novas UHE para implantação, em que a maioria estará localizada na região Sul do país (ANEEL, 2018). O aumento na demanda por energia elétrica, não apenas no Brasil, mas também na América Latina, tem levado a planos de investimento em novas hidrelétricas, como é o caso das novas 277 planejadas para a bacia do rio Amazonas. Seis destas usinas estarão localizadas nos principais tributários da região do Andes, os quais possuem elevadas concentrações de sedimentos em suspensão, sendo de grande preocupação, pois, juntas, poderão ter enormes impactos na hidrologia e produtividade do sistema do rio Amazonas, uma vez que mais de 90% de seus sedimentos têm origem nesses tributários (FORSBERG et al., 2017).

Muitas usinas construídas recentemente já apresentam problemas devido a retenção de sedimentos em seus reservatórios, na maioria dos casos diminuindo sua vida útil, ou até mesmo causando uma interrupção de sua operação. Até o ano 2000, mais de 40 reservatórios no Brasil estavam total ou parcialmente assoreados (CARVALHO et al., 2000). A geração de energia e

outros benefícios oriundos de reservatórios não constituem recursos renováveis a menos que os problemas de sedimentação sejam controlados (SUMI; HIROSE, [s.d.]).

Ao longo das últimas décadas, muitos destes empreendimentos no Brasil passaram a ser construídos na configuração “a fio d’água”, ou seja, a geração da energia se dá pela vazão afluente, sem amortecimento de vazões (EPE, 2019). Em casos de usinas a fio d’água com baixos volumes, estas estruturas sofrem com o problema de elevadas cargas de sedimentos afluentes desde o início de sua vida útil (ANNANDALE; MORRIS; KARKI, 2016). Muitos sofrem com elevados custos operacionais e problemas de abrasão nas turbinas como resultado. A gestão do transporte de sedimentos é fundamental nestes casos, para evitar que o efeito de deposição no trecho de montante, sujeito ao remanso provocado pela barragem, influencie os níveis de inundação e o reservatório, que tem pequeno volume, tenha sua vida útil reduzida.

Mesmo que exista um reservatório de baixo tempo de residência (redução da sedimentação), a sua eficiência somente será adequada se a operação durante os períodos de transporte de maior quantidade de sedimentos for eficiente. A avaliação do mecanismo operacional deve buscar dois objetivos fundamentais: (i) reduzir a quantidade de sedimentos depositada; (ii) promover a remoção de sedimentos existentes. Estes objetivos devem ser realizados evitando impactos de sedimentos para jusante, que podem ser prejudiciais para os ecossistemas do rio, principalmente em função da concentração (NEWCOMBE; JENSEN, 1996).

Existem diferentes técnicas para a gestão de sedimentos em reservatórios, que podem tanto evitar que ocorra nova deposição, quanto remover parte dos sedimentos já depositados, sendo as principais: *by-pass*, *pass-through* (*sluicing* e/ou correntes de turbidez), *flushing* e dragagem (MORRIS; FAN, 1998). Todas essas movimentações geram impactos na operação do reservatório, bem como no curso d’água e no ecossistema que dele depende. Sabe-se que o *flushing* de sedimentos pode levar ao decaimento do número de peixes a jusante do reservatório (BUERMANN et al., 1995).

Devido à importância deste assunto, estudos vêm sendo desenvolvidos para avaliar a operação destas técnicas em reservatórios ao redor do mundo. Estudos como de Grimardias, Guillard e Cattaneo (2017) e Baolingao et al. (2015) analisaram os impactos do *flushing* nos peixes dos rios Ródano (Suíça) e Amarelo (China), respectivamente, com trabalhos de campo e análises laboratoriais tanto no canal a jusante como dentro dos reservatórios. Contudo, os efeitos destas técnicas afetam não apenas as comunidades de peixes, mas também outras comunidades de vida

selvagem dependentes do rio, além da população que possa depender da qualidade da água para seu abastecimento. Um estudo foi realizado no reservatório Cacano (alpes italianos), analisando os impactos a jusante do reservatório considerando a aplicação de *flushing* controlado (ESPA et al., 2016). O limite da concentração de sedimentos suspensos, que era utilizado para controlar a operação do reservatório durante o procedimento, era determinado por um modelo empírico, desenvolvido por Newcombe e Jensen (1996), que relaciona a resposta biológica dos peixes a determinadas concentrações.

Trabalhos de modelagem dessas operações em reservatórios também são encontrados, como Liu et al. (2003), que desenvolveram um modelo unidimensional, PESF1D (*Prediction and Evaluation of Sediment Flushing*), para prever e avaliar os efeitos do *flushing* no rio Kurobe (Japão). Saam et al. (2019) realizaram um estudo, com modelagem tridimensional, a fim de avaliar a eficiência de diferentes cenários de *flushing* aplicados ao reservatório de Schwarzenbach, na Alemanha. Contudo, muitos estudos consideram também abordagens clássicas como os métodos de Burne (1953) e Churchill (1948) para o padrão de análise de sedimentos em reservatórios, como é o caso do modelo Reservoir Conservation Model – Rescon 2 (EFTHYMIU et al., 2017) –, desenvolvido pelo *World Bank Group*.

A modelagem da gestão de sedimentos nos reservatórios se faz útil não só para reservatórios já existentes, a fim de observar a viabilidade das técnicas, otimização de operação, possíveis efeitos a jusante e no interior do reservatório, entre outros, mas também para futuras construções. Estudos prévios à construção podem ser feitos para indicar o melhor posicionamento de estruturas como descarregadores de fundo, bem como analisar a melhor técnica de acordo com a região e o tamanho do reservatório, entre outros estudos.

Este estudo visa avaliar e comparar diferentes cenários de modelagem de gestão de sedimentos em reservatórios, avaliando a influência dos diferentes parâmetros e de diferentes rebaixamentos de nível d'água, como uma evolução do *pass-through (sluicing)* em direção ao *empty flushing*. Para isso, será usada como estudo de caso a usina hidrelétrica de Aimorés, inserida na bacia hidrográfica do rio Doce, que possui uma importante representatividade do problema, e onde foram aplicadas previamente as duas técnicas mencionadas. Acredita-se que este tipo de estudo teórico pode ser necessário sempre, uma vez que uma operação deste tipo pode não ser autorizada em função de resultados indesejáveis já na modelagem. Por isto a cenarização é relevante.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Análise de sensibilidade aos parâmetros adotados e das incertezas associadas à modelagem hidrodinâmica e de gestão de sedimentos em reservatórios, utilizando como estudo de caso o reservatório da usina hidrelétrica de Aimorés, no rio Doce (MG e ES, Brasil).

2.2. Objetivos Específicos

- analisar a sensibilidade do modelo à aplicação de diferentes equações de transporte de sedimento não coesivo na modelagem da operação de gestão de sedimentos;
- analisar a sensibilidade do modelo à aplicação de diferentes rebaixamentos de nível d'água para a operação de gestão de sedimentos (*pass-through* ao *flushing*);
- analisar a sensibilidade do modelo à aplicação de diferentes camadas de sedimentos disponíveis no reservatório;
- analisar a sensibilidade do modelo à aplicação de diferentes granulometrias no interior do reservatório;
- analisar se a incerteza na parametrização é maior do que a eficiência entre as técnicas de remoção de sedimentos (diferentes rebaixamentos).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão de trabalhos que englobam conceitos e técnicas que colaboraram para o desenvolvimento desta pesquisa. Estes trabalhos variam de conceitos básicos de hidrossedimentologia à sua modelagem, com maior enfoque em transporte e deposição de sedimentos em reservatórios.

Nas seções 3.1 e 3.2 são apresentados conceitos básicos de processos hidrossedimentológicos e de hidrodinâmica e transporte em reservatórios, respectivamente. A seção 3.3 apresenta as principais classificações de depósitos em reservatórios. Na seção 3.4 são apresentadas estratégias de gestão de sedimentos, bem como exemplos de aplicações bem-sucedidas em diferentes países. Na seção 3.5 é feita uma revisão de alguns dos principais modelos hidráulicos e hidrodinâmicos utilizados para modelagem de sedimentos.

3.1. Processos Hidrossedimentológicos

O ciclo dos sedimentos envolve os processos de destacamento, transporte, deposição e compactação destes. Estes são processos naturais, que sempre ocorreram através dos tempos geológicos, e têm entre seus principais agentes a água, o vento e a gravidade. Contudo, práticas antrópicas – como agricultura, desmatamento, entre outros – vêm intensificando a erosão natural, o que causa problemas devido à grande sedimentação gerada (CARVALHO, 2008).

As atividades humanas exercem uma grande influência na erosão, podendo elevar consideravelmente a taxa em relação à taxa normal (ou geológica). A erodibilidade dos materiais naturais pode ser reforçada devido a perturbações na estrutura do solo, como aragem e plantações, por exemplo (JULIEN, 1998).

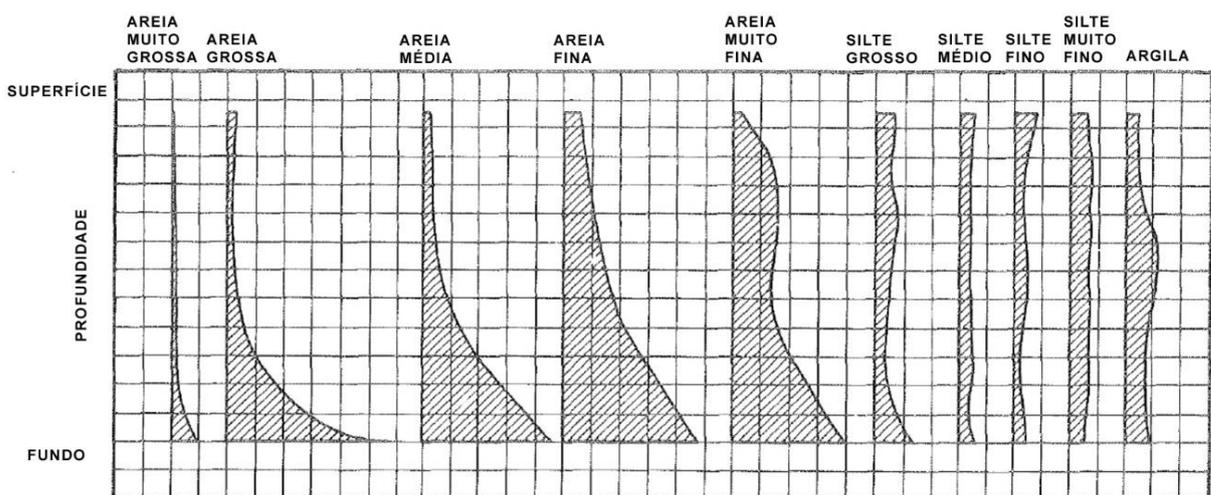
A carga de sedimentos que chega e é transportado no rio depende da produção da bacia hidrográfica a montante. Os fatores que determinam essa produção podem ser resumidos em (YANG, 1996):

- quantidade e intensidade das chuvas;
- tipo de solo, formação geológica e características dos sedimentos;
- cobertura vegetal, topografia e uso da terra;
- taxa de erosão, densidade da rede de drenagem, inclinação, forma, tamanho e alinhamento dos canais;
- tipo de escoamento e características hidráulicas do canal;

Estes sedimentos possuem diversas formas e granulometrias, sendo transportados de diferentes maneiras, dependendo das condições de escoamento. Podem permanecer em suspensão ou próximos ao fundo do rio, deslizando e rolando ao longo do leito. O que determina a maneira como o deslocamento das partículas ocorrerá é função do tamanho, da forma e do peso da partícula, além da forma do escoamento (laminar ou turbulento), da velocidade de corrente, da declividade do canal, temperatura da água, entre outros fatores (VANONI, 1977).

O sedimento suspenso sofre a ação da velocidade de corrente e do seu peso. Logo, a concentração de sedimentos possui um valor máximo junto ao leito do rio e um valor mínimo junto à superfície (SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION, 1963). A distribuição vertical das partículas depende do seu tamanho e de sua massa específica, portanto, cada material apresenta uma distribuição diferente, conforme a Figura 1.

Figura 1. Distribuições verticais dos sedimentos passíveis de serem encontradas em um curso d'água. Adaptado de *Subcommittee on Sedimentation*, 1963.



Segundo Lane (1955), o rio sempre procura o seu estado natural de estabilidade. Ao ocorrerem mudanças em relação à quantidade de sedimentos, ele responde de acordo com as novas condições. Se a carga de sedimentos for elevada, haverá formação de depósitos; já se a carga for reduzida, ocorrerá degradação do leito. A construção de uma barragem, por exemplo, gera uma mudança violenta no regime, existindo a tendência de deposição no reservatório e, por falta de descarga sólida a jusante e também mudança drástica no regime, o leito a jusante será degradado.

Os rios possuem uma capacidade de transporte sólido variável com a vazão, declividade do leito, granulometria e peso do material, que é chamado de valor de saturação. Quando a carga

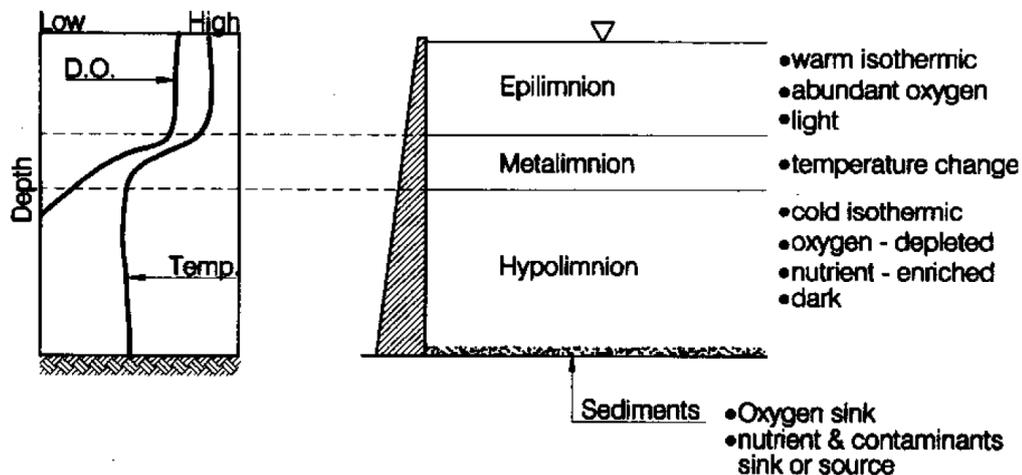
sólida presente no escoamento supera este valor, as forças do fluxo não são fortes o suficiente para manter os sedimentos em deslocamento, sendo o seu peso superior à força da corrente que atua sobre ele. Assim, as partículas sedimentam formando depósitos, que podem ser de pequeno a grande volume, transitórios ou permanentes.

Um exemplo de depósito permanente é o assoreamento de reservatórios. Ao ser construída uma barragem, a montante do barramento ocorre diminuição da velocidade do escoamento, ocorrendo deposição dos sedimentos que antes eram transportados. Essa retenção de sedimentos pode causar problemas, como quando obstruem a tomada d'água de usinas, além de diminuir sua vida útil. A dinâmica de sedimentos em reservatórios será melhor explicada no item a seguir.

3.2. Hidrodinâmica e transporte de sedimentos em reservatórios

Dependendo da profundidade do reservatório, existe a tendência à estratificação, que ocorre devido as alterações na densidade do fluido, causadas pelas diferenças de temperatura e pelos sólidos suspensos. A estratificação da temperatura, resultado do aquecimento solar na superfície, é caracterizada pela seguinte estrutura (Figura 2):

Figura 2. Estrutura vertical de reservatórios (MORRIS; FAN, 1998).



- *epilimnion*: camada verticalmente misturada, de água superficial mais quente e bem oxigenada;
- *metalimnion*: zona de rápida mudança de temperatura e densidade; engloba a termoclina;
- *hypolimnion*: zona profunda, mais fria e escura, com falta de oxigênio.

Termoclina é a zona em que o gradiente de temperatura é igual a 1° por metro de profundidade, ou mais, relativamente estreita, e englobada pela *metalimnion*, com a camada adjacente de transição entre as zonas superficial e profunda do reservatório.

O vento é o principal fator que causa a circulação vertical em reservatórios, em que ventos de elevada magnitude podem causar circulações mais profundas. Ventos com força e duração suficientes podem sobrepor a estratificação induzida pela temperatura, misturando a coluna d'água. Contudo, reservatórios pequenos estão também sujeitos às mudanças devido às vazões afluentes elevadas, que podem misturar as camadas, além de serem capazes de renovar a água armazenada.

A diferença de densidade por graus celsius de alteração na temperatura aumenta em função da temperatura, variando três vezes mais a uma alteração da temperatura a 24° que a 9° (MORRIS; FAN, 1998). Por este motivo, reservatórios em regiões tropicais podem ser mais estratificados apesar de apresentarem gradientes de temperatura menores que o da zona temperada. As variações na densidade são mais sensíveis devido aos sólidos suspensos que à temperatura, sendo uma ordem de grandeza maiores. Estas variações podem causar correntes de turbidez, explicadas mais detalhadamente no item 3.4.2, que podem transportar uma quantidade significativa de sedimentos através do reservatório.

Os produtores primários (autótrofos), criam matéria orgânica a partir de matéria inorgânica, utilizando como fonte energética a energia solar. Na maioria dos reservatórios, fósforo e nitrogênio são os principais nutrientes limitantes da produtividade. Estes nutrientes são rapidamente removidos do sistema aquático, se ligando aos sedimentos, em concentrações muito maiores que as presentes na água (MORRIS; FAN, 1998). A sedimentação é a principal fonte de redução do fósforo nos sistemas aquáticos.

Grande parte da matéria orgânica e de nutrientes presentes no reservatório estão particulados, sofrendo o mesmo processo de sedimentação que os sedimentos em suspensão. A matéria orgânica em suspensão sofre a ação de processos físicos e é sedimentada, geralmente formando um gradiente, da montante em direção ao barramento. Em alguns reservatórios tropicais, nutrientes são incorporados à biomassa das algas, contribuindo para a sedimentação da matéria orgânica, uma vez que esses organismos morrem e se depositam no fundo do reservatório.

O transporte de sedimentos dentro do reservatório pode se dar de duas maneiras, sendo elas o transporte convencional e as correntes de densidade (ANNANDALE; MORRIS; KARKI,

2016). Estas ocorrem quando a densidade da mistura água-sedimento é muito maior que a densidade da água limpa dentro do reservatório, de modo que a mistura de maior densidade atravessa o reservatório, próximo ao leito, formando uma corrente distinta. O transporte convencional ocorre quando a turbulência dentro do reservatório carrega sedimentos suspensos e de leito dentro do reservatório. Os sedimentos suspensos são distribuídos ao longo de toda a coluna d'água, diferentemente das correntes de densidade, que se dão somente no fundo do reservatório.

Muitas das equações de transporte de sedimentos comumente utilizadas no cálculo do transporte em reservatórios foram desenvolvidas para o cálculo do transporte em rios, baseadas em simplificações, como condições de escoamento permanente em canais prismáticos, e foram desenvolvidas para analisar sedimentos não coesivos (YANG, 1996). Ainda, consideram que as trocas entre o escoamento e o leito atingiram o equilíbrio. Contudo, estas premissas não são válidas para reservatórios, uma vez que suas seções aumentam de montante para jusante, seu escoamento não é permanente, o escoamento que chega ao reservatório deposita materiais de leito (violando a condição de equilíbrio) e grande parte de seus depósitos são de material coesivo. Estes depósitos são um desafio para a representação do transporte de sedimentos, devido à dificuldade na caracterização de sua erodibilidade, uma vez que ela varia em função do tempo, da profundidade, das regras de operação do reservatório.

A caracterização de sedimentos coesivos é complexa, devido à natureza não uniforme de seus depósitos. Diferentes eventos de afluência no reservatório formarão depósitos de diferentes espessuras e tamanhos de partícula, bem como diferenças podem ser causadas por material orgânico e sedimentos mais grosseiros (USSD, 2015). Ainda, conforme sedimentos coesivos compactam, a dificuldade em erodir aumenta.

3.3. Depósitos de sedimentos em Reservatórios

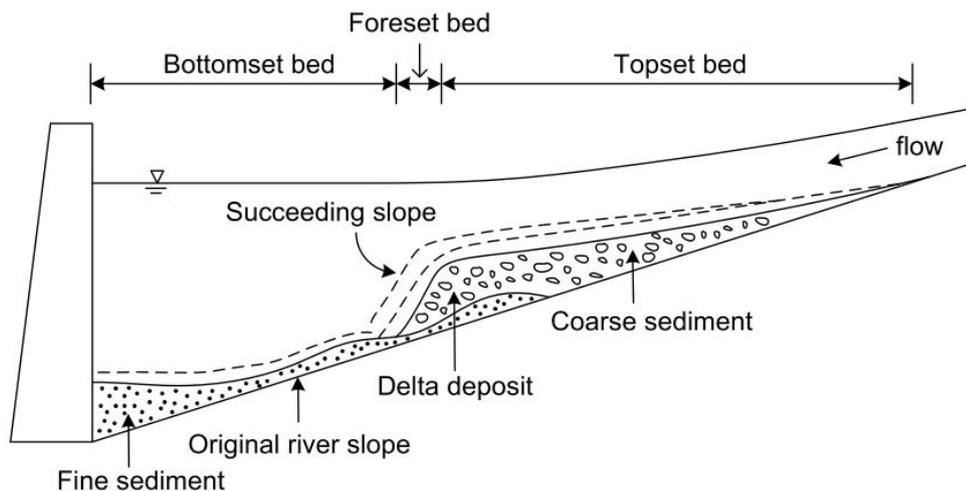
À medida que o escoamento perde velocidade, os sedimentos que entram no reservatório começam a se depositar. O material que chega por transporte de leito e a fração mais de granulometria mais grossa transportada em suspensão geralmente se depositam imediatamente, formando o delta, perto da cabeceira do reservatório (JULIEN, 1994). A deposição longitudinal pode ser dividida em três zonas, apresentadas na Figura 3, sendo elas:

- *topset bed*: correspondem aos depósitos em delta, tendo seu limite a jusante onde termina o transporte de leito dentro do reservatório;

- *foreset deposit*: representa a face do delta avançando no reservatório, com uma intensificação da declividade e diminuição do tamanho da partícula;
- *bottomset bed*: sedimentos finos que são depositados após o delta por correntes de turbidez ou escoamentos não estratificados.

A parte mais a montante é composta basicamente de materiais de granulometria maior, enquanto a jusante, mais próxima da barragem, é formada por materiais mais finos. Morris e Fan (1998) notaram algumas características básicas na formação de deltas: (i) existe uma mudança abrupta de declividade entre as regiões de montante e jusante; (ii) partículas de sedimento na região a montante são mais grosseiras do que nas regiões intermediária e jusante, havendo uma mudança bruta de granulometria entre essas regiões; (iii) a cota da zona de transição entre a zona de montante e a intermediária depende das regras de operação do reservatório e do seu nível.

Figura 3 Formação delta típica (AHN, 2011).

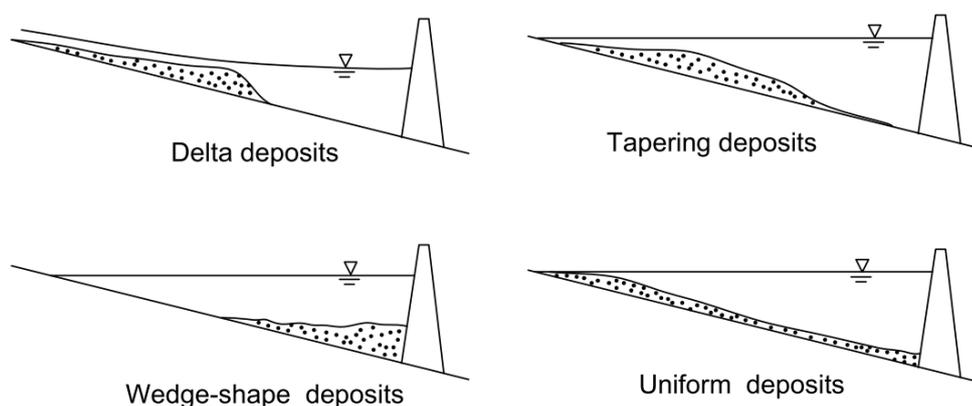


Os processos de sedimentação de reservatórios são complexos, variando com condições em toda a bacia, como a produção de sedimentos, taxa de transporte de sedimentos, geometria do rio, propriedades dos sedimentos, uso do solo, operação da barragem, entre outros (AHN, 2011). A classificação da deposição pode ser dividida em quatro tipos básicos (Figura 4), que podem ocorrer nas diferentes zonas do reservatório, formando geometrias complexas. São elas:

- depósitos delta (*delta deposits*): contêm a fração de maior granulometria, pode ser formado apenas por sedimentos mais grosseiros, mas também pode conter frações de silte;

- cunha (*wedge-shape deposits*): são mais espessos perto da barragem, ficando mais finos a montante. Típico de sedimentos finos transportados por correntes de turbidez, mas também podem ser encontrados em reservatórios menores, com alta carga de sedimentos afluente, ou reservatórios maiores operados a níveis baixos durante eventos de cheia;
- afunilados (*tapering deposits*): depósitos ficam progressivamente mais finos em direção a jusante. Comum em reservatórios longos, operados a níveis d'água elevados;
- uniformes (*uniform deposits*): pouco usuais, podem acontecer em reservatórios estreitos, com variações de nível d'água e baixa carga de sedimentos afluente.

Figura 4. Tipos básicos de formação de depósitos em reservatórios (AHN, 2011).



A retenção de sedimentos pelo reservatório depende de vários fatores, sendo um dos mais importantes a velocidade do escoamento. Reservatórios de acumulação tendem a reter mais sedimentos, uma vez que suas velocidades são reduzidas em relação aos reservatórios a fio d'água. A retenção de sedimentos no reservatório acarreta perda de volume útil ao longo do tempo e aumenta o risco de elevação dos níveis a montante pelo efeito de remanso provocado pela redução das seções de escoamento. Para jusante, o efeito possível é de erosão do trecho imediatamente a jusante da barragem. Adicionalmente, com a redução dos volumes do reservatório, ele perde a sua função de geração de energia ou regularização de vazão para abastecimento.

Segundo Carvalho et al. (2000), os dois métodos empíricos mais utilizados no Brasil para o cálculo da eficiência de retenção dos reservatórios são as curvas de Brune (1953) e Churchill (1948). A curva de Brune (Figura 5) relaciona a eficiência de retenção com o tempo de residência do reservatório e é utilizado para médios e grandes reservatórios. Já a curva de

Churchill (Figura 6) relaciona o sedimento que passa pelo reservatório com um índice de sedimentação, mais utilizada para pequenos reservatórios.

Figura 5. Curvas de eficiência de retenção de sedimentos em reservatórios segundo Brune (1963), adaptada de Carvalho (2008).

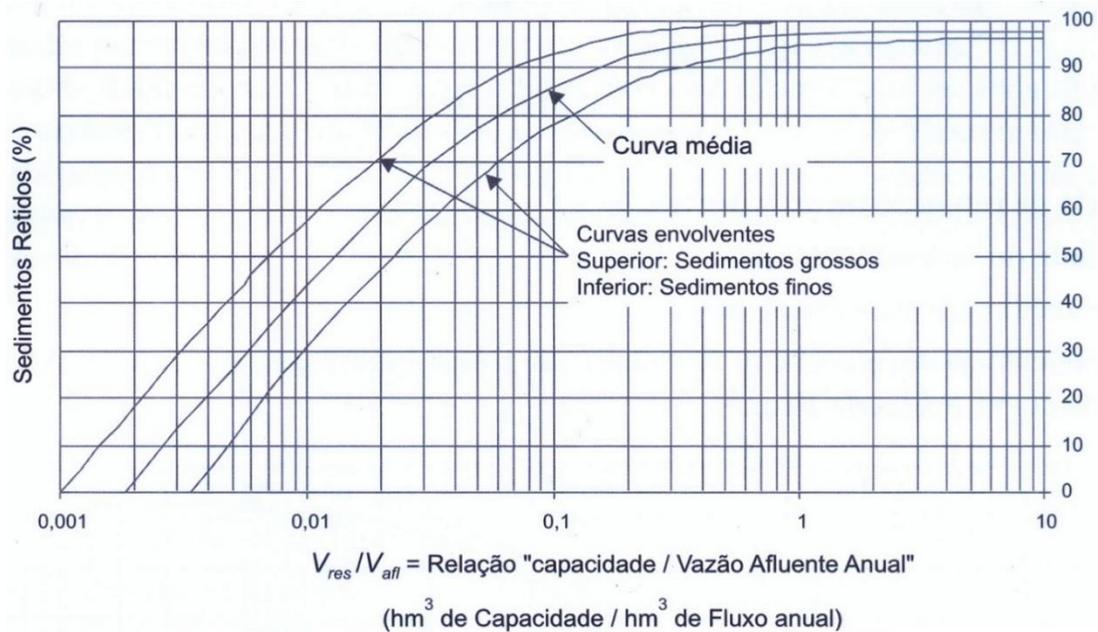
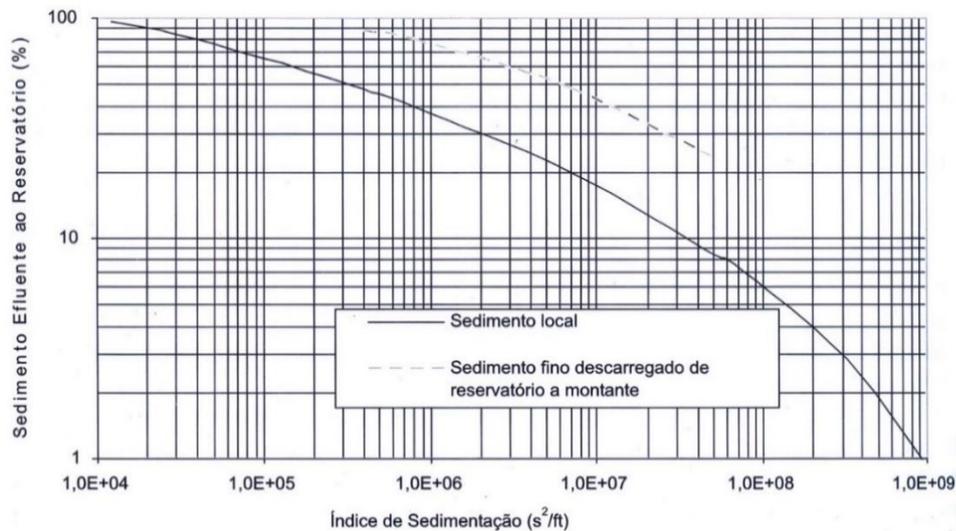


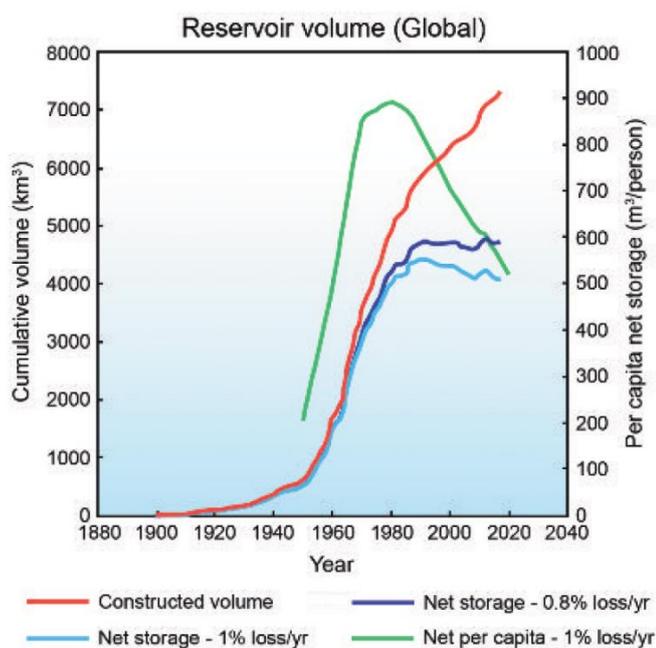
Figura 6. Curva de eficiência de retenção de sedimentos segundo Churchill (1948), adaptada de Carvalho (2008).



As abordagens históricas de desenvolvimento de reservatórios não consideram a questão do desenvolvimento sustentável, ou seja, que o armazenamento destes é necessário tanto para a atual geração como para a futura (ANNANDALE et al., 2018). Considerando a perda por sedimentação – estimada em 0,8 a 1% ao ano (ICOLD, 2009) –, a estimativa de armazenamento global indica ou uma estagnação, ou um decréscimo, apesar da contínua construção de

barragens em todo o mundo (Figura 7). No Brasil, muitos reservatórios sofrem com o processo de assoreamento. Segundo Carvalho et al. (2000), até 1998, 47 reservatórios brasileiros estavam total ou parcialmente assoreados, entre eles se encontram reservatórios de usinas hidrelétricas, de controle de cheias e de abastecimento, todos com altura da barragem superior a 10 m.

Figura 7. Armazenamento global atual e estimado (ANNANDALE et al., 2018).



Na década de 60, quando foram construídos os primeiros reservatórios de grande porte no Brasil para geração de energia, a tendência foi de construir reservatório de regularização com grande volume para armazenar. Neste processo, em alguns casos, os efeitos para montante e jusante destes reservatórios podem se estender por muitos quilômetros, com efeito ambiental importante.

Os reservatórios construídos na última década possuem menor tempo de residência. Com isto, a relação entre V/C , onde V = volume em m^3 dos reservatórios de energia; C = capacidade instalada das usinas, em MW, caiu de $8 \text{ hm}^3/\text{MW}$, na década de 1970, para $3 \text{ hm}^3/\text{MW}$, recentemente, mostrando que foram instalados muitos reservatórios com menor volume de regularização (como os reservatórios de São Antônio e Jirau, no rio Madeira). Com reservatórios menores, o fator de carga (relação entre energia firme por energia instalada), diminuiu.

Os reservatórios que utilizam a água afluyente para geração de energia, ou reservatórios “a fio d’água”, que apresentem menor volume podem sofrer com o problema de elevadas cargas de

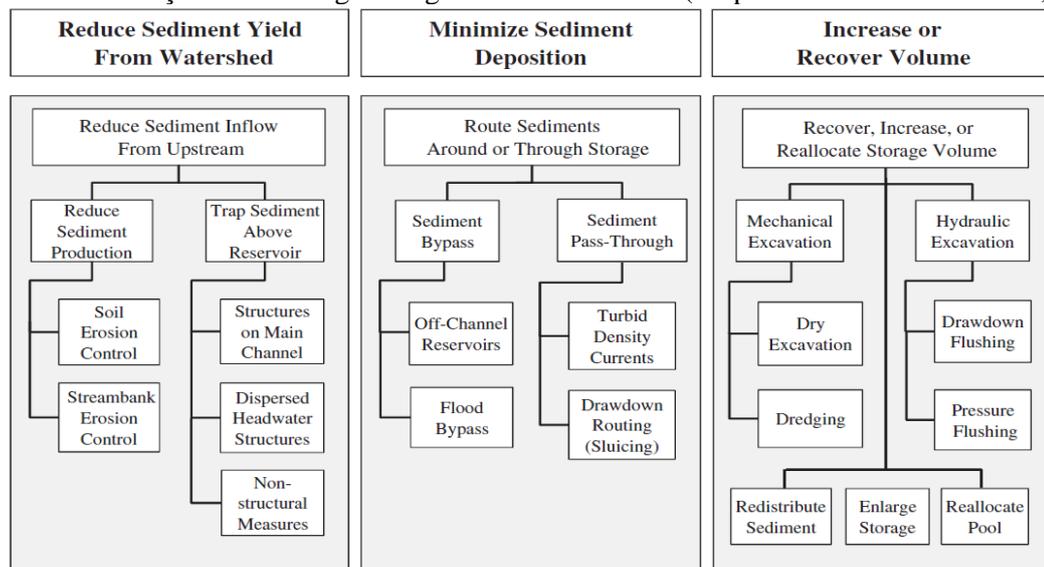
sedimentos afluentes desde o início de sua vida útil, como é o caso da usina de Jirau, no rio Madeira (bacia do rio Amazonas). Em 2014, um ano após sua entrada em operação comercial, uma cheia histórica mobilizou um grande volume de sedimentos, causando alterações no perfil topográfico do rio, provocando agradação perto das estruturas de captação de água e o desgaste dos equipamentos hidromecânicos (IHA, 2017).

Estes reservatórios podem ser operados para minimizar a quantidade de sedimentos retidos, a fim de evitar o efeito de redução da sua vida útil e aumento de nível para montante. Para isto, o reservatório é operado de forma a permitir a passagem das cheias sem muito amortecimento, mantendo assim mais energia no escoamento, e redistribuindo e transportando junto com a água os sedimentos, evitando que estes fiquem depositados. Este é o chamado *sluicing*, ou *pass-through*, que permite transportar para jusante os sedimentos de forma a evitar sua acumulação no trecho de montante, e que será tratado de forma mais aprofundada em itens a seguir.

3.4. Estratégias de Gestão de Sedimentos

Diversas estratégias de gestão de sedimentos foram estudadas e aplicadas no gerenciamento de reservatórios. Pode-se resumir essas estratégias em três grandes grupos: redução da carga sólida da bacia, minimização da deposição de sedimentos e recuperação do volume assoreado, como mostra a Figura 8. Neste capítulo serão explicadas algumas dessas técnicas, desconsiderando-se as estratégias de redução de carga de sedimentos na bacia hidrográfica, visto que o objetivo do estudo é avaliar duas técnicas aplicadas ao reservatório.

Figura 8. Classificação das estratégias de gestão de sedimentos (adaptado de KONDOLF et al, 2014).



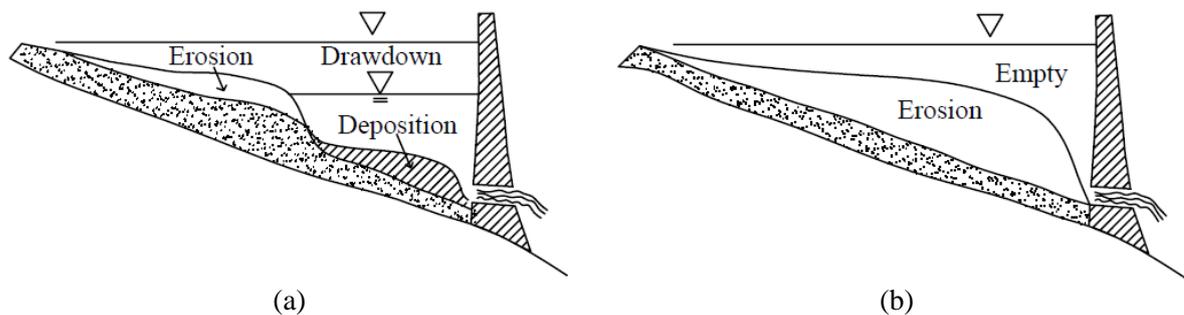
3.4.1. Flushing

O *flushing* é realizado por meio da abertura de descarregadores de fundo, a fim de estabelecer temporariamente um fluxo, erodindo um canal nos depósitos do reservatório, levando junto os sedimentos pelos descarregadores (MORRIS; FAN, 1998). O objetivo desta técnica é a retirada de sedimentos já depositados, apesar de também liberar os sedimentos que estão entrando no reservatório no momento da operação.

Existem dois modelos de operação que podem ser executados: (a) *pressure flushing*; (b) *empty flushing*. No primeiro, o reservatório pode ou não ser rebaixado até um determinado nível e os descarregadores de fundo são abertos, desenvolvendo um cone de remoção de sedimentos. Com o rebaixamento, os sedimentos da parte superior do reservatório são erodidos e transportados pela área inundada, mas podem ser depositados à medida que entram na região de em que o nível do reservatório foi mantido. Assim, apenas os sedimentos dentro do cone de remoção saem do reservatório (WANG; HU, 2009).

Já o *empty flushing* ocorre a partir do esvaziamento total do reservatório, deixando o fluxo natural do rio. Esta técnica permite que tanto os sedimentos da parte superior quanto da parte inferior do reservatório saiam com o escoamento. Estas duas configurações podem ser observadas na Figura 9.

Figura 9. Esquema com as duas configurações do flushing em reservatórios: (a) *pressure flushing*; (b) *empty flushing* (adaptado de WANG; HU, 2009).



O *flushing* realizado em épocas de cheia geralmente é mais efetivo, uma vez que possibilita maiores descargas, com maior poder erosivo, além de eliminar conjuntamente os sedimentos que entrariam no reservatório com a cheia. Contudo, devido à alta concentração de sedimentos liberada, a água liberada a jusante do reservatório apresenta elevada turbidez, impactando na sua captação, bem como no ecossistema a jusante. Gabbud et al. (2019) estudaram os impactos do *flushing* de sedimentos em macrozoobentos na região dos alpes suíços em comparação ao esperado numa dinâmica normal dos rios. Durante o verão, em que a ocorrência do *flushing* é

frequente, a diversidade e abundância de macroinvertebrados é baixa, começando sua recuperação à medida que esta frequência diminui no outono. O *flushing* leva a fluxos carregados de sedimentos que podem desestabilizar áreas do leito do riacho, causando taxas de deslocamento lateral do habitat muito mais elevadas do que a resposta dos macroinvertebrados (GABBUD et al., 2019).

Esta técnica foi aplicada ao reservatório Cacano, localizado no rio Adda, nos alpes italianos, que removeu aproximadamente 110.000 toneladas de silte (ESPA et al., 2016). As operações ocorreram durante três anos, por cerca de 46 dias em 2010, 53 dias em 2011 e 40 dias em 2012. Essa segmentação do processo ocorreu a fim de possibilitar o controle dos impactos do *flushing* a jusante da barragem. Estruturas de descarga de fundo têm eficiência limitada, de forma que estudos sobre o comportamento hidrodinâmico destes descarregadores e seus principais parâmetros que favorecem a remoção de sedimentos têm sido desenvolvidos, como o estudo de Abreu (2019).

3.4.2. *Pass-through*

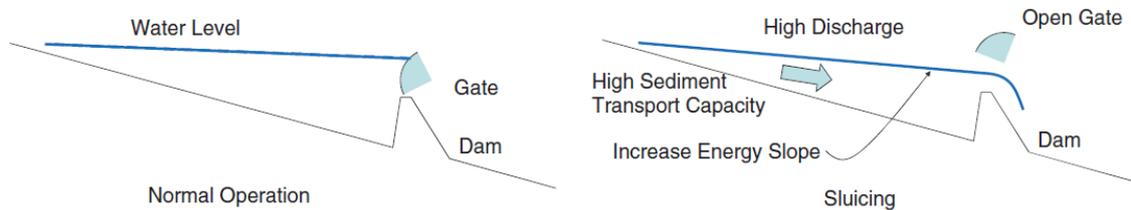
Esta técnica foca em minimizar a deposição ou balancear entre deposição e retirada de sedimentos. Diferentemente do *flushing*, este procedimento mantém o padrão de transporte do rio, não impactando tanto na concentração de sedimentos a jusante (MORRIS; FAN, 1998). O *pass-through* envolve quatro diferentes técnicas, em que três delas envolvem o rebaixamento parcial do nível do reservatório, a fim de maximizar a velocidade do escoamento e permitir a passagem da água com elevada concentração de sedimentos através do reservatório. Dentre elas, estão: rebaixamento sazonal, rebaixamento em períodos de cheia, com previsão de hidrogramas ou curva chave, e correntes de turbidez. A estas técnicas realizadas com rebaixamento, dá-se o nome de *Sluicing*, que será mais detalhada a seguir.

Sluicing

Esta técnica envolve a liberação de grandes descargas pela barragem em períodos de cheia, com o objetivo de liberar as elevadas concentrações de sedimento afluentes, evitando a sedimentação no interior do reservatório. Seu conceito pode ser facilmente explicado pelo slogan chinês: “liberar a água lamacenta, reter a água limpa” (WANG; HU, 2009). Devido à alta velocidade do escoamento, é possível que parte dos sedimentos depositados seja ressuspendida e retirada do reservatório em conjunto com os afluentes, mas ressalta-se que esta não é a finalidade do procedimento (KONDOLF et al., 2014). Para isso, são realizados o rebaixamento do nível do reservatório com a abertura das comportas. Estes descarregadores não necessariamente devem

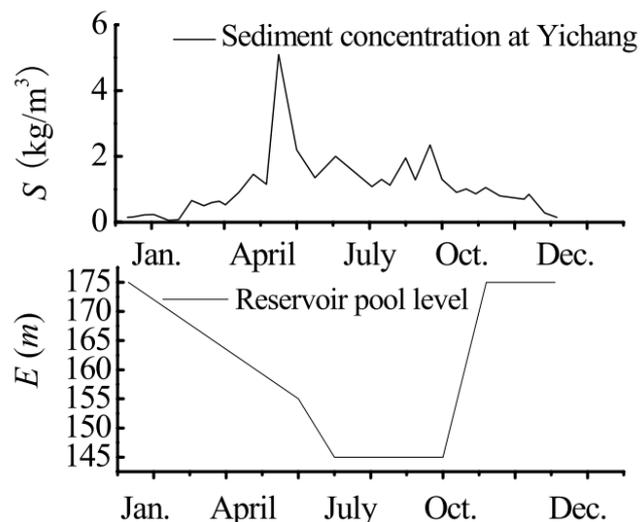
ser no ponto mais baixo do reservatório, podendo, em reservatórios menores, comportas acima da crista serem usadas. Na Figura 10 é apresentado um esquema desta operação.

Figura 10. Representação esquemática da operação do *sluicing*. (Adaptado de KONDOLF et al, 2014).



O reservatório da usina de Três Gargantas, na China, é um exemplo de grande reservatório (39 bilhões de m³ de armazenamento total) em que esta técnica é aplicada e bem-sucedida. O *sluicing* é a principal técnica para gestão dos sedimentos utilizada neste reservatório, onde o seu nível é rebaixado de junho a setembro (quando a concentração de sedimentos é elevada) e volta a armazenar água a partir de outubro, quando as concentrações diminuem (WANG; HU, 2009). Esta configuração de níveis está mostrada na Figura 11. Com o represamento da “água limpa” e liberação da água turva, menos sedimentos se depositam no reservatório enquanto ele ainda é capaz de armazenar água suficiente para manter a geração de energia. Ainda que o objetivo desta operação de rebaixamento não seja unicamente a gestão de sedimentos – este reservatório foi projetado para controle de cheias, geração de energia elétrica e abastecimento de água (REN et al, 2021) –, os resultados em termos de *sluicing* são satisfatórios.

Figura 11. Variação temporal típica das concentrações de sedimentos na região do reservatório Três Gargantas (gráfico superior) e operação dos níveis do reservatório (gráfico inferior) para controle de sedimentação (WANG; HU, 2009).

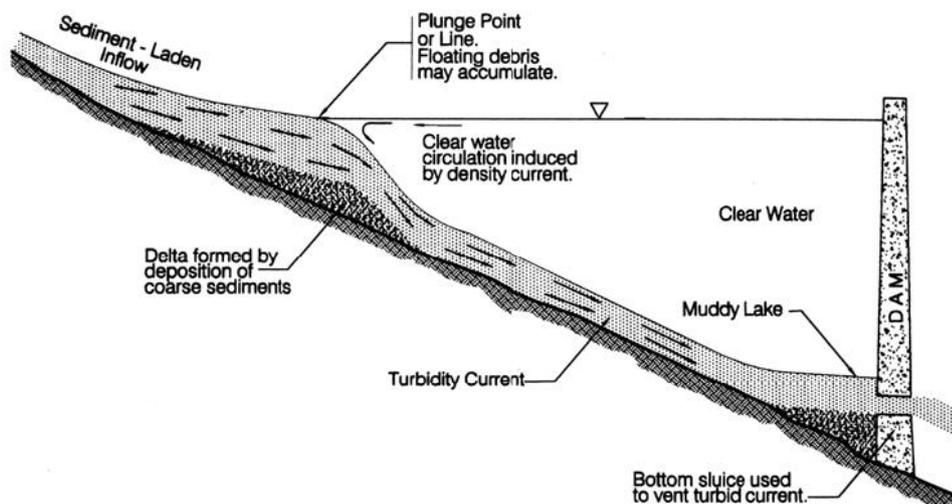


Quando o período de retenção de cheias é reduzido, os sedimentos depositam menos no reservatório, de modo que uma mudança nas regras de operação da barragem para diminuí-lo pode reduzir os problemas com sedimentação a um custo operacional baixo. Esta técnica apresenta melhores resultados em reservatórios longos e estreitos, mas mesmo reservatórios com outras configurações podem ter resultados positivos, como é o caso do reservatório de John Radmond, nos Estados Unidos, que possui uma forma quase circular. Um estudo utilizando o modelo hidrodinâmico CE-QUAL-W2 (*Portland State University*) mostrou que, apenas alterando algumas regras de operação a fim de incorporar o objetivo de gerenciamento dos sedimentos, já ocorreria uma significativa redução na deposição no interior do reservatório (LEE; FOSTER, 2013).

Correntes de turbidez

Correntes de turbidez podem se formar quando a água afluenta ao reservatório, com elevada concentração de sedimentos, forma uma corrente distinta, mais densa, que escoa pelo fundo do reservatório sem se misturar com a corrente em camada superior, menos densa (Figura 12). Estas correntes de turbidez aumentam a deposição de sedimentos. Existe uma técnica, chamada de “ventilação de correntes de turbidez”, em que os descarregadores de fundo são abertos, a fim de possibilitar a saída destas correntes densas. Contudo, esta técnica só pode ser aplicada com sucesso quando a corrente possui velocidade e turbulência suficientes para manter as partículas em suspensão e atravessar o reservatório como um escoamento distinto, podendo ser liberado a jusante (MORRIS; FAN, 1998).

Figura 12. Correntes de turbidez (adaptado de MORRIS; FAN, 1998).

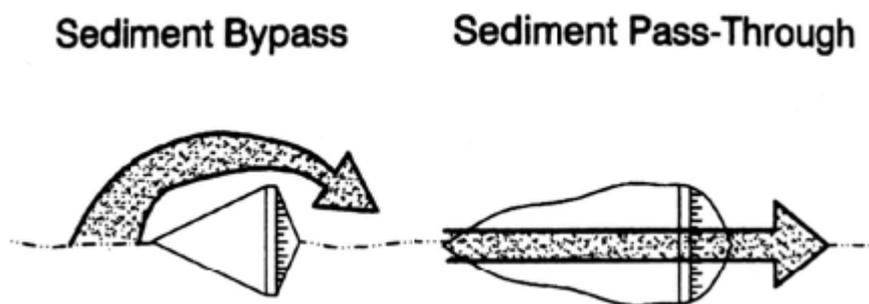


Os reservatórios Sanmenxia e Xiaolangdi, no rio Amarelo (China), utilizam esta técnica, em conjunto com o *flushing*, para descarregar os sedimentos. Para auxiliar neste gerenciamento, o Instituto de Pesquisas Hidráulicas do rio Amarelo (YRIHR, na sigla em inglês) desenvolveu uma fórmula para prever o ponto de formação destas correntes, assim, com melhores informações, é possível definir qual o local ideal para aplicação da técnica, além de fornecer critérios para design e operação de reservatórios a fim de criar correntes de turbidez efetivas (KONDOLF et al., 2014).

3.4.3. Bypass de sedimentos

São estruturas, como canais, condutos pressurizados ou túneis, que encaminham o escoamento com elevada concentração de sedimentos antes que ele adentre o reservatório. Dentre estes, os mais comumente utilizados são os túneis, porém todas as estruturas citadas necessitam de alto investimento, além de dependerem das condições locais de topografia, tamanho do reservatório, entre outros (HEALY et al., 2015). A Figura 13 apresenta a diferença entre o *bypass* e o *pass-through*.

Figura 13. Diferença entre *bypass* e *pass-through* (adaptado de MORRIS; FAN, 1998).



A maioria destas estruturas são encontradas na Suíça e no Japão, onde as declividades são mais acentuadas e os reservatórios são menores. Um exemplo de sucesso no emprego desta técnica é o reservatório Nunobiki (área de drenagem de 9,8 km²), no Japão, construído em 1900. A bacia hidrográfica em que este reservatório está inserido é localizada na região das montanhas Rokko, sendo caracterizada por elevada produção de sedimentos, devido a geologia e às elevadas declividades. Em 1908, a fim de reduzir a carga de sedimentos afluente ao reservatório, foi construído um túnel para *bypass*. Estudos mostram que, do ponto de vista de sedimentação, a vida do reservatório passou de 30 para 500 anos (SUMI; OKANO; TAKATA, 2004).

3.4.4. Dragagem

Sedimentos já depositados em reservatórios podem ser removidos por meio da dragagem, que pode ser hidráulica ou mecânica. Dependendo do volume depositado, do tamanho do grão, geometria do depósito, questões ambientais, entre outro, é feita a definição de qual a melhor estratégia de dragagem (MORRIS; FAN, 1998).

Qualquer das técnicas de dragagem é cara, mas a escavação mecânica costuma ter um valor menor que a hidráulica, além de conseguir remover sedimentos de maior granulometria. Contudo, para sua aplicação, é necessário que o nível do reservatório seja suficientemente rebaixado para deixar estes sedimentos expostos (KONDOLF et al., 2014).

A média de custo para realizar dragagem em reservatórios foi estimada em U\$ 8,70/m³, em 2010, um investimento pesado considerando-se o volume total necessário a ser dragado, em muitos casos (HEALY et al., 2015). Mesmo com um custo elevado, ainda é uma das técnicas mais utilizadas para desassoreamento de reservatórios, devido à falta de gerenciamento, sendo, muitas vezes, a única opção. Ainda, um grande problema é o impacto ambiental em remexer esses sedimentos depositados há anos, bem como a preocupação com o local de descarte e possível tratamento do material escavado.

3.5. Modelagem de sedimentos em reservatórios

Existe uma grande variedade de modelos com aplicação de transporte de sedimentos, que se diferem em relação a complexidade, processos considerados e dados necessários para sua aplicação. Não existe um modelo ideal para todos os tipo de aplicação, de modo que a definição do modelo a ser utilizado dependerá do objetivo de cada estudo (MERRITT; LETCHER; JAKEMAN, 2003).

Modelos mais detalhados de transporte e deposição de sedimentos em reservatórios devem possuir dois componentes: um hidráulico e um de transporte de sedimentos. As equações de escoamento representam a continuidade do escoamento e a quantidade de movimento, já as de transporte podem ser divididas em duas, uma para sedimentos em suspensão e uma para sedimentos de fundo. Estes modelos podem ser divididos nas seguintes categorias:

(a) empírico: relaciona as variáveis de interesse com indicador do reservatório. Por exemplo, os métodos de Churchill (1947), Brune (1953) ou Heinemann (1981) relacionam a retenção de sedimentos em função do valor de volume/vazão, permitindo ter uma estimativa da sua retenção. Pode-se citar, também, o modelo Rescon2 (EFTHYMIOU et al., 2017), que calcula o

assoreamento com base nos métodos de Brune e Churchill, podendo aplicar também técnicas de gestão de sedimentos e questões econômicas;

(b) modelos conceituais: os modelos conceituais procuram descrever o processo que ocorre no reservatório e podem ser baseados em processos físicos:

(b.1) tipo concentrado, quando não avaliam a distribuição dos processos dentro dos reservatórios, mas utilizam apenas uma variável de entrada e saída e volume para a quantidade de água e a retenção de sedimentos para a sua deposição;

(b.2) distribuído unidimensional: quando retrata o escoamento e o transporte de sedimentos com uma dimensão de espaço (longitudinal, ao longo do rio). Estes modelos são utilizados para a maioria dos problemas porque tem se apresentados confiáveis e necessitam menos dados que os modelos seguintes (MOLINAS; YANG, 1985). O modelo HEC-HAS é um exemplo deste tipo de modelo (USACE, 2016).

(b.3) distribuído bidimensional: quando retrata o escoamento e o transporte de sedimentos em duas dimensões (longitudinal e vertical). Este tipo de modelo é útil para avaliar a mobilidade da seção na sua vertical e onde as profundidades do escoamento são maiores.

(b.4) distribuído tridimensional quanto retrata as três dimensões do espaço. Este tipo de modelo é necessário para estudar a morfologia das seções em detalhe e para trechos menores.

Por serem de aplicação mais simples, muitos estudos de modelagem numérica utilizam modelos 1D em detrimento de modelos 2D ou 3D (MORRIS; FAN, 1998). Segundo White (2001) e Molinas e Yang (1985), um modelo 1D pode ser adequado para simulações de reservatórios, dependendo do objetivo da simulação. Para representação de estratificação, bem como dos processos de correntes de densidade, modelos unidimensionais não são possíveis de serem utilizados, necessitando a aplicação de modelos mais avançados. Modelos 2D ou 3D podem ser usados para avaliar impactos localizados de práticas de gestão de sedimentos e fenômenos hidrossedimentológicos, uma vez que requerem dados de campo para calibração.

Diversos modelos foram desenvolvidos para a simulação de transporte e deposição de sedimentos em reservatórios no decorrer das últimas décadas, em que muitos deles foram derivados de modelos desenvolvidos para simulação de transporte de leito móvel em cursos d'água (MORRIS; FAN, 1998).

3.5.1. HEC-RAS

Um dos mais tradicionais modelos da atualidade é o HEC-RAS (USACE, 2016). Os cálculos de transporte e deposição de sedimentos no HEC-RAS são feitos de forma unidimensional (1D), considerando alterações na geometria do canal com base nos cálculos de continuidade dos sedimentos. O objetivo das implementações iniciais do HEC-RAS foi replicar as funcionalidades do antigo modelo HEC-6 dentro do framework HEC-RAS. Versões anteriores do transporte de sedimentos em HEC-RAS utilizaram exclusivamente o modelo hidráulico quase não permanente, simulando a hidrodinâmica com uma série de fluxos estacionários. Em sua versão mais atual, lançada em 2016, o HEC-RAS 5.0 (também disponível em 2D) combina os cálculos de sedimentos com simulações em regime de fluxo não-permanente. A conservação hidrológica de massa é a maior vantagem do transporte de sedimentos em regime não-permanente, tornando os modelos de reservatórios, e até mesmo os modelos de cascatas de vários reservatórios, muito mais práticos no HEC-RAS. A simulação do transporte de sedimentos acoplada com simulações em regime não-permanente também traz várias características poderosas do software, incluindo estruturas laterais, redes de fluxo, fluxo misto e especialmente regras operacionais (Gibson e Boyd, 2014). A versão 5.0 inclui ainda parâmetros operacionais baseados em sedimentos, estruturas operacionais baseadas na alteração e concentração do leito.

Como exemplo de sucesso de aplicação dos modelos da série do HEC, Morris e Hu (1992) simularam a descarga de sedimentos no Reservatório de Loíza, no Porto Rico, usando um modelo unidimensional HEC-6 (US Army, 1991). O reservatório foi assumido como unidimensional, pois a variação lateral do canal não foi considerada significativa pelos autores.

3.5.2. SSIIM

O modelo foi originalmente desenvolvido em 1990-91, por Nils Olsen, chamado *Sediment Simulation in Intakes* (SSII), motivado pela dificuldade de simular sedimentos finos em modelos físicos, ou de escala. Posteriormente, foi incorporado a este modelo um módulo para cálculos multi-bloco, resultando no modelo SSIIM (OLSEN, 2018).

Este modelo utiliza o método de volume finitos para resolver as equações de Navier-Stokes em três dimensões. Um outro modelo de volumes finitos tridimensional é utilizado para calcular a concentração de sedimentos no reservatório, resolvendo a equação de advecção-difusão (MORRIS; FAN, 1998). O SSIIM utiliza um grid não estruturado e não ortogonal, composto por uma mistura de células tetraédricas e hexaédricas, que se adapta com as mudanças no leito e no nível d'água (HAUN et al., 2013).

Este software foi utilizado num estudo que desenvolveu um modelo tridimensional acoplado para a previsão do cone formado a montante do descarregador de fundo, devido ao *flushing* de sedimentos em um reservatório. Este modelo proposto é usado para simulação de testes baseados em sedimentos não coesivos. As características geométricas do cone (desenvolvimento espacial e temporal) foram bem previstos em comparação com os dados experimentais (SAWADOGO; BASSON; SCHNEIDERBAUER, 2019).

3.5.3. GSTARS

O GSTARS é uma série de modelos computacionais de tubos de fluxo generalizado para simulação de rios aluviais, desenvolvidos pelo *U.S. Bureau of Reclamation* para escoamentos estáveis e quase-estáveis. A primeira versão deste modelo foi desenvolvida por Molinas e Yang, em 1985, para simular as condições de escoamento de uma maneira semi-bidimensional e a mudança da geometria do canal de uma maneira semi-tridimensional baseado no conceito de tubos de fluxo. Após uma série de revisões e melhorias, Simões e Yang (2002) desenvolveram o GSTARS 3.0, expandido a capacidade para transporte de sedimentos coesivos e não coesivos em rios e reservatórios.

GSTARS4 é baseado na versão 3 e no SRH-1D (*Sediment and River Hydraulics – One dimension*) (Huang e Greimann, 2007), do qual adotou o método computacional para a solução de fluxos instáveis, com algumas modificações (YANG; AHN, 2011). Para os demais cálculos, como fluxos estáveis e quase-estáveis e mudanças no canal, ele utiliza basicamente os mesmos métodos da versão 3, com algumas revisões.

O modelo GSTARS4 foi aplicado com sucesso na modelagem de *flushing* do lago Lewis e Clark, localizado no rio Missouri. O reservatório é formado pela barragem Gavins Point, na Dakota do Sul (EUA). O delta do reservatório cresceu desde o fechamento da barragem, em 1955, resultando numa redução de 21% do volume. Assim, o modelo foi utilizado a fim de avaliar a aplicação do *flushing* para retirada dos sedimentos. Foram feitas simulações considerando um escoamento quase permanente e não permanente, constatando-se que, neste caso, os resultados não sofriam alterações significativas. Quatro cenários foram analisados, em que os resultados demonstraram que comportas com crista mais baixa aumentam a eficiência do *flushing* (AHN et al., 2013).

3.5.4. MIKE

A série de modelos MIKE 11, MIKE 21 e MIKE 3 desenvolvidos pelo *Danish Hydraulic Institute* (DHI), também pode ser usada para a simulação de sedimentos em reservatórios. O DHI desenvolveu este conjunto de modelos para a simulação de processos de reservatórios visando melhorar a gestão da sedimentação de reservatórios de todos os tamanhos e formas. Estes modelos podem representar reservatórios que vão desde pequenos reservatórios em regimes de rios até grandes reservatórios de armazenamento, com praticamente qualquer configuração de comportas, vertedouros e entradas. Eles permitem testar configurações alternativas e, assim, contribuir eficazmente para a otimização do projeto e operações. As principais características de cada um destes modelos são:

- MIKE 11 - modelo unidimensional (1D) para a simulação de transporte de carga de finos e em suspensão em rios e corpos de água similares. É aplicável a reservatórios longos e estreitos.
- MIKE 21 - um modelo bidimensional (2D, profundidade integrada) para a simulação de sedimentos e morfologia em águas rasas. Principalmente aplicável em reservatórios rasos.
- MIKE 3 - um modelo tridimensional (3D) para simulação de transporte de sedimentos em todos os tipos de massas de água, incluindo reservatórios de armazenamento profundos.

Um exemplo de aplicação é o trabalho realizado no rio Karun, no Irã, em que foram avaliadas e comparadas, entre os modelos HEC-RAS e Mike-11, as mudanças de seções a partir da altura do leito (HAGHIABI; ZAREDEHDASHT, 2012).

3.5.5. DELFT3D

Delft3D é um modelo bi e/ou tridimensional desenvolvido para estudos hidrodinâmicos, de transporte de sedimentos e morfologia, e qualidade da água, desenvolvido pela Deltares, instituto de pesquisas holandês. Este é um software livre, composto por diferentes módulos: hidrodinâmico (FLOW), ondas (WAVE), morfológico (MOR), qualidade da água (WAQ), ecologia (ECO), entre outros, com capacidade de interação entre processos. Os três primeiros módulos citados possuem o código livre desde 2011. Este modelo foi utilizado para os estudos hidrossedimentológicos realizados no Lago Guaíba (SEMA, 2018), em Porto Alegre, e vem recebendo atenção em projetos de engenharia local. Este foi o modelo escolhido para a realização deste estudo, sendo mais bem detalhado a seguir.

O módulo FLOW é o principal módulo do modelo Delft3D, sendo este um módulo multidimensional (2D ou 3D) hidrodinâmico e de transporte, capaz de calcular escoamentos instáveis e fenômenos de transporte, resultantes de efeitos de maré ou forçantes meteorológicas, em um grid retangular ou curvilíneo. Na direção vertical, ele oferece dois sistemas de coordenadas: sistema de coordenadas σ e o sistema cartesiano Z. Se o fluido é verticalmente homogêneo, pode-se utilizar a simulação 2D. A modelagem tridimensional é de maior interesse em problemas de transportes, onde o escoamento apresenta significativa variação vertical.

Este módulo resolve as equações de Navier-Stokes, em duas ou três dimensões, e de conservação de massa, para fluidos incompressíveis. Para os processos de transporte de sedimentos, resolve também a equação do transporte de massa para cada constituinte. Para os cálculos, são assumidas as seguintes condições (DELTARES, 2014):

- No sistema de coordenadas σ , a profundidade é assumidamente muito menor do que a escala horizontal do problema. Assim, as equações de águas rasas são válidas, significando que a equação de momento vertical é reduzida a relação de pressão hidrostática. Desta forma, as acelerações verticais são pequenas comparadas a aceleração da gravidade, não sendo levadas em consideração. Quando esta suposição não é válida, o módulo possui uma opção chamada “pressão não-hidrostática” no sistema cartesiano Z.
- O efeito da densidade variável só é levado em consideração no termo de pressão (aproximação de Boussinesq).
- As equações do Delft3D-FLOW são capazes de resolver escalas turbulentas (simulação de grande porte), mas geralmente os grids são muito grosseiros para resolver as flutuações. Portanto, as equações básicas são as médias de Reynolds (RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes), introduzindo as chamadas tensões de Reynolds, que estão relacionadas com as quantidades de fluxo médias de Reynolds por um submodelo de turbulência fechado.

Equações Governantes

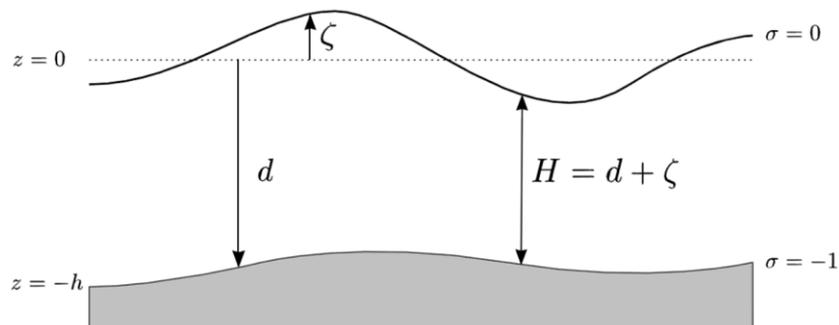
O Delft3D-FLOW resolve as equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis, sob as aproximações de águas rasas e Boussinesq. Na modelagem tridimensional, as velocidades verticais são calculadas pela equação da continuidade (2). O conjunto de equações diferenciais

parciais, combinado com as condições iniciais e de contorno apropriadas é resolvido em um grid de diferenças finitas.

Na direção horizontal, dois sistemas de coordenadas ortogonais curvilíneos são aceitos: cartesiano (ξ, η) e esférico (λ, ϕ) . Na direção vertical, são oferecidos os sistemas de coordenadas σ e cartesiano Z .

No sistema de coordenadas σ , o grid vertical consiste em camadas ligadas por dois planos σ , que não são exatamente horizontais, e sim seguem a topografia do fundo e a superfície livre, permitindo uma representação suavizada (Figura 14). O número de camadas em toda a área horizontal simulada é constante, independentemente do nível d'água, mas a distribuição da espessura de cada camada é geralmente não uniforme. Isso permite uma resolução maior em zonas de interesse, como a zona próxima ao leito, para simulações de transporte de sedimentos.

Figura 14. Definição de nível d'água (ζ), profundidade (h) e profundidade total (H). Adaptado de DELTARES, 2014.



A coordenada σ é definida como:

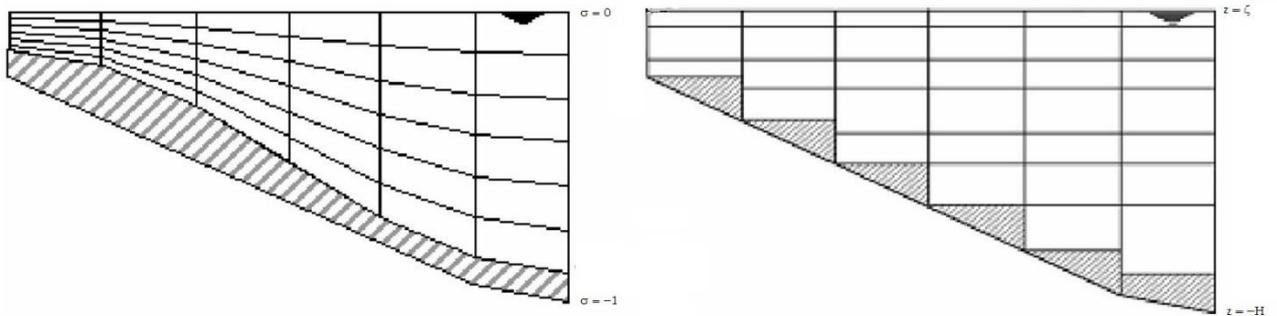
$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H} \quad (1)$$

Onde z é a coordenada vertical no espaço físico, em m; ζ é a cota da superfície livre acima do plano de referência ($z=0$), em m; d é a profundidade abaixo do plano de referência, em m; H é a profundidade total da água, em m.

O sistema de coordenadas Z tem linhas horizontais que são quase paralelas com interfaces de densidade em regiões de encostas íngremes. O fundo (e a superfície livre) geralmente não é

uma linha coordenada e é representado como uma escada. A Figura 15 exemplifica a diferença entre os dois sistemas.

Figura 15. Sistemas de coordenadas σ (esquerda) e Z (direita). Adaptado de DELTARES, 2014.



Para um fluido incompressível de superfície livre, as equações hidrodinâmicas governantes têm relação com as leis de conservação de massa (equação da continuidade (2)) e de momento (3), (4) e (5), que podem ser escritas como (DELTARES, 2014; BERNARDO, 2013).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + v_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + v_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho(x, y, z)g \quad (5)$$

Onde x, y, z são coordenadas espaciais; u, v, w são componentes de velocidade nas direções x, y e z , respectivamente, em m.s^{-1} ; t é o tempo, em s ; f é o parâmetro de Coriolis ($f=2\Omega \sin\Theta$), onde Ω é a taxa de rotação e Θ é a latitude; g é a aceleração da gravidade, em m.s^{-2} ; H é a altura da coluna d'água, em m ; ρ é a massa específica do fluido, em kg.m^{-3} ; P é a pressão hidrostática, em N.m^{-2} ; v_H e v_V são a viscosidade turbulenta na horizontal e na vertical, respectivamente.

O módulo de transporte de sedimentos e morfologia suporta tanto transporte de sedimentos de fundo (não coesivos) quanto em suspensão (coesivos e não coesivos). Para o cálculo do transporte de sedimentos em suspensão é utilizada a equação de advecção-difusão (balanço de massa), resolvida em três dimensões (6) (DELTARES, 2014; BERNARDO, 2013).

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{s,x} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{s,y} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{s,z} \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \lambda C + S \end{aligned} \quad (6)$$

Onde x, y, z são as coordenadas espaciais; t é o tempo; u, v, w são os componentes da velocidade nas direções x, y, z , respectivamente, em $m.s^{-1}$; C é a concentração em massa da fração de sedimento, em $kg.m^{-3}$; w_s é a velocidade de sedimentação da fração de sedimento, em $m.s^{-1}$; $\varepsilon_{s,x}, \varepsilon_{s,y}$ e $\varepsilon_{s,z}$ são os coeficientes de difusão da fração de sedimento, em $m^2.s^{-1}$; S é o termo fonte e sumidouro por unidade de área, devido à entrada ou saída do fluxo;

Em misturas de alta concentração, a velocidade de sedimentação de uma partícula é reduzida devido à presença de outras partículas. Levando isso em consideração, o modelo considera a velocidade de queda da mistura fluido-sedimento como função da concentração de sedimentos e da velocidade de queda não afetada (DELTARES, 2014). A equação (7) representa este cálculo para um sedimento l .

$$w_s^{(l)} = \left(1 - \frac{c_s^{tot}}{C_{soil}} \right)^5 w_{s,0}^{(l)} \quad (7)$$

Em que C_{soil} é a densidade de referência (dado de entrada); $w_{s,0}$ é a velocidade de sedimentação específica para a fração de sedimentos l ; c_s^{tot} é a concentração total, a partir da massa total de sedimentos.

Para sedimentos não coesivos (areia), é utilizado o método de Van Rijn (1993) para o cálculo de $w_{s,0}$, que depende do diâmetro do sedimento em suspensão. Já para sedimentos coesivos, não existe uma formulação interna ao modelo, devendo ser especificada.

Em termos de transporte dispersivo, os coeficientes de difusão para os sedimentos dependem das características do escoamento, como o nível de turbulência, e das influências de ondulações no fundo, devido ao cisalhamento. O Delft3D-FLOW tem implementado quatro submodelos de turbulência para determinação de v_v e D_v :

- coeficiente constante;
- algebraic Eddy Viscosity closure model (AEM);
- k-L (1 equação);
- k- ε (2 equações).

Sedimentos coesivos e não coesivos têm comportamentos diferentes para os processos de erosão e sedimentação. Esses processos são dependentes de níveis energéticos, que são funções do volume de água e da descarga líquida. A probabilidade de ocorrer erosão no leito aumenta quanto mais energético é o fluxo de água. Contudo, a perda temporária de energia estimula a sedimentação de parte do material em suspensão. Para frações de sedimentos coesivos, o modelo utiliza as formulações de Partheniades-Krone, apresentadas em (8), (9) e (10) para fração de sedimento l , para calcular os fluxos entre o rio e o leito (DELTAIRES, 2014).

$$E^l = M^l S(\tau_{cw}, \tau_{cr,e}^l) \quad (8)$$

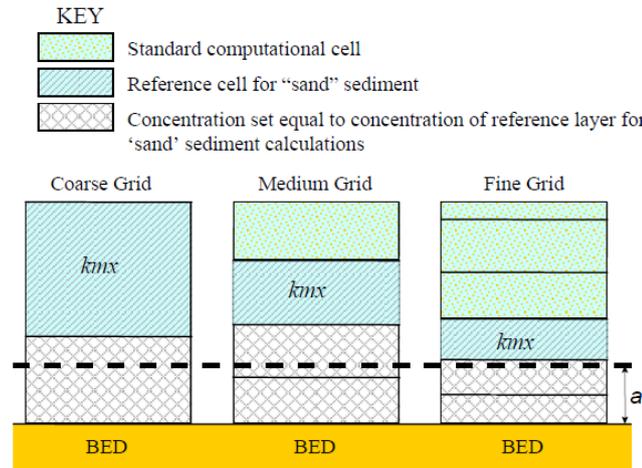
$$D^l = w_s^l c_b^l S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d}^l) \quad (9)$$

$$c_b^l = c^l \left(z = \frac{\Delta z_b}{2}, t \right) \quad (10)$$

Onde E_l é o fluxo erosivo, em $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$; M_l é o parâmetro erosivo, em $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, definido pelo usuário; $S(\tau_{cw}, \tau_{cr,e}^l)$ é uma função do passo de erosão; D_l é fluxo de deposição, em $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$; w_s^l é a velocidade de sedimentação, em m.s^{-1} ; c_b^l é a concentração média de sedimento próximo à camada de fundo; $S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d}^l)$ é uma função do passo de deposição; τ_{cw} é a tensão média de cisalhamento no leito devido a correntes e ondas; $\tau_{cr,e}^l$ é a tensão de cisalhamento crítica para a erosão, em N.m^{-2} ; $\tau_{cr,d}^l$ é a tensão de cisalhamento crítica para a deposição, em N.m^{-2} .

Para sedimentos não coesivos, a transferência de sedimentos entre o leito e o escoamento é modelado utilizando os termos fonte e sumidouro (equação (13), que agem a uma camada próxima ao fundo, mas completamente acima da altura de referência de Van Rijn. Esta camada é identificada como camada de referência (kmx), melhor apresentada na Figura 16. A concentração de sedimentos de camadas abaixo da camada de referência é rapidamente ajustada para a mesma concentração de referência, que é calculada conforme a equação (12). A fim de quantificar a massa de sedimentos que será transportada por suspensão e a que será transportada no leito, a concentração do fundo da camada de referência deve sofrer uma aproximação.

Figura 16. Seleção da camada kmx, onde a é a altura de referência de Van Rijn. Adaptada de (DELTA RES, 2014).



$$c_a^{(l)} = 0,015 \rho_s^{(l)} \frac{D_{50}^{(l)} (T_a^{(l)})^{1,5}}{a (D_*^{(l)})^{0,3}} \quad (11)$$

$$c_{kmx(bot)}^{(l)} = c_a^{(l)} \left(\frac{a(h - z_{kmx(bot)})}{z_{kmx(bot)}(h - a)} \right)^{A^{(l)}} \quad (12)$$

$$E^{(l)} \approx \frac{\alpha_2^{(l)} \varepsilon_s^{(l)} c_a^{(l)}}{\Delta z} - \frac{\alpha_2^{(l)} \varepsilon_s^{(l)} c_{kmx}^{(l)}}{\Delta z} \quad (13)$$

Onde $c_a^{(l)}$ é a concentração de referência, na altura de referência a ; D_{50} é o diâmetro médio das partículas da fração de sedimentos (l); D_* é diâmetro adimensional da partícula, T_a é a tensão de cisalhamento adimensional; c_{kmx} é a concentração no centro da camada kmx, h é a altura da coluna d'água; z é a elevação acima do nível do leito; α é o fator de correção da concentração de sedimento; ε é o coeficiente de difusão do sedimento;

O transporte de fundo para sedimentos não coesivos é calculado da seguinte forma: inicialmente, a magnitude e a direção do transporte são computadas no centro das células, utilizando a fórmula selecionada pelo usuário (a fórmula padrão é a de Van Rijn, 1993); em seguida, as taxas de transporte nas interfaces da célula são determinadas, corrigidas para o efeito da declividade, composição e disponibilidade de sedimentos do leito. As fórmulas para transporte de sedimentos não coesivos disponíveis no modelo estão elencadas na Tabela 1. O modelo também oferece a opção de implementar uma fórmula definida pelo próprio usuário.

Tabela 1. Fórmulas de transporte de sedimentos não coesivos suportada pelo modelo Delft3D-FLOW. Adaptado de (DELTA RES, 2014).

Fórmula	Transporte
Van Rijn (1993)	Leito e suspensão
Engelund-Hansen (1967)	Total*
Meyer-Peter-Muller (1948)	Total*
Fórmula geral	Total*
Bijker (1971)	Leito e suspensão
Van Rijn (1984)	Leito e suspensão
Soulsby/Van Rijn	Leito e suspensão
Soulsby	Leito e suspensão
Ashida-Michiue (1974)	Total*
Wilcock-Crowe (2003)	Leito
Gaeuman et al. (2009) calibração em laboratório	Leito
Gaeuman et al. (2009) calibração do rio Trinity	Leito

*formulação simplificada.

A seguir estão detalhadas as equações utilizadas nesta pesquisa.

Van Rijn (1993)

Segundo Van Rijn (1984), conforme as condições de escoamento e do tamanho e composição das partículas, os sedimentos serão transportados como carga de fundo ou em suspensão. Não existe uma divisão definida em condições reais, de forma que se deve determinar uma camada para possibilitar a representação matemática deste transporte de fundo.

Pode-se dividir em três tipos diferentes de movimentos das partículas. Quando a velocidade de cisalhamento supera o valor crítico de início de movimento, ocorrem os movimentos do tipo rolamento e salto. Neste método, é calculada a altura do máximo salto teórico e todas as partículas com altura maior do que esta são consideradas em transporte de suspensão. Aqui, seguem-se as definições de Bagnold (1996), em que o movimento das partículas do leito é dominado pelas forças gravitacionais, considerando-se os movimentos devido à turbulência menos importantes.

Esta formulação distingue os transportes de leito e em suspensão com base numa altura de referência, na qual é imposta uma concentração de referência. Assim, considera-se o transporte de leito ocorrendo abaixo desta e, acima, o transporte suspenso.

Esta concentração é calculada segundo a equação(11), apresentada no item 3.6.5.

Engelund-Hansen (1967)

Esta formulação, citada por Carvalho (2008), usa o conceito de potência da corrente e o princípio da similaridade. É frequentemente usada para cálculo de transporte de sedimentos em rios e estuários (DELTARES, 2014). A equação fica:

$$S = \frac{0,05\alpha q^5}{\sqrt{g}C^3\Delta^2D_{50}} \quad (14)$$

Onde q é a magnitude da velocidade do escoamento; Δ é a densidade relativa $(\rho_s - \rho_w)/\rho_w$, C é o coeficiente de Chèzy, α é o parâmetro de calibração. A taxa de transporte é imposta como transporte de leito devido à corrente (S_{bc}).

Meyer-Peter-Muller (1948)

Para o desenvolvimento desta formulação, foram feitos experimentos com partículas de areia de tamanho uniforme, de diferentes tamanhos, cascalho natural, lignita e barita. Duas hipóteses norteiam esta fórmula: i) no transporte de sedimentos, a declividade da linha de energia é característica da interação entre o transporte sólido e o líquido, de forma que uma porção da energia é consumida para o transporte sólido, e o restante para o líquido; ii) o início do movimento e o transporte de sedimentos são governados pelos mesmos fenômenos.

Esta equação (15) é um pouco mais sofisticada que a de Engelund-Hansen, incluindo a tensão de cisalhamento crítica para o transporte (Deltares, 2014).

$$S = 8\alpha D_{50}\sqrt{\Delta g D_{50}}(\mu\theta - \xi\theta_{cr})^{3/2} \quad (15)$$

Em que α é o coeficiente de calibração; Δ é a densidade relativa $(\rho_s - \rho_w)/\rho_w$; μ é o fator de eficiência; θ é o parâmetro crítico de mobilidade ($=0,047$), ξ é o fator “*hiding and exposure*” para a fração de sedimento considerada.

3.6. Analogia com estudos de rompimento de barragem

A ruptura de grandes barragens tem diversas consequências para o meio ambiente e para a população. Alguns países exigem estudos com a finalidade de elaborar um Plano de Ações Emergenciais (PAE), que deve conter uma série de estudos, como a identificação e análise de possíveis situações de emergência, os procedimentos para identificação e notificação de mau funcionamento ou potencial ruptura, os procedimentos de correção que devem ser adotados em situações de emergência, estratégia maneira de divulgar e alertar as comunidades

potencialmente afetadas, entre outros, na tentativa de minimizar os danos causados em caso de ruptura (LAURIANO et al., 2009).

No Brasil, em 2010 foi instituída uma lei que determinou que aspectos que antes eram avaliados apenas por experiência devem ser afirmados e institucionalizados por lei federal. Entre eles, está a criação do Plano de Segurança de Barragens, que engloba o PAE para barragens que apresentem risco elevado. Para este plano, é necessária a realização de estudos (ou *Dam Break*), baseados em modelos, dados disponíveis, equações empíricas e conceituais e cenários, a fim de definir determinados parâmetros específicos do dano causado a jusante em caso de rompimento (FERLA, 2018).

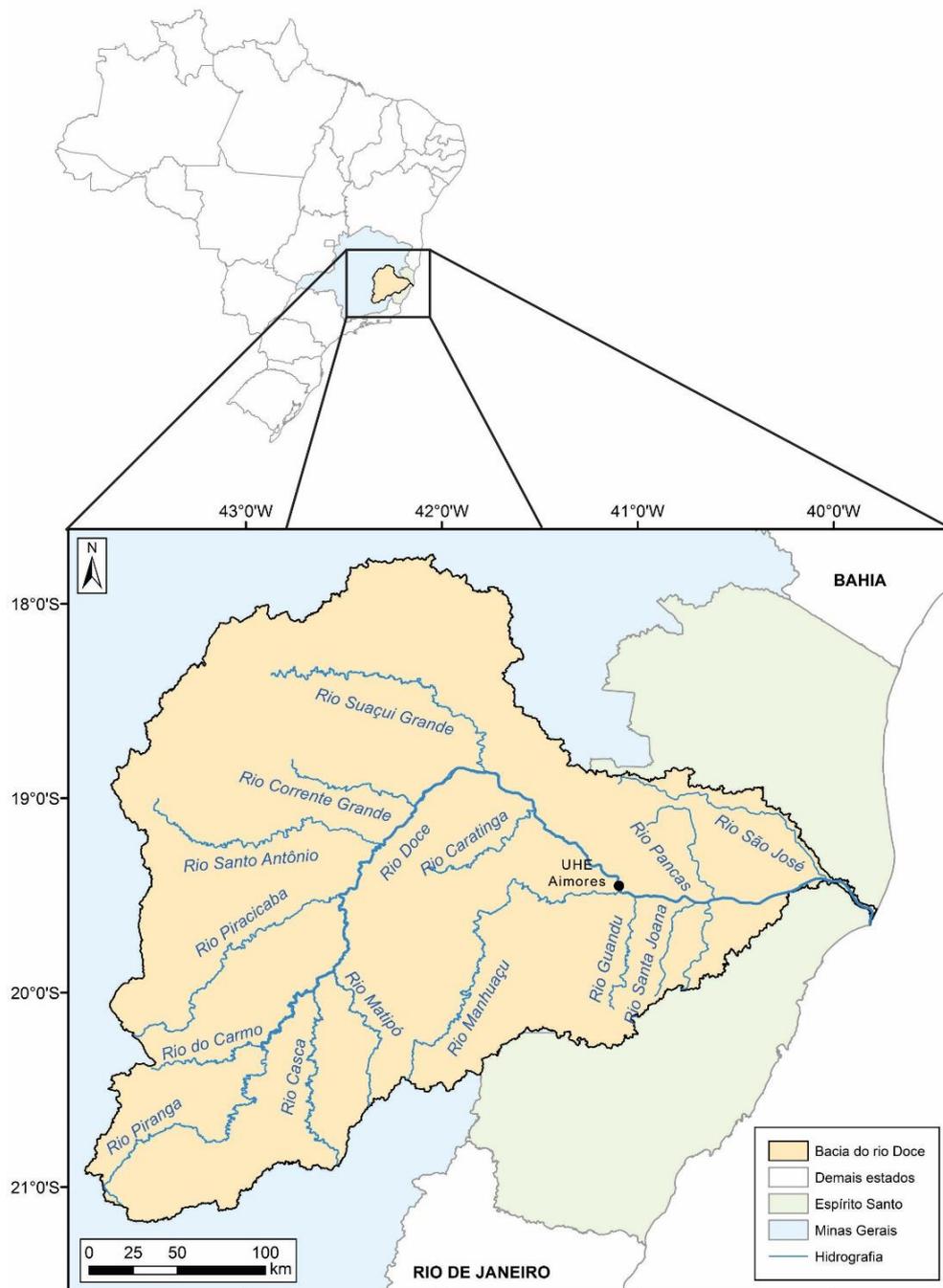
Na mesma linha, estas barragens têm sofrido assoreamento, e estratégias de limpeza dos sedimentos têm sido desenvolvidas e adotadas. Para licenciar ou liberar este tipo de operação, e até prever a sua eficácia, é importante um estudo de engenharia, que não necessariamente é factível de ser validado, assim como um estudo de rompimento de barragem. Estes estudos podem ser feitos para problemas de assoreamento já existentes, bem como na fase de projetos, a fim de avaliar estruturas como descarregadores de fundo, seu melhor posicionamento, a técnica mais eficaz para o reservatório, entre outros. Nesta linha, uma solução é a modelagem que utiliza também modelos computacionais, dados disponíveis, equações empíricas e conceituais e cenários.

Assim, estudos científicos de experimentação relacionados a métodos numéricos e limpeza de sedimentos em barragens são importantes para embasar escolhas em projetos de Engenharia. Esta pesquisa se enquadra nesta linha de estudo, onde foram simulados diferentes cenários de operações de gestão de sedimentos, considerando variações na parametrização e entre as técnicas.

3.7. Estudo de caso

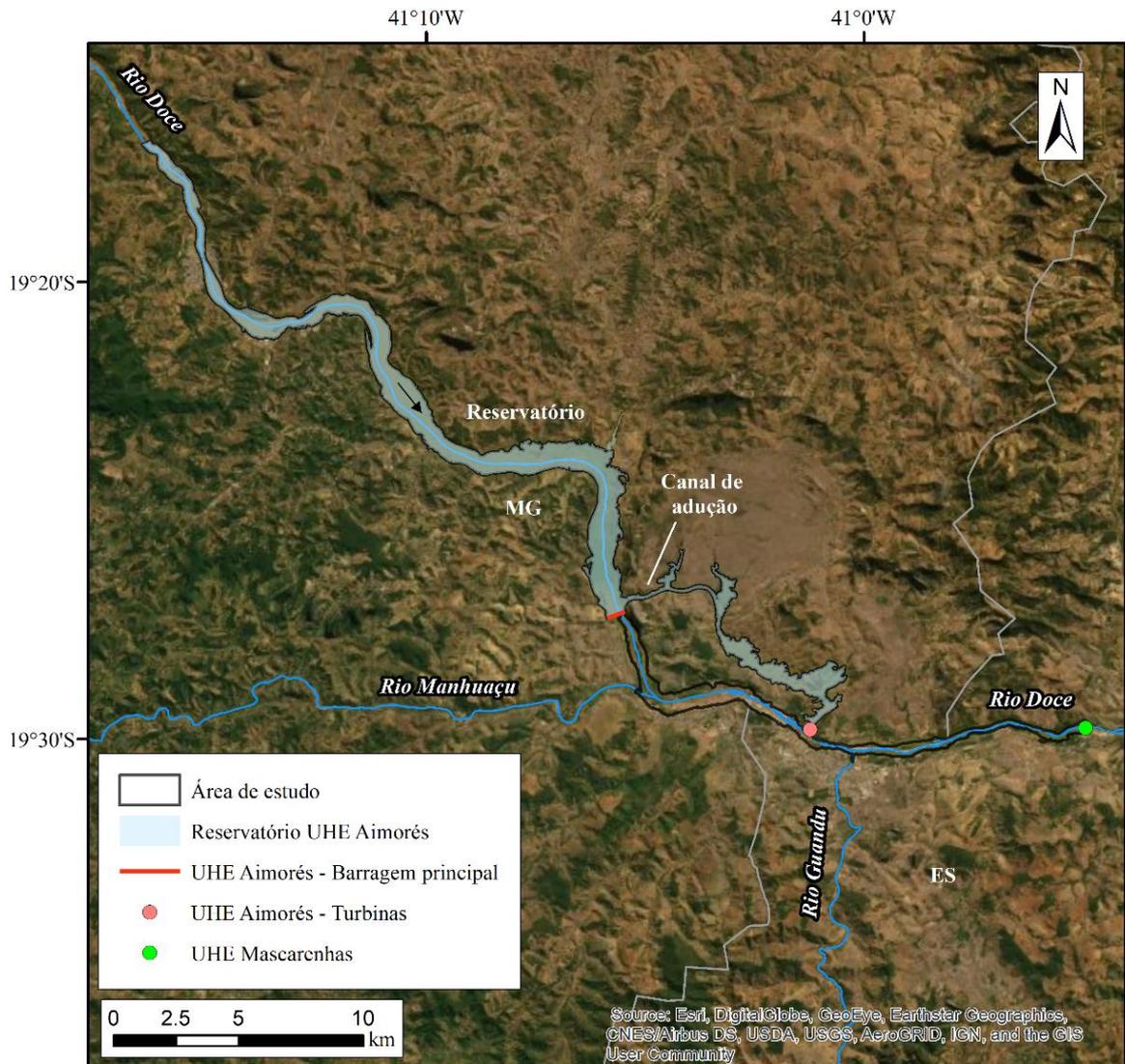
Na presente pesquisa, foi utilizado como estudo de caso o reservatório do empreendimento hidrelétrico de Aimorés, inserido na bacia hidrográfica do rio Doce, localizada nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo (Figura 17). Esta bacia situa-se na região hidrográfica do Atlântico Sudeste, com uma área de drenagem de cerca de 86.700 km². Este reservatório foi escolhido devido ao seu histórico problema com acúmulo de sedimentos, de forma que já foram realizadas operações de remoção de sedimentos.

Figura 17. Localização da bacia do rio Doce, onde está localizada a UHE Aimorés.



A usina de Aimorés está localizada entre o médio e baixo rio Doce (Figura 18), na divisa entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, abrangendo quatro municípios: Aimorés, Itueta e Resplendor (MG) e Baixo Guandu (ES). As coordenadas da barragem principal são $19^{\circ}27'23''\text{S}$ e $41^{\circ}5'41''\text{O}$. Possui um potencial de geração de 330 MW, com 172 MW de energia assegurada em operação (Aliança Energia, 2015).

Figura 18. Localização da UHE Aimorés.



O projeto da usina de Aimorés é composto por duas partes, segundo o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB, 2009): uma barragem principal de terra, com 18 m de altura e 565 m de comprimento a partir da margem direita, contígua ao sistema extravasor, composto por 10 comportas de fundo, que se estende até a margem esquerda, na montanha Pedra Lorena; um circuito de adução, com um canal escavado na margem esquerda de 12 km, com uma casa de

força ao final, abrigando três turbinas do tipo Kaplan. A ficha técnica da usina está apresentada na Tabela 2. A curva cota x volume do reservatório é apresentada na Figura 19.

Tabela 2. Ficha técnica da UHE Aimorés (CBDB, 2009).

Reservatório		Dados Gerais	
Área El. 90,0 m	30,9 km ²	Área de contribuição do reservatório	62.167 km ²
Área El. 92,0 m	36,6 km ²	Vazão máxima observada (Fev/79) – Período de 1931-1994	4.284 m ³ s ⁻¹
Comprimento	30 km	Vazão mínima observada (Out/56) – Período de 1931-1994	162 m ³ s ⁻¹
Volume total El. 90,0 m	184,6 x 10 ⁶ m ³	Precipitação média anual no reservatório	1.163 mm
NA máximo normal	90,0 m	Evaporação média anual no reservatório	1.224 mm
NA máximo maximorum	92,0 m	Vazão média de longo período (1931-1996)	292 m ³ s ⁻¹
Profundidade média	5,0 m	Comportas	
Profundidade máxima	16,0 m	Número de comportas	10
		Largura	13,5 m
		Altura	15,3 m
		Cota soleira	76 m
		Vertimento máximo comportas (cota 90 m)	13.930 m ³ .s ⁻¹
		Defluência máxima total (cota = 90 m)	15.294 m ³ .s ⁻¹
		Tipo de comporta	Radial
		Funcionamento	Hidráulica

Figura 19. Curva cota x volume do reservatório da UHE Aimorés, dezembro de 2016 (ONS, 2019)

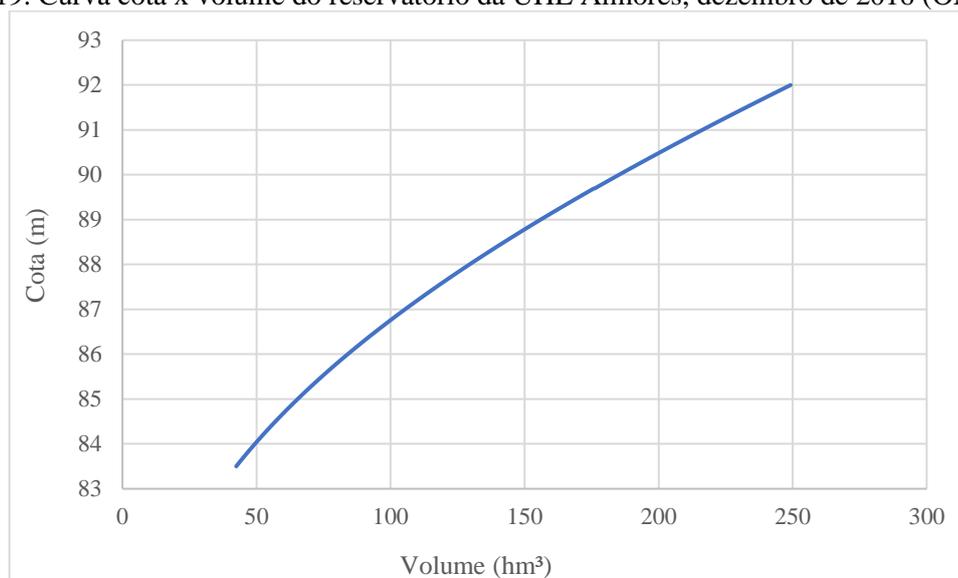


Figura 20. Reservatório da UHE Aimorés, barragem principal.



Fonte: Companhia Vale do rio Doce.

Figura 21. Canal de adução da UHE Aimorés.



Fonte: Companhia Vale do rio Doce.

Figura 22. Casa de força da UHE Aimorés.



Fonte: Companhia Vale do rio Doce.

Este empreendimento possui uma importante representatividade do problema. O transporte de sedimentos da bacia hidrográfica do rio Doce tem sido elevado ao longo das últimas décadas, decorrente de vários efeitos de uso do solo na bacia hidrográfica que resultam numa carga significativa de material sólido transportado pelo Doce até o Oceano. Para reservatórios como o da UHE Aimorés, o manejo operacional é importante para evitar acumulação adicional de sedimentos e/ou impactos de qualidade da água a jusante da barragem.

Em 2008, visando recuperar parte de seu volume, foi realizada a operação de *flushing* no reservatório. O rebaixamento (aproximadamente 4 m) ocorreu no período de 25/11/2008 a 06/12/2008, enquanto o *flushing* ocorreu no período de 16/12 a 25/12, cerca de dez dias de espera, consideradamente elevado para uma hidrelétrica parar seu funcionamento. A vazão de pico associada a operação foi $3749 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Como resultado, ocorreram remoções de até 2 m de altura em bancos existentes ao longo do reservatório.

Ainda, em 2015 houve o rompimento da barragem de mineração em Mariana (MG), a montante, que alterou as condições de transporte de sedimentos na bacia, na medida que o rompimento produziu 40 milhões de m^3 de sedimentos que foram liberados para jusante, onde parte deste

volume foi transportado até a UHE de Aimorés (Figura 23). O reservatório foi concebido para ser a fio d'água, com potencial pequeno no efeito para montante ou jusante. No entanto, as condições mostraram transformações nos últimos anos, com sedimentação no trecho de montante e conseqüente risco de inundações.

Figura 23. Reservatório da UHE Aimorés, após o rompimento da barragem de rejeitos em Mariana

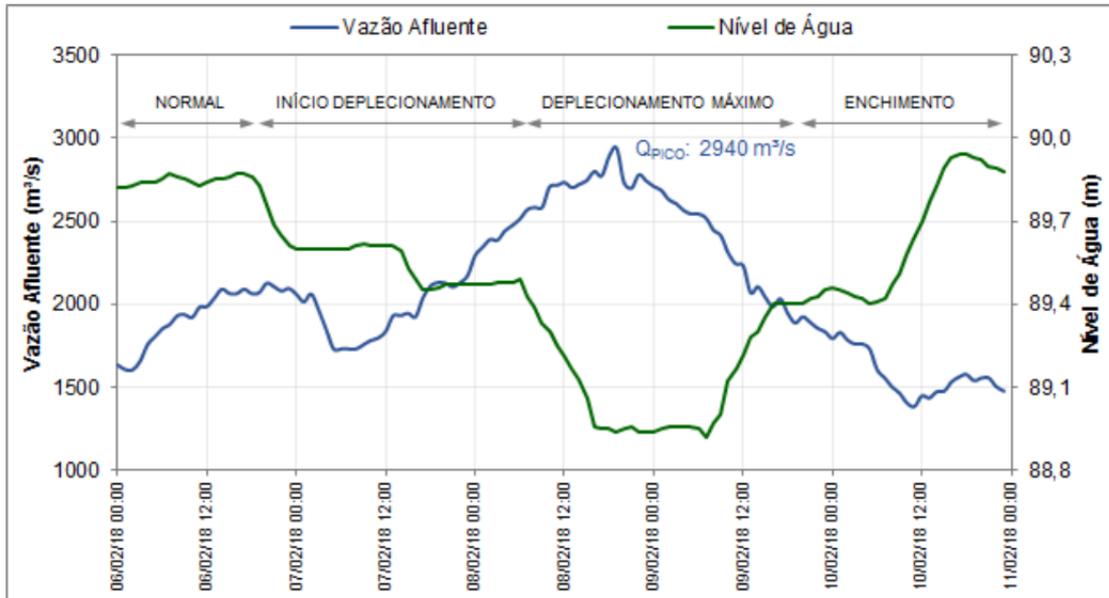


Tendo como premissas a eficiência da operação de *flushing* em 2008, restrições de vazão a jusante e a necessidade de reduzir o tempo de espera para a realização da operação, estudos foram feitos para realizar a operação de *pass-through (sluicing)* em 2018. Com o auxílio do sistema de previsão de vazão por conjunto desenvolvido para a UHE Aimorés (FAN et al., 2015), foi possível realizar a operação com tempo de espera muito reduzido, de modo que o deplecionamento máximo do reservatório foi obtido junto com a vazão de pico (Figura 24).

O acúmulo de sedimentos no reservatório da UHE Aimorés pode produzir efeitos de remanso para montante, afetando com inundações a cidade de Resplendor. De outro lado, um volume significativo de sedimentos pode aumentar a turbidez para jusante da barragem e afetar o abastecimento de cidades que utilizem o rio para captação de água. Estes objetivos conflitantes necessitam ser atendidos com base num conhecimento adequado do efeito de transporte de sedimentos pelo reservatório de forma a transportar os sedimentos para jusante sem

comprometer a sua qualidade da água por meio de ações operacionais baseadas em conhecimento adequado dos processos hidrossedimentológicos.

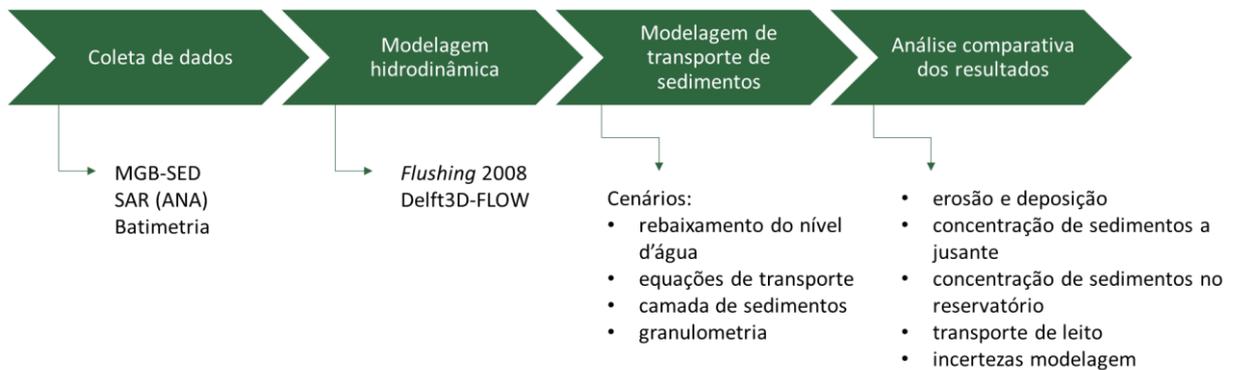
Figura 24. Vazão x deplecionamento do reservatório da UHE Aimorés durante a operação de *pass-through* realizada em fevereiro de 2018. (CARVALHO, 2018)



4 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a sequência de etapas aplicada na realização deste estudo. Nos itens a seguir, as etapas são explicadas com detalhes. A Figura 25 apresenta o fluxograma da metodologia seguida na realização do estudo e obtenção dos resultados.

Figura 25. Fluxograma da metodologia.



4.1. Coleta de dados

Inicialmente foi realizada a coleta de dados de terreno e operação do reservatório. Foram utilizados dados livremente disponíveis, provenientes da ANA e de modelagens locais anteriores, sendo descritos a seguir.

4.1.1. Batimetria do reservatório

Os dados utilizados foram obtidos de duas medições batimétricas diferentes: uma do reservatório da UHE Aimorés, de junho de 2015 (ANA, 2019), outra do reservatório da UHE Mascarenhas (RURALTECH, 2016). A batimetria do reservatório de Aimorés foi disponibilizada em formato MDT interpolado, com resolução de 5 m, enquanto a de Mascarenhas foi disponibilizada em formato de curvas de nível digitalizadas.

4.1.2. Vazão, nível e concentração de sedimentos

Os dados de vazão foram obtidos de duas fontes. As séries temporais dos afluentes foram obtidas do modelo de Fagundes (2018), que utilizou o MGB-SED para desenvolver o modelo hidrossedimentológico do rio Doce. Este modelo é resultado do acoplamento de um modelo de erosão e transporte de sedimentos em canal (BUARQUE, 2015) ao modelo hidrológico desenvolvido por Collischonn, em 2001, posteriormente modificado por Paiva (2009), MGB (Modelo de Grandes Bacias).

Em 2018, Fagundes aplicou o modelo para a bacia do rio Doce, utilizando dados *in situ* e de sensoriamento remoto, avaliando a dinâmica espaço-temporal dos sedimentos em suspensão na bacia. Em sua aplicação, o modelo apresentou resultados satisfatórios, colaborando para o entendimento da dinâmica de sedimentos na bacia. As séries de concentração de sedimentos também foram obtidas dos resultados desse modelo.

Já as séries de vazões, turbinadas e vertidas, da UHE Aimorés, bem como a série de níveis da UHE Mascarenhas, foram obtidas por meio do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR), da Agência Nacional de Águas (ANA).

4.1.3. Dados sedimentológicos

Para os dados sedimentológicos, foram utilizados dados obtidos na caracterização de sedimentos feita para a operação de *Pass-through* realizada no reservatório da UHE Aimorés no início de 2018 (CARVALHO, 2018). Estes dados foram resultados de medições realizadas com draga Petersen, amostras de superfície, em 9 pontos de um depósito próximo à ponte da cidade de Resplendor (MG). Os dados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Caracterização do sedimento depositado no reservatório da UHE Aimorés. Adaptado de Carvalho, 2018.

Granulometria de Fundo	Faixas granulométricas (mm)	% que passa (acumulada)	% que passa (incremental)	Total (%)
Cascalho médio	> 9,5	100,00	0,00	2,47
Cascalho médio e fino	9,5 e 4	100,00	0,17	
Cascalho muito fino	4 e 2	99,83	2,30	
Areia muito grossa	2 e 1	97,53	11,24	93,30
Areia grossa	1 e 0,5	86,29	31,00	
Areia média	0,5 e 0,25	55,29	32,79	
Areia fina	0,25 e 0,125	22,50	12,80	
Areia muito fina	0,125 e 0,063	9,70	5,43	
Silte/argila	< 0,063	4,27	4,27	4,27

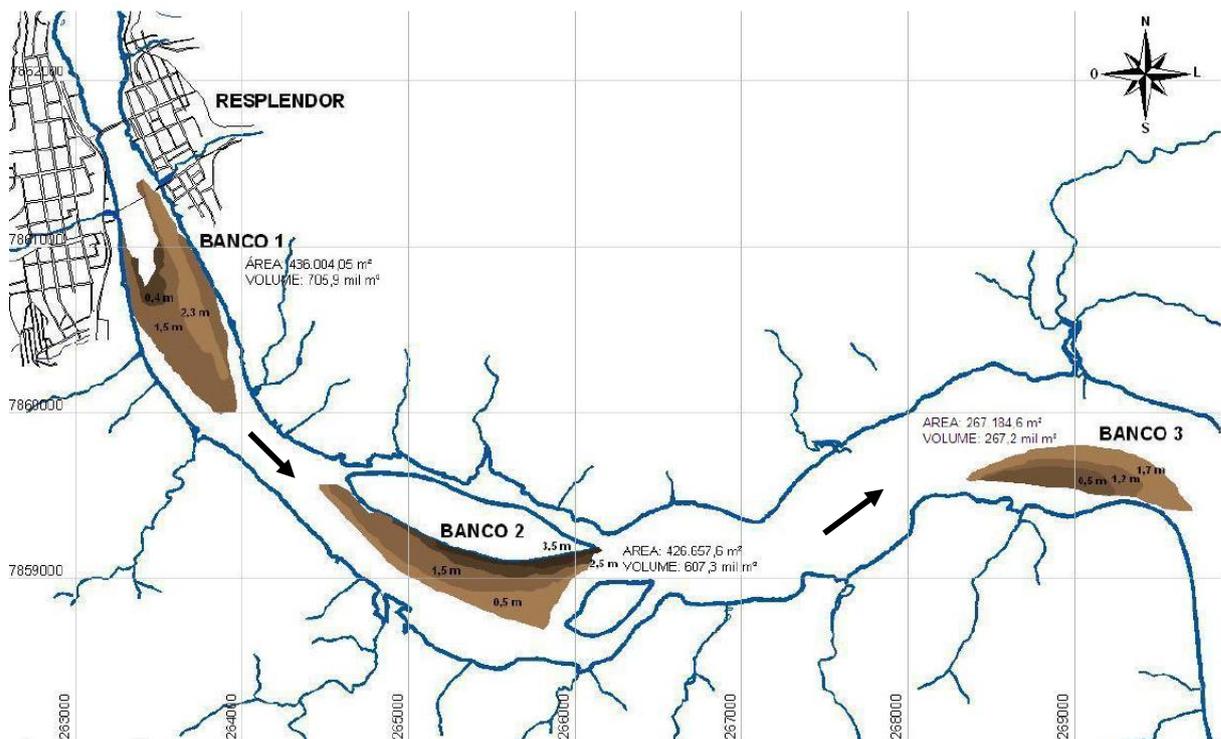
4.1.4. Informações das operações já realizadas no reservatório

Segundo informações de Carvalho (2018), nos anos de 2008 e 2018 foram realizadas duas operações de limpeza de sedimentos no reservatório da UHE Aimorés, *flushing* e *pass-through*, respectivamente. No primeiro, foi realizado um deplecionamento de aproximadamente 4 m, com vazão de pico no período do *flushing* de 3749 m³.s⁻¹. Como resultado, foram observadas

remoções de até 2 m nos bancos 1, 2 e 3 (Figura 26), com depósitos da ordem de 1 m no canal principal. Estes resultados foram utilizados como referência para a definição do cenário base para as análises deste estudo.

Em 2018, para a aplicação do *pass-through*, foi realizado um rebaixamento de aproximadamente 1 m no nível do reservatório. Nesta operação, a vazão de pico foi de $2940 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, havendo remobilização de sedimentos depositados nas zonas de Resplendor e dos bancos, que provavelmente ficaram retidos no interior do reservatório, com baixa liberação de sedimentos a jusante do vertedouro.

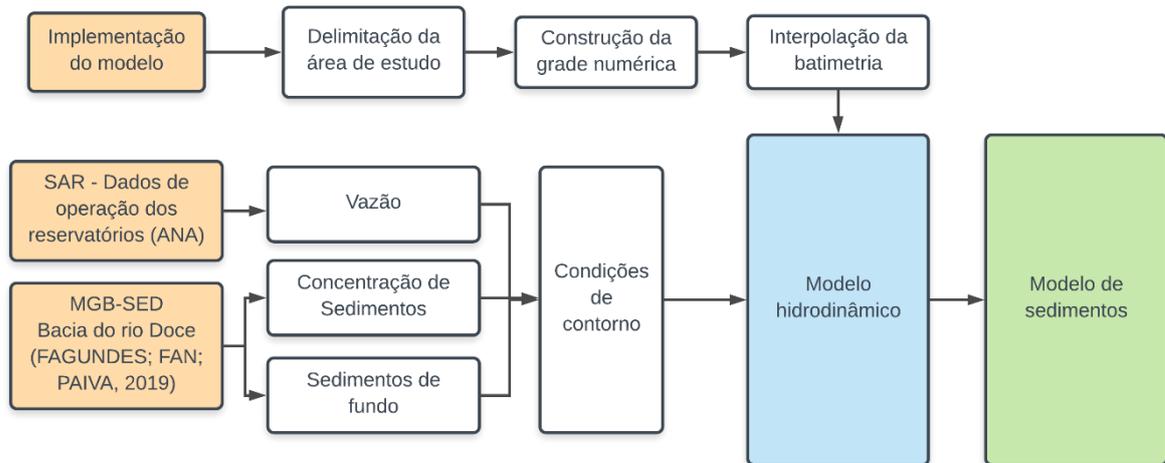
Figura 26. Bancos de sedimentos localizados no reservatório de Aimorés, a montante, próximo ao município de Resplendor (CARVALHO, 2018) .



4.2. Modelagem hidrodinâmica

Primeiramente, foi desenvolvido o modelo hidrodinâmico do reservatório. Para isso, foi utilizado o modelo Delft3D-FLOW, bidimensional, em que modelagem seguiu as etapas da Figura 27. O período simulado foi de 5 meses, de 01 de setembro de 2008 a 31 de janeiro de 2009.

Figura 27. Fluxograma simplificado das etapas da modelagem.



4.2.1. Implementação do modelo

Para a implementação do modelo, é necessária uma sequência de preparação de dados de entrada. Essa sequência de atividades será descrita neste item.

Grade numérica

Este modelo numérico é baseado em diferenças finitas. Para discretizar as equações de águas rasas em três dimensões, a área do modelo é coberta por uma grade numérica curvilínea, assumidamente ortogonal e bem estruturada. As coordenadas desta grade numérica podem ser nos sistemas cartesiano ou esférico, definido pelo usuário.

Para fazer essa discretização, as variáveis do escoamento são arranjadas em locais diferentes dentro da grade, chamando-a de grade numérica escalonada. Os pontos de nível d'água são definidos no centro da célula (continuidade), enquanto as componentes de velocidade são perpendiculares às faces das células em que estão situadas (Arakawa C-grid). Entre as vantagens deste modelo de grade, estão a facilidade de implementar as condições de contorno, além de prevenirem oscilações nos níveis d'água para a solução das equações de águas rasas.

Na direção vertical, existem dois tipos de grades disponíveis: σ e Z , como explicado anteriormente, no item 3.5. Neste estudo, foi realizada apenas a modelagem bidimensional.

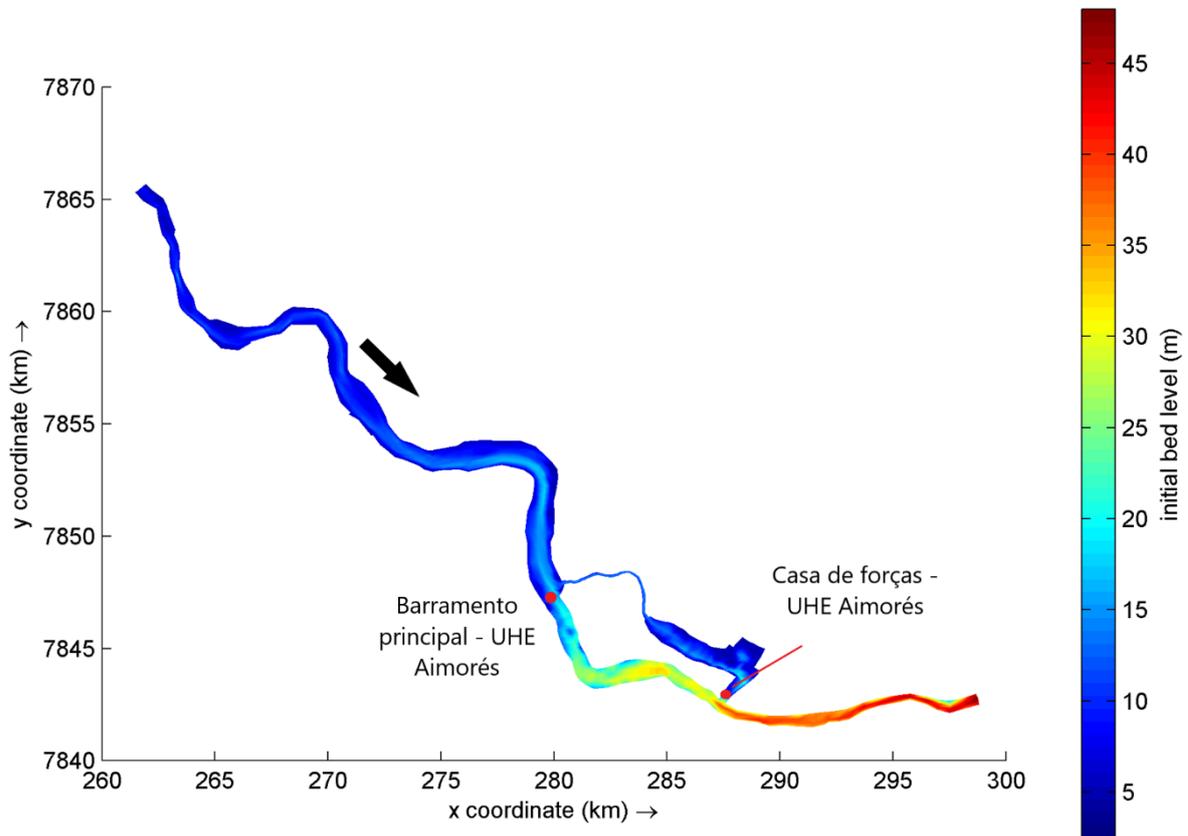
Interpolação da batimetria

Como o modelo usa equações que, de fato, são calculadas sobre as dimensões da grade, os melhores resultados são obtidos se a batimetria do modelo se aproximar da batimetria real em um sentido médio e não em um sentido local. Assim, se existirem mais dados de profundidade

do que da grade, aconselha-se que a atribuição de valores de profundidade se dê por meio de interpolação de médias. Contudo, se existirem menos pontos de profundidade, deve-se realizar uma interpolação triangular.

O software Delft3D-FLOW possui um módulo interno capaz de criar o arquivo de batimetria. Os métodos de interpolação que este módulo comporta são: média das células adjacentes (mais pontos de profundidade), interpolação triangular (menos pontos de profundidade) e difusão interna (preenchimento de células sem informação). Ainda, é possível utilizar métodos diferentes em diferentes partes da área de estudo, não sendo necessário o mesmo método para toda a área. Com os dados obtidos (item 5.1.1), foi feita a interpolação das seções com este módulo. A batimetria interpolada e utilizada é apresentada na Figura 28.

Figura 28. Batimetria interpolada.



4.2.2. Condições de contorno

Para a implementação do modelo, são necessárias as definições das condições iniciais (nível d'água e concentração de sedimentos) e condições de contorno. As condições iniciais podem ser simples, como valores uniformes para toda a área, ou mais complexas, com variações espaciais.

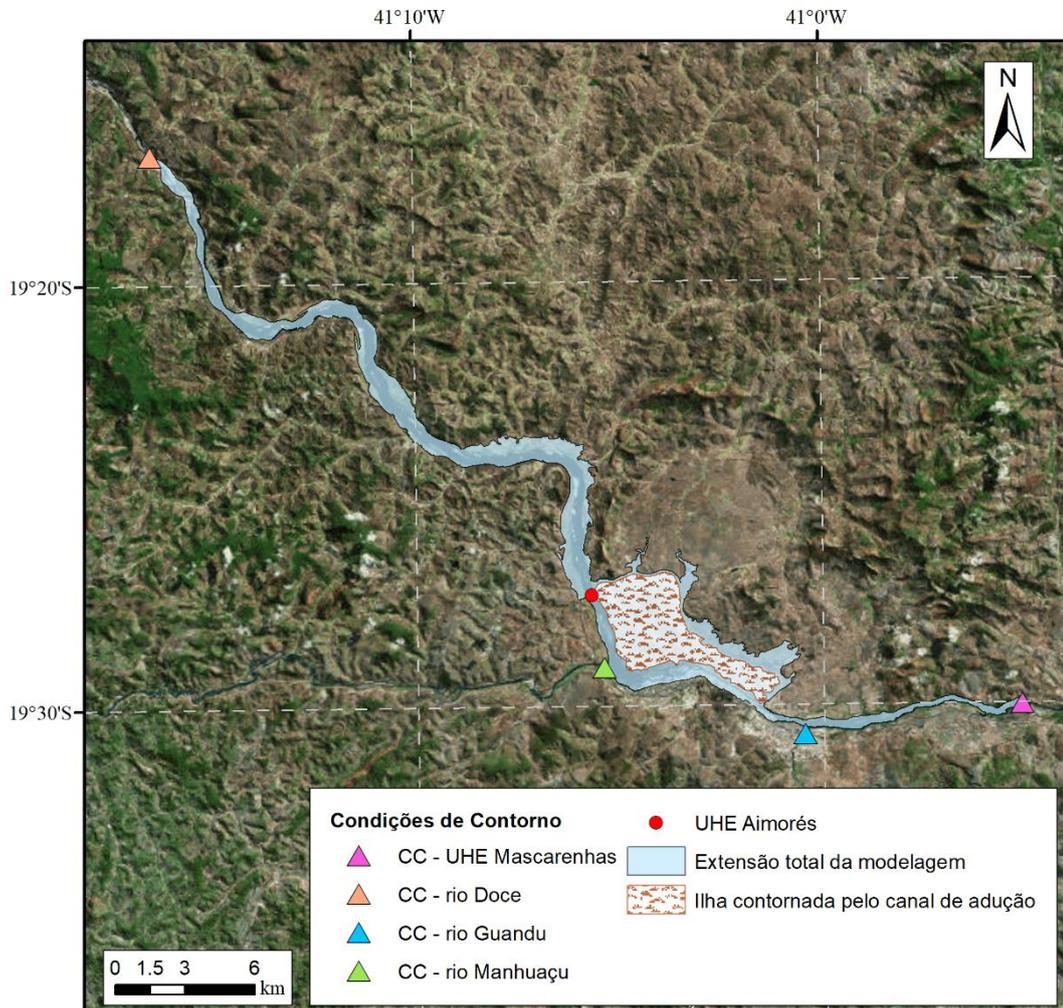
Para o presente estudo, foram definidas três entradas de dados (rio Doce, rio Manhuaçu e rio Guandu), consideradas condições de contorno, e um contorno aberto (UHE Mascarenhas), que será a saída do modelo. Estes contornos podem ser observados na Figura 29.

Como dito anteriormente, foram utilizados os dados de vazão provenientes de duas fontes: SAR e Fagundes (2018). Como forçantes, utilizou-se apenas o vento, desconsiderando-se processos de floculação, temperatura etc., por ser uma modelagem simplificada e por falta de dados disponíveis. Os valores de velocidade e direção do vento foram obtidos do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa, do INMET, da estação Aimorés (Tabela 4).

Tabela 4. Dados da estação meteorológica (INMET, 2019);

Dados	Estação Aimorés - MG
Código	83595
Latitude	-19,4945
Longitude	- 41,0775
Altitude	82,74 m

Figura 29. Localização das condições de contorno do modelo.



4.2.1. Sensibilidade numérica do modelo hidrodinâmico

Para os testes de sensibilidade do modelo, foram realizadas análises com os parâmetros numéricos e físicos. A análise dos primeiros, como passo de tempo e tamanho das células de grade, tem o objetivo de estabelecer parâmetros para a discretização numérica das equações, de modo que os resultados do modelo não sejam afetados por eles (Tobón, 2002; Toro, 1994).

Geralmente, é possível selecionar o passo de tempo com base apenas em argumentos de precisão, a estabilidade não é um problema na maioria dos casos. A precisão é, entre diversos parâmetros, como a reprodução de importantes escalas de comprimento espacial pela grade numérica, dependente do número de *Courant*. O modelo resolve as equações tridimensionais de águas rasas com um sistema de passo de tempo chamado ADI (*Alternating Direction Implicit*), a fim de resolver as equações garantindo estabilidade e precisão (BERNARDO, 2013). Assim, é recomendado que o número de *Courant* (C_r) satisfaça a seguinte condição:

$$C_r = 2\Delta t \sqrt{gH \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)} < 4\sqrt{2} \quad (16)$$

Em que C_r é o número de *Courant*; Δx e Δy são as dimensões horizontais da grade numérica, em m; Δt é o passo de tempo, em s; g é a aceleração da gravidade, em $m.s^{-2}$; H é a profundidade média local, em m.

A qualidade da grade numérica está, em grande parte, ligada a sua ortogonalidade com a taxa com que uma certa propriedade muda pela a área a ser modelada (suavidade). A primeira é medida pelo ângulo (ou cosseno do ângulo) entre as linhas da grade nas duas direções (φ). Para a suavidade, a medida utilizada é razão de aspecto das células (razão da dimensão das células nas duas direções) e a razão das dimensões das células vizinhas. No Delft3D existe um módulo (RGFGRID) que facilita esta inspeção graficamente, além de fornecer valores guia para a qualidade do grid:

- ortogonalidade: $\cos(\varphi) < 0,04$, em que φ é o ângulo entre as linhas da grade;
- razão de aspecto: deve ficar entre 1 e 2, a menos que o escoamento seja predominantemente em uma das linhas da grade;
- razão das células vizinhas: deve ser menos de 1,2 na área de interesse até 1,4 em áreas mais distantes.

4.2.2. Validação dos níveis do modelo hidrodinâmico

Séries temporais de níveis d'água, medidas em estações de monitoramento, são informações comumente utilizadas para comparação com resultados de modelos hidrodinâmicos. Além de ser uma variável facilmente medida, seu conhecimento pode fornecer informações confiáveis de outras variáveis de interesse.

Para validação dos resultados referentes aos sedimentos, tanto em suspensão quanto de leito, a tarefa é mais complexa, uma vez que estas informações são restritas a medidas pontuais, além de serem caras e, por isso, realizadas em intervalos de tempo maiores, muitas vezes em torno de 4 medições ao ano. Uma alternativa é realizar uma correlação entre turbidez e CSS, visto que a medição de turbidez é mais comum.

No presente estudo, pretende-se validar a aplicação do modelo desenvolvido verificando os resultados de níveis do reservatório e taxas de deposição. Será verificado se estes valores estão dentro de faixas observadas aceitáveis para a UHE Aimorés, comparando com dados disponíveis sobre a usina.

4.3. Modelagem de sedimentos

Para a modelagem dos sedimentos, não foram encontrados dados detalhados que permitam uma validação das operações de *flushing* ou *pass-through* do reservatório. Por este motivo justamente a presente pesquisa trabalhou com a elaboração de cenários, assumindo limites aceitáveis dos parâmetros do modelo.

Os poucos dados disponíveis para o caso, de 2008, foram usados para definir o cenário mais parecido com o que já foi observado no local, e assim escolher o cenário de referência para comparação dentre os testados.

Foram simulados 7 cenários, utilizando variações na equação de transporte do sedimento não coesivo, no rebaixamento do nível d'água, na camada de sedimentos disponível no leito e na granulometria do material não coesivo.

4.3.1. Ensaio equações de transporte

O ensaio com variações na equação de transporte visou analisar a influência da formulação na relação de erosão e deposição no reservatório, bem como no transporte de leito. Foram testadas três fórmulas, dentre as disponíveis no modelo, passíveis de serem aplicadas para o caso. São

elas: Van Rijn (1993), Engelund-Hansen (1948) e Meyer-Peter-Muller (1948), detalhadas anteriormente, no capítulo 3.5.5.

4.3.2. Ensaio rebaixamento de nível d'água

Uma das principais diferenças entre as técnicas de *flushing* e *pass-through* está no rebaixamento do reservatório. Como a UHE Aimorés não possui descarregador de fundo, e a modelagem utilizada foi bidimensional, optou-se por realizar três rebaixamentos diferentes para a análise da remoção de sedimentos. Foram elas: 1,5 m (aproximadamente o rebaixamento utilizado para o *pass-through* em 2018), 4 m (rebaixamento utilizado para o *flushing*) e 5 m. Com este ensaio, visou-se averiguar a influência no processo de erosão e deposição durante a aplicação da técnica de remoção, nas concentrações de sedimentos a jusante das comportas, no transporte de leito e na eficiência das técnicas.

4.3.3. Ensaio camada de sedimentos

Este ensaio buscou avaliar a influência da camada inicial de sedimentos na relação de erosão e deposição no reservatório ao ser aplicada a gestão dos sedimentos, o que se justifica por essa informação nem sempre ser de fácil acesso, como o caso deste estudo, em que não havia dados disponíveis. Assim, optou-se por utilizar duas camadas diferentes de disponibilidade de sedimentos não coesivos e analisar a ordem de grandeza de sua influência.

4.3.4. Ensaio granulometria

Como dito no item 4.1.3, os dados de granulometria disponíveis são oriundos de uma medição realizada apenas em um depósito a montante da região de estudo, não necessariamente sendo representativos de todo o reservatório. Assim, optou-se por utilizar uma granulometria uniforme em todo o trecho, de maneira simplificada.

Este ensaio buscou, então, avaliar a influência da granulometria na erosão e deposição durante o processo de retirada de sedimentos, a fim de enfatizar a necessidade de medições no reservatório. Neste estudo, optou-se pelas frações mais encontradas nos depósitos analisados a montante (Tabela 3): 0,125 mm (areia muito fina) e 0,396 mm (areia média).

4.4. Resumo dos Cenários

A Tabela 5 apresenta um resumo dos cenários realizados. Seus resultados são apresentados no capítulo 5.

Tabela 5. Cenários de simulação utilizados.

Cenário	Equação de transporte*	Camada de sedimentos (m)	Granulometria (μm)	Rebaixamento do nível d'água (m)
VR_3_A_1.5	VR	3	A (125)	1,5
VR_1_A_4	VR	1	A (125)	4,0
VR_3_A_4	VR	3	A (125)	4,0
VR_3_A_5	VR	3	A (125)	5,0
VR_3_B_4	VR	3	B (396)	4,0
MPM_3_A_4	MPM	3	A (125)	4,0
EH_3_A_4	EH	3	A (125)	4,0

VR: Van Rijn (1993)

MPM: Meyer-Peter-Muller (1948)

EH: Engelund-Hansen (1967)

4.5. Análise dos resultados

Após a validação do modelo, os resultados foram analisados segundo os seguintes aspectos:

- relação erosão/deposição ao longo do reservatório e de seções transversais;
- concentrações máximas e médias de sedimentos a jusante e no interior do reservatório;
- transporte de leito em seções transversais;
- número de intervalos de tempo de simulação necessários para realização da manobra;

Como referência para as análises, foi adotado o cenário VR_3_A_4, cujos resultados se assemelharam aos valores obtidos por Carvalho (2018).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Sensibilidade numérica do modelo

O trecho em estudo foi modelado em uma grade numérica curvilínea, com um total de 3454 células. O passo de tempo foi de 30 s, a fim de respeitar a condição de Courant para estabilidade numérica e o coeficiente de Manning adotado foi de 0,035 devido ao solo da região.

A sensibilidade à densidade de referência da mistura se mostrou pouco significativa. Já para os valores de tensão de cisalhamento, o modelo mostrou maiores variações. Os valores selecionados para esses parâmetros estão apresentados na Tabela 6. Resultados mais detalhados obtidos das análises podem ser vistos no ANEXO A.

Tabela 6. Parâmetros obtidos pela análise de sensibilidade.

Parâmetro	Valor
Massa específica de referência	1400 kg.m ⁻³
Tensão de cisalhamento de início de movimento	5 N.m ⁻²
Tensão de cisalhamento de início de destacamento	11 N.m ⁻²
Taxa de erosão	0.001 kg.m ² .s ⁻¹

5.2. Modelo hidrodinâmico

A pergunta a ser respondida pelo presente ensaio foi: o modelo se comporta da mesma maneira que os dados observados de nível no reservatório?

Para isso, primeiramente foi ajustado o modelo hidrodinâmico para o período simulado, de setembro de 2008 a janeiro de 2009. Estas simulações foram feitas com os dados disponíveis no SAR, e os resultados estão apresentados da Figura 30 a Figura 32. Pode-se observar o rebaixamento feito para a realização do *flushing*, que durou de 25 de novembro a 6 de dezembro, com posterior aplicação do *flushing* de 16 a 25 de dezembro. O comportamento dos níveis obtidos pelo modelo dentro do reservatório de Aimorés é semelhante ao dos dados observados (Figura 30). A vazão de pico associada ao *flushing* foi de aproximadamente 3500 m³.s⁻¹. A Figura 33 apresenta o campo de velocidades obtido na modelagem no dia de maior vazão afluente. Com base nestes resultados, é possível identificar os locais com maior probabilidade de erosão (velocidades altas) e com maior probabilidade de deposição (velocidades mais baixas). Também é possível esperar que a montante ocorra maior mobilização de sedimentos, uma vez que as velocidades vão diminuindo a medida que o escoamento avança em direção ao barramento.

Figura 30. Diferenças dos níveis em Aimorés obtidos no modelo (DELFT3D) e observados (SIN).

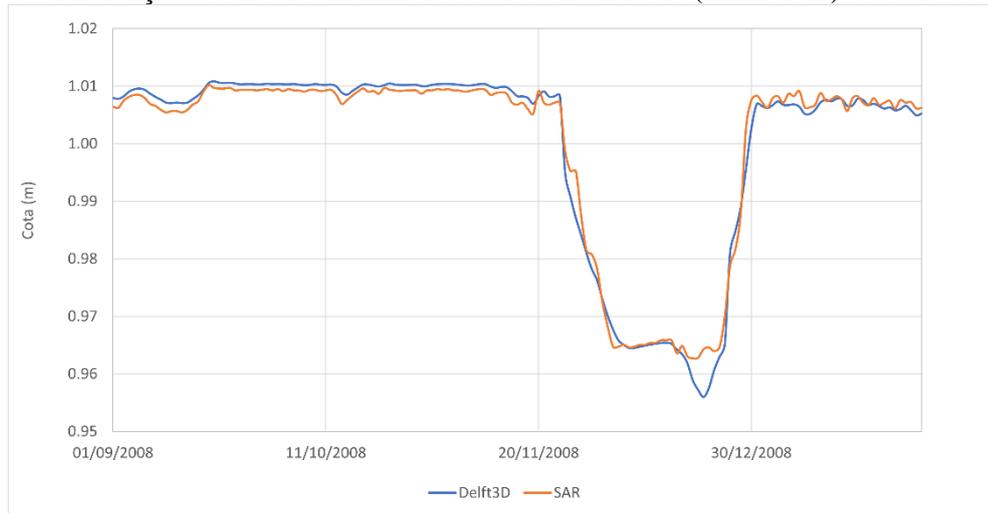


Figura 31. Vazões vertidas em Aimorés obtidas no modelo (DELFT) e observadas (SAR).

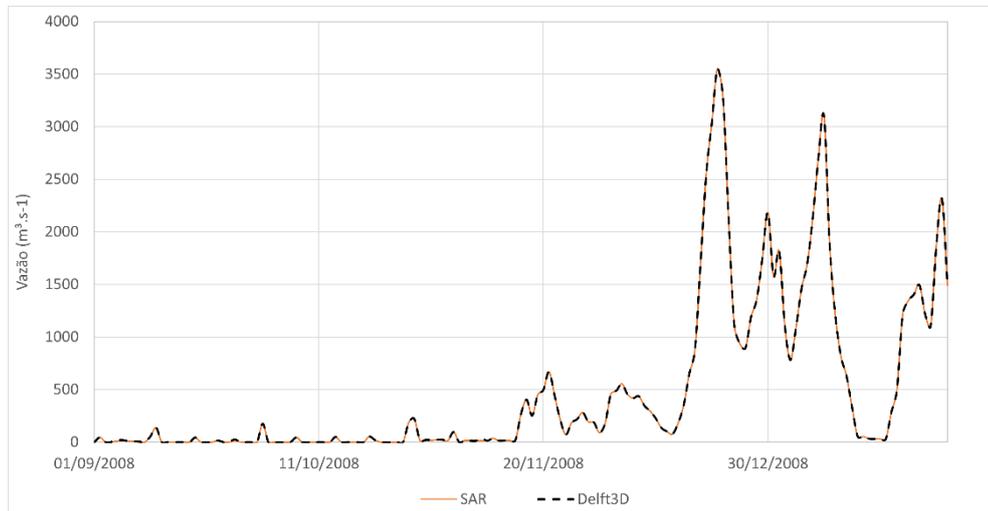


Figura 32. Vazões turbinadas em Aimorés obtidas no modelo (DELFT) e observadas (SAR).

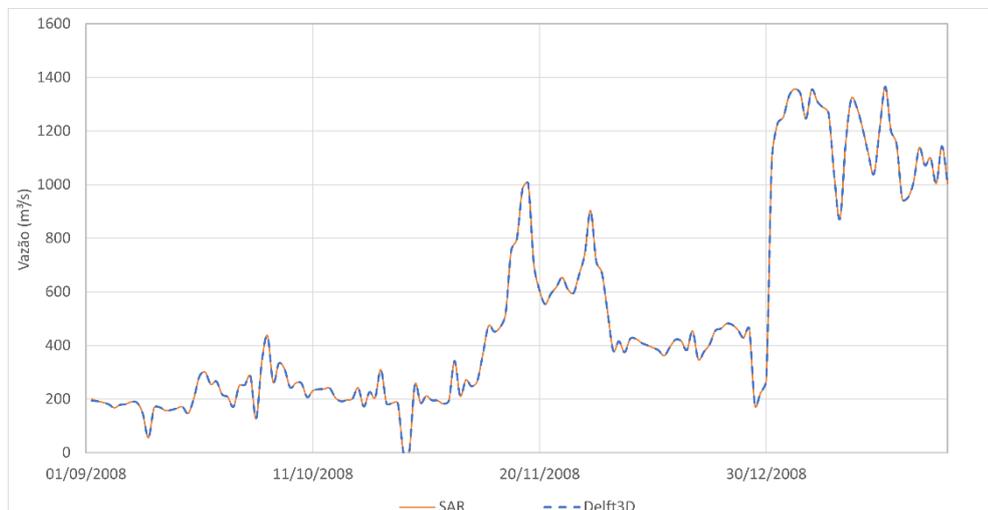
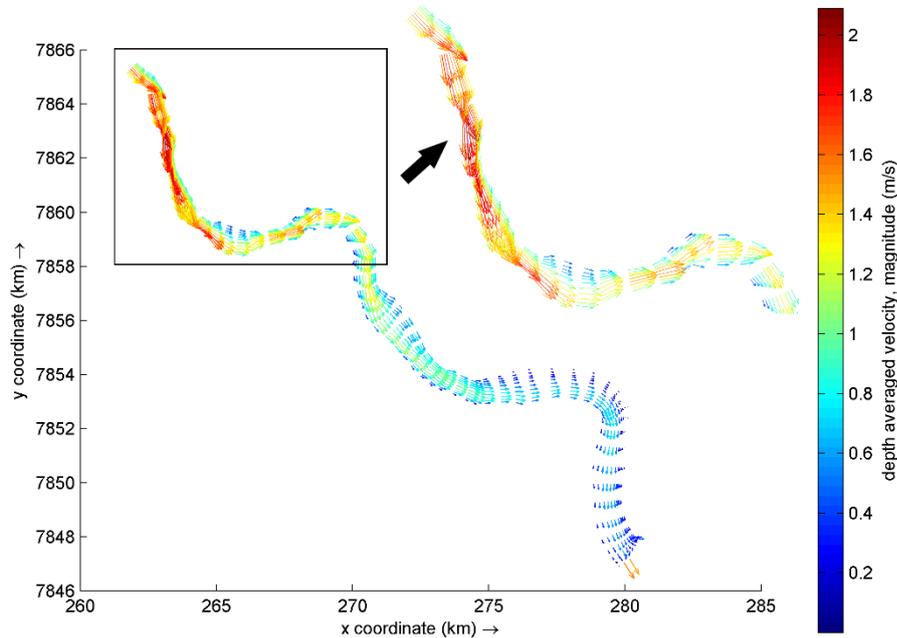


Figura 33. Campo de velocidades no interior do reservatório no dia de maior vazão afluente (21/12/2008). Magnitude variando de 0,1 m/s (azul escuro) a 2 m/s (vermelho).



5.3. Modelagem de sedimentos

Neste item são apresentados os resultados obtidos para os diferentes ensaios de gestão de sedimentos, sendo eles: rebaixamento de nível d'água (representando os procedimentos de *pass-through* e *flushing*), equações de transporte, camada de sedimentos e granulometria. Algumas análises foram feitas em seções específicas do reservatório(Figura 34).

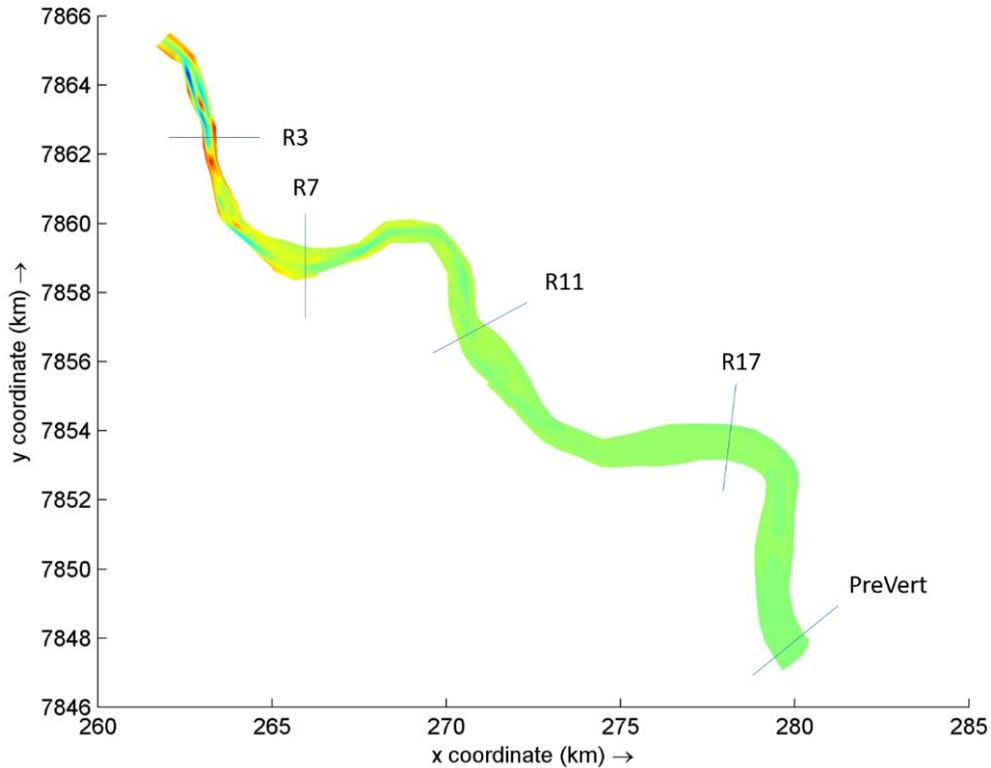
A Tabela 7 apresenta um resumo com os valores de erosão e deposição máximos e médios obtidos para os 12 cenários em que foi utilizada a equação de Van Rijn. Destes resultados, o que mais se assemelha aos resultados de Carvalho (2018) é o cenário VR_3_A_4, utilizado como base nas análises comparativas dos itens a seguir.

Tabela 7. Valores de erosão/deposição máximos e médios dos cenários com a equação de Van Rijn.

C/G*	Rebaixamento (m)					
	1,5	4	5	1,5	4	5
	Deposição máxima (m)			Erosão máxima (m)		
1A	0,31	0,44	0,54	-0,55	-0,74	-1,09
1B	0,82	1,18	1,35	-0,66	-0,81	-1,17
3A	0,84	1,20	1,36	-1,02	-1,23	-1,86
3B	2,17	2,80	2,86	-1,43	-1,66	-2,17
	Deposição média (m)			Erosão média (m)		
1A	0,08	0,09	0,10	-0,15	-0,17	-0,21
1B	0,10	0,11	0,14	-0,16	-0,21	-0,23
3A	0,12	0,15	0,19	-0,22	-0,29	-0,33
3B	0,16	0,21	0,28	-0,29	-0,38	-0,40

*C/G: camada/granulometria

Figura 34. Localização das seções analisadas nos diferentes ensaios.



5.3.1. Ensaio rebaixamento de nível d'água

A pergunta a ser respondida pelo presente ensaio foi: qual a diferença em termos de erosão/deposição máxima e média no reservatório, transporte de material do leito e concentração de sedimentos a jusante do reservatório, quando são usados diferentes rebaixamentos para operação de limpeza de sedimentos, comparando o que seria um *pass-through* até um *flushing*?

Para responder à esta pergunta, foram simulados três rebaixamento distintos: 1,5 m, 4 m e 5 m. Assim, foram feitos ajustes nas vazões vertidas apenas no período de deplecionamento do reservatório; durante o período em que ocorreu o *flushing* de 2008, mantiveram-se as vazões dos dados disponíveis.

Foram selecionados os cenários VR_3_A_1,5, VR_3_A_4 e VR_3_A_5 para a realização desta análise. Da Figura 35 à Figura 38 são apresentados os mapas com os valores de erosão e deposição obtidos, após a operação de gestão de sedimentos, no trecho modelado e com foco no reservatório, objeto de interesse neste estudo. Nas imagens, valores negativos são erosão, valores positivos são deposição.

Figura 35. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_4.

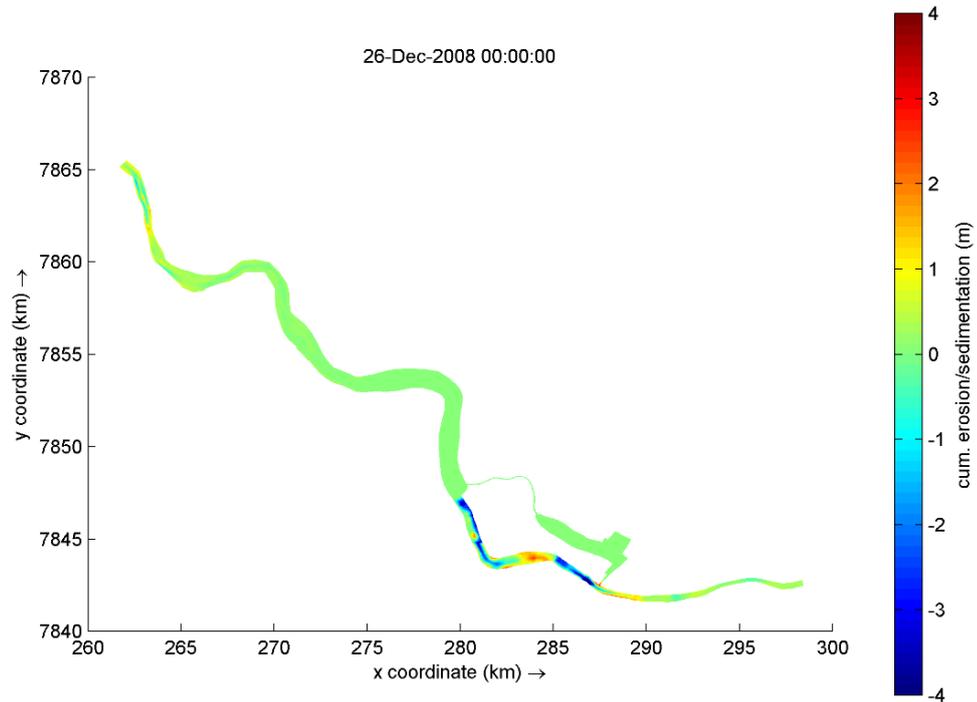


Figura 36. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_1.5 (foco no reservatório).

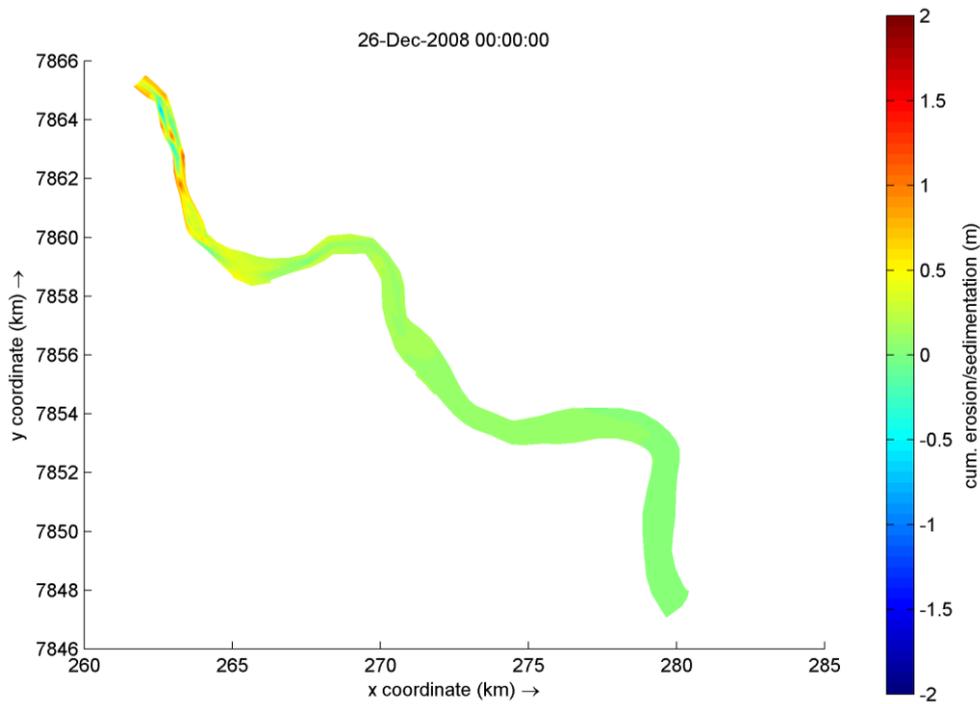


Figura 37. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_4 (foco no reservatório).

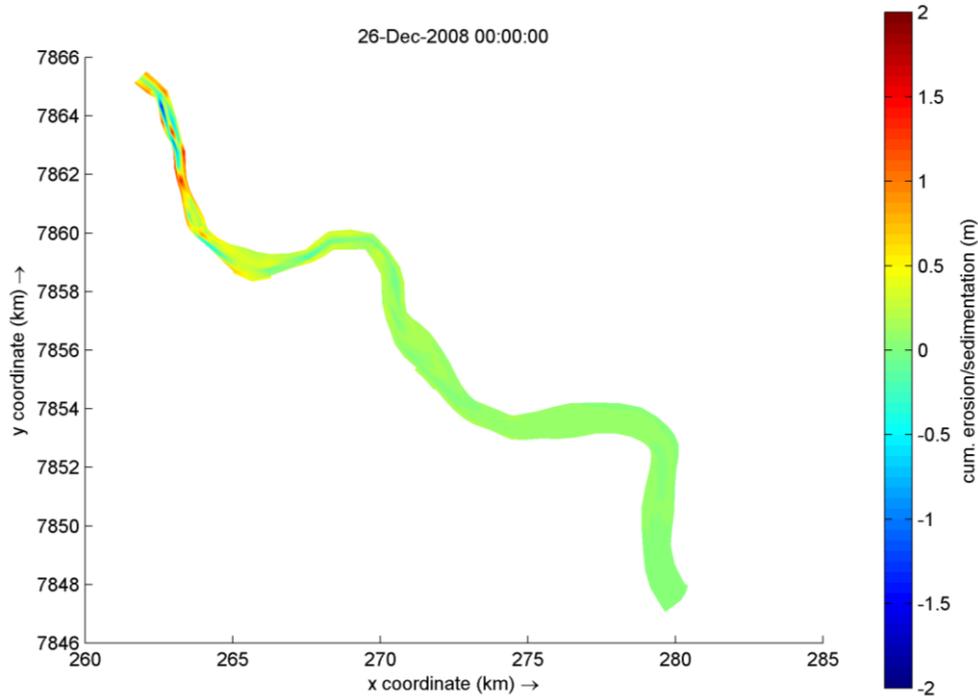
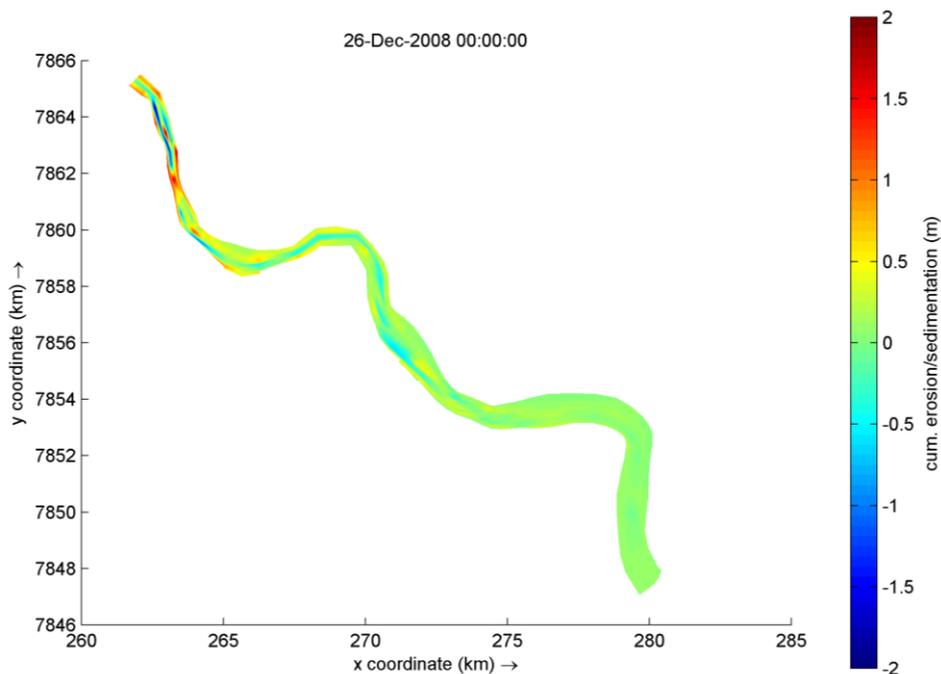


Figura 38. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_5 (foco no reservatório).



Em relação a erosão, observam-se poucos pontos no interior do reservatório utilizando o rebaixamento de 1,5 m, com exceção de alguns a montante. Conforme o rebaixamento aumenta, a erosão passa a ocorrer também em direção ao barramento, acentuando-se com o

deplecionamento de 5 m. É possível perceber que a deposição, assim como a erosão, avança dentro do reservatório conforme o rebaixamento aumenta. Conforme o nível do reservatório diminui, são obtidas maiores velocidades do escoamento afluente, aumentando a erosão.

A Tabela 8 apresenta os valores máximos e médios obtidos para a erosão nos cenários de alteração no rebaixamento de nível d'água. Neles, consideraram-se 3 m de camada inicial de sedimentos não coesivos, com granulometria de 0,125 mm, e a equação utilizada foi Van Rijn (1993). Segundo Carvalho (2018), após a operação realizada em 2008, foram observadas formações de depósitos a montante da ordem de 2 m, na região das ilhas. Assim, considerou-se que os resultados representam satisfatoriamente a distribuição dos sedimentos, considerando-se todas as incertezas associadas aos dados de entrada e configurações.

Tabela 8. Erosão e deposição máximas e médias para os diferentes rebaixamentos.

Erosão/Deposição	Rebaixamento		
	1,5 m	4 m	5 m
Deposição máxima (m)	0,84	1,20	1,36
Erosão máxima (m)	-1,02	-1,23	-1,86
Deposição média (m)	0,12	0,15	0,19
Erosão média (m)	-0,22	-0,29	-0,33

A evolução das seções transversais R3, R11 e R17 são apresentadas na Figura 39, Figura 40 e Figura 41, respectivamente. É possível notar que as maiores alterações acontecem a montante, na seção R3, não havendo modificações significativas na seção mais a jusante, R17. É interessante notar que, na seção intermediária, R11, apenas a partir de um rebaixamento de 5 m começa a haver erosão da margem direita (nas figuras, está à esquerda). Essa é uma característica dos reservatórios com maior aporte de sedimentos não coesivos, que se depositam primeiro, a montante. Além disso, com o rebaixamento do nível do reservatório, as movimentações ocorrem nas regiões de menor altura de coluna d'água, onde ocorrem as maiores velocidades de escoamento (erosão) e alguns pontos que podem secar (deposição e ilhas).

Figura 39. Alterações do leito na seção R3 para os três cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, rebaixamento de 1,5 m; verde, rebaixamento de 4 m, vermelho, rebaixamento de 5m). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento, para cada rebaixamento.

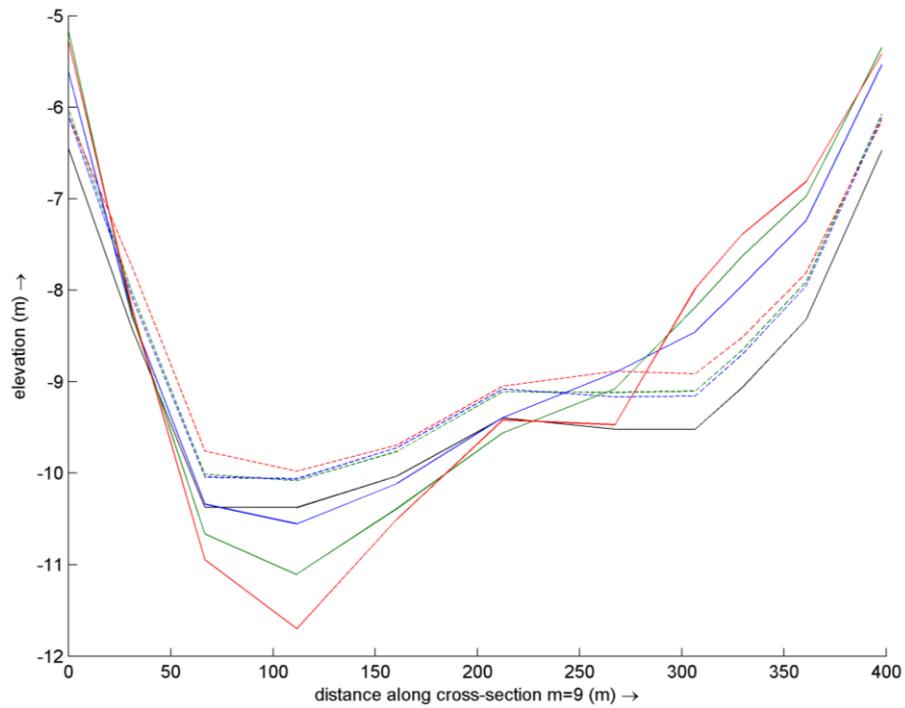


Figura 40. Alterações do leito na seção R11 para os três cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, rebaixamento de 1,5 m; verde, rebaixamento de 4 m, vermelho, rebaixamento de 5m). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.

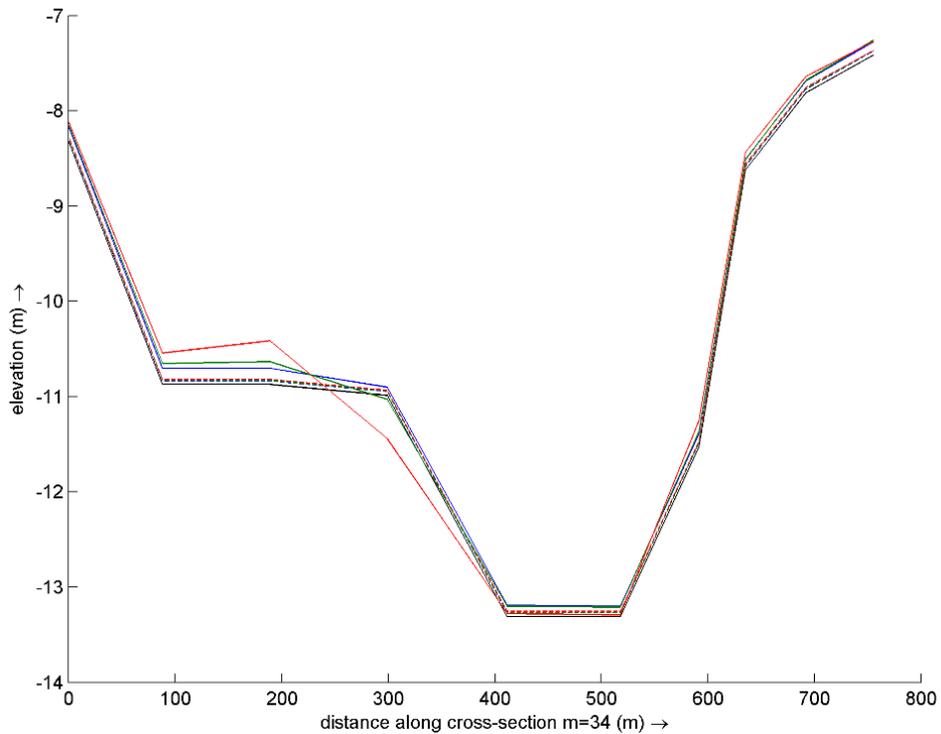
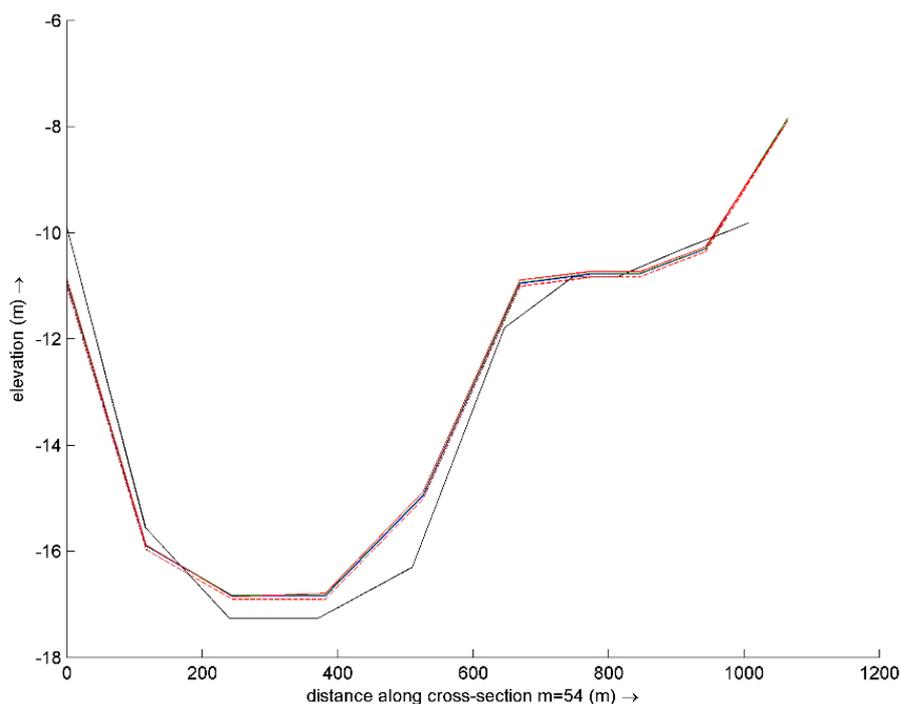


Figura 41. Alterações do leito na seção R17 para os três cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, rebaixamento de 1,5 m; verde, rebaixamento de 4 m, vermelho, rebaixamento de 5m). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.



Os mapas apresentados da Figura 42 à Figura 44 mostram as concentrações do sedimento coesivo no trecho em estudo, relativas ao dia 20 de dezembro, em que a concentração atinge seu valor máximo a jusante do barramento nos três cenários. Na Figura 45, observa-se os valores de concentração na seção após o barramento, para os três cenários simulados. Com o aumento do rebaixamento, a concentração obtida a jusante também aumenta. Após a aplicação da operação, quando o reservatório volta ao seu nível normal, a diferença entre as concentrações volta a diminuir. Para aumentar o rebaixamento do nível d'água, a vazão máxima liberada deve ser maior, aumentando o transporte de sedimentos e, conseqüentemente, a concentração que é liberada para jusante. Este mesmo comportamento foi apresentado por Ren et al (2021), ao estudar a resposta da sedimentação em resposta às estratégias de gestão do reservatório da usina hidrelétrica Três Gargantas (China). A Tabela 9 mostra os valores máximos e médios obtidos nessa seção com os diferentes rebaixamentos.

Tabela 9. Concentrações máximas e médias do sedimento coesivo a jusante do barramento para os diferentes rebaixamentos.

Concentrações do sedimento coesivo	Rebaixamento		
	1,5 m	4 m	5 m
Concentração máxima (kg/m ³)	0,298	0,406	0,665
Concentração média (kg/m ³)	0,037	0,050	0,087

Figura 42. Concentração de sedimentos coesivos durante a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_1.5.

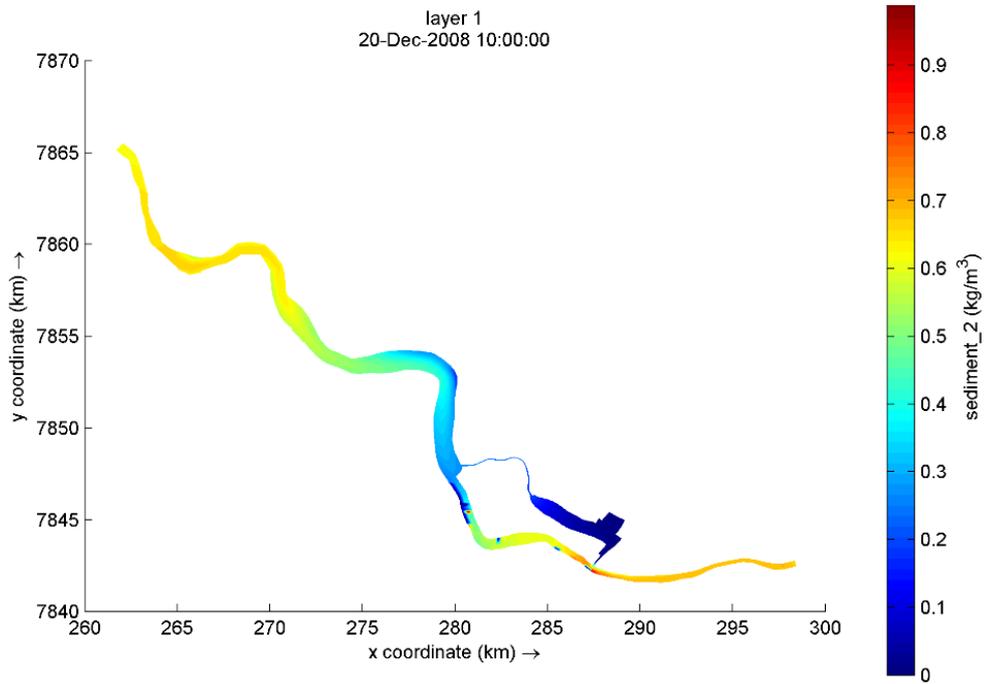


Figura 43. Concentração de sedimentos coesivos durante a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_4.

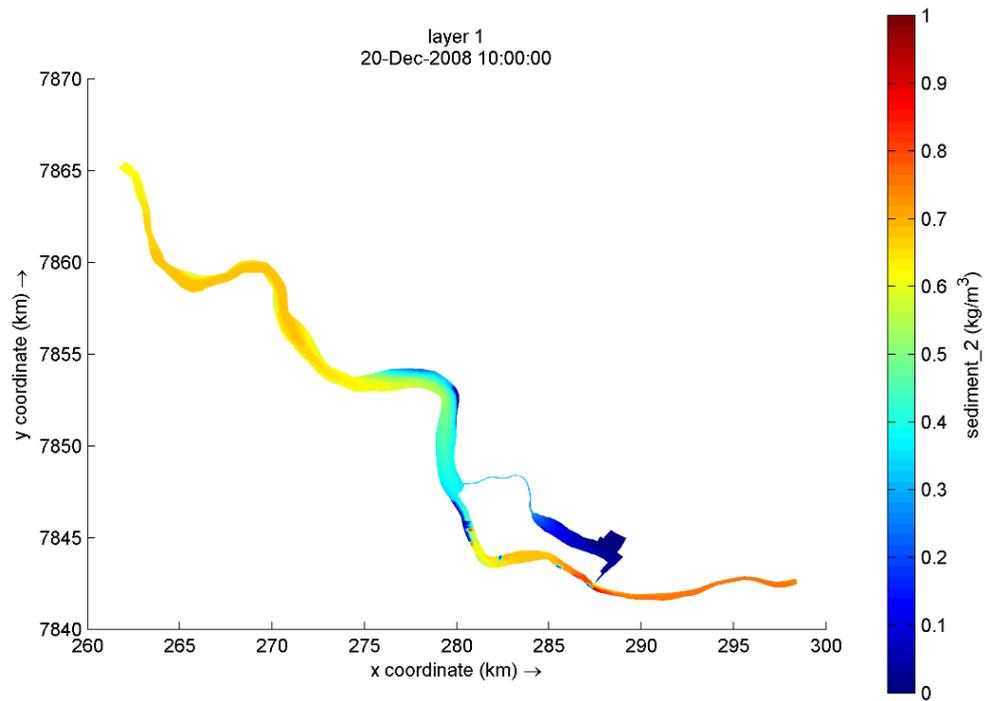


Figura 44. Concentração de sedimentos coesivos durante a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_5.

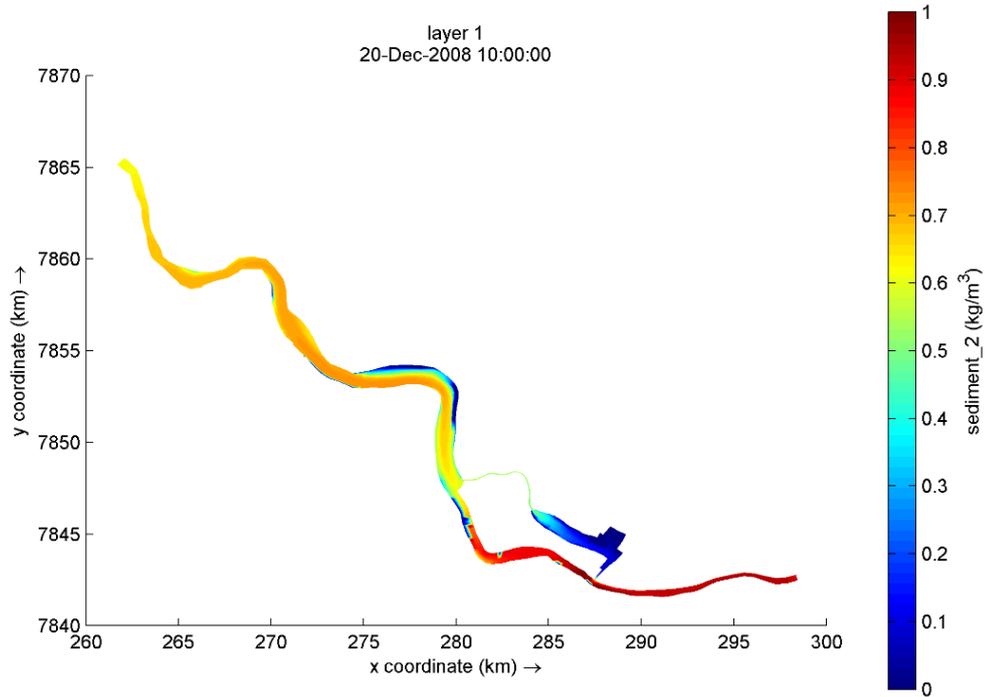
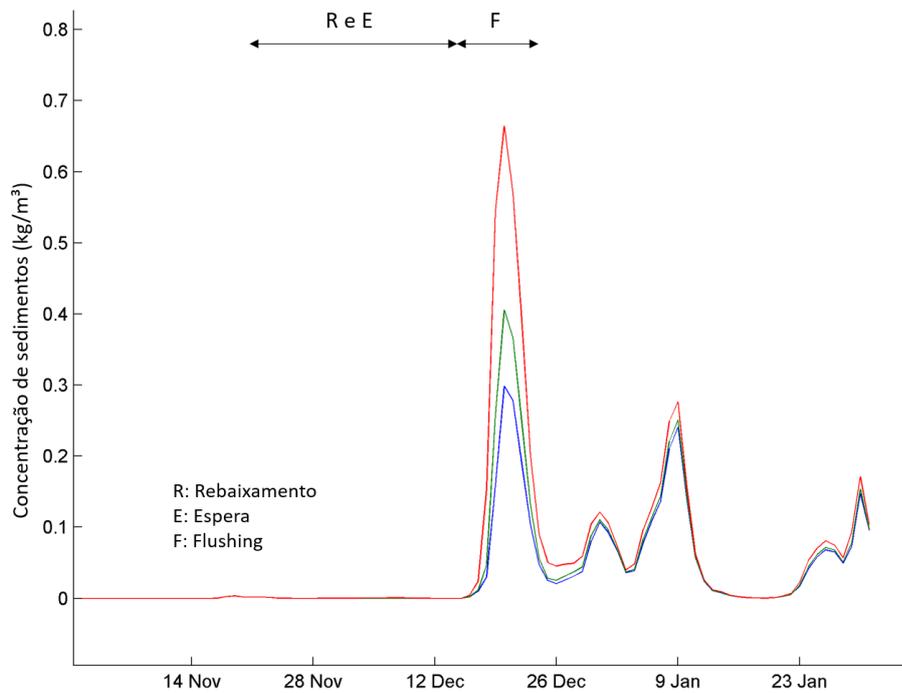


Figura 45. Concentração de sedimentos coesivos (em kg.m⁻³) após o vertedouro para os diferentes rebaixamentos (em vermelho, 5 m; em verde, 4 m; em azul, 1,5).



Com relação aos valores máximos e médios, a variação entre os cenários, em termos percentuais, foi maior do rebaixamento de 5 m para o de 4 m, com um aumento de aproximadamente 64% da concentração máxima e 73% da concentração média a jusante do reservatório (Tabela 10). Para atingir o rebaixamento de 5m, a vazão vertida necessária é superior às anteriores, de forma que são atingidas maiores velocidades do escoamento e, ainda, maiores tensões cisalhantes no leito do reservatório. Com o aumento dessas tensões, as instabilidades nos sedimentos depositados são maiores, levando a uma maior mobilização e transporte.

Tabela 10. Variação percentual da concentração entre os cenários.

Concentração	Rebaixamento	
	4 m/1, 5 m	5 m/4 m
Concentração máxima	36%	64%
Concentração média	36%	73%

Dentro do reservatório, a concentração máxima foi obtida em 19 de dezembro, e os mapas dos diferentes cenários são apresentados da Figura 46 à Figura 48, apenas para o seu interior. Percebe-se, assim como na erosão e deposição, que a concentração aumenta em direção ao interior do reservatório conforme o rebaixamento é intensificado, devido ao maior volume de sedimentos transportados pelo reservatório. Na Tabela 11, são apresentados os valores máximos e médios no interior do reservatório, para o dia de máxima concentração.

Tabela 11. Concentrações máximas e médias no interior do reservatório durante a operação de gestão de sedimentos.

19 de dezembro	Rebaixamento		
	1,5 m	4 m	5 m
Concentração máxima (kg/m³)	1,066	1,088	1,100
Concentração média (kg/m³)	0,712	0,795	0,859

Figura 46. Concentração de sedimentos coesivos durante a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_1.5 (foco no reservatório).

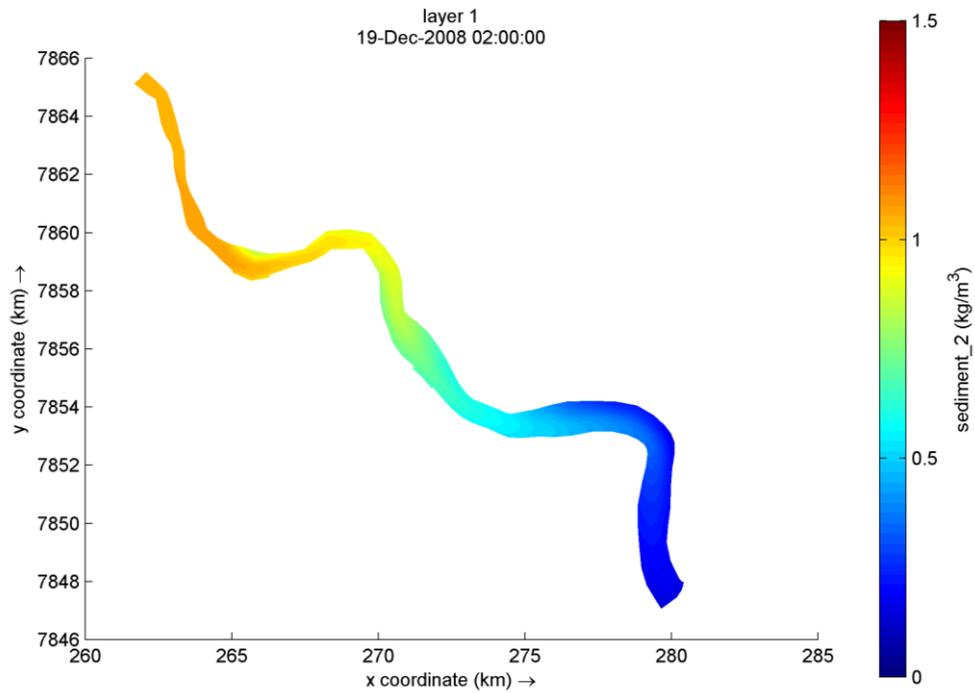


Figura 47. Concentração de sedimentos coesivos durante a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_4 (foco no reservatório).

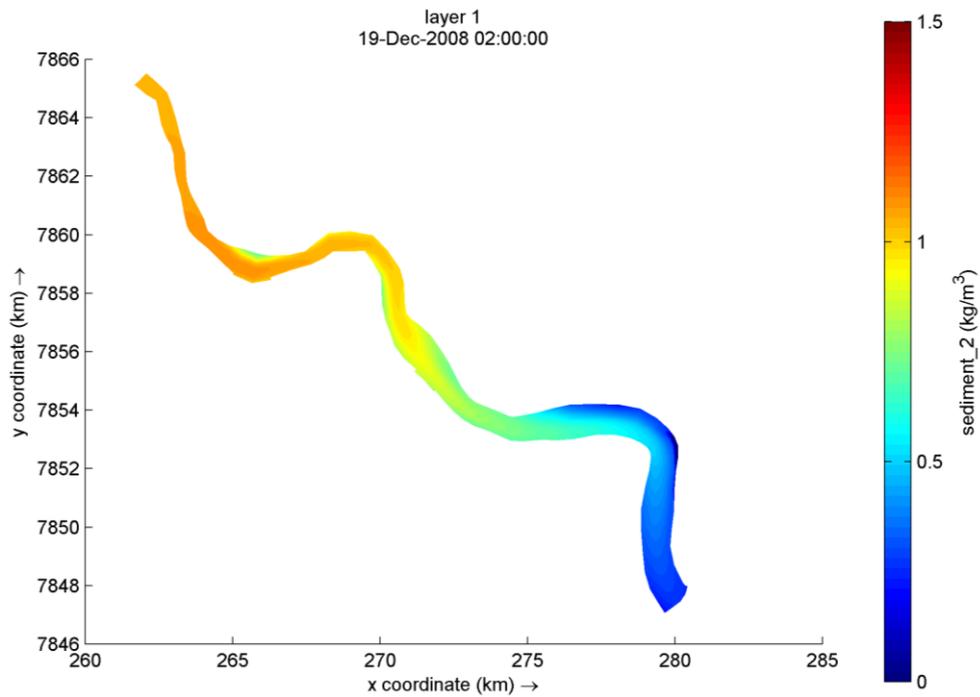
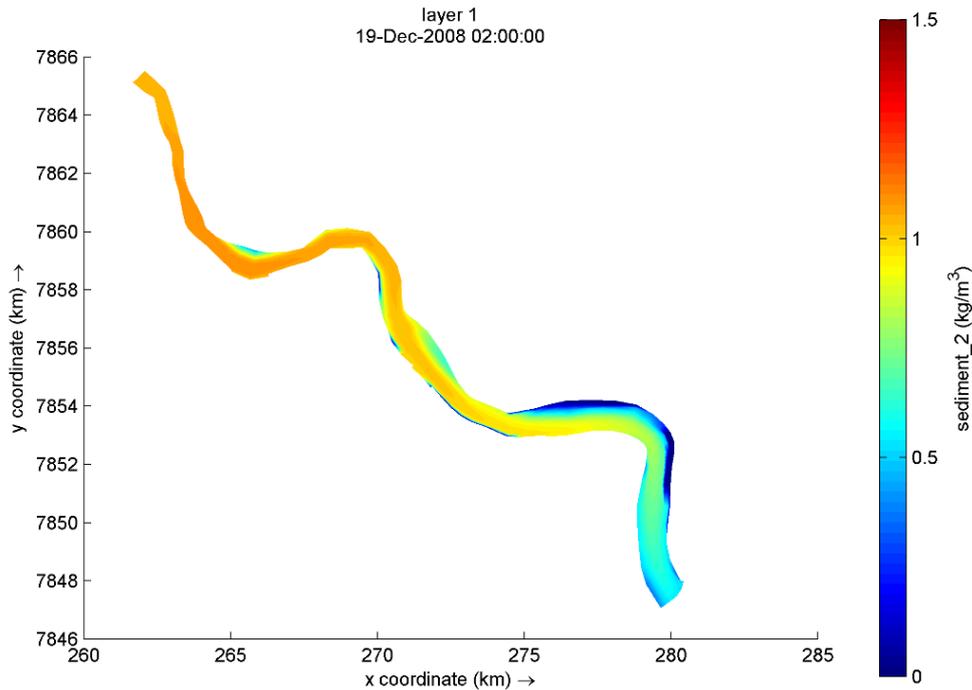


Figura 48. Concentração de sedimentos coesivos durante a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_5 (foco no reservatório).



Analisando quatro seções distribuídas no reservatório, nota-se que a variação das concentrações entre os cenários se acentua a jusante, quase não sofrendo alterações a montante, para os diferentes rebaixamentos. Isto ocorre porque os efeitos são sentidos a montante desde o menor rebaixamento, uma vez que a profundidade é menor e os efeitos do aumento da velocidade já são observados. Com a diminuição do nível d'água, esses efeitos passam a ser sentidos a jusante (transporte dos sedimentos afluentes em conjunto com os ressuspensos), onde antes não ocorriam. Desta forma, nota-se que as concentrações máximas observadas a montante variam pouco (seção R3), enquanto quase dobram a jusante (R17). A Figura 49 e a Figura 50 representam os valores obtidos na seção R3 e na seção R17, respectivamente. A Tabela 12 apresenta os máximos e médios.

Figura 49. Concentração de sedimentos coesivos na seção R3 (montante) do reservatório, para os três rebaixamentos de nível (azul, 1,5 m; verde, 4 m; vermelho, 5 m).

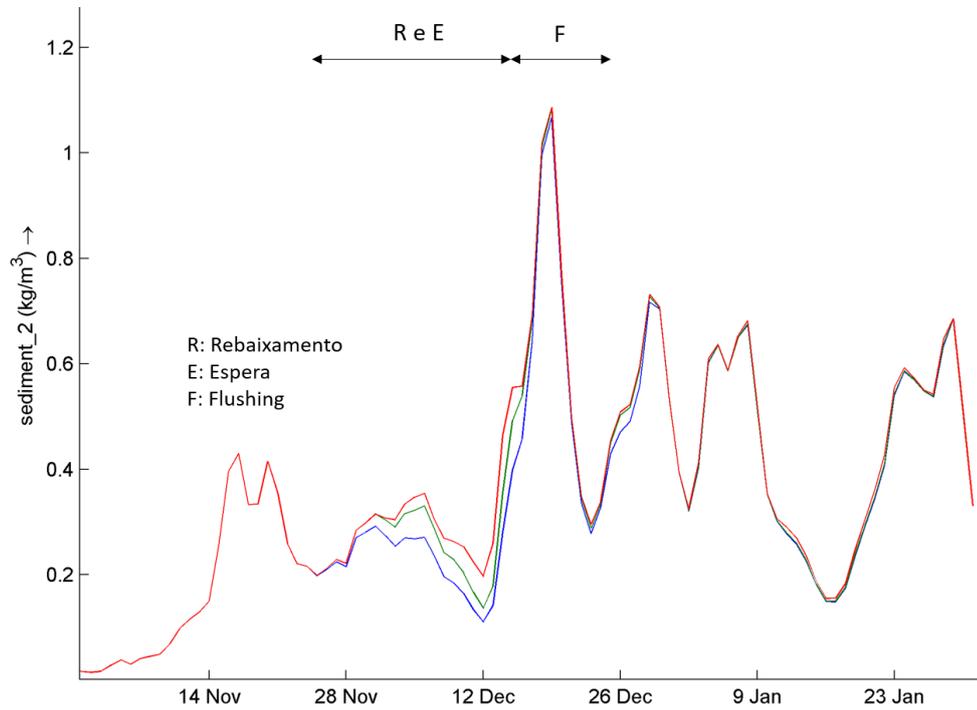


Figura 50. Concentração de sedimentos na seção R17 (jusante) do reservatório, para os três rebaixamentos de nível (azul, 1,5 m; verde, 4 m; vermelho, 5 m).

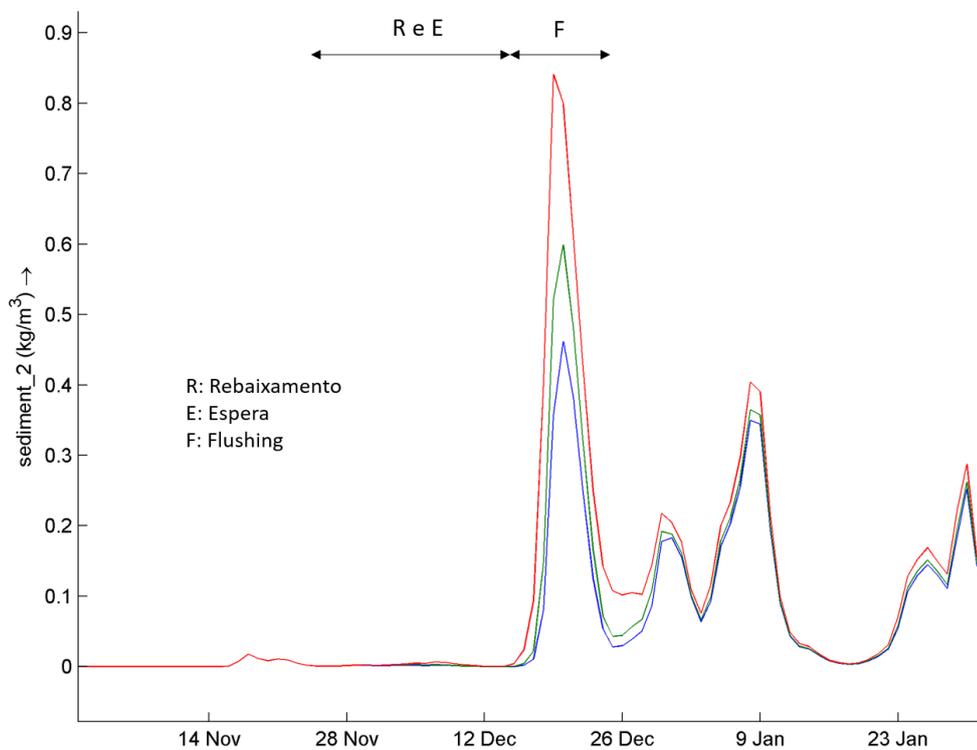


Tabela 12. Concentrações máximas e médias nas quatro seções analisadas do reservatório durante a operação de gestão de sedimentos.

Seção	Rebaixamento					
	1,5 m	4 m	5 m	1,5 m	4 m	5 m
	Concentração máxima (kg/m ³)			Concentração média (kg/m ³)		
R3	1,067	1,083	1,087	0,344	0,374	0,395
R11	0,820	0,964	1,021	0,127	0,154	0,191
R17	0,462	0,599	0,841	0,57	0,78	0,121
PreVert	0,284	0,394	0,653	0,32	0,46	0,83

Quanto ao transporte de leito, o comportamento se assemelha ao das variáveis anteriores. Conforme os mapas da Figura 51 a Figura 53, do dia com a maior taxa de transporte de leito, observa-se que esta taxa aumenta na jusante conforme aumenta o rebaixamento. A Figura 54 e a Figura 55 apresentam o transporte de leito, em kg.s⁻¹, em duas seções do reservatório, a montante e a jusante, respectivamente. A Tabela 13 mostra os valores máximos e médios obtidos nas seções analisadas. O transporte de leito é caracterizado pelo transporte de sedimentos não coesivos, de maior granulometria. Naturalmente, esses sedimentos se depositam mais a montante no reservatório, formando os bancos. Assim, o transporte de leito é mais intenso nessa região, devido às maiores velocidades do escoamento, que causa a remobilização do sedimento depositado.

Figura 51. Taxa de transporte de leito durante a operação de gestão de sedimentos (21 de dezembro) do cenário VR_3_A_1.5.

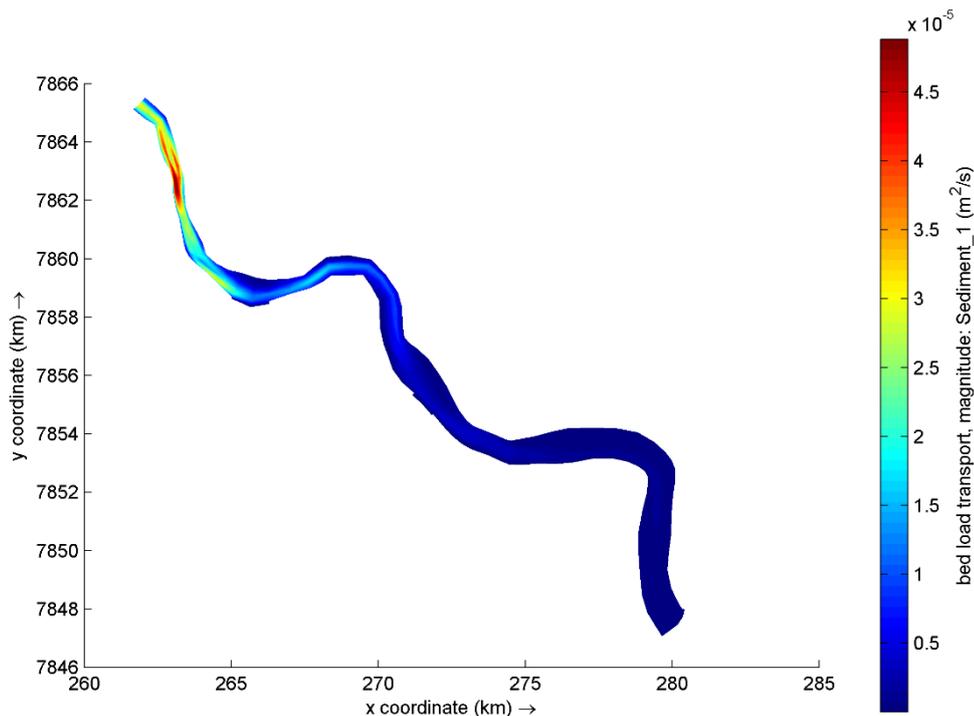


Figura 52. Taxa de transporte de leito durante a operação de gestão de sedimentos (21 de dezembro) do cenário VR_3_A_4.

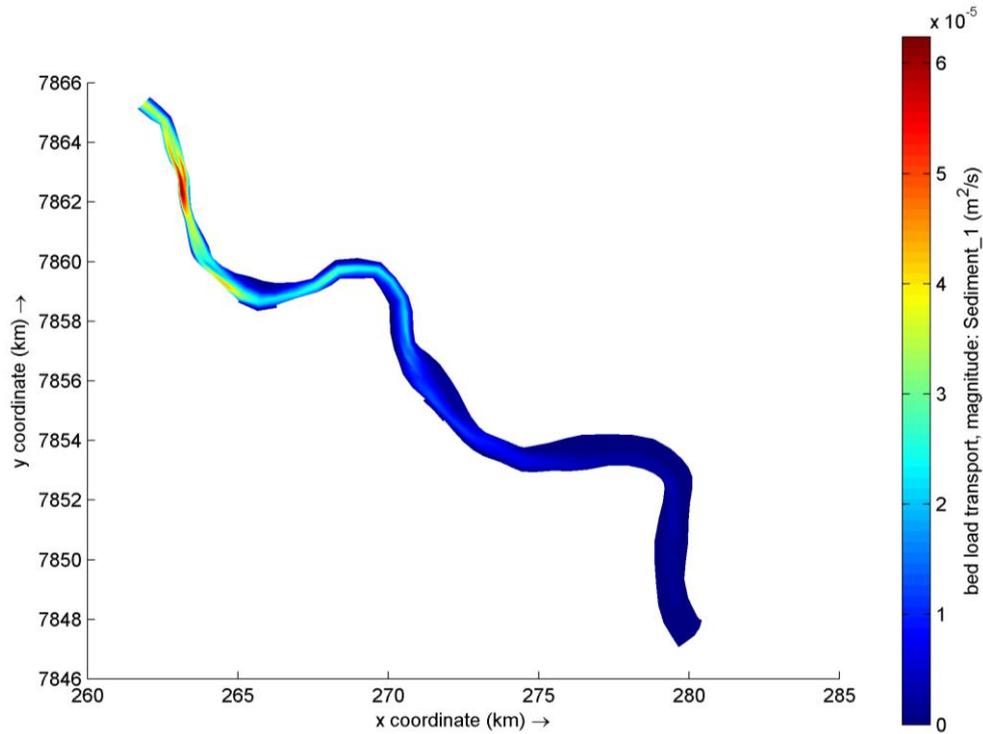


Figura 53. Taxa de transporte de leito durante a operação de gestão de sedimentos (21 de dezembro) do cenário VR_3_A_5.

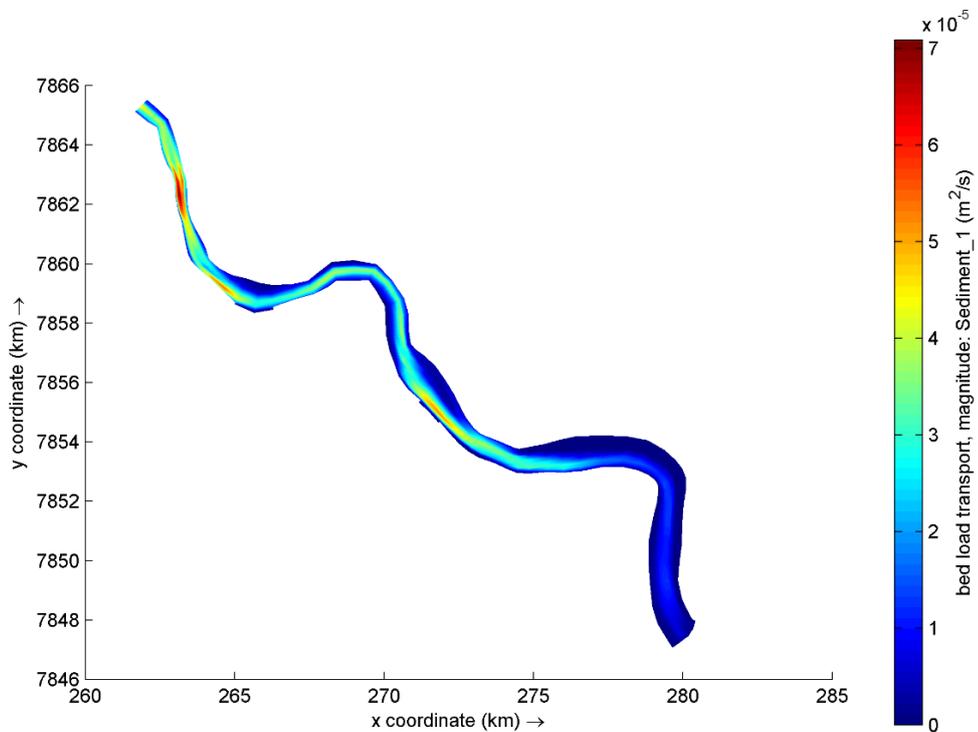


Figura 54. Transporte de leito a montante do reservatório para os três cenários de rebaixamento (vermelho, 5 m; verde, 4 m; azul, 1,5 m).

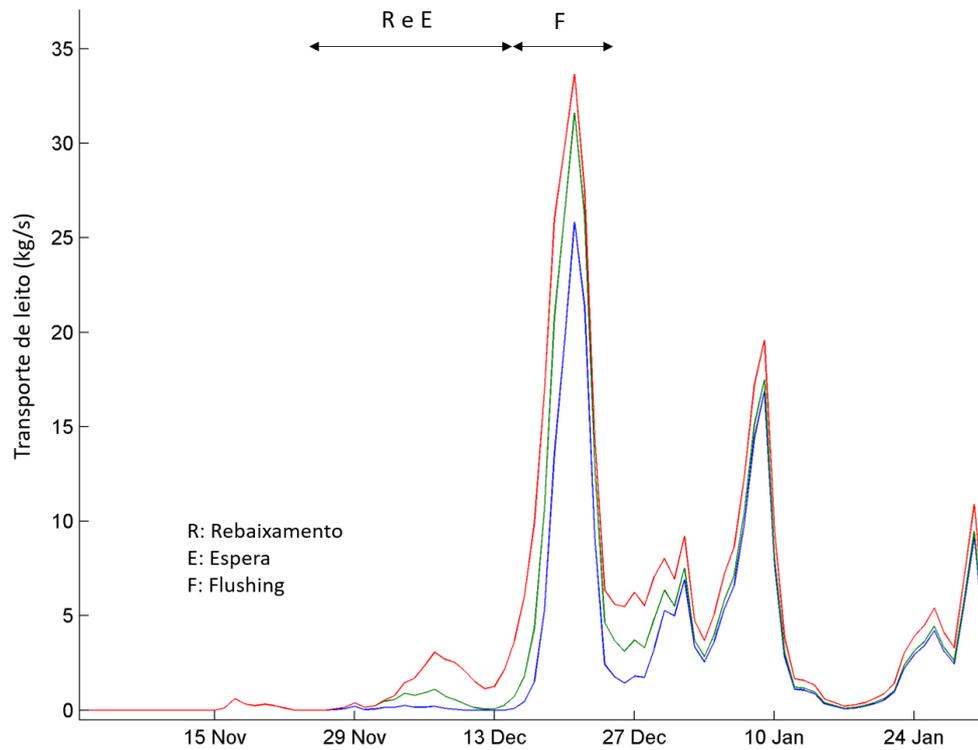


Figura 55. Transporte de em trecho intermediário reservatório para os três cenários de rebaixamento (vermelho, 5 m; verde, 4 m; azul, 1,5 m).

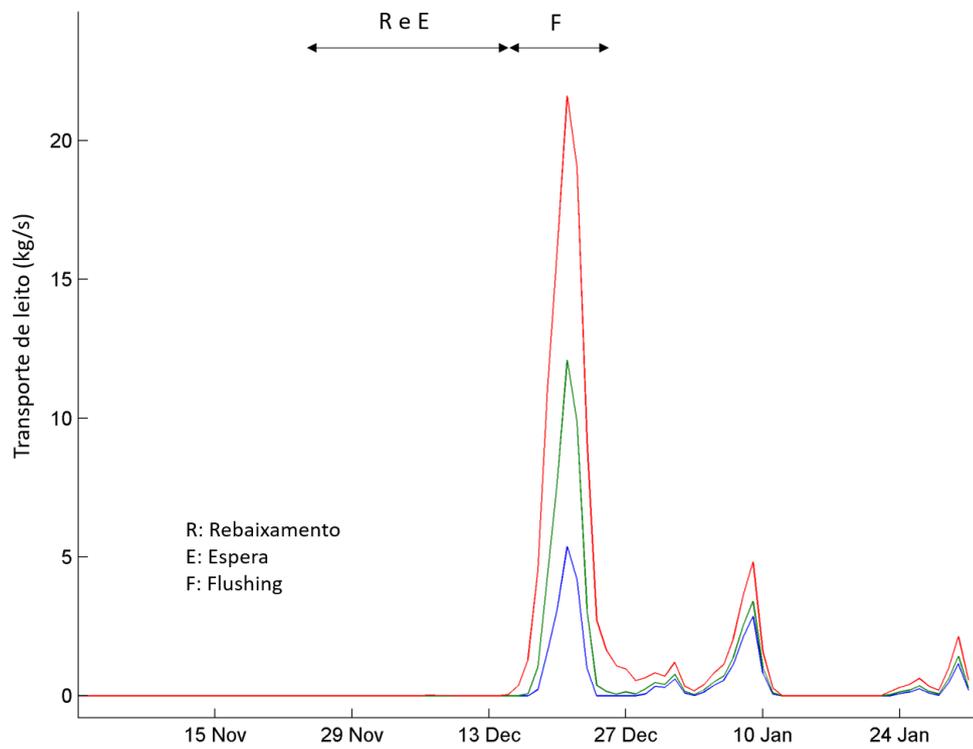


Tabela 13. Transporte de leito máximo e médio para os diferentes rebaixamentos, em três seções do reservatório.

Seção	Rebaixamento					
	1,5 m	4 m	5 m	1,5 m	4 m	5 m
	Transporte máximo (kg.s ⁻¹)			Transporte médio (kg.s ⁻¹)		
R3	25,8	31,6	33,7	3,3	4,9	6,6
R7	17,3	25,2	29,0	1,9	3,2	4,4
R11	5,4	12,1	21,6	0,5	1,3	2,8

A concentração de sedimentos não coesivos dentro do reservatório atinge seus valores mais elevados em 21 de dezembro (rebaixamento máximo durante a operação), a montante, não sofrendo grande variação em termos de área atingida dentro do reservatório, independentemente do rebaixamento aplicado. Esta fração de sedimento praticamente não é transportada a jusante do vertedouro. Os resultados para os rebaixamentos de 1,5 m, 4 m e 5 m são apresentados na Figura 56, Figura 57 e Figura 58, respectivamente.

Figura 56. Concentração de sedimentos não coesivos no interior do reservatório com o rebaixamento de 1,5 m.

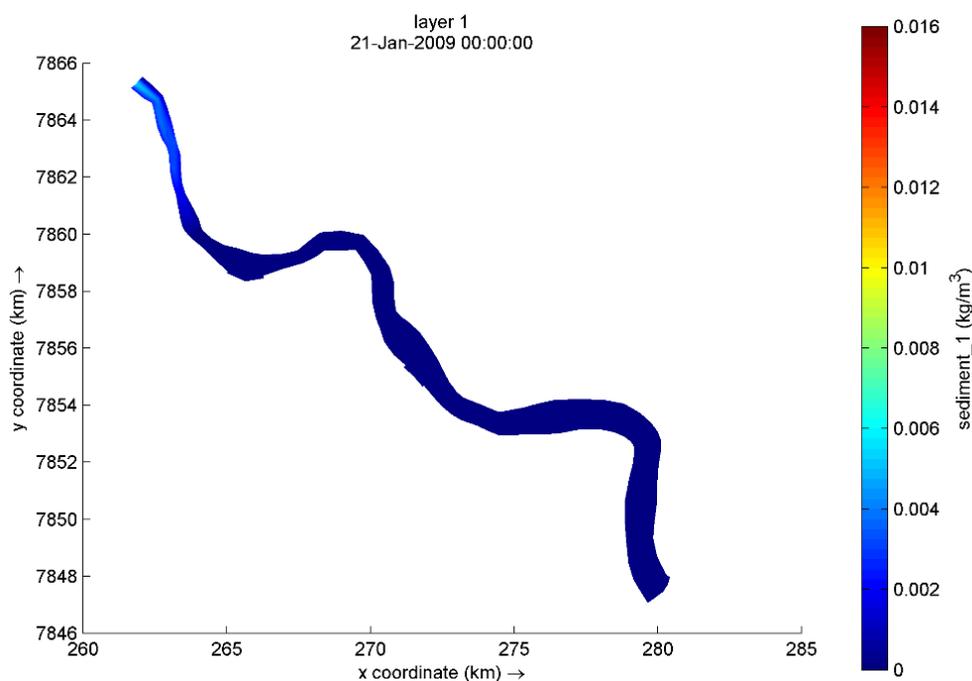


Figura 57. Concentração de sedimentos não coesivos no interior do reservatório com o rebaixamento de 4 m.

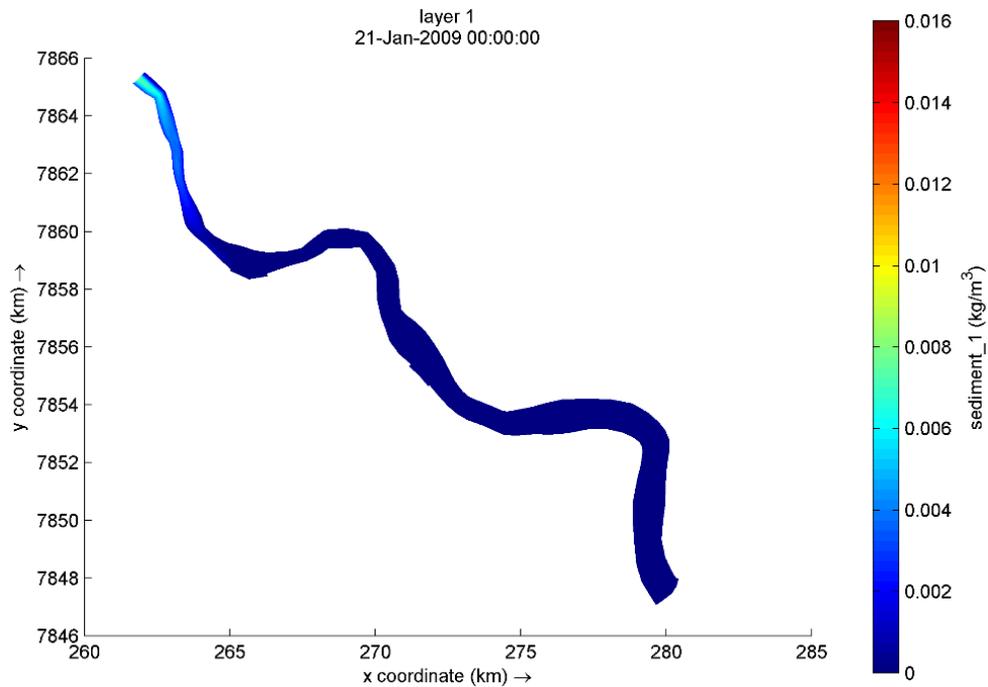
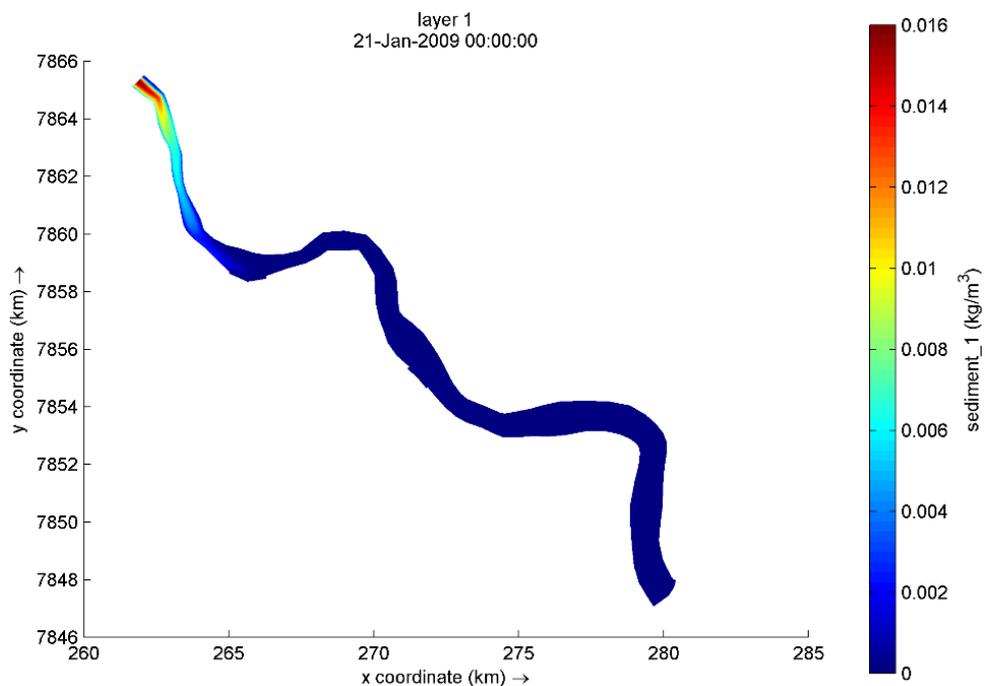


Figura 58. Concentração de sedimentos não coesivos no interior do reservatório com o rebaixamento de 5 m.



5.3.2. Ensaio das equações de transporte

A pergunta a ser respondida pelo presente ensaio foi: qual a diferença em termos de erosão/deposição máxima e média no reservatório, bem como no transporte de leito, quando

são usadas outras equações de transporte, além da equação padrão aplicada no modelo (Van Rijn)?

Para responder a essa pergunta, foram criados os cenários com as variações da equação de transporte de leito, utilizando-se Meyer-Peter-Muller (1948) e Engelund-Hansen (1967), como mencionado no item 4.3.1. As análises foram feitas comparando os cenários VR_3_A_4, MPM_3_A_4 e EH_3_A_4, que apresentam o mesmo rebaixamento e a mesma granulometria. O rebaixamento de 4 metros foi escolhido por ser o rebaixamento adotado durante a operação de *Flushing* no reservatório em 2008, cenário utilizado para calibração deste modelo.

Pode-se observar, pela Figura 60, que utilizando a equação de Engelund-Hansen os processos de erosão e deposição são intensificados a montante, não havendo significativa alteração à medida que se avança em direção a jusante dentro do reservatório. Uma possível causa deste comportamento é o fato de a magnitude da velocidade do escoamento ter grande influência na mobilização de sedimentos nessa equação (elevada à quinta potência). Contudo, uma análise mais detalhada das diferenças entre as formulações deve ser levada em conta em estudos futuros.

A Tabela 14 apresenta os valores máximos e médios da erosão e da deposição dentro do reservatório, ocorridos durante o período de aplicação da técnica de limpeza de sedimentos. Na Tabela 15 estão as variações percentuais entre os cenários analisados.

Comparando-se MPM com VR, apenas na deposição máxima ocorre um aumento de pequena proporção, enquanto os demais valores sofrem um decréscimo. Já EH, em relação ao cenário base, leva a um acréscimo dos valores máximos, mas diminuição dos valores médios dentro do reservatório.

Tabela 14. Erosão e deposição máximas e médias para as diferentes equações utilizadas.

Erosão e deposição	Equação		
	VR	MPM	EH
Deposição máxima (m)	1,20	1,25	2,04
Erosão máxima (m)	-1,23	-1,09	-1,57
Deposição média (m)	0,15	0,10	0,12
Erosão média (m)	-0,29	-0,18	-0,26

Figura 59. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário MPM_3_A_4.

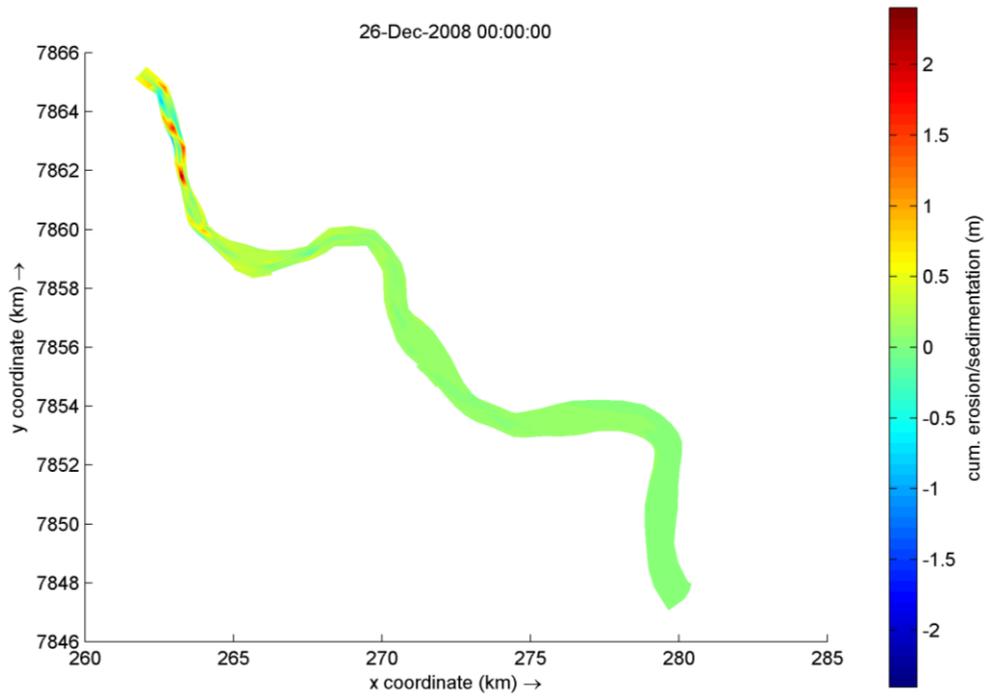


Figura 60. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário EH_3_A_4.

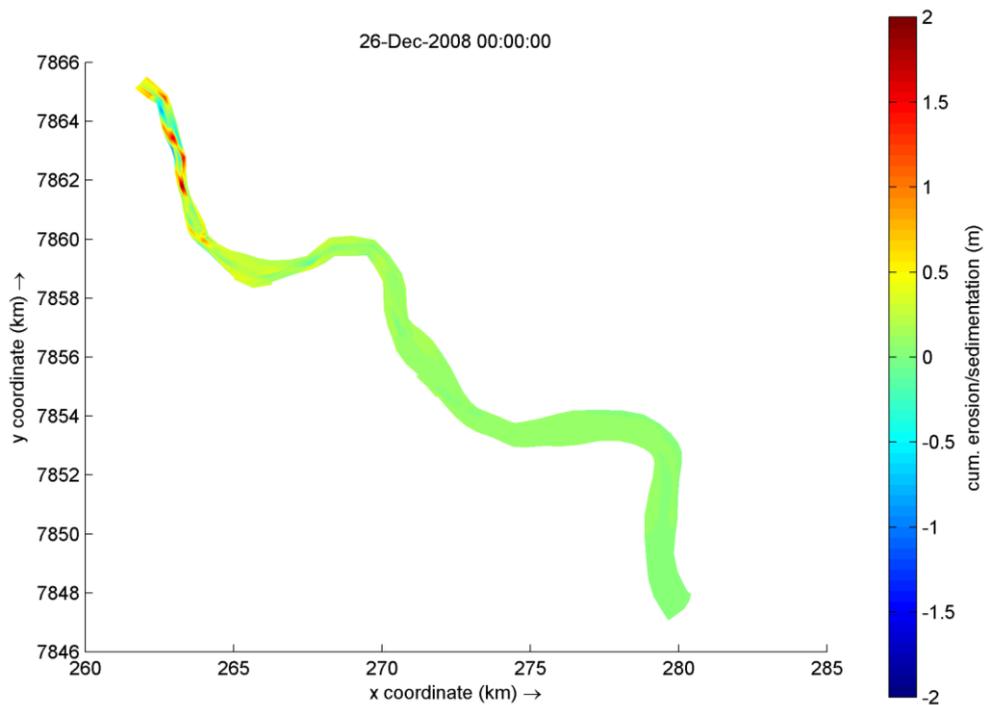


Tabela 15. Aumento/diminuição percentual entre os valores máximos e médios dos cenários com diferentes equações.

Erosão e deposição	Equação		
	MPM/VR	EH/MPM	EH/VR
Deposição máxima	4%	63%	70%
Erosão máxima	-11%	44%	28%
Deposição média	-30%	15%	-19%
Erosão média	-39%	48%	-10%

Observando-se duas seções no interior do reservatório, R3 a montante (Figura 61) e R11 intermediária (Figura 62) é possível observar que as diferenças se dão principalmente a montante, não havendo alteração significativa na evolução do leito da seção R11. Uma possível explicação é a dependência da magnitude da velocidade nas formulações, que é superior a montante. Ainda, percebe-se que MPM e EH resultam em uma sedimentação na região mais profunda da seção R3, o que não ocorre com o uso de Van Rijn.

Figura 61. Alterações do leito na seção R3 para os três cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, VR; verde, MPM, vermelho, EH). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.

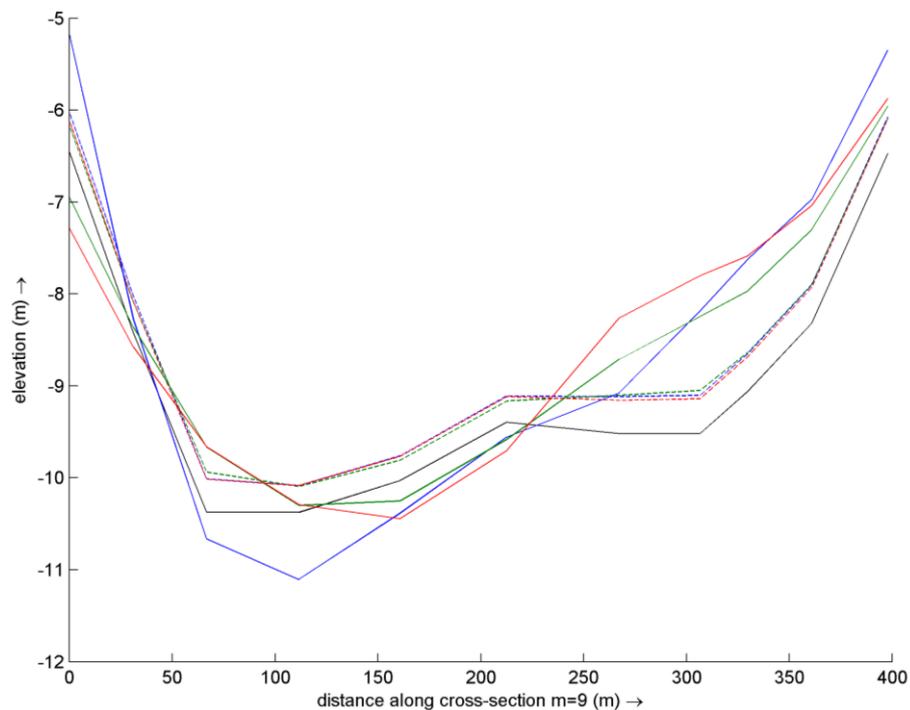
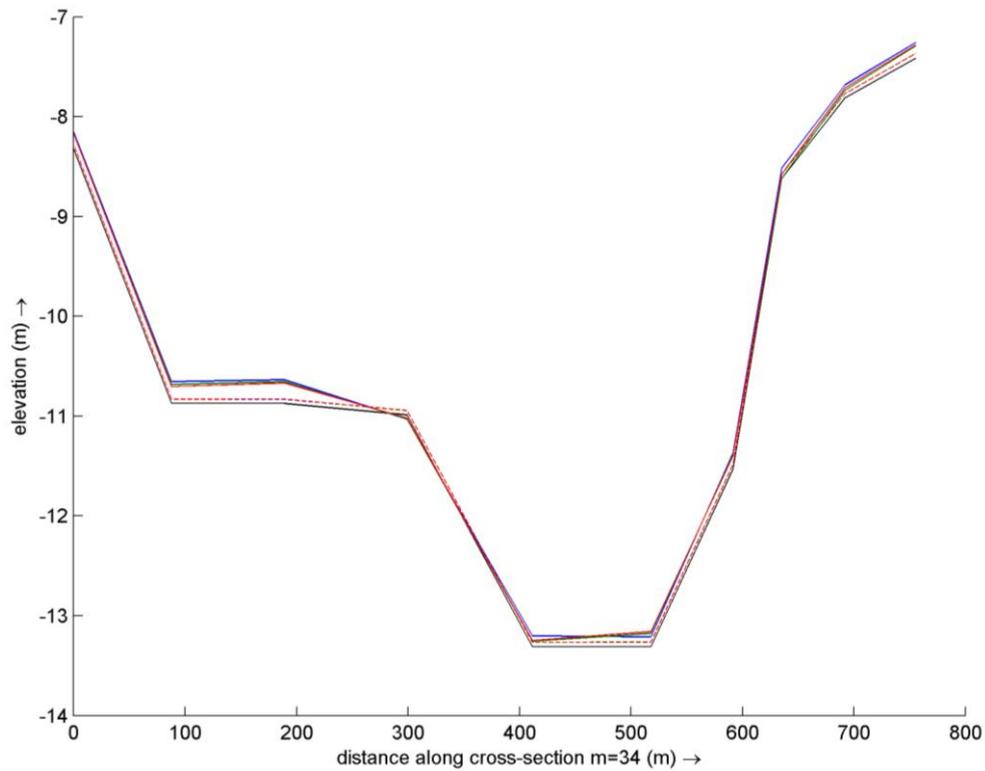


Figura 62. Alterações do leito na seção R11 para os três cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, VR; verde, MPM, vermelho, EH). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.



As maiores diferenças entre estes cenários se encontram no transporte de leito. Pela observação dos mapas (Figura 63 a Figura 65), nota-se que as taxas de transporte utilizando a equação de Van Rijn são menores que as demais (cerca de 18% da taxa com MPM e 6% da taxa com EH), sendo as maiores delas de quando se utiliza a equação de Engelund-Hansen (taxa máxima de $9 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). A principal diferença entre esses equacionamentos é que a equação de Van Rijn diferencia o volume de sedimentos não coesivos mobilizado em transporte de leito e transporte suspenso, enquanto as demais não realizam essa diferenciação, podendo ser a explicação para esse fato.

As seções, apresentadas na Figura 66 e na Figura 67, mostram os picos do transporte de leito, que ocorre no meio do período do *flushing*. Suas estatísticas estão apresentadas na Tabela 16.

Figura 63. Taxa de transporte de leito durante a operação de gestão de sedimentos (21 de dezembro) do cenário VR_3_A_4.

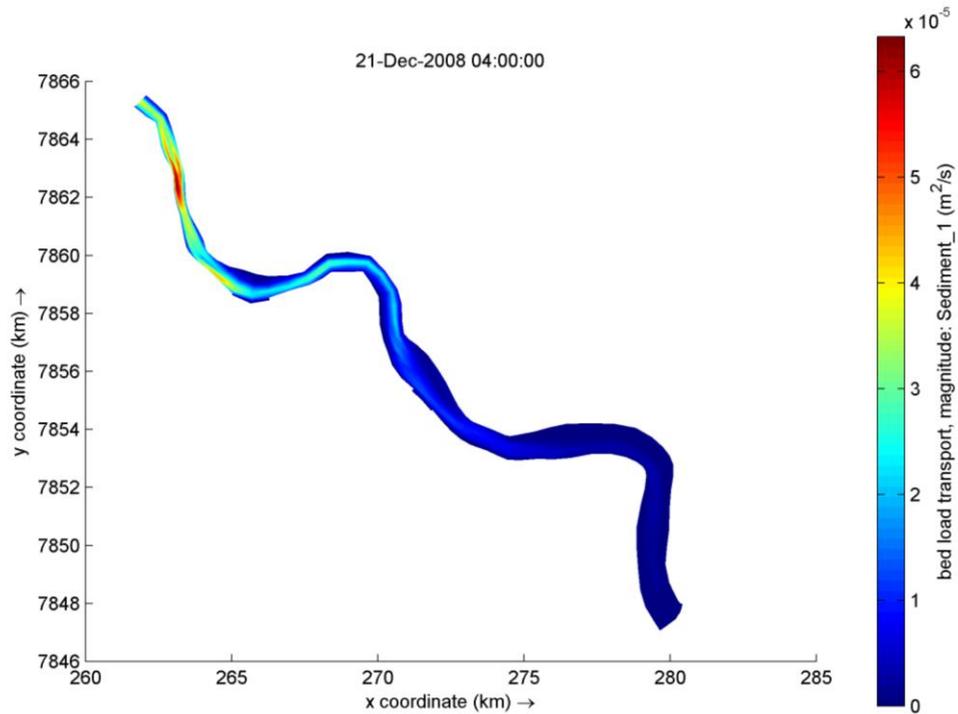


Figura 64. Taxa de transporte de leito durante a operação de gestão de sedimentos (21 de dezembro) do cenário MPM_3_A_4.

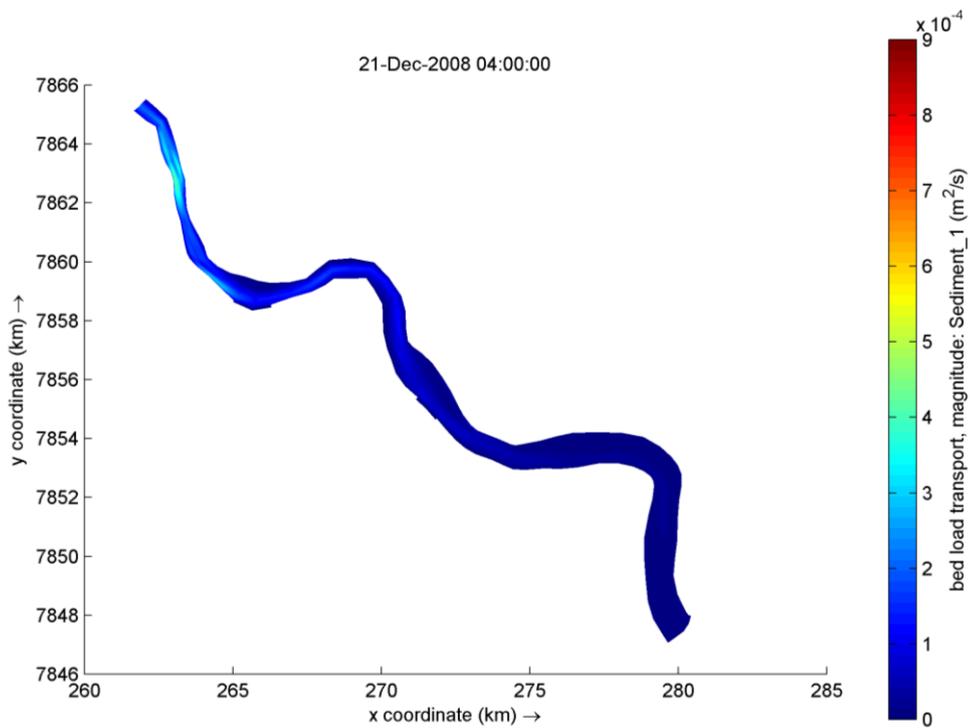


Figura 65. Taxa de transporte de leito durante a operação de gestão de sedimentos (21 de dezembro) do cenário EH_3_A_4.

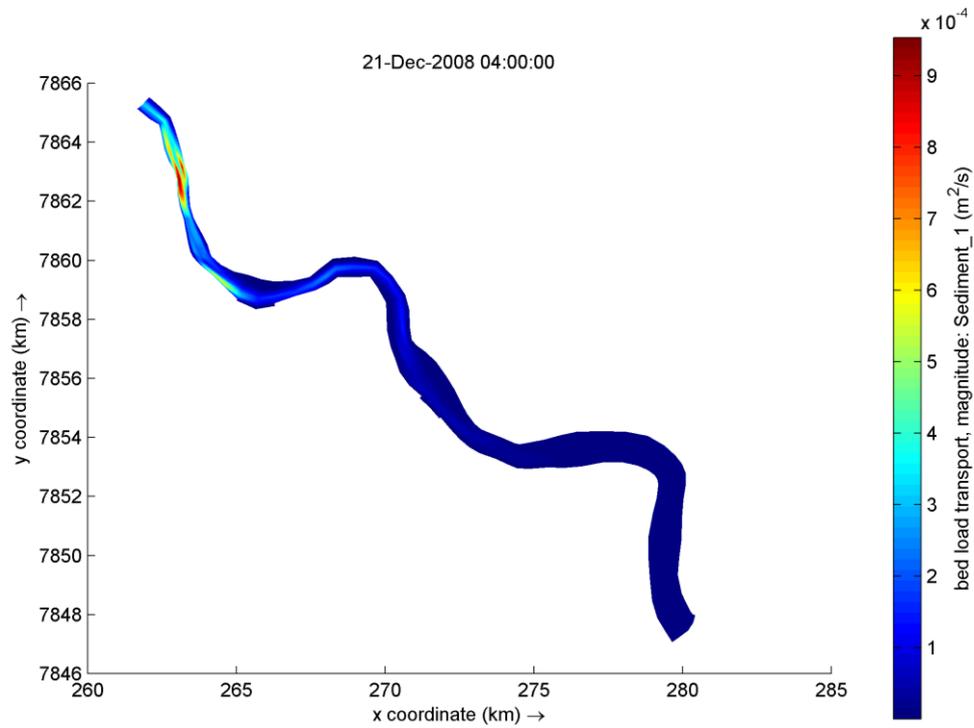


Figura 66. Transporte de leito em seção a montante do reservatório (R3), para as três equações de transporte (azul, VR; verde, MPM; vermelho, EH).

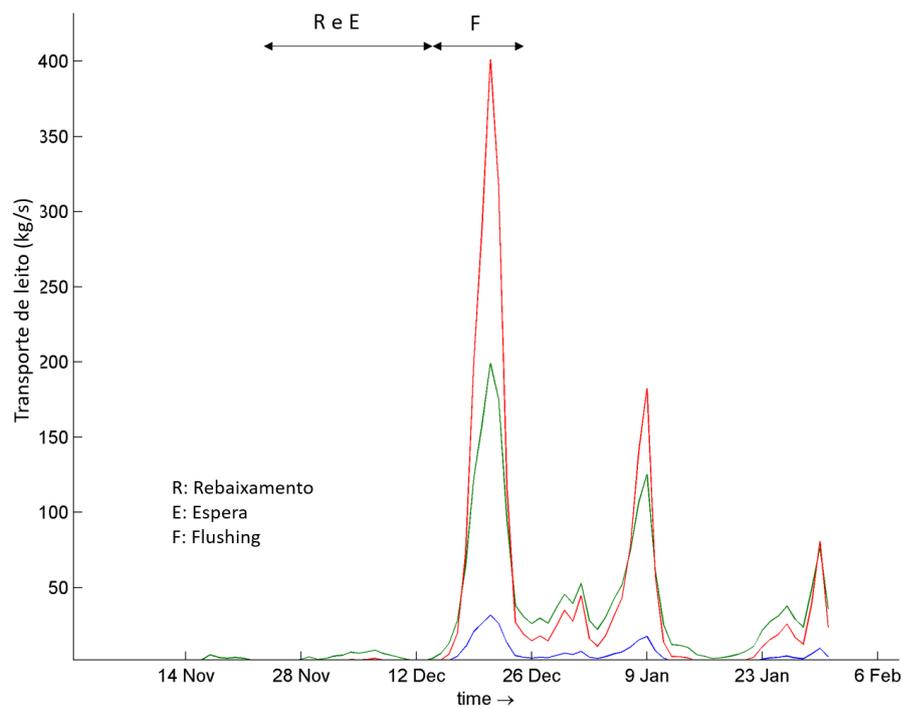


Figura 67. Transporte de leito em seção na porção intermediária do reservatório (R11), para as três equações de transporte (azul, VR; verde, MPM; vermelho, EH).

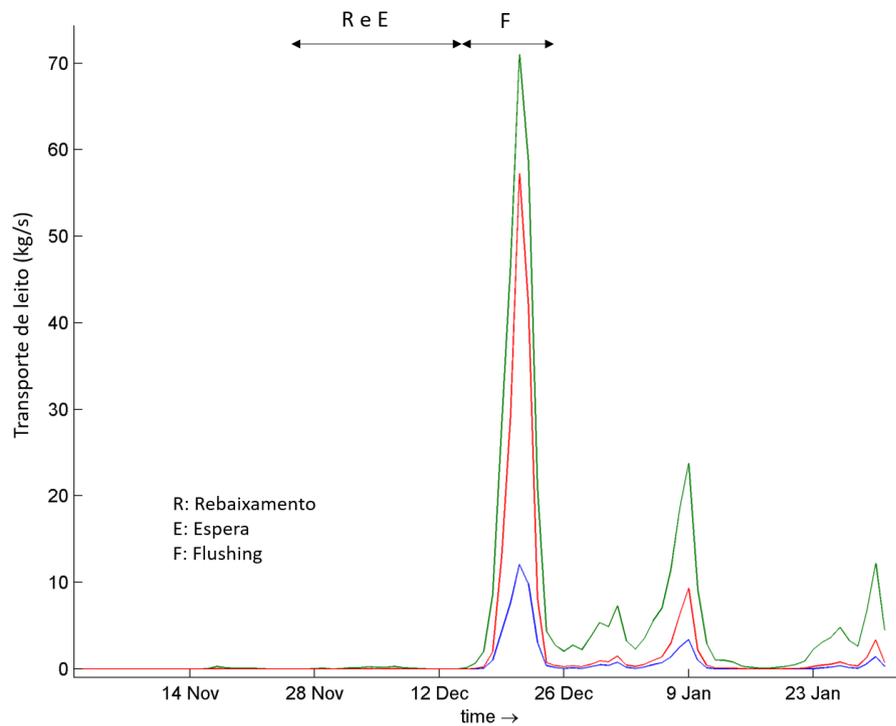


Tabela 16. Transporte de leito máximo e médio, referentes às três equações utilizadas, nas seções selecionadas.

Seção	Equação de transporte de leito					
	VR	MPM	EH	VR	MPM	EH
	Transporte máximo (kg.s ⁻¹)			Transporte médio (kg.s ⁻¹)		
R3	31,6	199,3	401,3	4,9	32,5	48,1
R7	25,2	150,2	211,3	3,2	20,4	22,1
R11	12,1	71,0	57,2	1,3	7,9	4,9

5.3.3. Ensaios de camadas de sedimentos

A pergunta a ser respondida pelo presente ensaio foi: qual a diferença em termos de erosão/deposição máxima e média no reservatório quando são usadas diferentes camadas de sedimentos disponíveis no local? Este ensaio se justifica, porque esta informação nem sempre é facilmente disponível, mas é demandada por alguns modelos hidrodinâmicos de sedimentos.

Os cenários analisados neste ensaio foram VR_1_A_4 e VR_3_A_4, com variação apenas da camada de sedimentos inicial. Os processos de erosão e deposição são intensificados com o aumento da camada, como mostram a Figura 68 e a Figura 69. Em termos de valores máximos e médios, observa-se que a variação foi superior a 50% em todos os casos, ultrapassando 100% de aumento na deposição máxima encontrada no reservatório (Tabela 17).

Figura 68. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_1_A_4.

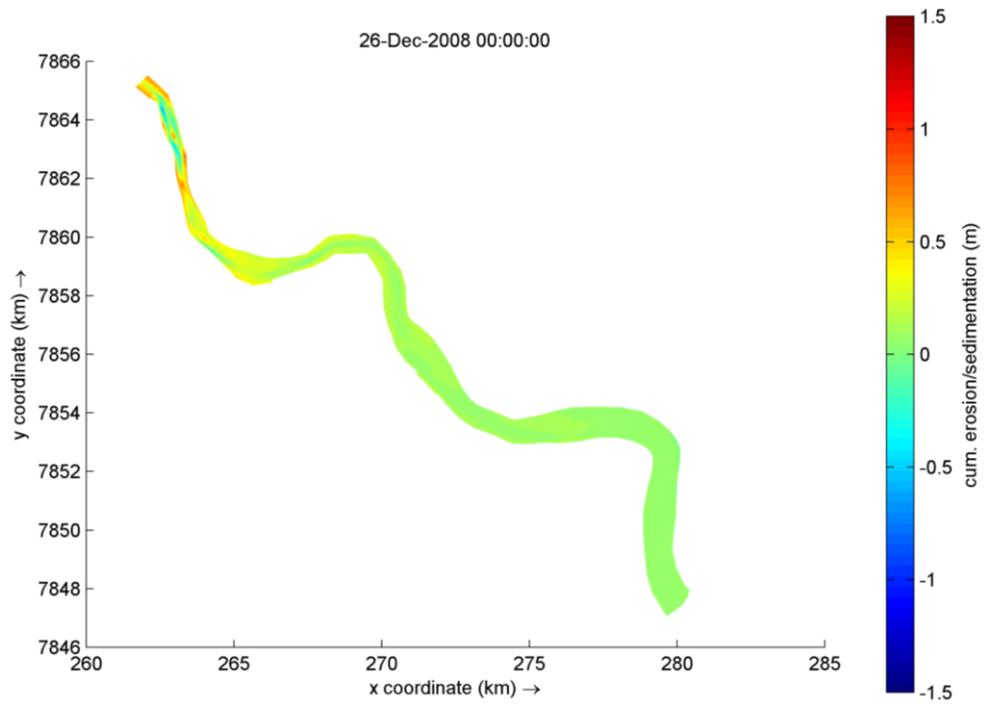


Figura 69. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_4.

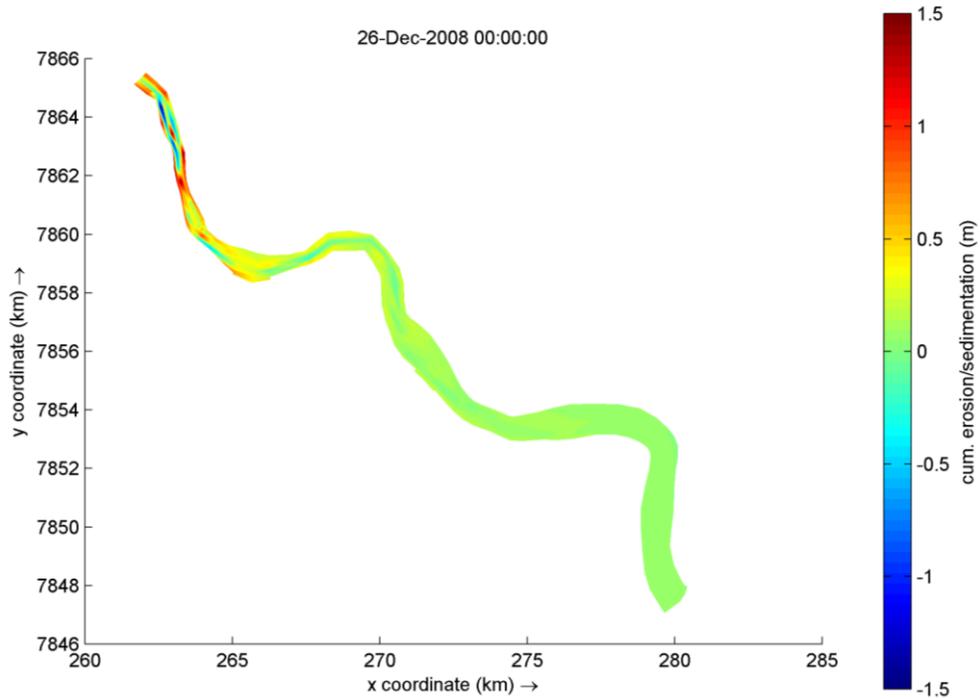


Tabela 17. Erosão e deposição máximas e médias para os cenários com diferentes camadas iniciais de sedimentos.

Erosão e deposição	Camada inicial de sedimentos (m)	
	1 m	3 m
Deposição máxima (m)	0,44	1,20
Erosão máxima (m)	-0,74	-1,23
Deposição média (m)	0,09	0,15
Erosão média (m)	-0,17	-0,29

Observando a evolução do leito, é possível notar que para a seção R3 (Figura 70), a erosão ocorre na região mais profunda do canal, com deposição nos pontos mais elevados. Já na seção R7 (Figura 71), a jusante da anterior, o comportamento é oposto. A partir da seção R11 (Figura 72), as alterações são pouco significativas. Este comportamento pode ser explicado pelo campo de velocidades (Figura 33), que mostra as maiores velocidades na margem direita de ambas as seções. Contudo, a seção R3 apresenta maior profundidade também na margem direita, enquanto a seção R7 é mais rasa nesta margem. Ainda, a seção R7 está localizada logo a jusante de uma ilha, que fica localizada na margem esquerda, tendo um canal na margem direita que leva a essas maiores velocidades.

Figura 70. Alterações do leito na seção R3 para os dois cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, 1 m; vermelho, 3 m). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.

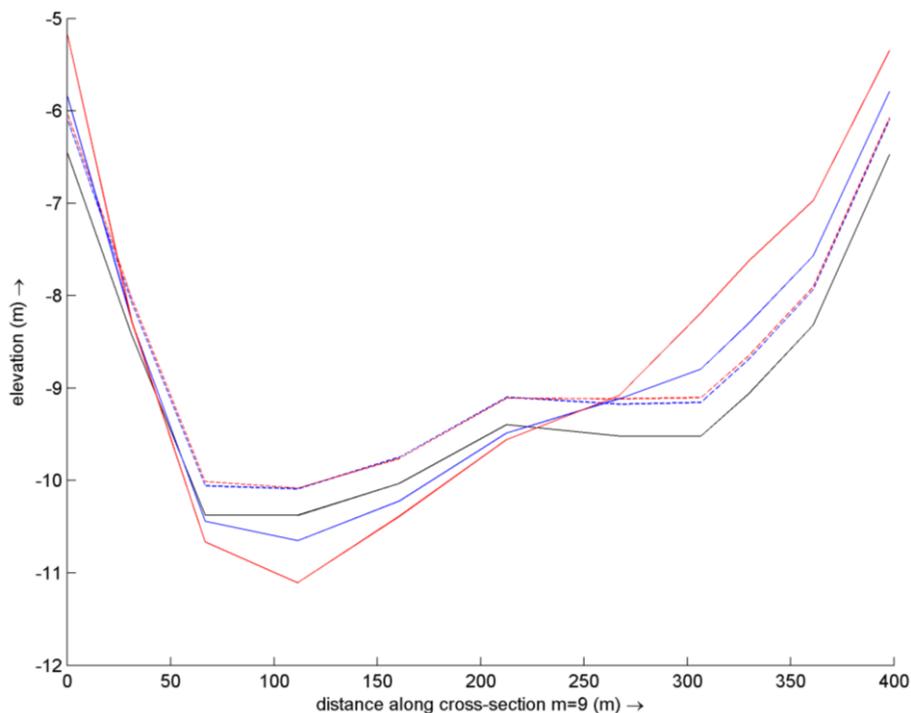


Figura 71. Alterações do leito na seção R7 para os dois cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, 1 m; vermelho, 3 m). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.

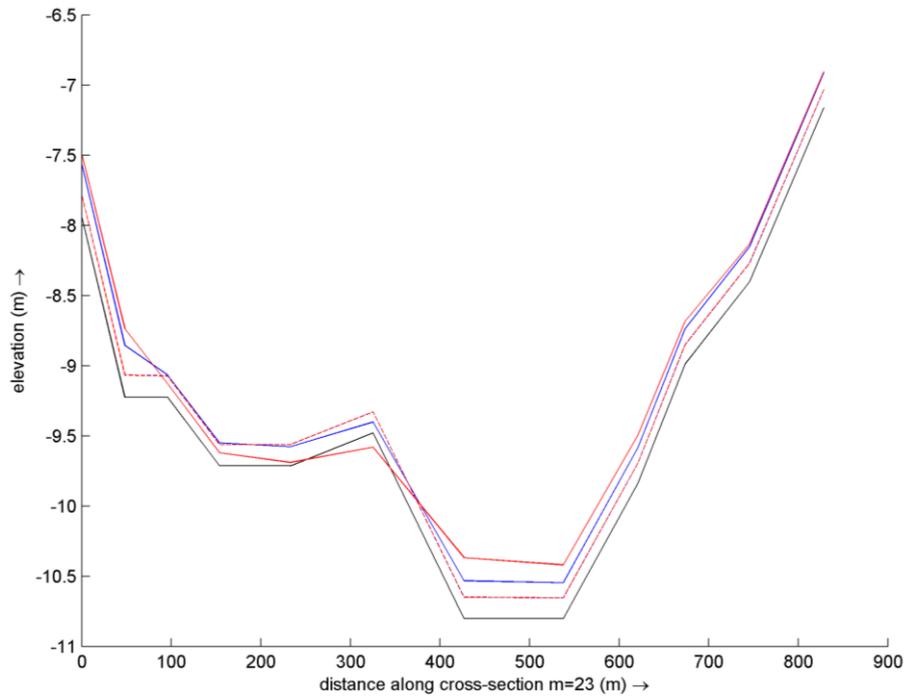
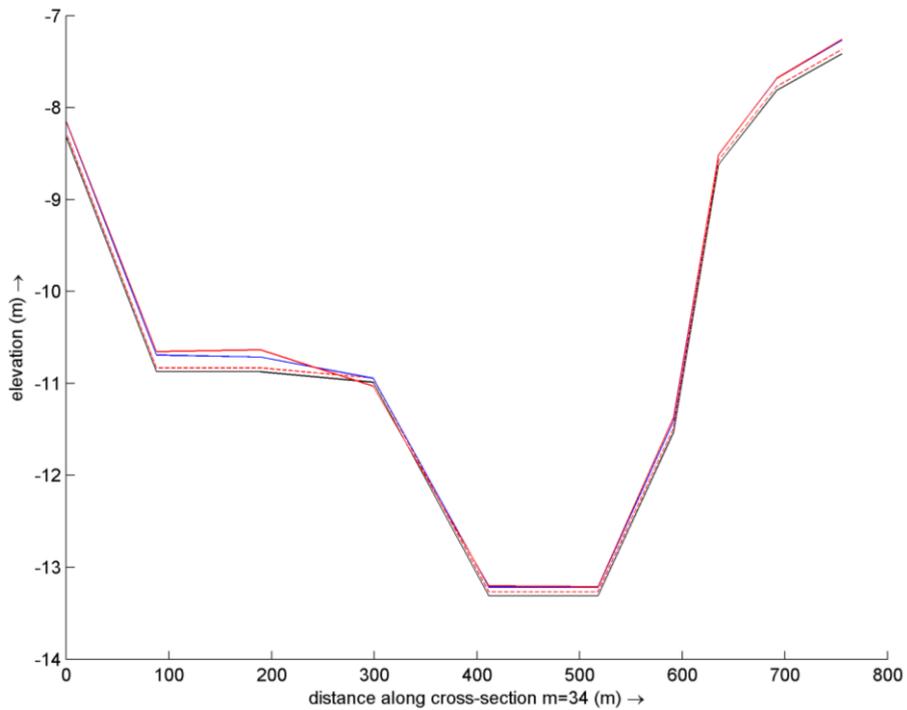
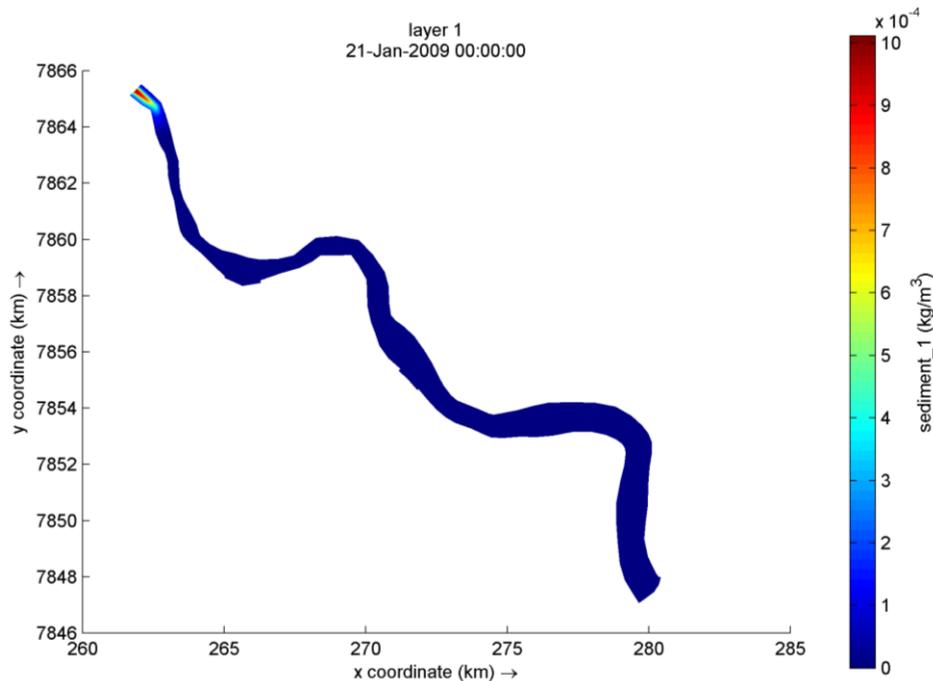


Figura 72. Alterações do leito na seção R11 para os dois cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, 1 m; vermelho, 3 m). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.



Em termos de concentração de sedimentos não coesivos, o ensaio de camada de sedimentos apresentou maior influência que o rebaixamento do nível. A Figura 73 apresenta os valores obtidos para o cenário VR_1_A_4, o cenário VR_3_A_4 está apresentado na Figura 57.

Figura 73. Concentração de sedimentos não coesivos no interior do reservatório no cenário com 1m de camada de sedimentos.



5.3.4. Ensaio de granulometrias

A pergunta a ser respondida pelo presente ensaio foi: qual a diferença em termos de erosão/deposição máxima e média no reservatório quando são usadas diferentes granulometrias esperadas de existirem no local?

Para responder à esta pergunta, os cenários analisados foram VR_3_A_4 e VR_3_B_4, em que apenas a granulometria foi alterada. Observa-se que os valores de erosão e deposição são intensificados com o aumento da granulometria, como mostram os mapas da

Figura 74 e da Figura 75. Atribui-se este resultado, principalmente, à formulação de Van Rijn, que depende diretamente da granulometria do material.

A Tabela 18 indica os valores de erosão e deposição máximas e médias no interior do reservatório para estes dois cenários, onde é possível notar que a deposição máxima do cenário de maior granulometria sofre um acréscimo de 133% de valor em relação a de menor granulometria. Contudo, os valores médios sofrem alterações não muito acima dos 30% de acréscimo.

Tabela 18. Erosão e deposição máximas e médias no interior do reservatório para os cenários com diferentes granulometrias.

Erosão e deposição	Granulometria (μm)	
	125	396
Deposição máxima (m)	1,20	2,80
Erosão máxima (m)	-1,23	-1,66
Deposição média (m)	0,15	0,21
Erosão média (m)	-0,29	-0,38

Figura 74. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_A_4.

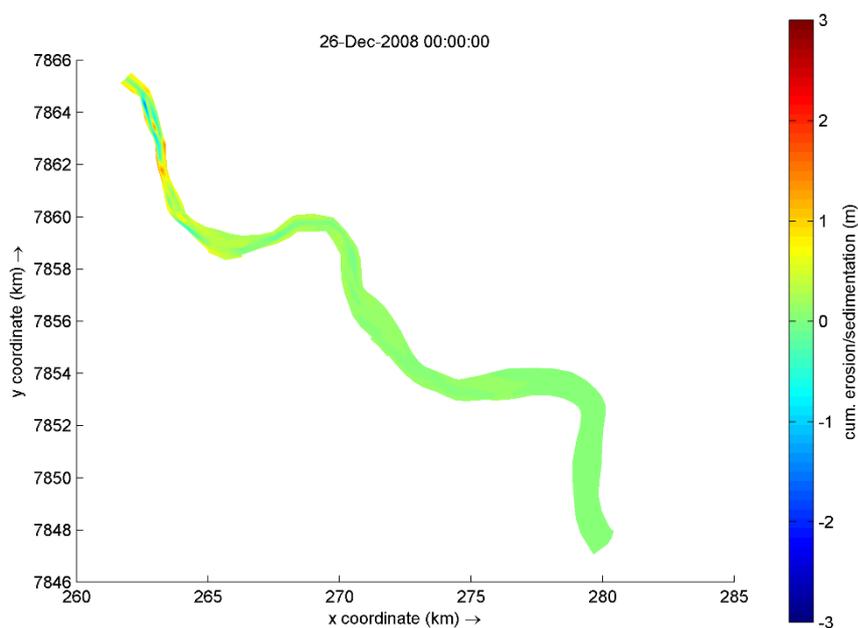
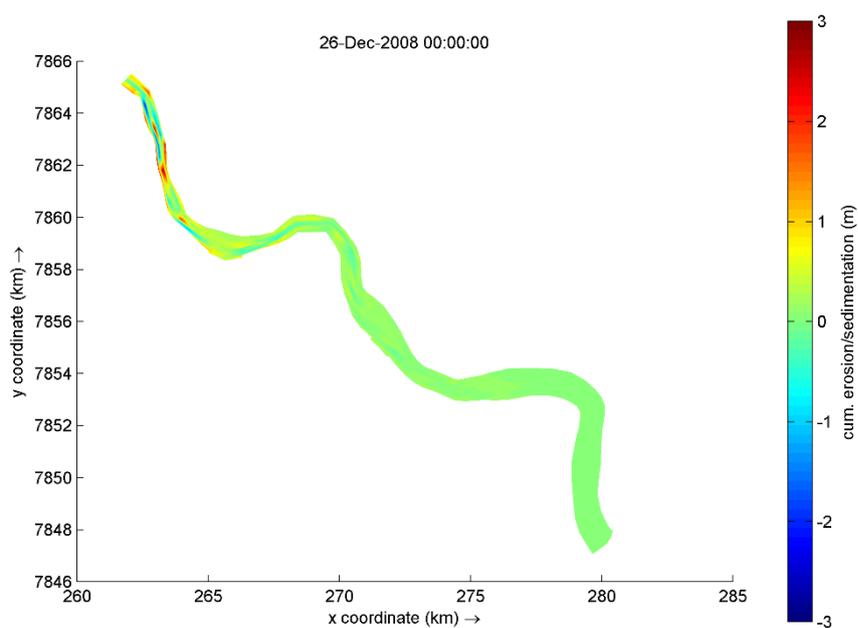


Figura 75. Erosão/sedimentação após a operação de gestão de sedimentos do cenário VR_3_B_4.



As evoluções do leito das seções R3, R7 e R11 são apresentadas na Figura 76, Figura 77 e Figura 78 respectivamente. É possível observar que, para a seção a montante (R3), a maior variação se encontra na erosão do trecho mais profundo, chegando a quase 2 m no cenário de maior granulometria. Já na seção R7, a região mais profunda possui uma deposição de aproximadamente 1 m de altura. A partir da seção R11, as modificações começam a ser menos significativas.

Figura 76. Alterações do leito na seção R3 para os dois cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, granulometria A; vermelho, granulometria B). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.

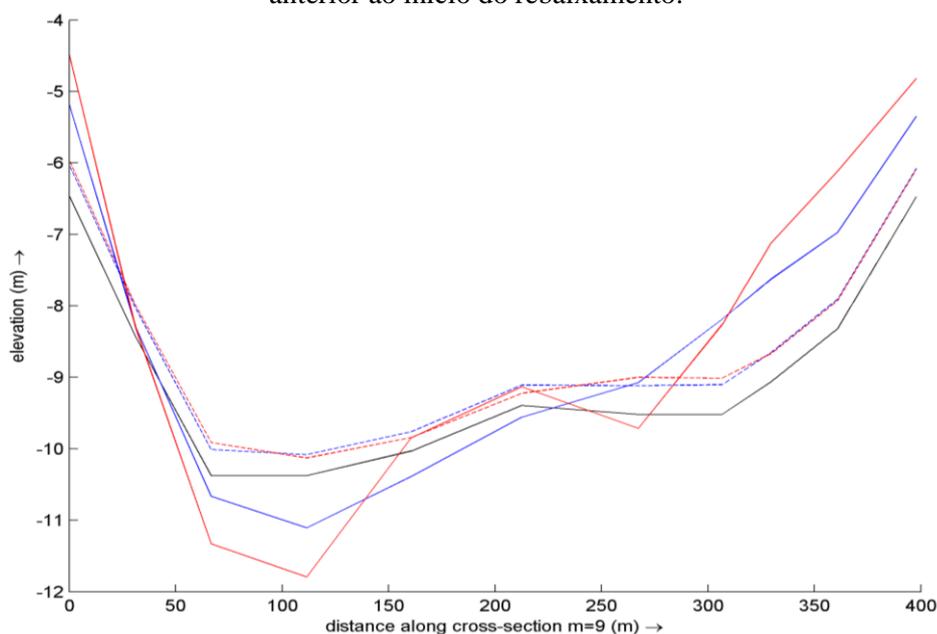


Figura 77. Alterações do leito na seção R7 para os dois cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, granulometria A; vermelho, granulometria B). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.

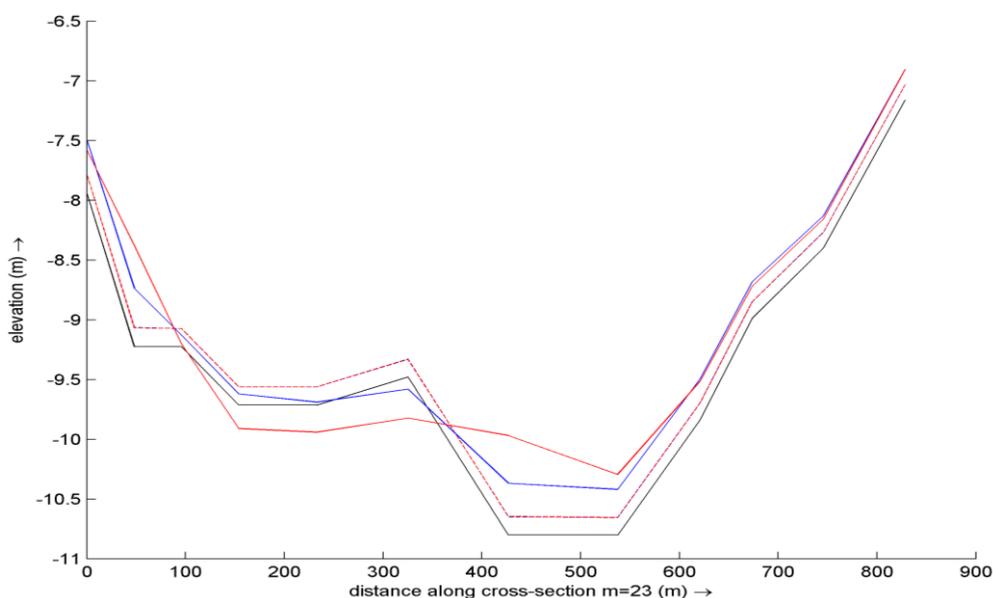
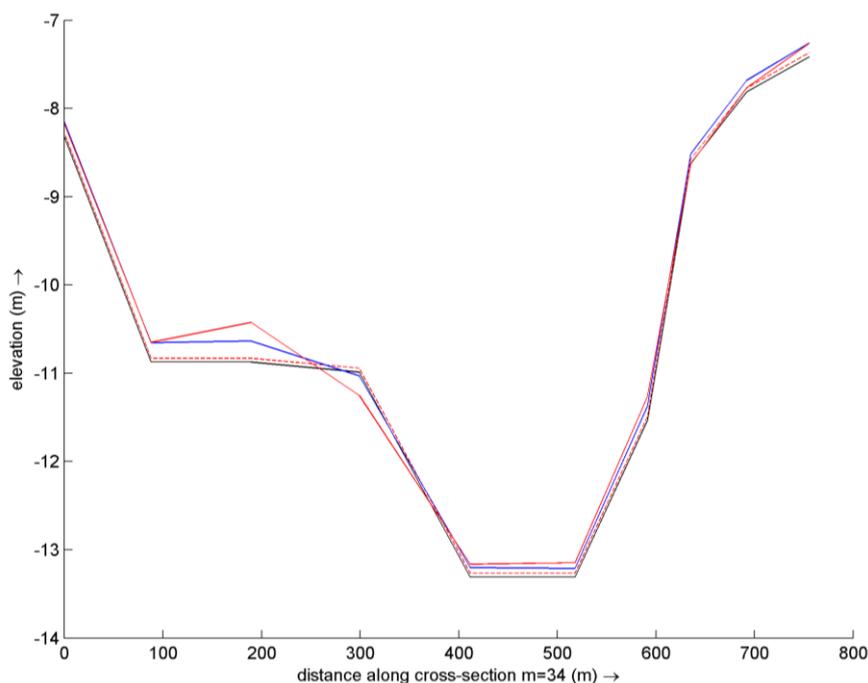


Figura 78. Alterações do leito na seção R11 para os dois cenários simulados (preto, leito original da simulação; azul, granulometria A; vermelho, granulometria B). Em linha tracejada, o leito no período anterior ao início do rebaixamento.



Quanto ao transporte de leito, observam-se grandes variações conforme é alterada a granulometria. Pela Figura 79 e Figura 80, pode-se notar o aumento do pico de transporte, que quase triplica em ambas as seções. Este comportamento era esperado, uma vez que a formulação depende diretamente da granulometria do material de leito (D50) e, neste ensaio, o valor da granulometria é praticamente triplicado. Os valores máximos e médios de transporte de leito das seções analisadas são apresentados na Tabela 19.

Figura 79. Transporte de leito em seção a montante do reservatório (R7), para as duas granulometrias utilizadas (azul, 0,125mm; vermelho, 0,396 mm).

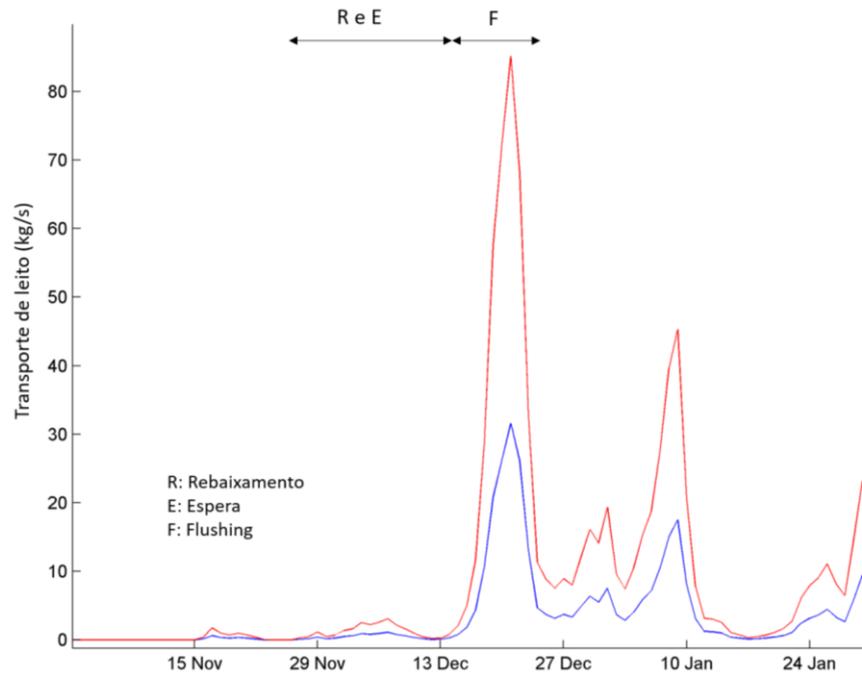


Figura 80. Transporte de leito em seção na parte intermediária (R11) do reservatório, para as duas granulometrias utilizadas (azul, 0,125mm; vermelho, 0,396 mm).

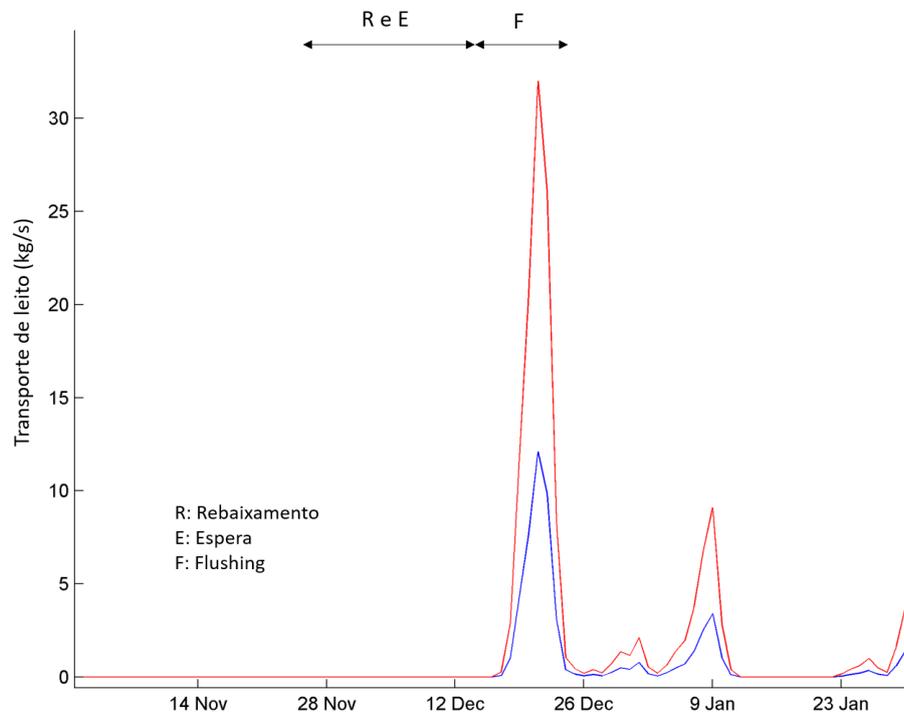


Tabela 19. Transporte de leito máximo e médio, referentes às duas granulometrias utilizadas, nas seções selecionadas.

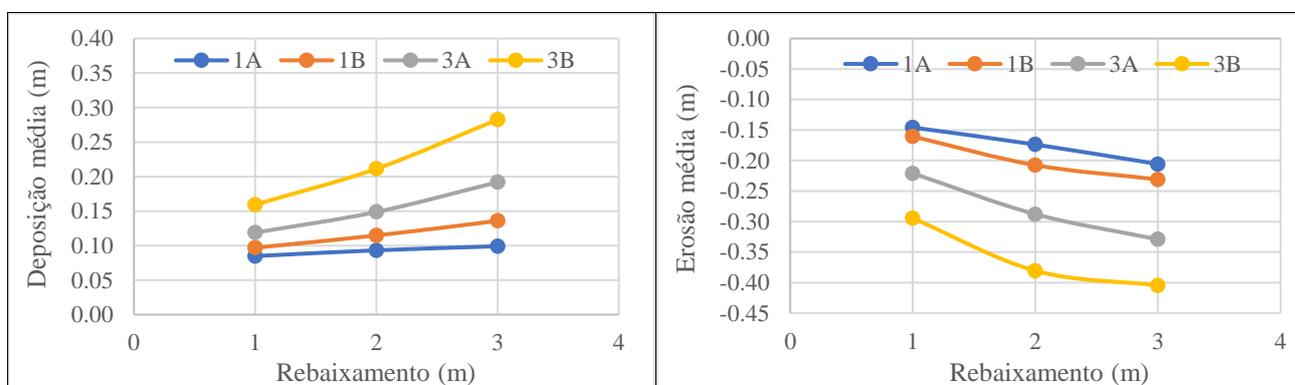
Seção	Granulometria			
	0,125 mm	0,396 mm	0,125 mm	0,396 mm
	Transporte máximo (kg.s ⁻¹)		Transporte médio (kg.s ⁻¹)	
R3	31,6	85,2	4,9	13,1
R7	25,2	69,5	3,2	8,8
R11	12,1	32,0	1,3	3,3

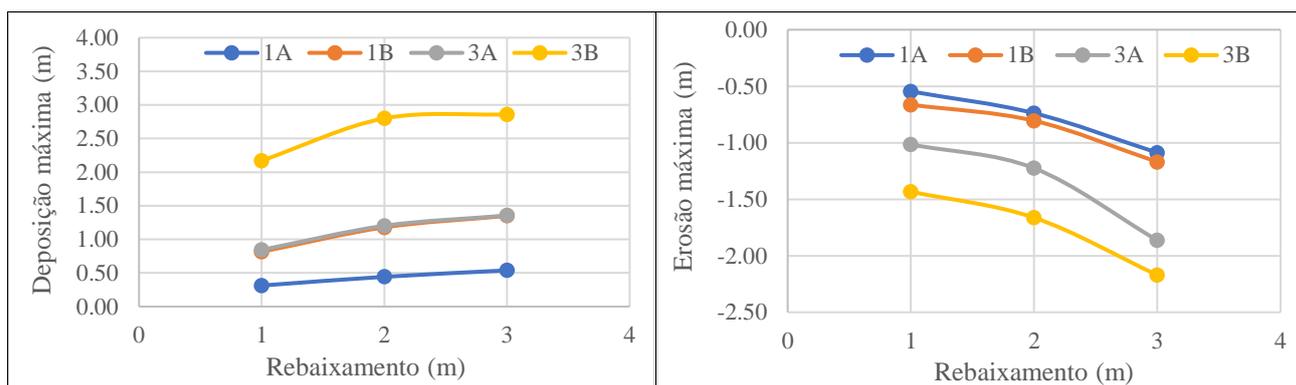
5.4. Resumo dos resultados

A faixa de variação da deposição máxima foi de 0,31 m (cenário VR_1_A_1,5) a 2,86 m (cenário VR_3_B_5), enquanto a de erosão máxima foi de 0,55 m e 2,17 m, para os mesmos cenários. Em termos de gerais de deposição e erosão, o parâmetro que se mostrou mais influente foi a camada de sedimentos no leito, causando variações elevadas entre os cenários, principalmente na comparação entre os de maior granulometria (Figura 81). Contudo, mesmo erodindo mais que os demais casos, sua influência na deposição também é bastante elevada, chegando a atingir pontos de quase 3 m para maiores granulometrias.

Os cenários de diferentes rebaixamentos são os que apresentam maior variação de erosão e deposição em termos de distribuição dentro do reservatório. Quanto maior o rebaixamento, mais a erosão avança em seu interior, como mostra a Figura 38. Considerando a relação de deposição/erosão médias, os resultados com maior erosão são os de maiores rebaixamento (com exceção do cenário VR_3_B_4), como mostra a Tabela 20.

Figura 81. Deposição e erosão média e máxima resultantes dos diferentes cenários com a equação de Van Rijn.





A influência da granulometria (dos ensaios de granulometria) pode ser explicada pelas formulações utilizadas. Para o cálculo da erosão dos sedimentos não coesivos, é utilizada a concentração e referência de Van Rijn, que depende diretamente da granulometria do material (item 3.5.5). Quanto maior a granulometria, maior a concentração de referência e, conseqüentemente, maior a erosão. Contudo, a deposição também depende desta concentração, as taxas de deposição também se elevam. Assim, mesmo erodindo mais sedimentos que os casos de menor granulometria, este cenário deposita mais, de forma que o transporte total de sedimento não coesivo pouco se altera.

Tabela 20. Relações entre deposição e erosão dos 12 cenários com equação de Van Rijn

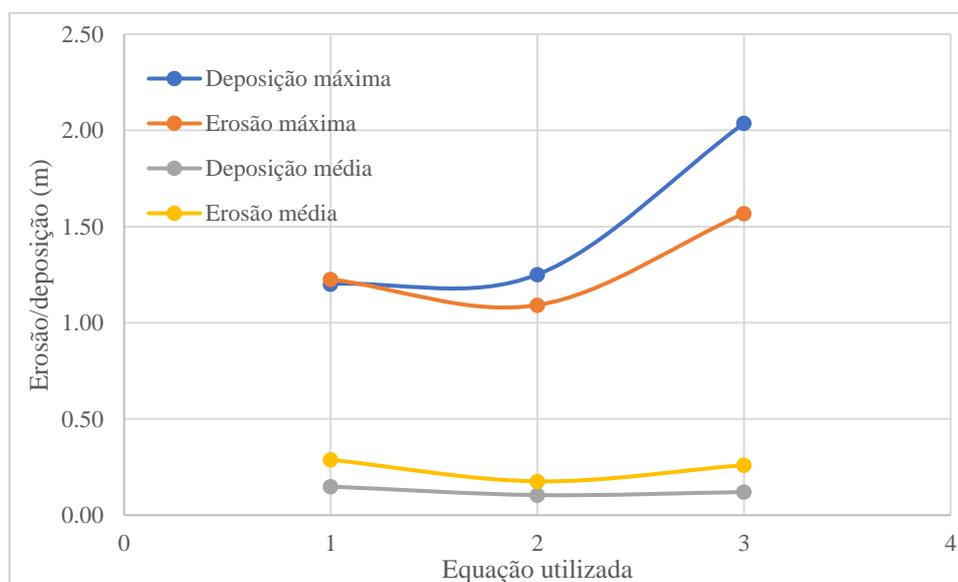
C/G*	Rebaixamento (m)					
	1,5	3	5	1,5	3	5
	Deposição máxima – erosão máxima			Deposição média – erosão média		
1A	-0,23	-0,30	-0,55	-0,06	-0,08	-0,11
1B	0,15	0,37	0,18	-0,06	-0,09	-0,10
3A	-0,17	-0,02	-0,51	-0,10	-0,14	-0,14
3B	0,74	1,14	0,69	-0,14	-0,17	-0,12

*C/G: camada/granulometria.

Entre os cenários com diferentes equações, a Figura 82 mostra que utilizando as equações de Meyer-Peter-Muller e Engelund-Hansen, as variações entre os valores obtidos de deposição máxima e erosão máxima aumentam em relação a utilização de Van Rijn. MPM aumenta a deposição máxima em 8% em relação a Van Rijn, diminuindo a erosão máxima em 11%. As maiores variações se encontram entre EH e VR, aumento de 70% na deposição máxima e 28% na erosão máxima do primeiro para o segundo. Contudo, para os valores médios, ambos apresentam diminuições, tanto para erosão como para deposição, em relação a VR (de 10 a 39%).

Com exceção da deposição máxima, Meyer-Peter-Muller subestima os demais parâmetros em relação a Van Rijn, não se distanciando muito dos valores obtidos por esta, enquanto Engelund-Hansen apresenta variações de quase um metro. Este resultado mostra que os resultados com diferentes equações podem apresentar variações significativas. Em caso de estudos deste tema, pode ser interessante apresentar os resultados em faixas de valores, considerando as diferentes equações.

Figura 82. Erosão e deposição máxima e média obtidas nos cenários de diferentes equações.



No eixo das abscissas: 1: VR; 2: MPM; 3:EH

Entre os cenários de rebaixamento, o valor máximo atingido de concentração de sedimentos no interior do reservatório foi de $1,100 \text{ kg.m}^{-3}$, com o rebaixamento de 5 m. Apesar de seu valor máximo não ser muito influenciado pelo rebaixamento, o alcance das concentrações mais elevadas sofre influência, resultando em variações próximas ao barramento. A jusante, a faixa dos valores máximos obtidos é de $0,298 \text{ kg.m}^{-3}$ (no cenário VR_3_A_1,5) e $0,665 \text{ kg.m}^{-3}$ (no cenário VR_3_A_5). Com o rebaixamento, as velocidades do escoamento aumentam, aumentando também suas tensões de cisalhamento, erodindo e transportando mais sedimentos, o que leva ao aumento das concentrações, tanto dentro do reservatório como na sua liberação após o barramento. Já para os demais cenários, não houve alterações significativas na concentração a jusante do vertedouro, quando comparadas as variações dos demais parâmetros para um único rebaixamento.

Com relação ao transporte de leito, dentre os cenários que utilizam a equação de Van Rijn, os que apresentaram maiores variações no transporte foram os com alteração na granulometria. Este comportamento também é pode ser explicado pela formulação (item 3.6.5), uma vez que

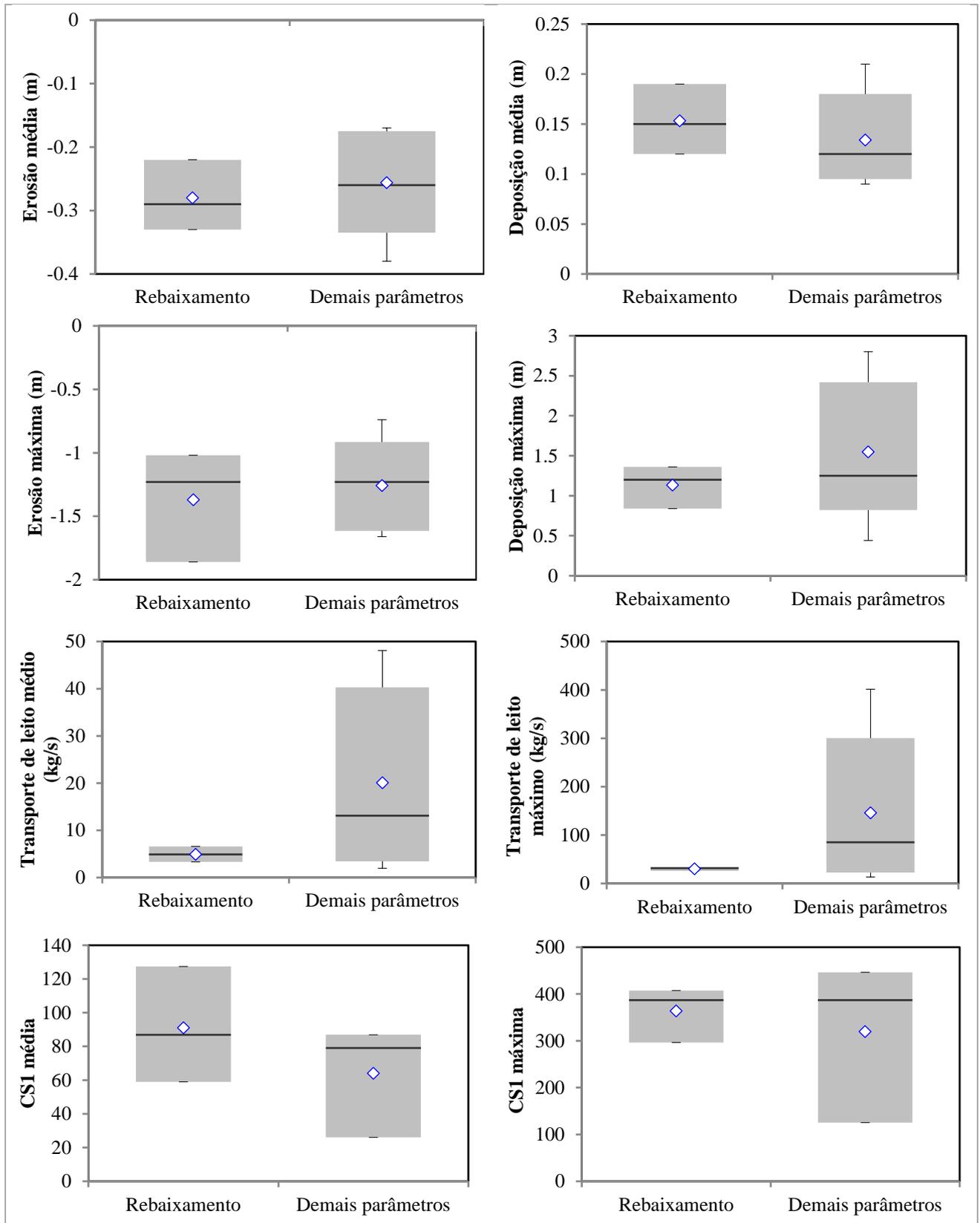
a fórmula de Van Rijn utiliza a concentração de referência para diferenciar os transportes de leito (abaixo desta concentração) e suspensão (acima desta concentração). Assim, com granulometria maior, esta concentração de referência é mais elevada, aumentando o transporte de leito.

As equações, assim como na relação de erosão e deposição, possuem bastante influência na variação do transporte de leito. Quando comparadas entre si, MPM e EH sofrem poucas variações em termos de valores médios ao longo das seções. Contudo, ao comparar com o método de Van Rijn, suas diferenças são bastante significativas. Uma razão possível é que a equação de VR diferencia a o transporte do sedimento coesivo entre transporte de leito e em suspensão, o que as demais não fazem.

A concentração de sedimentos não coesivos no interior do reservatório apresentou valores máximos variando de $0,125 \text{ kg.m}^{-3}$, no cenário VR_1_A_4, a $0,446 \text{ kg.m}^{-3}$, no cenário VR_3_B_4. Suas médias variaram de $0,026$ a $0,127 \text{ kg.m}^{-3}$, nos cenários VR_1_A_4 e VR_3_A_5, respectivamente. Em termos de rebaixamento, essas concentrações não aparentam sofrer influência em termos de distribuição dentro do reservatório, mas seus valores máximos e médios aumentam com o aumento do rebaixamento, sofrendo um acréscimo de aproximadamente 50% nos últimos para as mudanças de 1, 5 a 4 m e de 4 a 5 m. Seu comportamento condiz com o observado na relação erosão/deposição, pois uma vez que os sedimentos são remobilizados, é esperado o aumento da concentração. Observa-se, também, que essa fração de sedimentos não é transportada para a jusante do barramento, possivelmente se depositando ao longo do reservatório.

O último objetivo proposto da presente pesquisa foi analisar se a incerteza dos parâmetros utilizados na modelagem supera a incerteza da técnica aplicada para a remoção dos sedimentos (diferentes rebaixamentos). Na análise conjunta dos resultados, observa-se que, com exceção da concentração máxima de sedimentos não coesivos, a incerteza nos parâmetros supera a incerteza entre as técnicas nos cenários analisados, como mostra a Figura 83. Nela, foram avaliadas as variações dos resultados considerando-se apenas a diferença de rebaixamentos (neste caso, simbolizando as diferentes técnicas) e, depois, considerando-se a diferença devido às variações dos demais parâmetros (granulometria, camada de sedimentos e equação de transporte). A partir dos resultados, constata-se que as incertezas relacionadas aos parâmetros de entrada superam as incertezas da aplicação das diferentes técnicas.

Figura 83. Incertezas entre os cenários analisados.



As concentrações médias são referentes ao dia de maior concentração (21 de dezembro).
O transporte foi avaliado para a seção R3.

6 CONCLUSÕES

Com a crescente demanda por energia, a construção de novas hidrelétricas já é prevista, tanto no Brasil como em outros países. Com isto, estudos sobre a dinâmica dos sedimentos em reservatórios, bem como sobre estratégias de gestão desse sedimento se fazem necessários, tanto para usinas que estão por vir como para as já existentes, visto que muitas já estão assoreadas ou em processos de assoreamento.

Os efeitos que estas técnicas de gestão têm sobre o meio ambiente e sobre a operação destas usinas podem ser elevados, fazendo-se necessários estudos mais direcionados a esta questão. Análises mais simplificadas, como o método de Brune (1953), podem dar uma base inicial sobre a necessidade e viabilidade de certas técnicas, mas estudos mais detalhados podem trazer informações mais precisas, desde que existam os dados necessários para o seu desenvolvimento. Porém, quando analisados estudos deste gênero, existe uma questão anterior ainda, que é a potencialidade e a sensibilidade dos modelos que podem ser usados nestes estudos detalhados.

Nesta questão, este estudo buscou avaliar a influência que determinados parâmetros possuem e a própria diferença de resultados de técnicas como o *pass-through* e o *flushing* de sedimentos. Para isso, foram criados cenários com variações de rebaixamento no nível do reservatório, de equações de transporte de fundo, de granulometria e de camada inicial de sedimentos não coesivos. Com os resultados obtidos e as análises realizadas, concluiu-se que

- quanto maior o rebaixamento do reservatório, maiores a erosão e a deposição em seu interior, ampliando a área interna alcançada pela erosão. Aumentando o rebaixamento, de 1,5 m para 4 m, o acréscimo na erosão média é de cerca de 30%, chegando a erodir até 1,2 m com o rebaixamento intermediário. Comparando-se os resultados dos rebaixamentos extremos, ambos os processos sofrem acréscimos de mais de 50%, chegando a quase 2 m de erosão em alguns pontos com o maior rebaixamento;
- os valores médios de deposição e erosão no interior do reservatório, após o período analisado, sofrem decréscimo ao serem utilizadas as equações de Meyer-Peter-Muller e Engelund-Hansen em comparação à equação de Van Rijn (10% a 30%). Em termos máximos, o comportamento é o oposto, chegando a um acréscimo de até 70% com a utilização da equação de EH;
- quanto ao transporte de leito, a utilização destas equações levou a um acréscimo, chegando a variações de até $370 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ (EH) nos valores máximos e $43 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ nos valores médios a montante do reservatório;

- o rebaixamento do reservatório para a aplicação da operação possui grande influência na concentração de sedimentos coesivos liberada pelo vertedouro. Ao triplicar o rebaixamento, aproximadamente, os resultados de concentração a jusante do barramento mais do que dobram de valor, chegando ao máximo de 664 mg.L^{-1} . Já dentro do reservatório, em termos máximos e médios, sua influência não é significativa, ficando próximo dos 10%. Contudo, as concentrações mais elevadas atingem regiões mais próximas ao barramento;
- a influência do rebaixamento na concentração de sedimentos não coesivos é inferior à de sedimentos coesivos, não ocorrendo alterações significativas em termos de alcance das concentrações mais elevadas. A variação entre o rebaixamento de 1,5 m e os de 4 e 5 m é próxima, em torno de 30% e 37%, respectivamente;
- considerando uma seção a montante do reservatório, região que mais sofre influência da operação, o transporte máximo não sofre alterações maiores que 30%, variando entre 25 e 33 kg.s^{-1} . Já seus valores médios sofrem alterações significativas, quase dobrando os valores obtidos entre os rebaixamentos extremos analisados;
- a variação da camada inicial de sedimentos possui grande influência nos valores de erosão e deposição obtidos, aumentando em mais de 60% os valores médios. Na comparação entre os dois cenários analisados, a deposição máxima chega a 1,2 m, triplicando o resultado obtido para 1 m de camada de sedimentos. Este comportamento se dá também em relação às concentrações de sedimento não coesivo no interior do reservatório;
- em termos de transporte de leito a montante do reservatório, a variação na granulometria e na camada de sedimentos aumentam em 2,5 vezes os resultados, tanto médios como máximos;
- quanto a erosão e deposição no reservatório, a maior influência da granulometria se deu nos valores de deposição máxima, duplicando o resultado com o aumento da granulometria. Em termos médios, sua variação levou a aumentos de cerca de 30 a 40% na erosão e na deposição, respectivamente;
- em termos de erosão e deposição, o parâmetro que mais influenciou os resultados foi a camada inicial de sedimentos, enquanto para o transporte de leito foi a granulometria.
- de maneira geral, as incertezas nos parâmetros superaram as incertezas da variação de rebaixamento (técnicas aplicadas). Estes resultados demonstram que modelos desta complexidade são altamente dependentes dos dados de entrada e, sem a estimativa

correta dos parâmetros, é possível aplicar um rebaixamento maior e, ao final, obter remoções equivalentes a menores rebaixamentos. Em outras palavras, um tomador de decisão pode aplicar um rebaixamento de 5m esperando uma grande remoção de sedimentos do reservatório, mas ao final chegar em uma remoção equivalente a operação prevista para 1m de rebaixamento, porque os dados de entrada não foram bem estimados.

7 TRABALHOS FUTUROS

Este estudo buscou avaliar a influência de determinados parâmetros na eficiência de técnicas de gestão de sedimentos como o *flushing* e o *pass-through*. Contudo, foram feitas análises simplificadas, devido à falta de mais dados disponíveis sobre o local. Fatores como possível estratificação do reservatório, bem como a influência de nutrientes no assoreamento não puderam ser levados em consideração para avaliar uma possível influência. De posse desses dados, seria possível analisar os processos de forma mais completa, a fim de observar influência da temperatura e dos nutrientes no processo de remoção de sedimentos.

O Delft3D é um software que trabalha com modelos mais detalhados, ideal para uma segunda etapa de estudo mais específico. Uma ferramenta que faz análises mais simplificadas, mas com a possibilidade de aplicação também de outras técnicas, bem como de avaliar a questão econômica, é a RESCON 2 (IAHR...). Comparar os resultados obtidos neste estudo com uma análise mais simplificada deste último seria interessante, de forma a avaliar a necessidade de estudos mais detalhados. Possivelmente, a utilização do RESCON 2 poderia caracterizar um estudo inicial, aplicando-se os modelos mais detalhados posteriormente, conforme o interesse e necessidade.

Na questão dos sedimentos em reservatórios, muitos dos reservatórios com problemas de assoreamento no Brasil são em cascata, como Aimorés e Mascarenhas. A aplicação de técnicas de gestão de sedimentos em usinas nesta configuração acarretaria em diversos impactos nos reservatórios localizados a jusante, sendo muito importante o planejamento dessas operações. Contudo, poucos trabalhos levam em consideração a modelagem da configuração em cascata, que poderia facilitar a tomada de decisão. Uma operação em conjunto entre os reservatórios do sistema, que possibilite o controle e a avaliação do impacto da técnica de remoção aplicada, poderia diminuir os efeitos de sua aplicação. Assim, estudos que avaliem a possibilidade dessa operação em conjunto, com diferentes configurações, bem como a sua eficiência, por meio de modelagem numérica (uni, bi ou tridimensional), podem ser uma importante ferramenta de gestão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, A. S. **Análise experimental em modelo físico de estruturas hidráulicas de remoção de sedimentos em barragens: descarregadores de fundo**. Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos. Universidade Federal de Pelotas. 2019.
- AHN, J. *Numerical Modeling of Reservoir Sedimentation and Flushing Processes*. [s.l.] Colorado State University, 2011.
- AHN, J. et al. *Numerical modeling of sediment flushing from Lewis and Clark Lake*. *International Journal of Sediment Research*, v. 28, n. 2, p. 182–193, jun. 2013.
- ALIANÇA ENERGIA. Aliança Geração de Energia S. A. **Parque Gerador – Usinas Hidrelétricas**. Disponível em: <<https://aliancaenergia.com.br/br/nossas-usinas/usina-de-aimores/>>. Acesso em: janeiro de 2019.
- ANA. **GeoNetwork. UHE Aimorés - Dados geográficos contendo limites do reservatório, seções de controle, curvas de nível e o modelo digital de elevação do reservatório**. Agência Nacional de Águas. Disponível em: <<https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home>>.
- ANA. **Boletim de Monitoramento dos Reservatórios da Bacia do rio Doce**. Agência Nacional de Águas. V 1., n.5, dezembro de 2006. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/saladesituacao/BoletinsMensais/RioDoce/Boletim_Monitoramento_Rio_Doce_2006_12.pdf>
- ANEEL. **Relatório de Acompanhamento da Implantação de Empreendimentos de Geração**. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2018.
- ANNANDALE, G. W. et al. *Reservoir Sedimentation: Challenges and Management Strategies*. *Hydrolink*, n. 3, p. 72–75, 2018.
- ANNANDALE, G. W.; MORRIS, G. L.; KARKI, P. *Extending the Life of Reservoirs: Sustainable Sediment Management for Dams and Run-of-River Hydropower*. Washington, DC: World Bank Group, 2016.
- BAOLIGAO, B.; XU, F.; CHEN, X.; WANG, X.; CHEN, W. *Acute impacts of reservoir sediment flushing on fishes in the Yellow River*. *Journal of Hydro-environment Research*, v. 13, p. 26-35, 2015.
- BERNARDO, J. W. Y. *Interpretation and applicability of residence times in reservoirs*. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2013.
- BRUNE, G. M. *Trap efficiency of Reservoir*. *Trans AGU*. vol. 34, p. 3, 1953.
- BUARQUE, D. C. **SIMULAÇÃO DA GERAÇÃO E DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM GRANDES BACIAS: Estudo de caso do rio Madeira**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul., p. 166, 2015.
- BUERMANN, Y. et al. *Suspended silt concentrations in the lower Olifants River (Mpumalanga) and the impact of silt releases from the Phalaborwa Barrage on water quality*

and fish survival. Koedoe, 1995.

CARVALHO, C. J. DE. **Operação Pass Through - UHE Aimorés**. XII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos e I Particles in the Americas. **Anais...** Vitória, ES: ABRHidro, 2018. Disponível em: <<https://www.abrh.org.br/xiiienes/index.php?ID=245>>

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática. 2ª edição, ver., atual e ampliada**. Rio de Janeiro, 2008.

CARVALHO, N. DE O. et al. **Guia de avaliação de Assoreamento de Reservatórios**. p. 140, 2000.

CBDB. Comitê Brasileiro de Barragens. **Main brazilian dams III: design, construction and performance**. ICOLD Publications, Brasil. 437p. 2009.

CHURCHILL, M.A. **Discussion of "Analysis and Use of Reservoirs Sedimentation Data" by L C Gottschalk** *Proceedings of Federal Interagency Sedimentation Conference*, Denver, Co. 1947.

COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

DELTARES. **Delft3D 3D-FLOW user manual**. Deltares, , 2014. Disponível em: <All Papers/D/Deltares 2006 - Delft3D 3D-FLOW user manual.pdf>

EFTHYMIOU, N. P. et al. **Reservoir Conservation Model Rescon 2 Beta**. World Bank Group, 2017. Disponível em: <<https://www.hydropower.org/sediment-management/resources/tool-reservoir-conservation-model-rescon-2-beta>>

ENGELUND, F.; HANSEN, E. **A monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams**. *Teknisk Forlag*, Copenhagen. 1967

EPE. **Balço Energético Nacional - Relatório Síntese do ano base 2018**. Rio de Janeiro: [s.n.].

ESPA, P. et al. **Controlled sediment flushing at the Cancano Reservoir (Italian Alps): Management of the operation and downstream environmental impact**. *Journal of Environmental Management*, v. 182, p. 1–12, 1 nov. 2016.

FAGUNDES, H. D. O.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D. DE. **Automatic calibration of a large-scale sediment model using suspended sediment concentration, water quality, and remote sensing data**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 24, p. 1–18, 25 abr. 2019.

FAN, F. M. et al. **PREVISÃO DE VAZÃO POR ENSEMBLE PARA A UHE AIMORÉS NO RIO DOCE**. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...** Brasília, DF: ABRHidro, 2015

FERLA, R. **Metodologia simplificada para análise de aspectos hidráulicos em rompimento de barragens**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul., 2018.

FORSBERG, B. R. et al. **The potential impact of new Andean dams on Amazon fluvial**

ecosystems. PLoS ONE, v. 12, n. 8, 1 ago. 2017.

GABBUD, C. et al. ***Hydropower Flushing Events Cause Severe Loss of Macrozoobenthos in Alpine Streams***. *Water Resources Research*, p. 56–81, 2019.

GIBSON, S. AND BOYD, P. ***Modeling Long Term Alternatives for Sustainable Sediment Management Using Operational Sediment Transport Rules***. *Reservoir Sedimentation – Scheiss et al. (eds)*, 229-236. 2014.

GRIMARDIAS, D.; GUILLARD, J.; CATTANÉO, F. ***Drawdown flushing of a hydroelectric reservoir on the Rhône River: Impacts on the fish community and implications for the sediment management***. *Journal of Environmental Management*, v. 197, p.239-249, 2017.

HAGHIABI, A. H.; ZAREDEHDASHT, E. ***Evaluation of HEC-RAS Ability in Erosion and Sediment Transport Forecasting***. *World Applied Sciences Journal*, v. 17, n. 11, p. 1490–1497, 2012.

HAUER, C. et al. ***State of the art, shortcomings and future challenges for a sustainable sediment management in hydropower: A review***. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, , 1 dez. 2018.

HAUN, S. et al. ***Three-dimensional measurements and numerical modelling of suspended sediments in a hydropower reservoir***. *Journal of Hydrology*, v. 479, p. 180–188, 4 fev. 2013.

HEALY, K. M. et al. ***State of the Practice of Sediment Management Reservoirs: Minimizing Sedimentation and Removing Deposits***. Proceedings of the 5th Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference and the 10th Federal Interagency Sedimentation Conference. **Anais...**Reno, Nevada: ACWI -Subcommittee on Sedimentation, 2015

HUANG, J.; GREIMANN, B.P. ***User's Manual for SRH-1D 2.0*** (Sedimentation and River Hydraulics – One Dimension Version 2.0), Bureau of Reclamation, Technical Service Center. 2007.

ICOLD. ***Sedimentation and Sustainable Use of Reservoirs and River Systems***, Draft Bulletin 147. 2009.

IHA. Case study - Jirau, Brazil. ***Sediment Management***, n. September, 2017.

JULIEN, P. Y. ***Erosion and sedimentation***. [s.l.] Cambridge University Press, 1994.

JULIEN, P. Y. ***Erosion and Sedimentation***. [s.l.] Press Syndicate of The University of Cambridge, 1998.

KONDOLF, G. M. et al. ***Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents***. *Earth's Future*, v. 2, n. 5, p. 256–280, maio 2014.

LAURIANO, A. W. et al. ***Estudo de ruptura da barragem de Funil: comparação entre os modelos FILDWAV e HEC-RAS***. XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. **Anais...**ABRH, 2009

LANE, E. W. ***The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering***. ASCE Proc 81, 745. 1955.

LEE, C.; FOSTER, G. *Assessing the potential of reservoir outflow management to reduce sedimentation using continuous turbidity monitoring and reservoir modelling*. *Hydrological Processes*, v. 27, n. 10, p. 1426–1439, 2013.

LIU, J.; MINAMI, S.; OTSUKI, H.; LIU, B.; ASHIDA, K. *Environmental impacts of coordinated sediment flushing*. *Journal of Hydraulic Research*, v. 42(5), p. 461-472, 2004.

MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. *A review of erosion and sediment transport models*. *Environmental Modelling and Software*. Anais...Elsevier BV, 2003

MEYER-PETER, E.; MÜLLER, R. “*Formulas for bed load transport.*” In Proceedings of the 2nd Congress IAHR, Stockholm, vol. 2, pages 39–64. 1948.

MOLINAS, A.; YANG, C. T. *Computer program user’s manual for GSTARS (Generalized Stream Tube model for Alluvial River Simulation)*. U.S. Bureau of Reclamation Engineering and Research Center, Denver, CO. 1986.

MOLINAS, A.; YANG, C. T. *Generalized Water Surface Profile Computations*. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 111, n. 3, p. 381–397, 1985.

MORRIS, G. L.; FAN, J. *Reservoir Sedimentation Handbook*. [s.l.] McGraw-Hill Book Co, 1998.

MORRIS, G. L.; HU, G. *HEC-6 modeling of sediment management in Loíza Reservoir, Puerto Rico. Hydraulic Engineering: Saving A Threatened Resource - in Search of Solutions*, Proceedings of the Hydraulic Engineering Sessions at Water Forum ‘92, ASCE, Baltimore, Aug. 2-6 1992, M. Jennings and N.G. Bhowmik, eds, pp. 630-635. 1992.

NEWCOMBE, C. P.; JENSEN, J. O. T. *Channel Suspended Sediment and Fisheries: A Synthesis for Quantitative Assessment of Risk and Impact*. *North American Journal of Fisheries Management*, v. 16, n. 4, p. 693–727, 1996.

OLSEN, N. R. B. *A THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL FOR INTAKES WITH MULTIBLOCK OPTION SSIIM - User ’s Manual*. DEPARTMENT OF CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING THE NORWEGIAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, , 2018.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Histórico da Operação**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao>>

PAIVA, R. C. D. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias. Estudo de caso: bacia do rio Solimões**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

Partheniades, E. “*Erosion and Deposition of Cohesive Soils.*” *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE 91 (HY 1): 105–139. January. 1965.

REN, S.; ZHANG, B.; WANG, W-J.; YUAN, Y.; GUO, C. *Sedimentation and its response to management strategies of the Three Gorges Reservoir, Yangtze River, China*. CATENA,

Eslevier. 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105096>

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

RURALTECH. **Relatório Técnico: Atualização das curvas cota x área x volume da UHE Mascarenhas. Anexo 02 – Levantamentos batimétricos**. 2016.

SAAM, L.; KILIAN, M.; WIEPRECHT, S.; HAUN, STEFAN. *Three-dimensional numerical modelling of reservoir flushing to obtain long-term sediment equilibrium*. E-proceedings of the 38th IAHR World Congress. September 1-6, 2019, Panama City, Panama. Doi: 10.3850/38WC092019-0742

SAWADOGO, O.; BASSON, G. R.; SCHNEIDERBAUER, S. *Physical and coupled fully three-dimensional numerical modeling of pressurized bottom outlet flushing processes in reservoirs*. *International Journal of Sediment Research*, v. 34, n. 5, p. 461–474, 1 out. 2019.

SEMA. **Ata da 80 reunião da câmara técnica permanente de mineração**. Porto Alegre: [s.n.].

SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION. *Determination of fluvial sediment discharge*. Inter-Agency Committee on Water Resources. Report nº14. Washington, DC. 1963.

SUMI, T.; HIROSE, T. *ACCUMULATION OF SEDIMENT IN RESERVOIRS*. [s.l: s.n.].

SUMI, T.; OKANO, M.; TAKATA, Y. *RESERVOIR SEDIMENTATION MANAGEMENT WITH BYPASS TUNNELS IN JAPAN*. Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation. *Anais...* Yichang, China: 2004

TOBÓN, C. A. P. *Metodología para la validación de modelos hidrodinámicos utilizando amplia información de campo: Aplicación a la bahía Meldorf en la costa del mar del Norte alemán*. PhD Thesis. Universidad Nacional de Colombia, 2002.

TORO, F. M. *Verification of the CCHE – 3D Hydrodynamic Model for Open Channel Flow*. Ph. D. Dissertation, The University of Mississippi. 1994.

USACE. *HEC-RAS River Analysis System User's Manual*. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.hec.usace.army.mil>.

USSD. *Modeling Sediment Movement in Reservoirs*. USSD Commi ed. [s.l: s.n.].

WANG, Z. YIN; HU, C. *Strategies for managing reservoir sedimentation*. *International Journal of Sediment Research*, v. 24, n. 4, p. 369–384, dez. 2009.

WHITE, W. R. *Evacuation of Sediment from Reservoirs*, Thomas Telford, London, UK. 2001.

YANG, C. T.; AHN, J. *GSTARS4 User's Manual*. Colorado State University, , 2011.

YANG C. T. and Simões F. J. M. *User's manual for GSTARS3 (Generalized Sediment Transport model for Alluvial River Simulation version 3.0)*. Technical Service Center, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, USA. 2002.

YANG, C. T. *Sediment transport: Theory and practice*. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, McGraw-Hill, New York ~reprinted by Krieger, Malabar, Fla, 1996.

VANONI, V. A. *Sedimentation Engineering*. Edition by ASCE. Nova York. 1977.

ANEXO A. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

Tabela 21. Testes de sensibilidade realizados.

ANÁLISE	RDHS* (kg/m ³)	Tensão Sedimentação (N/m ²)	Tensão Erosão (N/m ²)	Taxa erosão (kg/m ² /s)
A**	800	5	11	0.0001
B**	200	5	11	0.0001
C	800	0.001	11	0.001
D	800	0.001	5	0.001
E	800	1	11	0.001
F	800	5	11	0.001

*Reference density for hindered settling

**Os testes de sensibilidade A e B foram feitos com um cenário base diferente dos demais, mas serviram ao propósito de avaliar se a mudança no RDHS causaria muitas mudanças na erosão/deposição.

Figura 84. Erosão e deposição no teste de sensibilidade A.

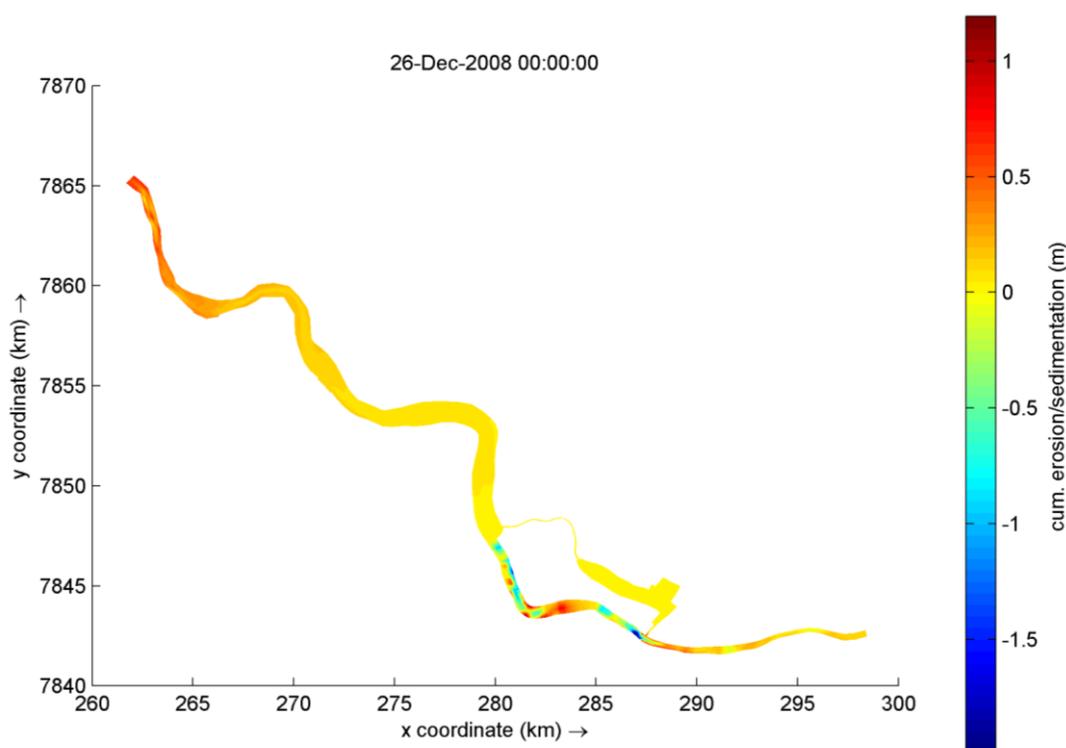


Figura 85. Erosão e deposição no teste de sensibilidade B.

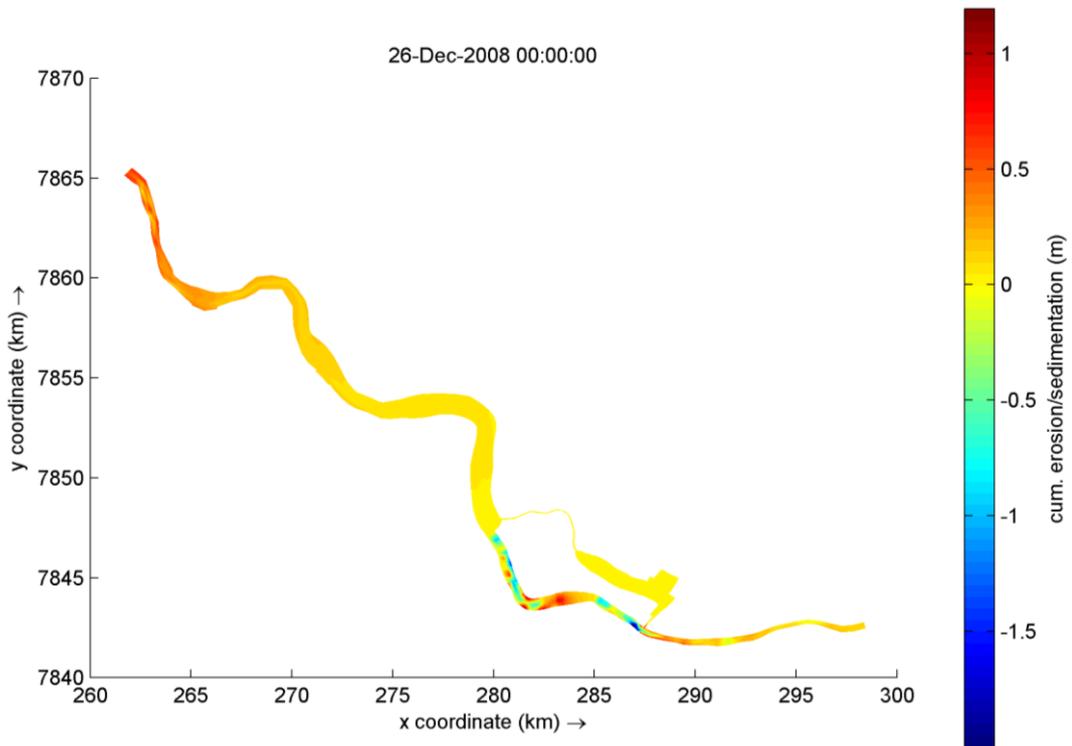


Figura 86. Erosão e deposição no teste de sensibilidade C.

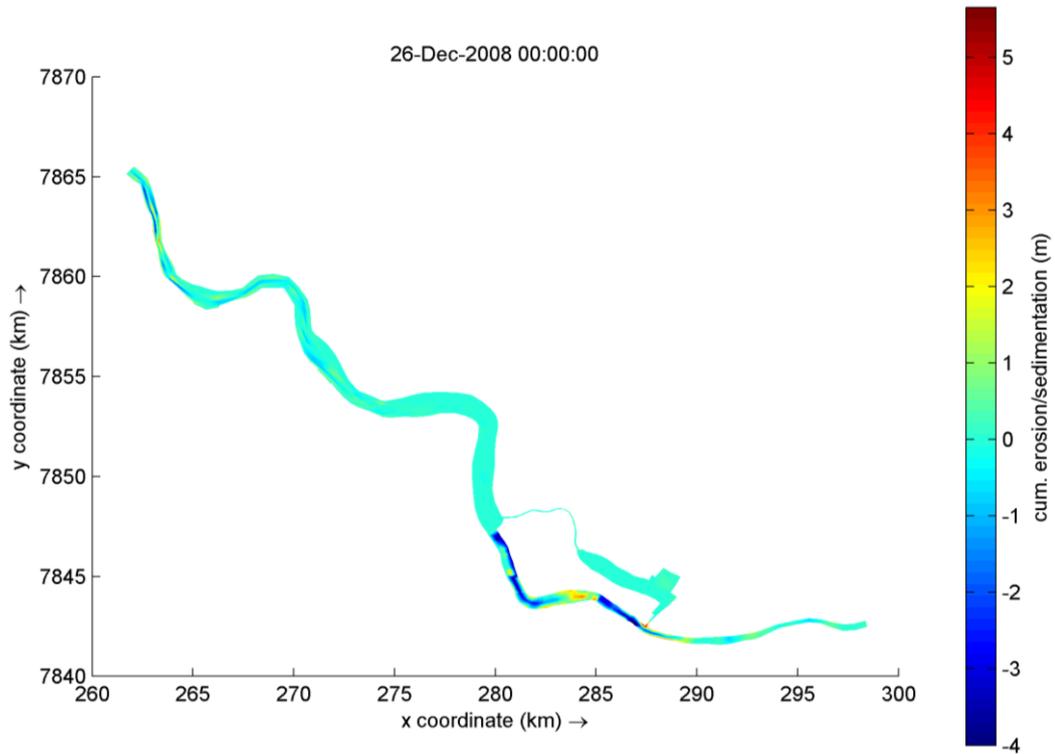


Figura 87. Erosão e deposição no teste de sensibilidade D.

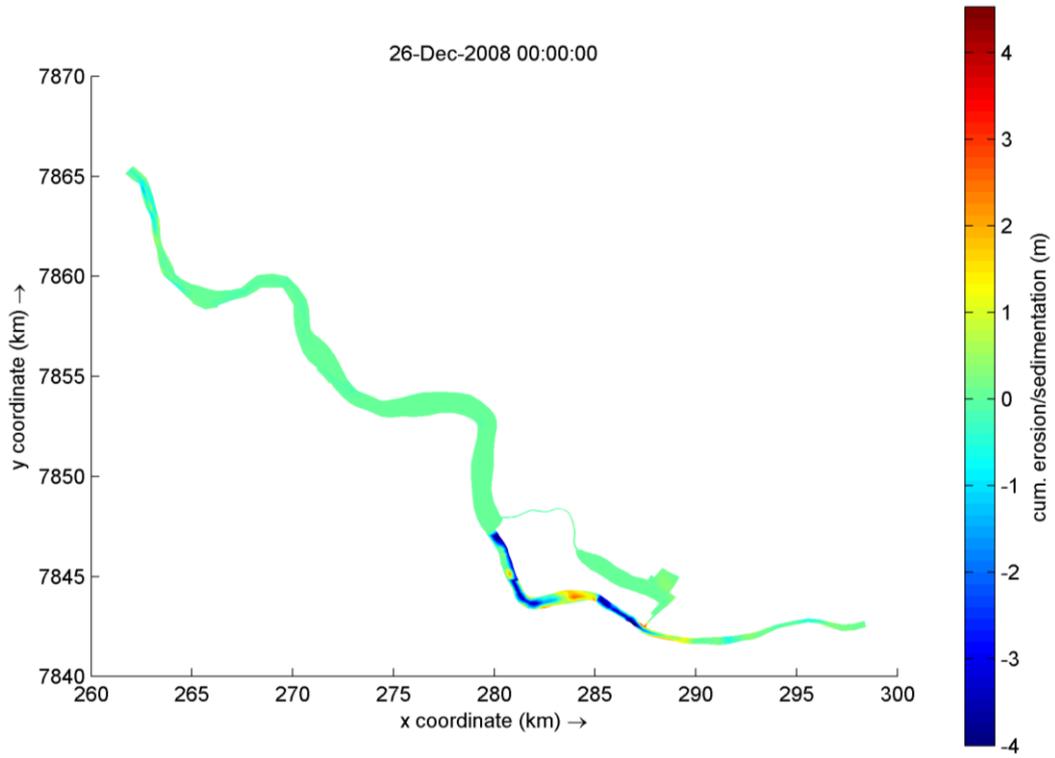


Figura 88. Erosão e deposição no teste de sensibilidade E.

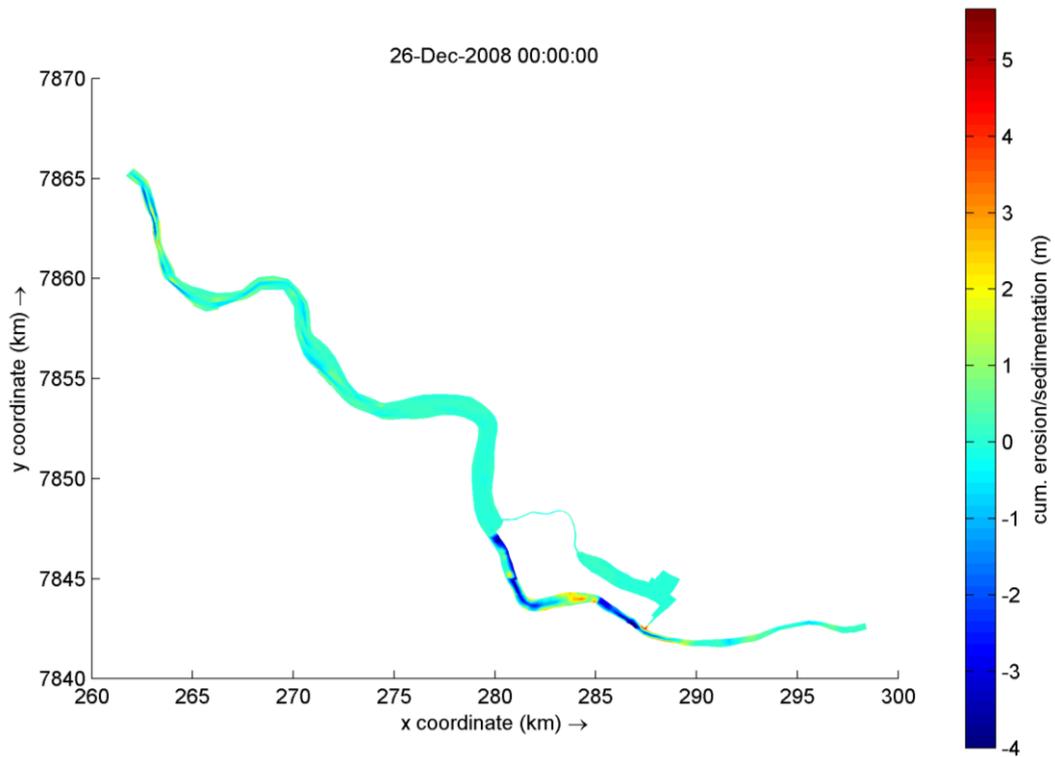


Figura 89. Erosão e deposição no teste de sensibilidade F.

