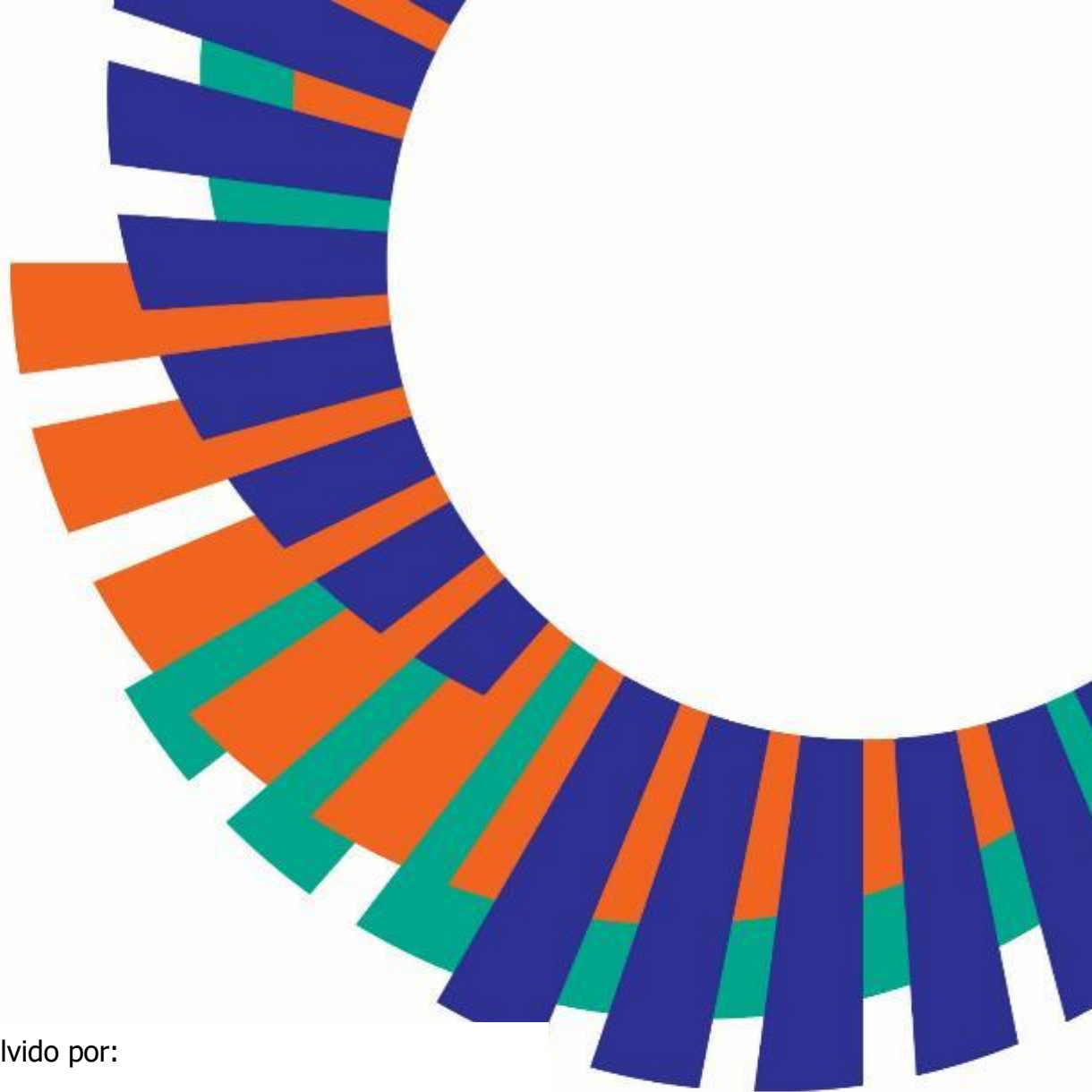




Desenvolvido por:



FUNDAÇÃO
renova

**RELATÓRIO TÉCNICO
ATUALIZAÇÃO ESTUDOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA
BACIA DO RIO DOCE**

SETEMBRO/ 2023



ATUALIZAÇÃO ESTUDOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA BACIA DO RIO DOCE

DATA: 25/09/2023

RHAMA ANALYSIS

Responsável técnico

Eng. PhD Carlos Eduardo Morelli Tucci
E-mail: carlos.tucci@rhama-analysis.com
Telefone: (51) 3287-6887

Responsável comercial e financeiro

Rafael Tucci
E-mail: rafael.tucci@rhama-analysis.com
Telefone: 51 3287 6887

EMPRESA SOLICITANTE

Fundação Renova

Contato: Melina Alencar
E-mail: melina.alencar@fundacaorenova.org
Telefone: 27 999299968

[illegible]

Equipe técnica

Profissional	Formação	Atividades
Carlos Tucci	Eng. Civil, PhD	Responsável Técnico
Maria Eduarda Alves	Eng. Ambiental MSc	Coordenador Técnico
Gabriele Leão	Eng. Ambiental	Equipe técnica



Sumário

1. INTRODUÇÃO	23
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	23
1.2. Objetivo	25
1.3. Avaliação do atendimento às Notas Técnicas da GT-GRSA	25
1.4. Resumo das demandas	27
1.5. Considerações gerais de avaliação	28
1.6. Estudos anteriores.....	29
1.7. Estrutura de apresentação do relatório	30
2. MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO DOCE.....	31
2.1. Dados Utilizados.....	31
2.1.1. Dados climatológicos.....	32
2.1.2. Dados pluviométricos.....	33
2.1.3. Dados fluviométricos.....	36
2.1.4. Modelo Digital de Elevação	39
2.1.5. Informações de reservatórios	42
2.1.6. Condições Inicial de Contorno.....	42
2.2. Discretização da bacia do rio Doce	43
2.2.1. Procedimentos Adotados	43
2.2.2. Relevo	44
2.2.3. Rede de Drenagem e Minibacias	44
2.2.4. Definições de sub-bacias	47
2.3. Unidades de resposta hidrológica	48
2.4. Características físicas das minibacias.....	49
2.4.1. Relações Geomorfológicas	49
2.5. Calibração e validação dos parâmetros do modelo hidrológico	50
2.5.1. O Coeficiente de Nash-Sutcliffe das Vazões	51
2.5.2. O Coeficiente de Nash-Sutcliffe dos Logaritmos das Vazões	52
2.5.3. O Erro Relativo de Volume	52
2.5.4. Avaliação do Desempenho	53
2.5.5. Parâmetros fixos.....	53
2.5.6. Calibração hidrológica	55
2.5.7. Validação hidrológica	59
2.5.8. Espacialização dos Resultados.....	63
3. MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA DO RIO DOCE	66
3.1. Dados utilizados	66
3.1.1. Dados de sedimentos em suspensão	66
3.1.2. Dados de sedimentos de leito	69
3.1.3. Condições de Contorno	71
3.1.4. Definição de parâmetros da MUSLE.....	72
3.2. Calibração e validação do modelo de sedimentos.....	73

3.2.1.	Parâmetros Calibráveis.....	75
3.2.2.	Reservatórios.....	76
3.2.3.	Avaliação de desempenho	78
3.2.4.	Resultados da calibração.....	79
3.2.5.	Resultados da validação	81
3.2.6.	Espacialização dos resultados	83
3.2.7.	Dinâmica dos sedimentos	88
3.2.8.	Sedimentos de leito.....	94
3.2.9.	Efeito dos reservatórios	96
3.2.10.	Relação Vazão Líquida <i>versus</i> Vazão Sólida.....	100
4.	RESULTADOS - SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS	103
4.1.	Cenário A	104
4.1.1.	Produção de sedimentos das Sub-bacias	105
4.1.2.	Geração e Transporte de Sedimentos nas sub-bacias e no rio principal.....	107
4.1.3.	Curvas Vazão líquida x Vazão sólida	114
4.2.	Cenário B – Período de Rompimento.....	117
4.2.1.	Estimativa dos volumes de sedimentos acumulados nos trechos e reservatórios	118
4.3.	Cenário C.....	124
4.3.1.	Formulação considerada para ressuspensão e deposição	125
4.3.2.	Material depositado nos trechos	127
4.3.3.	Séries de concentrações e vazões sólidas	137
4.3.4.	Relação vazão sólida e vazão líquida.....	141
4.4.	Cenário Futuro	149
4.4.1.	Contribuição da área extracalha impactada.....	152
4.4.2.	Prognóstico do transporte de sedimentos	153
4.5.	Síntese da discussão	163
4.5.1.	Limitações e Incertezas Associadas	165
5.	CONCLUSÕES.....	168
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	171

Lista de tabelas

Tabela 1. Estações meteorológicas do INMET selecionadas na região da bacia do rio Doce.....	32
Tabela 2. Estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) selecionadas na região da bacia do rio Doce, com dados entre 1970 e 2022. Os valores em negrito indicam as estações fora da bacia.	34
Tabela 3. Estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) selecionadas na região da bacia do rio Doce, com dados entre 1970 e 2022.....	37
Tabela 4. Características das barragens das UHE da bacia do rio Doce.	42
Tabela 5. Parâmetros calibráveis do modelo MGB. Adaptado de Fan e Collischonn (2014).	51
Tabela 6. Classificação adotada para os coeficientes Nash-Sutcliffe (ENS) e Nash-Sutcliffe dos Logaritmos das Vazões (ENSlog)	53
Tabela 7. Classificação adotada para o erro de volume (ΔV).	53
Tabela 8. Valores de albedo adotados para a simulação hidrológica na bacia do rio Doce.....	54
Tabela 9. Valores do índice de área foliar adotados para a simulação hidrológica na bacia do rio Doce.....	54
Tabela 10. Valores da altura das árvores adotados para a simulação hidrológica na bacia do rio Doce.....	54
Tabela 11. Valores de resistência superficial adotados para a simulação hidrológica na bacia do rio Doce.....	55
Tabela 12. Estatísticas calculadas para cada uma das 62 estações selecionadas na bacia do rio Doce e classificação do ajuste conforme Moriasi et al. (2007).	58
Tabela 13. Estatísticas calculadas para cada uma das 62 estações selecionadas na bacia do rio Doce e classificação do ajuste conforme Moriasi et al. (2007).	62
Tabela 14. Estações de sedimentos selecionadas.....	67
Tabela 15. Estações de monitoramento com dados coletados pela RHAMA e correspondentes postos da ANA ou PMQQS existentes no local ou próximos do monitoramento atual.	68
Tabela 16. Postos de monitoramento da Golder Associates.	69
Tabela 17. Estações de monitoramento com dados coletados pela RHAMA, onde serão considerados dados de descarga de leite.	70
Tabela 18. Parâmetros da MUSLE utilizados na simulação.	73
Tabela 19. Classificação adotada para avaliação das simulações em função do PBIAS.....	79
Tabela 20. Valores das estatísticas calculados para cada uma das estações com dados de concentração de sedimentos em suspensão selecionadas na bacia do rio Doce, para o período de calibração (janeiro de 2005 a dezembro de 2014).	80
Tabela 21. Valores das estatísticas calculadas para cada uma das estações com dados de concentração de sedimentos em suspensão selecionadas na bacia do rio Doce, para o período de validação (1998-2004).....	83

Tabela 22. Localidades ao longo do rio Doce para verificação da sazonalidade do transporte de sedimentos em suspensão.	111
Tabela 23. Médias anuais das concentrações de sedimentos em suspensão simuladas para o cenário A, nas 12 localidades selecionadas.....	111
Tabela 24. Médias anuais das vazões líquidas simuladas para o cenário A, nas 12 localidades selecionadas.	111
Tabela 25. Médias anuais das vazões sólidas simuladas para o cenário A, nas 12 localidades selecionadas.	111
Tabela 26. Parâmetros das curvas ajustadas para os postos localizados no rio Doce.....	114
Tabela 27. Volumes depositados de sedimentos contendo rejeitos nos trechos T-6 a T-16 e reservatórios, estimado pela simulação ao final do cenário B.	119
Tabela 28. Volumes de sedimentos depositados e escoados após o rompimento da barragem de Fundão.....	120
Tabela 29. Volumes estimados de sedimentos depositados na intracalha e aqueles depositados nas planícies de inundação após o rompimento da barragem de Fundão.	124
Tabela 30. Estimativa dos volumes específicos de depósitos remanescentes na calha ao longo do rio Doce ao final de cada ano de simulação.....	128
Tabela 31. Estimativa dos volumes específicos de depósitos remanescentes na calha ao longo do rio Doce ao final de cada ano de simulação.....	129
Tabela 32. Balanço entre os volumes de sedimentos depositados e escoados em cada trecho definido no Programa de Manejo de Rejeitos e Reservatórios, no período simulado do cenário C.	149
Tabela 33. Áreas extracalhas impactadas pelo rompimento, vegetada ou de solo exposto, discretizada por trecho de estudo.	152
Tabela 34. Valores de volume total retido no rio Doce e a redução para o período (cenário C).....	163
Tabela 35. Descrição dos pontos de interesse ao longo do rio Doce.....	228
Tabela 36. Picos de vazão observados após o rompimento da barragem de Fundão ao longo do rio Doce.	229
Tabela 37. Concentrações máximas observadas no rio Doce após o evento de rompimento da barragem de Fundão.....	229
Tabela 38. Picos de vazão observados e simulados após o rompimento da barragem de Fundão em diferentes pontos de interesse ao longo do rio Doce, e respectivos tempos decorridos a partir do evento de rompimento da barragem de Fundão.	232
Tabela 39. Concentrações máximas observadas e simuladas em diferentes pontos de interesse ao longo do rio Doce e respectivos tempos decorridos a partir do evento de rompimento da barragem de Fundão.	234

Lista de figuras

Figura 1. Trechos de avaliação ao longo do rio Doce.	32
Figura 2. Localização das estações meteorológicas do INMET selecionadas na região da bacia do rio Doce.....	33
Figura 3. Localização das estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) selecionadas na região da bacia do rio Doce.	36
Figura 4. Localização das estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) selecionadas para uso na simulação hidrológica.	39
Figura 5. Relevo na bacia do rio Doce representado pelo MDE do COPDEM, com resolução espacial de 30m.	40
Figura 6. Modelo Digital do Terreno do rio Doce, com resolução espacial de 1m, com informações de toda a área atingida pelo rompimento da barragem de Fundão.	41
Figura 7. Sessões transversais ao longo do rio Doce (alto, médio e baixo rio Doce) comparando o MDT de 1m com sua versão reamostrada para 30m.	42
Figura 8. Limites da bacia do rio Doce e rede de drenagem definidas com o uso da ferramenta IPH Hydro Tools a partir do MDE de resolução espacial de 30 m.	46
Figura 9. Visão espacial das 2256 minibacias delimitadas para a bacia do rio Doce, com o uso da ferramenta IPH Hydro Tools, a partir do MDE 30 m de resolução.	46
Figura 10. Delimitação de sub-bacias por localização dos postos fluviométricos e pontos de interesse na bacia do rio Doce.	47
Figura 11. Unidades de Resposta Hidrológica (URH) da bacia do rio Doce.	49
Figura 12. Representação de seções transversais naturais dos rios por seções do tipo retangular. Na figura, z representa a cota, w a largura, B a largura da seção, H a profundidade da seção e Ad a área da seção. Adaptado de Paiva (2009).	50
Figura 13. Hidrogramas simulado e observado na estação Fazenda Ocidente (56337000), a estação mais a jusante do rio Gualaxo do Norte. A simulação foi realizada no período de janeiro de 1990 a dezembro de 2014, mas o gráfico apresenta o período de 2006 a 2009 para melhor visualização.	56
Figura 14. Curvas de permanência simulada e observada na estação Fazenda Ocidente (56337000), a estação mais a jusante do rio Gualaxo do Norte, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014.....	56
Figura 15. Hidrogramas simulado e observado na estação Acaiaca (56335001), a estação mais a jusante do rio do Carmo. A simulação foi realizada no período de janeiro de 1990 a dezembro de 2014, mas o gráfico apresenta o período de 2006 a 2009 para melhor visualização.....	57
Figura 16. Curvas de permanência simulada e observada na estação Acaiaca (56335001), a estação mais a jusante do rio do Carmo, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014.....	57
Figura 17. Hidrogramas simulado e observado na estação Fazenda Ocidente (56337000), a estação mais a jusante do rio Gualaxo do Norte, no período	

simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989, mas o gráfico apresenta o período de 1981 a 1983 para melhor visualização.....	60
Figura 18. Curvas de permanência simulada e observada na estação Fazenda Ocidente (56337000), a estação mais a jusante do rio Gualaxo do Norte, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989.....	60
Figura 19. Hidrogramas simulado e observado na estação Acaiaca (56335001), a estação mais a jusante do rio do Carmo, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989, mas o gráfico apresenta o período de 1981 a 1983 para melhor visualização.	61
Figura 20. Curvas de permanência simulada e observada na estação Acaiaca (56335001), a estação mais a jusante do rio do Carmo, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989.....	61
Figura 21. Representação gráfica dos coeficientes de ajuste obtidos para o período de calibração e validação.	63
Figura 22. Coeficiente de Nash-Sutcliffe calculado para cada uma das estações fluviométricas da bacia.	64
Figura 23. Coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões calculado para cada uma das estações fluviométricas da bacia.	64
Figura 24. Erro de volume calculado para cada uma das estações fluviométricas da bacia.....	65
Figura 25. Localização das 31 estações de sedimentos selecionadas na bacia do rio Doce.....	68
Figura 26. Localização de postos de monitoramento da Golder Associates.....	69
Figura 27. Localização das Estações de monitoramento do programa atual com dados coletados pela RHAMA, com dados de descarga de leito e suspensão. .	71
Figura 28. Limite das sub-bacias que contribuem para a seção do rio que possui estações de sedimentos, na bacia do rio Doce, com dados disponíveis.....	74
Figura 29. Representação gráfica dos coeficientes de ajuste obtidos para o período de calibração e validação.	84
Figura 30. Coeficiente de Pearson das concentrações de sedimentos em suspensão (CSS) calculado para cada uma das estações sedimentométricas da bacia.	85
Figura 31. Coeficiente de determinação das concentrações de sedimentos em suspensão (CSS) calculado para cada uma das estações sedimentométricas da bacia.	85
Figura 32. PBIAS das concentrações de sedimentos em suspensão (CSS) calculado para cada uma das estações sedimentométricas da bacia.	86
Figura 33. Coeficiente de Pearson das descargas sólidas em suspensão (Qs) calculado para cada uma das estações sedimentométricas da bacia.	86
Figura 34. Coeficiente de determinação das descargas sólidas em suspensão (Qs) calculado para cada uma das estações sedimentométricas da bacia.	87
Figura 35. Coeficiente PBIAS das descargas sólidas em suspensão (Qs) calculado para cada uma das estações sedimentométricas da bacia.	87
Figura 36. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Porto Firme	

(56075000), no período de calibração (2005 a 2014), para as datas das medições.	88
Figura 37. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Porto Firme (56075000), no período de validação (1998 a 2004), para as datas das medições.	89
Figura 38. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Mário de Carvalho (566960000), no período de calibração (2005 a 2014), para as datas das medições.	89
Figura 39. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Mário de Carvalho (566960000), no período de validação (1998 a 2004), para as datas das medições.	90
Figura 40. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação da CEMIG, no período de calibração (2005 a 2014), para as datas das medições.	90
Figura 41. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação da CEMIG, no período de validação (1998 a 2004), para as datas das medições.	91
Figura 42. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Cachoeira dos Óculos Montante (56539000), no período de calibração (2005 a 2014), para as datas das medições.	91
Figura 43. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Cachoeira dos Óculos Montante (56539000), no período de validação (1998 a 2004), para as datas das medições.	92
Figura 44. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Governador Valadares (56850000), no período de validação (1998 a 2004), para as datas das medições.	92
Figura 45. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Colatina (56994500), no período de calibração (2005 a 2014), para as datas das medições.	93
Figura 46. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Colatina (56994500), no período de validação (1998 a 2004), para as datas das medições.	93
Figura 47. Percentual da carga de leito transportada com relação à carga total simuladas para cada trecho de rio simulado.	95
Figura 48. Sedimentograma da carga de leito simulada na estação Cachoeira dos Óculos Montante.	95
Figura 49. Sedimentograma da carga de leito simulada na estação Governador Valadares.	96

Figura 50. Sedimentograma da carga de leito simulada na estação Colatina...	96
Figura 51. Efeito da presença do reservatório de Risoleta Neves nas a) vazões diárias e b) concentrações de sedimentos em suspensão. Para facilitar a visualização do impacto na concentração de sedimentos, apresenta-se c) um gráfico no período mais curto de 01/07/2008 a 31/07/2009.	97
Figura 52. Efeito da presença do reservatório de Baguari nas a) vazões diárias e b) concentrações de sedimentos em suspensão. Para facilitar a visualização do impacto na concentração de sedimentos, apresenta-se c) um gráfico no período mais curto de 01/07/2008 a 31/07/2009.	98
Figura 53. Efeito da presença do reservatório da UHE Aimorés nas a) vazões diárias e b) concentrações de sedimentos em suspensão. Para facilitar a visualização do impacto na concentração de sedimentos, apresenta-se c) um gráfico no período mais curto de 01/07/2008 a 31/07/2009.	98
Figura 54. Efeito da presença do reservatório da UHE Mascarenhas nas a) vazões diárias e b) concentrações de sedimentos em suspensão. Para facilitar a visualização do impacto na concentração de sedimentos, apresenta-se c) um gráfico no período mais curto de 01/07/2008 a 31/07/2009.	99
Figura 55. Relação Vazão Líquida versus Vazão Sólida, observadas e simuladas, no período de 1998 a 2014, para a estação Fazenda Cachoeira D'Antas (56425000).	100
Figura 56. Relação Vazão Líquida versus Vazão Sólida, observadas e simuladas, no período de 1998 a 2014, para a estação Cachoeira dos Óculos Montante (56539000).	101
Figura 57. Relação Vazão Líquida versus Vazão Sólida, observadas e simuladas, no período de 1998 a 2014, para a estação Governador Valadares (56850000).	101
Figura 58. Relação Vazão Líquida versus Vazão Sólida, observadas e simuladas, no período de 1998 a 2014, para a estação Tumiritinga (56920000).	102
Figura 59. Relação Vazão Líquida versus Vazão Sólida, observadas e simuladas, no período de 1998 a 2014, para a estação Colatina (56994500).	102
Figura 60. Comparação entre as descargas diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Acaiaca Jusante (56335001), no período de 2015 a 2022. Na figura b), o eixo as ordenadas estão em escala logarítmica.	105
Figura 61. Comparação entre as descargas diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Mario de Carvalho (56696000), no período de 2015 a 2022. Na figura b), o eixo as ordenadas estão em escala logarítmica.	106
Figura 62. Comparação entre as descargas diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Naque Velho (56825000), no período de 2015 a 2022. Na figura b), o eixo as ordenadas estão em escala logarítmica.	106
Figura 63. Comparação entre as descargas diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Vila Matias Montante (56891900), no período de 2015 a 2022. Na figura b), o eixo as ordenadas estão em escala logarítmica.	107
Figura 64. Comparação entre as descargas diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação São Sebastião da Encruzilhada (56990000),	

no período de 2015 a 2022. Na figura b), o eixo as ordenadas estão em escala logarítmica.....	107
Figura 65. Carga média anual específica de sedimentos gerada nas minibacias e aportadas aos trechos de rios, no período de 2015 a 2022.....	108
Figura 66. Carga anual específica de sedimentos em suspensão nos trechos de rio da bacia do rio Doce, no período de 2015 a 2022.	109
Figura 67. Carga anual média de longo período de sedimentos em suspensão nos trechos de rio da bacia do rio Doce, no período de 2015 a 2022.....	109
Figura 68. Espacialização das localidades ao longo do rio Doce para verificação da sazonalidade do transporte de sedimentos em suspensão.	110
Figura 69. Caracterização sazonal das vazões simuladas na bacia, nos pontos de interesse.....	113
Figura 70. Vazão sólida x vazão líquida no posto 56425000 Fazenda Cachoeira D'Antas, para a série simulada de 2015 a 2022.	115
Figura 71. Vazão sólida x vazão líquida no posto 56539000 Cachoeira dos Óculos Montante, para a série simulada de 2015 a 2022.....	116
Figura 72. Vazão sólida x vazão líquida no posto 56850000 Governador Valadares, para a série simulada de 2015 a 2022.	116
Figura 73. Vazão sólida x vazão líquida no posto 56920000 Tumiritinga, para a série simulada de 2015 a 2022.....	117
Figura 74. Vazão sólida x vazão líquida no posto 56994500 Colatina, para a série simulada de 2015 a 2022.....	117
Figura 75. Volume de sedimentos [10^3 m^3] depositados ao longo do trecho simulado.....	122
Figura 76. Volume médio de sedimentos [10^3 m^3] depositados nos trechos de interesse.....	123
Figura 78. Variação dos volumes específicos de depósitos remanescentes no leito do rio Doce ao fim de cada ano, e volume estimado inicialmente com o rompimento da barragem de Fundão e propagação da onda de cheia. Os volumes específicos correspondem ao volume do depósito (diferença entre os volumes nos cenários C e A) dividido pelo comprimento do trecho de análise.....	130
Figura 79. Volumes específicos de depósitos remanescentes no leito do rio Doce estimado inicialmente com o rompimento da barragem de Fundão. Os volumes específicos correspondem ao volume do depósito (diferença entre os volumes nos cenários C e A) dividido pelo comprimento do trecho de análise.....	131
Figura 80. Volumes específicos de depósitos remanescentes no leito do rio Doce estimado para o ano de 2022. Os volumes específicos correspondem ao volume do depósito (diferença entre os volumes nos cenários C e A) dividido pelo comprimento do trecho de análise.....	132
Figura 81. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-6, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.....	133
Figura 82. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-7, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.....	133
Figura 83. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-8, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.....	134

Figura 84. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-9, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.....	134
Figura 85. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-10, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.....	134
Figura 86. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-11, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.....	135
Figura 87. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-13, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.....	135
Figura 88. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-14, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.....	135
Figura 89. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-15, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.....	136
Figura 90. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-16, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.....	136
Figura 91. Variação do percentual de volume de depósito inicial reduzido em cada trecho. Quanto maior o percentual reduzido, mais próximo do cenário A se encontra o trecho, em termos de volume depositado.	136
Figura 92. Comparação de séries simuladas para a estação Barra Longa, no rio Gualaxo do Norte, com dados observados no período de dezembro de 2017 a dezembro de 2022.	137
Figura 93. Comparação de séries simuladas para a estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) com dados observados no período.....	138
Figura 94. Comparação de séries simuladas para a estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante) com dados observados no período.	138
Figura 95. Comparação de séries simuladas para a estação 56850000 (Governador Valadares) com dados observados no período.	138
Figura 96. Comparação de séries simuladas para a estação 56920000 (Tumiritinga) com dados observados no período.	139
Figura 97. Comparação de séries simuladas para a estação 56994500 (Colatina) com dados observados no período.	139
Figura 98 - Comparação de séries simuladas para a estação RGN06 com dados observados no período.	139
Figura 99 - Comparação de séries simuladas para a estação RCA02 com dados observados no período.	140
Figura 100 - Comparação de séries simuladas para a estação RDO01 com dados observados no período.	140
Figura 101. Curvas de relação entre vazões líquidas e sólidas simuladas médias, e observadas médias, para os cenários A e C na estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) no período de 2015 a 2022.	142
Figura 102. Curvas de relação entre vazões líquidas e sólidas simuladas médias, e observadas médias, para os cenários A e C na estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos) no período de 2015 a 2022.....	142
Figura 103. Curvas de relação entre vazões líquidas e sólidas simuladas médias, e observadas médias, para os cenários A e C na estação 56850000 (Governador Valadares) no período de 2015 a 2022.	143

Figura 104. Curvas de relação entre vazões líquidas e sólidas simuladas médias, e observadas médias, para os cenários A e C na estação 56920000 (Tumiritinga) no período de 2015 a 2022.	143
Figura 105. Curvas de relação entre vazões líquidas e sólidas simuladas médias, e observadas médias, para os cenários A e C na estação 56994500 (Colatina) no período de 2015 a 2022.	144
Figura 106. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2017 (dezembro).	145
Figura 107. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2018.	146
Figura 108. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2019.	146
Figura 109. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2020.	147
Figura 110. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2021.	147
Figura 111. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2022.	148
Figura 112. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-06 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.	154
Figura 113. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-07 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.	154
Figura 114. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-08 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.	155
Figura 115. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-09 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.	155
Figura 116. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-10 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.	155
Figura 117. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-11 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.	156
Figura 118. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-13 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.	156
Figura 119. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-14 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.	156
Figura 120. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-15 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.	157

Figura 121. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-16 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.	157
Figura 122. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-06 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho. A linha azul indica o percentual esperado (RQ_s) em cada ano. As linhas tracejadas indicam os limites superiores (laranja) e inferiores (verde).	158
Figura 123. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-07 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.	159
Figura 124. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-08 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.	159
Figura 125. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-09 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.	159
Figura 126. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-10 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.	160
Figura 127. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-11 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.	160
Figura 128. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-13 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.	160
Figura 129. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-14 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.	161
Figura 130. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-15 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.	161
Figura 131. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-16 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.	161

Figura 132. Variação percentual média da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), em todos os trechos nas simulações futuras do transporte de sedimentos. A linha tracejada preta indica a tendência geral da variação.....	163
Figura 133. Esquema do balanço de água no solo do modelo MGB para uma URH. Para uma URH (j) de uma minibacia (i), são representados a precipitação (PC), a evaporação (ET) a evapotranspiração (ET), a percolação da água para o aquífero (P) e o fluxo ascendente (D_{cap}) e a geração dos escoamentos superficial (D_{sup}), subsuperficial (D_{int}) e subterrâneo (D_{bas}). Fonte: Buarque (2015). .	194
Figura 134. Esquema dos processos de geração e propagação de escoamentos nas minibacias e propagação de vazão na rede de drenagem, considerando minibacias de cabeceira (esquema inferior) e minibacias intermediárias (esquema superior).....	200
Figura 135. Hidrogramas simulado e observado na estação Ponte Nova (56110005), a estação mais a jusante do rio Piranga, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014. O período apresentado no gráfico é de 2006 a 2009, para melhor visualização.	204
Figura 136. Curvas de permanência simulada e observada na estação Ponte Nova (56110005), a estação mais a jusante do rio Piranga, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014.....	204
Figura 137. Hidrogramas simulado e observado na estação Barra do Cuieté (56940002), a estação mais a jusante do rio Caratinga, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014. O período apresentado no gráfico é de 2006 a 2009, para melhor visualização.	205
Figura 138. Curvas de permanência simulada e observada na estação Barra do Cuieté (56940002), a estação mais a jusante do rio Caratinga, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014.....	205
Figura 139. Hidrogramas simulado e observado na estação São Sebastião da Encruzilhada (56990000), a estação mais a jusante do rio Manhaçu, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014. O período apresentado no gráfico é de 2006 a 2009, para melhor visualização.	205
Figura 140. Curvas de permanência simulada e observada na estação São Sebastião da Encruzilhada (56990000), a estação mais a jusante do rio Manhaçu, no período de janeiro de 1990 a dezembro de 2014.	206
Figura 141. Hidrogramas simulado e observado na estação Naque Velho (56825000), a estação mais a jusante do rio Santo Antônio, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014. O período apresentado no gráfico é de 2006 a 2009, para melhor visualização.	206
Figura 142. Curvas de permanência simulada e observada na estação Naque Velho (56825000), a estação mais a jusante do rio Santo Antônio, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014.....	206
Figura 143. Hidrogramas simulado e observado na estação Mario de Carvalho (56696000), a estação mais a jusante do rio Piracicaba, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014. O período apresentado no gráfico é de 2006 a 2009, para melhor visualização.	207

Figura 144. Curvas de permanência simulada e observada na estação Mario de Carvalho (56696000), a estação mais a jusante do rio Piracicaba, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014.....	207
Figura 145. Hidrogramas simulado e observado na estação Rio Casca (56415000), a estação mais a jusante do rio Casca, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014. O período apresentado no gráfico é de 2006 a 2009, para melhor visualização.	207
Figura 146. Curvas de permanência simulada e observada na estação Rio Casca (56415000), a estação mais a jusante do rio Casca, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014.....	208
Figura 147. Hidrogramas simulado e observado na estação Ponte do Pancas (56995500), a estação mais a jusante do rio Pancas, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014. O período apresentado no gráfico é de 2006 a 2009, para melhor visualização.	208
Figura 148. Curvas de permanência simulada e observada na estação Ponte do Pancas (56995500), a estação mais a jusante do rio Pancas, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014.....	208
Figura 149. Hidrogramas simulado e observado na estação Ponte Nova (56110005), a estação mais a jusante do rio Piranga, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989. O período apresentado no gráfico é de 1981 a 1983, para melhor visualização.	209
Figura 150. Curvas de permanência simulada e observada na estação Ponte Nova (56110005), a estação mais a jusante do rio Piranga, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989.....	209
Figura 151. Hidrogramas simulado e observado na estação Barra do Cuieté (56940002), a estação mais a jusante do rio Caratinga, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989. O período apresentado no gráfico é de 1981 a 1983, para melhor visualização.	210
Figura 152. Curvas de permanência simulada e observada na estação Barra do Cuieté (56940002), a estação mais a jusante do rio Caratinga, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989.....	210
Figura 153. Hidrogramas simulado e observado na estação São Sebastião da Encruzilhada (56990000), a estação mais a jusante do rio Manhaçu, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989. O período apresentado no gráfico é de 1981 a 1983, para melhor visualização.....	210
Figura 154. Curvas de permanência simulada e observada na estação São Sebastião da Encruzilhada (56990000), a estação mais a jusante do rio Manhaçu, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989.....	211
Figura 155. Hidrogramas simulado e observado na estação Naque Velho (56825000), a estação mais a jusante do rio Santo Antônio, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989. O período apresentado no gráfico é de 1981 a 1983, para melhor visualização.	211
Figura 156. Curvas de permanência simulada e observada na estação Naque Velho (56825000), a estação mais a jusante do rio Santo Antônio, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989.....	211

Figura 157. Hidrogramas simulado e observado na estação Mario de Carvalho (56696000), a estação mais a jusante do rio Piracicaba, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989. O período apresentado no gráfico é de 1981 a 1983, para melhor visualização.	212
Figura 158. Curvas de permanência simulada e observada na estação Mario de Carvalho (56696000), a estação mais a jusante do rio Piracicaba, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989.	212
Figura 159. Hidrogramas simulado e observado na estação Rio Casca (56415000), a estação mais a jusante do rio Casca, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989. O período apresentado no gráfico é de 1981 a 1983, para melhor visualização.	212
Figura 160. Curvas de permanência simulada e observada na estação Rio Casca (56415000), a estação mais a jusante do rio Casca, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989.	213
Figura 161. Hidrogramas simulado e observado na estação Ponte do Pancas (56995500), a estação mais a jusante do rio Pancas, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989. O período apresentado no gráfico é de 1981 a 1983, para melhor visualização.	213
Figura 162. Curvas de permanência simulada e observada na estação Ponte do Pancas (56995500), a estação mais a jusante do rio Pancas, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989.	213
Figura 163. Esquema dos processos de geração e propagação de sedimentos das minibacias e propagação de sedimentos na rede de drenagem.	215
Figura 164. Pontos de interesse selecionados ao longo do rio Doce para a avaliação da simulação do rompimento da barragem de Fundão.	228
Figura 165. Hidrograma de rompimento estimado no ponto P0 para a simulação com o modelo MGB-SED. Qpico é a vazão de pico do hidrograma, Tp é o tempo de pico, e Volume é o volume de água do hidrograma.	230
Figura 166. Hidrogramas simulados após o rompimento da barragem de Fundão, nos pontos P1, P2, P3 e G6.	231
Figura 167. Hidrogramas simulados ao longo do rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão, nos pontos G6 a G1 e S4.	231
Figura 168. Comparação entre os picos de vazão simulados e observados após o rompimento da barragem de Fundão ao longo do rio Doce.	232
Figura 169. Concentrações e vazões simuladas após o rompimento da barragem de Fundão, nos pontos G6 a G1 e no S4.	233
Figura 170. Concentrações simuladas após o rompimento da barragem de Fundão, nos pontos P1, P3 e G6.	234
Figura 171. Comparação entre os picos de concentração simulados e observados após o rompimento da barragem de Fundão ao longo do rio Doce.	235
Figura 172. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2017 (dezembro).	236
Figura 173. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2018.	237

Figura 174. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2019.	237
Figura 175. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2020.	238
Figura 176. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2021.	238
Figura 177. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2022.	239
Figura 178. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) no período de 01/11/2015 a 31/12/2015.	239
Figura 179. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) no ano de 2016.	240
Figura 180. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) no ano de 2017.	240
Figura 181. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) no ano de 2018.	241
Figura 182. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) no ano de 2019.	241
Figura 183. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) no ano de 2020.	242
Figura 184. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) no ano de 2021.	242
Figura 185. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) no ano de 2022.	243
Figura 186. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante) no período de 01/11/2015 a 31/12/2015.	243
Figura 187. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante) no ano de 2016.	244
Figura 188. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante) no ano de 2017.	244
Figura 189. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante) no ano de 2018.	245
Figura 190. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante) no ano de 2019.	245
Figura 191. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante) no ano de 2020.	246
Figura 192. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante) no ano de 2021.	246
Figura 193. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante) no ano de 2022.	247
Figura 194. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56850000 (Governador Valadares) no período de 01/11/2015 a 31/12/2015.	247

Figura 195. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56850000 (Governador Valadares) no ano de 2016.	248
Figura 196. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56850000 (Governador Valadares) no ano de 2017.	248
Figura 197. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56850000 (Governador Valadares) no ano de 2018.	249
Figura 198. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56850000 (Governador Valadares) no ano de 2019.	249
Figura 199. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56850000 (Governador Valadares) no ano de 2020.	250
Figura 200. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56850000 (Governador Valadares) no ano de 2021.	250
Figura 201. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56850000 (Governador Valadares) no ano de 2022.	251
Figura 202. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56920000 (Tumiritinga) no período de 01/11/2015 a 31/12/2015.	251
Figura 203. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56920000 (Tumiritinga) no ano de 2016.	252
Figura 204. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56920000 (Tumiritinga) no ano de 2017.	252
Figura 205. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56920000 (Tumiritinga) no ano de 2018.	253
Figura 206. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56920000 (Tumiritinga) no ano de 2019.	253
Figura 207. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56920000 (Tumiritinga) no ano de 2020.	254
Figura 208. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56920000 (Tumiritinga) no ano de 2021.	254
Figura 209. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56920000 (Tumiritinga) no ano de 2022.	255
Figura 210. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56994500 (Colatina) no período de 01/11/2015 a 31/12/2015.	255
Figura 211. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56994500 (Colatina) no ano de 2016.	256
Figura 212. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56994500 (Colatina) no ano de 2017.	256
Figura 213. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56994500 (Colatina) no ano de 2018.	257
Figura 214. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56994500 (Colatina) no ano de 2019.	257
Figura 215. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56994500 (Colatina) no ano de 2020.	258
Figura 216. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56994500 (Colatina) no ano de 2021.	258

Figura 217. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56994500 (Colatina) no ano de 2022.	259
Figura 218. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RGN06 no ano de 2017.	259
Figura 219. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RGN06 no ano de 2018.	260
Figura 220. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RGN06 no ano de 2019.	260
Figura 221. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RGN06 no ano de 2020.	261
Figura 222. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RGN06 no ano de 2021.	261
Figura 223. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RGN06 no ano de 2022.	262
Figura 224. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RCA02 no ano de 2018.	262
Figura 225. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RCA02 no ano de 2019.	263
Figura 226. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RCA02 no ano de 2020.	263
Figura 227. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RCA02 no ano de 2021.	264
Figura 228. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RCA02 no ano de 2022.	264
Figura 229. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RDO01 no ano de 2018.	265
Figura 230. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RDO01 no ano de 2019.	265
Figura 231. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RDO01 no ano de 2020.	266
Figura 232. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RDO01 no ano de 2018.	266
Figura 233. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RDO01 no ano de 2018.	267

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A Fundação Renova solicitou que fosse desenvolvido um estudo relacionado ao transporte de sedimentos na bacia do rio Doce, com os principais objetivos listados abaixo:

1. Consolidação de uma base de dados hidrossedimentológicos na bacia do rio Doce, considerando: i) caracterização de sedimentos transportados na bacia; ii) monitoramento hidrossedimentológico; iii) dados topográficos e topobatimétricos; dados hidrométricos e meteorológicos;
2. Construção de um modelo conceitual de geração e transporte de sedimentos para a bacia do rio Doce;
3. Simulação matemática do transporte de sedimentos na bacia do rio Doce, considerando: i) cenário histórico, consolidando com dados anteriores a novembro de 2015 (mês do rompimento da barragem de Fundão); e ii) cenário atual, consolidando dados posteriores a novembro de 2015;
4. Mapeamento de zonas de depósito de rejeitos oriundos do rompimento da barragem de Fundão;
5. Prognóstico do transporte de sedimentos e remobilização de depósitos de sedimentos contendo rejeitos para a bacia do rio Doce;

Os objetivos 3 a 5 constituíram o que posteriormente ficou conhecido como “balanço de massa” no rio Doce. Isto se deve a sua capacidade de gerar informações relativas ao transporte de sedimentos, remobilização de depósitos contendo rejeitos intracalha e extracalha, e o mapeamento desse transporte considerando as unidades do Plano de Manejo de Rejeitos da Fundação Renova (PMR). Para tanto, o balanço de massa e transporte de sedimentos realizado durante a Fase II do projeto “Estudo dos processos fluviais e de sedimentos a jusante da barragem de Fundão, no rio Doce”, consolidou a base de dados hidrossedimentológicos disponibilizados até o início do seu desenvolvimento. Esta base de dados é composta pelas seguintes informações:

- Pluviometria: dados de precipitação (chuva) obtidos nas estações convencionais operadas principalmente pela ANA na bacia do rio Doce e seu entorno.
- Fluviometria: dados de nível e vazão obtidos nas estações convencionais operadas principalmente pela ANA na bacia do rio Doce.
- Sedimentometria: dados de sedimentos em suspensão e descarga sólida obtidos por diversos operadores e programas de monitoramento existentes na bacia do rio Doce. Destaca-se a rede de monitoramento da Fundação Renova como fonte de dados após o rompimento da barragem de Fundão ao longo dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce.

A partir destas bases, foi calibrado e validado um modelo hidrossedimentológico distribuído baseado em processos (MGB-SED) capaz de gerar informações de transporte

de sedimentos em toda a bacia do rio Doce, contemplando os processos de: i) geração de sedimentos em bacias hidrográficas; ii) transporte de sedimentos em rede de drenagem superficial; iii) processos erosivos das margens e leitos dos canais; iv) processos de deposição de sedimentos nas margens e leitos dos canais. O modelo representa os principais processos de geração, transporte e deposição de sedimentos tanto no leito menor quanto na planície de inundação dos trechos de rios avaliados.

A representação do modelo MGB-SED permitiu a consolidação de diferentes cenários: i) cenário histórico, com dados antes do rompimento de Fundão; ii) volumes depositados durante a passagem da onda de rompimento ao longo dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce; e iii) situação atual com base nos dados medidos após o rompimento da barragem de Fundão. Além destes cenários, o modelo permitiu a avaliação de tendências futuras para remobilização e transporte de sedimentos na bacia do rio Doce com base em diferentes cenários hidrológicos.

O modelo tem sido utilizado em diversos estudos técnicos LACTEC (2017) e científicos (BUARQUE, 2015; FAGUNDES, 2018; FÖEGER, 2019; FÖEGER et al., 2022), incluindo a modelagem dos fluxos de sedimentos na bacia do rio Doce (FAGUNDES et al., 2019, 2020, ALMEIDA, 2021; DELA COSTA, 2021) e em toda América do Sul (FAGUNDES et al, 2022, 2023a, 2023b). Um ponto relevante na utilização do modelo MGB-SED é a possibilidade de mapeamento dos diferentes processos existentes no balanço de massa em diferentes trechos da bacia do rio Doce. Esse balanço de massa considera as principais contribuições hidrossedimentológicas que configuram o transporte de sedimentos.

O desenvolvimento dos estudos de transporte de sedimentos no rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão ao longo dos últimos anos, realizado pela Rhama Consultoria, a qual apresentou em 2021 os resultados em três fases I, II e III. A primeira fase envolveu a identificação dos dados disponíveis e suas limitações, planejando a coleta futura de dados. A fase II desenvolveu o balanço de sedimentos com simulação do escoamento e transporte de sedimentos em toda a bacia, analisando cenários de antes, durante o rompimento e período pós rompimento e projeção para o futuro sobre as condições recuperação das funções hidrossedimentológicas na bacia. A terceira fase desenvolveu a simulação mais detalhada em trechos específicos, como o do reservatório de Aimorés.

O projeto finalizado foi protocolado em 30/09/2020 pela Fundação Renova com o relatório "Estudo dos Processos Fluviais e de Sedimentos a Jusante da Barragem de Fundão, no rio Doce – Fases I e II" (ID 535547511) e apresenta dados atualizados até a data de 31/12/2019, considerando todos os dados obtidos a partir de diferentes campanhas de monitoramento hidrossedimentológico no trecho impactado disponíveis.

Os estudos foram avaliados pela CT-GRSA – Câmara Técnica de Rejeitos e Segurança Ambiental, resultando na emissão das NOTAS TÉCNICAS CT-GRSA nº 02/2021; 11/2021; 21/2021 e 17/2022.

1.2. Objetivo

O objetivo geral desse estudo é o de analisar o transporte de sedimentos dos trechos do rio Doce impactados pelo rompimento da barragem de Fundão quanto ao comportamento natural da bacia e o comportamento pós rompimento, buscando avaliar a possível recuperação dos trechos impactados.

Para isso, são considerados objetivos específicos:

- Representar o transporte de sedimentos na bacia do rio Doce, antes e após o rompimento, e estimar o tempo para que o transporte retorne a condições similares ao período anterior ao rompimento;
- Estimar a quantidade de depósitos¹ na intracalha após o rompimento da barragem de Fundão e a sua taxa de redução ao longo dos anos, considerando o período atual e cenários futuros.

Esse estudo também buscou atualizar o modelo já desenvolvido de acordo com as considerações da CT-GRSA, expostas nas Deliberações CIF nº 475/2020 (NT CT-GRSA Nº 02/2021) e 526/2021 (NT CT-GRSA Nº 11/2021), NT CT-GRSA Nº 21/2021 e NT CT-GRSA Nº 17/2022, as quais avaliaram os estudos hidrossedimentológicos concluídos em 2020 e 2021 (Rhama, 2020, 2021a,b) e apresentam diversas recomendações técnicas a serem incorporadas nos estudos hidrossedimentológicos.

A seguir são apresentadas cada uma das recomendações abordadas nesse projeto e citadas na Nota Técnica.

1.3. Avaliação do atendimento às Notas Técnicas da GT-GRSA

A seguir são reproduzidos os textos das recomendações e solicitações das Notas Técnicas. Todos os itens elencados abaixo, para as fases I e II foram devidamente abordados e considerados.

Com relação ao item C, é importante frisar que este é referente ao monitoramento de sedimentos do rio, o qual foi atualizado com monitoramento do fundo realizado atualmente e os dados devidamente considerado no presente relatório. Na mesma linha, o monitoramento atualizado sanou as questões relacionadas ao item D.

Para o item K, ressalta-se que a turbidez de um corpo hídrico pode vir a ser considerada como proxy da concentração de sedimentos em suspensão (Teixeira et al., 2015, Fagundes et al., 2019). Os estudos de turbidez apresentados em Rhama (2020) tinham apenas o objetivo preliminar de observar o efeito sobre esta variável na variabilidade ocorrida no período pós rompimento da barragem, e as estimativas de sólidos suspensão por turbidez não faziam parte dos estudos com modelagem, os quais consideram dados medidos e que possuem maior precisão. Considerando que esse

¹ O termo “depósitos” nesse contexto indica sedimentos depositados, ou seja, a mistura sedimentos + rejeitos depositados no fundo do trecho fluvial investigado. Portanto, indica sedimentos contendo rejeitos.

estudo de revisão e atualização tem foco na modelagem de sedimentos, essas estimativas não são adequadas e, portanto, não são consideradas.

Para o item M, é importante destacar que nesse estudo buscou-se avaliar o sistema lacustre do baixo rio Doce, em especial as lagoas Juparanã, Nova, Monserás, Areal e Pandolfi. Para isso, foram obtidas as informações disponíveis de batimetria dessas lagoas buscando-se uma representação simplificada da troca de água entre os lagos laterais no baixo Doce e o rio Doce, dentro de uma configuração lateral simplificada de um sistema unidimensional. No entanto, as avaliações realizadas mostram que, embora o fluxo de água e sedimentos para entre o rio Doce e essas lagoas possa ser importante localmente, a sua consideração no presente estudo não é viável pois:

- Os dados disponíveis correspondem apenas às batimetrias das lagoas, não havendo informações sobre o trecho de canal que as conectam com o rio Doce, exceto nas lagoas Nova e Juparanã;
- O fluxo de água e sedimentos nesse ambiente é bidimensional, com escoamento difuso e não concentrado em um canal de ligação, o que é incompatível com uma representação dentro de um modelo de escoamento unidimensional para o adotado nesse estudo;
- Não há informações sobre os fluxos entre a lagoa e o rio que possam subsidiar uma calibração do modelo MGB-SED;
- Uma possibilidade de avaliação seria estimar quando há extravasamento da calha do rio em cotas superiores à cota média da lagoa, podendo inferir nesses casos uma possível conexão entre rio-lagoa. No entanto, a estimativa é bastante imprecisa e o modelo MGB-SED não é calibrado para estimativas de cotas e sim de vazões

Ainda, destaca-se que a inclusão ou não desse sistema no estudo realizado não afeta seus resultados, pois o impacto da troca de água e sedimentos entre as lagoas e o rio é quase inexistente.

FASE I

- a. Desconsiderou a alteração no valor de saturação dos corpos hídricos para transporte de sedimentos nas condições pretéritas e pós-rompimento da barragem de Fundão**
- b. Para a parte capixaba, uso de estações climatológicas fora da isozona e bacia hidrográfica**
- c. Uso de dados de granulometria de leito de rio coletado por metodologia para análise qualitativa de sedimento, e não quantitativa**
- d. Uso de metodologia inadequada e não recomendada nos livros de Hidrossedimentologia e Guia da ANEEL para coleta de sedimento de**

fundo nas campanhas amostrais realizadas entre junho e novembro de 2019

- e. Falta de dados das Usinas Hidrelétricas instaladas ao longo da calha do rio Doce**
- f. Falta de dados para o período chuvoso onde o transporte deste é amplificado**

FASE II

- g. Não visualização do uso de cálculos para o transporte de sedimentos de fundo no modelo utilizado**
- h. Não observado a somatória de todas as vazões nas condições iniciais e de contorno do modelo utilizado**
- i. Modelo digital de terreno com erro, podendo a chegar a 10 metros na vertical para áreas planas (região do baixo Doce)**
- j. Uso de estudo desconhecido pelo sistema CIF e com baixa representatividade para a bacia do Doce**
- k. Estimativa de sólidos suspensos por turbidez e considerando que as condições pré e pós rompimento para estes parâmetros se mantiveram**
- l. Não identificação dos efeitos de maré para a região de Linhares (sede) a Foz**
- m. Não consideração do sistema lacustre do baixo Doce**

1.4. Resumo das demandas

Segundo entendimento das discussões e dos documentos, o presente estudo contém os seguintes elementos para atender às recomendações da CT-GRSA:

1. Caracterização do escoamento e estimativa da capacidade de transporte dos corpos d'água para o transporte de sedimentos em suspensão;
2. Uso dos dados da parte capixaba da bacia, necessitando nova calibração e validação do modelo;
3. Desenvolvimento de uma relação entre transporte em suspensão e transporte de fundo com dados de monitoramento para ajuste do modelo quanto ao transporte de sedimentos do leito;
4. Ajuste da propagação de sedimentos e das retenções de sedimentos de fundo e em suspensão nos reservatórios ao longo do rio Doce, considerando os dados das respectivas Usinas Hidroelétricas, como volumes, curvas cota-área-volumes e altura de barramento;

5. Ajuste e verificação dos parâmetros do modelo e estabelecimento dos cenários futuros quanto a curva de vazão sólida x vazão líquida e volume de sedimentos de fundo. Esta atualização permite refinar os estudos realizados recentemente até o ano de 2022, com os dados observados mais atuais disponíveis;
6. Código do modelo ajustado para produzir as vazões sólidas de suspensão e de fundo;
7. Apresentação as condições iniciais e de contorno do modelo nos seus módulos;
8. Consideração de um Modelo Digital de Terreno mais recente e mais preciso que o MDE utilizado no estudo anterior;
9. O modelo foi estendido para jusante até uma seção de escoamento ao longo do rio Doce na qual o efeito da maré é desprezível ou inexistente;
10. Avaliaram-se os dados das áreas lacustres laterais no trecho de simulação para verificar possível inclusão no modelo MGB-SED.

1.5. Considerações gerais de avaliação

Com o rompimento da barragem de Fundão, um volume significativo de rejeito se deslocou para jusante, sendo depositado nas calhas dos rios e planícies de inundação. Após o rompimento, houve um grande aumento no transporte de sedimentos em 2015 e 2016 se comparado ao cenário anterior (antes de novembro de 2015).

A avaliação da recuperação dos trechos impactados realizada na presente atualização, assim como no estudo anterior (Rhama, 2020), é feita considerando o comportamento dos sedimentos pelos seguintes processos:

- *Transporte de Sedimentos em suspensão:* O material escoado em suspensão é caracterizado pela curva descarga sólida x descarga líquida. A verificação do impacto é realizada comparando esta curva para dados antes do rompimento com a curva obtida com dados de depois do rompimento. Esta análise é realizada para os dados atuais e a evolução desta curva ao longo dos anos é feita com base nas simulações para os cenários futuros, verificando o tempo necessário de recuperação desta função.
- *Volume de sedimentos de Fundo:* O volume de sedimentos adicional no fundo rio que é proveniente do rompimento da barragem. O rio tende a se recuperar quando este volume diminui e tende a proporções residuais, ou quando o mesmo fica retido e consolidado no leito sem proporcionar ressuspensão, exceto em eventos de grandes magnitudes de vazões. Este volume também pode influenciar a curva mencionada no item anterior pela ressuspensão, mas quando a curva converge há indicativo de que para a faixa de vazão da curva usada, as descargas sólidas do rio não são mais influenciadas.

O presente estudo envolve a simulação da bacia do rio Doce, buscando projetar a sua evolução no futuro, em termos de volume de sedimentos. Este estudo considera que a recuperação ocorre quando não há mais rejeitos remanescentes do rompimento da

barragem de Fundão presentes na calha do rio e/ou quando a relação entre as vazões líquidas e sólidas voltam a representar condições de transporte de sedimentos anteriores às do rompimento. Para isso, é utilizado o modelo de sedimentos MGB-SED calibrado e ajustado para a bacia do rio Doce. Adicionalmente, uma importante fonte de dados para o presente estudo foi aquele desenvolvido pela (NHC, 2020), o qual apresentou informações sobre a estimativa do transporte de sedimentos e dos cálculos de volumes dos depósitos, bem como àquelas inerentes as estimativas e cálculos dos dados de entrada do balanço de massa de sedimentos, entre os trechos T06 a T11 do PMR.

O presente relatório considera, com as devidas limitações, o aporte de sedimentos provenientes das áreas de várzeas impactadas e não impactadas no balanço de massa médio anual de um dos cenários avaliados (cenário C). Além disso, os resultados das projeções futuras serão apresentados nos trechos a montante da UHE Risoleta Neves impactados pelo rompimento (trechos T06 a T11) e a jusante desta, até o T16 definidos no PMR da Fundação Renova.

1.6. Estudos anteriores

Buscando identificar e resumir os dados de trabalhos pré-existent, foram selecionados estudos que utilizaram ferramentas matemáticas, apresentados na sequência. Foram priorizados modelos e aplicações de modelagem com enfoque em hidráulica, balanço hídrico, dinâmica hidrossedimentológica, dinâmica de reservatórios e estudo de cheias. O ANEXO A apresenta uma síntese dos estudos e modelos levantados considerando viabilidade, aplicabilidade, forma de obtenção e estudos que utilizaram as ferramentas identificadas.

Na bacia do rio Doce foram identificados estudos publicados em plataformas públicas, como teses, artigos e relatórios. Além disso, a Fundação Renova disponibilizou uma rica base de dados com projetos relacionados principalmente à modelagem matemática do assoreamento do reservatório de Risoleta Neves (POTAMOS, 2019). Estes estudos foram compilados e uma síntese das principais informações serão apresentadas na sequência.

No contexto de aplicações de modelagem numa escala de bacia hidrográfica, foram identificados dois estudos que estimam a produção e transporte de sedimentos na bacia do rio Doce. Os trabalhos de Fagundes et al. (2017) e Magris et al. (2019) apresentam a modelagem hidrossedimentológica da bacia do rio Doce utilizando os modelos matemáticos MGB-SED e SWAT, respectivamente. O trabalho de Fagundes et al. (2017) foi utilizado como base para os resultados apresentados no relatório de LACTEC (2017) sobre a dinâmica hidrossedimentológica do rio Doce. No segundo trabalho (Magris et al., 2019) ainda é analisado o impacto da propagação de sedimentos decorrente do rompimento de Fundão sobre o rio Doce e a zona costeira do Espírito Santo. Em ambos os casos há uma representação da produção de sedimentos extracalha (na planície de inundação ou na bacia hidrográfica) e do transporte de sedimentos intracalha (no leito do rio) para o rio Doce e demais rios de maior porte.

Em uma escala mais detalhada, foram identificados estudos de propagação de sedimentos no rio Doce. São os casos dos estudos de Doaher (2018) e Palu & Julien

(2019) que analisaram o transporte de sedimentos no rio Doce considerando modelos hidráulicos unidimensionais. Os trabalhos apresentam diferentes áreas de aplicação, sendo o primeiro referente apenas a um trecho do rio Doce próximo ao município de Colatina – ES e o segundo referente a uma simulação do trecho a jusante de Risoleta Neves e terminando no oceano atlântico. O trabalho de Palu & Julien (2019) traz ainda uma análise do transporte de sedimentos durante o rompimento de Fundão, com estimativas de volumes depositados em reservatórios e propagados para o oceano.

POTAMOS (2019) simulou o transporte de sedimentos no reservatório da UHE Risoleta Neves. Os autores utilizaram um misto de campanhas de monitoramento de campo, análises hidrossedimentológicas e modelagem matemática para avaliar o assoreamento no reservatório após o rompimento de Fundão. Para isso, utilizaram o modelo SRH-1D (*Sedimentation and River Hydraulics One Dimension*), versão 3.1.1. O principal resultado indica uma redução da vida útil do reservatório, sendo identificado um impacto direto do rompimento de Fundão na operação em longo prazo do reservatório para geração de energia (menor vida útil = redução na capacidade de geração de energia).

Os estudos identificados apresentaram resultados quanto a produção e transporte de sedimentos no rio Doce, considerando a dinâmica hidrossedimentológica natural (antes do rompimento) e impactada (após o rompimento) da bacia do rio Doce.

1.7. Estrutura de apresentação do relatório

O presente relatório compõe uma entrega final do estudo “ATUALIZAÇÃO ESTUDOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA BACIA DO RIO DOCE”. Para tanto, foram considerados outros estudos de referência relevantes, especialmente na bacia do rio Doce.

O capítulo 3 apresenta as informações referentes a modelagem hidrológica da bacia do rio Doce. As informações correspondem aos dados utilizados até 31/12/2022, à discretização adotada na modelagem, às características físicas das bacias e à calibração e validação do modelo hidrológico.

O capítulo 4 apresenta as informações referentes ao modelo de sedimentos da bacia do rio Doce. São apresentados os dados utilizados e a calibração e validação do modelo hidrossedimentológico, incluindo o efeito dos reservatórios, a geração e transporte de sedimentos e a relação Vazão líquida x Vazão sólida.

Os resultados referentes às simulações de cenários de avaliação são encontrados no capítulo 5, e no capítulo 6 são apresentadas uma síntese geral e as conclusões obtidas a partir deste trabalho, através da avaliação das simulações realizadas.

2. MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO DOCE

Assim como no estudo anterior (Rhama, 2020), a presente atualização utiliza o modelo de sedimentos denominado MGB-SED (BUARQUE, 2015; FAGUNDES, 2018; FAGUNDES et al., 2019; FÖEGER, 2019), que consiste no acoplamento de um módulo de geração, transporte e redistribuição de sedimentos ao modelo hidrológico de grandes bacias MGB. Com esse acoplamento, o modelo hidrológico/hidráulico alimenta o módulo de sedimento, fornecendo informações necessárias para a geração de sedimentos na bacia, tais como volume de escoamento superficial, vazão de pico do escoamento superficial, e para o transporte de sedimentos nos rios, tais como vazões, velocidades, profundidades e trocas laterais entre rios e planícies. Desta forma, a aplicação do modelo MGB-SED se inicia com a calibração e validação do modelo hidrológico.

Como o modelo MGB-SED possui dois módulos (hidrológico e de sedimentos), as avaliações e os dados utilizados são apresentados separadamente para a Modelagem Hidrológica e a Modelagem de Sedimentos. Por esse motivo, nesse capítulo é apresentada apenas a Modelagem Hidrológica.

Esse capítulo apresenta os principais resultados e discussões sobre a modelagem hidrológica da bacia do rio Doce. Ao longo do desenvolvimento do trabalho foi dada ênfase aos trechos impactados pelo rompimento da barragem de Fundão. O modelo hidrológico utilizado é apresentado no APÊNDICE A. Na sequência é apresentada a representação computacional, calibração e validação dos parâmetros do modelo. Maiores detalhes sobre o módulo de sedimentos será apresentado no próximo capítulo e no APÊNDICE A.

2.1. Dados Utilizados

Para a aplicação do módulo hidrológico do modelo MGB são necessários dados hidrológicos e meteorológicos, os quais consistem em arquivos que contenham informações de vazão, chuva e clima.

Os dados de clima são constituídos de dados de temperatura, pressão, insolação, umidade relativa do ar e velocidade do vento, disponíveis em estações climatológicas. Os dados hidrológicos necessários para aplicação do modelo são referentes à chuva e à vazão. A principal aplicação das séries de vazão é na calibração dos parâmetros do modelo e na validação dos resultados.

Visto que o estudo anterior finalizou os dados observados até 12/2019, o presente relatório atualiza a base de dados com dados recentes de precipitação, vazão e concentração de sedimentos em suspensão, disponíveis no período de 01/2020 a 12/2022, **atendendo assim a demanda (f) apresentada no item 1.3.**

Além destes dados, são necessários mapas de uso do solo (cobertura vegetal) e de tipo de solo e Modelo Digital de Elevação (MDE). A seguir são apresentados os dados disponíveis e que são considerados para a simulação da bacia do rio Doce.

A Figura 1 apresenta um mapa geral com o detalhamento dos trechos estudados, definidos pelo PMR (CH2M, 2017), e adotado na Fase II (Rhama, 2020) e nessa atualização.

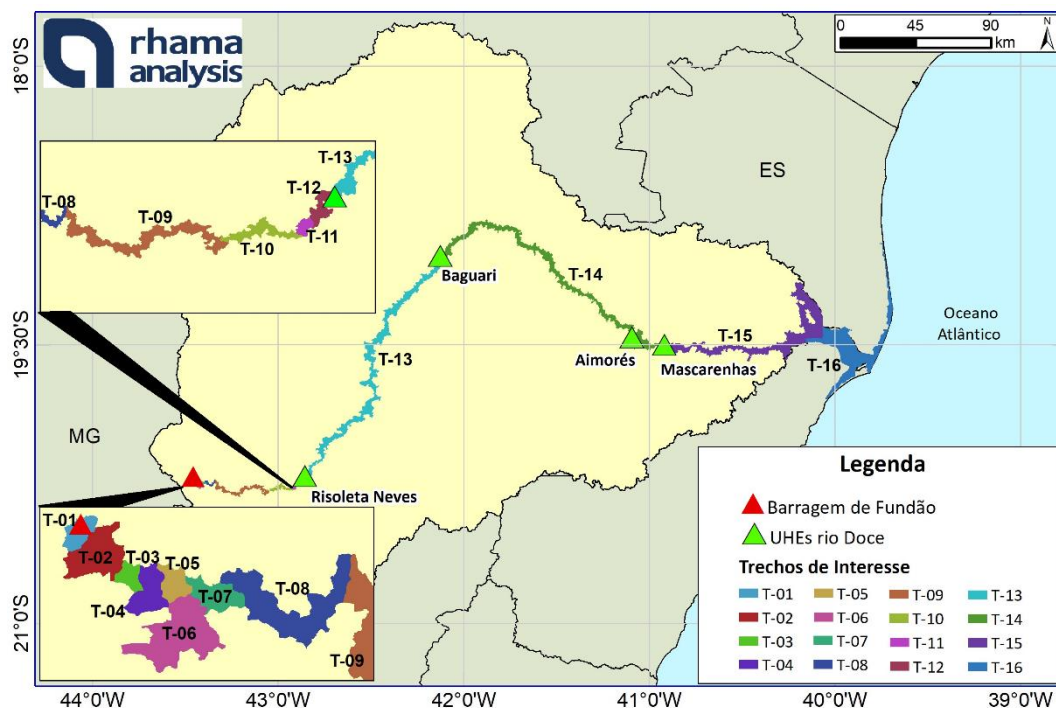


Figura 1. Trechos de avaliação ao longo do rio Doce.

2.1.1. Dados climatológicos

Os dados climáticos devem fornecer para o modelo, informações sobre temperatura, pressão, insolação, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Os dados de clima utilizados serão os pertencentes à base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), também disponíveis na base interna do modelo MGB. Para **atendimento à demanda (b) apresentada no item 1.3**, nessa atualização do estudo estão sendo considerados novos postos complementares. Assim, é considerado um total 18 estações meteorológicas que foram selecionadas na região da bacia (dentro da bacia e também fora da bacia, porém próximas dos seus limites), as quais estão apresentadas na Tabela 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e na Figura 2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 1. Estações meteorológicas do INMET selecionadas na região da bacia do rio Doce.

ID	Nome da estação	Código	Longitude	Latitude
1	Belo Horizonte	00083587	-43,9330	-19,9330
2	Caparaó	00083639	-41,9000	-20,5170
3	Caratinga	00083592	-42,1500	-19,8000
4	Conceição do Mato Dentro	00083589	-43,4330	-19,0170
5	Diamantina	00083538	-43,6000	-18,2500
6	Itamarandiba	00083488	-42,8500	-17,8500
7	Juiz de Fora	00083692	-43,3500	-21,7670

ID	Nome da estação	Código	Longitude	Latitude
8	São Mateus	00083550	-39,8500	-18,7000
9	Vitória	00083648	-40,3170	-20,3170
10	João Monlevade	00083591	-43,1170	-19,8330
11	Viçosa	00083642	-42,8500	-20,7500
12	Barbacena	00083689	-43,7670	-21,2500
13	Usiminas	00083594	-42,5330	-19,4830
14	Governador Valadares	00083543	-41,9330	-18,8500
15	Teófilo Otoni	00083492	-41,5000	-17,8500
16	Itambacuri	00083490	-41,0170	-18,0170
17	Linhares	00083597	-40,0670	-19,4170
18	Aimorés	00083595	-41,0670	-19,4830



Figura 2. Localização das estações meteorológicas do INMET selecionadas na região da bacia do rio Doce.

2.1.2. Dados pluviométricos

Os dados pluviométricos diários utilizados para a modelagem hidrológica da bacia pertencem à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). A partir da base de dados da ANA, foram pré-selecionadas 142 estações pluviométricas em operação na bacia a partir de janeiro de 1970. Também foram pré-selecionadas, com o mesmo critério, 75 estações fora da bacia, porém próximas dos seus limites, as quais são necessárias para uso na modelagem. Para cada estação, foi verificado o número de dias com falha (ausência de informação) dentro de cada mês. Um mês contendo mais do que 5 dias com falha foi considerado um mês “com falha”. Para uso na modelagem, foram selecionados os postos contendo ao menos 80% dos meses sem falhas no período. Desta

forma, do total de 217 estações, foram selecionadas 101 com dados entre 1970 e 2022, sendo 58 dentro da bacia e 43 fora da bacia, as quais estão apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Essas estações são as mesmas consideradas no estudo da Rhama (2020).

Na Tabela 2 os valores em negrito indicam as estações fora da bacia. Os dados de chuva diária foram interpolados utilizando o método de interpolação do Inverso da Distância ao Quadrado (padrão utilizado no modelo MGB) para o centroide de cada minibacia, a fim de espacializar as informações de chuva por toda a superfície da bacia.

Tabela 2. Estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) selecionadas na região da bacia do rio Doce, com dados entre 1970 e 2022. Os valores em negrito indicam as estações fora da bacia.

ID	Nome da Estação Pluviométrica	Código	Longitude	Latitude
1	Capelinha	1742014	-42,5175	-17,6908
2	Malacacheta	1742017	-42,0756	-17,8456
3	Águia Branca	1840000	-40,7461	-18,9856
4	Barra de São Francisco	1840004	-40,8936	-18,7536
5	Ponte Nova (BR-101)	1840008	-39,9933	-18,9817
6	Cedrolândia	1840010	-40,6906	-18,8097
7	Vila Matias - montante	1841001	-41,9178	-18,5747
8	Campanário	1841003	-41,7486	-18,2386
9	Vargem Grande	1841006	-41,1967	-18,6811
10	Mantenópolis	1841009	-41,1217	-18,9089
11	Tumiritinga	1841011	-41,6403	-18,9764
12	Central de Minas	1841018	-41,3083	-18,7631
13	São Pedro do Suaçuí	1842004	-42,5956	-18,3583
14	Coroaci	1842005	-42,2786	-18,6119
15	Guanhães	1842007	-42,9311	-18,7722
16	Santa Maria do Suaçuí	1842008	-42,4553	-18,2011
17	Povoação	1939002	-39,7944	-19,5775
18	Itarana	1940000	-40,8744	-19,8744
19	São João de Petrópolis	1940001	-40,6789	-19,8053
20	Riacho	1940003	-40,0431	-19,7497
21	Cavalinho	1940005	-40,3981	-19,6922
22	Colatina - corpo de bombeiro	1940006	-40,6231	-19,5308
23	Pancas	1940009	-40,8533	-19,2203
24	Valsugana Velha - montante	1940010	-40,5525	-19,9533
25	Itaimbé	1940012	-40,8353	-19,6636
26	Novo Brasil	1940013	-40,5914	-19,2375
27	Barra de São Gabriel	1940016	-40,5164	-19,0578
28	Caldeirão	1940020	-40,7417	-19,9550
29	Aracruz	1940021	-40,2722	-19,8300
30	Jacupemba	1940022	-40,1981	-19,5886
31	Rio Bananal	1940023	-40,3208	-19,2742
32	Serraria (alto do moacir)	1940025	-40,5175	-19,2953
33	Ipanema	1941000	-41,7061	-19,7989
34	Baixo Guandú	1941003	-41,0142	-19,5236
35	Resplendor - jusante	1941004	-41,2461	-19,3431
36	Barra do Cuieté - jusante	1941005	-41,5328	-19,0617
37	Assarai - montante	1941006	-41,4581	-19,5947

ID	Nome da Estação Pluviométrica	Código	Longitude	Latitude
38	Laranja da Terra	1941008	-41,0581	-19,9011
39	Ibituba	1941009	-41,0200	-19,6911
40	São Sebastião da Encruzilhada	1941010	-41,1617	-19,4925
41	Santo Antônio do Manhuaçu	1941011	-41,8361	-19,6783
42	Alto Rio Novo	1941012	-41,0275	-19,0592
43	Bom Jesus do Galho	1942002	-42,3178	-19,8336
44	Vermelho Velho	1942006	-42,3475	-19,9989
45	Dom Cavati	1942008	-42,1050	-19,3736
46	Rio Piracicaba	1943001	-43,1778	-19,9228
47	Conceição do Mato Dentro	1943002	-43,4442	-19,0167
48	Ferros	1943003	-43,0144	-19,2503
49	Jaboticatubas	1943004	-43,7444	-19,5206
50	Sabará	1943006	-43,8150	-19,8931
51	Santa Barbara	1943007	-43,4011	-19,9453
52	Santa Maria de Itabira	1943008	-43,1178	-19,4419
53	Caeté	1943010	-43,6675	-19,9006
54	Taquaraçu	1943023	-43,6881	-19,6639
55	José de Melo	1943024	-43,5856	-19,6897
56	Morro do Pilar	1943025	-43,3742	-19,2175
57	Usina Peti	1943027	-43,3675	-19,8808
58	Vau da Lagoa	1943035	-43,5881	-19,2189
59	Santa Maria do Jetibá (DNOS)	2040007	-40,7433	-20,0283
60	Garrafão (DNOS)	2040008	-40,9753	-20,1433
61	Cachoeira Suíça (DNOS)	2040018	-40,6067	-20,0794
62	São Rafael	2040023	-40,9339	-20,2964
63	Caiana	2041005	-41,9219	-20,6939
64	Dores do Manhumirim	2041008	-41,7283	-20,1081
65	Conceição do Castelo (DNOS)	2041011	-41,2394	-20,3522
66	IUNA	2041013	-41,5375	-20,3458
67	Dores do Rio Preto	2041014	-41,8461	-20,6858
68	Ibitirama (DNOS)	2041016	-41,6656	-20,5406
69	Santa Cruz - caparão (DNOS)	2041017	-41,7042	-20,3228
70	Usina Fortaleza (DNOS)	2041018	-41,4089	-20,3714
71	Itaici	2041019	-41,5114	-20,5283
72	Arace (DNOS)	2041020	-41,0611	-20,3667
73	Afonso Cláudio - montante	2041023	-41,1214	-20,0786
74	Carangola	2042000	-42,0239	-20,7400
75	Raul Soares - montante	2042008	-42,4400	-20,1036
76	Abre Campo	2042010	-42,4781	-20,2989
77	Rio Casca	2042011	-42,6500	-20,2261
78	Bicuiba	2042014	-42,3011	-20,7694
79	São Miguel do Anta	2042016	-42,8067	-20,6825
80	Matipó	2042017	-42,3256	-20,2772
81	Ponte Nova - jusante	2042018	-42,9028	-20,3847
82	Lagoa Grande (mmv)	2043002	-43,9428	-20,1792
83	Rio do Peixe (mmv)	2043004	-43,8925	-20,1378
84	Conselheiro Lafaiete	2043005	-43,7778	-20,6650
85	Acaiaca - jusante	2043009	-43,1439	-20,3625
86	Piranga	2043010	-43,2994	-20,6906
87	Fazenda Paraíso	2043011	-43,1803	-20,3900

ID	Nome da Estação Pluviométrica	Código	Longitude	Latitude
88	Congonhas - linígrafo	2043013	-43,8300	-20,5219
89	Porto Firme	2043014	-43,0881	-20,6703
90	Carandaí	2043018	-43,8008	-20,9558
91	Usina da Brecha	2043025	-43,0167	-20,5167
92	Braz Pires	2043026	-43,2419	-20,8475
93	Fazenda Ocidente	2043027	-43,0989	-20,2856
94	Represa Das Codornas (mmv)	2043042	-43,8919	-20,1647
95	Astolfo Dutra	2142000	-42,8606	-21,3069
96	Fazenda Umbaúbas	2142004	-42,5156	-21,0503
97	Usina Ituerê	2143000	-43,2022	-21,3094
98	Guarani	2143001	-43,0503	-21,3556
99	Desterro do Melo	2143003	-43,5200	-21,1492
100	Vargem do Engenho	2143007	-43,6139	-21,1928
101	Tabuleiro	2143017	-43,2469	-21,3550

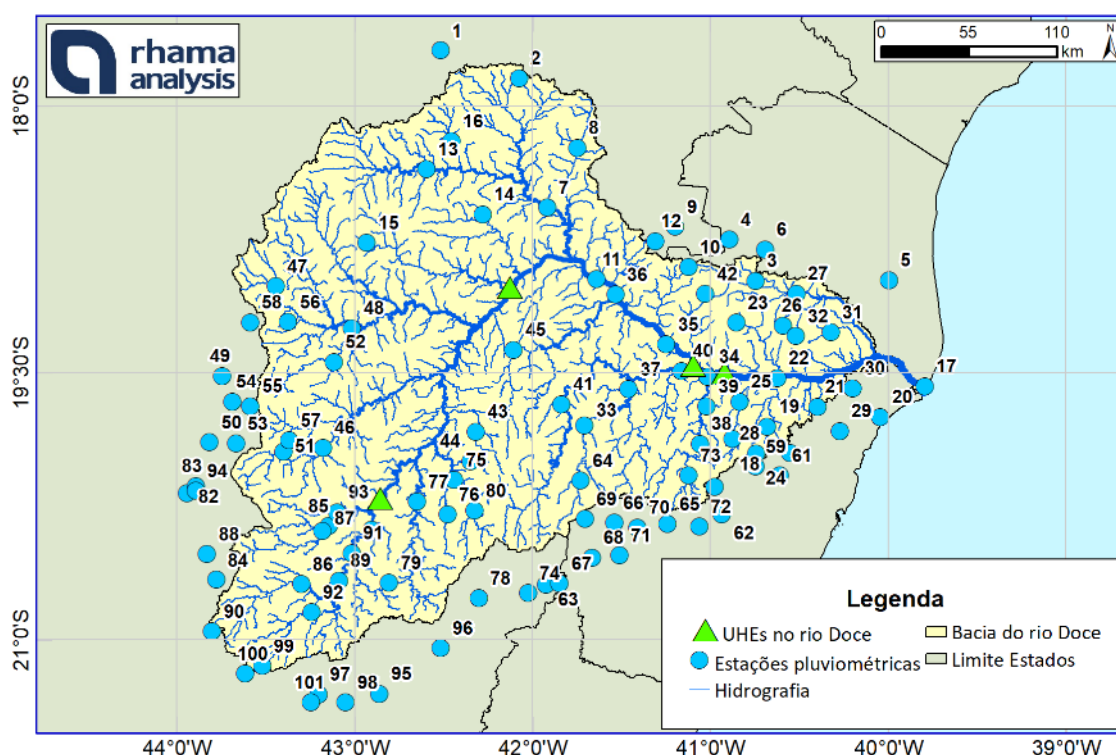


Figura 3. Localização das estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) selecionadas na região da bacia do rio Doce.

2.1.3. Dados fluviométricos

De todas as estações disponíveis na base de dados da ANA (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>) para download com dados de vazão, foram analisadas aquelas que possuem 5 ou mais anos com dados. Ao total, assim como no estudo anterior (Rhama, 2020), foram selecionadas 63 estações fluviométricas na bacia do rio Doce, de um total de 213, que continham dados disponíveis para download com informações a partir de 1970 até 2022.

As estações fluviométricas consideradas para a modelagem da bacia com o modelo MGB estão apresentadas na Tabela 3 e na Figura 4. Estes dados são fundamentais para a para calibração e validação dos valores dos parâmetros do modelo, bem como para a simulação dos cenários.

Tabela 3. Estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) selecionadas na região da bacia do rio Doce, com dados entre 1970 e 2022.

ID	Nome da Estação Fluviométrica	Código	Longitude	Latitude
1	Piranga	56028000	-43,2994	-20,6906
2	Bráz Pires	56055000	-43,2419	-20,8475
3	Senador Firmino	56065000	-43,0972	-20,9117
4	Porto Firme	56075000	-43,0881	-20,6703
5	Seriquite	56085000	-42,9228	-20,7233
6	Fazenda Varginha	56090000	-42,9997	-20,7144
7	Ponte Nova (Jusante)	56110005	-42,9028	-20,3839
8	Fazenda Paraíso	56240000	-43,1819	-20,3903
9	Acaica (Jusante)	56335001	-43,1394	-20,3614
10	Fazenda Ocidente	56337000	-43,1008	-20,2672
11	São Miguel do Anta	56385000	-42,6731	-20,6997
12	Rio Casca	56415000	-42,6500	-20,2261
13	Fazenda Cachoeira D'antas	56425000	-42,6744	-19,9944
14	Matipó	56460000	-42,3256	-20,2772
15	Raul Soares (Montante)	56484998	-42,4400	-20,1036
16	Abre Campo	56500000	-42,4783	-20,2989
17	Instituto Florestal Raul Soares	56510000	-42,4592	-20,0975
18	Cachoeira dos Óculos (Montante)	56539000	-42,4764	-19,7769
19	Pingo D'água	56570000	-42,4456	-19,7086
20	Rio Piracicaba	56610000	-43,1731	-19,9317
21	ETA (São Bento Mineração)	56631900	-43,4903	-19,9986
22	Carrapato (Brumal)	56640000	-43,4589	-19,9717
23	Nova Era IV	56659998	-43,0328	-19,7656
24	UHE Sá Carvalho (Barramento Antônio Dias)	56688080	-42,8500	-19,6461
25	Mario de Carvalho	56696000	-42,6408	-19,5247
26	Belo Oriente	56719998	-42,3761	-19,3297
27	Conceição do Mato Dentro	56750000	-43,4461	-19,0144
28	Dom Joaquim	56765000	-43,2431	-18,9606
29	Ferros	56775000	-43,0200	-19,2322
30	Fazenda Barraca	56787000	-43,0703	-19,3319
31	Senhora do Porto	56800000	-43,0825	-18,8947
32	UHE Porto Estrela (Barramento)	56820080	-42,6631	-19,1167
33	Naque Velho	56825000	-42,4228	-19,1881
34	Fazenda Corrente	56845000	-42,7125	-18,8947
35	Porto Santa Rita	56846000	-42,3592	-18,9517
36	UHE Baguari (Barramento)	56846080	-42,1250	-19,0214
37	Fazenda Aconchego	56846890	-42,1028	-18,9317
38	Governador Valadares	56850000	-41,9508	-18,8831
39	Campanário	56851000	-41,7311	-18,2392
40	São Pedro do Suaçuí	56860000	-42,6022	-18,3631

ID	Nome da Estação Fluviométrica	Código	Longitude	Latitude
41	Santa Maria do Suaçuí	56870000	-42,4547	-18,2017
42	Vila Matias (Montante)	56891900	-41,9178	-18,5747
43	Tumiritinga	56920000	-41,6417	-18,9711
44	Inhapim	56928000	-42,1222	-19,5497
45	Dom Cavati	56935000	-42,1028	-19,3728
46	Barra do Cuieté (Jusante)	56940002	-41,5333	-19,0619
47	Fazenda Vargem Alegre	56960005	-41,9611	-20,1706
48	Fazenda Bragança	56976000	-41,7853	-19,7431
49	Santo Antônio do Manhuaçu	56978000	-41,8358	-19,6786
50	Dores de Manhumirim	56983000	-41,7283	-20,1072
51	Ipanema	56988500	-41,7061	-19,7989
52	Mutum	56989001	-41,4375	-19,8106
53	Assarai (Montante)	56989400	-41,4581	-19,5947
54	São Sebastião da Encruzilhada	56990000	-41,1617	-19,4925
55	Afonso Cláudio (Montante)	56990990	-41,1242	-20,0775
56	Laranja da Terra	56991500	-41,0581	-19,9011
57	Baixo Guandu	56992000	-41,0142	-19,5236
58	UHE Mascarenhas (Barramento)	56992400	-40,9186	-19,5008
59	Jusante Córrego da Piaba	56993551	-40,7328	-19,5592
60	Colatina	56994500	-40,6297	-19,5333
61	Colatina (Corpo de Bombeiros)	56994510	-40,6236	-19,5303
62	Ponte do Pancas	56995500	-40,6864	-19,4228
63	Barra de São Gabriel	56998400	-40,5339	-19,0411

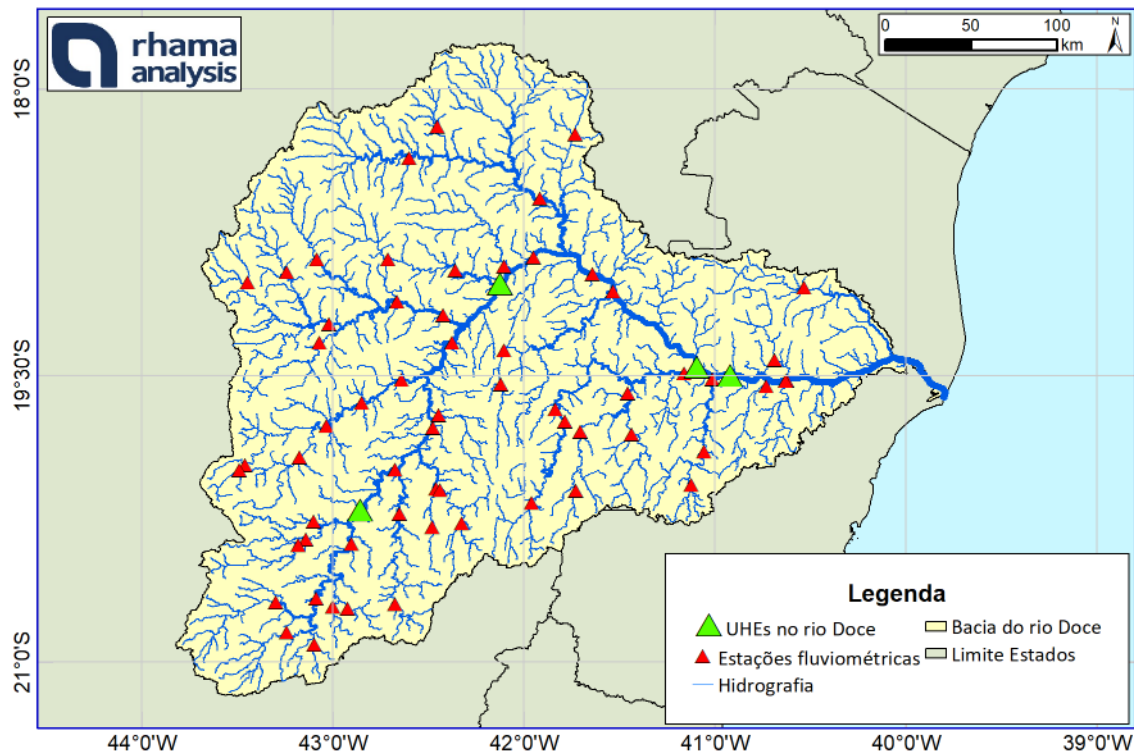


Figura 4. Localização das estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) selecionadas para uso na simulação hidrológica.

2.1.4. Modelo Digital de Elevação

O modelo MGB necessita de uma etapa de pré-processamento onde são definidas as características físicas e espaciais da bacia a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE).

No entanto, buscando **atender a demanda (i) apresentada no item 1.3**, esse presente estudo de atualização adotará um MDE mais recente, e com melhor resolução espacial, fornecido pelo COPDEM (Copernicus DEM) com resolução de 30m (<https://spacedata.copernicus.eu/en/web/guest/collections/copernicus-digital-elevation-model>). Esse MDE, apresentado na

Figura 5, representa a superfície da Terra com excelente precisão, podendo incluir edificações, infraestruturas e vegetação.

Além do MDE citado acima, esse estudo considera o Modelo Digital do Terreno (MDT) com resolução de 1m desenvolvido para a FUNDAÇÃO RENOVA², com informações de toda a área atingida pelo rompimento da barragem de Fundão. Essa versão do MDT está apresentada na Figura 6.

² FUNDAÇÃO RENOVA. Modelo digital de terreno obtida de dados oriundos de perfilamento aéreo a laser executado no período entre 30/11/2018 e 19/06/2019, pela empresa Fototerra. O uso desse MDT foi apresentado no plano de trabalho desse estudo, o qual foi avaliado na NT CT-GRSA Nº17/2022.

Para uso na modelagem, os dois produtos COPDEM e MDT foram combinados, ou seja, o MDE do COPDEM foi considerado em toda a região da bacia onde não há o detalhamento abrangido pelo MDT. Importante destacar que para grandes bacias geralmente se adotam produtos em escalas globais. Nesse sentido, uma análise foi realizada com o MDT de 1m comparado com sua versão reamostrada para 30m, de forma a torná-lo compatível com o MDE do COPDEM. Na análise, as duas resoluções foram comparadas em diversas sessões transversais, como a mostrada na Figura 7, indicando que a perda de informação ao passar de 1m para 30m é pequena e considerada aceitável para a modelagem em grandes bacias como a do rio Doce.

Assim, o MDT de 1m foi reamostrado para 30m e compatibilizado com o MDE do COPDEM, ou seja, o MDE do COPDEM foi considerado em toda a região da bacia onde não há detalhamento abrangido pelo MDT reamostrado.

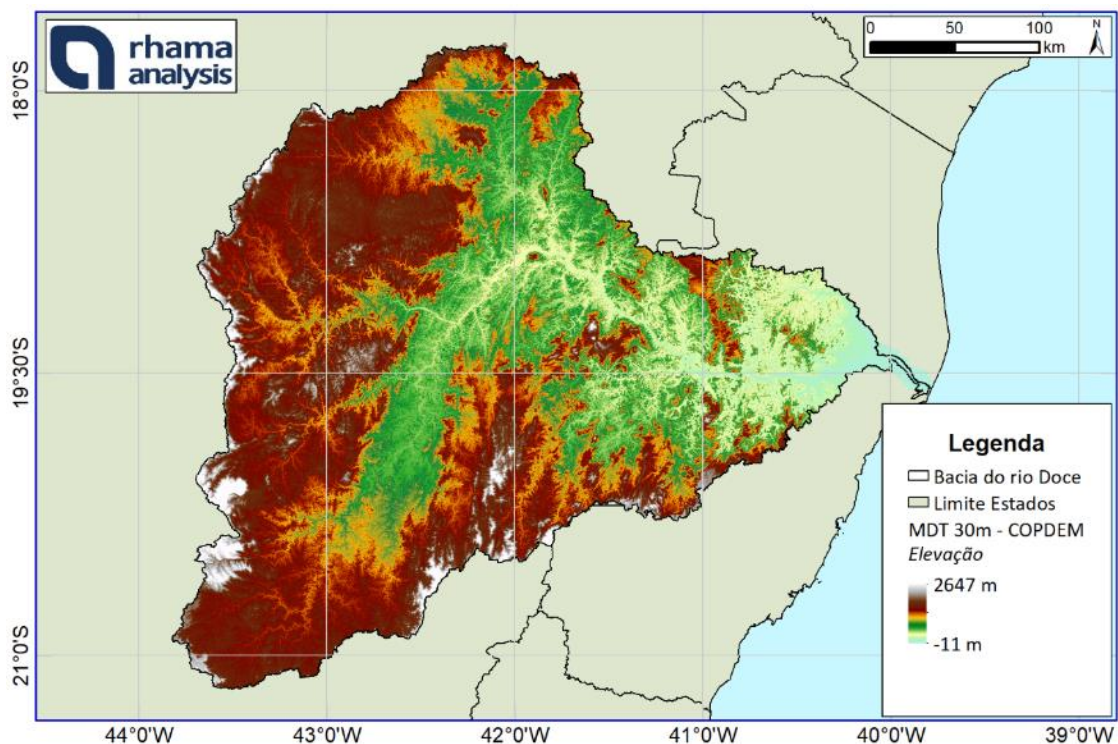


Figura 5. Relevo na bacia do rio Doce representado pelo MDE do COPDEM, com resolução espacial de 30m.

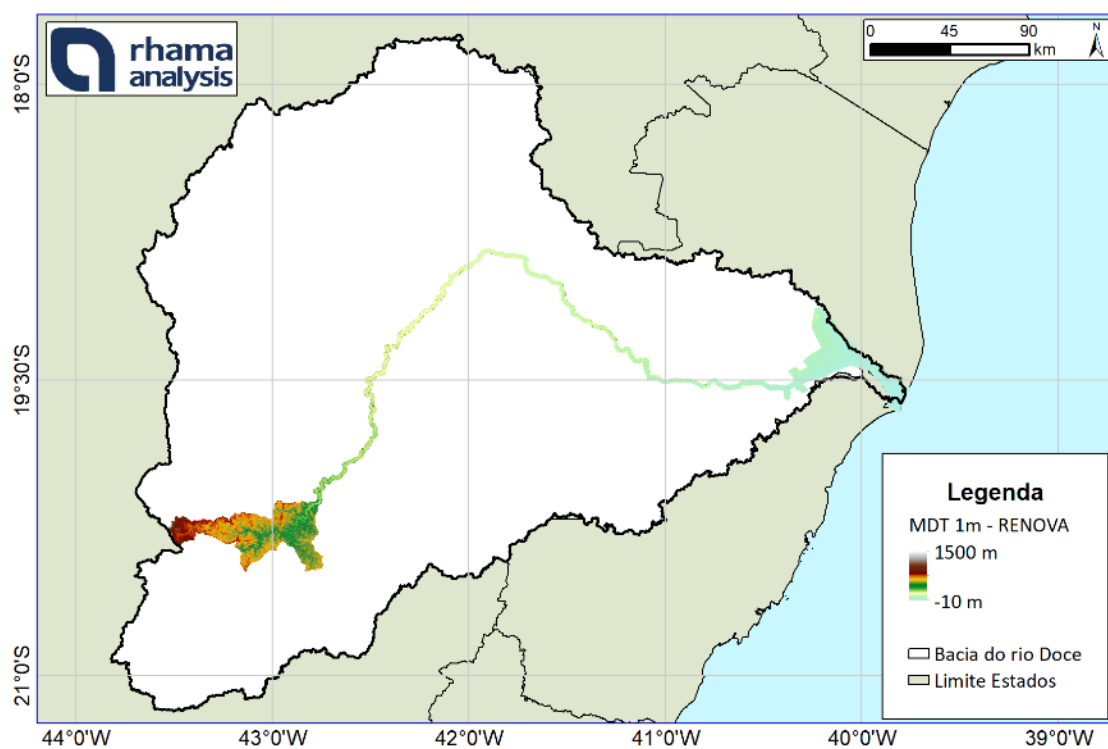
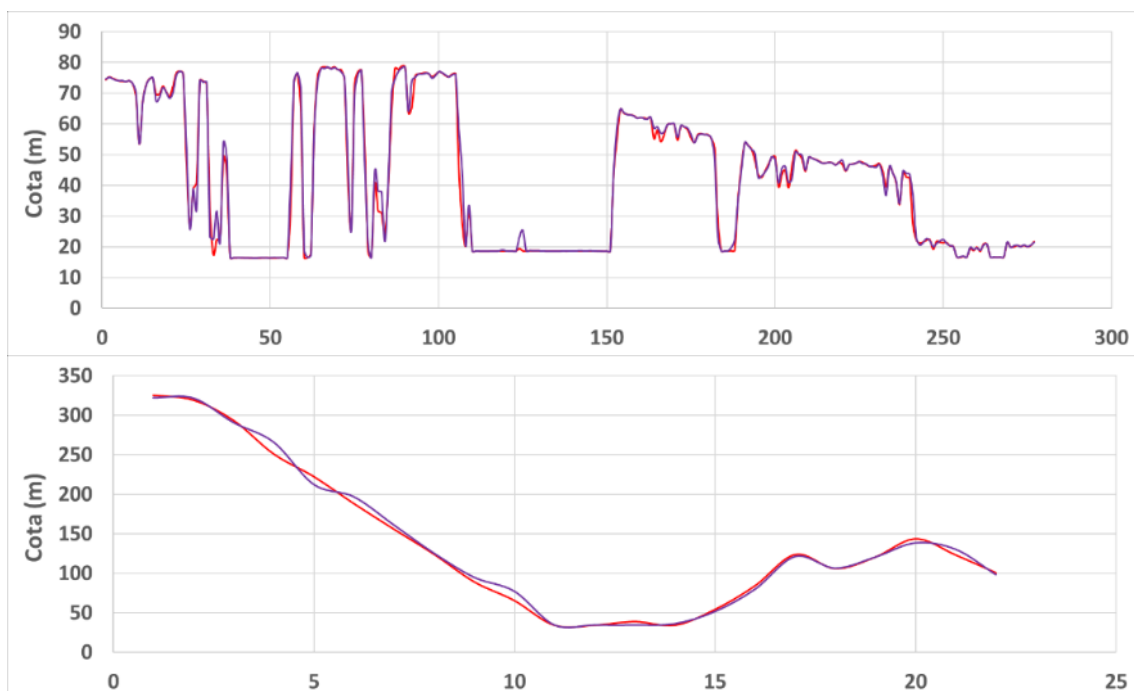


Figura 6. Modelo Digital do Terreno do rio Doce, com resolução espacial de 1m, com informações de toda a área atingida pelo rompimento da barragem de Fundão.



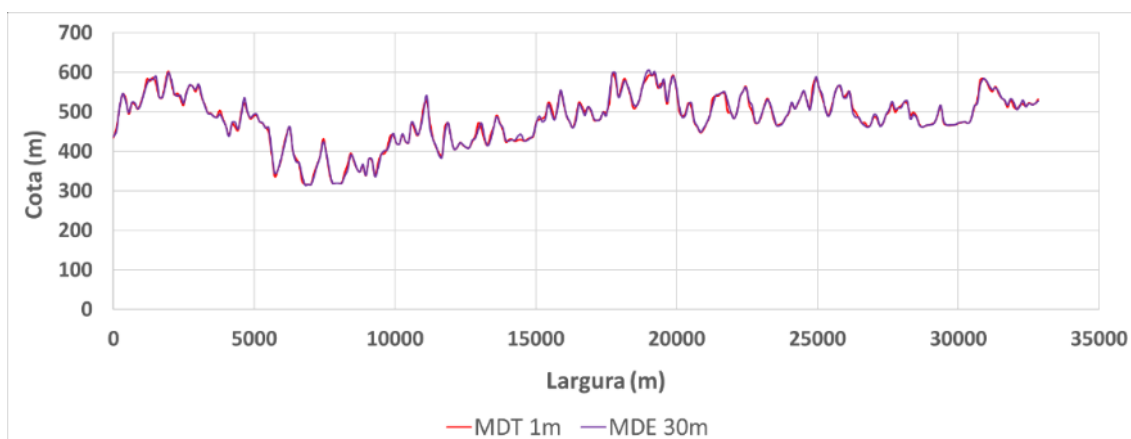


Figura 7. Sessões transversais ao longo do rio Doce (alto, médio e baixo rio Doce) comparando o MDT de 1m com sua versão reamostrada para 30m.

2.1.5. Informações de reservatórios

Nas últimas décadas foram construídos quatro reservatórios para uso hidrelétrico ao longo do rio Doce no trecho médio do rio, cujas principais características estão resumidas na Tabela 4. Embora os reservatórios existentes operem a fio d'água, sem efeito de regularização das vazões, eles possuem o efeito de redução da carga de sedimentos afluente por deposição, principalmente dos sedimentos com granulometria mais grossa. Os sedimentos finos que permanecem mais tempo na água em suspensão podem escoar para jusante, alterando as relações dos sólidos em suspensão para jusante. As características dos reservatórios são importantes para que o modelo possa representar os efeitos da propagação das vazões no seu interior e estimar a retenção de sedimentos e suas eficiências de retenção. Esses dados já foram considerados no estudo anterior e, portanto, também buscam **atender à demanda (e) apresentada no item 1.3**. Além desses, estão sendo consideradas as informações de curva "Cota x Área x Volume" disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA): <https://metadados.snirh.gov.br/>.

Tabela 4. Características das barragens das UHE da bacia do rio Doce.

UHE	Ano de Início	Área (km ²)	Qm (m ³ .s ⁻¹)	Volume (Vop) (hm ³)	Vop/Qm ¹ (dia)
Risoleta Neves	2004	8900	143,3	40	3,23
Baguari	2009	38350	496,1	38,1	0,89
UHE Aimorés	2006	74000	747,9	162,1	2,50
UHE Mascarenhas	1974	75000	830,3	3,2	0,45

¹A relação obtida entre o volume operacional (Vop) e vazão média (Qm) representa o tempo de renovação de volume do reservatório, e fornece uma ideia da capacidade do reservatório em reter sedimentos, a qual é maior quanto maior for a relação.

2.1.6. Condições Inicial de Contorno

No módulo hidrológico as bacias contribuintes possuem como dados de entrada:

- Precipitação obtidas das estações pluviométricas;

- Evapotranspiração potencial estimada no modelo com a equação de Penman-Monteith, a qual utiliza dados meteorológicos e parâmetros relativos às características aerodinâmicas e dos estômatos das plantas (ver APÊNDICE A);
- Parâmetros do Modelo.

Como condições iniciais, o modelo considera o estado de umidade do solo e a vazão inicial da bacia. Geralmente, após alguns intervalos de tempo, os possíveis erros destas condições iniciais são superados.

Ainda, considerando que a bacia do rio Doce drena para o oceano, uma condição de contorno adequada pode ser considerada para representar os efeitos da maré próximos à foz. Outra opção é realizar a simulação até uma seção próxima à foz na qual o efeito da maré é desprezível. Um estudo realizado pela Rede Rio Doce Mar (FEST-RRDM, 2019) avaliou a intrusão salina no rio Doce e verificou que na localidade de Povoação, já não há influência das marés. A condição de ausência de influência de maré nessa região também foi observada em análise independente dos resultados do modelo desenvolvido pela COPPETEC (2020). Portanto, buscando remover possíveis impactos das marés nos resultados do modelo próximo à foz, a modelagem será realizada até uma seção do rio Doce localizada 10km a montante da foz. Destaca-se que essa medida não traz prejuízo ao estudo de modelagem unidimensional fluvial, e buscam **atender a demanda (h) apresentada no item 1.3.**

2.2. Discretização da bacia do rio Doce

No modelo MGB existem três níveis de divisão dos dados espaciais definidos a partir de dados topográficos de um Modelo Digital de Elevação (MDE): a bacia; as sub-bacias; e as minibacias. A bacia é a área total que será representada no modelo hidrológico. As sub-bacias são unidades maiores do que as minibacias e menores do que a bacia, que podem ser utilizadas para a definição de valores de parâmetros do modelo hidrológico e nos procedimentos de calibração. Já as minibacias são as menores unidades em que a bacia é dividida (discretizada), dentro das quais os processos de propagação fluvial são importantes e não negligenciados. Ou seja, são áreas em que os processos de translação e atenuação de ondas de cheias são relevantes na compreensão das dinâmicas da bacia.

Neste item, é apresentada a discretização da bacia hidrográfica do rio Doce para a aplicação do modelo hidrológico MGB. Esta etapa incluiu a definição das minibacias e sub-bacias. Os procedimentos adotados para a realização da discretização são citados a seguir, seguidos de seus resultados.

2.2.1. Procedimentos Adotados

A discretização da bacia hidrográfica se baseia em algumas metodologias existentes para divisão e subdivisão de bacias hidrográficas, principalmente naquelas que envolvem a utilização de ferramentas SIG.

Após a análise dos dados hidrometeorológicos e demais informações disponíveis, foi feita a discretização da bacia do rio Doce para uso na simulação hidrológica. Foi utilizado o MDE de 30m de resolução espacial resultante da composição do MDE COPDEM (30m) e do MDT da Fundação Renova³ reamostrado para 30m. Esse MDE 30m foi processado com o conjunto de ferramentas denominado IPH-HydroTools (SIQUEIRA et al., 2016). A definição da rede de drenagem e a discretização da bacia foram feitas considerando uma área mínima de drenagem para regiões de cabeceira.

2.2.2. Relevô

Como especificado anteriormente, os dados de relevo foram obtidos diretamente do Modelo Digital de Elevação (MDE) de 30m de resolução espacial resultante da composição do MDE COPDEM com o MDT da Fundação Renova. Esse produto composto será denominado simplesmente por "MDE".

2.2.3. Rede de Drenagem e Minibacias

O processo de discretização da bacia no modelo MGB inicia-se a partir de um modelo digital de elevação (MDE), onde são realizadas etapas de remoção de depressões, geração de direções de fluxo, área de drenagem acumulada, rede de drenagem e a subdivisão em minibacias, as menores unidades na qual a bacia é dividida (PAIVA et al., 2011). Os algoritmos utilizados na etapa de discretização da bacia são baseados no modelo digital de elevação devido à topografia ser o principal elemento que define a direção e velocidade dos escoamentos superficiais.

A discretização da bacia foi realizada com o pacote de ferramentas IPH Hydro Tools (SIQUEIRA et al., 2016). Inicialmente utilizou-se o método MHS (*Modified Heuristic Search*) para a remoção de depressões do terreno e, posteriormente, foram definidas as direções do escoamento, a área de drenagem e a delimitação da rede de drenagem. Essa última etapa consiste em adotar um valor limite de área de drenagem a partir do qual considera-se que se inicia um curso d'água. Quando o valor limite escolhido é relativamente baixo, o processamento gera uma rede de drenagem de maior densidade (mais trechos de rios) e, conseqüentemente, maior número de minibacias associadas aos trechos de drenagem gerados, e se o valor limite escolhido é alto, acontece o oposto, e a rede de drenagem gerada terá menor densidade e menor número de minibacias (SORRIBAS et al., 2011; FAN et al. 2013; BUARQUE, 2015; PONTES, 2016). Para o presente trabalho, **o limite escolhido foi de, aproximadamente, 4,1 km² (cerca de 4556 pixels do MDE)**, e a rede de drenagem gerada, bem como a delimitação da bacia, estão apresentadas na Figura 8. Este limiar foi escolhido visando (i) representar trechos de rio estratégicos para a bacia ser simulada, como o rio Gualaxo do Norte, (ii)

³ FUNDAÇÃO RENOVA. Modelo digital de terreno obtida de dados oriundos de perfilamento aéreo a laser executado no período entre 30/11/2018 e 19/06/2019, pela empresa Fototerra.

tornar o tamanho das minibacias de cabeceira compatível com a resolução dos dados de precipitação a serem utilizados e (iii) possibilitar um custo computacional adequado.

Após a definição da rede de drenagem, foi realizada a segmentação da rede em trechos de rios individuais. Um trecho de rio é definido como um segmento da rede de drenagem localizado entre duas confluências sucessivas (FAN; COLLISCHONN, 2014). O método das confluências é utilizado por diversos modelos hidrológicos (MGB e SWAT, por exemplo). No modelo MGB também é possível utilizar uma metodologia que considera um critério adicional de segmentação relacionado ao comprimento dos trechos de rio, no qual se define um comprimento máximo para os trechos de rios para que a estabilidade do modelo Inercial de propagação de vazões seja garantida (FAN et al., 2014b; PONTES et al., 2015; PONTES, 2016). Adicionalmente, para melhor representar os volumes de sedimentos depositados durante a passagem da onda de rompimento ao longo dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, nesse estudo, o comprimento máximo para os trechos de rios foi definido como sendo 1 km para os rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, e para os demais cursos d'água foi definido o limite máximo de 10km conforme recomendado por (PONTES, 2016), o que gerou um total de 2256 minibacias, apresentadas na Figura 9, cujos respectivos trechos de rios possuem comprimentos que não superam os valores pré-estabelecidos.

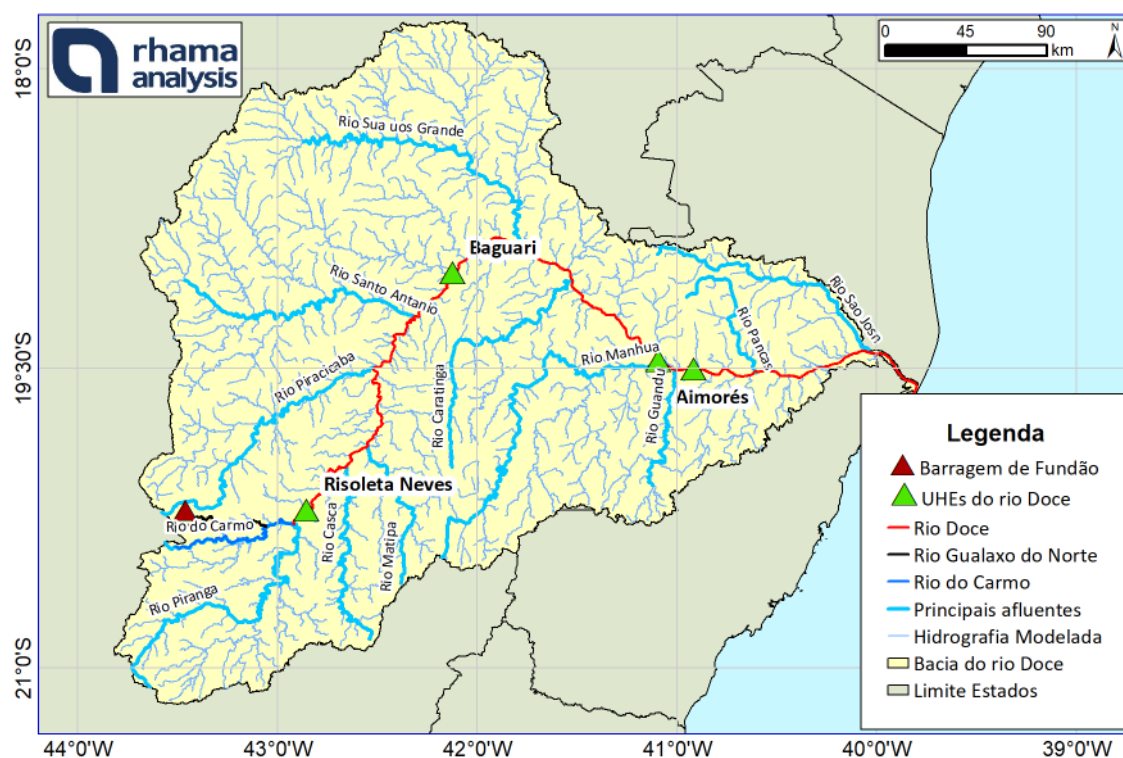


Figura 8. Limites da bacia do rio Doce e rede de drenagem definidas com o uso da ferramenta IPH Hydro Tools a partir do MDE de resolução espacial de 30 m.

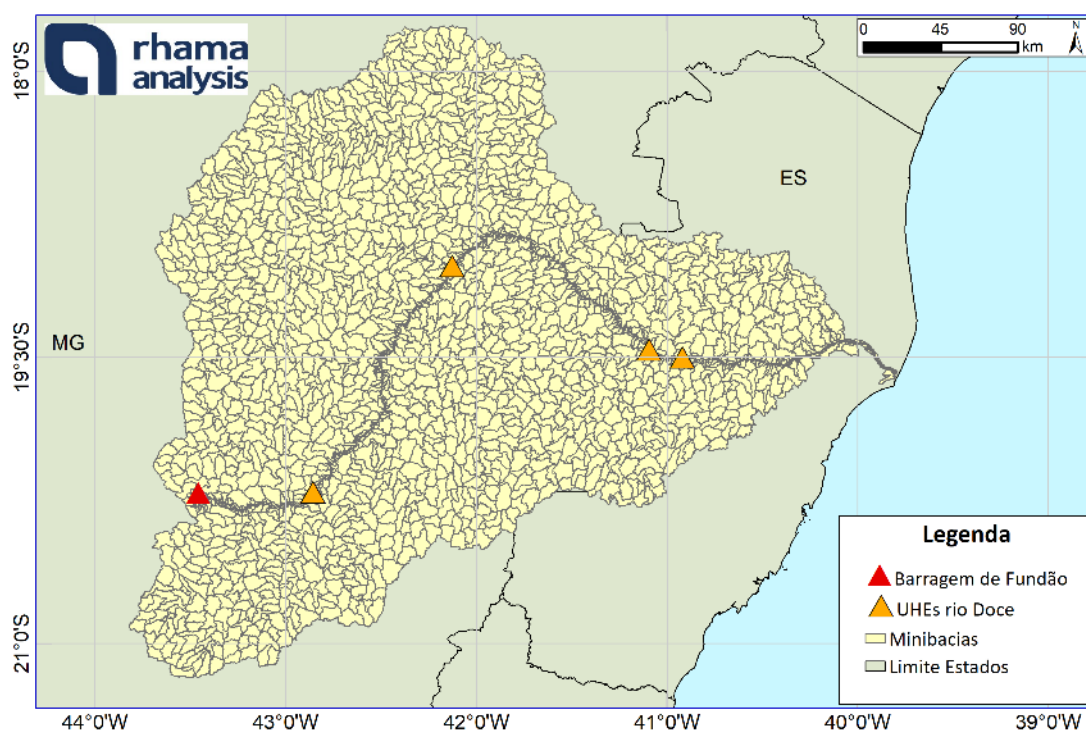


Figura 9. Visão espacial das 2256 minibacias delimitadas para a bacia do rio Doce, com o uso da ferramenta IPH Hydro Tools, a partir do MDE 30 m de resolução.

2.2.4. Definições de sub-bacias

De acordo com Jardim et al. (2015), pode-se aplicar diferentes critérios para definição das sub-bacias. Dentre os utilizados pode-se citar o tipo de ocupação do solo, o tipo de solo, a geologia ou mesmo a separação da região em áreas com declive semelhante. Também se pode considerar como critério para divisão das sub-bacias os pontos com estações fluviométricas, reservatórios, pontes, cidades ou tomadas de água.

Esta divisão em sub-bacias não possui nenhuma finalidade prática para a aplicação do modelo. Ela é apenas realizada por conveniência, para permitir a calibração do modelo hidrológico por partes (no caso, por sub-bacias), permitindo uma maior variabilidade espacial das características da bacia com a definição de conjuntos de valores dos parâmetros distintos em cada uma. No entanto, é importante que o modelo possa gerar vazões nos diversos pontos de interesse da bacia.

Nesse estudo, para cada posto fluviométrico existente, descritos anteriormente, foram definidas as suas áreas de influência (bacias incrementais) as quais estão apresentadas na Figura 10. Para as UHE Baguari, Risoleta Neves, Mascarenhas e Aimorés, além de terem sido consideradas como exutórios de minibacias, buscou-se também definir sub-bacias com base nas suas localizações geográficas.

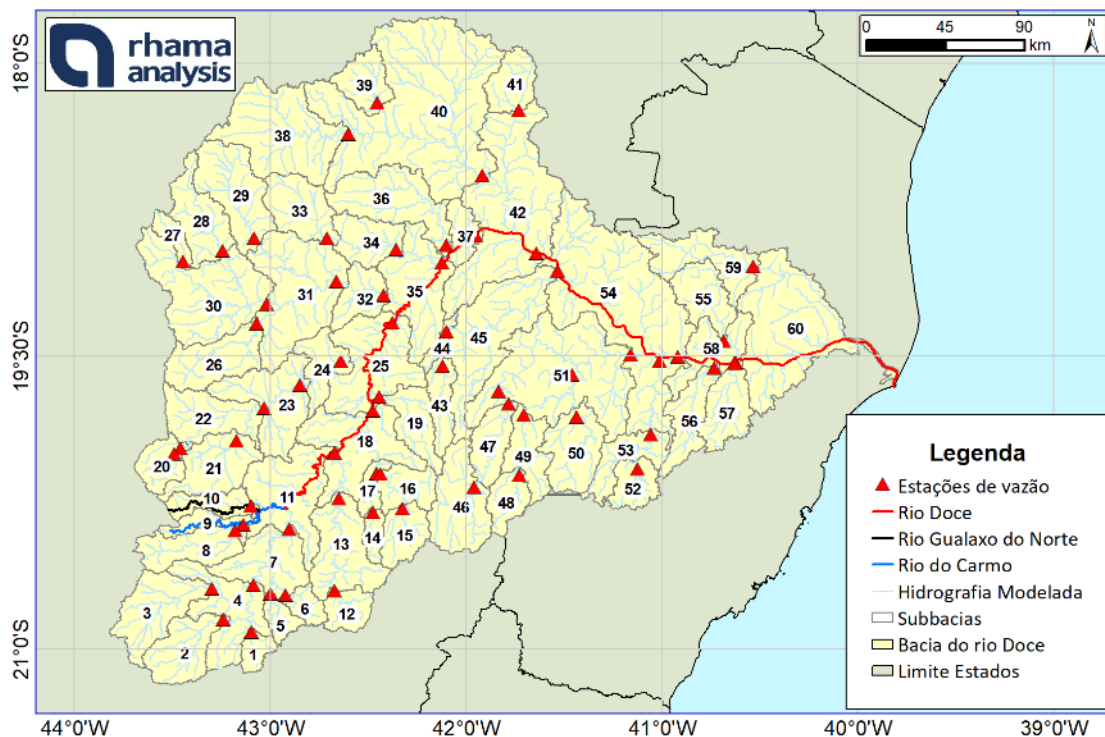


Figura 10. Delimitação de sub-bacias por localização dos postos fluviométricos e pontos de interesse na bacia do rio Doce.

Embora tenham sido considerados os 63 postos fluviométricos no estudo, conforme apresentado anteriormente na Tabela 3, alguns estão localizados muito próximos uns dos outros e foram considerados como um único local de geração de sub-bacias. Desta forma, foi gerado um total de 60 sub-bacias, as quais foram numeradas de montante para jusante ao longo dos rios de forma que uma determinada sub-bacia

não fique localizada a montante de outra com numeração inferior. Essa ordem, embora facilite uma visualização da conectividade topológica entre elas, é mais importante no processo de calibração do modelo hidrológico, pois cada uma delas pode receber um conjunto diferente de valores dos parâmetros para cada uma de suas Unidades de Resposta Hidrológica (URH, que são áreas de comportamento hidrológico similar) e, com isso, é possível melhorar a precisão dos resultados do modelo.

2.3. Unidades de resposta hidrológica

A variabilidade espacial da bacia dentro do MGB é considerada por meio das Unidades de Resposta Hidrológica (URH). As unidades são definidas por meio da sobreposição de mapas de tipo de solo e de uso da terra e vegetação. O número de URH a ser gerada é subjetivo e depende das quantidades de classes de tipos e usos de solo.

Neste estudo, as URHs foram obtidas diretamente do mapa de URHs desenvolvido por Fan et al. (2015) para toda a América do Sul. Este mapa foi elaborado com base em mapas de tipos de vegetação oriundos da iniciativa GlobCover (Arino et al., 2009) e em mapas de tipos de solo da FAO (FAO, 2003), do projeto RADAM BRASIL, e de outros produtos mais detalhados existentes em alguns estados brasileiros e os citados acima.

O mapa de URHs desenvolvido por Fan et al. (2015) tem sido utilizado em diversos estudos de modelagem hidrológica de grandes escalas com o uso do MGB, como em Lisboa et al. (2015), Lopes (2017), Silva et al. (2018), Siqueira et al. (2018), Fagundes et al. (2019), Fagundes et al. (2020), Suekame et al. (2020).

Embora diferentes tipos de solos apresentem comportamentos diferentes aos processos erosivos, na escala de aplicação do modelo MGB-SED torna-se impraticável a distinção de solos que possam apresentar comportamentos semelhantes. Portanto, considerando o uso de um modelo de grande escala, o mapa de URHs considerado neste estudo, já aplicados em diversos outros, é adequado e coerente com as características de uso e tipo de solo da Bacia do Rio Doce.

O mapa de URH da América do Sul (FAN et al., 2015) apresenta as seguintes classificações: floresta em solo raso e profundo; campo em solo raso e profundo; agricultura em solo raso e profundo; várzea e florestas inundáveis; água; e áreas semi-impermeáveis. Neste mapa, solos rasos foram considerados como aqueles que tem alta capacidade de geração de escoamento superficial, como os Cambissolos, Neossolos Litólicos, Litossolos e Gleissolos, enquanto solos profundos são aqueles que possuem baixa capacidade de gerar escoamento superficial, como os Argissolos e Latossolos.

As URH existentes na bacia do rio Doce, segundo esse mapa, estão apresentadas na Figura 11. Como resultado, consideram-se nove classificações: floresta em solo raso e profundo (FloRas e FloProf, respectivamente); campo em solo raso e profundo (CampRas e CampProf, respectivamente); agricultura em solo raso e profundo (AgriRas e AgriProf, respectivamente); várzea e florestas inundáveis (Várzea); água; e áreas semi-impermeáveis (ASI).

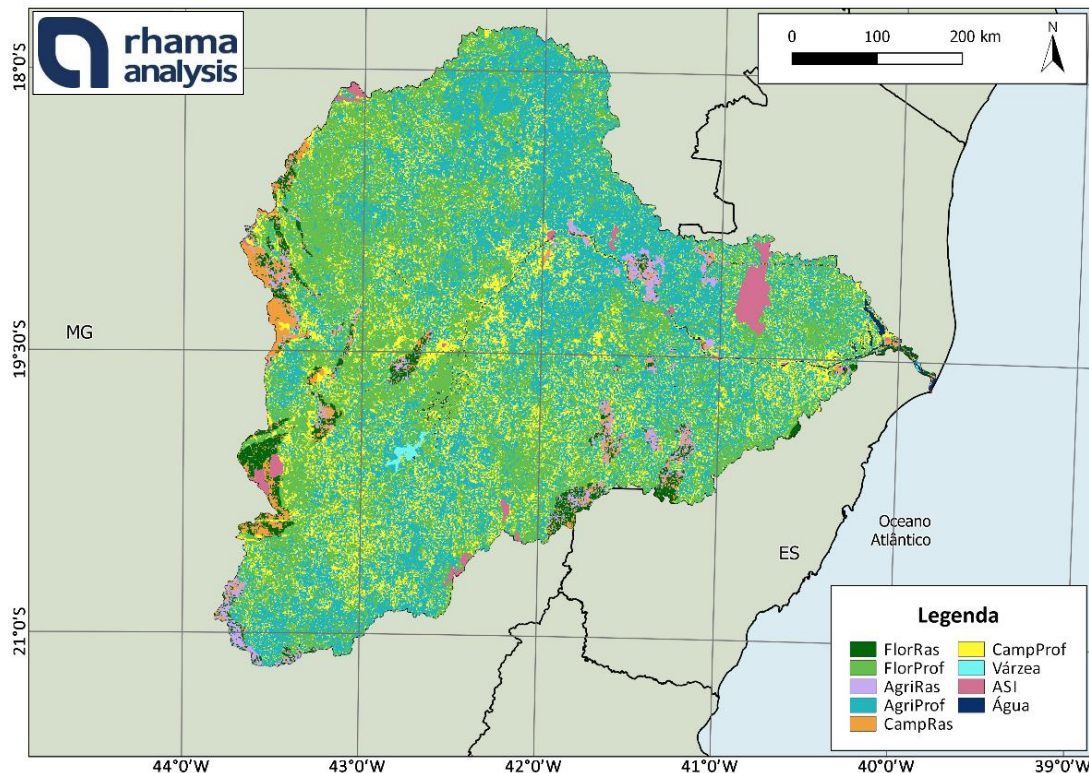


Figura 11. Unidades de Resposta Hidrológica (URH) da bacia do rio Doce.

2.4. Características físicas das minibacias

A maioria dos parâmetros do modelo MGB é relacionada às características físicas da bacia, como topografia, tipo e cobertura vegetal do solo, e é obtida via imagens de satélite, mapas digitalizados e modelo digital de elevação (MDE). Sendo assim, cada minibacia da discretização da área de estudo para aplicação do modelo MGB necessita de diversas informações a respeito das suas características físicas, como por exemplo: a área da superfície, a sua topologia hídrica e a da rede de drenagem, os comprimentos e declividades de trechos de rios internos a elas, as áreas acumuladas de drenagem, seus centroides, a distribuição das URHs, mapeamento das áreas de inundação, entre outros. Tais informações indispensáveis para aplicação do modelo, principalmente os comprimentos e as declividades dos trechos de rios em grandes bacias, raramente estão disponíveis e a sua extração tem sido obtida automaticamente a partir do MDE através de uma rotina contida no IPH Hydro-Tools.

2.4.1. Relações Geomorfológicas

No modelo MGB as seções transversais dos trechos de rios são consideradas retangulares (Figura 12), e os parâmetros geométricos de largura B [m] e profundidade máxima H [m] são estimados como função da área de drenagem Ad [km²], por meio de relações geomorfológicas. Essa abordagem tem sido utilizada amplamente na literatura devido às dificuldades de se obter informações de seções transversais que permitam uma adequada caracterização de grandes rios, como o rio Doce. Além disso, diversos trabalhos têm demonstrado que essa aproximação permite a adequada

representação das vazões níveis nos modelos hidrológicos (e.g. PAIVA et al., 2013, PONTES et al., 2017). Mais recentemente, Fleischmann et al. (2018) compararam duas abordagens com diferentes modelos, utilizando seções topobatimétricas levantadas em campo (simulando com o modelo HEC-RAS) e aproximações das relações geomorfológicas (simulando com o modelo MGB). Os autores mostraram que o modelo MGB foi capaz de representar suficientemente bem as vazões nas seções.

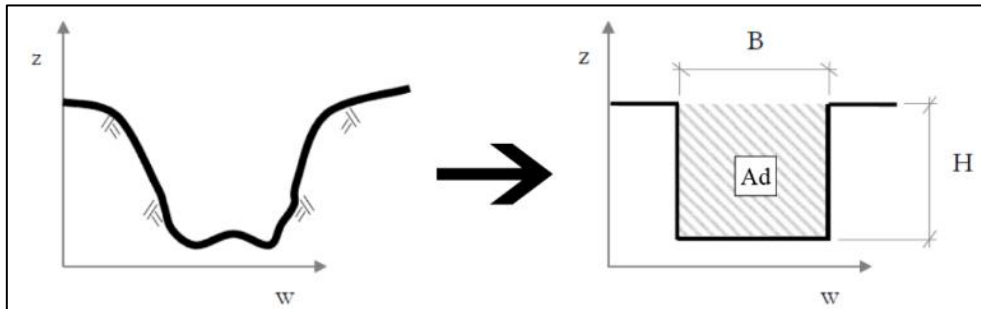


Figura 12. Representação de seções transversais naturais dos rios por seções do tipo retangular. Na figura, z representa a cota, w a largura, B a largura da seção, H a profundidade da seção e Ad a área da seção. Adaptado de Paiva (2009).

Fagundes (2018) analisou dados de perfis transversais de 27 estações fluviométricas disponibilizadas pela ANA na bacia do rio Doce e estabeleceu as equações geomorfológicas para a bacia. Cada uma das estações analisadas possuía mais de um perfil, de modo que, foram selecionados aqueles que representavam o comportamento médio da seção ao longo do tempo. Assim para o presente trabalho, essas relações foram escolhidas para serem utilizadas na simulação. As equações desenvolvidas para largura e profundidade, respectivamente, foram:

$$B = 0,1537 * Ad^{0,7123} \quad 1$$

$$H = 0,3489 * Ad^{0,204} \quad 2$$

2.5. Calibração e validação dos parâmetros do modelo hidrológico

O modelo MGB possui diversos parâmetros que são definidos em diferentes etapas de sua aplicação. A maioria dos parâmetros relacionados à topografia, como a área de drenagem e a declividade, é extraída do MDE, na etapa de pré-processamento. Existem também os parâmetros associados à vegetação, como o albedo, a altura do dossel e o índice de área foliar (COLLISCHONN, 2001). Os parâmetros associados à vegetação (albedo, índice de área foliar (IAF), altura das árvores e resistência superficial) estão detalhados no item 2.5.5, e não são considerados calibráveis, devendo ser definidos previamente, com base em informações da literatura. Já os parâmetros calibráveis do modelo hidrológico MGB são associados às propriedades físicas das URHs, especialmente com o solo, e são aqueles a que o modelo é mais sensível, então podem ser alterados no processo de calibração. A Tabela 5 apresenta esses parâmetros.

Tabela 5. Parâmetros calibráveis do modelo MGB. Adaptado de Fan e Collischonn (2014).

Parâmetro	Descrição
W_m	Capacidade de armazenamento de água no solo.
b	Parâmetro empírico que define a capacidade de armazenamento do solo em torno de W_m .
K_{bas}	Parâmetro que controla a vazão durante a estiagem. Valores mais altos implicam em maior escoamento subterrâneo.
K_{int}	Parâmetro que controla a quantidade de água da camada de solo que escoar subsuperficialmente.
XL	Controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária ou subsuperficial do solo.
CAP	Controla a possibilidade de retorno de água subterrânea para a camada de solo.
W_c	Limita o armazenamento residual e subterrâneo.
CI	Parâmetro para a calibração da propagação superficial nas minibacias.
CS	Parâmetro para a calibração da propagação subterrânea nas minibacias.
CB	Parâmetro que representa o retardo do reservatório subterrâneo.

Para a calibração do MGB é usual considerar a inspeção visual do ajuste dos hidrogramas e medidas de desempenho quantitativas, chamadas de funções objetivo. As funções objetivo consideradas para o presente trabalho foram o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe das vazões simuladas e observadas (ENS); o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões simuladas e observadas (ENS_{log}); e o erro relativo de volume total dos hidrogramas (ΔV).

2.5.1. O Coeficiente de Nash-Sutcliffe das Vazões

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe é uma forma quantitativa adimensional de avaliar o desempenho de um modelo hidrológico, medindo o quanto o modelo hidrológico é superior a um modelo alternativo, que é a média de longo prazo das vazões. O seu valor é adimensional e pode variar entre $-\infty$ a 1. Um modelo perfeito apresentaria coeficiente de valor igual a 1, e um modelo pior que o alternativo apresentaria valores menores que zero. O cálculo do coeficiente é dado por:

$$ENS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (QC_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^N (QO_i - QO_m)^2} \quad 3$$

em que QC_i é a vazão calculada num intervalo de tempo i ; QO_i é a vazão observada neste mesmo intervalo de tempo; N é o número de intervalos de tempo; e QO_m é a média das vazões observadas no período de N intervalos de tempo.

O coeficiente de Nash-Sutcliffe tem a tendência de dar mais valor a erros nos picos das vazões. Desta forma, ajustar o modelo apenas com o objetivo de maximizar o coeficiente de Nash-Sutcliffe pode resultar em um mau ajuste nos períodos de recessão,

quando a vazão é mais baixa. Para estes períodos, pode-se considerar o coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões.

2.5.2. O Coeficiente de Nash-Sutcliffe dos Logaritmos das Vazões

O coeficiente de Nash-Sutcliffe pode ser utilizado com os dados de vazão ou com os dados de vazão transformados por algum procedimento matemático, como a raiz quadrada, o inverso ou os logaritmos. O objetivo de calcular o coeficiente de eficiência usando os logaritmos das vazões é que desta forma se obtém uma medida de desempenho menos sensível aos picos e mais sensível aos períodos de recessão de vazão. Enquanto o coeficiente de Nash-Sutcliffe tem a tendência de dar mais valor a erros nos picos das vazões, o índice para o logaritmo das vazões favorece ajustes nas vazões menores.

Com a mesma interpretação que o coeficiente de Nash-Sutcliffe das vazões, o coeficiente de Nash-Sutcliffe dos Logaritmos das vazões tem um valor adimensional que pode variar entre $-\infty$ e 1. O coeficiente é dado por:

$$ENSlog = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\log(QC_i) - (\log(QO_i)))^2}{\sum_{i=1}^N (\log(QO_i) - (\log(QO_m)))^2} \quad 4$$

onde QC_i é a vazão calculada num intervalo de tempo i ; QO_i é a vazão observada neste mesmo intervalo de tempo; N é o número de intervalos de tempo; e QO_mLog é a média dos logaritmos das vazões observadas no período de N intervalos de tempo.

2.5.3. O Erro Relativo de Volume

O erro relativo de volume é uma forma de avaliar se existe um desvio sistemático de superestimava ou subestimativa da vazão. O erro relativo de volume é adimensional e pode ser apresentado em termos percentuais. Um erro relativo de -20%, por exemplo, indica que o modelo hidrológico gera, ao longo de todo o período de simulação, uma vazão média 20% inferior à vazão observada. Idealmente os erros de volume deveriam se manter numa faixa de -10% a +10%, que pode ser considerada razoável em função das incertezas da curva-chave e dos próprios dados medidos.

Desta forma, o erro relativo de volume total dos hidrogramas, ou viés, compara os volumes totais simulados e observados e aponta o quanto o simulado difere do observado, sendo dado por:

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^N QC_i - \sum_{i=1}^N QO_i}{\sum_{i=1}^N QO_i} \quad 5$$

onde QC_i é a vazão calculada num intervalo de tempo i ; QO_i é a vazão observada neste mesmo intervalo de tempo; N é o número de intervalos de tempo.

2.5.4. Avaliação do Desempenho

Para avaliar o desempenho do modelo, os resultados das estatísticas foram classificados de acordo com Moriasi et al. (2007). Esses autores sugerem as seguintes classificações para o desempenho de modelos hidrológicos baseadas no coeficiente de Nash-Sutcliffe (*ENS*): “Muito bom” para valores maiores que 0,75; “Bom” para valores entre 0,65 e 0,75; “Satisfatório” para valores entre 0,5 e 0,65; e “Não satisfatório” para valores abaixo de 0,50. Essa mesma classificação foi adotada para o coeficiente *ENSlog*. No entanto, é importante destacar que essa classificação foi determinada para modelos com passos de tempo mensais. Em modelos diários ou horários, geralmente espera-se que as estatísticas calculadas apresentem valores menores. Desta forma, nesse estudo, foi incluída uma nova faixa de valores entre os valores de 0,30 e 0,50 e classificada como “aceitável”, e os valores foram considerados “não satisfatórios” quando inferiores a 0,30. Desta forma, para os coeficientes *ENS* e *ENSlog*, a classificação adotada é:

Tabela 6. Classificação adotada para os coeficientes Nash-Sutcliffe (*ENS*) e Nash-Sutcliffe dos Logaritmos das Vazões (*ENSlog*)

Classificação	Faixa de valores da razão
Muito bom	$0,65 \leq ENS/ENSlog \leq 0,75$
Bom	$0,65 \leq ENS/ENSlog < 0,75$
Satisfatório	$0,50 \leq ENS/ENSlog < 0,65$
Aceitável	$0,30 \leq ENS/ENSlog < 0,50$
Não-satisfatório	$0,30 \geq ENS/ENSlog$

Para o erro de volume, Moriasi *et al.* (2007) indicam as seguintes classificações para o desempenho de modelos hidrológicos: “Muito bom” para erros de volume menores que +/- 10%; “Bom” para erros entre +/- 10% e +/- 15%; “Satisfatório” para erros entre +/- 15% e +/- 25%; e “Não satisfatório” para erros maiores que +/- 25%. No caso do erro de volume, também foi acrescentada uma faixa de valores entre os valores de +/- 25% e +/- 30% e classificada como “aceitável”, e os valores foram considerados “não satisfatórios” quando inferiores ou superiores a 30%. Desta forma, para erro de volume, a classificação adotada é:

Tabela 7. Classificação adotada para o erro de volume (ΔV).

Classificação	Faixa de valores
Muito bom	$\Delta V \leq +/- 10\%$
Bom	$+/- 10\% \leq \Delta V \leq +/- 15\%$
Satisfatório	$+/- 15\% \leq \Delta V \leq +/- 25\%$
Aceitável	$+/- 25\% \leq \Delta V \leq +/- 30\%$
Não-satisfatório	$\Delta V \geq +/- 30\%$

2.5.5. Parâmetros fixos

Os parâmetros fixos para a simulação hidrológica foram obtidos com auxílio de dados contidos na literatura (e.g. Shuttleworth, 1993; Collischonn, 2001) e baseados no estudo de Fagundes (2018) que os definiu com base nas características da bacia, estudos anteriores e utilização de imagens e produtos de sensoriamento remoto. O albedo [-] é

a parcela da radiação solar que é refletida ao atingir a superfície do solo, considerando sua cobertura vegetal. O Índice de Área Foliar [$\text{m}^2.\text{m}^{-2}$] expressa a relação entre a área das folhas de todas as plantas e da área de uma parcela de solo. A resistência superficial [s.m^{-1}] representa a resistência ao fluxo de umidade do solo, através das plantas até a atmosfera. Os valores dos parâmetros fixos adotados estão apresentados da Tabela 8 a Tabela 11. Nas tabelas, a numeração das URHs indica: 1) floresta em solo raso; 2) floresta em solo profundo; 3) campo em solo raso; 4) campo em solo profundo; 5) agricultura em solo raso; 6) agricultura em solo profundo; 7) várzea e florestas inundáveis; 8) áreas semi-impermeáveis; 9) água.

Tabela 8. Valores de albedo adotados para a simulação hidrológica na bacia do rio Doce.

URH	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
5	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
6	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
8	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
9	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Tabela 9. Valores do índice de área foliar adotados para a simulação hidrológica na bacia do rio Doce.

URH	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
2	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
3	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
6	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
7	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Tabela 10. Valores da altura das árvores adotados para a simulação hidrológica na bacia do rio Doce.

URH	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
2	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
3	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
7	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabela 11. Valores de resistência superficial adotados para a simulação hidrológica na bacia do rio Doce.

URH	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	40,0	40,0	40,0	50,0	60,0	70,0	60,0	50,0	40,0	40,0	40,0	40,0
2	40,0	40,0	40,0	50,0	60,0	70,0	60,0	50,0	40,0	40,0	40,0	40,0
3	40,0	40,0	40,0	50,0	60,0	70,0	60,0	50,0	40,0	40,0	40,0	40,0
4	40,0	40,0	40,0	50,0	60,0	70,0	60,0	50,0	40,0	40,0	40,0	40,0
5	40,0	40,0	40,0	50,0	60,0	70,0	60,0	50,0	40,0	40,0	40,0	40,0
6	40,0	40,0	40,0	50,0	60,0	70,0	60,0	50,0	40,0	40,0	40,0	40,0
7	20,0	20,0	20,0	50,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
8	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

2.5.6. Calibração hidrológica

O módulo hidrológico foi calibrado para toda a área de estudo, utilizando passo de tempo diário, compatível com a escala temporal dos dados disponíveis. O período de calibração escolhido foi de janeiro de 1990 a dezembro de 2014, buscando representar a hidrologia e hidrodinâmica na bacia em período anterior ao rompimento da barragem de Fundão.

Como exemplo de resultados obtidos na calibração do modelo MGB, as Figura 13 e Figura 15 apresentam os hidrogramas simulado e observado das estações Fazenda Ocidente (56337000) e Acaiaca (56335001) localizadas próximo aos exutórios de dois rios de grande importância para o presente estudo, que são o rio Gualaxo do Norte e o rio do Carmo, respectivamente. Embora o período de calibração tenha sido de 1990 a 2014, o período apresentado no gráfico é de 2006 a 2009, considerado representativo de todo o período e permitindo uma melhor visualização do resultado da calibração. Os resultados obtidos apresentaram concordância em períodos de vazões máximas e em períodos de estiagem. A qualidade dos resultados é mais bem verificada a partir das medidas de desempenho quantitativas apresentadas nas figuras.

Neste estudo, buscou-se avaliar a calibração dos parâmetros do modelo não apenas comparando os hidrogramas observados e simulados e avaliando as estatísticas de desempenho, mas também comparando suas curvas de permanência. A curva de permanência é uma função que relaciona as vazões ao percentual de tempo em que a mesma se verifica no curso d'água, sendo igualada ou superada neste período. Por exemplo, uma vazão com 70% de permanência, é igualada ou superada em 70% do tempo, ou ainda, em 30% do tempo as vazões são inferiores a esta. Desse modo a curva de permanência indica uma espécie de garantia de ocorrência de determinada vazão. Assim, quanto maior a permanência, menores as vazões.

Com a curva de permanência ajustada, tem-se mais uma garantia da representação do comportamento do regime hídrico da bacia. A curva é uma forma também de avaliar a ocorrência de vazões mínimas. Na Figura 14 e na Figura 16 são apresentadas as respectivas curvas de permanência para cada estação (Fazenda Ocidente e Acaiaca) utilizado como exemplo. Nestas figuras é possível observar um bom

ajuste das vazões e suas permanências no tempo, tanto para vazões mínimas quanto para as máximas. Por exemplo, para a estação Fazenda Ocidente, as vazões observadas e simuladas com permanência de 50% foram, respectivamente, 8,5 e 10,1 m³/s. Já as vazões observadas e simuladas com permanência de 90% foram ambas iguais a 5,3 m³/s.

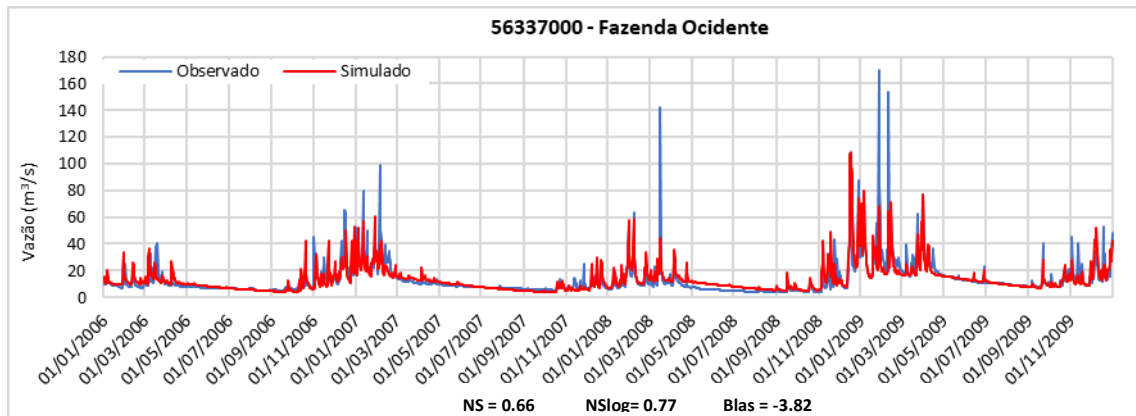


Figura 13. Hidrogramas simulado e observado na estação Fazenda Ocidente (56337000), a estação mais a jusante do rio Gualaxo do Norte. A simulação foi realizada no período de janeiro de 1990 a dezembro de 2014, mas o gráfico apresenta o período de 2006 a 2009 para melhor visualização.

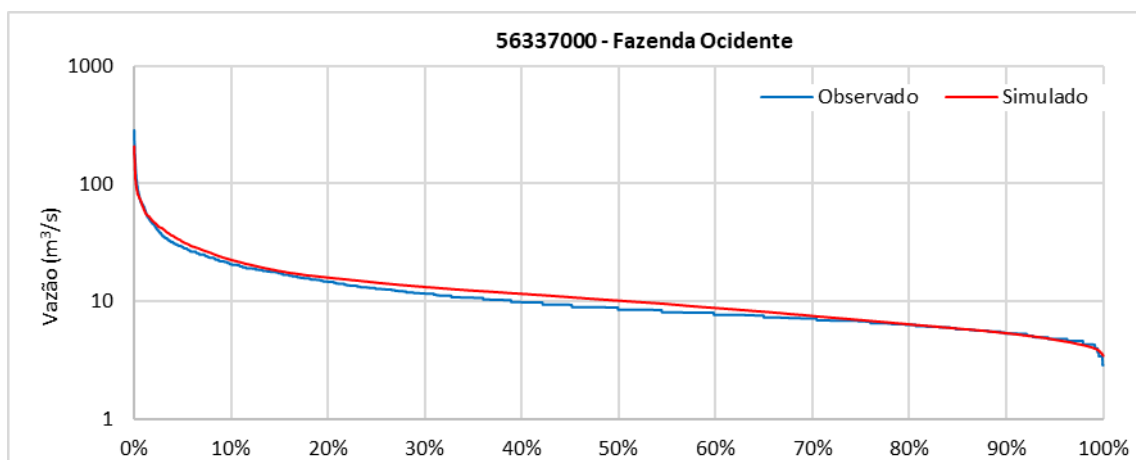


Figura 14. Curvas de permanência simulada e observada na estação Fazenda Ocidente (56337000), a estação mais a jusante do rio Gualaxo do Norte, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014.

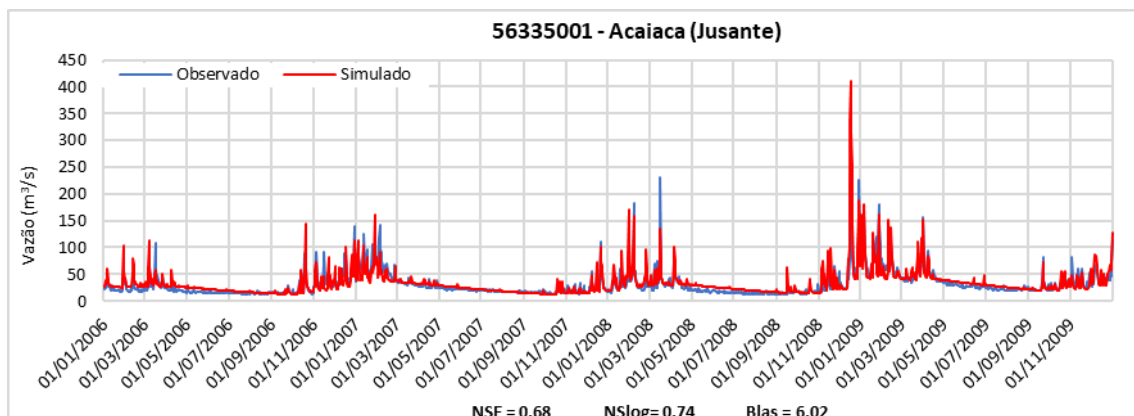


Figura 15. Hidrogramas simulado e observado na estação Acaiaca (56335001), a estação mais a jusante do rio do Carmo. A simulação foi realizada no período de janeiro de 1990 a dezembro de 2014, mas o gráfico apresenta o período de 2006 a 2009 para melhor visualização.

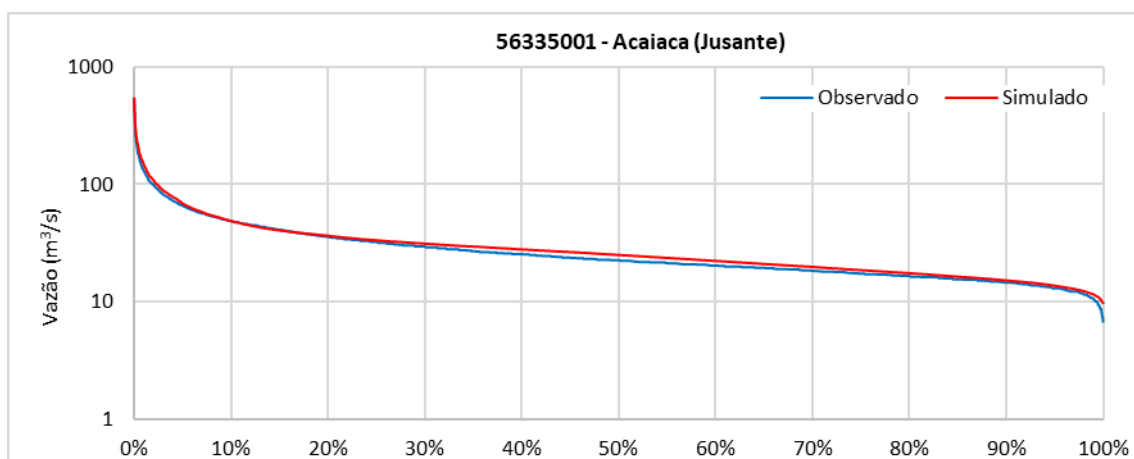


Figura 16. Curvas de permanência simulada e observada na estação Acaiaca (56335001), a estação mais a jusante do rio do Carmo, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014.

Os hidrogramas simulado e observado nas estações localizadas mais a jusante de alguns dos principais afluentes do rio Doce, como rio Piranga (56110005), rio Caratinga (56940002), rio Manhaçu (56990000), rio Santo Antônio (56825000), rio Piracicaba (56696000), rio Casca (56415000) e rio Pancas (56995500) avaliadas na calibração, bem como suas respectivas curvas de permanência, estão apresentados no APÊNDICE B. O período apresentado nos gráficos é de 2006 a 2009, considerado representativo de todo o período e permitindo uma melhor visualização do resultado da calibração. Os resultados mostram boa concordância geral nas estações analisadas, especialmente considerando as medidas de desempenho quantitativas.

Percebe-se um bom ajuste entre as curvas de permanência observadas e simuladas ao longo de todas as durações. Em algumas localidades, como Rio Casca (56415000), Naque Velho (56825000) e Ponte do Pancas (56995500), verifica-se uma diferença para as vazões mínimas, a partir da permanência de 50%. No entanto, estas

são bacias pequenas, onde a vazão de base é de difícil calibração, especialmente pela possibilidade de haver fluxo de sub-base entre ela e suas contribuintes, e este processo não é representado pelo modelo.

A Tabela 12 apresenta os valores das estatísticas de desempenho quantitativas calculadas para 62 das 63 estações fluviométricas utilizadas na simulação, conforme apresentado na Tabela 3, classificadas segundo os critérios de Moriasi *et al.* (2007) descritos na seção 1.5. A estação Fazenda Aconchego (56846890) não foi considerada na análise estatística de vazão devido à baixa disponibilidade de dados.

Pode-se inferir que foram obtidos resultados considerados satisfatórios para a maioria das bacias, dentro das limitações existentes em relação a disponibilidade de informação e qualidade dos dados, principalmente se levado em consideração o parâmetro de erro de volume, que apresentou resultados considerados muito bons para a maior parte das estações.

Tabela 12. Estatísticas calculadas para cada uma das 62 estações selecionadas na bacia do rio Doce e classificação do ajuste conforme Moriasi *et al.* (2007).

ID	Código	ENS	ENSlog	ΔV (%)	ID	Código	ENS	ENSlog	ΔV (%)
1	56028000	0,74	0,75	6,45	32	56820080	0,81	0,71	-9,07
2	56055000	0,65	0,69	-1,68	33	56825000	0,81	0,73	-10,16
3	56065000	0,61	0,56	-8,97	34	56845000	0,77	0,81	-9,56
4	56075000	0,81	0,83	-5,55	35	56846000	0,67	0,78	-11,07
5	56085000	0,52	0,50	8,39	36	56846080	0,93	0,90	1,47
6	56090000	0,51	0,56	-14,16	37	56850000	0,90	0,89	-0,55
7	56110005	0,82	0,82	-5,89	38	56851000	0,44	0,41	-19,54
8	56240000	0,69	0,70	-0,71	39	56860000	0,65	0,69	4,20
9	56335001	0,68	0,74	6,02	40	56870000	0,48	0,69	-17,35
10	56337000	0,66	0,72	8,14	41	56891900	0,78	0,82	-13,15
11	56385000	0,66	0,67	7,75	42	56920000	0,90	0,88	-6,82
12	56415000	0,55	0,67	13,93	43	56928000	0,55	0,75	-8,82
13	56425000	0,89	0,86	2,91	44	56935000	0,58	0,30	-7,06
14	56460000	0,76	0,77	-8,52	45	56940002	0,59	0,72	-6,97
15	56484998	0,79	0,74	-10,29	46	56960005	0,62	0,68	-5,93
16	56500000	0,58	0,62	-1,56	47	56976000	0,55	0,75	-22,39
17	56510000	0,80	0,75	-2,83	48	56978000	0,63	0,74	-20,76
18	56539000	0,88	0,87	6,36	49	56983000	0,73	0,78	-8,49
19	56570000	0,43	0,56	-19,04	50	56988500	0,62	0,73	-4,59
20	56610000	0,68	0,68	7,34	51	56989001	0,71	0,74	-0,92
21	56631900	0,50	0,74	3,89	52	56989400	0,83	0,85	6,37
22	56640000	0,58	0,69	-5,20	53	56990000	0,82	0,85	-10,37
23	56659998	0,74	0,71	6,40	54	56990990	0,43	0,39	-0,19
24	56688080	0,82	0,79	5,26	55	56991500	0,54	0,61	-11,30
25	56696000	0,78	0,76	-0,72	56	56992000	0,53	0,61	-6,54
26	56719998	0,90	0,87	4,53	57	56992400	0,90	0,81	11,21
27	56750000	0,26	0,52	-7,81	58	56993551	0,67	0,52	-5,00

ID	Código	ENS	ENSlog	ΔV (%)	ID	Código	ENS	ENSlog	ΔV (%)
28	56765000	0,67	0,74	-0,37	59	56994500	0,85	0,87	-5,07
29	56775000	0,61	0,79	-7,80	60	56994510	0,89	0,81	-8,70
30	56787000	0,33	0,65	2,89	61	56995500	0,72	0,80	-8,53
31	56800000	0,61	0,66	-3,32	62	56998400	0,58	0,59	-22,91

As principais áreas de interesse apresentaram NS na faixa do satisfatório ou superior. O desempenho também pode ser atestado pelos hidrogramas apresentados. Cerca de 90,3% das estações apresentaram resultados de ENS satisfatórios a muito bons na calibração, sendo 30,6% considerados satisfatórios, 24,2% bons e 35,5% muito bons. Já para a estatística ENSlog, o percentual entre satisfatório e muito bom foi de 95,2%, sendo 79,0% classificado com bons ou muito bons. Para o erro do volume, os resultados foram ainda melhores, verificando-se cerca de 75,8% de resultados classificados como muito bons.

2.5.7. Validação hidrológica

A validação do modelo consiste em avaliar os resultados das vazões simuladas em relação às observadas, considerando as mesmas métricas da calibração, porém considerando um período distinto daquele adotado para a calibração dos parâmetros. O modelo hidrológico foi validado para toda a área de estudo, utilizando passo de tempo diário, compatível com a escala temporal dos dados disponíveis. O período de validação escolhido foi de janeiro de 1970 a dezembro de 1989. Os parâmetros adotados para a calibração foram aplicados no período, a fim de realizar a validação.

Assim como na calibração, como exemplo de apresentação dos resultados da validação do modelo MGB foram consideradas as estações da Fazenda Ocidente (56337000) e Acaica (56335001), devido à proximidade aos exutórios dos rios Gualaxo e Carmo, que são de grande importância para esse estudo. As Figura 17 e Figura 19 apresentam os hidrogramas simulado e observado nessas estações.

O período apresentado no gráfico é de 1981 a 1983, considerado representativo de todo o período e permitindo uma melhor visualização do resultado da validação. Também são apresentadas as respectivas curvas de permanência das estações. Nestas figuras é possível observar um bom ajuste das vazões e suas permanências no tempo, de acordo com desempenho do modelo de representar a realidade de forma aproximada. Por exemplo, para a estação Fazenda Ocidente, as vazões observadas e simuladas com permanência de 50% foram, respectivamente, 9,4 e 9,9 m³/s. Já as vazões observadas e simuladas com permanência de 90% foram, respectivamente, 5,9 e 5,6 m³/s.

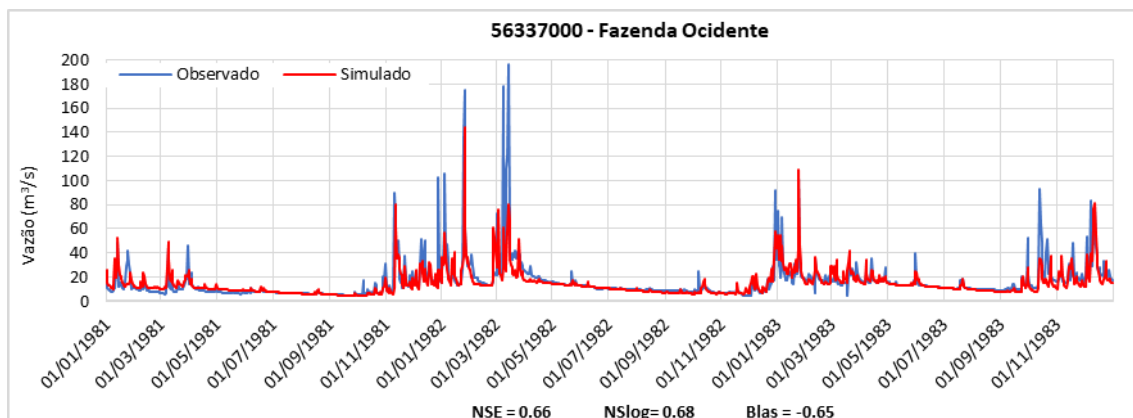


Figura 17. Hidrogramas simulado e observado na estação Fazenda Ocidente (56337000), a estação mais a jusante do rio Gualaxo do Norte, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989, mas o gráfico apresenta o período de 1981 a 1983 para melhor visualização.

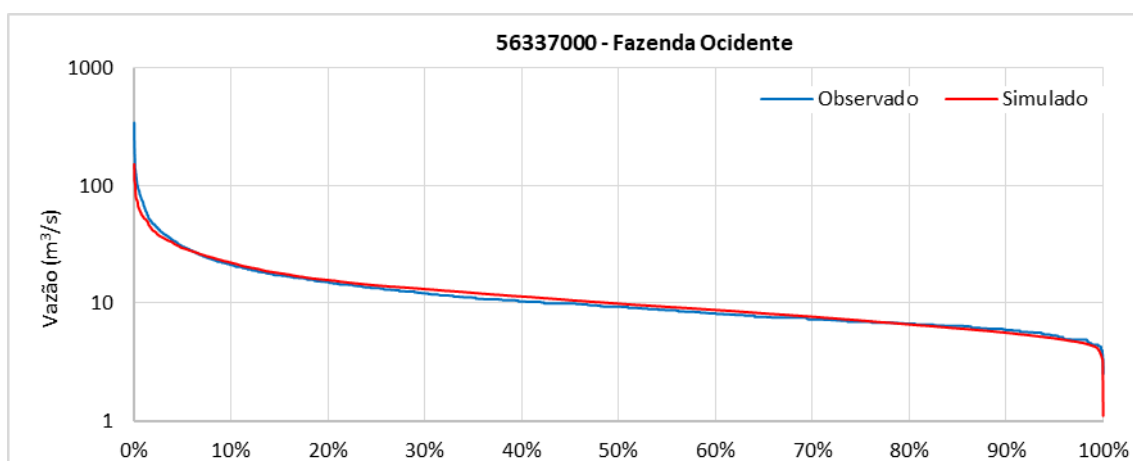


Figura 18. Curvas de permanência simulada e observada na estação Fazenda Ocidente (56337000), a estação mais a jusante do rio Gualaxo do Norte, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989.

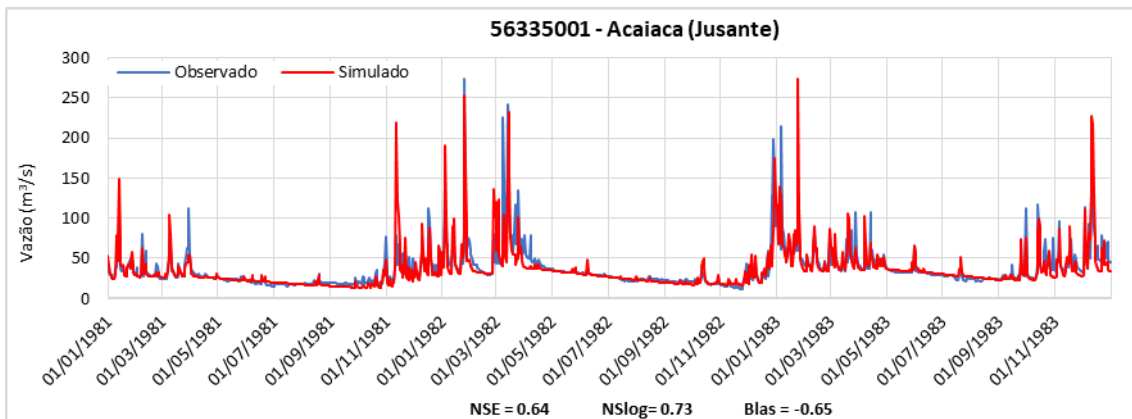


Figura 19. Hidrogramas simulado e observado na estação Acaiaca (56335001), a estação mais a jusante do rio do Carmo, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989, mas o gráfico apresenta o período de 1981 a 1983 para melhor visualização.

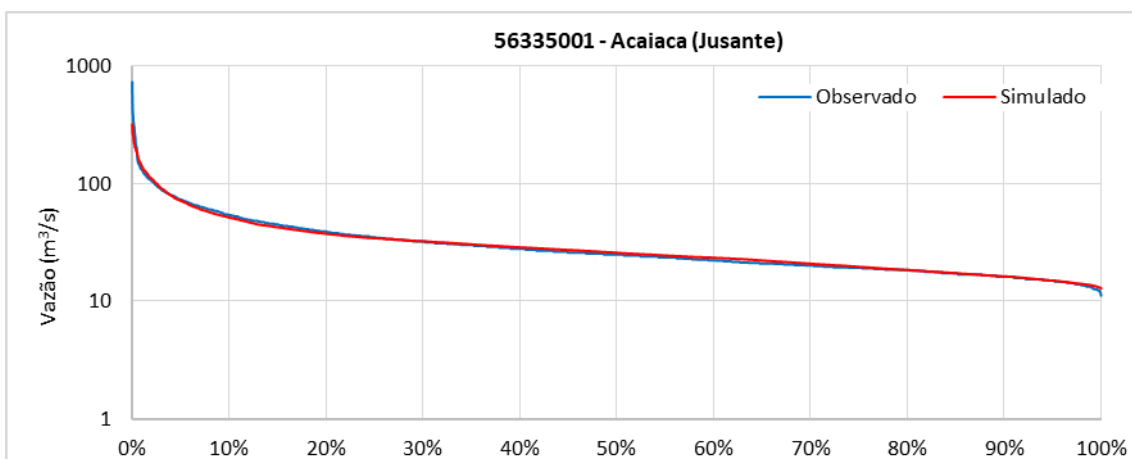


Figura 20. Curvas de permanência simulada e observada na estação Acaiaca (56335001), a estação mais a jusante do rio do Carmo, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989.

Os hidrogramas simulado e observado nas estações localizadas mais a jusante de alguns dos principais afluentes do rio Doce, como rio Piranga (56110005), rio Caratinga (56940002), rio Manhaçu (56990000), rio Santo Antônio (56825000), rio Piracicaba (56696000), rio Casca (56415000) e rio Pancas (56995500) avaliados na validação, bem como suas respectivas curvas de permanência, estão apresentados no APÊNDICE B. O período apresentado nos gráficos é de 1981 a 1983, considerado representativo de todo o período e permitindo uma melhor visualização do resultado da validação. Os resultados mostram uma boa concordância geral nas estações analisadas, especialmente considerando as medidas de desempenho quantitativas.

Percebe-se um bom ajuste entre simulação e observação. No entanto, para a estação Mario de Carvalho (56696000) o período mostrado se inicia em 1989, ano em que também foram iniciadas as operações da estação. A qualidade dos resultados pode ser verificada a partir dos estimadores estatísticos apresentados nas figuras e resumidos na Tabela 13.

A Tabela 13 apresenta os valores das estatísticas de desempenho qualitativas calculadas para 62 das 63 estações fluviométricas utilizadas na simulação, conforme apresentação na Tabela 3, classificadas segundo os critérios de Moriasi *et al.* (2007) descritos na seção 1.5. A estação Fazenda Aconchego (56846890) não foi considerada na análise estatística de vazão devido à baixa disponibilidade de dados.

As principais áreas de interesse apresentaram NS na faixa do satisfatório ou superior, não sendo encontrados valores menores que 0,60. Seis estações não possuíam dados no período de 1970 a 1989. Os piores desempenhos (estações 56846000, 56851000 e 56870000) foram identificados em bacias de cabeceira. Estas bacias são pequenas e podem apresentar fluxo subsuperficial entre elas e as sub-bacias para as quais drenam, o que é um comportamento não representado pelo modelo hidrológico. No entanto, por serem pequenas, seus impactos no resultado geral tendem a ser menores.

Como é de se esperar, é comum haver uma redução da qualidade dos resultados do modelo no período de validação, o que pode estar associado a fatores como diferenças nas variações anuais das chuvas durante os anos, qualidade dos dados medidos no passado, uso do solo nos períodos de calibração e validação. Ainda assim, pode-se inferir que foram obtidos resultados considerados satisfatórios para a maioria das estações, dentro das limitações existentes em relação a disponibilidade de informação e qualidade dos dados, principalmente se levado em consideração o parâmetro de erro de volume, que apresentou resultados considerados muito bons para a maior parte das estações.

Tabela 13. Estatísticas calculadas para cada uma das 62 estações selecionadas na bacia do rio Doce e classificação do ajuste conforme Moriasi *et al.* (2007).

ID	Código	ENS	ENSlog	ΔV (%)	ID	Código	ENS	ENSlog	ΔV (%)
1	56028000	0,77	0,78	-1,78	32	56820080	-	-	-
2	56055000	0,69	0,72	-6,48	33	56825000	0,78	0,50	-20,08
3	56065000	0,64	0,65	-9,18	34	56845000	-0,63	0,25	-3,13
4	56075000	0,76	0,77	-15,79	35	56846000	0,69	0,57	-20,96
5	56085000	0,49	0,69	-0,69	36	56846080	-	-	-
6	56090000	0,34	0,49	-28,41	37	56850000	0,87	0,80	-11,42
7	56110005	0,83	0,81	-9,80	38	56851000	0,34	0,39	-46,28
8	56240000	0,63	0,62	-5,44	39	56860000	0,59	0,70	-0,74
9	56335001	0,64	0,73	-0,65	40	56870000	0,12	0,16	-29,18
10	56337000	0,66	0,68	-0,65	41	56891900	0,69	0,67	-24,28
11	56385000	0,56	0,61	3,22	42	56920000	0,84	0,77	-16,07
12	56415000	0,66	0,73	5,99	43	56928000	-	-	-
13	56425000	0,89	0,83	-2,11	44	56935000	0,52	0,61	-10,63
14	56460000	0,66	0,69	-16,62	45	56940002	0,65	0,75	-15,50
15	56484998	0,71	0,65	-22,40	46	56960005	0,66	0,74	-11,74
16	56500000	0,58	0,54	-16,25	47	56976000	0,65	0,75	-18,98

ID	Código	ENS	ENSlog	ΔV (%)	ID	Código	ENS	ENSlog	ΔV (%)
17	56510000	0,74	0,70	-18,09	48	56978000	0,63	0,73	-22,01
18	56539000	0,80	0,81	-7,01	49	56983000	0,64	0,71	-12,72
19	56570000	0,54	0,55	-25,04	50	56988500	0,69	0,74	-2,35
20	56610000	0,63	0,62	-13,22	51	56989001	0,71	0,67	-11,62
21	56631900	-	-	-	52	56989400	0,87	0,86	-0,89
22	56640000	0,59	0,68	-15,08	53	56990000	0,83	0,82	-15,46
23	56659998	0,77	0,72	5,20	54	56990990	0,69	0,67	-2,97
24	56688080	-	-	-	55	56991500	0,58	0,59	-15,23
25	56696000	0,67	0,64	-13,37	56	56992000	0,61	0,66	-10,35
26	56719998	0,88	0,90	1,09	57	56992400	-	-	-
27	56750000	0,26	0,45	-18,11	58	56993551	0,71	0,57	-14,55
28	56765000	0,66	0,76	-13,20	59	56994500	0,81	0,78	-9,61
29	56775000	0,77	0,78	-10,17	60	56994510	0,66	0,34	-22,86
30	56787000	0,66	0,76	2,18	61	56995500	0,76	0,72	-8,21
31	56800000	0,49	0,52	-13,35	62	56998400	0,63	0,62	-22,67

2.5.8. Espacialização dos Resultados

Buscando identificar os locais onde as estatísticas indicaram maior ou menor desempenho do modelo, tanto na calibração quanto na validação, os resultados foram espacializados na bacia. A Figura 22, Figura 23 e Figura 24 apresentam os valores das estatísticas calculadas na bacia de maneira espacializada em mapa, onde os círculos correspondem a localização das estações. Cada círculo foi dividido ao meio e sua metade esquerda representa a classificação obtida na calibração, e a metade direita a classificação da validação. A Figura 21 apresenta a classificação obtida a partir dos coeficientes de ajuste utilizados. Observa-se que a grande maioria da região do rio principal e seus principais afluentes possuem ajustes BOM ou superior. Já estações que controlam pequenas bacias, principalmente de cabeceiras, são as que tem apresentados resultados piores, mas ainda assim aceitáveis.

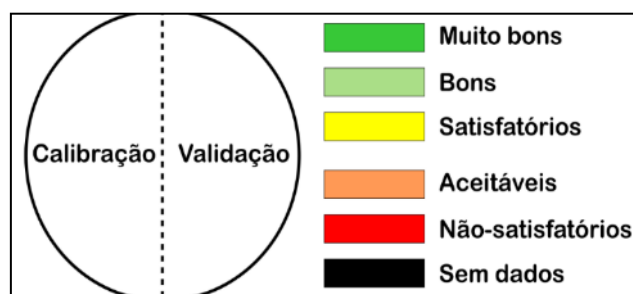


Figura 21. Representação gráfica dos coeficientes de ajuste obtidos para o período de calibração e validação.

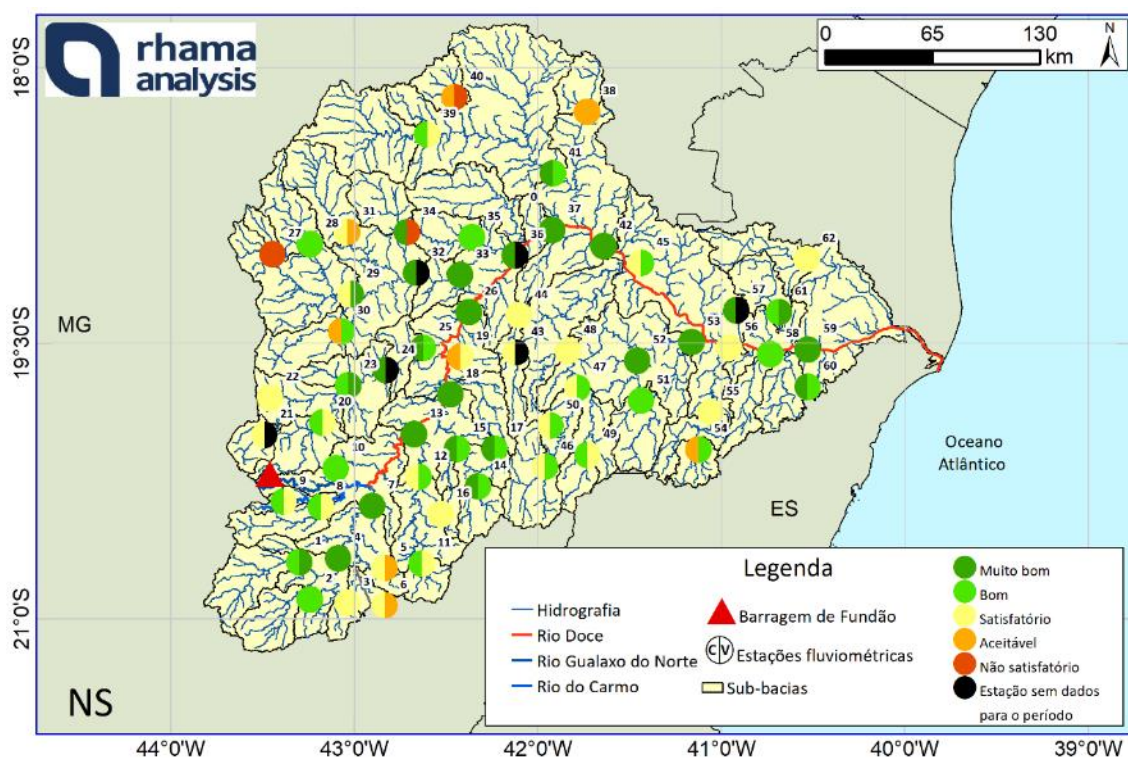


Figura 22. Coeficiente de Nash-Sutcliffe calculado para cada uma das estações fluviométricas da bacia.

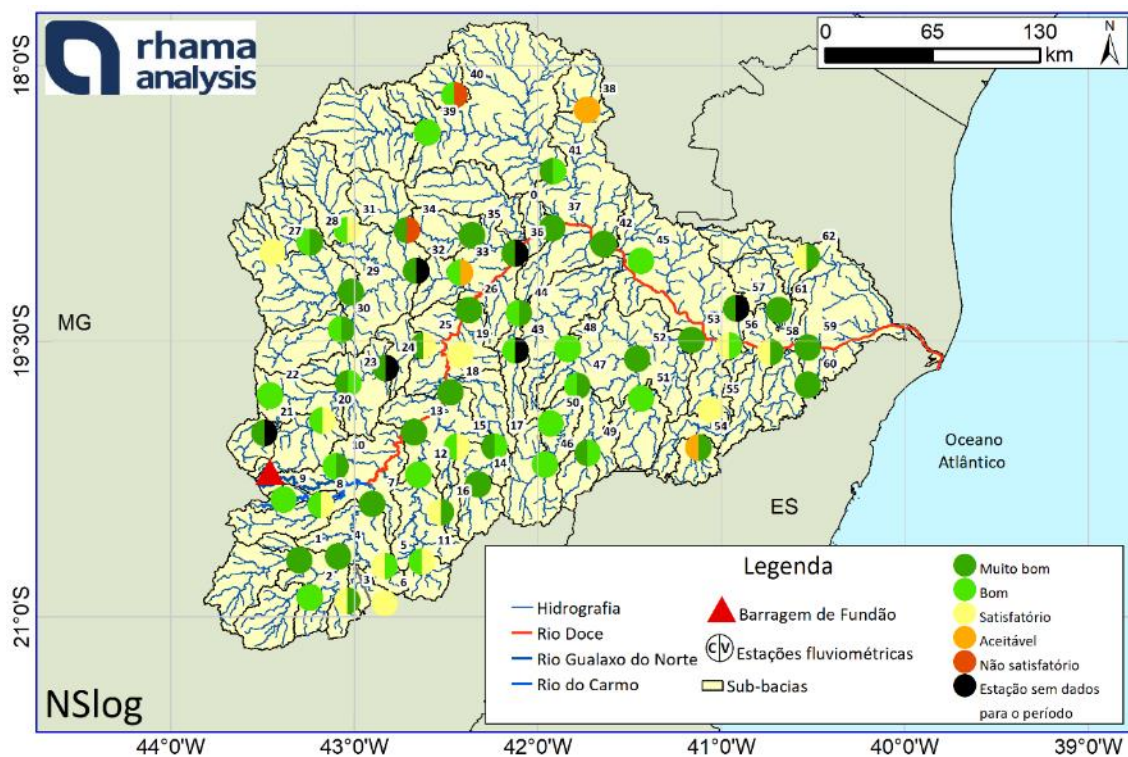


Figura 23. Coeficiente de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões calculado para cada uma das estações fluviométricas da bacia.

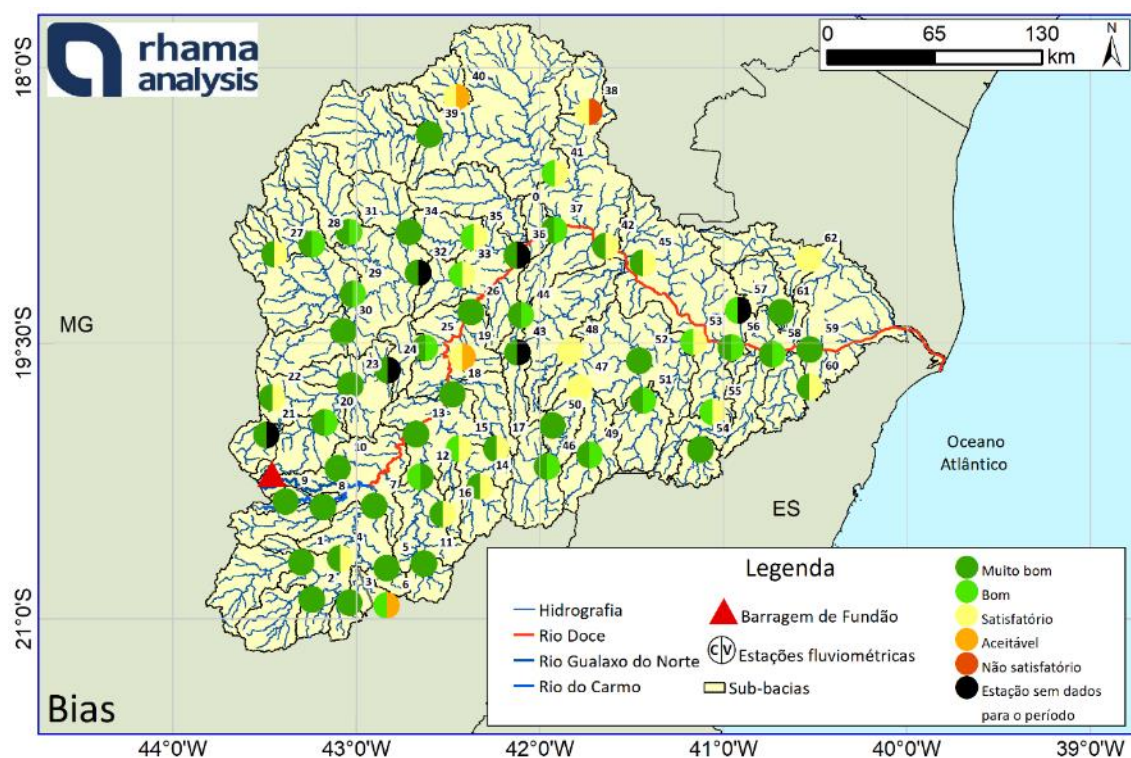


Figura 24. Erro de volume calculado para cada uma das estações fluviométricas da bacia.

3. MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA DO RIO DOCE

A medição e o controle dos processos relacionados à geração e ao transporte de sedimentos em bacias tornam-se mais complexos à medida que a área da bacia aumenta, visto que também se tornam maiores as interações entre diferentes processos erosivos e deposicionais, bem como seus impactos (VENTE et al., 2007). O monitoramento das variáveis envolvidas é, certamente, a principal forma de avaliação. No entanto, como ferramenta complementar, modelos computacionais são importantes para uma avaliação integrada da área de estudo. Os modelos hidrossedimentológicos permitem a avaliação dos efeitos dos agentes ambientais e das alterações antrópicas sobre os processos hidrológicos, de desagregação, de transporte e de deposição de sedimentos (SARI, 2017).

Conforme informado, esse estudo utiliza o modelo denominado MGB-SED (BUARQUE, 2015; FAGUNDES, 2018; FAGUNDES et al., 2019; FÖEGER, 2019), que consiste no acoplamento de um modelo de geração, transporte e redistribuição de sedimentos acoplado ao modelo hidrológico de grandes bacias MGB. Esse modelo foi o adotado no estudo realizado por Rhama (2020), o qual está sendo atualizado no presente estudo. No APÊNDICE C, apresenta-se a descrição detalhada do modelo.

Na sequência são apresentados os dados utilizados, os principais parâmetros que representam a produção de sedimentos nas bacias hidrográficas, a calibração e validação do modelo e a simulação de diferentes cenários para caracterizar a dinâmica de sedimentos em cenários históricos e atuais.

Importante destacar que na fase de calibração e validação do modelo de sedimentos, foram considerados dados existentes no período anterior ao rompimento da barragem de Fundão (nov/2015), sendo então considerado o período de anos completos de 1998 a 2014. Essa etapa buscou ajustar o modelo na bacia para representar a dinâmica dos sedimentos em condição anterior ao rompimento. Desta forma, será possível simular um cenário de referência, até o período de dados existentes mais recentes, no qual o rompimento seja desconsiderado, ou seja, uma situação hipotética do comportamento do rio caso o rompimento não tivesse ocorrido.

3.1. Dados utilizados

3.1.1. Dados de sedimentos em suspensão

Os dados de sedimentos em suspensão são importantes na modelagem para permitir a avaliação dos resultados do modelo. Esses dados podem ser obtidos de diversas fontes, no entanto a limitação das informações disponíveis é um dos maiores desafios para a modelagem de sedimentos.

Neste estudo, estão sendo considerados os dados de concentração de sedimentos em suspensão disponibilizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). A ANA disponibiliza dados de concentração de sedimentos em suspensão e descargas líquidas obtidos em estações de medição com amostragens a cada ano, com média de 4 medições por ano. A metodologia de amostragem e procedimentos de

laboratórios usados pela ANA seguem recomendações internacionais. Para o período anterior ao rompimento, foram selecionadas 30 estações. O critério de seleção adotado foi de que a estação possuísse ao menos 5 anos de medições.

Também foi selecionada a estação de Ouro Fino, que pertence à Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), a qual possui dados de monitoramento de sedimentos em suspensão para o período escolhido, em maior frequência de medição, totalizando 31 estações, as quais estão apresentadas na Tabela 14 e Figura 25.

Além dos dados acima, também serão incluídos nessa atualização os dados de descarga líquida (m^3/s) e concentração de sedimentos em suspensão (mg/L) do monitoramento realizado pela RHAMA no período de julho de 2019 a abril de 2022. A localização e características desses pontos estão apresentadas na Tabela 15 e na Figura 27, juntamente com a indicação da respectiva estação de monitoramento da ANA ou PMQQS ao longo do rio Doce.

No período pós rompimento da barragem de Fundão, serão considerados os dados de concentração de sedimentos em suspensão e descargas líquidas em 6 estações de interesse ao longo do rio Doce, disponibilizadas pela ANA, incluindo a estação Barra Longa, no rio Gualaxo do Norte, a montante da sua confluência com o rio do Carmo. Para a estação do Gualaxo do Norte (localizada no município de Barra Longa), conforme apresentado em RHAMA (2020 e 2021), os dados medidos utilizados foram campanhas realizadas pela Golder entre dezembro de 2017 e dezembro de 2022 (GOLDER, 2019) e as medições mais recentes realizadas pela RHAMA no período de julho de 2019 a abril de 2022.

Tabela 14. Estações de sedimentos selecionadas.

ID	Código ANA	Nome da Estação	Latitude	Longitude
1	56075000	Porto Firme	-20,6703	-43,0881
2	56110005	Ponte Nova Jusante	-20,3839	-42,9028
3	56335001	Acaiaca Jusante	-20,3614	-43,1394
4	56415000	Rio Casca	-20,2261	-42,6500
5	56425000	Fazenda Cachoeira D'antas	-19,9944	-42,6744
6	56484998	Raul Soares Montante	-20,1036	-42,4400
7	56539000	Cachoeira dos Óculos Montante	-19,7769	-42,4764
8	56696000	Mario de Carvalho	-19,5247	-42,6408
9	56775000	Ferros	-19,2322	-43,0200
10	56787000	Fazenda Barraca	-19,3319	-43,0703
11	56800000	Senhora Do Porto	-18,8947	-43,0825
12	56825000	Naque Velho	-19,1881	-42,4228
13	56846000	Porto Santa Rita	-18,9517	-42,3592
14	56850000	Governador Valadares	-18,8831	-41,9508
15	56860000	São Pedro do Suaçuí	-18,3631	-42,6022
16	56891900	Vila Matias Montante	-18,5747	-41,9178
17	56915500	Jampruca	-18,4594	-41,8075
18	56920000	Tumiritinga	-18,9711	-41,6417
19	56935000	Dom Cavati	-19,3728	-42,1028
20	56948005	Resplendor - Jusante	-19,3431	-41,2461
21	56976000	Fazenda Bragança	-19,7431	-41,7853

ID	Código ANA	Nome da Estação	Latitude	Longitude
22	56989400	Assarai Montante	-19,5947	-41,4581
23	56990000	São Sebastião da Encruzilhada	-19,4925	-41,1617
24	56990990	Afonso Cláudio Montante	-20,0775	-41,1242
25	56991500	Laranja da Terra	-19,9011	-41,0581
26	56992000	Baixo Guandu	-19,5236	-41,0142
27	56993551	Jusante Córrego da Piaba	-19,5586	-40,7325
28	56994500	Colatina	-19,5333	-40,6297
29	56995500	Ponte do Pancas	-19,4228	-40,6864
30	56998400	Barra De São Gabriel	-19,0411	-40,5339
31	**	Estação Ouro Fino (CEMIG)	-19,1900	-42,8800

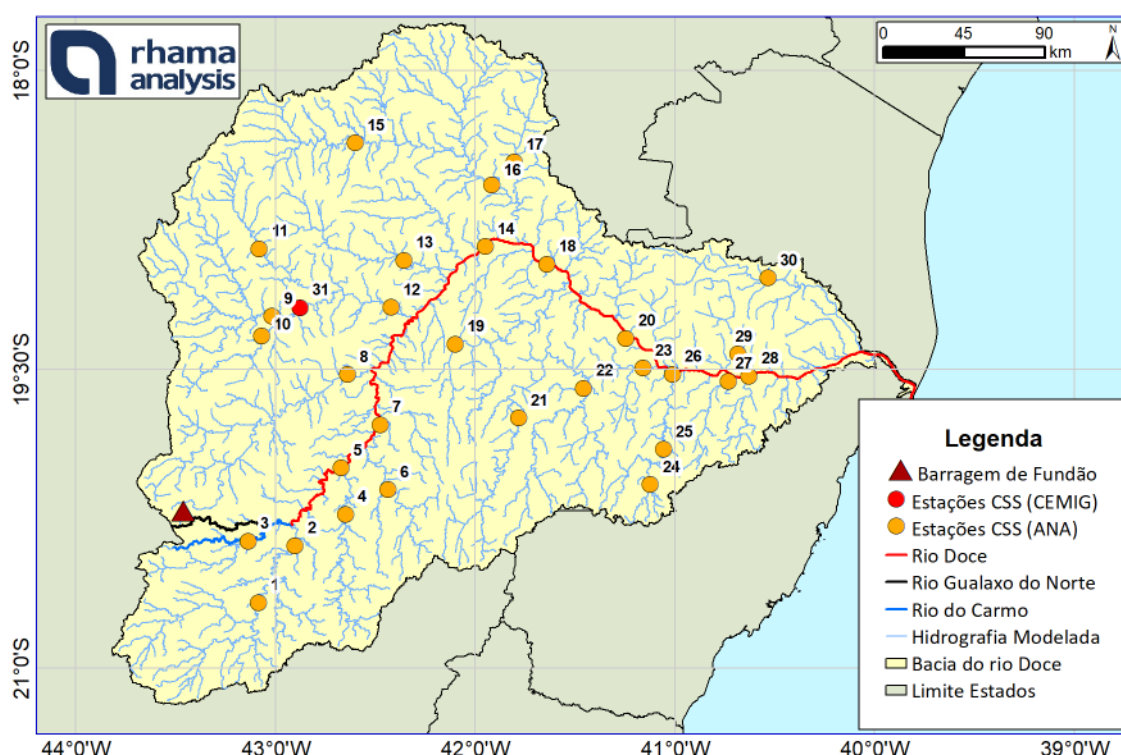


Figura 25. Localização das 31 estações de sedimentos selecionadas na bacia do rio Doce.

Tabela 15. Estações de monitoramento com dados coletados pela RHAMA e correspondentes postos da ANA ou PMQQS existentes no local ou próximos do monitoramento atual.

Seção ¹	Rio	Área de drenagem (km ²)	Código e nome do Posto considerado na Fase II ²		Lat.	Long.	Município
RD1	Doce	10.100	56425000	Fazenda Cachoeira D'Antas	-19,99	-42,67	São José Goiabal–MG
RD2	Doce	18.088	56539000	Fazenda Cachoeira dos Óculos	-19,55	-42,52	Bom Jesus do Galho–MG
RD3	Doce	40.500	56850000	Governador Valadares	-18,88	-41,95	Gov. Valadares–MG
RD10	Doce	55.100	56920000	Tumiritinga	-18,97	-41,64	Tumiritinga–MG
RD15	Doce	78.707	56994500	Colatina	-19,51	-40,56	Colatina–ES

¹ Nomeação das estações de monitoramento do programa atual, sendo representativos à seção de escoamento.

² Nomeação dos respectivos postos da ANA ou PMQQS existentes no local ou próximos do monitoramento atual.

O monitoramento realizado pela Golder Associates corresponde a medições do transporte de sedimentos no rio Gualaxo do Norte e no rio do Carmo durante a estação chuvosa e possui dados disponíveis para o período de 2017 e 2022. O programa de monitoramento inclui medições de vazão, concentração de sedimentos em suspensão e turbidez com frequência variável. Os postos de monitoramento estão apresentados na Tabela 16 e Figura 26.

Tabela 16. Postos de monitoramento da Golder Associates.

ID	Posto	Latitude	Longitude
1	RGN01	-20,28	-43,48
2	RGN06	-20,30	-43,25
3	RGN08	-20,29	-43,06
4	RCA01	-20,35	-43,11
5	RCA02	-20,28	-43,04
6	RDO01	-20,26	-42,89
7	RPG01	-20,33	-42,90

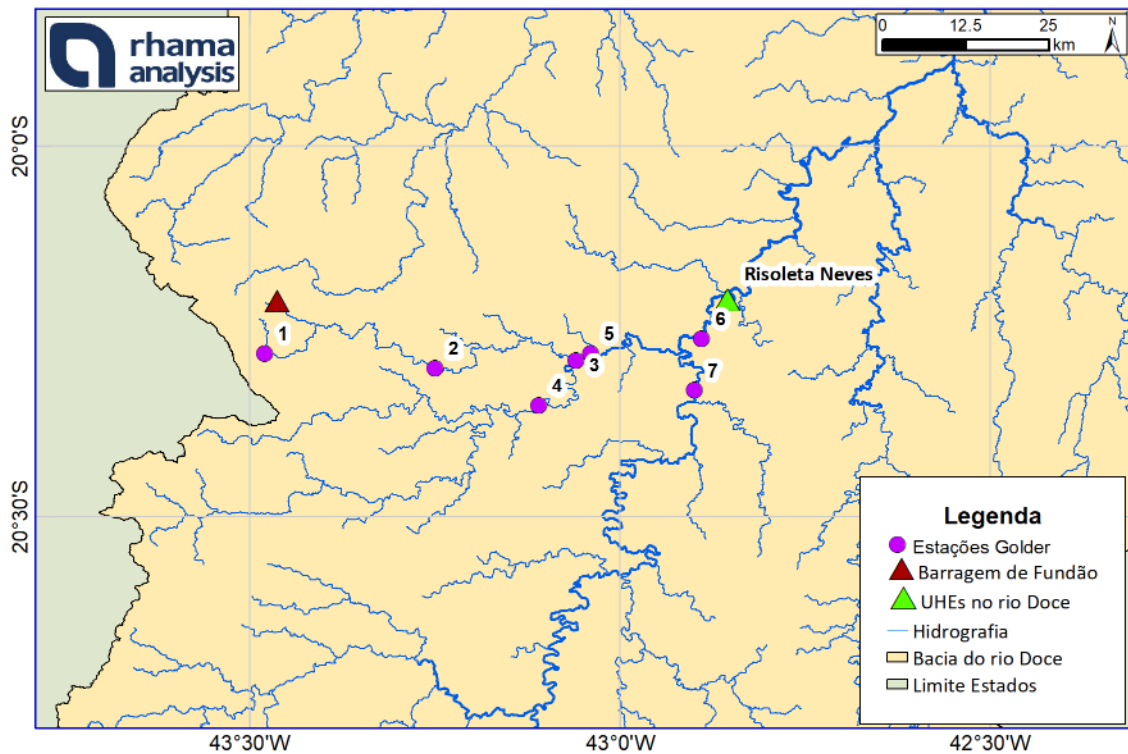


Figura 26. Localização de postos de monitoramento da Golder Associates.

3.1.2. Dados de sedimentos de leito

O modelo MGB-SED possui dois módulos principais: (a) geração de sedimentos e transporte na bacia contribuinte e (b) transporte de sedimentos no canal principal (rio Doce).

No primeiro módulo a geração de sedimentos na superfície da bacia é estimada com base no uso da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE). Essa equação permite a estimativa do volume de solo erodido com passo de tempo diário. O

material erodido na bacia é separado em três classes de partículas com suas dimensões médias (silte, argila e areia), as quais são propagadas para a rede de drenagem (corpos d'água), ao longo da qual são transportadas considerando dois processos:

- Partículas de silte e argila são transportadas como sedimentos em suspensão adotando uma equação de advecção;
- Partículas de areia são transportadas como carga de fundo adotando a equação da continuidade de sedimentos.

No canal de drenagem são considerados os processos de erosão e deposição de carga de fundo, a partir de uma equação de capacidade de transporte dependente das características hidráulicas do escoamento. Já as partículas em suspensão permanecem em suspensão até que possam ser depositadas em reservatórios ou planícies de inundação.

Portanto, o modelo MGB-SED permite a simulação do transporte de sedimentos em suspensão e de leito ao longo da rede de drenagem. No estudo anterior (Rhama, 2020), foi avaliado o transporte de sedimentos em suspensão. No entanto, neste estudo de atualização, é considerado também o transporte de sedimentos do leito. Para isso são considerados os dados de monitoramento de descarga de leito realizado pela Rhama a partir de 2019 nas estações apresentadas na Tabela 17 e Figura 27. Porém, é importante destacar que o modelo considera as duas formas de transporte independentes, não havendo uma interação direta entre os sedimentos destas duas camadas, portanto a erosão do leito ocorre apenas para as partículas de sedimentos do leito. Por outro lado, buscando **atender a observação (a) apresentada no item 1.3**, para o transporte de sedimentos em suspensão foi considerada uma equação de deposição e ressuspensão desses sedimentos eventualmente depositados, a qual está apresentada na simulação do CENÁRIO B do presente relatório.

Tabela 17. Estações de monitoramento com dados coletados pela RHAMA, onde serão considerados dados de descarga de leito.

Seção ¹	Rio	A (km ²)	Operadora	Posto ²	Lat.	Long.	Município
RD13	Gualaxo do Norte	284	RENOVA	RGN 06	-20,30	-43,25	Mariana-MG
RD4	Gualaxo do Norte	529	ANA	56337000	-20,27	-43,10	Barra Longa-MG
RGN8	Gualaxo do Norte	560	RENOVA	RGN 08	-20,29	-43,10	Barra Longa-MG
RCA1	Carmo	529	ANA	56335001	-20,35	-43,11	Acaiaca-MG
RD11	Gualaxo do Norte	2.166	ANA	56335500	-20,28	-43,04	Barra Longa-MG
RPG1	Piranga	1.370	CPRM	56110005	-20,33	-42,90	Ponte Nova-MG
RD17	Doce	8.988	IGAM	RD 072	-20,26	-42,91	Rio Doce-MG
RD1	Doce	10.100	ANA	56425000	-19,99	-42,67	São José Goiabal-MG
RD2	Doce	18.088	RENOVA	RDO 04	-19,55	-42,52	Bom Jesus do Galho-MG
RD6	Doce	24.200	ANA	56720000	-19,32	-42,36	Bugre-MG
RD16	Doce	36.117	RENOVA	RDO 06	-19,10	-42,16	Periquito-MG

Seção ¹	Rio	A (km ²)	Operadora	Posto ²	Lat.	Long.	Município
RD3	Doce	40.500	ANA	56850000	-18,88	-41,95	Gov. Valadares–MG
RD5	Doce	61.200	ANA	56948005	-19,33	-41,25	Resplendor–MG
RD14	Doce	75.302	RENOVA	RDO 12	-19,50	-40,76	Colatina–ES
RD15	Doce	78.707	RENOVA	RDO 14	-19,51	-40,56	Colatina–ES
RD7	Doce	82.100	ANA	56998000	-19,41	-40,06	Linhares–ES

¹ Nomeação das estações de monitoramento do programa atual, sendo representativos à seção de escoamento.

² Nomeação dos respectivos postos da ANA ou PMQS existentes no local do monitoramento atual.

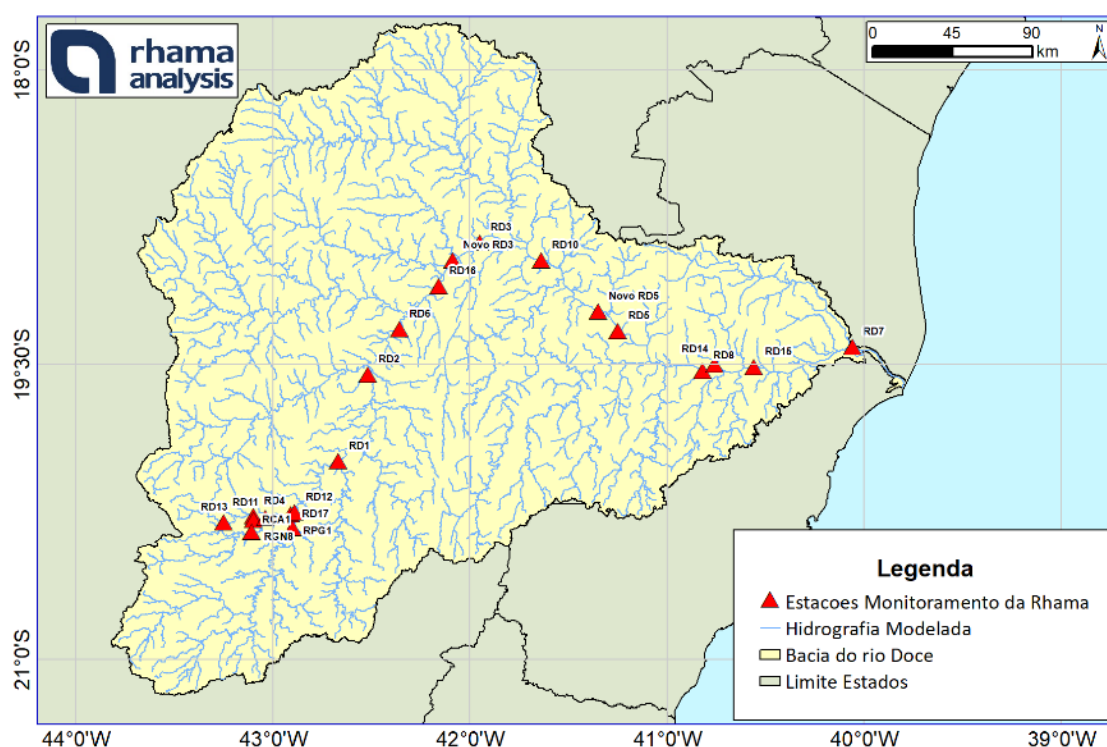


Figura 27. Localização das Estações de monitoramento do programa atual com dados coletados pela RHAMA, com dados de descarga de leito e suspensão.

Com esses dados o modelo foi calibrado para que possa também representar o transporte de sedimentos de fundo de forma compatível com os dados observados e a relação entre sedimentos em suspensão e sedimentos de fundo. O código do modelo foi alterado para produzir as vazões sólidas em suspensão e de fundo para serem apresentados os resultados, **atendendo assim a demanda (g) apresentada no item 1.3.**

3.1.3. Condições de Contorno

No módulo produção de sedimentos utiliza-se como entrada as características da bacia e a precipitação para estimar a geração de sedimentos da bacia pela equação da

MUSLE (Equação 6 e APÊNDICE C), que é transportada até as seções de entrada no rio Doce.

$$SED_{i,j}^k = 11,8 * (Dsup_{i,j}^k * qpico_{i,j}^k * Ap_{i,j}^k)^{0,56} * K_j * C_j * P_j * LS_{i,j}^K \quad 6$$

onde i e j são índices que indicam as minibacias e a URH, k o pixel ao qual a equação está sendo aplicada. Na equação, SED [t] é a carga de sedimentos resultante da erosão do solo, Q_{sup} [mm.ha⁻¹] é o volume de escoamento superficial, qpico [m³.s⁻¹] é a taxa de pico do escoamento superficial, Ap [ha] é a área superficial do pixel, K [0,013.t.m².h.(m³.t.cm)⁻¹] é o fator de erodibilidade do solo, C [-] é o fator de cobertura e manejo do solo, P [-] é o fator de práticas conservacionistas, LS [-] é o fator topográfico.

No módulo de transporte de sedimentos do rio Doce, as condições iniciais são a concentração de sedimentos existentes no rio e a vazão inicial na parte de montante (fornecida pelo módulo hidrológico). Possíveis erros nas condições iniciais são rapidamente dissipados após alguns passos de tempo. As condições hidráulicas do módulo de sedimentos são fornecidas pelo módulo hidrológico a cada passo de tempo de simulação. Ao longo do trecho, este módulo recebe a contribuição de vazão líquida e vazão sólida dos tributários para o transporte do escoamento e dos sedimentos ao longo do rio Doce.

Como a bacia do rio Doce drena para o oceano, possíveis impactos das marés nos resultados do modelo próximo à foz serão evitados com a modelagem realizada até uma seção do rio Doce localizada 10km a montante da foz, semelhante à modelagem hidrológica⁴. **Essas informações buscam atender as demandas (h) e (l) apresentadas no item 1.3.**

3.1.4. Definição de parâmetros da MUSLE

Para a simulação de sedimentos são necessários dados relativos aos parâmetros da MUSLE, que são estimados para cada Unidade de Resposta Hidrológica (URH) da bacia (com exceção do fator de comprimento e declive LS). O fator LS foi determinado na etapa de pré-processamento, para cada pixel do MDE, com rotina computacional específica (BUARQUE, 2015), mantendo-se as informações a respeito da minibacia e URH à qual pertence cada pixel. Os outros parâmetros foram baseados no trabalho de Fagundes (2018).

O fator de erodibilidade K da MUSLE adotado foi estimado com base nas informações dos percentuais de silte, argila, areia e carbono orgânico de cada tipo de solo, os quais foram obtidos para cada tipo de solo das URHs a partir das informações disponíveis no mapa de solo da Food and Agriculture Organization of the United Nations

⁴ Um estudo realizado pela Rede Rio Doce Mar (FEST-RRDM, 2019) avaliou a intrusão salina no rio Doce e verificou que na localidade de Povoação, já não há influência das marés. Condição de ausência de influência de maré nessa região também foi observada em uma análise independente dos resultados do modelo desenvolvido pela COPPETEC (2020).

- FAO (FAO, 1971). O fator de cobertura e manejo do solo C foi definido com base em valores apresentados na literatura. Os valores do fator C para floresta, agricultura e campo foram obtidos em Silva et al. (2010), o valor para várzea em Vázquez-Fernández et al. (1996) e de áreas semi-impermeáveis em Ribeiro e Alves (2007).

Como existe uma deficiência de informações detalhadas e espacialmente distribuídas a respeito das medidas conservacionistas do solo, o fator de práticas conservacionistas P tem sido comumente adotado como 1 (VENTE et al., 2008; WILKINSON et al., 2009; BUARQUE, 2015; FAGUNDES, 2018). Neste estudo, o valor será considerado o valor unitário de P para todas as unidades de resposta hidrológica. Os parâmetros da MUSLE inicialmente adotados para cada unidade de resposta hidrológicas estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18. Parâmetros da MUSLE utilizados na simulação.

URH	Solos	K				C	P
		Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	OrgC (%)		
FlorRas	Cambissolos e litossolos	65,550	15,550	18,900	0,870	0,04	1
FlorProf	Argissolos e latossolos	44,500	16,750	38,750	1,835	0,04	1
AgriRas	Cambissolos e litossolos	65,550	15,550	18,900	0,870	0,164	1
AgriProf	Argissolos e latossolos	44,500	16,750	38,750	1,835	0,164	1
CampRas	Cambissolos e litossolos	65,550	15,550	18,900	0,870	0,05	1
CampProf	Argissolos e latossolos	44,500	16,750	38,750	1,835	0,05	1
Várzea	Argissolos	53,300	17,200	29,500	1,740	0,001	1
ASI	Argissolos e latossolos	44,500	16,750	38,750	1,835	0,001	1
Água	-	0	0	0	0	0	1

3.2. Calibração e validação do modelo de sedimentos

O modelo MGB-SED possui parâmetros que podem ser calibrados, os quais estão relacionados ao processo de geração de sedimentos na bacia. A calibração do modelo consiste em determinar os valores dos seus parâmetros, de forma que os resultados das simulações sejam os mais próximos possíveis dos valores observados. Os dados observados considerados na calibração são os dados medidos de concentrações de sedimentos em suspensão nos rios (C_s , em mg.L^{-1}), pertencentes às 31 estações de sedimentos apresentadas na Tabela 14 e Figura 25 e disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Para estas estações, também foram consideradas as descargas sólidas (Q_s , em ton.dia^{-1}) observadas, obtidas pela Equação 7, onde Q [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$] é a vazão líquida.

$$Q_s = 0,0864.Q.C_s \quad 7$$

No entanto, destaca-se que o ajuste dos resultados de modelos de sedimentos aos dados observados é limitado devido à baixa frequência temporal das medições de concentração de sedimentos em postos fluviométricos da rede oficial da ANA que, tipicamente, apresentam um máximo de 4 medições anuais. Além disso, as medições raramente são realizadas em períodos de vazão alta, que são os períodos em que a concentração tende a ser mais elevada.

O modelo de sedimentos foi calibrado para toda a área de estudo, nas 31 seções dos rios onde há postos de sedimentos com dados, utilizando passo de tempo diário, compatível com o passo de tempo da simulação hidrológica. Desta forma, foi possível estabelecer um conjunto de parâmetros com valores distintos em cada uma das sub-bacias que contribuem para a seção do rio que possui estações de sedimentos. As sub-bacias de contribuição para as estações estão apresentadas na Figura 28, onde a sub-bacia 32 corresponde a área incremental de contribuição ao exutório, portanto, sem estação de monitoramento e sem calibração dos valores dos parâmetros.

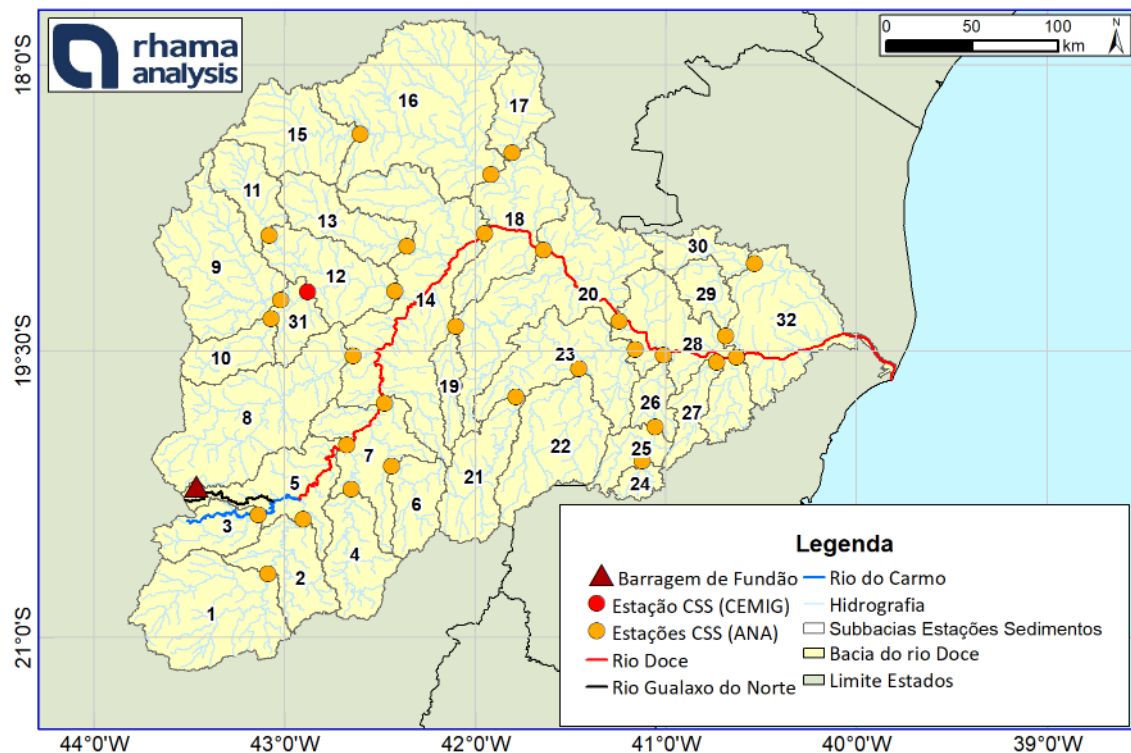


Figura 28. Limite das sub-bacias que contribuem para a seção do rio que possui estações de sedimentos, na bacia do rio Doce, com dados disponíveis.

O período de calibração escolhido foi de janeiro de 2005 a dezembro de 2014, buscando representar a dinâmica de sedimentos na bacia em período anterior ao rompimento da barragem de Fundão. Optou-se por dividir o período selecionado para calibração do modelo hidrológico (1990 a 2014) para as etapas de calibração e validação do modelo de sedimentos, pois este era o período com maior quantidade de dados medidos de concentração de sedimentos em suspensão disponíveis para análise.

A calibração foi realizada de maneira manual e para sua avaliação buscou-se comparar a série contínua de concentrações de sedimentos em suspensão simuladas com os pontos medidos desta variável nos postos. Também buscou-se comparar a série de descargas sólidas simuladas com as descargas sólidas observadas nos postos. Além disso, foram consideradas estatísticas para avaliação dos resultados.

A seguir são apresentados os parâmetros calibráveis, as estatísticas consideradas para avaliar o desempenho do modelo e os resultados preliminares do processo de calibração.

A partir da calibração das cargas em suspensão estimadas pelo modelo, foram avaliadas as estimativas da carga de leito utilizando a equação clássica de capacidade de transporte de Meyer Peter & Muller. Como no período de calibração e validação não havia dados de descarga de leito disponíveis, fez-se uma avaliação da proporção da carga de leito e a carga total transportada estimada pelo modelo e àquela estimada a partir de dados medidos *in situ* entre 2019 e 2022. Os dados *in situ* foram coletados nas estações apresentadas na Tabela 17.

Importante destacar que cada corpo hídrico tem uma capacidade variada de transportar uma determinada quantidade de sedimentos, pois essa capacidade depende de características hidráulicas do escoamento, como da vazão, velocidade e declividade, e dos sedimentos a serem transportados, como a sua granulometria e o seu peso específico. Essa capacidade é conhecida como Capacidade de Transporte, e a quantidade de sedimentos a serem transportados é conhecida como valor de saturação (Carvalho, 2008). O modelo MGB-SED considera uma equação de capacidade de transporte para os sedimentos e permite deposição de sedimentos em suspensão em reservatórios e planícies de inundações. Portanto, considerando que o valor de saturação depende das condições hidráulicas e que essas foram simuladas no estudo anterior realizado, nas condições pretéritas e pós-rompimento, o modelo considerou alterações no valor de saturação dos corpos hídricos para transporte de sedimentos. Ainda assim, buscando **atender a demanda (a) apresentada no item 1.3**, este estudo adota uma capacidade de transporte para que seja representada a saturação para sedimentos em suspensão, a partir de uma caracterização do escoamento, baseado no estudo de Krishnappan (2000).

3.2.1. Parâmetros Calibráveis

Fagundes et al. (2019) mostraram ser possível realizar a calibração de três parâmetros no módulo de sedimentos do MGB-SED, sendo que dois deles (α e β) estão relacionados a equação da MUSLE, a qual pode ser reescrita como:

$$SED_{i,j}^k = \alpha * (Dsup_{i,j}^k * qpico_{i,j}^k * Ap_{i,j}^k)^\beta * K_j * C_j * P_j * LS_{i,j}^K * FG_j, \quad 8$$

Os parâmetros α e β são iguais a 11,8 e 0,56, respectivamente, na equação originalmente proposta por Williams (1975), mas são considerados calibráveis no modelo utilizado neste estudo. As concentrações de sedimentos nos sedimentogramas são amplificadas ou reduzidas de forma proporcional à variação do parâmetro α , enquanto o parâmetro β amplifica as concentrações dos sedimentogramas e intensifica seus picos e vales à medida que seu valor diminui.

Uma vez determinado o volume de sedimentos gerado em cada pixel, o volume total de sedimentos gerados em cada URH de uma minibacia e armazenado no reservatório é calculado pela seguinte equação:

$$VSED_{i,j}^t = VSED_{i,j}^{t-1} + \sum_{k=1}^{NP_j} VSED_{i,j}^k \quad 9$$

onde $VSED_{i,j}$ [t] é o volume no reservatório de sedimentos da URH j da minibacia i em questão; NP é o número de pixels da URH; e os índices t e $t - 1$ indicam os passos de tempo atual e anterior, respectivamente.

O volume total de sedimentos gerados em uma determinada minibacia é aportado à rede de drenagem por meio do seu retardo ao passar por reservatórios lineares. A descarga sólida total QS [$t.s^{-1}$] de saída do reservatório linear é computada como uma função linear da respectiva carga armazenada e do tempo de retardo TKS [s] do reservatório superficial. A estimativa da descarga sólida de saída para cada URH é dada por:

$$QS_{i,j}^t = \frac{1}{TKS_i} * VSED_{i,j}^t \quad 10$$

Conforme sugerido por Fagundes et al. (2019), o parâmetro TKS , que corresponde ao tempo de retardo associado ao reservatório, foi considerado como um parâmetro calibrável do módulo de sedimentos proposto neste estudo. Quanto menor o valor adotado para o TKS , mais intensos são os picos e os vales dos sedimentogramas. O parâmetro também influencia diretamente no deslocamento temporal dos sedimentogramas, atrasando ou retardando.

3.2.2. Reservatórios

Para a parte hidráulica, a propagação hidrodinâmica de um dado trecho de rio em que o reservatório estava presente foi substituída por um esquema *level-pool* (reservatório concentrado). Nesse caso, a afluição do reservatório foi estimada considerando um fluxo uniforme na porção mais a montante do lago, sendo essa a condição de contorno de montante. A declividade da água foi estimada a partir do modelo digital do terreno.

A relação nível-armazenamento do reservatório foi obtida a partir das bases de dados nacionais da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) bem como da base global fornecida por (Yigzaw et al., 2018).

A vazão defluente foi simulada a partir de um esquema de operação simplificado proposto por Shin et al. (2019). Esse esquema foi utilizado, pois, recentemente, Fleischmann et al. (2021) mostraram que essa regra gerou resultados razoáveis para a simulação das defluências de mais de 30 reservatórios na bacia do rio Paraná. Os autores

concluíram que as estimativas realizadas foram úteis em estudos de mudanças hidrológicas em escala regionais.

O esquema proposto por Shin et al. (2019) é de uma regra baseada na demanda e afluência diárias para reservatórios hidrelétricos, que não possuem retiradas de água do sistema. A defluência estimada é dada pela Equação 10 (Shin et al., 2019):

$$Q(i, t) = R_i K_{i,y} I_m + (1 - R_i) I_t \quad 11$$

onde $Q(i, t)$ é a i -éssima defluência em um passo de tempo diário t , R_i é a constante de capacidade de regulação que pode ser calibrada com observações ou calculada a partir da Equação 10, e é assumida igual a zero para reservatório a fio d'água ($R_i < 0.1$). I_m e I_t são as afluências médias anuais e diárias, respectivamente, e $K_{i,y}$ é a fração do armazenamento no início do ano hidrológico (Equação 11). O ano hidrológico de cada reservatório é definido como iniciando no mês em que a vazão naturalizada (estimada sem reservatório) diminui para um valor abaixo da média de longo período.

$$R_i = \min(1, \alpha_{res} s_i) \quad 12$$

$$K_{i,y} = S_{first,y} / \alpha_{res} s_i \quad 13$$

onde o termo s_i é a razão entre a capacidade máxima de armazenamento do reservatório ($S_{máx}$) e a afluência média anual ao reservatório ($s_i = S_{máx} / I_m$), $S_{first,y}$ é o armazenamento no início do ano hidrológico y e α_{res} é uma constante definida como 0,85 (Hanasaki; Kanae; Oki, 2006).

Depois de estimar a $Q(i, t)$, o armazenamento do reservatório foi atualizado utilizando a Equação 12, que representa um reservatório concentrado.

$$V_{act}(i, t) = V_{act}(i, t - 1) + [I_t - Q(i, t)] \cdot 86400 \quad 14$$

onde $V_{act}(i, t)$ é o i -éssimo volume diário do reservatório no passo de tempo t .

Os reservatórios foram incluídos na simulação e começaram a gerar algum efeito sobre os fluxos de água e sedimentos no ano em que iniciaram sua operação. Foi adotado que os reservatórios estavam cheios no primeiro dia de simulação. Não foi considerado que o volume total do reservatório diminuísse ao longo do tempo devido à deposição de sedimentos.

Para considerar o processo de deposição de sedimentos nos reservatórios, foi assumido que as partículas transportadas como carga de fundo (areia) são totalmente retidas pelo barramento.

Por outro lado, as partículas finas (silte e argila) podem depositar ou podem seguir para jusante. A concentração de sedimentos finos na saída de cada reservatório foi considerada como uma função da concentração de entrada e de variáveis do escoamento no reservatório (velocidade, profundidade e comprimento) conforme sugerido por Palu e Julien (2019):

$$C_i = C_{oi} \cdot e^{\frac{-X\omega_i}{hU}} \quad 15$$

onde C_{oi} é a concentração de sedimentos em suspensão com fração i a montante do reservatório, estimada pelo modelo, C_i é a concentração de sedimentos em suspensão com fração i a jusante do reservatório, ou seja, aquela que deixará o reservatório após eventual deposição, X é distância de deposição, ω_i é a velocidade de queda da partícula com fração i , h é a profundidade do escoamento (Equação 16) e U é a velocidade média do escoamento (Equação 17).

$$h = \frac{V_{act}}{A_{res}} \quad 16$$

onde A_{res} é a área superficial reservatório.

$$U = \frac{I_t}{h \left(\frac{A_{res}}{X} \right)} \quad 17$$

3.2.3. Avaliação de desempenho

Para avaliar o desempenho do modelo foram consideradas estatísticas, de forma semelhante às utilizadas para a modelagem hidrológica, como o coeficiente de Nash-Sutcliffe (ENS). No entanto, diferentemente da simulação hidrológica, o coeficiente de Nash foi considerado na simulação de sedimentos apenas como uma forma de verificar locais da bacia onde a calibração possa estar melhor em relação a outros locais, mas não como uma avaliação da qualidade da calibração. Essa forma de aplicação se justifica devido à limitação temporal dos dados de concentração de sedimentos e, conseqüentemente, de descargas sólidas, os quais tem periodicidade média de 4 valores ao longo do ano.

Também foram considerados o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o coeficiente de determinação (R^2), os quais descrevem o grau de colinearidade entre os dados simulados e observados, além do viés percentual (*percent bias* - PBIAS) que mede a tendência média dos dados simulados serem maiores ou menores que os dados observados (GUPTA et al., 1999). Para cada uma das 31 estações de sedimentos, as estatísticas foram estimadas para comparar os dados medidos (observados) de concentração de sedimentos em suspensão nos postos sedimentométricos com as concentrações simuladas, para as datas das medições. O coeficiente de correlação de Pearson (r) é dado por:

$$r = \frac{\sum (Cs_{obs} - \overline{Cs_{obs}})(Cs_{sim} - \overline{Cs_{sim}})}{\sqrt{\sum (Cs_{obs} - \overline{Cs_{obs}})^2 \sum (Cs_{sim} - \overline{Cs_{sim}})^2}} \quad 18$$

$$r = \frac{\sum (Qs_{obs} - \overline{Qs_{obs}})(Qs_{sim} - \overline{Qs_{sim}})}{\sqrt{\sum (Qs_{obs} - \overline{Qs_{obs}})^2 \sum (Qs_{sim} - \overline{Qs_{sim}})^2}}$$

onde $C_{s_{obs}}$ e $C_{s_{sim}}$ são as concentrações de sedimentos em suspensão medida e simulada [mg.L^{-1}], respectivamente, $\overline{C_{s_{obs}}}$ $\overline{C_{s_{sim}}}$ são as médias das concentrações medidas e simuladas [mg.L^{-1}], respectivamente, $Q_{s_{obs}}$ e $Q_{s_{sim}}$ são as descargas sólidas ($Q_s = 0,0864.Q.C_s$ [ton.dia^{-1}], onde Q [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$] é a vazão líquida) observada e simulada, respectivamente, e $\overline{Q_{s_{obs}}}$ $\overline{Q_{s_{sim}}}$ são as médias das descargas sólidas observadas e simuladas.

O coeficiente de correlação varia de -1 a 1, sendo um índice do grau de relação linear entre dados observados e simulados, ou seja, se $r = 0$ não há relação linear e se $r = 1$ ou -1 é porque existe uma perfeita relação linear positiva ou negativa. De forma semelhante, o R^2 descreve a proporção da variância nos dados medidos que é explicada pelo modelo. O valor de R^2 varia de 0 a 1, sendo que altos valores são indicativos de menos erro de variância. Para o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o coeficiente de determinação (R^2), Moriasi *et al.* (2007) avaliaram que valores acima de 0,5 podem ser considerados aceitáveis para passos de tempo mensal. No entanto, espera-se que os resultados das estatísticas calculadas apresentem valores menores ao usar passo de tempo diário e dados com baixa frequência temporal. Aqui, foram considerados como aceitáveis valores iguais ou superiores a 0,40.

Para o PBIAS, Moriasi *et al.* (2007) verificaram que valores até 55% têm sido considerados como aceitáveis em simulações com passos de tempo mensal, com o qual as variabilidades diárias são filtradas. Desta forma, considerando que o presente estudo realiza simulação com passo de tempo diário, adotou-se o limite de $\pm 60\%$ para um resultado aceitável e consideraram-se as seguintes faixas de valores para avaliação das simulações, conforme Tabela 19.

Tabela 19. Classificação adotada para avaliação das simulações em função do PBIAS

Classificação	Faixa de valores
Muito Bom	$PBIAS \leq \pm 15,0$
Bom	$\pm 15,0 < PBIAS \leq \pm 30,0$
Satisfatório	$\pm 30,0 < PBIAS \leq \pm 45,0$
Aceitável	$\pm 45,0 < PBIAS \leq \pm 60,0$
Não satisfatório	$\pm 60,0 < PBIAS$

3.2.4. Resultados da calibração

A calibração dos três parâmetros da MUSLE foi realizada manualmente, iniciando pelas sub-bacias de montante até as de jusante, no período de janeiro de 2005 a dezembro 2014. No entanto, os resultados das estações de ID 14 e 20 foram desconsiderados na fase de calibração, porque apresentavam poucos ou nenhum dado no período selecionado, restando assim 29 estações de sedimentos para as quais os parâmetros do modelo foram calibrados. Para cada sub-bacia definiu-se um conjunto de valores diferentes dos parâmetros calibráveis. Para a sub-bacia 32 (ver Figura 28) que drena para o exutório da bacia do rio Doce e não há estação de monitoramento correspondente, foram mantidos os valores dos parâmetros originais da equação da MUSLE (item 3.2.1). Destaca-se que no período de calibração do modelo, os

reservatórios considerados (ver Tabela 4) já estavam em operação na bacia (Risoleta Neves e UHE Mascarenhas) ou entraram em operação ao longo desse período (UHE Aimorés e Baguari).

Os valores das estatísticas calculadas correspondem à comparação entre as concentrações de sedimentos em suspensão (CSS) e descargas de sedimentos (Qs) observadas nos postos de sedimentos e simuladas pelo modelo, apenas nas datas em que há dados observados no período de calibração.

A Tabela 20 apresenta os valores calculados das estatísticas para o período de calibração. Ao verificar as estatísticas obtidas em cada uma das estações de sedimentos para a CSS e para a Qs, observa-se que, para a maioria das estatísticas, há um melhor ajuste dos resultados do modelo ao se comparar as Qs observadas e simuladas, visto que esta variável modula as concentrações de acordo com as vazões. Em várias estações, os valores do ENS calculado entre a Qs observada e simulada foram próximos ou superiores a 0,9. Tanto para as CSS quanto para as Qs, 50% das estações apresentaram valores de ENS acima de 0,20. No entanto, para os resultados da Qs observa-se que 72% e 62% das estações apresentaram ajustes com ENS acima de 0,2 e 0,5 respectivamente, enquanto para as CSS, a porcentagem de valores com ENS > 0,5 foi de 41%.

Tabela 20. Valores das estatísticas calculados para cada uma das estações com dados de concentração de sedimentos em suspensão selecionadas na bacia do rio Doce, para o período de calibração (janeiro de 2005 a dezembro de 2014).

ID	Estação	Sub	Concentração (CSS)				Descarga sólida (Qs)			
			ENS	r	R ²	PBIAS	ENS	r	R ²	PBIAS
1	56075000	4	0,06	0,62	0,38	2,51	0,38	0,65	0,42	-8,79
2	56110005	7	0,56	0,92	0,84	9,20	0,87	0,97	0,94	6,56
3	56335001	9	0,74	0,90	0,82	-49,74	0,82	0,99	0,98	4,75
4	56415000	13	0,84	0,93	0,87	-18,42	0,98	0,99	0,99	7,30
5	56425000	11	-0,09	0,11	0,01	-43,05	-0,02	0,19	0,04	-48,08
6	56484998	16	-0,20	0,63	0,40	51,01	0,76	0,87	0,76	3,67
7	56539000	18	0,62	0,81	0,65	-23,06	0,79	0,90	0,81	-16,53
8	56696000	24	0,66	0,84	0,71	39,89	0,79	0,92	0,85	-6,72
9	56775000	30	0,10	0,40	0,16	-13,41	0,54	0,74	0,55	5,29
10	56787000	26	0,29	0,55	0,31	-4,40	0,10	0,49	0,24	2,51
11	56800000	29	0,67	0,86	0,73	-25,94	0,87	0,95	0,90	-12,72
12	56825000	32	-0,48	0,29	0,08	11,81	-0,01	0,35	0,12	-19,97
13	56846000	34	-0,62	0,83	0,69	-4,88	0,61	0,92	0,85	-16,29
14	56850000	37								
15	56860000	38	-0,34	0,60	0,36	43,83	0,12	0,49	0,24	7,89
16	56891900	40	0,07	0,67	0,45	57,70	0,46	0,75	0,56	-19,46
17	56915500	42	0,86	0,96	0,93	-31,36	0,83	0,93	0,86	-16,62
18	56920000	42	-0,51	0,85	0,72	60,45	0,77	0,95	0,90	30,62
19	56935000	44	-1,32	0,68	0,46	-3,73	-0,18	0,71	0,51	-6,37
20	56948005	54								
21	56976000	47	-0,03	0,40	0,16	-8,78	0,19	0,47	0,22	-19,36

ID	Estação	Sub	Concentração (CSS)				Descarga sólida (Qs)			
			ENS	r	R ²	PBIAS	ENS	r	R ²	PBIAS
22	56989400	51	0,73	0,88	0,77	-4,55	0,89	0,95	0,89	2,17
23	56990000	51	0,47	0,84	0,71	-45,82	0,55	0,98	0,96	-55,74
24	56990990	52	0,77	0,89	0,79	-20,63	0,97	0,99	0,98	1,59
25	56991500	53	0,65	0,81	0,66	-19,79	0,90	0,95	0,91	3,25
26	56992000	54	0,71	0,91	0,83	28,83	0,71	0,86	0,74	4,94
27	56993551	56	0,77	0,98	0,95	-55,11	0,90	0,95	0,91	-7,22
28	56994500	58	-5,38	0,70	0,50	120,9	-3,52	0,86	0,75	132,42
29	56995500	55	-0,36	0,55	0,30	-41,51	0,67	0,84	0,71	-26,30
30	56998400	59	-0,90	0,04	0,00	-4,53	-0,45	0,15	0,02	-8,52
31	CEMIG	31	0,25	0,52	0,27	-15,62	0,24	0,64	0,41	-6,05

O padrão de resultados melhores para a Qs em relação à CSS também foi observado para as demais métricas. Para o coeficiente de correlação de Pearson (r) das CSS e Qs, 79% dos resultados apresentaram valores maiores que 0,5. O coeficiente de determinação (R^2) apresentou valores maiores que 0,5 para 45% das estações ao analisar as CSS e Qs. Também para o R^2 , os valores analisando apenas a Qs foram superiores, com 72% das estações apresentando valores acima de 0,5.

A avaliação dos resultados para o coeficiente PBIAS mostrou que, para a análise de concentração, 93% das estações apresentaram ajustes aceitáveis e, para as descargas, a porcentagem chegou a 97%. Valores de PBIAS menores ou iguais a $\pm 15,0$ foram estimados em aproximadamente 34% das estações para valores de concentração e descarga.

Considerando as análises realizadas comparando dados observados com resultados do modelo, é possível concluir que esses resultados demonstram que o modelo, no geral, está bem calibrado para o transporta de sedimentos. Assim, prossegue-se para uma etapa de validação dessa calibração, a fim de verificar também a performance do modelo em representar os fluxos de sedimentos em outro período e então realizar as simulações de cenários.

3.2.5. Resultados da validação

A validação do modelo busca avaliar seus resultados considerando os parâmetros calibrados, porém em período distinto daquele considerado na calibração. A validação dos resultados do modelo, com os parâmetros calibrados em cada sub-bacia no período de janeiro de 2005 a dezembro de 2014, foi realizada em um período distinto, escolhido como sendo de janeiro de 1998 a dezembro de 2004. Este período foi selecionado porque o período de validação utilizado na etapa de modelagem hidrológica (1970 a 1989) ofereceria poucos dados de sedimentos observados para uma análise de resultados, além de que a maioria das estações de sedimentos possuem medições iniciando a partir do ano de 1998. Além disso, dado o curto período com dados de sedimentos (1998 a 2014) antes do rompimento (menos de 20 anos), em relação aos dados de vazão, nesse

estudo deu-se prioridade à calibração dos parâmetros e a consideração de um período mais recente para ela.

A Tabela 21 apresenta os resultados das estatísticas de avaliação dos resultados do modelo para o período de validação. Os valores das estatísticas calculadas correspondem à comparação entre as CSS e Qs observadas nos postos de sedimentos e simuladas pelo modelo MGB-SED, apenas nas datas em que há dados observados no período de validação. No entanto, para a validação, os resultados da estação de ID 18 foi desconsiderado, porque não apresentava dados no período selecionado para a validação, restando assim 30 estações de sedimentos para as quais foi realizada a validação.

Assim como na calibração, os resultados das estatísticas para a Qs em cada estação, no geral, apresentaram ajustes melhores do que os resultados avaliados para os valores de CSS, visto que esta variável modula as concentrações de acordo com as vazões do escoamento. Das 30 estações avaliadas, 33% apresentaram valores de ENS maiores ou iguais a 0,20 para a concentração, enquanto para a descarga essa porcentagem foi de 63%.

Para r , 63% das estações apresentaram ajustes maiores que 0,5 considerando as CSS. Para as Qs, a porcentagem foi de 90%. O comportamento foi semelhante para o R^2 , onde 33% das estações apresentaram ajustes maiores que 0,5 para a CSS e 70% das estações apresentaram ajustes maiores que 0,5 para as Qs.

A avaliação dos resultados para o coeficiente PBIAS mostrou que, para a análise de CSS e Qs, 60% das estações apresentaram ajustes aceitáveis. PBIAS menores ou iguais a $\pm 15,0$ foram estimados em 10% e 13% das estações na análise de CSS e Qs, respectivamente.

Como é de se esperar, é comum haver uma redução da qualidade dos resultados do modelo no período de validação, o que pode estar associado a fatores como diferenças nas variações anuais das chuvas durante os anos, qualidade dos dados medidos no passado, uso do solo nos períodos de calibração e validação, menor período com dados na validação. Contudo, para a modelagem de sedimentos e a disponibilidade de dados observados (cerca de 4 dados por ano), a maior dificuldade é na diferença do comportamento das amostras, que são pequenas. Destaca-se ainda que, diferentemente do período de calibração do modelo, no período de validação apenas os reservatórios Risoleta Neves e UHE Mascarenhas estavam em operação na bacia (ver Tabela 4).

A variação temporal da CSS e da Qs na bacia do rio Doce também é muito elevada, o que faz com que uma estimativa de pico com dias de diferença, numa amostra pequena, possa gerar erros grandes nas métricas, sendo também importante uma análise visual (gráficos) dos dados observados e simulados, que será apresentada adiante neste relatório. Ainda assim, pode-se inferir que foram obtidos resultados considerados satisfatórios para a maioria das estações, dentro das limitações existentes em relação à disponibilidade de informação e à qualidade e à quantidade de dados de concentrações disponíveis no período, principalmente se levado em consideração as

estatísticas r e R^2 , que apresentaram resultados aceitáveis a bons para a maior parte das estações, especialmente aquelas ao longo do rio Doce.

Tabela 21. Valores das estatísticas calculadas para cada uma das estações com dados de concentração de sedimentos em suspensão selecionadas na bacia do rio Doce, para o período de validação (1998-2004).

ID	Estação	Sub	Concentração (CSS)				Descarga sólida (Qs)			
			ENS	r	R ²	PBIAS	ENS	r	R ²	PBIAS
1	56075000	4	0,60	0,92	0,84	-1,76	-0,14	0,95	0,90	30,66
2	56110005	7	-0,06	0,23	0,05	-42,34	-0,07	0,32	0,10	-33,70
3	56335001	9	-0,35	0,46	0,21	-92,40	-0,15	0,68	0,46	-94,42
4	56415000	28	-4,41	0,47	0,22	23,60	-7,45	0,22	0,05	48,59
5	56425000	29	0,16	0,70	0,49	-39,39	0,42	0,75	0,56	-26,19
6	56484998	32	0,09	0,41	0,17	-51,79	0,58	0,83	0,69	-53,97
7	56539000	34	0,26	0,79	0,62	-61,41	0,42	0,97	0,94	-63,16
8	56696000	15	0,17	0,80	0,63	-69,30	0,17	0,81	0,66	-76,98
9	56775000	20	-0,43	0,68	0,46	24,55	0,40	0,94	0,88	19,00
10	56787000	16	-2,06	0,56	0,32	41,75	-2,41	0,52	0,27	50,38
11	56800000	19	-0,09	0,07	0,00	-77,76	0,54	0,82	0,68	-56,46
12	56825000	22	-0,14	0,10	0,01	-77,94	0,24	0,60	0,36	-62,95
13	56846000	38	-0,11	0,07	0,01	-51,18	0,09	0,39	0,15	-50,53
14	56850000	41	-0,10	0,87	0,75	21,97	0,08	0,87	0,76	25,37
15	56860000	23	0,45	0,87	0,76	29,25	0,87	0,96	0,93	-6,22
16	56891900	25	0,07	0,52	0,27	-72,74	0,22	0,82	0,67	-71,52
17	56915500	42	0,22	0,86	0,74	-79,01	0,49	0,92	0,85	-71,53
18	56920000	42	-	-	-	-	-	-	-	-
19	56935000	44	0,25	0,82	0,67	-65,91	0,26	0,62	0,39	-62,90
20	56948005	54	0,48	0,72	0,52	-27,59	0,85	0,95	0,89	-13,41
21	56976000	47	-0,10	0,16	0,02	-86,62	0,08	0,71	0,50	-79,98
22	56989400	51	-0,08	0,29	0,08	-46,89	0,73	0,88	0,77	-21,23
23	56990000	51	0,29	0,63	0,40	-45,30	0,40	0,85	0,72	-60,57
24	56990990	52	0,82	0,94	0,88	-41,49	0,80	0,99	0,98	-47,81
25	56991500	53	0,27	0,71	0,50	-62,28	0,34	0,92	0,85	-71,13
26	56992000	54	-0,67	0,62	0,38	24,07	-5,19	0,82	0,68	118,15
27	56993551	57	-0,06	0,44	0,19	-75,13	0,05	0,67	0,45	-80,46
28	56994500	59	0,09	0,50	0,25	10,69	0,41	0,67	0,45	4,74
29	56995500	56	-0,27	0,41	0,16	-62,67	0,72	0,91	0,83	-44,34
30	56998400	55	0,12	0,88	0,77	48,87	0,94	1,00	1,00	-19,90
31	CEMIG	21	0,38	0,65	0,43	-1,11	0,39	0,72	0,52	8,51

3.2.6. Espacialização dos resultados

Buscando identificar os locais onde as estatísticas calculadas anteriormente indicaram maior ou menor desempenho do modelo, tanto na calibração quanto na

validação, os resultados apresentados na Tabela 20 e na Tabela 21 foram espacializados na bacia.

As Figura 30, Figura 31 e Figura 32 apresentam os valores das estatísticas das CSS, calculadas na bacia de maneira espacializada em mapa, onde os círculos correspondem a localização das estações e cada um foi dividido ao meio (ver Figura 29). Já as Figura 33, Figura 34 e Figura 35 apresentam resultados semelhantes, porém considerando os valores das estatísticas das Qs.

Nas Figuras, a metade esquerda de cada círculo representa a classificação obtida na calibração (c), e a metade direita representa a classificação da validação (v), conforme Figura 29. Os critérios de classificação e cores são os mesmos apresentados anteriormente para a construção e análise das tabelas Tabela 20 e Tabela 21. Para qualquer estatística, os símbolos em preto indicam estações que não possuíam dados no período avaliado.

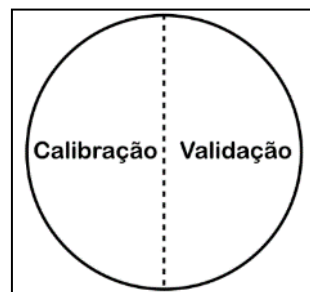


Figura 29. Representação gráfica dos coeficientes de ajuste obtidos para o período de calibração e validação.

A espacialização dos resultados mostra que resultados bons e ruins ocorreram para estações com pequenas ou grandes áreas de drenagem. Assim, as figuras apresentadas a seguir não apresentam um padrão específico de performance. Isso acontece tanto para a calibração quanto para a validação, também tanto para a CSS quanto a QS.

Apesar dos resultados na validação do modelo de sedimentos ter apresentado estatísticas PBIAS com maiores erros que na calibração, em grande parte justificável pela qualidade dos dados nesse período e sua menor distribuição temporal, considerando as análises realizadas comparando dados observados com resultados do modelo, é possível concluir que esses resultados demonstram que o modelo, no geral, foi bem calibrado para o transporte de sedimentos e consegue representar períodos distintos daquele considerado na calibração. Portanto, com o modelo calibrado e validado, é possível realizar cenários de simulações como os que são considerados nesse estudo.

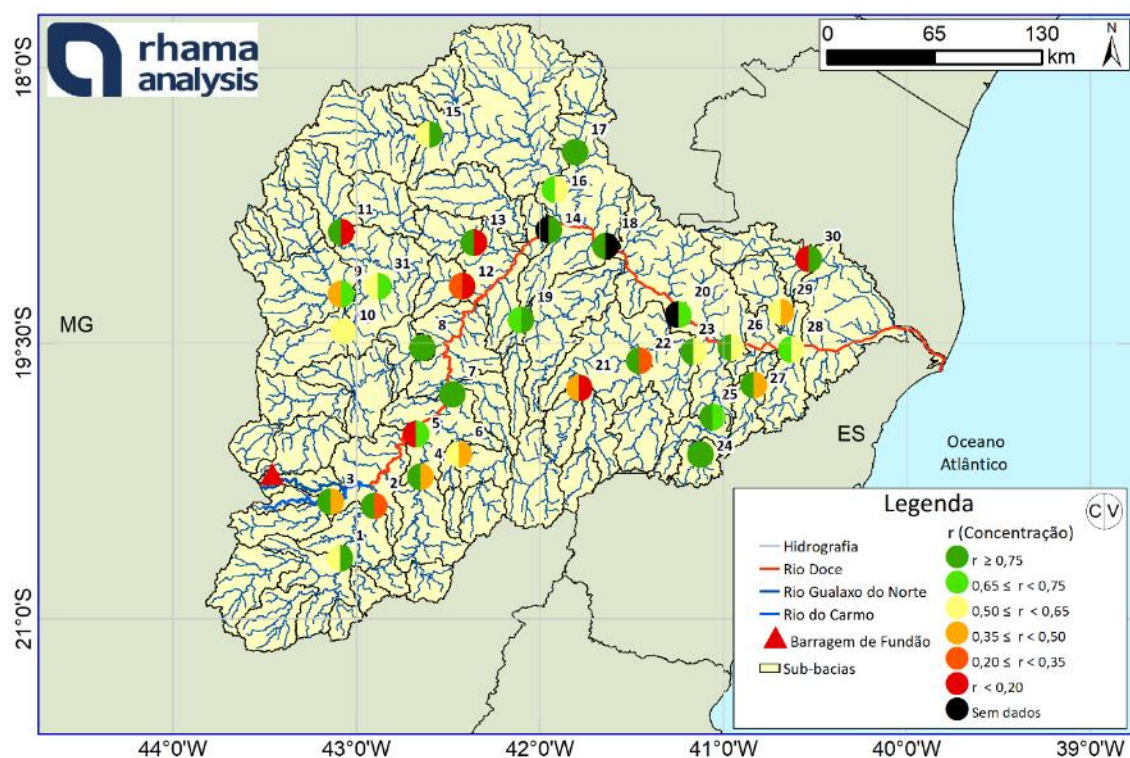


Figura 30. Coeficiente de Pearson das concentrações de sedimentos em suspensão (CSS) calculado para cada uma das estações sedimentométricas da bacia.

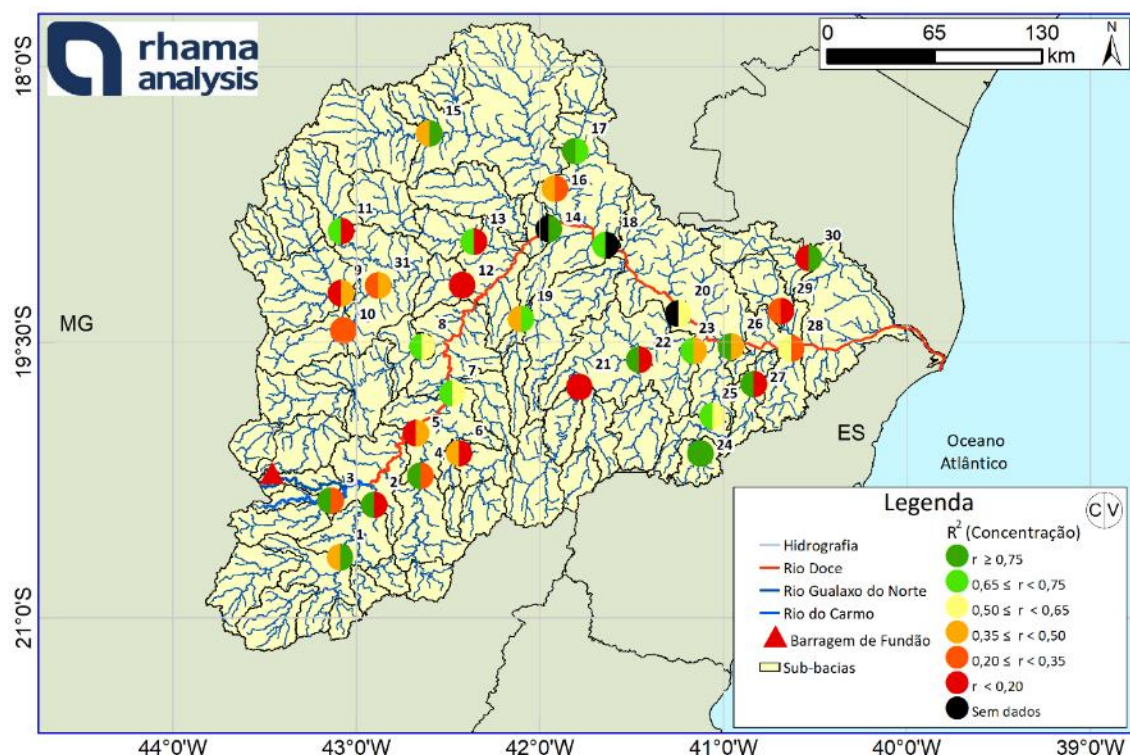


Figura 31. Coeficiente de determinação das concentrações de sedimentos em suspensão (CSS) calculado para cada uma das estações sedimentométricas da bacia.

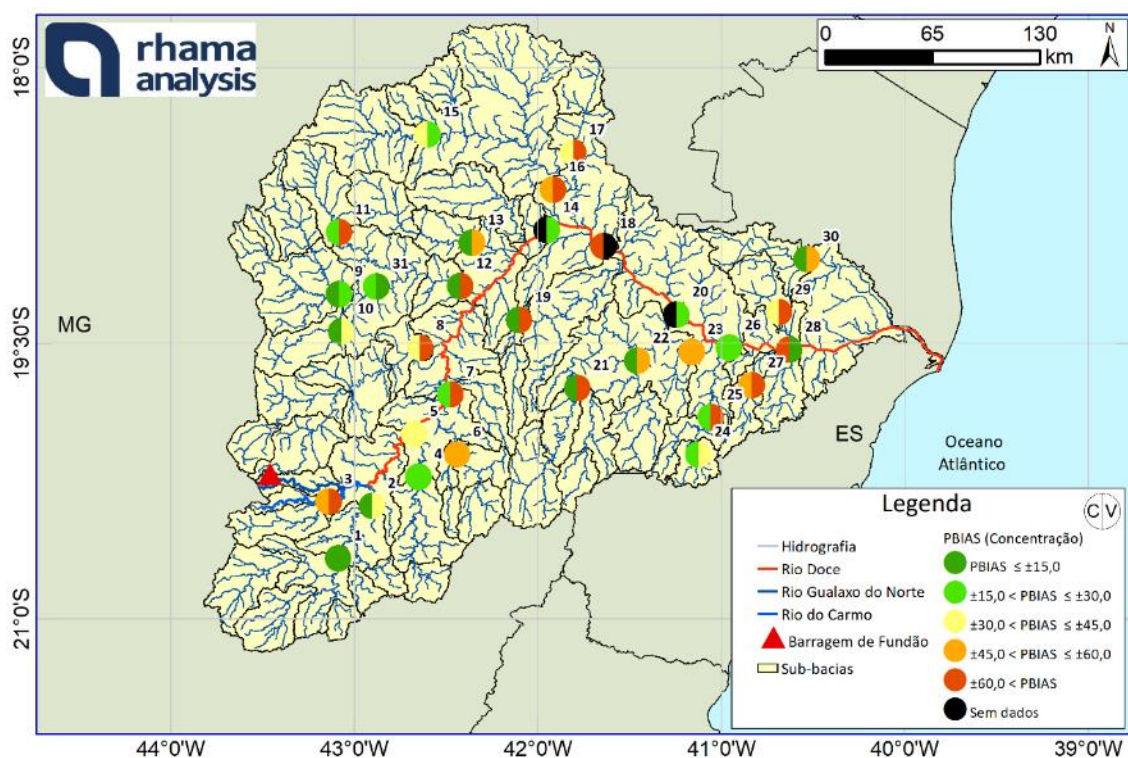


Figura 32. PBIAS das concentrações de sedimentos em suspensão (CSS) calculado para cada uma das estações sedimentométricas da bacia.

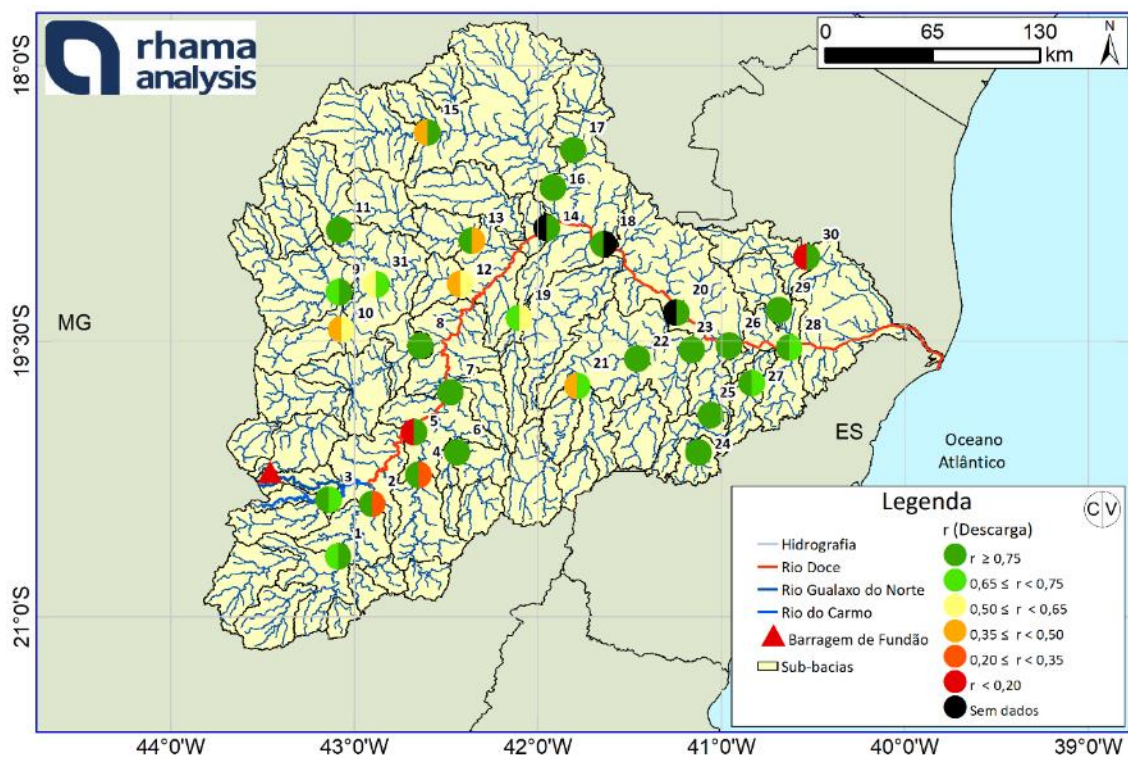


Figura 33. Coeficiente de Pearson das descargas sólidas em suspensão (Q_s) calculado para cada uma das estações sedimentométricas da bacia.

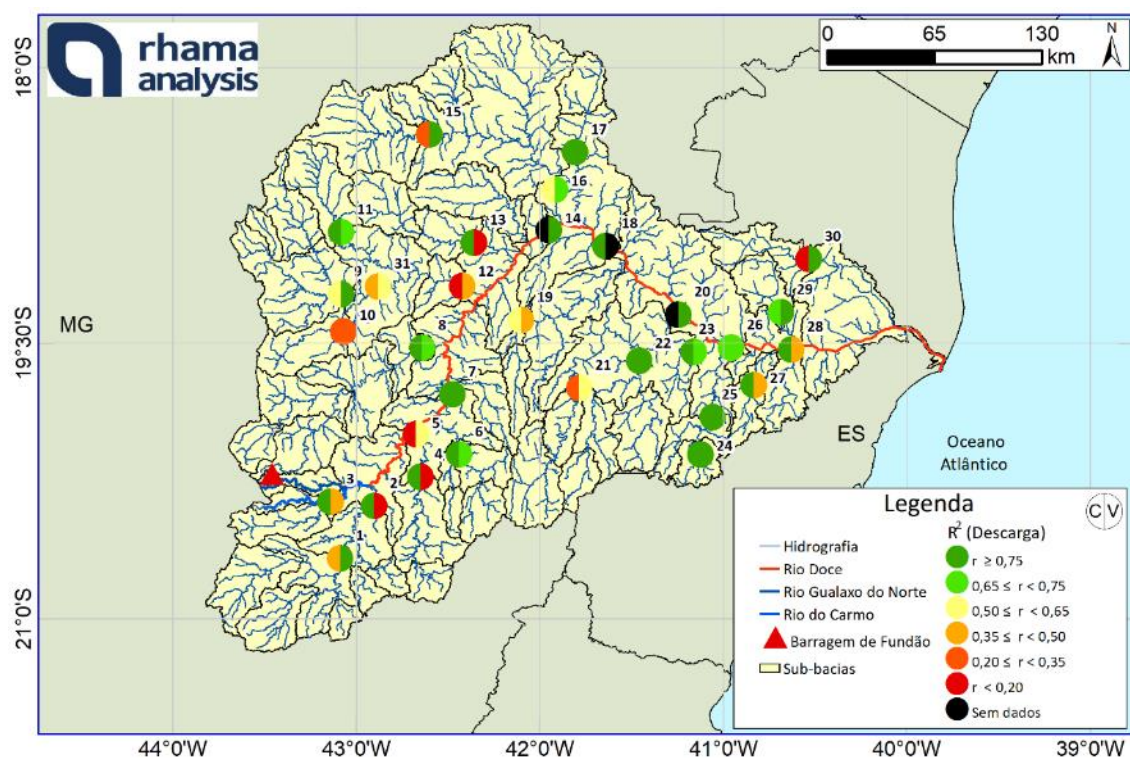


Figura 34. Coeficiente de determinação das descargas sólidas em suspensão (Q_s) calculado para cada uma das estações sedimentométricas da bacia.

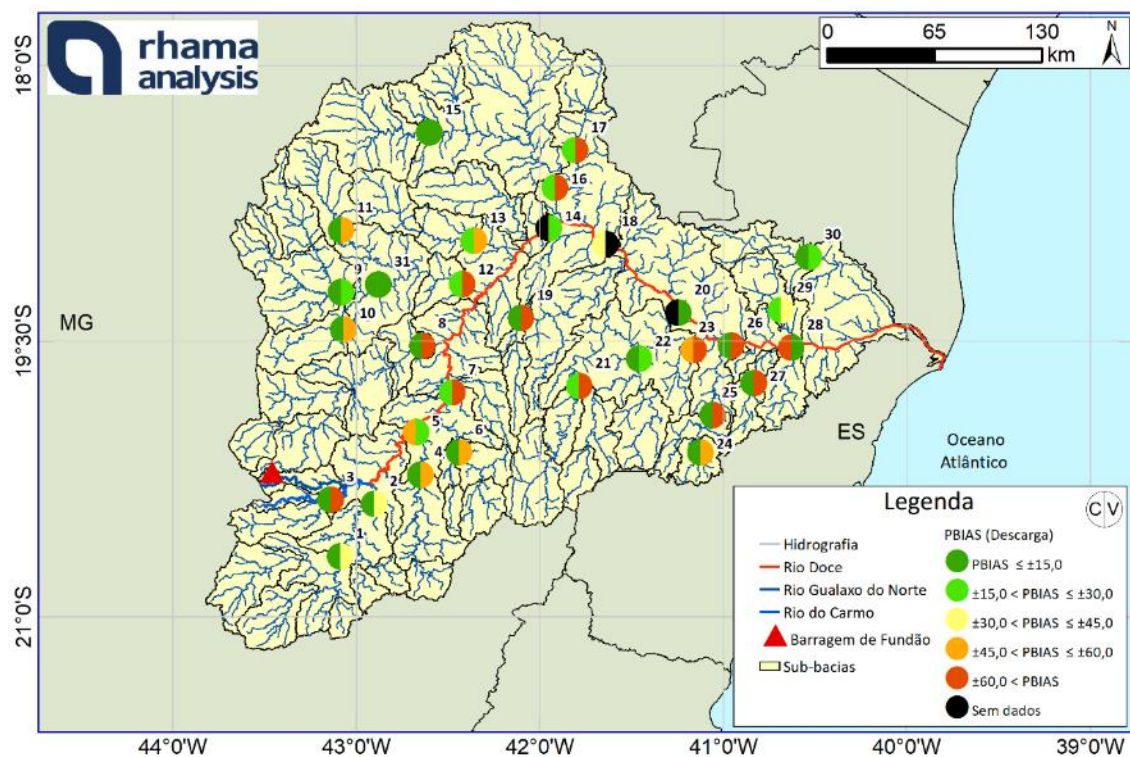


Figura 35. Coeficiente PBIAS das descargas sólidas em suspensão (Q_s) calculado para cada uma das estações sedimentométricas da bacia.

3.2.7. Dinâmica dos sedimentos

Para conhecer a dinâmica dos sedimentos na bacia e nos trechos de rio também se faz necessário observar os resultados das simulações a cada intervalo de tempo. Sendo assim, os resultados também podem ser apresentados considerando valores diários das simulações. As CSS (mg/L), bem como as Qs (t/dia) simuladas foram determinadas em cada uma das estações que possuem dados de concentrações de sedimentos em suspensão observados no período simulado tanto para a etapa de calibração (2005 a 2014) quanto para a etapa de validação (1998 a 2004).

Como exemplo, estão apresentados a seguir os valores simulados e medidos em algumas das estações sedimentométricas localizadas em regiões que não sofreram impactos do rompimento de Fundão. No entanto, exceto para a estação da CEMIG que possui maior frequência de medições de CSS, é importante destacar que, considerando que os dados medidos têm frequência média de 4 medições anuais, os resultados apresentados mostram os valores das concentrações e descargas diárias simulados e os valores destas variáveis medidos nas estações. Desta forma, é possível avaliar o comportamento do modelo em gerar resultados que acompanhem a variabilidade da CSS e Qs.

Em geral, os resultados simulados na fase de validação têm sido semelhantes aos da fase de calibração, especialmente para as Qs. Em todos os sedimentogramas, o comportamento sazonal dos dados medidos e observados tem sido representado de forma aceitável, embora em alguns momentos existam subestimativas da simulação e em outros da observação.

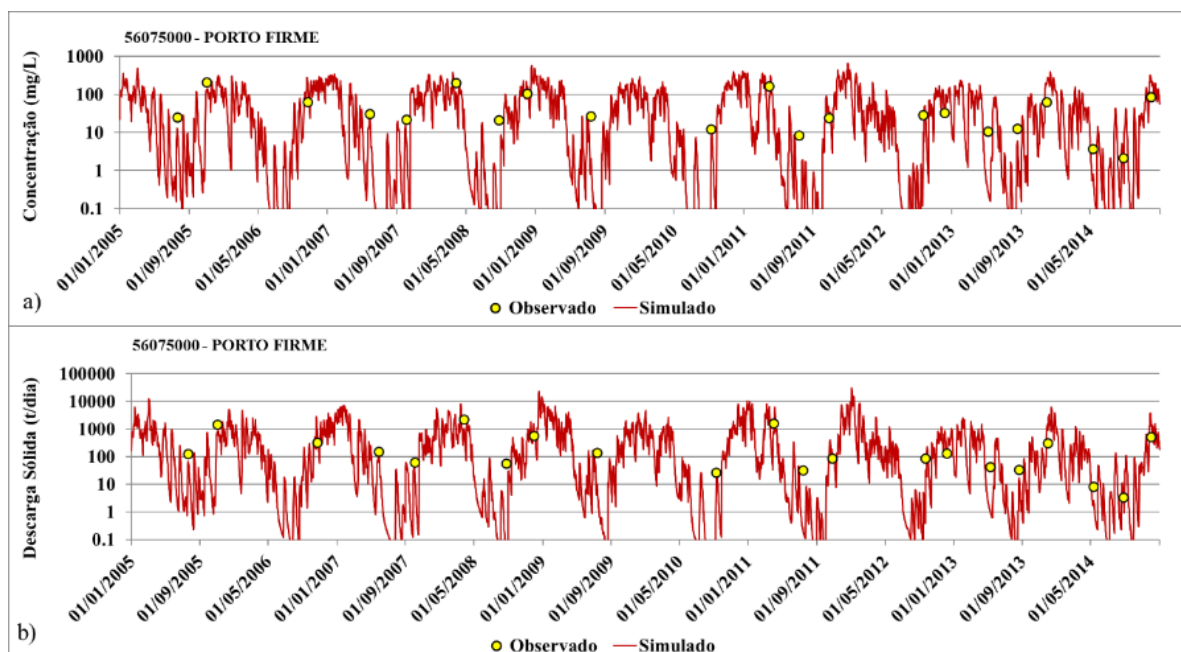


Figura 36. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Porto Firme (56075000), no período de calibração (2005 a 2014), para as datas das medições.

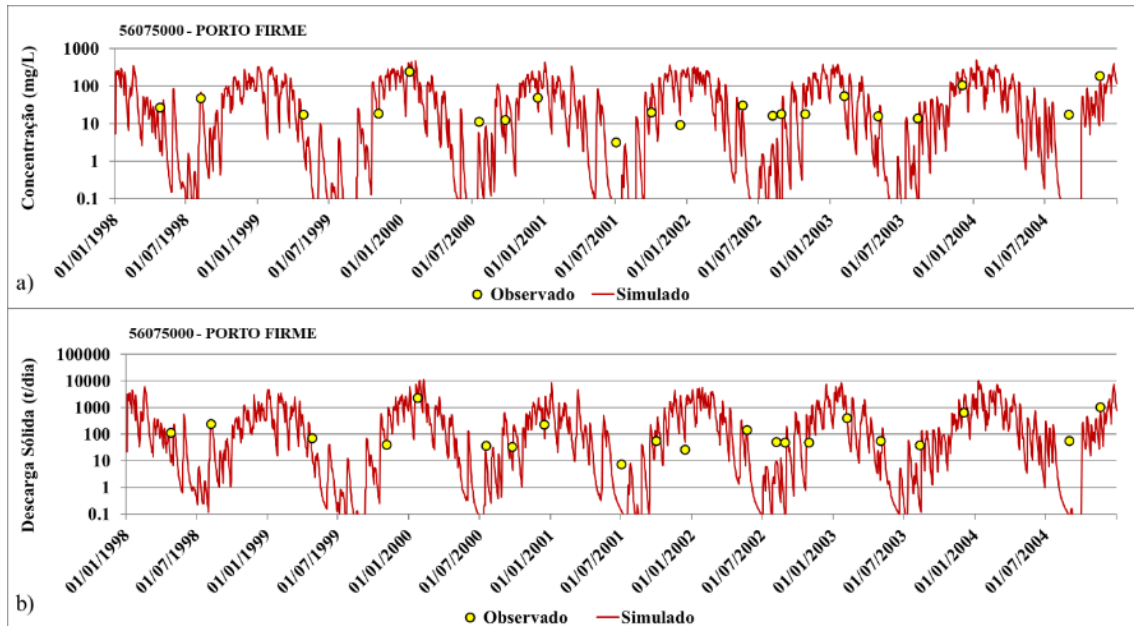


Figura 37. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Porto Firme (56075000), no período de validação (1998 a 2004), para as datas das medições.

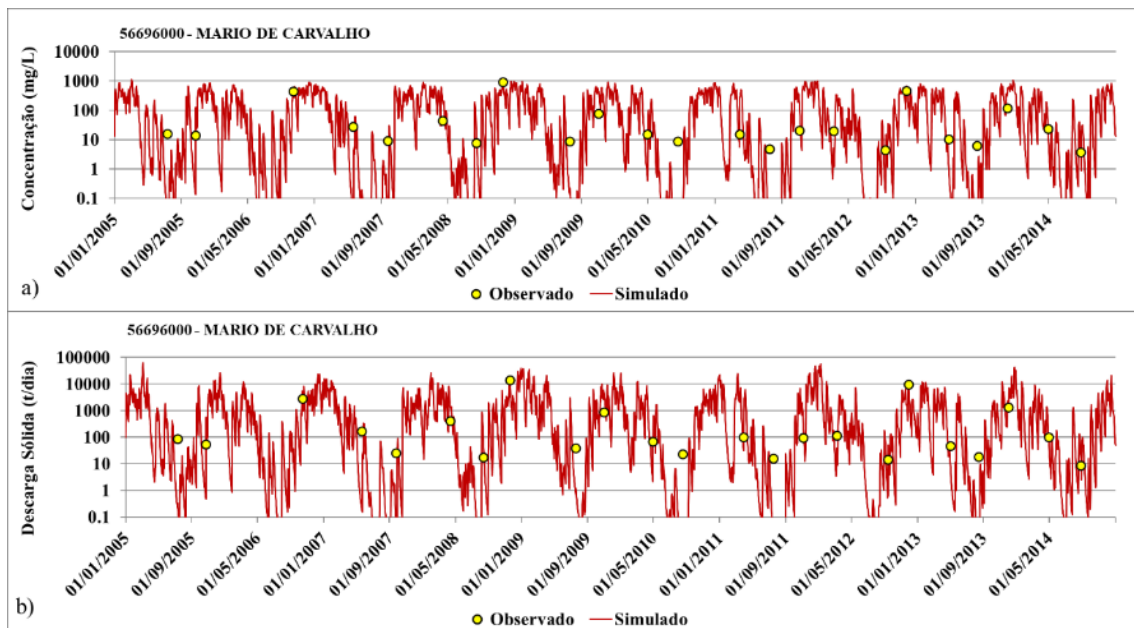


Figura 38. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Mário de Carvalho (566960000), no período de calibração (2005 a 2014), para as datas das medições.

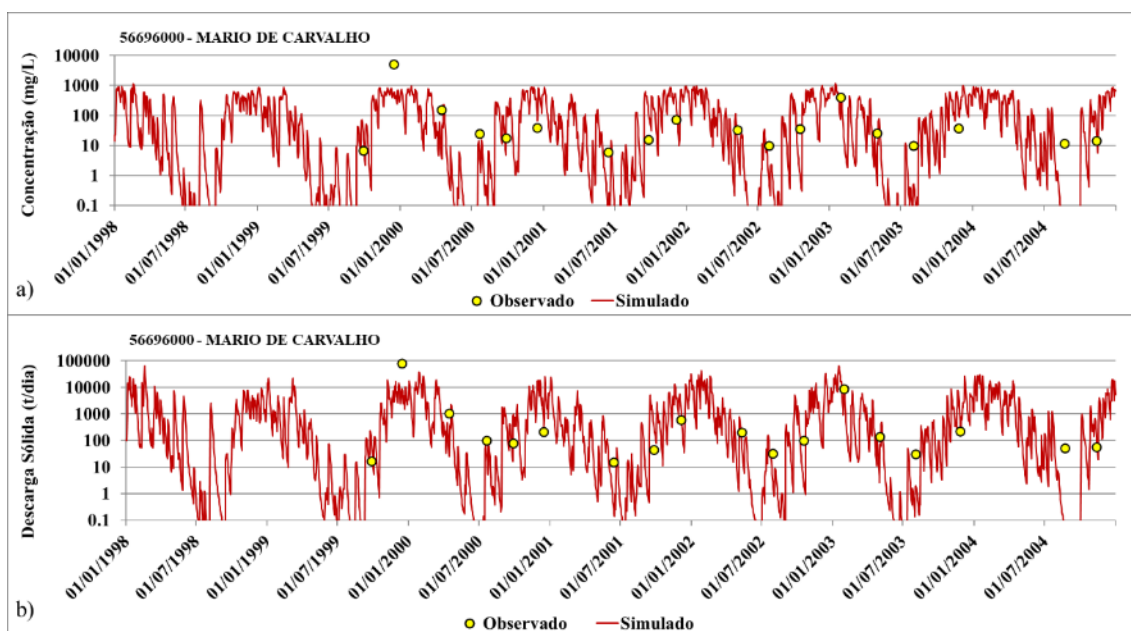


Figura 39. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Mário de Carvalho (566960000), no período de validação (1998 a 2004), para as datas das medições.

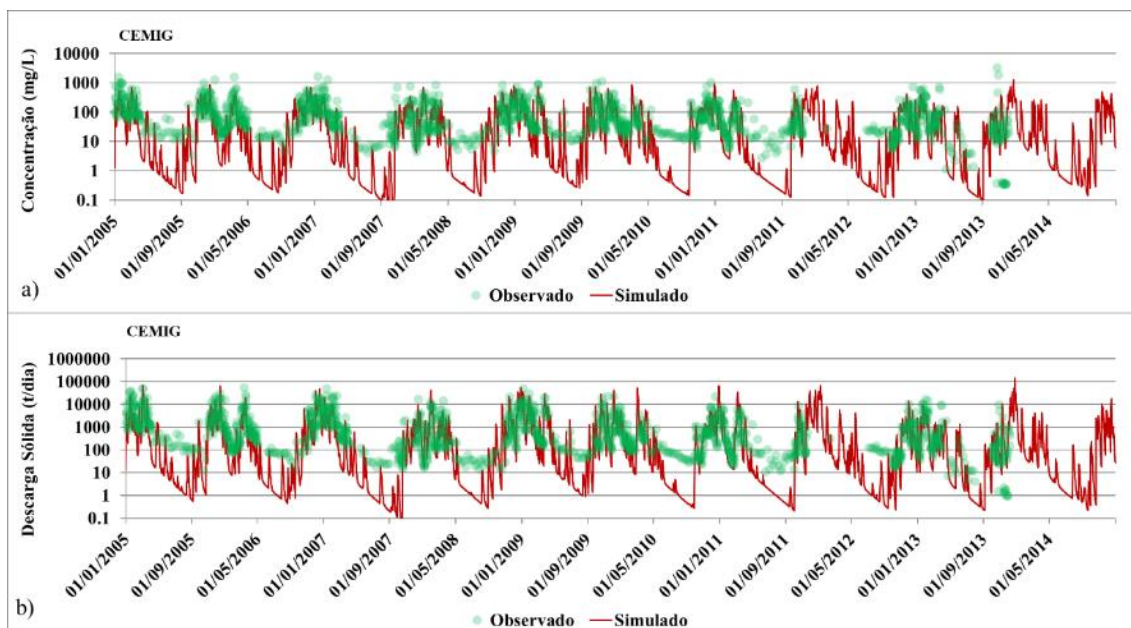


Figura 40. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação da CEMIG, no período de calibração (2005 a 2014), para as datas das medições.

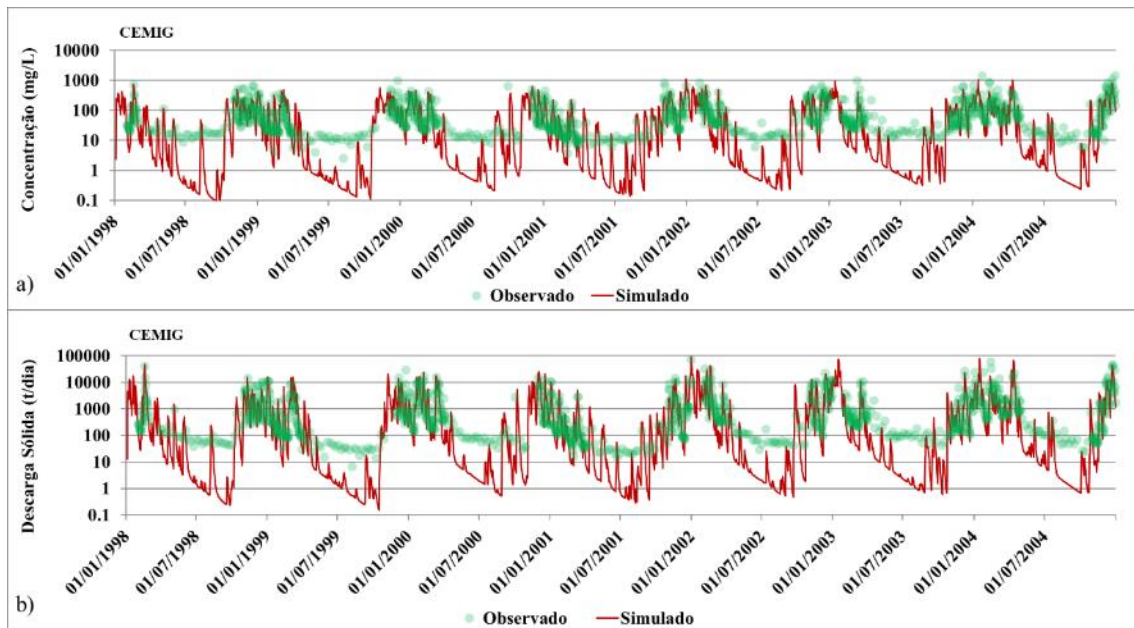


Figura 41. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação da CEMIG, no período de validação (1998 a 2004), para as datas das medições.

A seguir estão apresentados os valores simulados e medidos em algumas das estações sedimentométricas localizadas em regiões que sofreram impactos do rompimento de Fundão. Especificamente para a estação Governador Valadares, são apresentados os resultados apenas no período de validação, visto que não há dados observados no período de calibração.

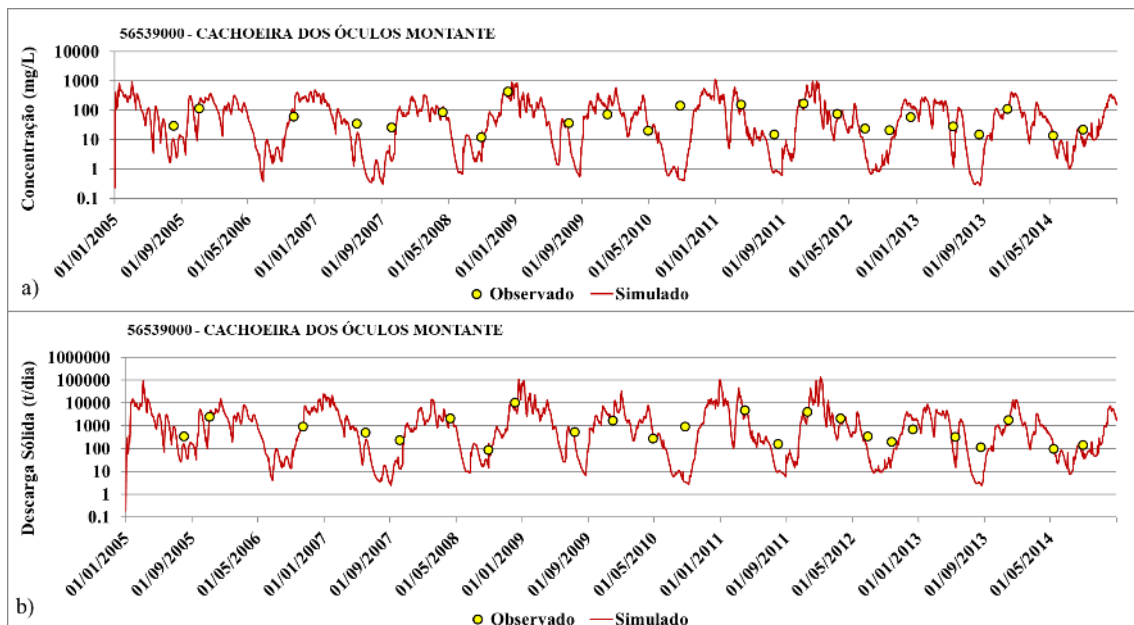


Figura 42. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Cachoeira dos Óculos Montante (56539000), no período de calibração (2005 a 2014), para as datas das medições.

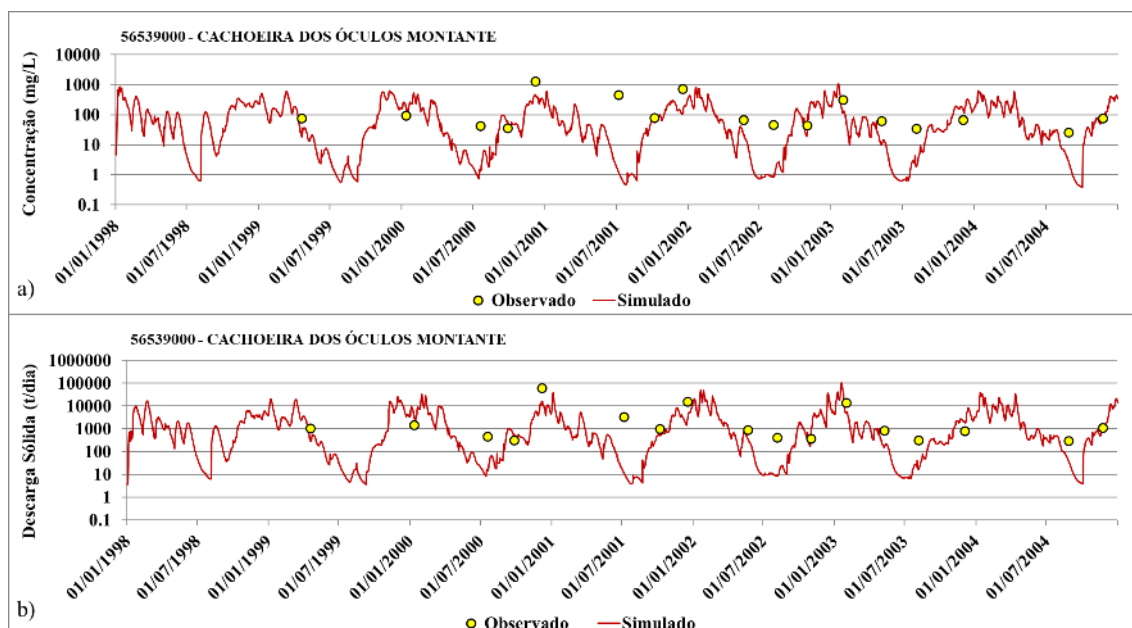


Figura 43. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Cachoeira dos Óculos Montante (56539000), no período de validação (1998 a 2004), para as datas das medições.

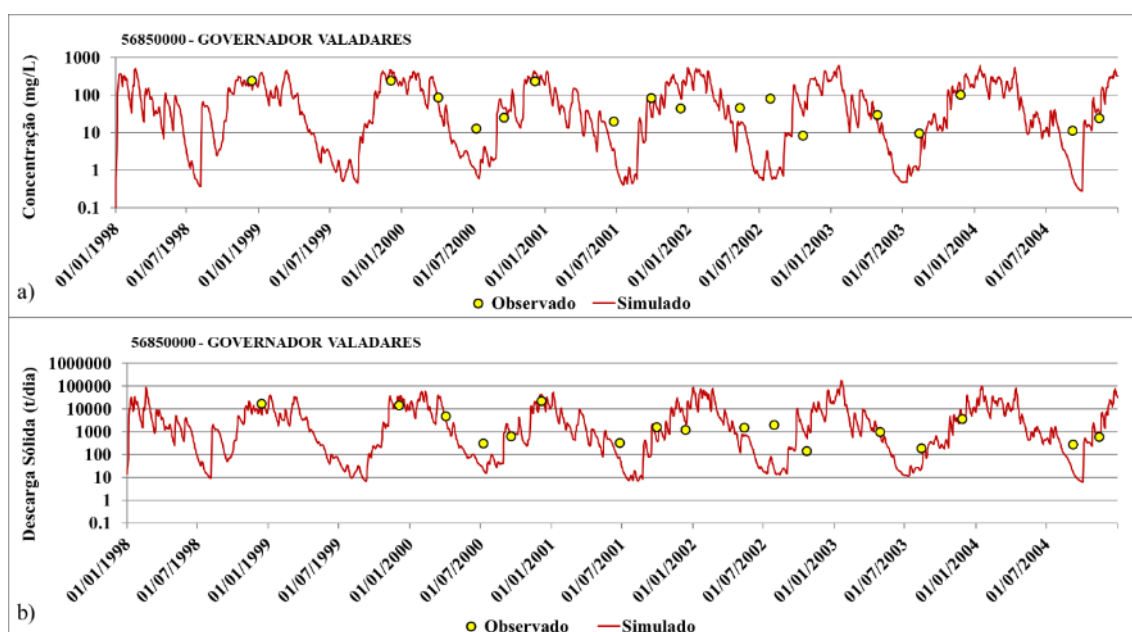


Figura 44. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Governador Valadares (56850000), no período de validação (1998 a 2004), para as datas das medições.

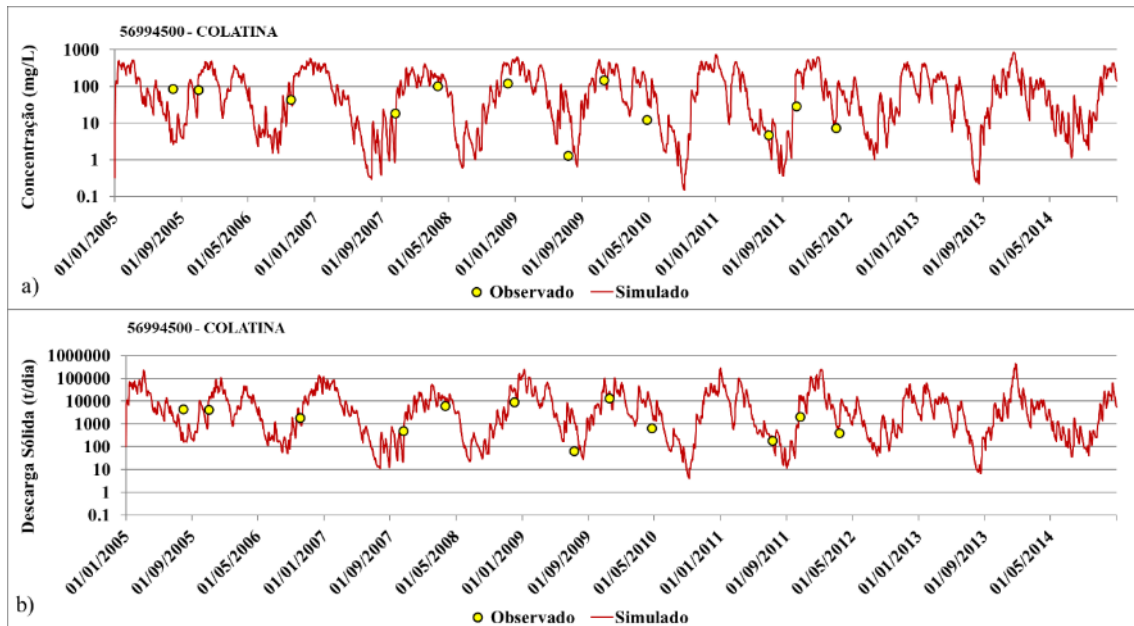


Figura 45. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Colatina (56994500), no período de calibração (2005 a 2014), para as datas das medições.

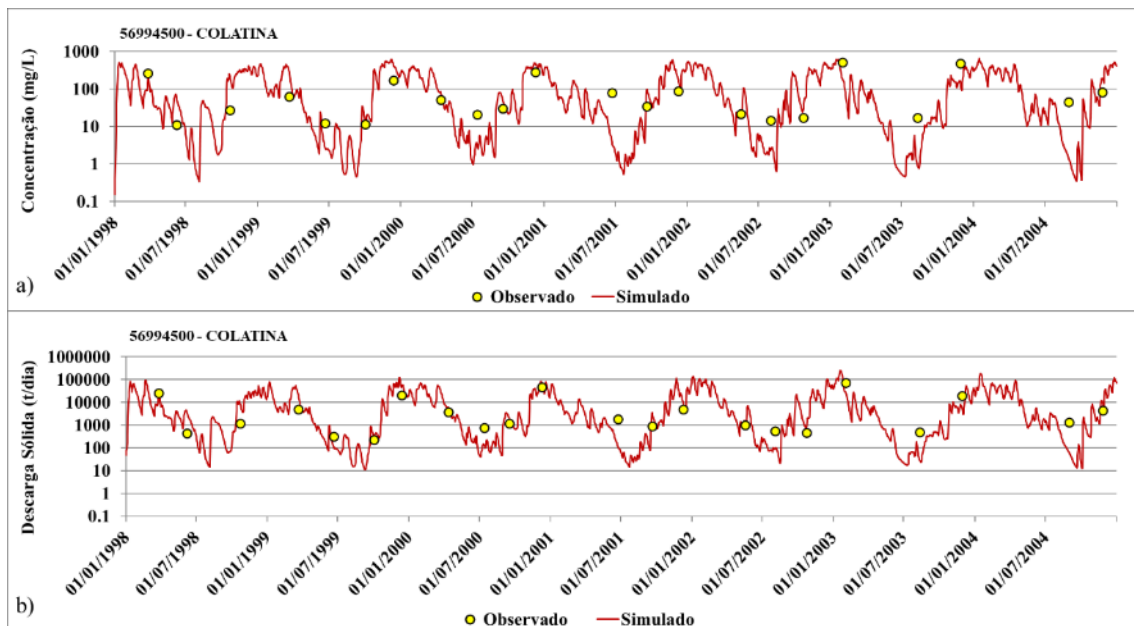


Figura 46. Comparação entre as concentrações (a) e as descargas (b) diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Colatina (56994500), no período de validação (1998 a 2004), para as datas das medições.

Ao avaliar as CSS em estações que monitoram pequenas bacias, verifica-se que em alguns poucos dias nos períodos secos, onde o escoamento é suportado pelo aporte de água do fluxo de base, o modelo tende a estimar concentrações nulas, pois a equação de geração de sedimentos é dependente do escoamento superficial e o aporte de sedimentos em suspensão para os rios provém da bacia. Essas diferenças podem estar

relacionadas a processos naturais que ocorrem ao longo dos rios, como erosão de margens (HOOKE, 2003), processos não representados explicitamente no modelo. No entanto, considerando o tempo de translação das cargas das bacias para os rios e ao longo dos rios, e por se tratar de concentrações muito baixas em cada estação e ocorrendo em curtos intervalos de tempo, o impacto dessa idealização pode ser desprezado. Fagundes et al. (2018), por exemplo, compararam o módulo de transporte de sedimentos do modelo MGB-SED e do modelo HEC-RAS 5.0.3, em um trecho de 100km do rio Doce, entre Governador Valadares e Resplendor. Os resultados do estudo indicaram que o transporte de sedimentos no canal foi muito similar com os dois modelos, mesmo que um modelo seja mais simples (MGB-SED) que o outro (HEC-RAS).

Por fim, apesar de um ajuste aceitável, existem muitas incertezas associadas aos dados observados e seus métodos de aquisição. Mesmo sob condições melhores do que as observadas neste estudo, em relação à quantidade de dados observados, Navratil et al. (2011) encontraram erros variando de 10% a 70% adotando os métodos tradicionais de medição da CSS. Como exemplos neste estudo, observam-se picos nas concentrações medidas nas estações de Cachoeira dos Óculos Montante (56539000) e São Sebastião da Encruzilhada (56990000), os quais são mais discrepantes em relação à magnitude dos valores da série da estação. Por outro lado, a estação Governador Valadares (56850000) não possui dados no período de calibração, mas os resultados no período de validação foram menos discrepantes (ver Tabela 21).

3.2.8. Sedimentos de leito

As cargas de leito foram simuladas e avaliadas comparando o percentual de transporte de leito (Q_{sl}) com relação ao transporte total (Q_{st}). Medições realizadas pela Rhama entre 2019 e 2022 foram utilizadas para se comparar essa relação entre as descargas observadas e o mesmo foi realizado com a modelagem.

Primeiramente, na Figura 47, é apresentada a proporção da carga de leito simulada com relação à carga total transportada estimada pelo modelo. Observa-se que alguns trechos de rio com maiores declividades, como o rio Gualaxo Norte, trechos do Alto Santo Antônio e outras, os valores do transporte de leito com relação ao total são acima de 10%. Para a maioria dos rios, esses valores variaram entre 0% e 5%.

As medições realizadas pela Rhama em 16 estações na bacia do rio Doce mostraram que em média a relação Q_{sl}/Q_{st} é de 5%. Os valores de transporte de leito no período chuvoso são cerca de 5-10 vezes maiores que no período seco. Contudo, proporcionalmente à QSS, a QSL no período seco tende a ser maior do que no período chuvoso. Além disso, os dados mostraram que ao longo do rio Doce podem ocorrer valores "altos" de transporte de leito se comparado ao total, mostrando assim não haver um padrão nos dados que indiquem regiões com mais e menos transporte de sedimentos de leito, associados à declividade do rio, por exemplo.

Os resultados estimados usando os dados medidos pela Rhama, mostraram que a relação Q_{sl}/Q_{st} para a estação Cachoeira dos Óculos Montante, Governador Valadares e Colatina, foi em média de 1%, 2% e 14%, respectivamente. Já com os resultados da simulação no período de calibração, esses valores foram em média aproximadamente

0% para as respectivas estações. É importante ressaltar que medições da carga de leito são extremamente difíceis e apresentam grandes incertezas. Além disso, essas medições raramente são realizadas em períodos de grandes vazões.

Na Figura 48, Figura 49 e Figura 50 são apresentadas, apenas como forma de ilustração, séries simuladas da Qsl para as estações Cachoeira dos Óculos Montante, Governador Valadares e Colatina, respectivamente.

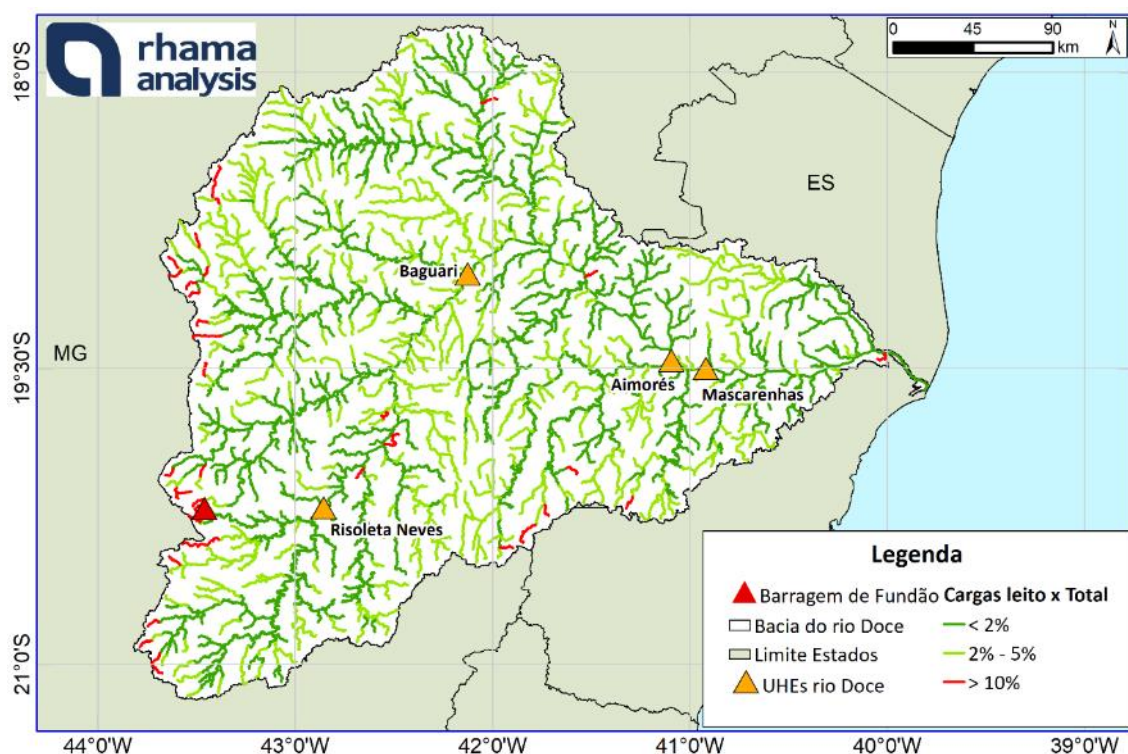


Figura 47. Percentual da carga de leito transportada com relação à carga total simuladas para cada trecho de rio simulado.

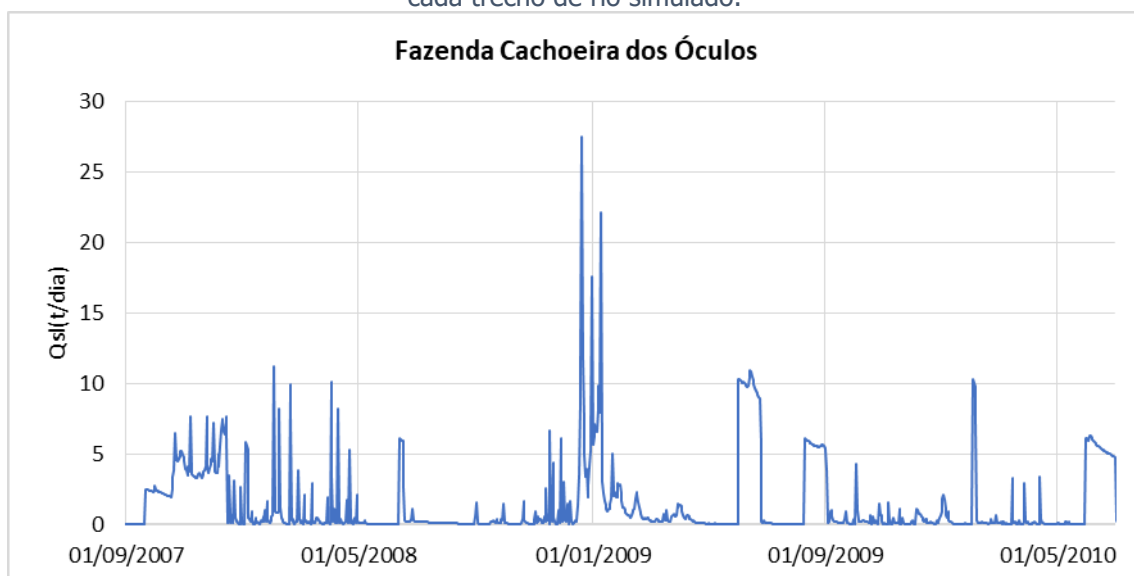


Figura 48. Sedimentograma da carga de leito simulada na estação Cachoeira dos Óculos Montante.

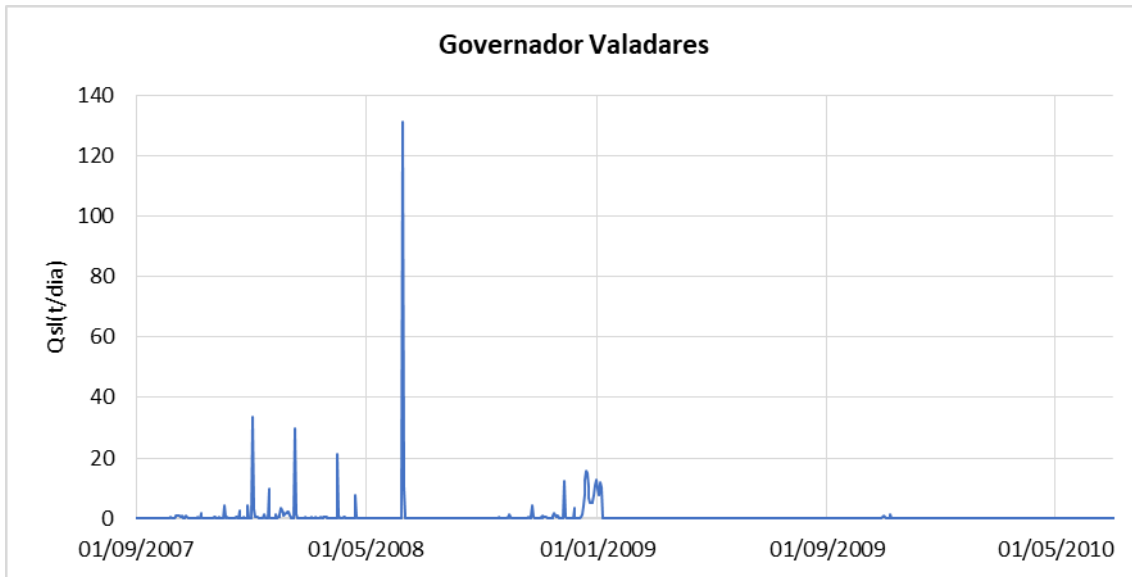


Figura 49. Sedimentograma da carga de leito simulada na estação Governador Valadares.

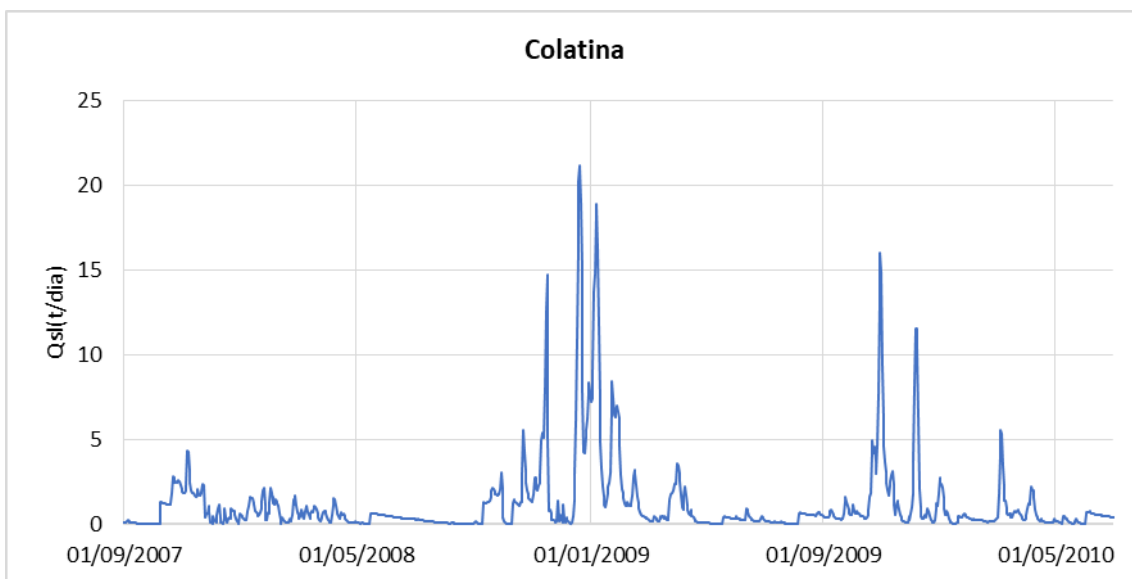


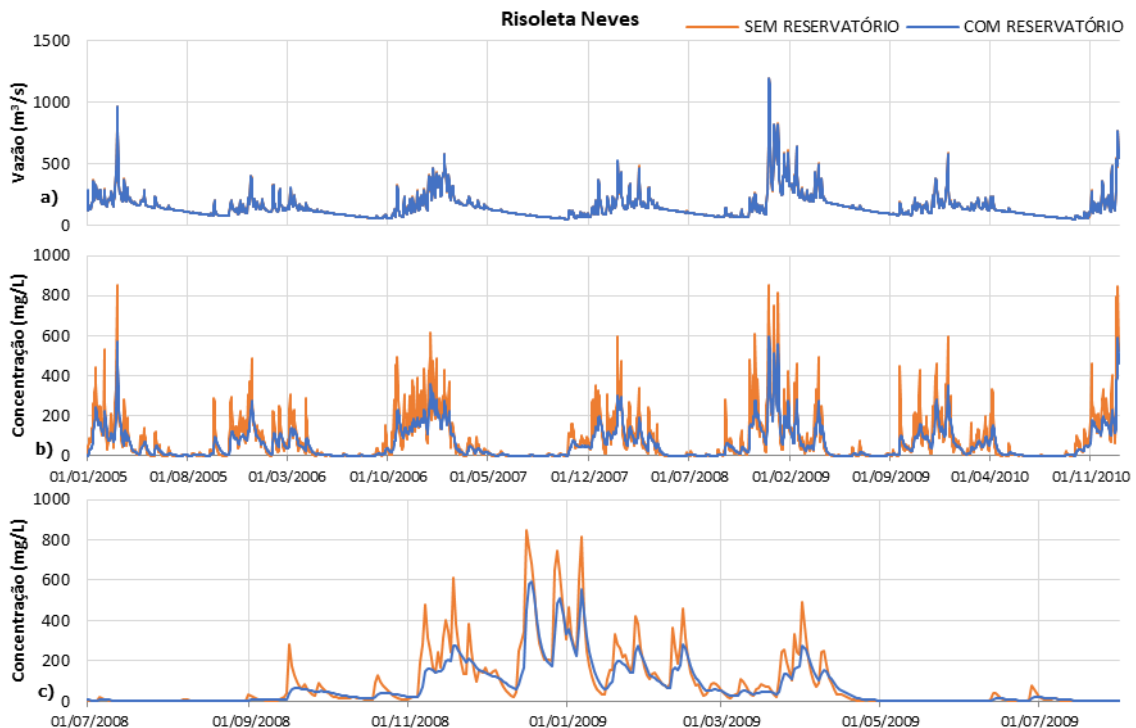
Figura 50. Sedimentograma da carga de leito simulada na estação Colatina.

3.2.9. Efeito dos reservatórios

Para avaliar o comportamento dos reservatórios simulados neste estudo, são apresentadas as séries de vazões e de concentrações de sedimentos em suspensão, em dois cenários no período de 2005 a 2014: 1) desprezando a existência de reservatórios na bacia (linha laranja); 2) considerando a presença dos reservatórios e suas respectivas datas de início da operação. Os resultados estão apresentados na Figura 51, Figura 52, Figura 53 e Figura 54. Em cada figura são apresentadas vazões diárias (a) e a concentrações de sedimentos em suspensão (b). Ainda, para facilitar a visualização da influência do reservatório nas concentrações de sedimentos, apresenta-se um gráfico (c) em um período mais curto (01/07/2008 a 31/07/2009). Em todos os reservatórios, o

impacto nas vazões é desprezível, o que se justifica pelo fato deles não serem reservatórios de regularização, sendo operados a fio d'água.

A presença de reservatório retém parte dos sedimentos transportados em suspensão, além de produzir uma suavização dos sedimentogramas de concentrações para jusante. A suavização da série de CSS defluentes aos reservatórios parece ser dissipada para jusante, de forma que as flutuações das concentrações voltam a ser semelhantes àsquelas a montante do reservatório ou ao cenário sem reservatórios. Isso pode ser observado ao verificar, por exemplo, as concentrações afluentes ao reservatório de Baguari antes do início da sua operação. A carga de sedimentos afluente à Baguari passou pelo reservatório de Risoleta Neves, o qual suavizou as concentrações defluentes, mas o sedimentograma possui comportamento semelhante àquele observado na simulação sem reservatórios (linha laranja) embora com valores menores, especialmente nos picos. Por outro lado, para o reservatório da UHE Mascarenhas, iniciado em 1974, observa-se um comportamento muito semelhante ao da UHE Aimorés, devido ao efeito que essa provoca naquela outra.



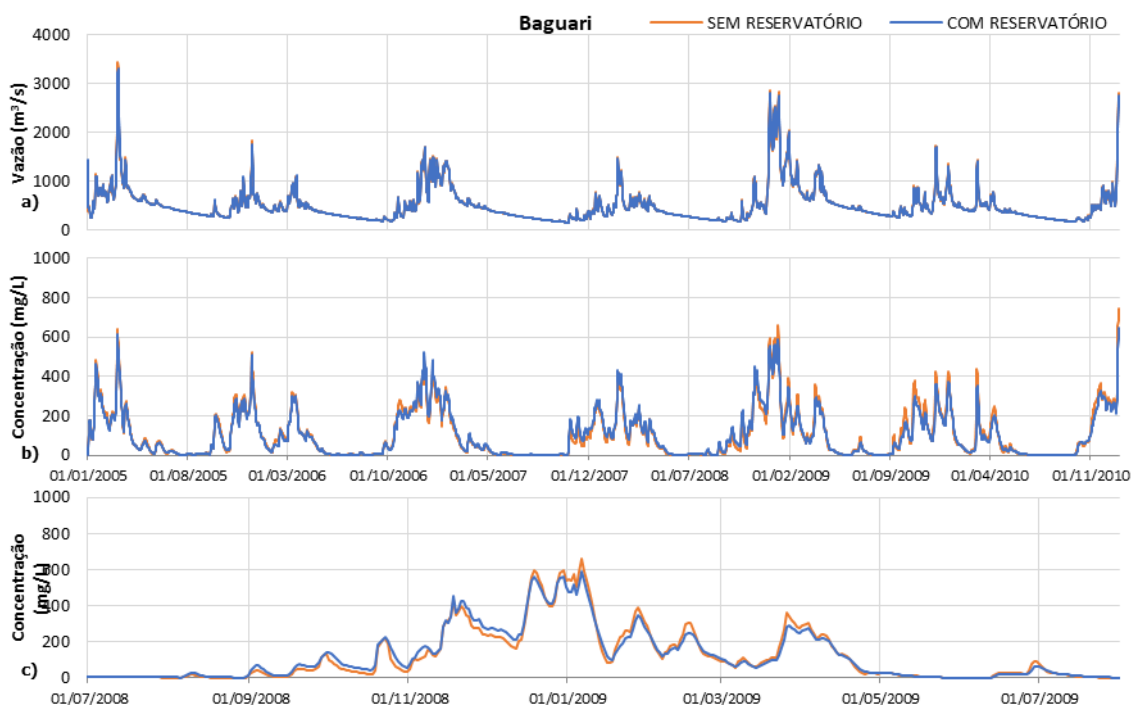


Figura 52. Efeito da presença do reservatório de Baguari nas a) vazões diárias e b) concentrações de sedimentos em suspensão. Para facilitar a visualização do impacto na concentração de sedimentos, apresenta-se c) um gráfico no período mais curto de 01/07/2008 a 31/07/2009.

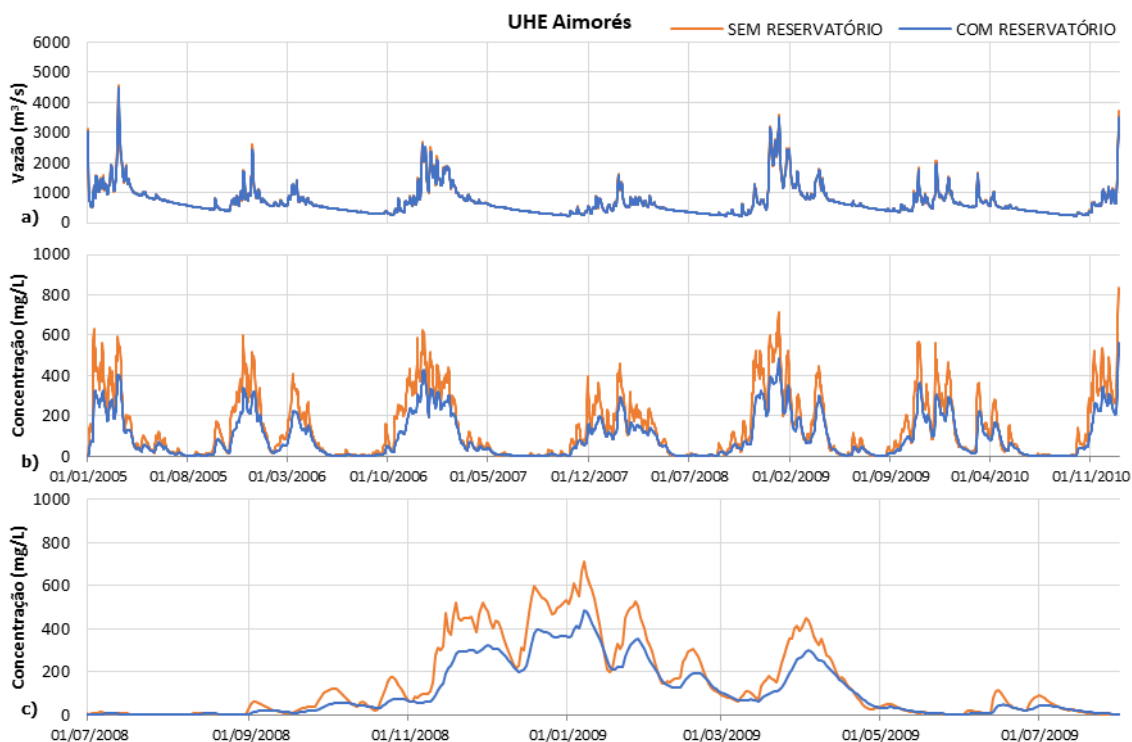


Figura 53. Efeito da presença do reservatório da UHE Aimorés nas a) vazões diárias e b) concentrações de sedimentos em suspensão. Para facilitar a visualização do impacto na concentração de sedimentos, apresenta-se c) um gráfico no período mais curto de 01/07/2008 a 31/07/2009.

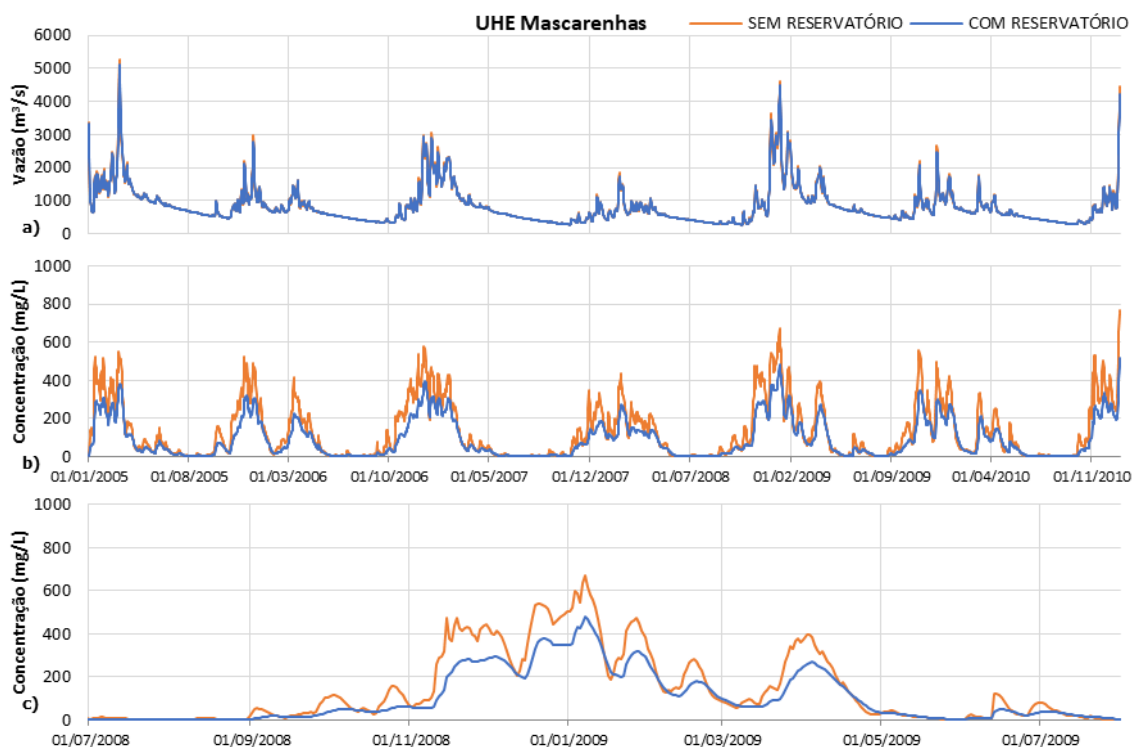


Figura 54. Efeito da presença do reservatório da UHE Mascarenhas nas a) vazões diárias e b) concentrações de sedimentos em suspensão. Para facilitar a visualização do impacto na concentração de sedimentos, apresenta-se c) um gráfico no período mais curto de 01/07/2008 a 31/07/2009.

Pelas simulações realizadas, estimou-se uma retenção de sedimentos em suspensão de 24,3% em Risoleta Neves, 8,2% em Baguari, 27,7% na UHE Aimorés e 3,1% na UHE Mascarenhas, ao longo do período simulado de 2005 a 2014. Segundo estudo realizado pela Potamos (2019), a eficiência de retenção Risoleta Neves, após 10 anos de operação, estaria próxima de 40% da carga total afluente ao reservatório.

O valor estimado pelo modelo refere-se apenas a retenção da carga de sedimentos em suspensão, sem considerar a descarga de fundo. Potamos (2019) analisou descargas de fundo no trecho próximo a UHE Risoleta Neves. A partir de medições em campo, foi determinada uma proporção de 10% de descarga de fundo com relação à descarga em suspensão em postos não impactados pelo rompimento. No rio Gualaxo do Norte, local mais impactado pela onda de rompimento, o estudo indicou um aumento na proporção, subindo para 20% da descarga em suspensão. Valores semelhantes também foram observados nesse estudo com os dados da Rhama, apresentado no item anterior.

Considerando a descarga de fundo como 10% da carga em suspensão e que toda a carga de fundo fica retida no reservatório, a eficiência de retenção seria de 38%. Portanto, dentro da ordem de grandeza das estimativas.

3.2.10. Relação Vazão Líquida *versus* Vazão Sólida

Para avaliar os resultados da calibração e validação do modelo, também buscou-se verificar o ajuste da relação vazão líquida versus vazão sólida. No período de 1998 a 2014, a tendência da relação obtida com os dados observados de descargas líquidas foi comparada com aquela obtida a partir dos resultados das simulações. Na Figura 55 até a Figura 59 são apresentadas estas relações para os postos sedimentométricos com dados localizados ao longo do rio Doce. Nestas figuras, os dados observados foram plotados em azul para o período da validação (1998 a 2004) e em amarelo para o período de calibração (2005 a 2014). No geral, observa-se que há um bom ajuste das nuvens de pontos observados e simulados referentes às descargas sólidas. Para a estação Governador Valadares (56850000), os dados disponíveis correspondem ao período de validação do modelo, mas ainda assim o ajuste das curvas é bom. Já a estação de Tumiritinga (5692000) possui dados apenas no período de calibração, embora sejam poucos.

No entanto, há uma tendência das medições de concentrações de sedimentos em suspensão e respectivas descargas líquidas serem realizadas em eventos com vazões menos elevadas, de forma que os picos das cheias geralmente não são medidos. Além disso, há uma grande variabilidade das vazões sólidas de cada intervalo de vazão líquida, o que pode estar associado ao fato de que, para uma mesma vazão, o local pode estar passando por um evento de cheia com subida do hidrograma, como também pode estar num momento de recessão. Além disso, a variabilidade espacial da precipitação afeta a produção de sedimentos, com chuva podendo ocorrer em locais com maior capacidade de produção de sedimentos, embora com uma mesma geração de escoamento.

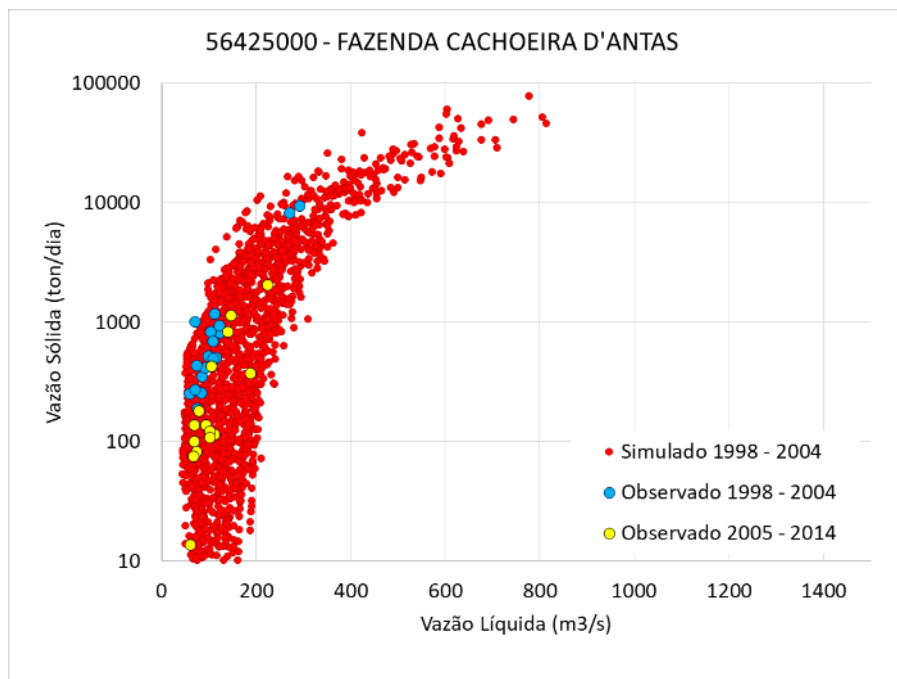


Figura 55. Relação Vazão Líquida versus Vazão Sólida, observadas e simuladas, no período de 1998 a 2014, para a estação Fazenda Cachoeira D'Antas (56425000).

Para a estação Fazenda Cachoeira D'Antas (56425000) (Figura 55), por exemplo, as descargas sólidas observadas no período de 1998 a 2014 têm seu maior valor para uma vazão líquida de $290 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. No entanto, o modelo gera vazões sólidas para eventos maiores, não medidos.

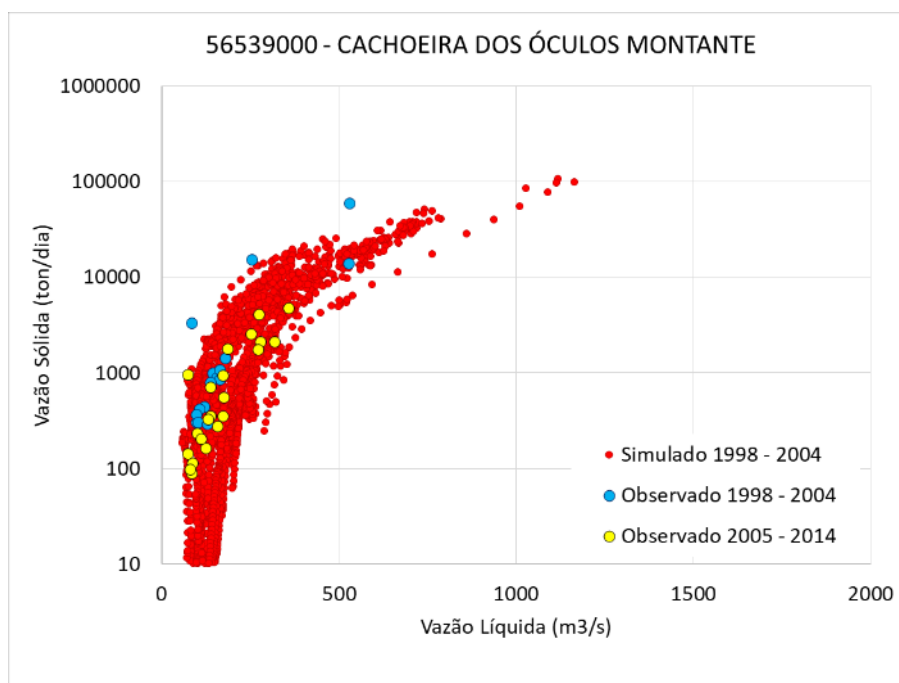


Figura 56. Relação Vazão Líquida versus Vazão Sólida, observadas e simuladas, no período de 1998 a 2014, para a estação Cachoeira dos Óculos Montante (56539000).

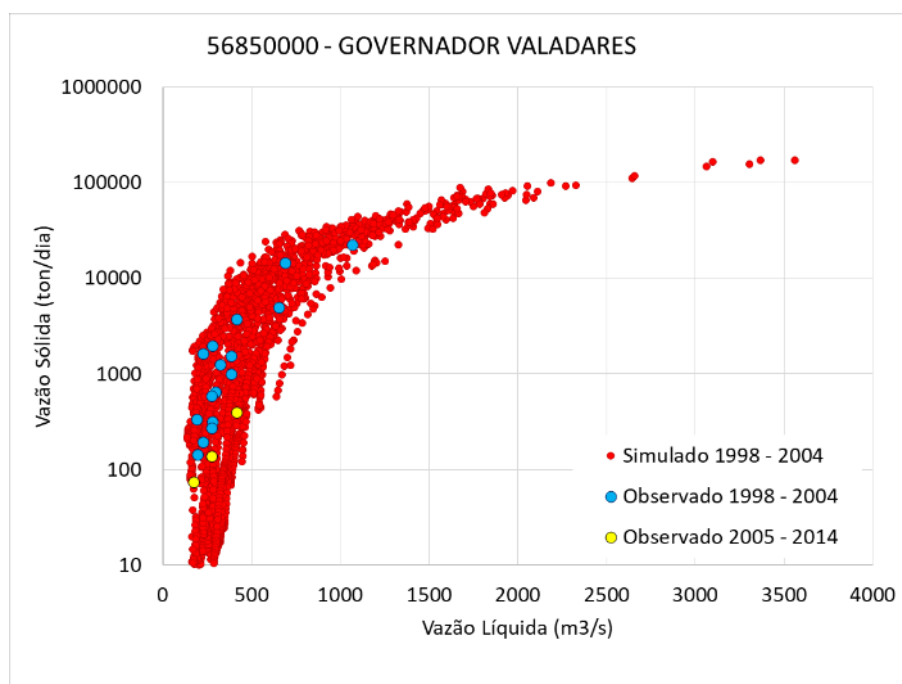


Figura 57. Relação Vazão Líquida versus Vazão Sólida, observadas e simuladas, no período de 1998 a 2014, para a estação Governador Valadares (56850000).

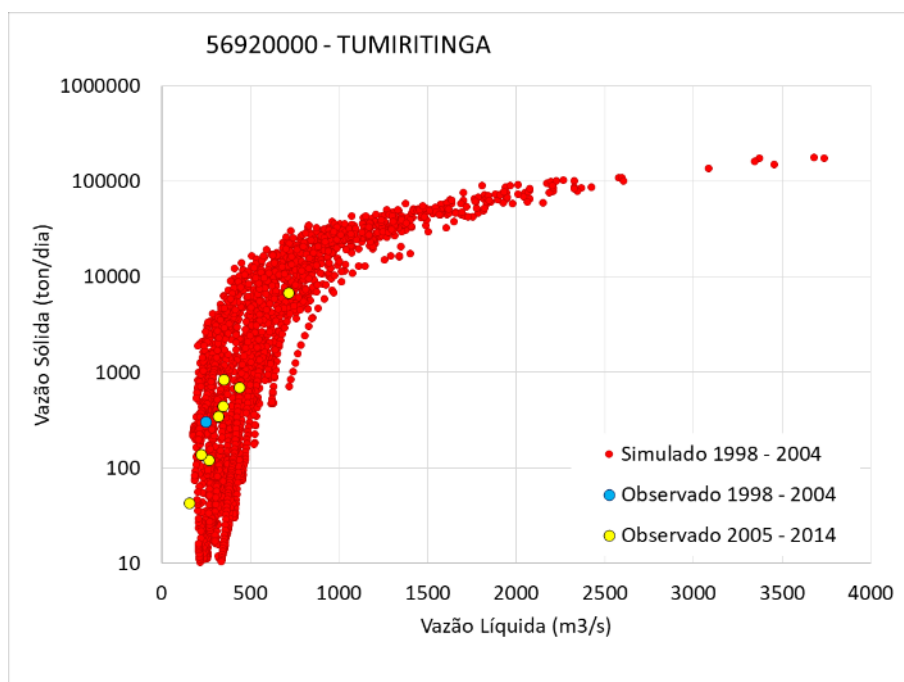


Figura 58. Relação Vazão Líquida versus Vazão Sólida, observadas e simuladas, no período de 1998 a 2014, para a estação Tumiritinga (56920000).

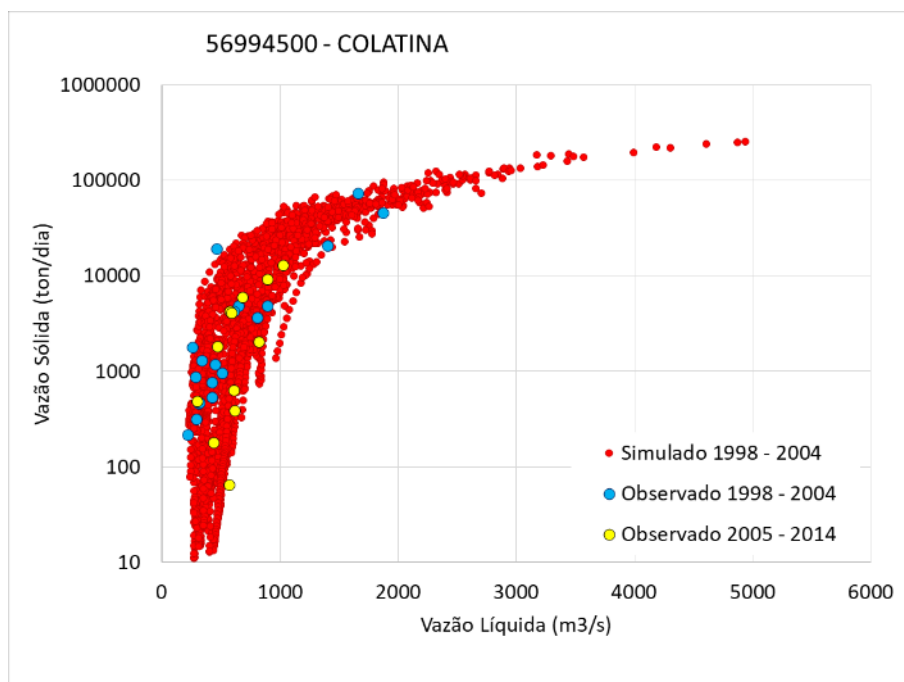


Figura 59. Relação Vazão Líquida versus Vazão Sólida, observadas e simuladas, no período de 1998 a 2014, para a estação Colatina (56994500).

4. RESULTADOS - SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS

O modelo de sedimentos foi calibrado e validado para o período anterior ao rompimento (1998 a 2014), incluindo uma rotina para representar a existência de reservatórios. Para isso, foram considerados os dados de concentração em suspensão de postos sedimentométricos da ANA e respectivas vazões líquidas medidas. Também foi considerada a relação vazão líquida x vazão sólida para estimar uma série observada contínua de vazão sólida a partir da série de vazões diárias dos postos fluviométricos da ANA. Assim como na parte hidrológica, o que se buscou foi calibrar, no período mais recente até antes do rompimento, e validar com o período anterior.

O modelo MGB-SED ajustado será utilizado para simular cenários que respondam perguntas sobre o rompimento ocorrido. Para isso, foram definidos quatro cenários de simulação:

- *O cenário A corresponde ao cenário que simula a situação hipotética sem o rompimento da barragem, mas com as ocorrências hidrológicas de novembro de 2015 a dezembro de 2022. Este é o cenário de referência para as demais simulações;*
- *O cenário B corresponde ao cenário do rompimento, no período de 5 a 25 de novembro de 2015, da ocorrência do rompimento e o deslocamento da onda para jusante;*
- *O cenário C consiste em simular o sistema para o período de 25 novembro de 2015 a dezembro de 2022 considerando o rompimento da barragem, para comparação com o cenário A. Este cenário envolve dados existentes e procura responder à pergunta quanto a diferença de cenários em diferentes trechos do rio Doce;*
- *O cenário futuro⁵ envolve a simulação do rio Doce para o futuro, a fim de procurar projetar a sua recuperação. Esta simulação envolve uma análise estocástica com base nas precipitações. Considerando as séries disponíveis de precipitação desde a década de 70 até 2022, portanto serão cerca de 50 anos de dados. Diferentemente do estudo anterior (Rhama, 2020), o presente estudo não apresenta resultados desse cenário apenas os trechos a montante da UHE Risoleta Neves (T-06 a T-11), mas sim em todos os trechos de T-06 a T-16.*

É importante lembrar que o modelo de sedimentos adotado neste estudo considera que os sedimentos transportados são compostos por três classes de partículas, caracterizadas por seu diâmetro médio dentro de cada classe: silte, argila e areia. As partículas de silte e argila são consideradas “sedimentos finos” e são transportados majoritariamente em suspensão, enquanto a classe areia é considerada “sedimento

⁵ Esse cenário futuro corresponde ao que antes era chamado de Cenário E do estudo da Rhama (2020), porém agora ampliado para considerar também os trechos T-12 a T-16.

transportado como carga de fundo”. Considerando que tipicamente sedimentos finos são transportados em suspensão, este estudo assume que todo o transporte dos rejeitos ocorre dessa forma. Apesar do transporte de sedimentos do leito ter sido estimado na calibração e validação do modelo, considerando que o modelo não considera a interação entre essa forma de transporte e o transporte em suspensão, os resultados avaliados e apresentados aqui são relativos aos sedimentos finos.

O balanço de massa foi discretizado considerando os cenários, em cada trecho definido nos Planos de Manejo de Rejeitos, no período simulado. Estes cenários representam o transporte de sedimentos na bacia do rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão. Neste balanço, o volume total transportado em suspensão no leito menor de cada trecho do PMR (VOL_J) é composto por: volume total transportado em suspensão no leito menor do trecho de rio imediatamente a montante (VOL_M); volume total transportado em suspensão no leito menor dos afluentes que contribuem ao trecho (VOL_{aflu}); volume total proveniente da perda de solo da área da bacia contribuinte diretamente ao trecho (VOL_{bac}); volume total gerado no leito menor do trecho (VOL_{trecho}); volume total armazenado nos reservatórios (VOL_{res}); e volume total retido no leito maior (planícies) do trecho (VOL_{plan}). Desta forma, o balanço de massa com o modelo MGB-SED é representado por:

$$VOL_J [m^3] = VOL_M + VOL_{aflu} + VOL_{bac} + VOL_{trecho} - VOL_{res} - VOL_{plan} \quad 19$$

O volume total gerado no leito menor do trecho corresponde à diferença entre o volume de material fino (silte e argila) ressuspensionado do fundo da calha do rio e o volume de depósitos de material fino. Desta forma, valores positivos indicam que ao longo do período simulado houve mais material erodido/ressuspensionado da calha do trecho do que material depositado. Valores negativos, por sua vez, indicam que no período simulado houve maior volume depositado no trecho do que erodido.

4.1. Cenário A

Considerando que o modelo de sedimentos foi calibrado e validado para um período anterior ao rompimento (1998 a 2014), este cenário corresponde à simulação de uma situação em que não ocorre o rompimento da barragem. Trata-se de um cenário de referência, que simula o que teria acontecido na bacia do rio Doce, em termos de transporte de sedimentos, ao longo do período do final de 2015 até os dias atuais, caso o rompimento da barragem de rejeitos não tivesse ocorrido.

Buscando caracterizar o transporte de sedimentos na bacia, no período de novembro de 2015 até os dias atuais, caso o rompimento da barragem de rejeitos não tivesse ocorrido, os resultados do modelo foram avaliados nas sub-bacias afluentes do rio principal, as quais não sofreram impactos do rompimento. Ao longo do rio Doce, foram estimados os volumes de sedimentos retidos no reservatório durante o período simulado, bem como estabelecidas curvas vazão líquida x vazão sólida em locais com dados no período e outros de interesse.

4.1.1. Produção de sedimentos das Sub-bacias

Os resultados são apresentados considerando valores diários das simulações. Para este cenário de referência, as descargas sólidas (Q_s , em t/dia) simuladas foram determinadas em cada uma das estações que possuem dados de concentrações de sedimentos em suspensão medidos no período de 2015 a 2022 e não sofreram o efeito do rompimento da barragem.

Considerando que os dados medidos têm frequência média de 4 medições anuais, os resultados apresentados mostram os valores das concentrações e descargas diárias simulados e os valores destas variáveis medidos nas estações⁶. Os resultados estão apresentados da Figura 60 a Figura 64, onde a figura inferior (b) apresenta o eixo das ordenadas em escala logarítmica, facilitando avaliar o ajuste dos dados. Observa-se que o modelo consegue gerar resultados que acompanham a variabilidade espacial e temporal das descargas sólidas. As estatísticas apresentadas foram estimadas comparando as observações com as simulações, apenas nas datas em que há dados observados.

Em todos os sedimentogramas, o comportamento sazonal dos dados medidos e simulados tem sido representado de forma aceitável.

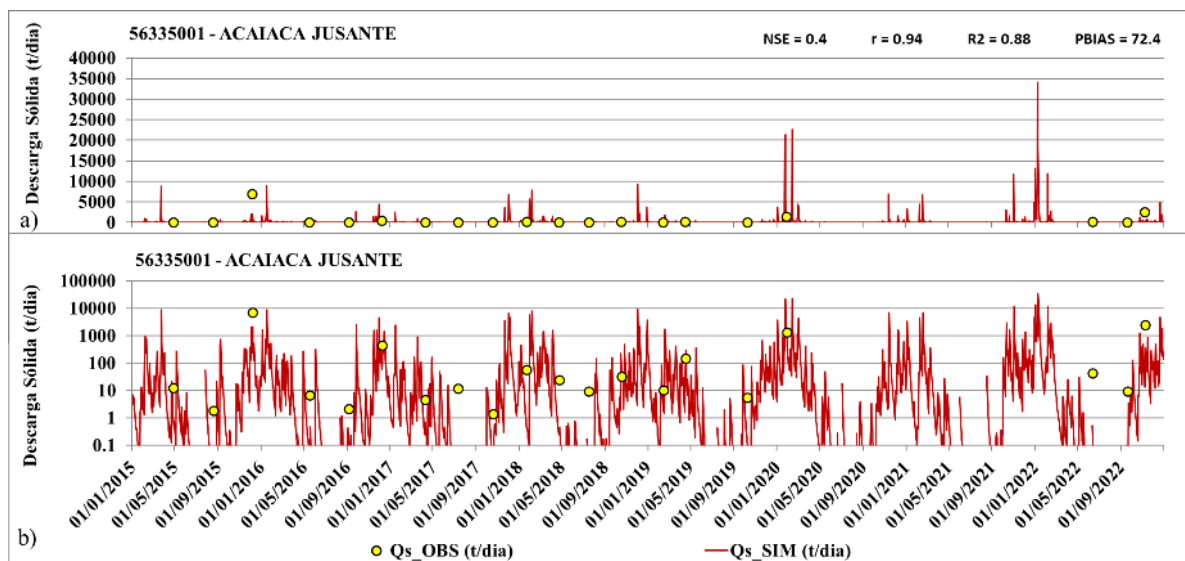


Figura 60. Comparação entre as descargas diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Acaiaca Jusante (56335001), no período de 2015 a 2022. Na figura b), o eixo das ordenadas estão em escala logarítmica.

⁶ Exceto para a estação da CEMIG que possui maior frequência de medições de concentração de sedimentos.

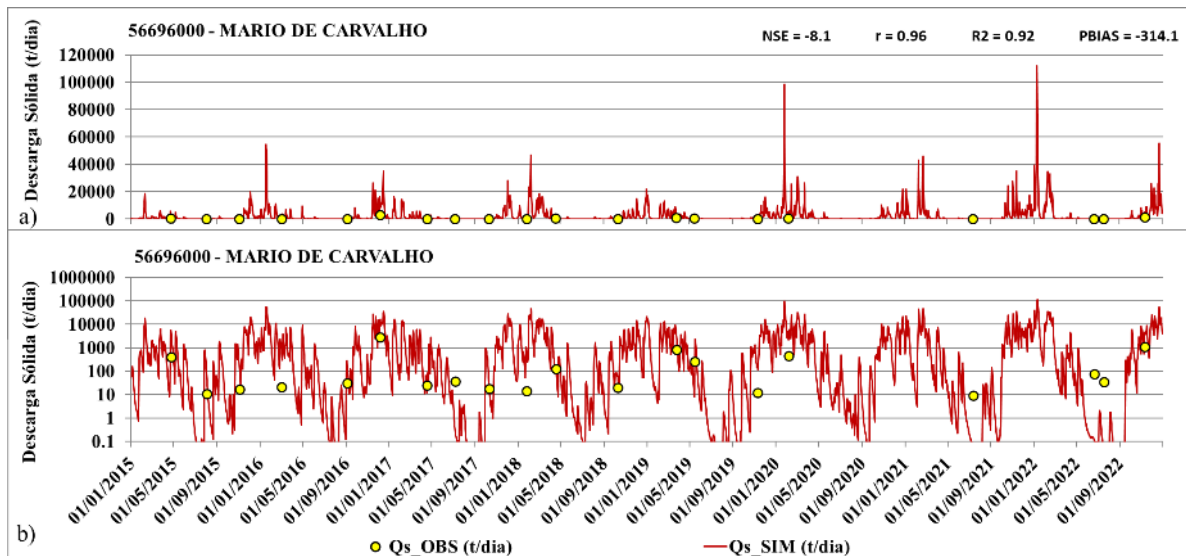


Figura 61. Comparação entre as descargas diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Mario de Carvalho (56696000), no período de 2015 a 2022. Na figura b), o eixo as ordenadas estão em escala logarítmica.

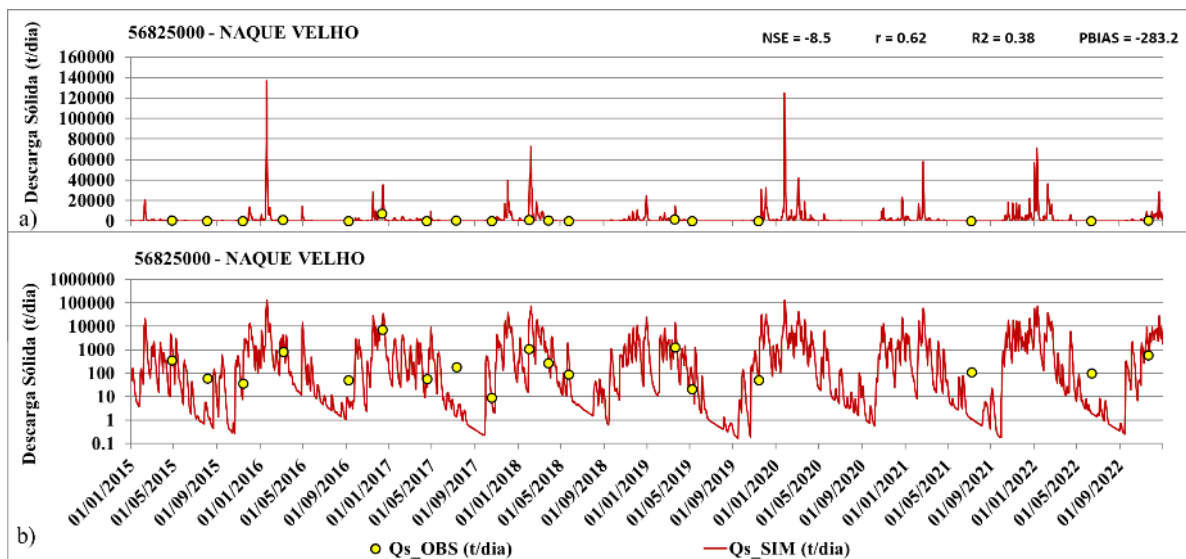


Figura 62. Comparação entre as descargas diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Naque Velho (56825000), no período de 2015 a 2022. Na figura b), o eixo as ordenadas estão em escala logarítmica.

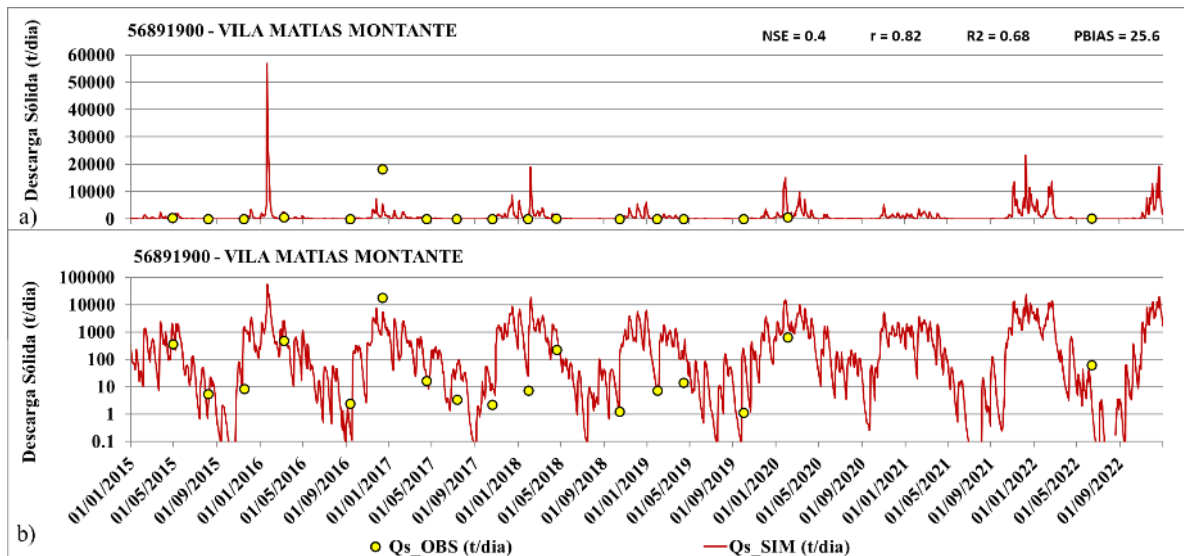


Figura 63. Comparação entre as descargas diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação Vila Matias Montante (56891900), no período de 2015 a 2022. Na figura b), o eixo as ordenadas estão em escala logarítmica.

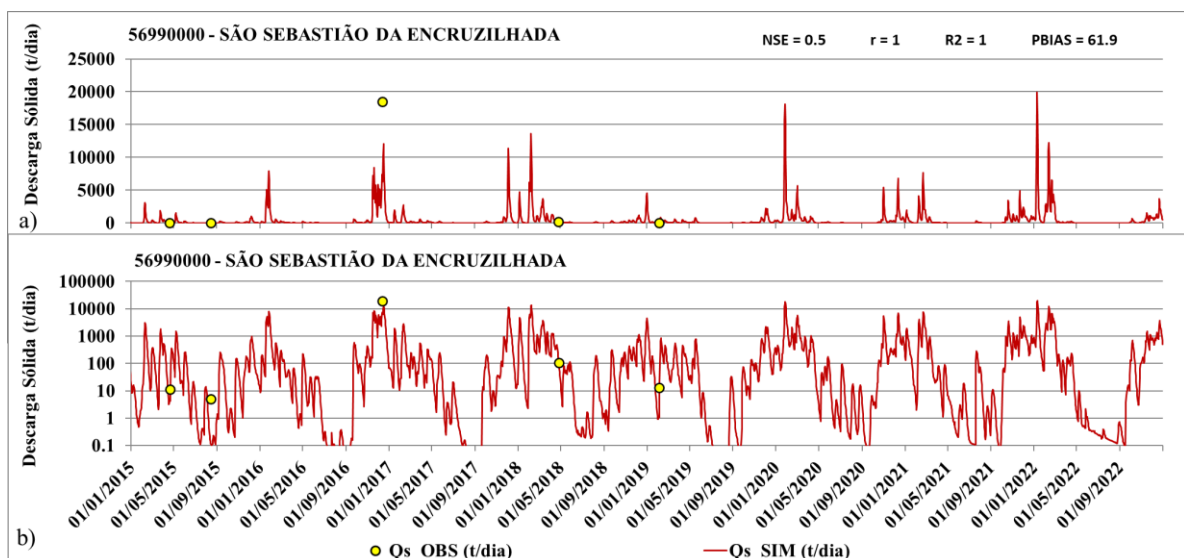


Figura 64. Comparação entre as descargas diárias de sedimentos em suspensão simuladas e observadas na estação São Sebastião da Encruzilhada (56990000), no período de 2015 a 2022. Na figura b), o eixo as ordenadas estão em escala logarítmica.

4.1.2. Geração e Transporte de Sedimentos nas sub-bacias e no rio principal

Assim como em fases anteriores, para o período de 2015 a 2022, foi verificada a geração e o transporte de sedimentos na bacia. Para isso, foi estimada a variabilidade espacial da carga total de sedimentos gerada em cada minibacia, em cada passo de tempo, que seguirá para a rede de drenagem, como condição de contorno para o módulo de transporte nos trechos de rios. Na Figura 65 é apresentada a carga média anual específica de sedimentos (t/ano/km²) gerada em cada minibacia e aportada à rede de drenagem no período de referência.

A Figura 66 apresenta os trechos de rio que mais contribuem com a carga de sedimentos em suspensão na bacia, pois nela, a carga anual de cada trecho de rio foi dividida pela área de contribuição acumulada no trecho, gerando um mapa espacial da carga média específica de sedimentos em suspensão. A Figura 67 apresenta a estimativa da descarga média anual de longo período de sedimentos em suspensão nos trechos de rio da bacia do rio Doce. Observa-se um aumento da descarga sólida no sentido de montante para jusante, onde as descargas superam valores de $3,2 \cdot 10^6$ toneladas por ano nas proximidades do exutório da bacia.

De maneira similar, a partir de dados simulados de vazão líquida e concentração de sedimentos suspensos no período de 2015 a 2022, foram calculadas as séries de descarga sólida referentes a cada sub-bacia do rio Doce associada a um posto sedimentométrico. Para cada uma das sub-bacias, foram consideradas as vazões médias anuais de descarga sólida (em ton.ano^{-1}) simuladas e, a partir da sua área de drenagem (em km^2), foram obtidas as vazões específicas ($\text{ton.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$) de contribuição de sedimentos para o rio Doce, apresentadas na Figura 66.

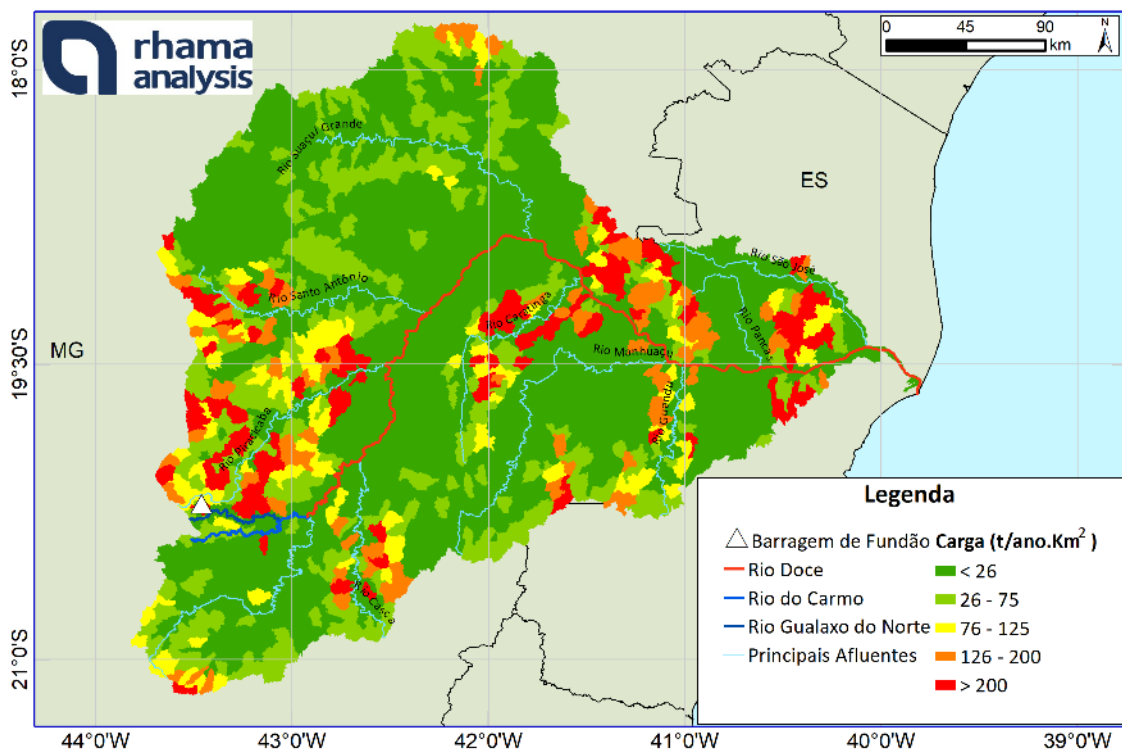


Figura 65. Carga média anual específica de sedimentos gerada nas minibacias e aportadas aos trechos de rios, no período de 2015 a 2022.

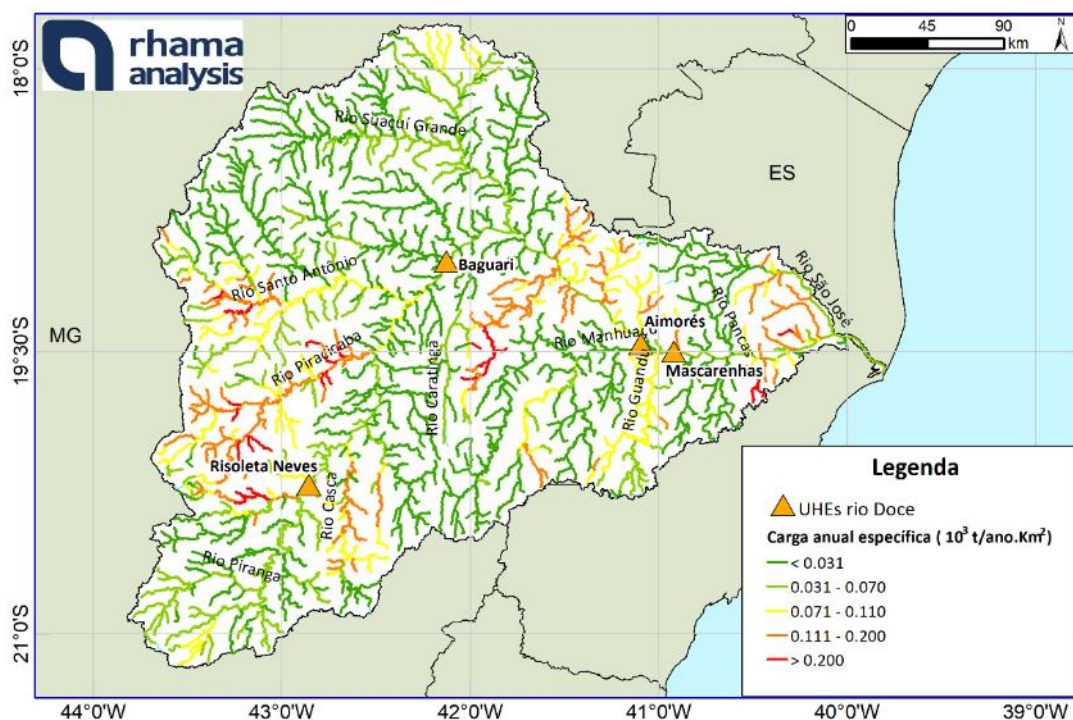


Figura 66. Carga anual específica de sedimentos em suspensão nos trechos de rio da bacia do rio Doce, no período de 2015 a 2022.

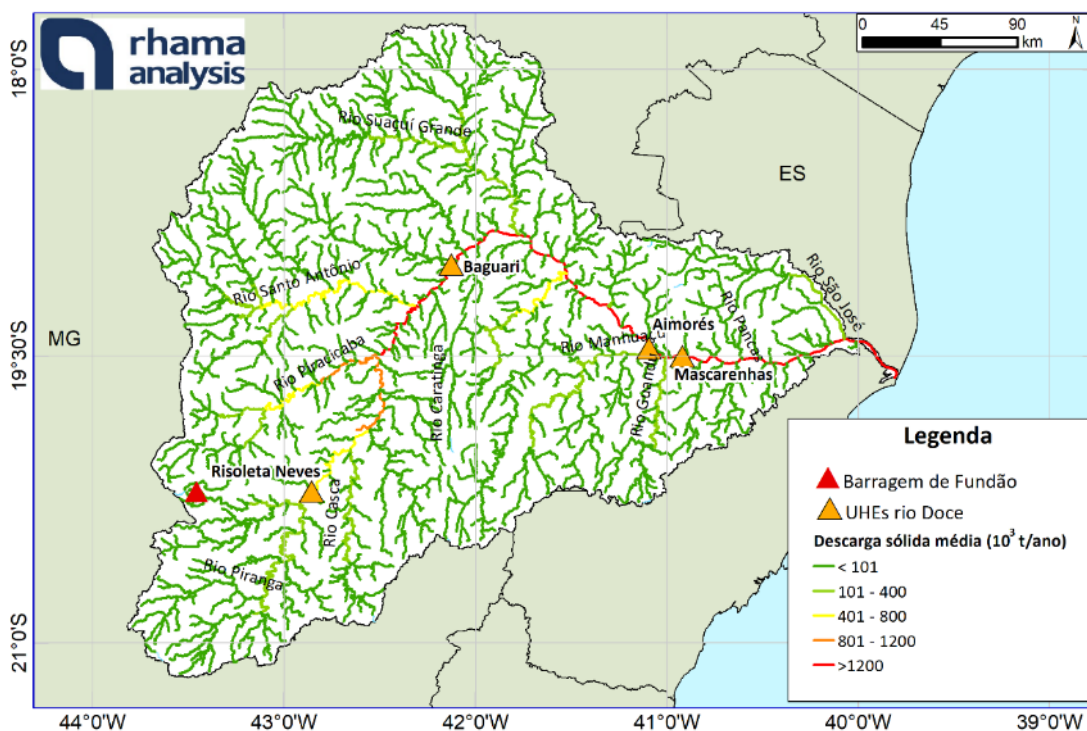


Figura 67. Carga anual média de longo período de sedimentos em suspensão nos trechos de rio da bacia do rio Doce, no período de 2015 a 2022.

O trecho médio possui maior capacidade de retenção de sedimentos devido aos reservatórios das quatro UHEs que existem nesse trecho. A tendência do reservatório é

de reter os sedimentos de maior granulometria como areia e parte do silte. Os sedimentos finos que permanecem mais tempo na água em suspensão tendem a escoar para jusante, alterando as relações dos sólidos em suspensão para jusante.

Para conhecer a dinâmica do fluxo de sedimento na bacia, também é importante conhecer a sazonalidade do transporte de sedimentos em suspensão. Desta forma, para verificar a variabilidade sazonal do transporte de sedimentos em suspensão durante o ciclo hidrológico, são apresentados resultados das médias anuais das vazões líquidas, das concentrações e das descargas simuladas em 12 localidades ao longo do rio Doce apresentadas na Tabela 22 e especializadas na Figura 68. Também foram estimadas as vazões líquidas médias mensais, as concentrações médias mensais e as descargas médias mensais simuladas nestas mesmas localidades.

Para a simulação do cenário A, no período de 2015 a 2022, as estimativas das médias anuais das concentrações de sólidos suspensos, vazão líquida e vazão sólida são apresentadas nas Tabela 23, Tabela 24 e Tabela 25. Para as três variáveis analisadas, pode-se observar que o ano de 2015 apresentou os menores valores estimados pela simulação, o que pode estar relacionado ao fato deste ano ter sido o mais seco dentre os demais, gerando menor aporte de sedimentos das bacias para os rios.

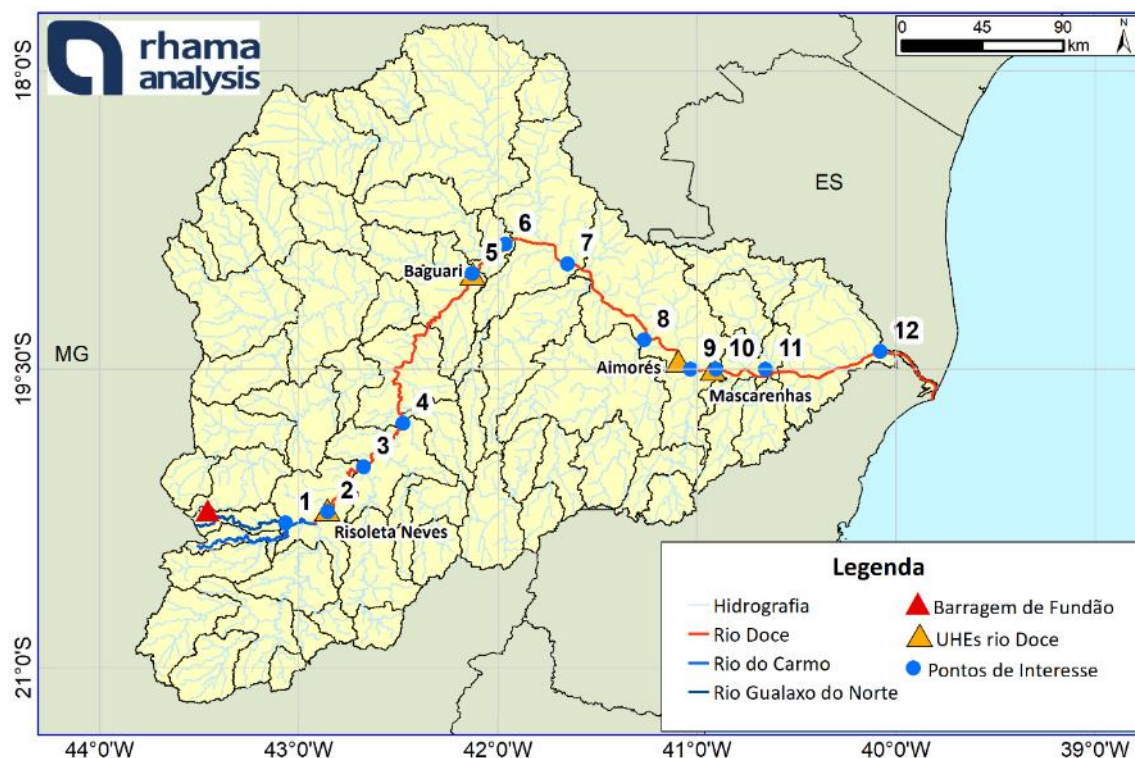


Figura 68. Especialização das localidades ao longo do rio Doce para verificação da sazonalidade do transporte de sedimentos em suspensão.

Tabela 22. Localidades ao longo do rio Doce para verificação da sazonalidade do transporte de sedimentos em suspensão.

ID	Descrição	Latitude	Longitude
1	Gualaxo Norte - 08	-20,274	-43,067
2	UHE Risoleta Neves	-20,218	-42,857
3	56425000 - Fazenda Cachoeira D'antas	-19,994	-42,675
4	56539000 - Cachoeira dos Óculos Montante	-19,774	-42,477
5	UHE Baguari	-19,022	-42,130
6	56850000 - Governador Valadares	-18,872	-41,963
7	56920000 - Tumiritinga	-18,972	-41,649
8	56948005 - Resplendor - Jusante	-19,354	-41,266
9	UHE Aimorés	-19,503	-41,033
10	UHE Mascarenhas	-19,502	-40,905
11	56994500 - Colatina	-19,502	-40,655
12	Linhares	-19,414	-40,079

Tabela 23. Médias anuais das concentrações de sedimentos em suspensão simuladas para o cenário A, nas 12 localidades selecionadas.

MÉDIA ANUAL CSS (mg/L)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2015	148,1	44,1	44,3	53,0	67,8	54,4	57,1	72,0	52,0	54,0	54,3	56,7
2016	165,8	48,8	48,9	66,5	95,7	78,2	85,0	111,1	78,9	82,5	83,0	87,4
2017	110,3	31,7	32,2	45,7	69,7	55,4	62,8	88,8	61,6	64,4	65,1	69,8
2018	213,4	59,0	57,6	73,2	93,6	76,5	84,9	111,9	79,4	83,3	83,7	89,8
2019	151,5	42,8	42,3	57,0	78,9	64,0	66,8	88,6	64,1	67,3	68,0	74,1
2020	203,5	61,0	60,7	80,2	103,4	86,8	95,9	122,6	90,6	95,3	95,6	102,0
2021	185,4	53,5	54,6	75,3	101,0	83,7	96,7	124,8	90,4	95,6	95,6	100,8
2022	226,3	65,7	65,6	77,9	100,4	84,8	92,8	116,9	84,8	86,7	86,6	92,3
MÉDIA	175,5	50,8	50,8	66,1	88,8	73,0	80,3	104,6	75,2	78,6	79,0	84,1

Tabela 24. Médias anuais das vazões líquidas simuladas para o cenário A, nas 12 localidades selecionadas.

MÉDIA ANUAL VAZÃO LÍQUIDA (m³/s)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2015	10,1	106,4	117,1	150,1	324,7	331,7	383,2	403,4	452,0	463,7	474,2	487,8
2016	13,3	137,0	152,8	202,0	480,0	493,3	558,6	589,0	664,0	679,0	689,3	703,6
2017	9,9	97,2	109,8	152,4	358,4	366,9	410,0	439,5	511,5	526,8	537,9	557,0
2018	14,6	128,8	146,0	198,0	484,6	495,2	551,2	589,2	685,6	707,9	723,7	751,3
2019	12,0	114,0	126,8	168,3	383,7	392,7	430,3	458,9	521,1	536,6	547,9	568,7
2020	16,5	194,5	215,8	292,0	638,4	651,9	717,6	765,5	865,1	891,8	911,4	942,2
2021	12,9	141,4	158,9	220,6	489,4	500,6	561,2	597,9	674,8	699,0	718,1	744,1
2022	18,7	212,0	236,9	306,3	670,1	684,6	767,8	818,8	919,9	944,7	964,6	1003,4
MÉDIA	13,5	141,4	158,0	211,2	478,7	489,6	547,5	582,8	661,7	681,2	695,9	719,8

Tabela 25. Médias anuais das vazões sólidas simuladas para o cenário A, nas 12 localidades selecionadas.

MÉDIA ANUAL VAZÃO SÓLIDA (t/dia)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2015	294.1	601.6	657.7	1018.2	2953.8	2382.9	2764.2	3640.3	2809.5	2953.5	2996.1	3142.2
2016	453.1	967.9	1087.3	2046.2	7726.6	6660.8	8131.9	10664.1	8762.7	9197.4	9285.5	9641.5
2017	220.9	437.9	543.8	1148.2	3830.1	3140.3	3775.1	5419.9	4323.8	4628.7	4734.0	5108.4
2018	604.0	990.6	1075.1	1840.5	6564.9	5523.4	6606.6	9055.5	7259.7	7800.3	7922.1	8519.7

MÉDIA ANUAL VAZÃO SÓLIDA (t/dia)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2019	283.9	599.4	659.0	1264.9	4321.8	3578.3	4000.9	5633.2	4529.6	4830.7	4946.2	5473.3
2020	702.0	1911.8	2070.3	3610.6	9735.4	8525.1	9884.6	12938.9	10680.7	11411.0	11589.5	12313.8
2021	465.8	993.9	1124.0	2259.7	7180.3	6056.4	7644.6	10449.6	8306.3	8950.8	9122.7	9755.9
2022	1087.2	2861.8	3212.1	4574.1	11782.9	10543.3	12387.8	16048.6	13207.7	13659.1	13833.2	14901.1
MÉDIA	513.9	1170.6	1303.7	2220.3	6762.0	5801.3	6899.5	9231.3	7485.0	7928.9	8053.7	8607.0

Na Figura 69 são apresentados gráficos de vazões líquidas e sólidas médias mensais simuladas, obtidas no período simulado de 2015 a 2022 nos 12 locais selecionados. O comportamento das descargas é modulado pelas vazões nos rios. As descargas médias aumentam durante o período de elevação dos níveis d'água e decrescem no período de redução dos níveis d'água. Os resultados das simulações mostram que as vazões líquidas e sólidas possuem comportamentos semelhantes, sendo maiores nos meses de dezembro a março, declinando no período de vazante que se inicia em abril e atingindo seus valores mínimos entre agosto e setembro. Em outubro, o comportamento das vazões começa a subir novamente, fechando o ciclo. Também se observa que as vazões aumentam à medida que os postos se aproximam do exutório da bacia, visto que a área de contribuição dos pontos também aumenta na mesma direção. Também é possível observar uma defasagem entre os picos das vazões líquidas e sólidas de montante para jusante, especialmente a partir do médio Doce.

Volume acumulado nos reservatórios

A tendência do reservatório é de reter os sedimentos de maior granulometria como areia e parte do silte. Os sedimentos finos que permanecem mais tempo na água em suspensão podem escoar para jusante, alterando as relações dos sólidos em suspensão.

Conforme apresentado anteriormente, o modelo de sedimentos busca representar os impactos da existência de reservatórios. Neste estudo, foram considerados os reservatórios de Risoleta Neves, Baguari, UHE Aimorés e UHE Mascarenhas. Para determinar o volume acumulado pelos reservatórios, foram realizadas duas simulações, sendo a primeira sem considerar a presença dos reservatórios na bacia, e a outra, a simulação que já é a representativa do cenário A, com os quatro reservatórios em operação. Assim, é possível comparar o resultado das duas simulações diretamente, observando a carga que ficou retida devido a presença dos reservatórios na bacia em contraste com a carga que existiria naturalmente.

Pelas simulações realizadas, verificou-se uma retenção de sedimentos em suspensão de 25% ($662 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$) em Risoleta Neves, 14% ($1558 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$) em Baguari, 25% ($4320 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$) na UHE Aimorés e 3% ($334 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$) na UHE Mascarenhas, ao longo do período simulado de 2015 a 2022. Estes valores foram estimados considerando a densidade dos sedimentos igual 1.65 t/m^3 (MORRIS; FAN, 1998) para a conversão das unidades.



Figura 69. Caracterização sazonal das vazões simuladas na bacia, nos pontos de interesse.

4.1.3. Curvas Vazão líquida x Vazão sólida

Para o período anterior ao rompimento, foram estabelecidas relações entre Vazão Sólida e Vazão Líquida para cada posto sedimentométrico com dados disponíveis, as quais foram apresentadas no item 3.2.10. A partir da modelagem, estas relações podem ser estabelecidas para o cenário atual sem o rompimento. Para isso, foram consideradas as vazões líquidas (Q [$m^3.s^{-1}$]) e sólidas (Q_s [$ton.dia^{-1}$]) simuladas no período de 2015 a 2022. A vazão sólida simulada (carga total no tempo), foi obtida a partir da Equação 7, onde C_s [$mg.L^{-1}$] é a concentração de sedimentos em suspensão simulada.

Usualmente, os pontos se ajustam bem a uma relação de potência para os valores medidos de vazão sólida e vazão líquida, onde a e b são coeficientes ajustados aos dados medidos.

$$Q_s = a.Q^b \quad 20$$

Com as relações estabelecidas no período atual desprezando a ocorrência do rompimento, será possível avaliar se as condições de transporte de sedimentos após o rompimento, apresentam tendências similares às condições históricas observadas nas séries monitoradas. Para isso, deverá ser simulado um cenário atual considerando o rompimento e estabelecidas as relações entre vazão sólida e vazão líquida.

O ajuste das curvas foi realizado para valores médios de vazão sólidas em intervalo de vazão líquida média, para evitar tendenciosidade do ajuste quando existe grande concentração de dados num intervalo. Ao total, foram definidos 20 intervalos de vazões líquidas. A qualidade do ajuste (R^2) se refere aos pontos médios. A Tabela 26 apresenta os coeficientes de ajuste das curvas de potência estimadas para os locais de cinco estações que estão localizadas ao longo do rio Doce, que sofreram impacto do rompimento de Fundão. Na tabela também são apresentados os coeficientes das relações de vazões sólidas (Q_s) e vazões líquidas (Q) médias nos intervalos. A qualidade do ajuste (R^2) mostrou-se satisfatória nos locais apresentados. No APÊNDICE D são apresentadas as curvas que relacionam vazão sólida versus vazão líquida para todos os postos utilizados neste estudo.

Tabela 26. Parâmetros das curvas ajustadas para os postos localizados no rio Doce.

Nome	Código da estação	a	b	R ²
Fazenda Cachoeira D'Antas	56425000	0,0039	2,3344	0,99
Cachoeira Óculos	56539000	0,0042	2,2994	0,96
Governador Valadares	56850000	0,0015	2,3052	0,95
Tumiritinga	56920000	0,0014	2,3036	0,93
Colatina	56994500	0,0014	2,2597	0,94

Para estas estações, nas Figura 70 a Figura 74 a seguir estão apresentadas as relações entre vazões líquidas e sólidas simuladas médias em cada intervalo (círculos azuis), para o período base (2015 a 2022), bem como as relações entre os valores diários simulados (círculos laranja). Para comparar o comportamento destas variáveis com o período antes do rompimento, nos gráficos também estão apresentadas as relações entre os valores médios da vazão líquida e vazão sólida observadas (círculos verdes) nos

postos sedimentométricos, no período anterior ao rompimento da barragem de 1998 a 2014.

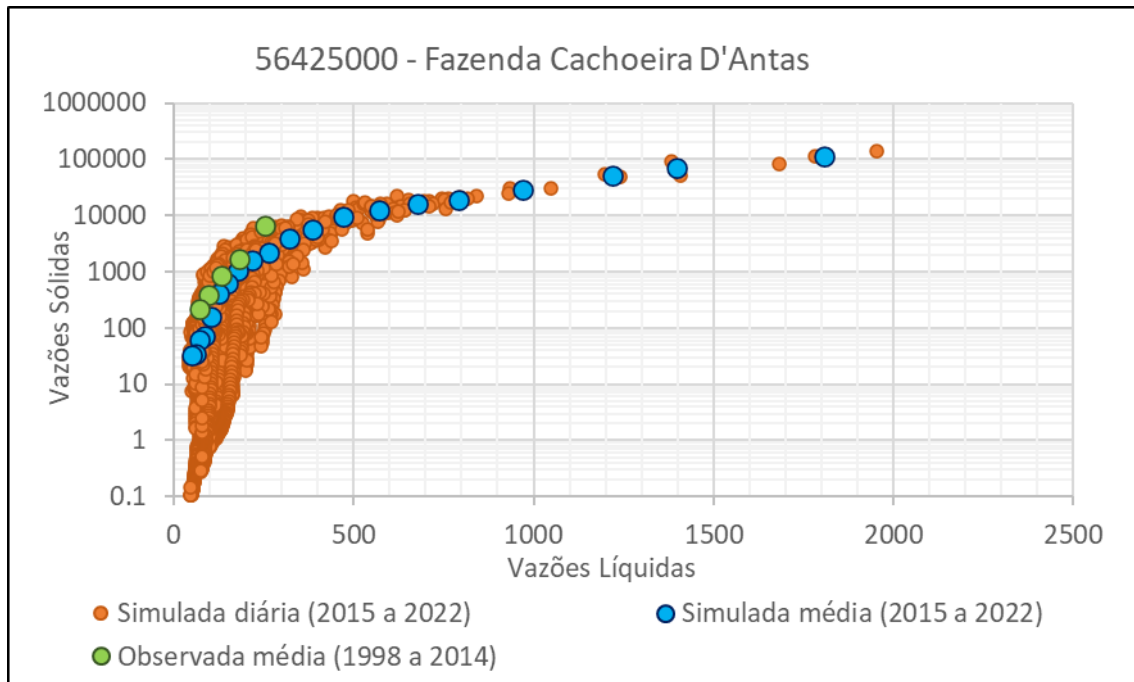


Figura 70. Vazão sólida x vazão líquida no posto 56425000 Fazenda Cachoeira D'Antas, para a série simulada de 2015 a 2022.

Comparando as relações estimadas a partir dos dados observados nos postos sedimentométricos, no período anterior ao do rompimento, e aquelas estimadas a partir dos resultados da simulação no cenário base (2015 a 2022), verifica-se que há uma boa semelhança para vazões baixas, mas também uma tendência a subestimar as descargas sólidas do período atual em relação ao período anterior. Parte destas diferenças podem estar relacionadas ao período mais seco entre 2015 e 2022, produzindo menos aporte de sedimentos das bacias aos rios, ou seja, as variações observadas se devem a condições naturais de um período entre 2015 e 2022 mais seco em comparação ao período anterior.

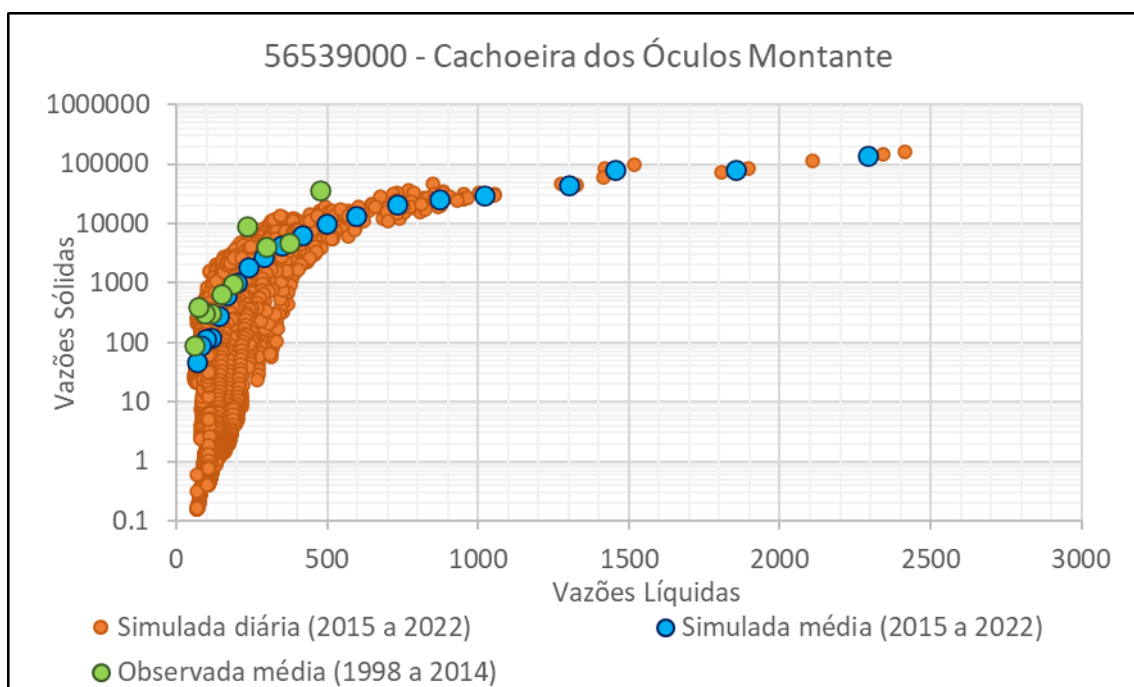


Figura 71. Vazão sólida x vazão líquida no posto 56539000 Cachoeira dos Óculos Montante, para a série simulada de 2015 a 2022.

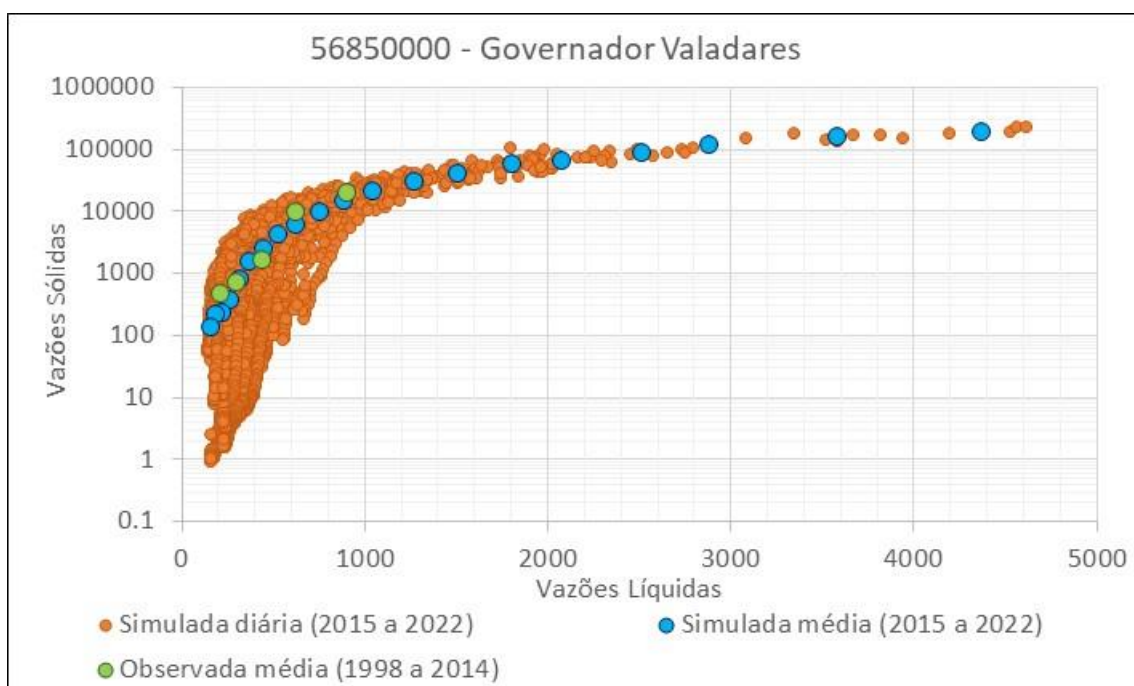


Figura 72. Vazão sólida x vazão líquida no posto 56850000 Governador Valadares, para a série simulada de 2015 a 2022.

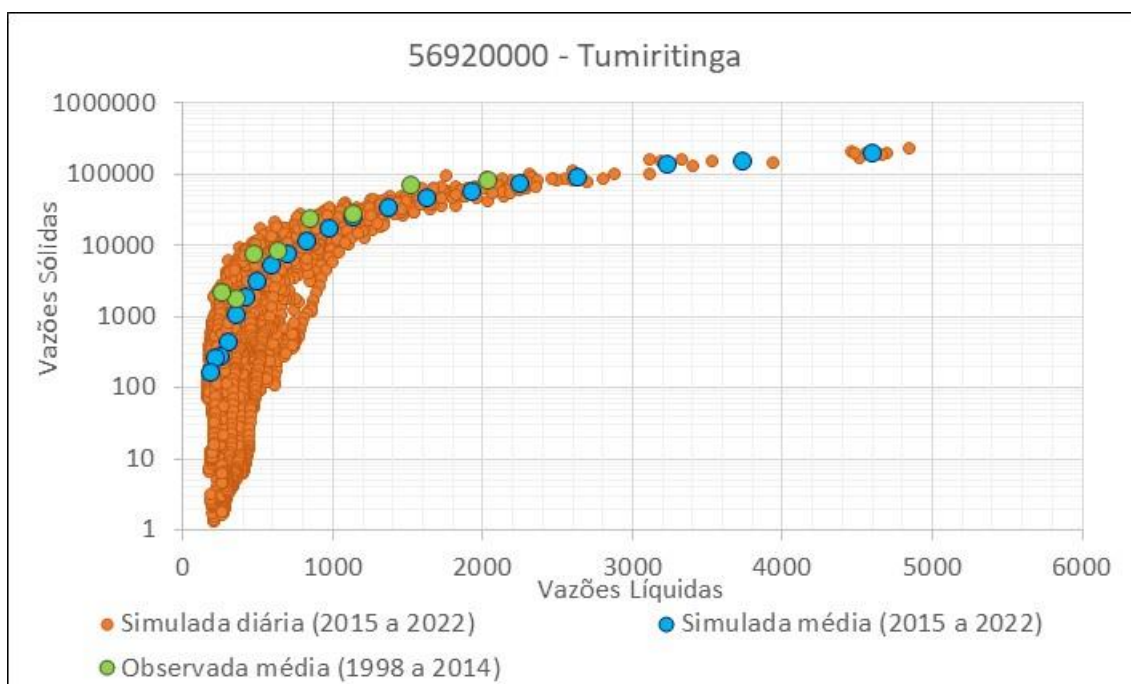


Figura 73. Vazão sólida x vazão líquida no posto 56920000 Tumiritinga, para a série simulada de 2015 a 2022.

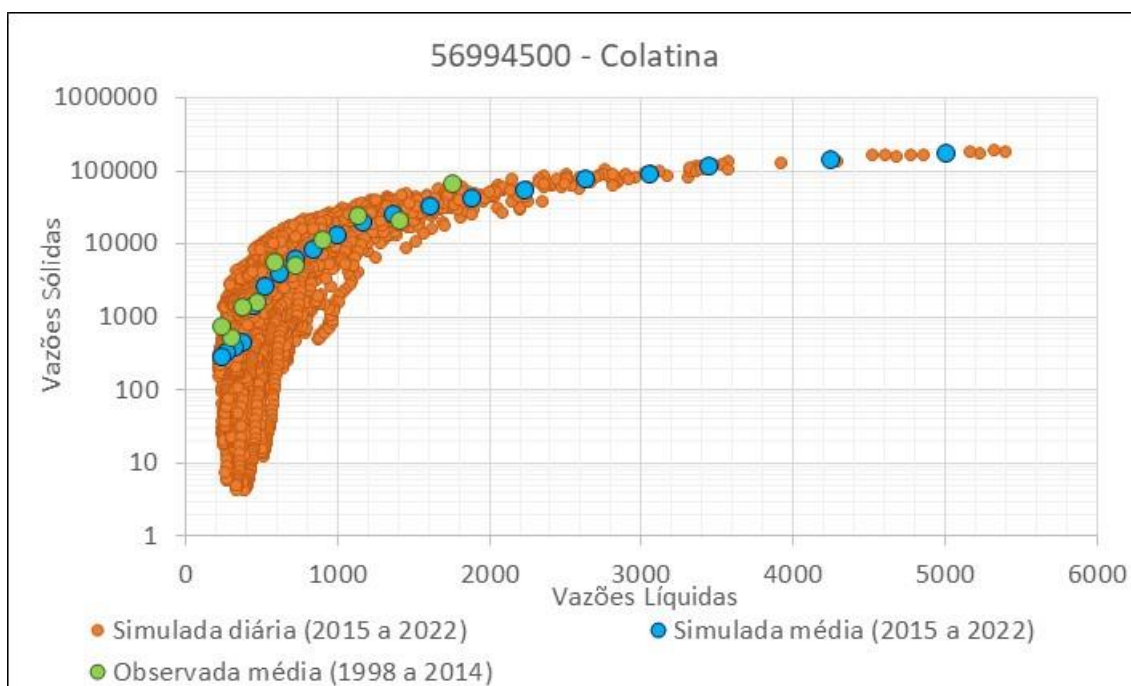


Figura 74. Vazão sólida x vazão líquida no posto 56994500 Colatina, para a série simulada de 2015 a 2022.

4.2. Cenário B – Período de Rompimento

Este cenário corresponde ao período compreendido entre os dias 5 e 25 de novembro de 2015, que ocorre desde a ocorrência do rompimento e o deslocamento da

onda para jusante. Após a ruptura da Barragem de Fundão, a Barragem de Santarém, localizada imediatamente a jusante da Barragem de Fundão, sofreu um processo de galgamento, armazenando parte do rejeito, e o material liberado fluiu através do curso do córrego Santarém, adentrando em seguida o rio Gualaxo do Norte, que deságua no Rio do Carmo a aproximadamente 73 km a jusante, que por sua vez é tributário do Rio Doce (MACHADO, 2017). A onda de cheia originada do colapso da barragem de Fundão foi propagada por aproximadamente 670 km ao longo da bacia do rio Doce.

Nesse cenário foram considerados os dados do monitoramento de acompanhamento da onda de cheia devido ao rompimento, realizado pela Agência Nacional de Águas (ANA) e pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), buscando mapear os impactos do rompimento de Fundão na bacia (CPRM e ANA, 2015).

Para representar o evento de ruptura, buscou-se ajustar: os picos das vazões e das concentrações de sedimentos em suspensão (CSS) simuladas aos picos observados destas variáveis durante o monitoramento da onda de cheia; o tempo de pico dos hidrogramas e sedimentogramas; o volume do hidrograma de ruptura; e o *timing* dos eventos. Para as concentrações (CSS), o ajuste do pico considerou o processo de deposição do material liberado pelo rompimento, de forma que os volumes depositados ao longo do rio Doce, em cada trecho de interesse, e nos reservatórios foram estimados com base nas condições hidráulicas do escoamento e do transporte de sedimentos, ajustando as variáveis de vazão e concentração aos dados observados.

Para realizar a simulação do evento de rompimento algumas mudanças foram implementadas no modelo MGB-SED: adaptação do modelo para considerar passos de tempos menores que um dia; redução dos comprimentos dos trechos de rio do longo do rio Doce, adotando-se no trecho do rio principal Doce e no rio Gualaxo do Norte um limite de extensão de trechos de rio de 1 km e, nos demais tributários, trechos uma extensão de 10 km.

Detalhes sobre a simulação desse cenário estão apresentadas no APÊNDICE E. Aqui são apresentados os principais resultados das estimativas dos volumes de sedimentos depositados ao longo dos trechos impactados T-6 a T-16 e dos reservatórios.

4.2.1. Estimativa dos volumes de sedimentos acumulados nos trechos e reservatórios

Os volumes estimados de sedimentos contendo rejeito depositados⁷ ao longo do rio Doce, nos trechos impactados pelo rompimento da barragem de Fundão, durante o período do evento (05 a 25 de novembro 2015), desde Santarém até o exutório estão apresentados na Figura 75 e na Tabela 27. Observa-se uma grande deposição nos trechos até Risoleta Neves.

⁷ Conforme definido nos objetivos desse estudo, o termo “depósitos” nesse contexto indica sedimentos depositados, ou seja, a mistura sedimentos + rejeitos depositados no fundo do trecho fluvial investigado. Portanto, indica sedimentos contendo rejeitos.

O balanço deste evento de rompimento é apresentado na Tabela 27 quanto ao total gerado na barragem no rompimento, volume retido nos reservatórios, volume retido no leito menor e no leito maior (montante de UHE de Risoleta Neves) e o volume escoado para o mar. Os valores percentuais são também apresentados com relação ao volume gerado no rompimento.

Na Figura 76 estão apresentados os volumes médios acumulados nos trechos de estudo definidos pela Renova. Neste estudo considerou-se o material depositado como sendo composto majoritariamente de partículas de silte e argila, ou seja, sedimentos finos contendo rejeito.

De acordo com a simulação, com a passagem da onda de cheia o reservatório de Risoleta Neves reteve cerca de $6,6 \times 10^6 \text{ m}^3$, enquanto os reservatórios de Baguari, Aimorés e Mascarenhas retiveram, respectivamente, $3,9 \times 10^6 \text{ m}^3$, $1,8 \times 10^5 \text{ m}^3$ e $2,0 \times 10^4 \text{ m}^3$. A deposição simulada em Candonga está muito próxima dos valores apresentados por IBAMA (2016), Palu (2019) e GOLDER (2022). Nos demais reservatórios, a ordem de grandeza dos volumes depositados foi a mesma, incluindo em Mascarenhas, cujo volume estimado neste estudo foi bem semelhante ao estimado por Palu (2019), de $0,02 \text{ Mm}^3$. Nas estimativas de Palu (2019), Mascarenhas reteve um valor equivalente a apenas 10% daquele retido em Aimorés, o que está compatível com o valor estimado nesse estudo. No entanto, os volumes de depósitos entre Aimorés e Mascarenhas possuem a mesma ordem de grandeza e os volumes depositados neles são bem inferiores ao volume dos seus reservatórios (cerca de 0,04%) (Palu, 2019).

Tabela 27. Volumes depositados de sedimentos contendo rejeitos nos trechos T-6 a T-16 e reservatórios, estimado pela simulação ao final do cenário B.

Trecho definido no Programa de Manejo de Rejeitos e Reservatórios	Extensão do trecho (km)	Extensão acumulada (km)	Volume total depositado (hm^3)	Proporção com relação ao volume do rompimento (%)
T-6	5,1	5,11	0,2	0,5
T-7	4,1	9,2	0,7	1,7
T-8	9,2	18,4	1,9	4,6
T-9	55,9	74,3	9,7	22,6
T-10	25,5	99,8	4,5	10,6
T-11	6,1	105,8	0,4	0,9
T-12 UHE Risoleta Neves	11,2	117,0	6,6	15,5
T-13	227,6	344,6	12,3	28,9
UHE Baguari	-		3,9	9,2
T-14	193,2	537,8	2,0	4,8
UHE Aimorés	-		0,18	0,4
UHE Mascarenhas	-		0,02	0,02
T-15	102,6	640,4	0,05	0,1
T-16	43,7	684,1	0,007	0,05
Total	684,1	-	42,5	100,0

Os trechos a montante da UHE de Risoleta Neves são os trechos mais críticos em termos de volume de depósito. Segundo estimativas apresentadas por GOLDER (2022), nos trechos T-6 a T-12 foram depositados $19,5 \text{ Mm}^3$, o que é bem próximo do valor de $18,3 \text{ Mm}^3$ simulados no presente estudo. Já a jusante de Risoleta Neves, GOLDER (2022) apresentou estimativas de que nos trechos T-13 a T-16 foram depositados cerca de $15,6 \text{ Mm}^3$, enquanto a presente simulação estimou-se cerca de $14,4 \text{ Mm}^3$. Portanto, os volumes de depósitos estimados são comparáveis com aqueles estimados por GOLDER (2022), especialmente em ordem de grandeza. Assim, considerando que os hidrogramas e os sedimentogramas simulados foram ajustados ao evento e mostraram-se semelhantes aos observados, possíveis variações entre os volumes simulados e estimados estão relacionadas aos métodos de estimativa, com a simulação considerando as características morfológicas dos trechos e a hidráulica do escoamento para estimar os depósitos de forma distribuída ao longo do rio Doce.

Tabela 28. Volumes de sedimentos depositados e escoados após o rompimento da barragem de Fundão.

Local	Volume de Rejeitos	Proporção com relação ao volume do rompimento (%)
Volume gerado pelo rompimento (hm^3)	42,8	-
Volume retido nos reservatórios (hm^3)	10,7	25,1
Volume retido no leito dos rios em (hm^3)	19,7	46,0
Volume retido nas planícies de inundação (hm^3)	10,5	24,5
Volume escoado para o mar no cenário B (hm^3)	1,9	4,4

A diferença em relação a GOLDER (2022) do volume depositado no trecho a jusante de Risoleta Neves, pode estar relacionada a liberação do volume de rejeitos no modelo acontecer a partir da confluência do córrego Santarém com o rio Gualaxo do Norte (T-6), sendo da ordem de $42,7 \text{ Mm}^3$. O volume total de depósitos estimados por GOLDER (2022) é da ordem de $46,7 \text{ Mm}^3$, porém é considerado no cálculo os trechos T-1 a T-5. É importante considerar também que as estimativas de volumes depositados apresentam grandes incertezas (CH2M, 2017; GOLDER, 2022). Segundo estudo da CH2M (2017), o volume liberado pelo rompimento mais o que verteu após o evento foi da ordem de $43,7 \times 10^6 \text{ m}^3$, enquanto o estudo da GOLDER o volume total de depósitos já é maior, sendo da ordem de $46,7 \times 10^6 \text{ m}^3$, sem considerar volumes transferidos para o oceano.

Acredita-se, porém, que os resultados das simulações dão uma boa ordem de grandeza dos volumes depositados ao longo do rio Doce, especialmente a montante de Candonga, bem como dos volumes armazenados nos reservatórios, embora os dois estudos adotem métodos distintos de avaliação. O modelo considera informações das características físicas dos rios, incluindo declividades, e estima os volumes de depósitos de forma distribuída ao longo do rio Doce com base na hidrodinâmica do escoamento e na discretização do rio pelo MDE. O estudo da GOLDER (2022) considera as informações disponíveis, especialmente antes do rompimento, sendo necessário adotar premissas para complementar o modelo de balanço de massa e algumas das principais fontes de

incertezas incluem o volume e o destino de sedimentos naturais erodidos durante o rompimento.

Na Tabela 29 são apresentados os volumes de sedimentos depositados na calha dos rios e aqueles depositados nas suas respectivas planícies de inundação, em todos os trechos T-6 a T-16, obtidos ao final da simulação desse cenário. Na tabela, estão excluídos os volumes depositados nos reservatórios e, também por esse motivo, o trecho T-12 (correspondente ao reservatório da UHE Risoleta Neves) não está apresentado. Os resultados apresentados indicam que houve um grande volume de sedimentos depositados nas planícies nos primeiros 100km. Destaca-se que o trecho T-13 foi o que teve o maior volume depositado, no entanto esse é também o trecho mais longo, de forma que o volume específico (m^3/km) é menor do que os dos trechos T-10 e T11. Com os resultados obtidos, esses volumes intracalha serão, então, considerados no cenário C seguinte.

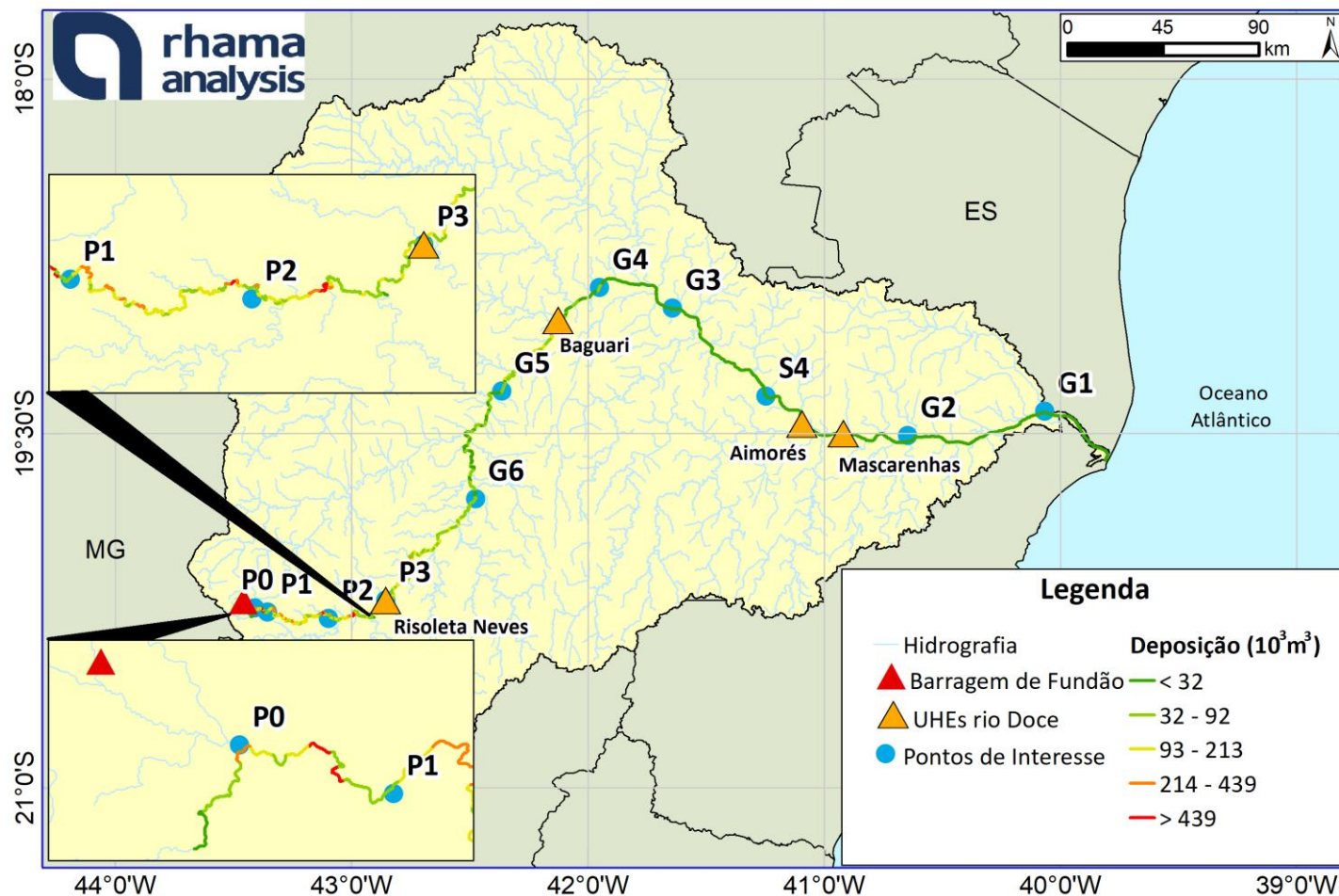


Figura 75. Volume de sedimentos [10^3 m^3] depositados ao longo do trecho simulado.

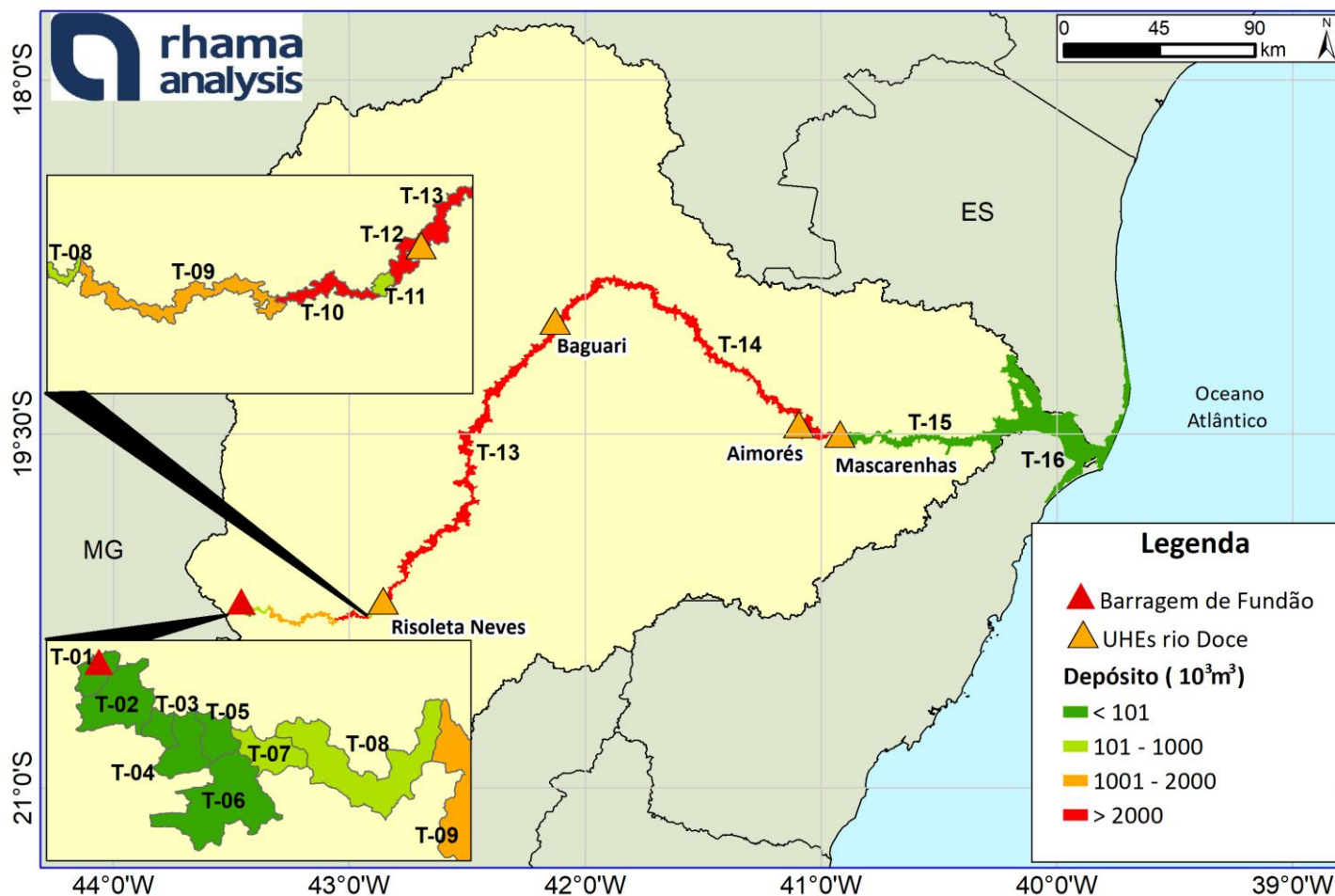


Figura 76. Volume médio de sedimentos [10³ m³] depositados nos trechos de interesse.

Tabela 29. Volumes estimados de sedimentos depositados na intracalha e aqueles depositados nas planícies de inundação após o rompimento da barragem de Fundão.

TRECHO	L (km)	L acu (km)	VOLUMES DEPOSITADOS (hm ³)		
			Total**	Calha	Planície
T-6	5,1	5,11	0,20	0,027	0,18
T-7	4,1	9,2	0,71	0,13	0,58
T-8	9,2	18,4	1,97	0,24	1,73
T-9	55,9	74,3	9,64	1,67	7,97
T-10	25,5	99,8	4,50	2,82	*
T-11	6,1	105,8	0,39	0,39	*
T-13	227,6	344,6	12,31	12,31	*
T-14	193,2	537,8	2,03	2,03	*
T-15	102,6	640,4	0,051	0,051	*
T-16	43,7	684,1	0,008	0,008	*
		TOTAL	31,81	19,68	10,45

*Não houve deposição de sedimentos nas planícies.

** Total = Calha + planície

4.3. Cenário C

O cenário C corresponde ao cenário com o rompimento para o período recente depois do rompimento (2015 a 2022). Este cenário é comparado com o cenário A, que simulou este período sem o rompimento, na calha principal do rio Doce. A análise é realizada para o trecho de rio afetado pelo rompimento da barragem, por onde o rejeito foi transportado. Assim como no cenário A o período simulado foi de 2015 a 2022.

Para este cenário de simulação foram consideradas como condições iniciais de depósito de leito os resultados obtidos de volumes depositados ao longo do rio Doce no cenário B. Na representação dos sedimentos do cenário C o modelo foi adaptado para que sejam considerados os processos de ressuspensão e deposição de sedimentos finos na calha do rio, associado à contribuição da bacia, conforme apresentado a seguir. Tal processo foi adotado em todas as simulações desse estudo buscando considerar uma possível saturação de transporte de sedimentos em suspensão, atendendo assim a **demanda (a) apresentada no item 1.3.**

Neste estudo considera-se o material depositado como sendo composto majoritariamente de partículas de silte e argila, ou seja, sedimentos finos. Desta forma, os resultados avaliados e apresentados são relativos aos sedimentos finos.

Na modelagem do rompimento, realizada no cenário B, verificou-se que parte do material depositado antes da UHE Risoleta Neves ficou retido nas planícies. Neste estudo, considera-se que apenas o material retido na calha do rio está disponível para ressuspender⁸. Todo o processo de ressuspensão de material coesivo (silte e argila) é

⁸ A contribuição das planícies para o transporte de sedimentos ao longo do rio Doce possui incertezas e é de difícil estimativa em escala temporal diária, como a adotada nas simulações desse estudo. A sua contribuição é restrita a períodos de chuvas capazes de transportá-las para o rio, o que sugere

complexo e os resultados obtidos são uma aproximação do que ocorreu após o evento. Algumas considerações são importantes de serem feitas:

- Não se considerou possível sedimento remobilizados das planícies impactadas pelo rompimento;
- Foram considerados processos de ressuspensão e deposição de material coesivo (silte e argila), estando a ressuspensão limitada ao material depositado que foi estimado pela simulação do rompimento de Fundão e eventual deposição ao longo da simulação;
- Nos primeiros períodos após o rompimento, é possível que a barragens tenham liberado mais rejeitos com os eventos chuvosos (CH2M, 2017). No entanto, de forma conservadora, essa possível fonte não foi considerada neste cenário dada a dificuldade em estabelecer a taxa de liberação em função dos eventos chuvosos, bem como o volume que foi liberado ao longo do tempo. Além disso, os diques criados a montante da confluência do córrego Santarém com o rio Gualaxo buscaram reduzir a propagação desses rejeitos para jusante;
- É possível que intervenções realizadas ao longo do rio Doce, tais como pequenos barramentos em Risoleta Neves, dragagens e outros, possam ter alterado as concentrações de sedimentos em suspensão em algum momento. Tais processos não foram considerados de maneira individualizada nas simulações deste estudo;
- De maneira conservadora, foi considerado que todo volume de sedimentos depositado na calha do rio com a granulometria de silte e argila é passível de ressuspensão.

Importante ainda destacar que nesse estudo, a avaliação do transporte de sedimentos e o possível retorno das condições de transporte anteriores ao rompimento considera duas avaliações: descargas sólidas e sua variação temporal; volumes depositados nos trechos. Na primeira, avalia-se se as relações entre descargas líquidas e sólidas retornam às condições esperadas caso o rompimento não tivesse ocorrido. Na segunda, verifica-se a possibilidade de redução do material depositado devido ao rompimento. Portanto, essas duas avaliações devem ser consideradas de forma integrada.

4.3.1. Formulação considerada para ressuspensão e deposição

contribuição inferior à da bacia e da própria calha do rio. Importante ainda considerar o papel que a vegetação nas planícies de inundação com depósitos de rejeitos tem na atenuação do aporte de material oriundo dessas áreas (Golder, 2022a). Por tanto, ao longo do tempo a contribuição das planícies, além de pequena, tende a reduzir e os resultados desse cenário avaliados com dados observados entre 2015 e 2022 mostram-se consistentes com o comportamento do rio Doce após o rompimento.

Segundo estudo realizado por Palu (2019) e Palu e Julien (2019), o transporte de sedimentos finos no rio Doce ocorre majoritariamente em suspensão. Este estudo considera que o sedimento depositado é composto basicamente de silte e argila. Este material pode ser tratado como material coesivo, para o qual podem ocorrer dois processos distintos: um para erosão e outro para deposição (LAU e KRISHNAPPAN, 1994; KRISHNAPPAN, 2000). Desta forma, para sedimentos finos é possível considerar processos de erosão e deposição seguindo critério de tensão de cisalhamento de fundo.

A fim de representar o impacto do material depositado no fundo do rio, foram adicionados ao modelo os processos de ressuspensão da carga que foi depositada devido ao rompimento da barragem de Fundão. O algoritmo implementado foi baseado no estudo de Krishnappan (2000). O modelo considera que partículas finas (silte e argila) não podem ser erodidas e depositadas ao mesmo tempo e, assim sendo, cada uma das condições ocorre isoladamente, seguindo critérios relacionados à tensão de cisalhamento. A partir dos experimentos do estudo, Krishnappan (2000) definiu leis de potência que estimam a fração de sedimento depositada no leito e a fração do que pode entrar em ressuspensão.

Para as simulações realizadas neste estudo, a equação de Krishnappan (2000) teve seus coeficientes ajustados para que o modelo pudesse representar as condições observadas no rio Doce, buscando aproximar os valores simulados dos observados.

No modelo, é necessário realizar o cálculo da velocidade de atrito, conforme equação abaixo:

$$U_* = \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)}{2,50 * \ln* \left[\frac{11,0 * \left(\frac{A}{P}\right)}{2,50 * D_{65}} \right]} \quad (21)$$

onde U_* é a velocidade de atrito [m/s], Q é a vazão [m³/s], A é a área da seção transversal [m²], P é o perímetro molhado [m] e D_{65} é o diâmetro característico da partícula [m].

A partir do cálculo da velocidade de atrito, a tensão de cisalhamento do leito τ_0 [N/m²] é estimada por:

$$\tau_0 = 1000 * U_*^2 \quad (22)$$

A lei de potência que estima a fração de sedimento depositadas no leito que podem entrar em ressuspensão, ajustada para o presente estudo está apresentada abaixo.

$$\begin{aligned} f_e &= 0,0016 \left(\frac{\tau_0}{\tau_{ce}} - 2 \right)^{2,0} & \text{para } 30 < \frac{\tau_0}{\tau_{ce}} < 55 \\ f_e &= 0,0 & \text{para } \frac{\tau_0}{\tau_{ce}} \leq 30 \\ f_e &= 1,0 & \text{para } \frac{\tau_0}{\tau_{ce}} \geq 55 \end{aligned}$$

onde f_e [-] corresponde à fração de sedimento ressuspensionado, τ_{ce} é a tensão de cisalhamento crítica para a ressuspensão (adotada igual a $0,2 \text{ N.m}^{-2}$).

No caso da deposição, a lei de potência ajustada é dada por:

$$\begin{aligned} f_d &= 1,0 - 0,002 \left(\frac{\tau_0}{\tau_{cd}} - 1 \right)^{3,0} && \text{para } 0,2 < \frac{\tau_0}{\tau_{cd}} < 1 \\ f_d &= 1,0 && \text{para } \frac{\tau_0}{\tau_{cd}} \leq 0,2 \\ f_d &= 0,0 && \text{para } \frac{\tau_0}{\tau_{cd}} \geq 1 \end{aligned}$$

onde f_d [-] corresponde à fração da concentração em suspensão que será depositada, τ_{cd} é a tensão de cisalhamento crítica para deposição (adotada igual a $0,1 \text{ N.m}^{-2}$).

Para definir quando haverá erosão ou deposição em cada trecho de rio, a cada passo de tempo, são comparadas as tensões de cisalhamento do fundo do trecho e a do trecho de montante. Caso a tensão de cisalhamento de montante seja superior à do trecho em análise, haverá deposição no trecho. Caso a tensão no trecho de montante seja inferior à do trecho, haverá erosão.

É importante considerar que as equações de erosão e deposição de finos geralmente permitem a erosão do material que foi depositado, ou seja, o volume erodido será limitado ao volume depositado anteriormente, sem necessariamente remover material já existente do fundo do rio. No entanto, para a simulação do cenário C, as cargas de sedimentos finos depositadas no leito do rio, estimadas no cenário B, estão sendo consideradas para eventual ressuspensão no escoamento. Não são considerados os volumes depositados nos reservatórios, visto que esses são assumidos como não passíveis de ressuspensão e propagação para jusante (Morris and Fan, 1998).

4.3.2. Material depositado nos trechos

Os volumes de rejeito depositados ao longo do rio Doce, obtidos com a simulação do cenário B, foram considerados como possíveis de ressuspender logo após a passagem da onda de cheia. É importante destacar que os resultados apresentados se referem especificamente a material fino transportados em suspensão, depositados ou ressuspensionados, não sendo considerados nas análises os sedimentos transportados como carga de fundo. Com isso, o termo volume de depósito para fins deste trabalho refere-se apenas ao volume de material fino.

Desta forma, ao longo da simulação no período de 2015 a 2022, o modelo permitiu os processos de ressuspensão e deposição de material finos, com ressuspensão limitada inicialmente aos volumes que foram eventualmente depositados antes do rompimento. A partir do dia 20 de novembro de 2015, após a passagem da onda de cheia, os volumes iniciais disponíveis para ressuspensão em cada trecho foram aqueles volumes de rejeitos depositados com o rompimento, os quais foram considerados como material fino (silte e argila), excluindo-se volumes eventualmente depositados no cenário A.

Na Tabela 30 é apresentado o volume de depósito (inicial) nestes trechos de análise devido ao rompimento da barragem de Fundão, estimado com a simulação do

cenário B. Comparando o volume que seria depositado no cenário A de referência, com o volume de depósito existente no fundo do rio no cenário C, é possível determinar o quanto do volume de depósito inicial (estimado no cenário B) foi reduzido ao longo dos anos. Assim, na tabela também são apresentados os volumes de depósitos remanescentes no fundo, ao longo dos anos. Os percentuais de redução apresentados na última coluna da tabela indicam que quanto mais próximo de 100%, mais o volume de depósito remanescente se aproxima do cenário A. Considerando que os volumes apresentados correspondem aos depósitos de finos nos trechos de rios, excluindo-se os volumes de finos armazenados nos reservatórios, o trecho T12 foi excluído da tabela por ser considerado o trecho correspondente ao reservatório de Risoleta Neves (Candonga).

Destaca-se ainda, que os volumes remanescentes em cada ano não correspondem necessariamente à rejeitos da barragem de Fundão, visto que além do processo de ressuspensão há também deposição do material ressuspendido e do material em suspensão proveniente da bacia junto com o rejeito propagado. Portanto, a última coluna representa a redução do volume com relação a um volume disponível inicialmente após o rompimento em nov/2015, não significando redução de sedimentos contendo rejeitos, pois ao longo do tempo o volume disponível para remobilização passa a ser uma soma de rejeito depositado com o rompimento e de parcela de sedimentos finos provenientes da bacia que vão sendo depositados.

Tabela 30. Estimativa dos volumes específicos de depósitos remanescentes na calha ao longo do rio Doce ao final de cada ano de simulação.

VOLUME ESPECÍFICO DEPÓSITO ($10^3 \text{ m}^3/\text{km}$) ¹ - TRECHOS RENOVA												
Trecho	L (km) ⁴	L acu (km) ⁵	Inicial ²	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	% de ³ redução
T-6	5,1	5,1	5,2	5,2	5,2	5,0	5,0	5,0	5,0	4,9	4,9	6,0
T-7	4,1	9,2	31,4	31,4	30,6	22,9	22,8	22,8	22,8	22,7	22,6	28,8
T-8	9,2	18,4	26,3	26,3	24,9	12,3	12,2	12,1	12,1	11,9	11,9	56,3
T-9	55,9	74,3	29,8	29,8	28,2	18,7	18,6	18,5	18,4	18,1	18,0	41,6
T-10	25,5	99,8	111,0	111,0	106,8	91,3	91,2	90,9	90,8	89,9	89,7	21,6
T-11	6,1	105,8	64,2	64,2	60,9	51,1	50,1	48,7	48,2	42,6	41,9	53,3
T-13	227,6	344,6	54,1	54,1	49,5	41,4	40,5	39,5	39,4	26,4	26,1	73,4
T-14	193,2	537,8	10,5	10,5	9,7	3,9	3,8	3,4	3,4	2,1	2,1	87,2
T-15	102,6	640,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	56,4
T-16	43,7	684,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	33,8

¹ O volume apresentado em cada trecho não considera os volumes armazenados nos reservatórios.

² Volumes depositados nos trechos de rio com a passagem da onda de cheia do rompimento, inicialmente disponíveis para ressuspender; ³ Redução em relação ao volume inicial estimado após o rompimento no cenário B. ⁴ L (km) é o comprimento de cada trecho; ⁵ – L acu (km) é o comprimento acumulado.

Pelos resultados apresentados na Tabela 30, os trechos T-13 e T-14 são aqueles com maior percentual de redução do volume de depósito, portanto são os que mais tendem a se aproximar do cenário A enquanto volume de depósitos no leito do rio. Os trechos T-13 e T-14 apresentam, respectivamente, percentual de redução de 73,4% e 87,2%, enquanto os demais apresentam redução inferior a 57%.

Buscando uma avaliação do volume de depósitos remanescentes estimados nesse estudo, os resultados ao final do ano de 2018 foram comparados com estimativas baseadas nas amostras dos transectos realizadas no âmbito dos Planos de Manejo de Rejeito – PMR (CH2M, 2017a; JACOBS/CH2M, 2018a,b,c,d) entre os anos de 2017 e 2018. A Tabela 31 apresenta as estimativas dos volumes remanescentes por quilômetro de rio ao final do ano de 2018 nos trechos T-06 a T-11, bem com os percentuais do volume total depositado em cada trecho e o volume total dos trechos. Em volumes totais, percebe-se que os valores estimados pela modelagem e pelo monitoramento guardam boa relação em ordem de grandeza, embora com maior diferença no trecho T-06. Entretanto, percebe-se que em termos percentuais a distribuição entre os trechos tem boa concordância, com os maiores percentuais depositados nos trechos T-09 e T-10.

Portanto, apesar das diferenças entre os dois métodos, pode-se inferir que o modelo além de representar os aumentos das descargas solidadas observadas após o rompimento devido à ressuspensão de depósitos, como será apresentado mais adiante, também tem coerência nas estimativas dos volumes remanescentes ao longo dos anos.

Tabela 31. Estimativa dos volumes específicos de depósitos remanescentes na calha ao longo do rio Doce ao final de cada ano de simulação.

Trecho	L (km)	MGB-SED		NHC (2020)	
		10 ³ m ³ /km	% do total	10 ³ m ³ /km	% do total
T-6	5,1	5,0	0,7	17,1	2,9
T-7	4,1	22,8	2,4	14,0	1,9
T-8	9,2	12,1	2,9	16,7	5,1
T-9	55,9	18,5	26,7	14,9	27,6
T-10	25,5	90,9	59,8	48,3	40,9
T-11	6,1	48,7	7,6	107,0	21,6
Total	105,8	197,9		218,0	

A Figura 77 apresenta os volumes específicos remanescentes de depósitos estimados no fundo do rio Doce ao fim de cada ano de simulação, por trecho de análise. Considerando uma comparação entre o cenário C com o cenário A de referência, os volumes apresentados correspondem a diferença entre o estimado no cenário C e o que já eventualmente teria sido depositado no cenário A sem o rompimento. Os volumes específicos são os volumes estimados (diferença entre os cenários C e A) apresentados na Tabela 30, divididos pelo respectivo comprimento de cada trecho. Na Figura 78 e Figura 79 estão representados os volumes específicos para a condição inicial, resultado do rompimento, e estimados ao final do ano de 2022.

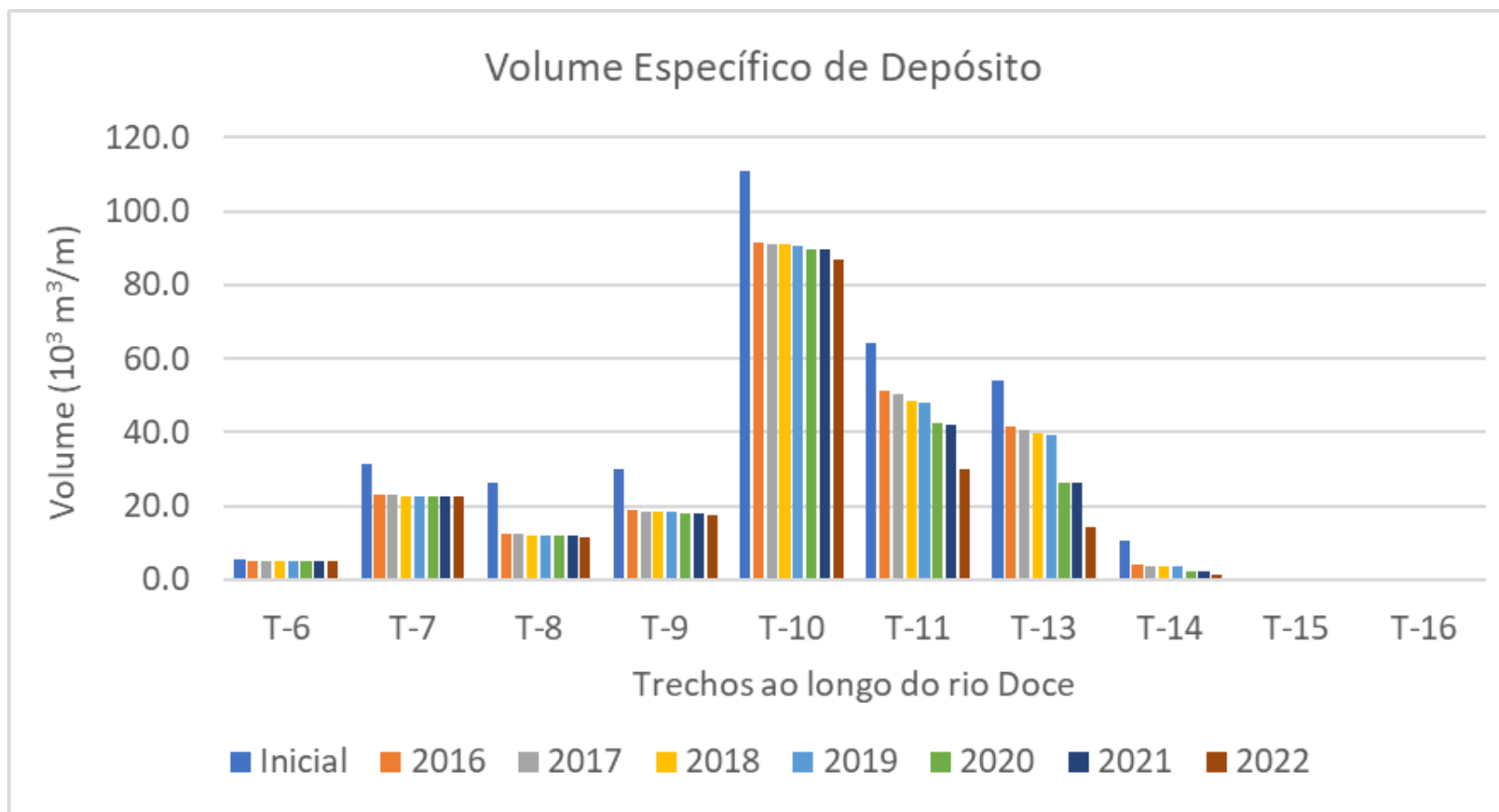


Figura 77. Variação dos volumes específicos de depósitos remanescentes no leito do rio Doce ao fim de cada ano, e volume estimado inicialmente com o rompimento da barragem de Fundão e propagação da onda de cheia. Os volumes específicos correspondem ao volume do depósito (diferença entre os volumes nos cenários C e A) dividido pelo comprimento do trecho de análise.

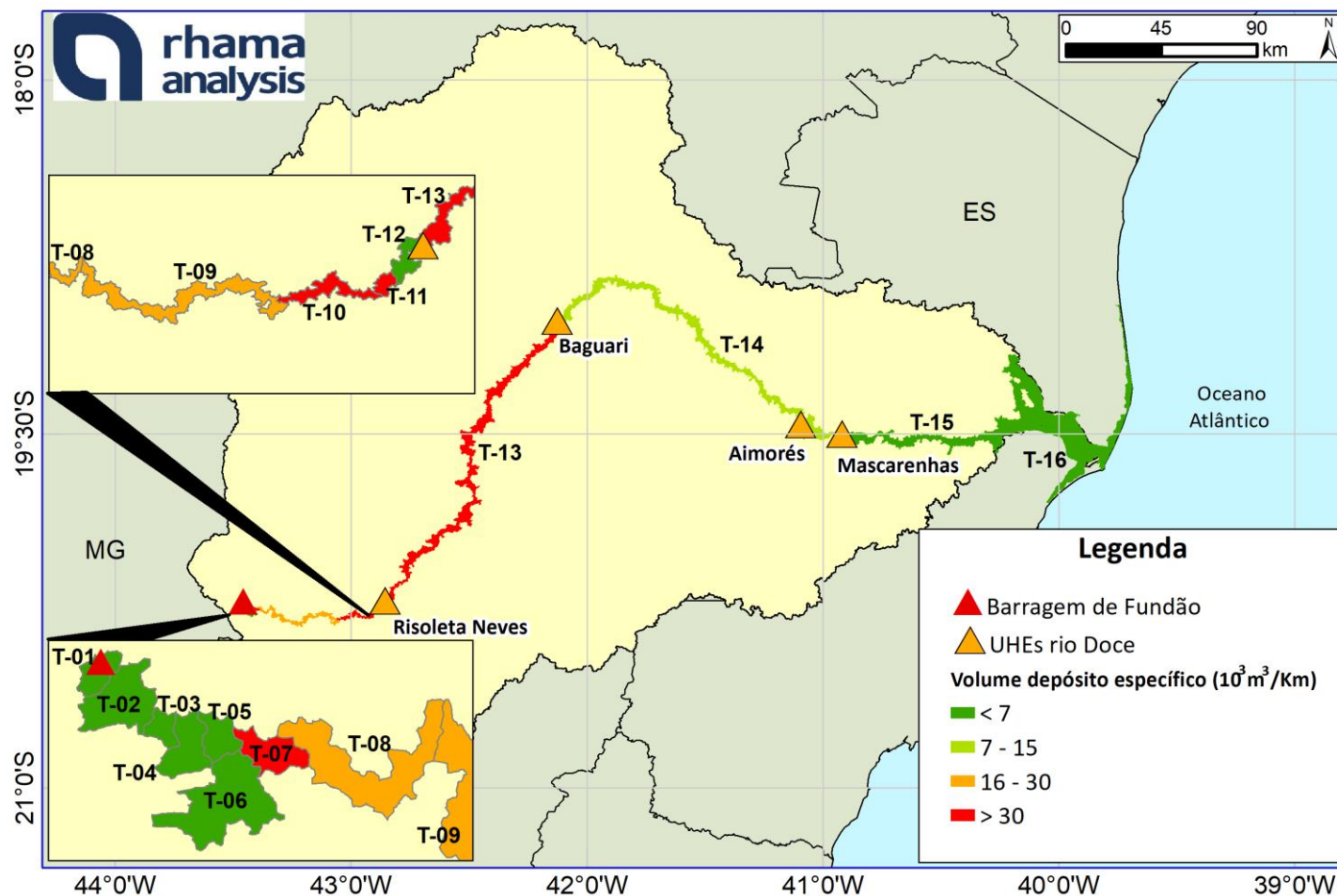


Figura 78. Volumes específicos de depósitos remanescentes no leito do rio Doce estimado inicialmente com o rompimento da barragem de Fundão. Os volumes específicos correspondem ao volume do depósito (diferença entre os volumes nos cenários C e A) dividido pelo comprimento do trecho de análise.

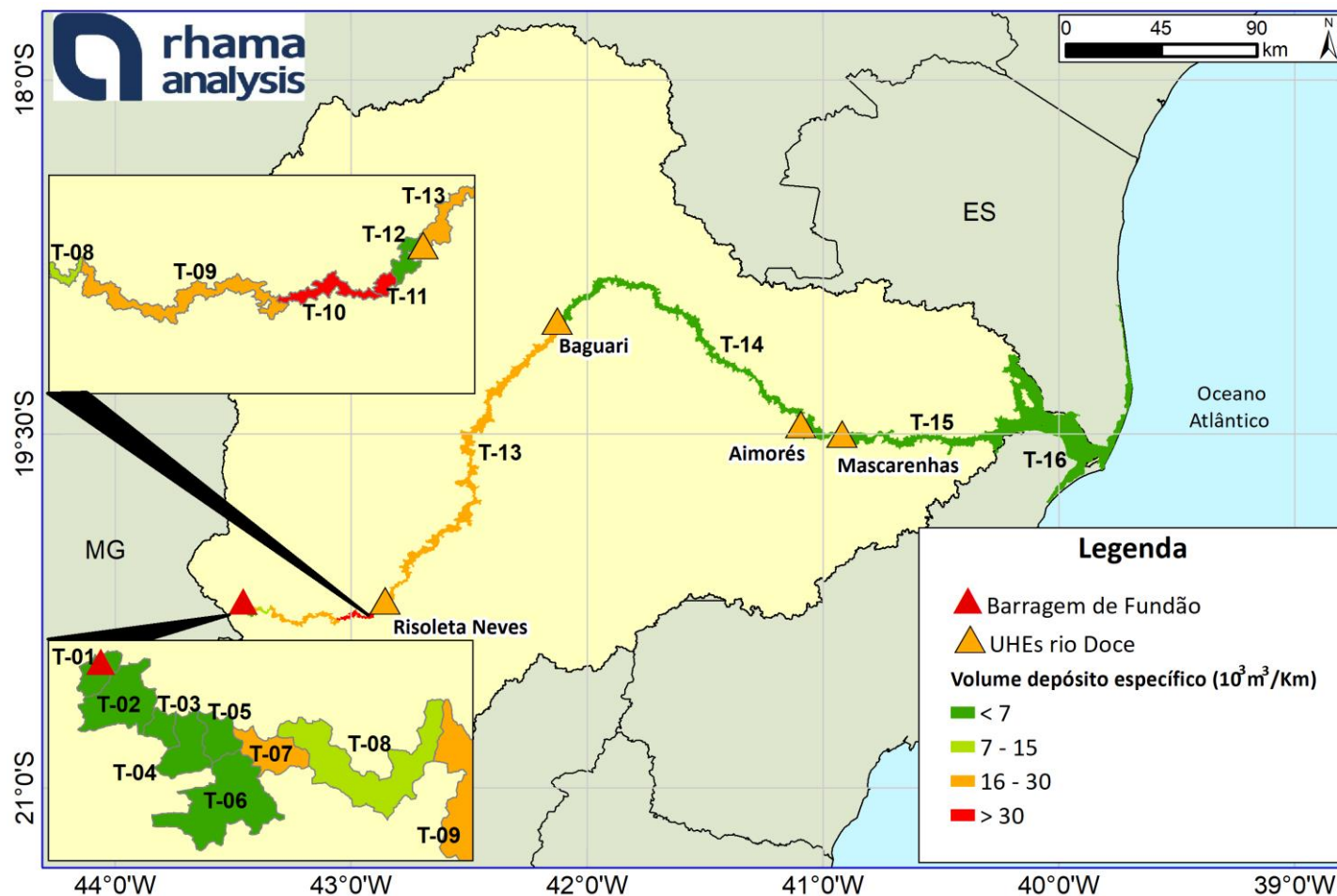


Figura 79. Volumes específicos de depósitos remanescentes no leito do rio Doce estimado para o ano de 2022. Os volumes específicos correspondem ao volume do depósito (diferença entre os volumes nos cenários C e A) dividido pelo comprimento do trecho de análise.

Da Figura 80 a Figura 88 são apresentados gráficos onde no eixo vertical esquerdo estão os volumes de depósitos disponíveis inicialmente e aqueles remanescentes ao final de cada ano simulado, por trecho. No lado direito das figuras estão os percentuais do volume total depositado inicialmente que foi reduzido por ressuspensão. Quanto maior o percentual reduzido, mais próximo do cenário A se encontra o trecho, em termos de volume depositado.

O percentual do volume do depósito total inicial que foi reduzido, ao fim de cada ano, está apresentado na Figura 90, onde se verifica que a maior parte da redução do volume de depósito ocorreu no primeiro ano após o rompimento (2016). Ressalta-se que o trecho T13 é aquele com maior volume depositado, porém também é o trecho de maior comprimento, de forma que, embora possua um grande volume total, o seu volume específico (por m^3/km) é menor que o dos trechos T10 e T11 (ver Figura 77).

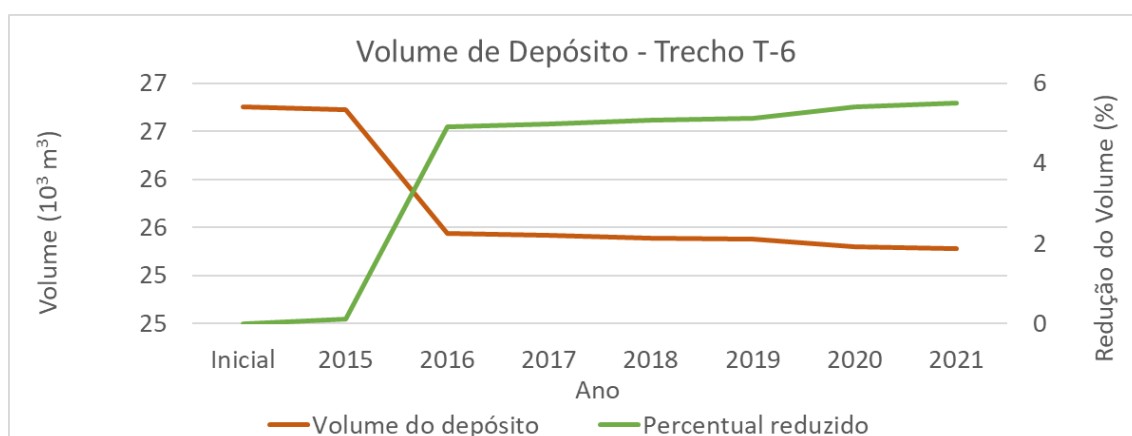


Figura 80. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-6, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.

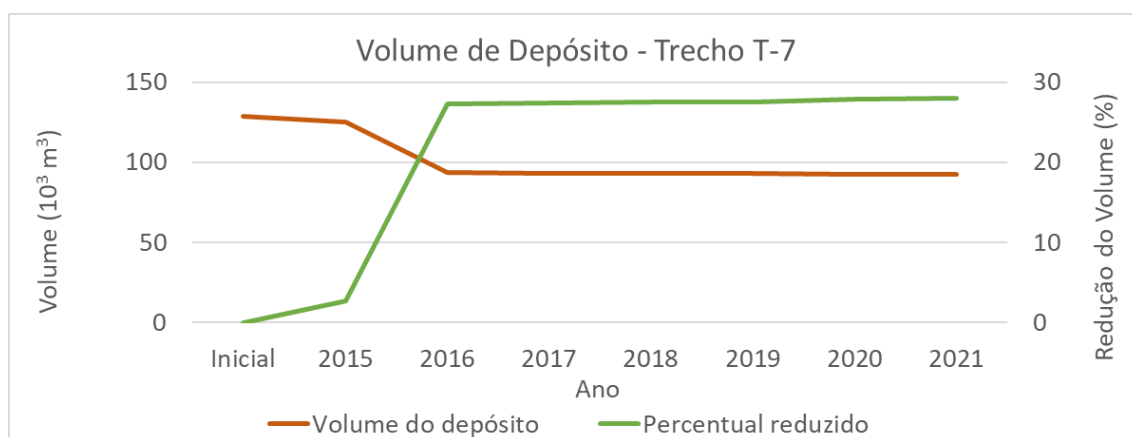


Figura 81. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-7, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.

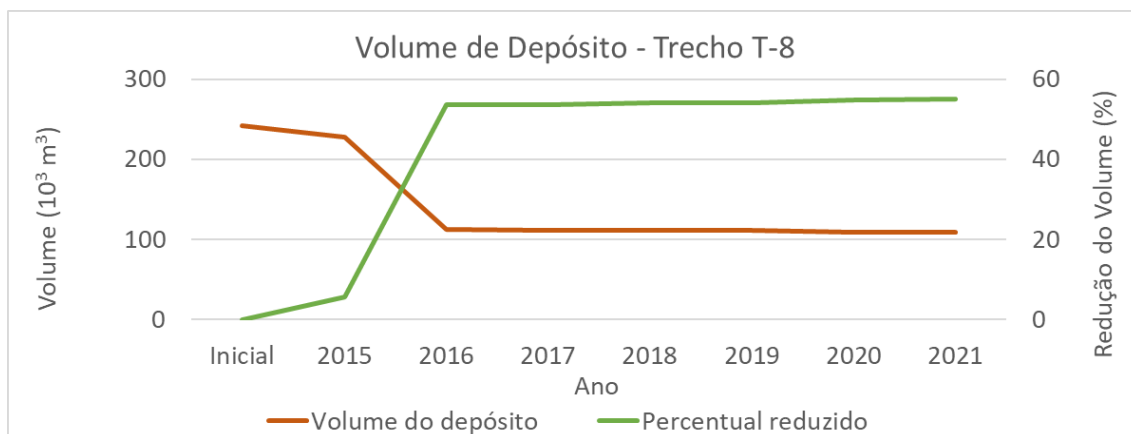


Figura 82. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-8, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.

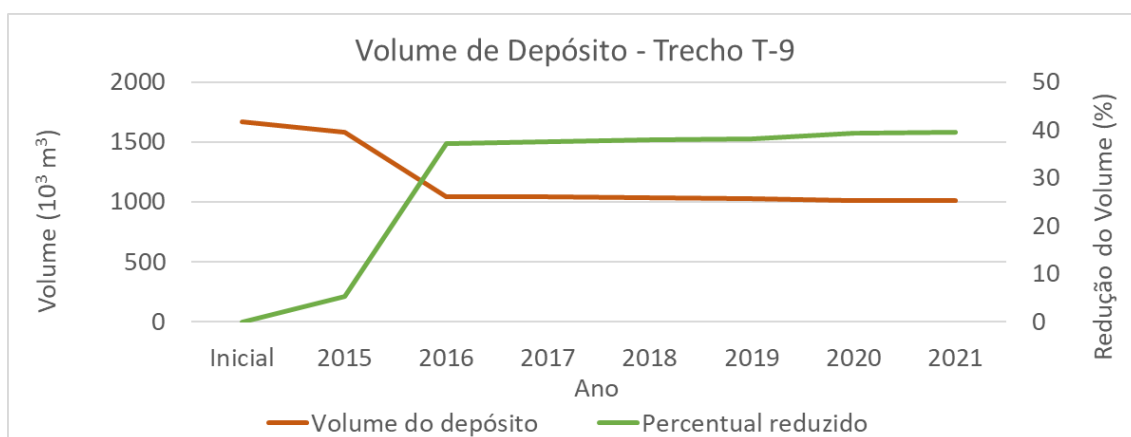


Figura 83. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-9, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.

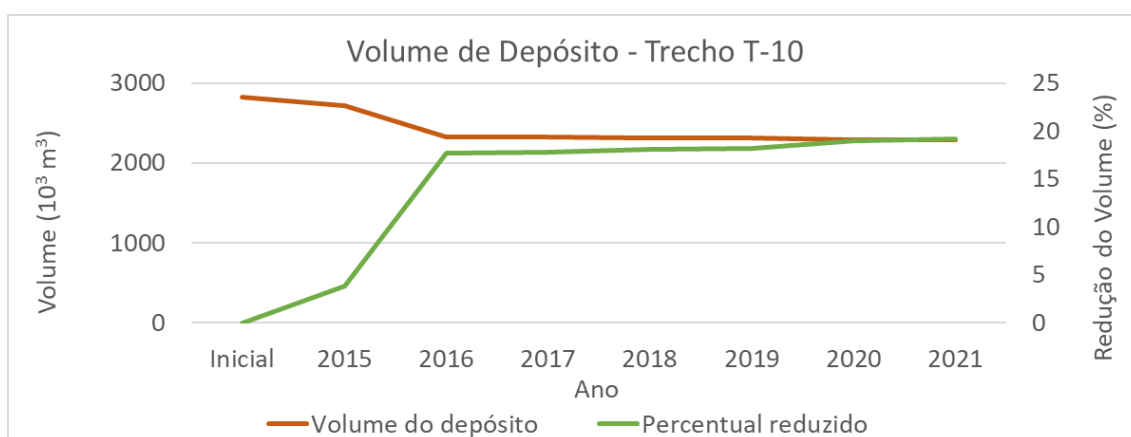


Figura 84. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-10, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.

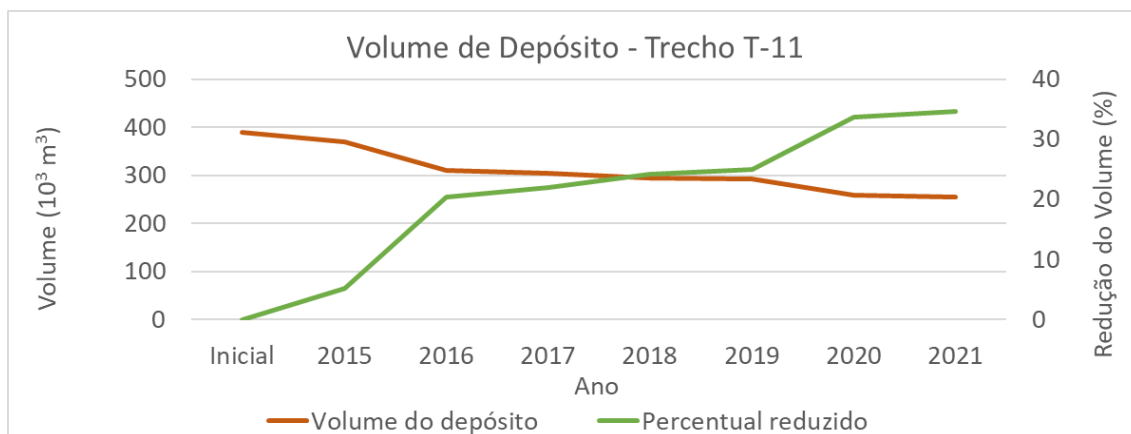


Figura 85. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-11, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.

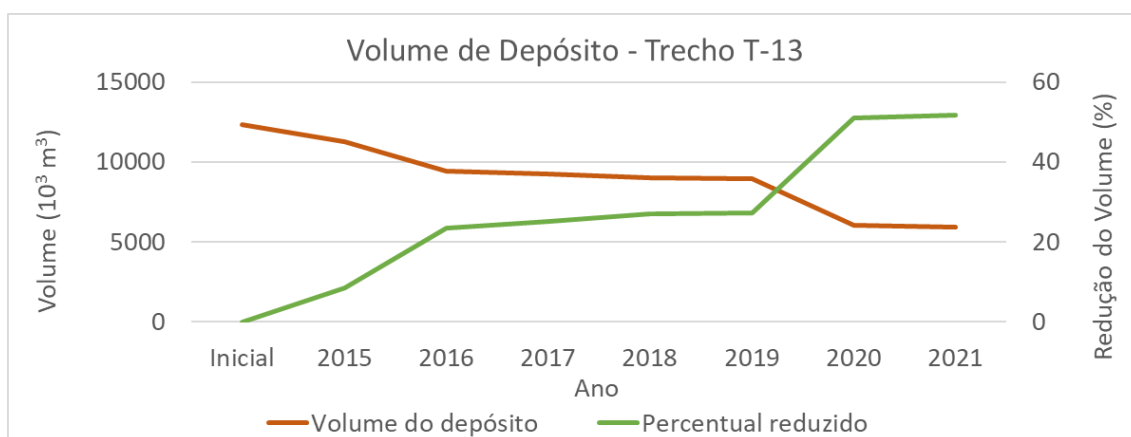


Figura 86. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-13, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.

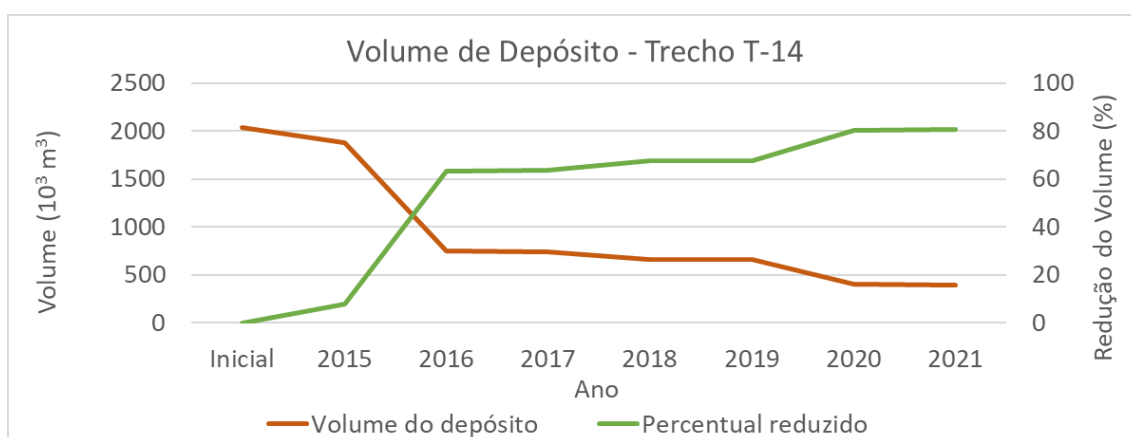


Figura 87. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-14, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.

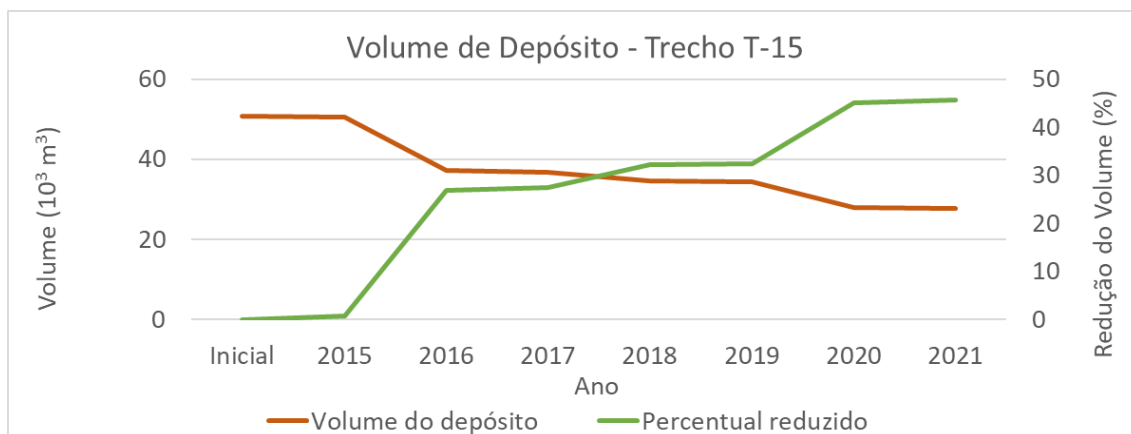


Figura 88. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-15, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.

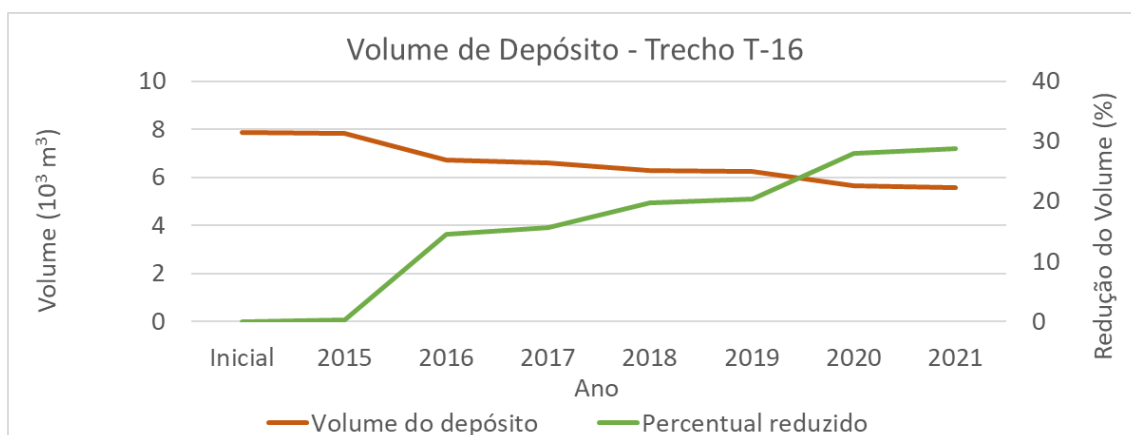


Figura 89. Variação do volume de depósito ao longo dos anos no trecho T-16, e percentual de volume reduzido em relação ao volume de depósito inicial.

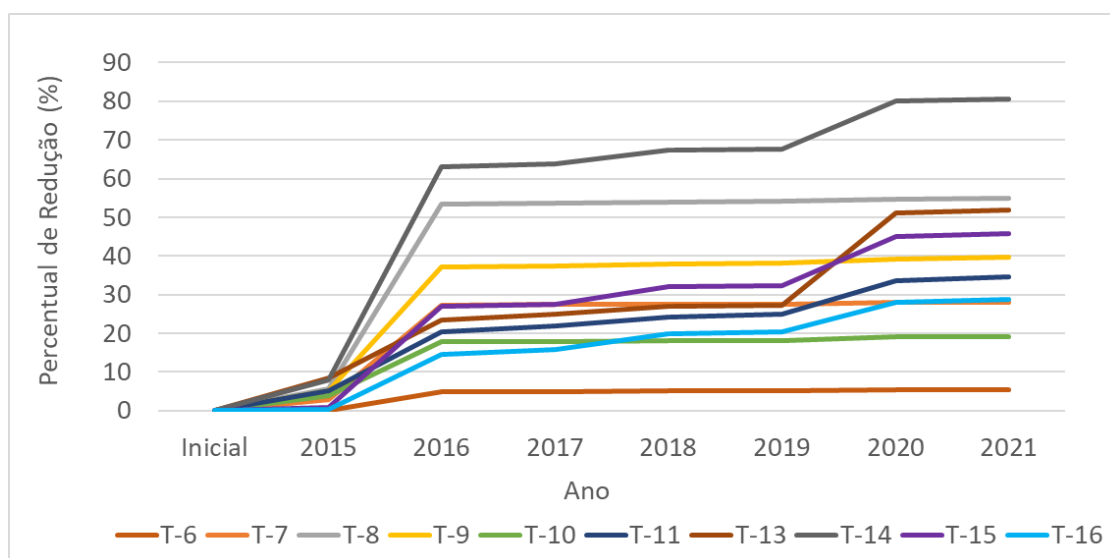


Figura 90. Variação do percentual de volume de depósito inicial reduzido em cada trecho. Quanto maior o percentual reduzido, mais próximo do cenário A se encontra o trecho, em termos de volume depositado.

4.3.3. Séries de concentrações e vazões sólidas

A seguir são apresentadas as séries simuladas de concentrações de sedimentos em suspensão e de vazões sólidas. Os resultados foram comparados com as séries simuladas nos cenários A e C, e os dados medidos após o rompimento (ocorrido em 05/11/2015) em estações ao longo do rio Doce. Os valores apresentados das estatísticas calculadas correspondem à comparação entre as concentrações de sedimentos em suspensão e descargas sólidas observadas nos locais e simuladas pelo modelo, apenas nas datas em que há dados observados no período.

Da Figura 92 até a Figura 99 estão apresentados, ano a ano, as séries de concentrações de sedimentos suspensos (letra a) e descargas sólidas (letra b) para as estações de interesse, incluindo a estação Barra Longa, no rio Gualaxo do Norte, a montante da sua confluência com o rio do Carmo e as estações RDO01, RCA02 e RGN06. Importante observar que os valores de concentrações e descargas estão apresentados nos gráficos em escala logarítmica. Na cor cinza, estão representados os resultados estimados no cenário A, tanto no gráfico de concentração de sólidos suspensos quanto no gráfico da descarga sólida. As estatísticas apresentadas nos gráficos são correspondentes à simulação do cenário C, em relação aos dados observados.

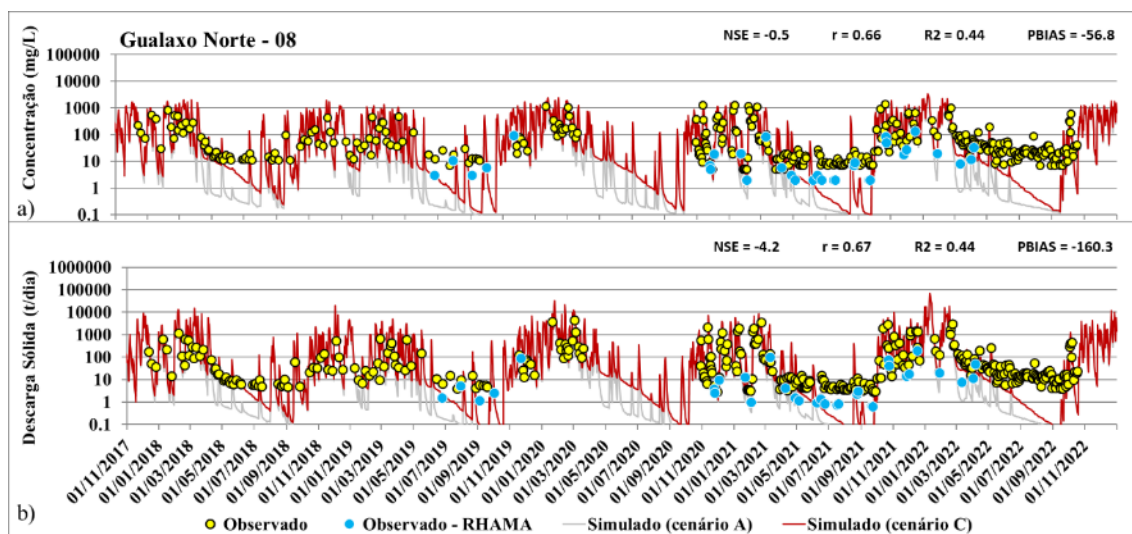


Figura 91. Comparação de séries simuladas para a estação Barra Longa, no rio Gualaxo do Norte, com dados observados no período de dezembro de 2017 a dezembro de 2022.

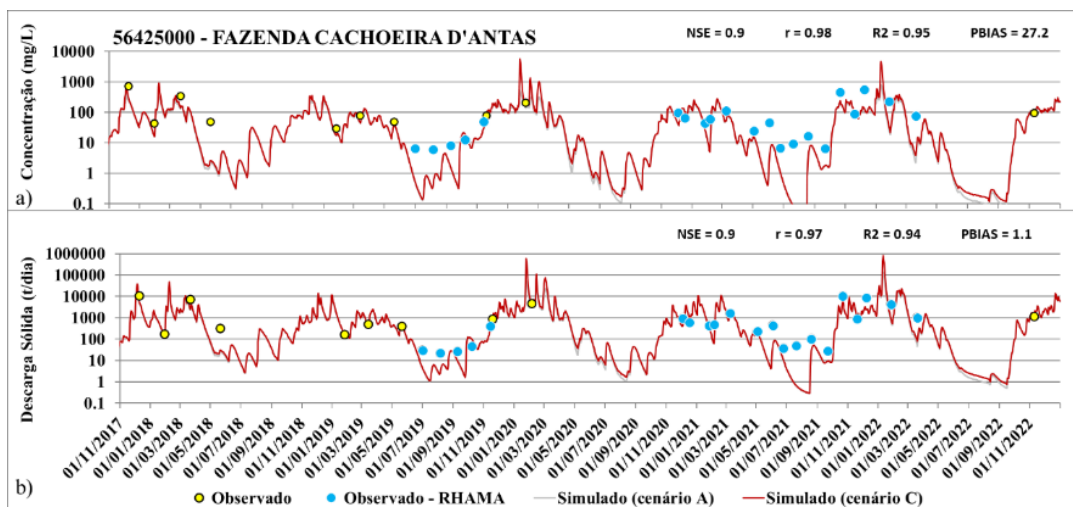


Figura 92. Comparação de séries simuladas para a estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) com dados observados no período.

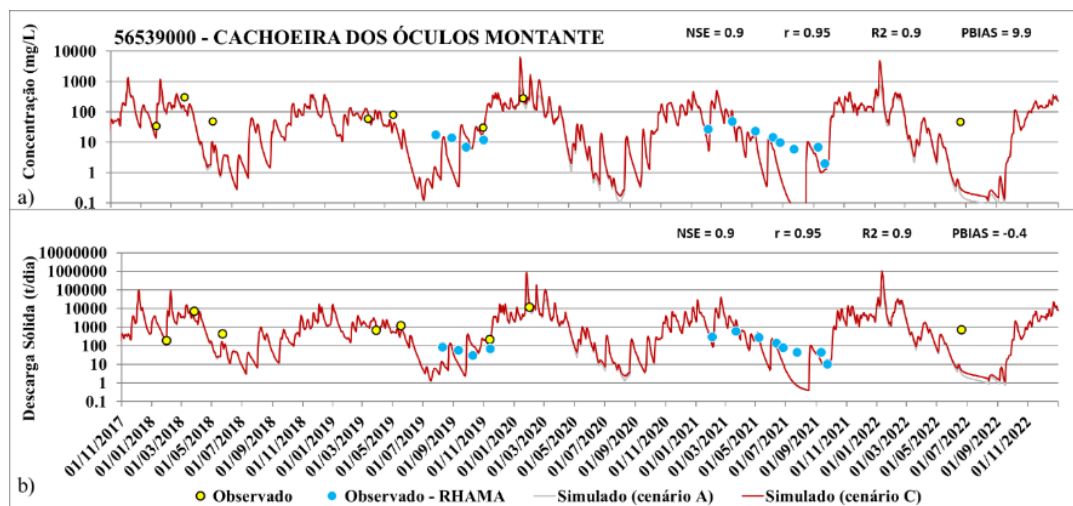


Figura 93. Comparação de séries simuladas para a estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante) com dados observados no período.

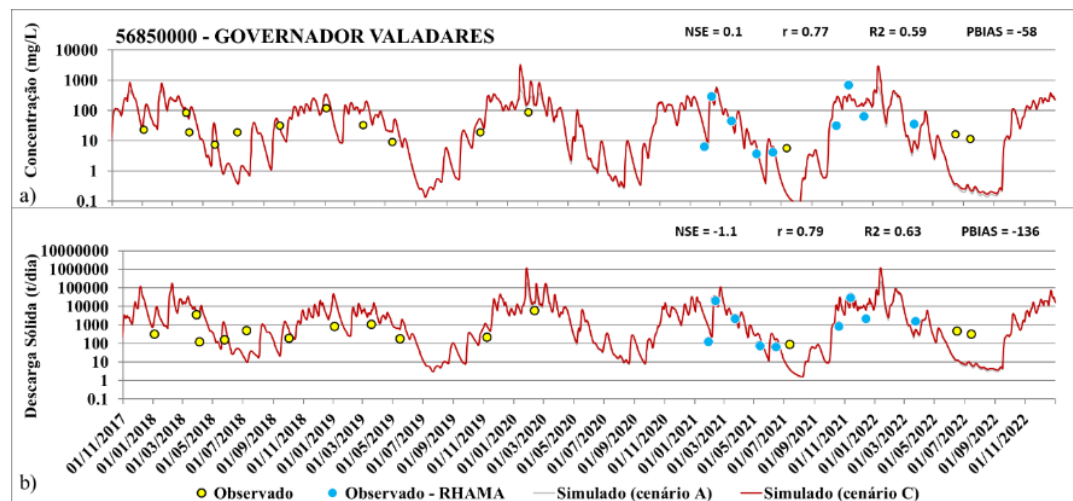


Figura 94. Comparação de séries simuladas para a estação 56850000 (Governador Valadares) com dados observados no período.

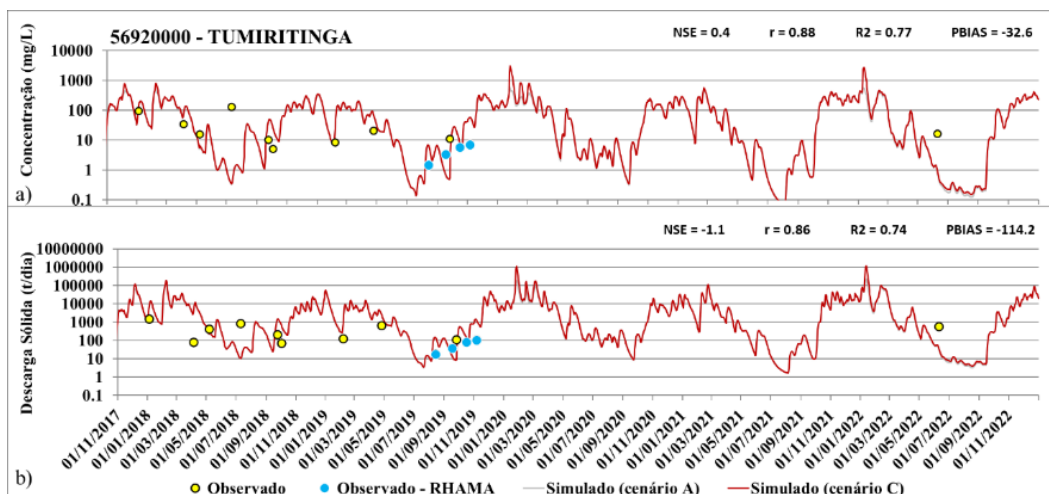


Figura 95. Comparação de séries simuladas para a estação 56920000 (Tumiritinga) com dados observados no período.

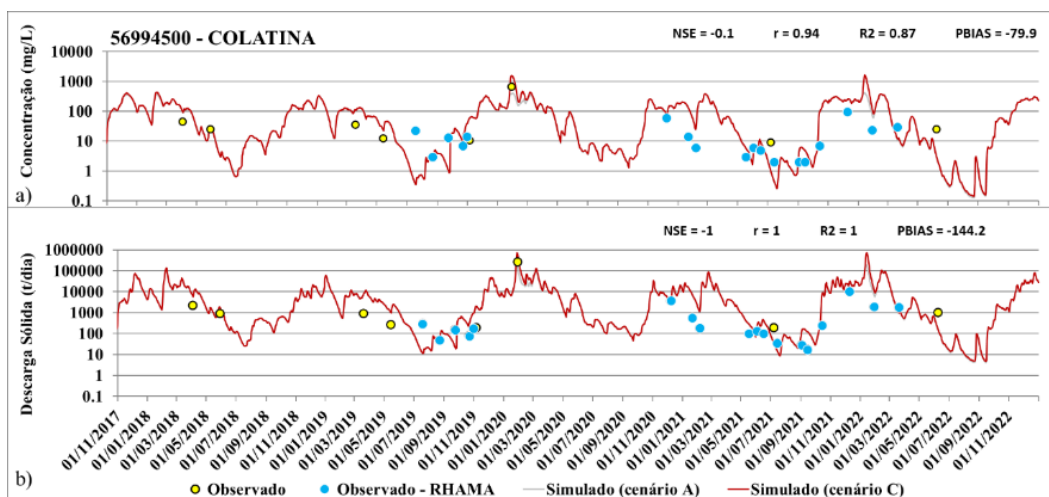


Figura 96. Comparação de séries simuladas para a estação 56994500 (Colatina) com dados observados no período.

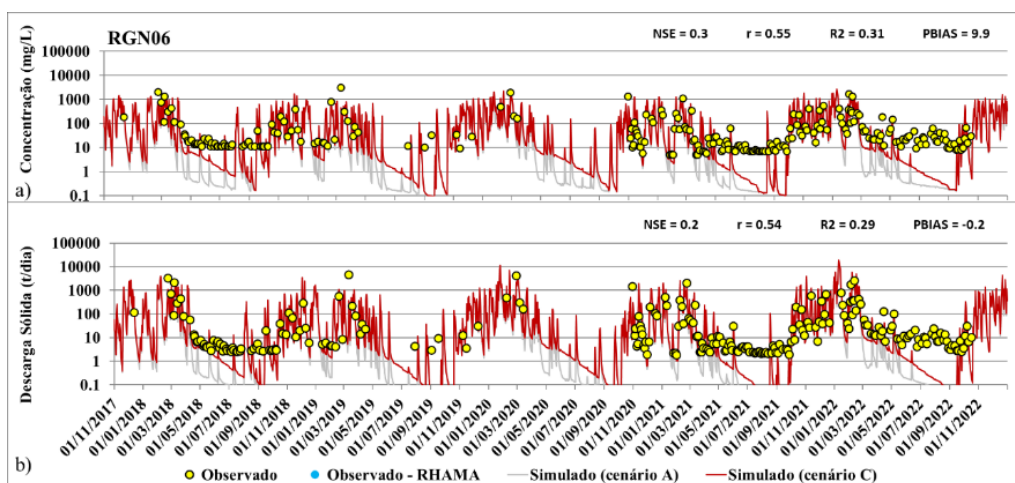


Figura 97 - Comparação de séries simuladas para a estação RGN06 com dados observados no período.

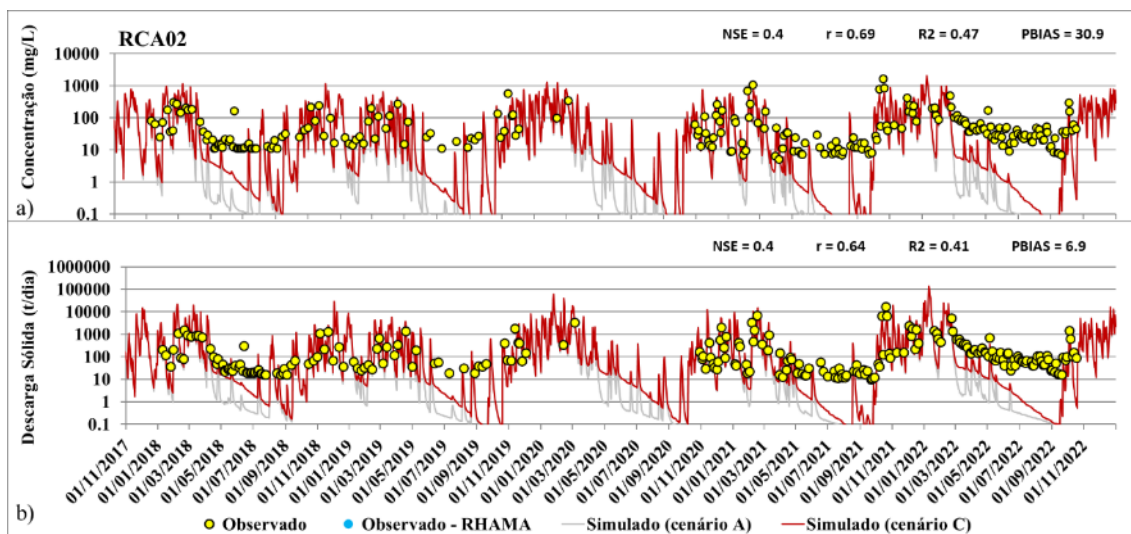


Figura 98 - Comparação de séries simuladas para a estação RCA02 com dados observados no período.

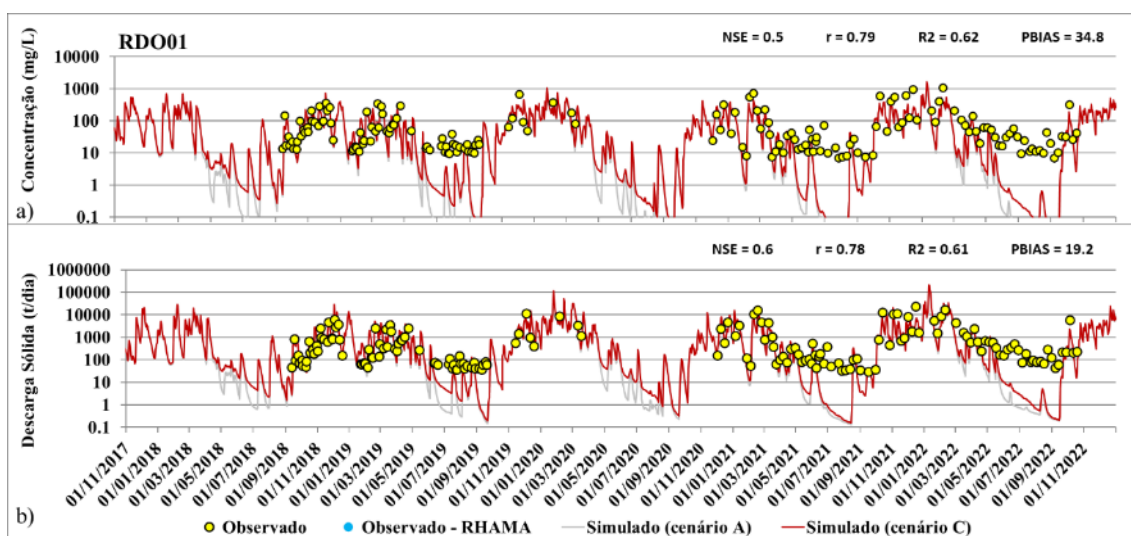


Figura 99 - Comparação de séries simuladas para a estação RDO01 com dados observados no período.

Os resultados desse cenário mostram o comportamento do aumento das concentrações devido à ressuspensão do material depositado causado pelo rompimento da barragem e pela passagem da onda de sedimentos. Neste cenário, apesar do aumento das concentrações devido à ressuspensão, verifica-se uma tendência de diminuição das concentrações ao longo do tempo, buscando retornar às condições anteriores às do rompimento, especialmente nos trechos a jusante de Risoleta Neves.

Para a estação em Gualaxo do Norte (Barra Longa) e RDO01, RCA02 e RGN06, os dados medidos foram os de campanhas realizadas pela Golder entre dezembro de 2017 e dezembro de 2022 (GOLDER, 2023). Neste período, verificou-se que nos períodos de baixas vazões as concentrações medidas estão limitadas a 10 mg/L comparadas com as dos demais períodos medidos. O modelo buscou representar esse comportamento com

a ressuspensão, porém apresentou concentrações menores que as observadas em alguns períodos. No entanto, os resultados simulados nesta estação mostram um comportamento claro de elevação das concentrações com a ressuspensão nos primeiros anos, em virtude da influência do material disponibilizado pelo rompimento.

Na estação de 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas), observam-se duas medições ocorridas no início de 2017 com concentrações maiores que as estimadas pelo modelo, embora as descargas sólidas sejam mais próximas às observações. Apesar da ressuspensão considerada no modelo e o bom ajuste das simulações com as demais observações desta estação, verifica-se que esses valores observados mais elevados possivelmente se devem à fatores externos, como realização de dragagem, os quais ressuspenderam sedimentos depositados ao longo deste período. No entanto, esses eventos externos não afetam os resultados gerais apresentados neste estudo.

É importante destacar que o modelo conseguiu representar bem o comportamento das concentrações e descargas sólidas quando comparados os seus resultados com os dados medidos e representativos deste cenário. Portanto, os resultados apresentados são aceitáveis e correspondem aos dados medidos, representando adequadamente os fluxos de sedimentos ao longo do rio Doce no período pós-rompimento.

4.3.4. Relação vazão sólida e vazão líquida

No cenário A, foram apresentadas curvas que relacionavam a vazão sólida com a vazão líquida, e a mesma relação foi realizada para o cenário C, a fim de estabelecer uma comparação entre os cenários com e sem o evento de rompimento da barragem. Da Figura 100 à Figura 104 são apresentadas as relações entre vazões líquidas e sólidas simuladas diárias e médias, e observadas, nos cenários A e C, para os locais das estações de sedimentos da ANA localizadas ao longo do rio Doce, que continham dados no período simulado de 2015 a 2022. Para o ano de 2015, são considerados todos os dados observados do ano, e não apenas aqueles medidos após o rompimento da barragem de Fundão. Os valores simulados e observados médios correspondem às médias dos valores em faixas de vazão líquida. Para comparar o comportamento destas variáveis com o período antes do rompimento, nos gráficos também estão apresentadas as relações entre os valores médios da vazão líquida e vazão sólida observadas, no período anterior ao rompimento da barragem de 1998 a 2014.

Os resultados apresentados nas figuras, comparando os valores diários nos cenários C e A, indicam que há uma maior ressuspensão nas estações mais a montante no cenário C, a qual tende a reduzir das estações de montante para as de jusante. As relações entre as vazões sólidas (Q_s) e líquidas (Q_L) na estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) apresentam valores mais elevados de Q_s no cenário C⁹. Já para a

⁹ Este posto fica logo a jusante do reservatório de Risoleta Neves. Estes valores podem ser resultado de ações de movimentação de sedimentos da barragem num certo período em que se dispunha de dados observados.

estação 56994500 (Colatina), as relações em ambos os cenários são mais próximas, embora um pequeno aumento das Qs seja observado para vazões maiores.

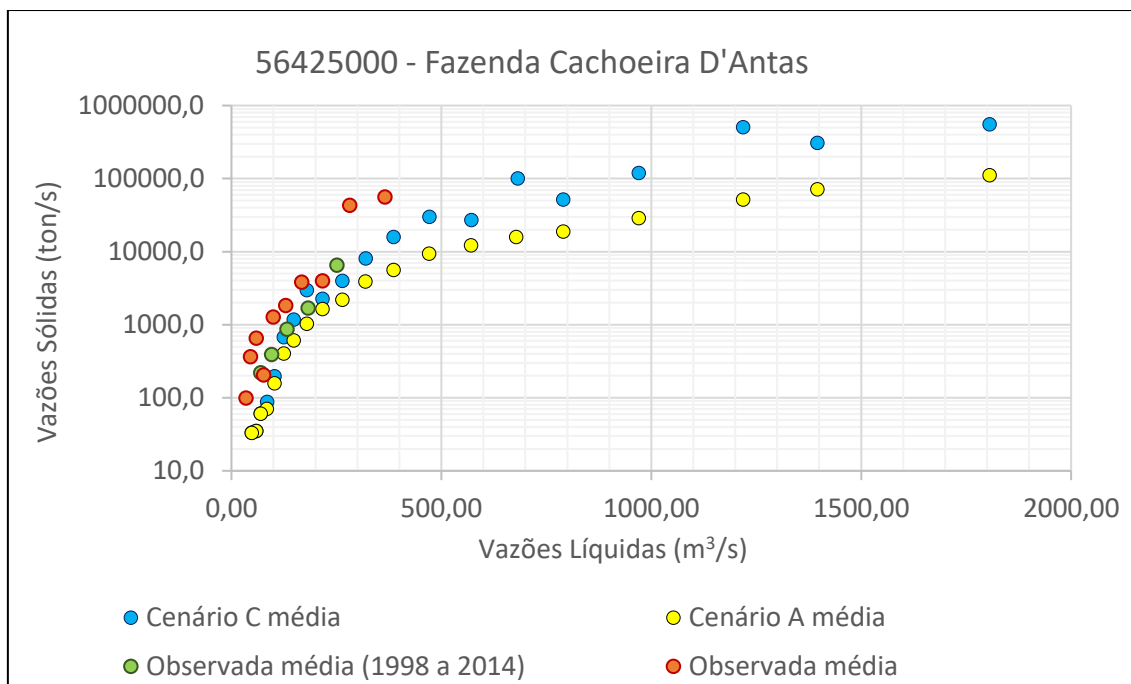


Figura 100. Curvas de relação entre vazões líquidas e sólidas simuladas médias, e observadas médias, para os cenários A e C na estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) no período de 2015 a 2022.

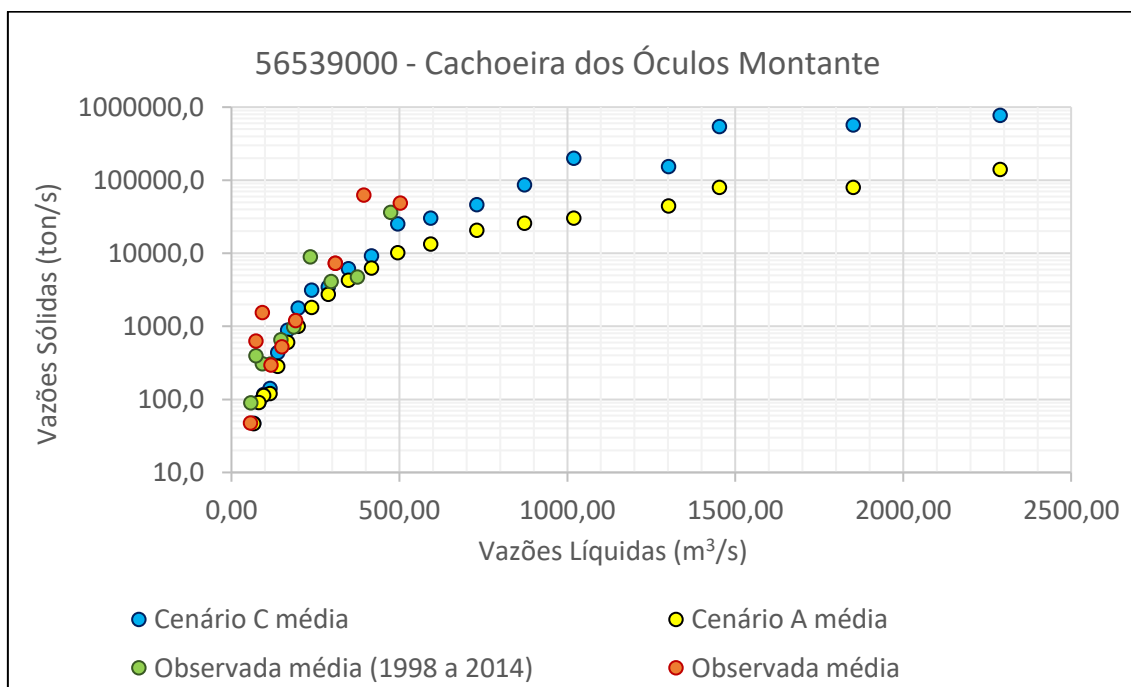


Figura 101. Curvas de relação entre vazões líquidas e sólidas simuladas médias, e observadas médias, para os cenários A e C na estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos) no período de 2015 a 2022.

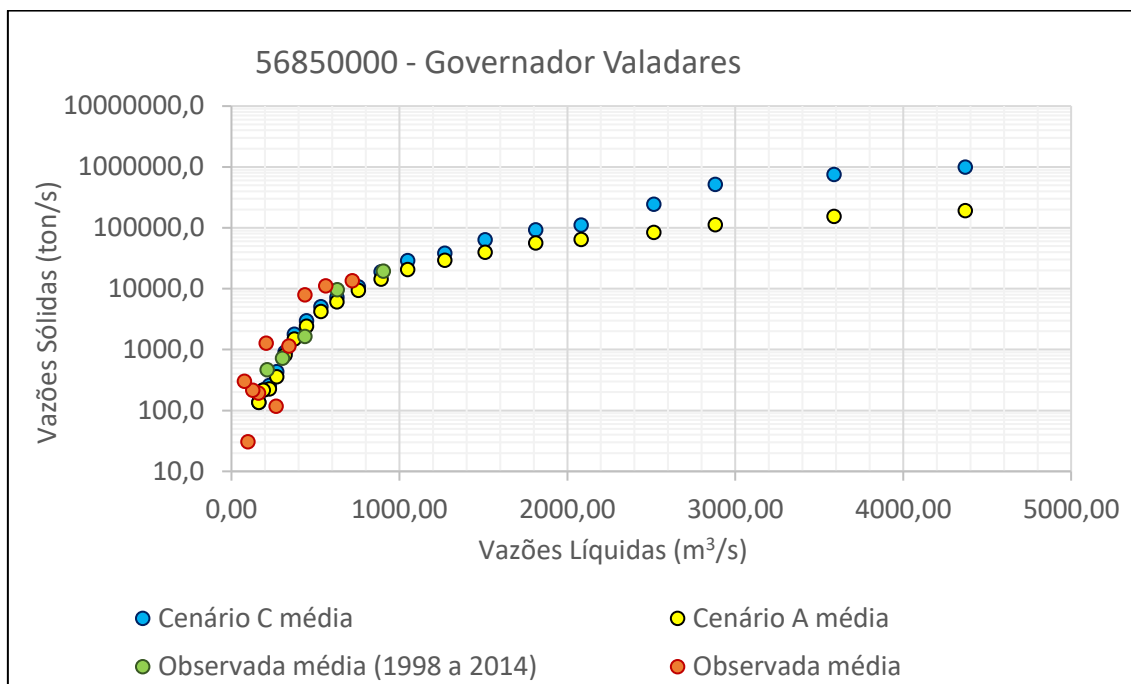


Figura 102. Curvas de relação entre vazões líquidas e sólidas simuladas médias, e observadas médias, para os cenários A e C na estação 56850000 (Governador Valadares) no período de 2015 a 2022.

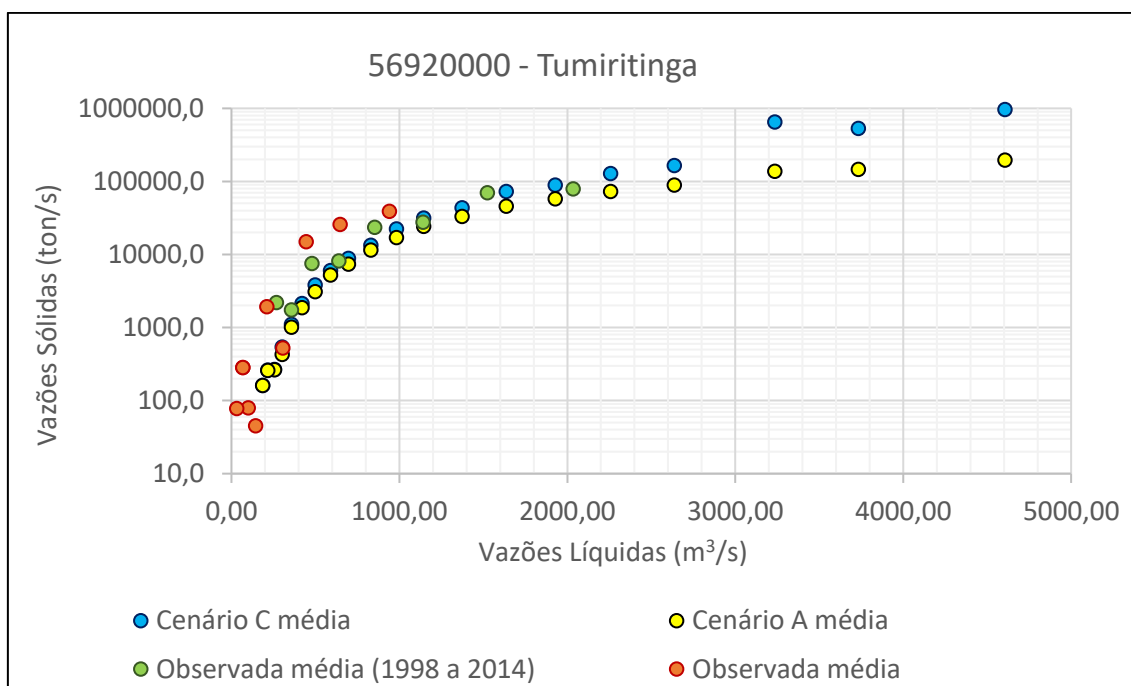


Figura 103. Curvas de relação entre vazões líquidas e sólidas simuladas médias, e observadas médias, para os cenários A e C na estação 56920000 (Tumiritinga) no período de 2015 a 2022.

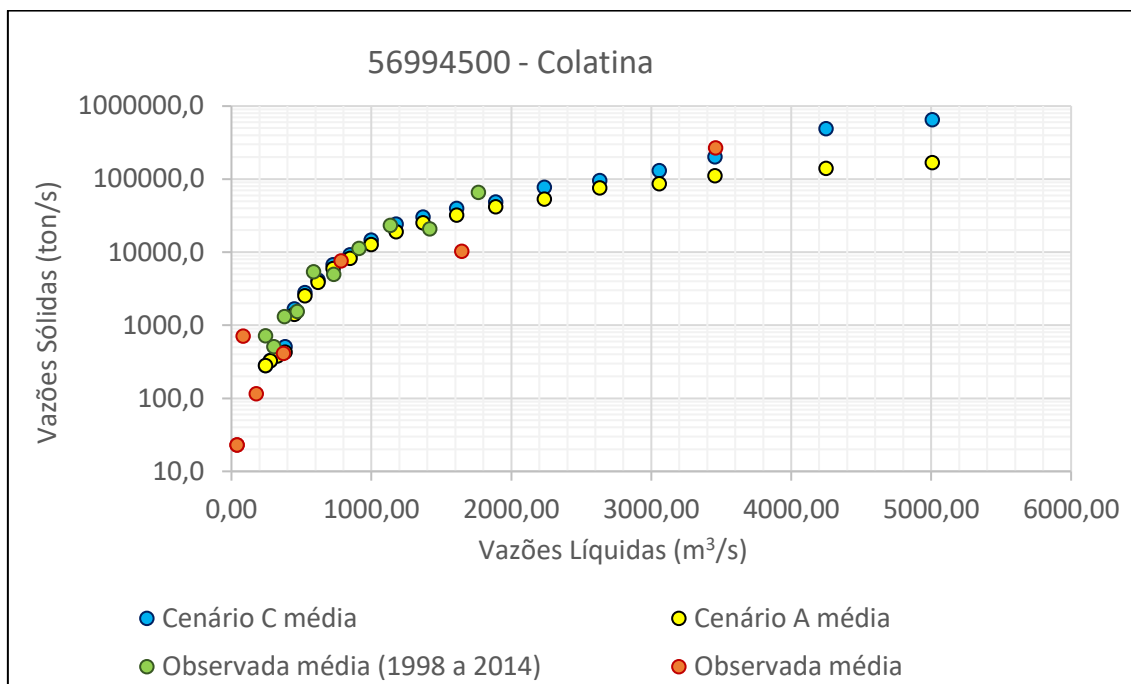


Figura 104. Curvas de relação entre vazões líquidas e sólidas simuladas médias, e observadas médias, para os cenários A e C na estação 56994500 (Colatina) no período de 2015 a 2022.

Como esperado e já apresentado anteriormente, as relações entre os valores médios de Q_s e Q_L observados no cenário A (2015 a 2022) estão próximas àquelas observadas no período de 1998 a 2014, anterior ao rompimento. Por outro lado, os valores médios mostram claramente que há um aumento das vazões sólidas no cenário C em relação ao cenário A, o que é reflexo da ressuspensão do material depositado no fundo dos rios após o rompimento da barragem de Fundão. No entanto, essa diferença tende a ser menor ao longo do rio Doce, de montante para jusante, como pode ser observado na estação 56994500 (Colatina). Esse comportamento indica que nos locais mais afastados do rompimento, especialmente a jusante da UHE Risoleta Neves, as descargas sólidas foram menos influenciadas pelo rompimento e já aparentam ter um comportamento semelhante àquele antes do evento ou do cenário A, o qual representa um comportamento esperado caso o evento não tivesse ocorrido.

Para avaliar o comportamento das vazões sólidas ao longo dos anos, foram analisadas as *relações entre vazões líquidas e sólidas simuladas diárias, e observadas*, nos cenários A e C, para os locais das estações de sedimentos da ANA localizadas ao longo do rio Doce, que continham dados no período simulado de 2015 a 2022. As relações estão apresentadas no APÊNDICE F e aqui são discutidos os principais resultados.

A partir das relações é possível perceber, principalmente nas estações localizadas mais a montante do rio Doce, um aumento das vazões sólidas no período pós rompimento, o que é reflexo da ressuspensão do material depositado no fundo dos rios após o rompimento da barragem de Fundão. Os valores diários mostram claramente que há um aumento das vazões sólidas no cenário C em relação ao cenário A. Por outro lado, observa-se que uma aproximação dos resultados obtidos no cenário C com aquelas do

cenário A ocorre ao longo dos anos, especialmente nas estações mais de jusante, onde o impacto do rompimento foi menor.

Ao longo dos anos, há uma tendência de redução das vazões sólidas, se aproximando ao cenário sem rompimento (cenário A) e, conseqüentemente, ao período anterior ao rompimento. Já nos trechos mais a jusante, especialmente após os reservatórios de Aimorés e Mascarenhas, as concentrações após a passagem da onda de cheia já eram menores e o efeito da ressuspensão é menos perceptível. Esse comportamento indica que nos locais mais afastados do rompimento, as descargas sólidas foram menos impactadas pelo rompimento e já aparentam ter um comportamento semelhante àquele antes do evento ou do cenário A, o qual representa um comportamento esperado caso o evento não tivesse ocorrido.

Como exemplo das relações apresentadas no APÊNDICE F, da Figura 105 a Figura 110 são reproduzidos os gráficos referentes à estação de Barra Longa (Gualaxo do Norte). Neles, os dados observados (medidos) correspondem ao período de 12/2017 a 10/2022, considerando todo o período de 2018. Os dados medidos neste período (2 anos após o rompimento) mostram um comportamento semelhante ao observado antes do rompimento, embora com valores um pouco mais elevados, o que pode ser observado também ao comparar os cenários A e C.

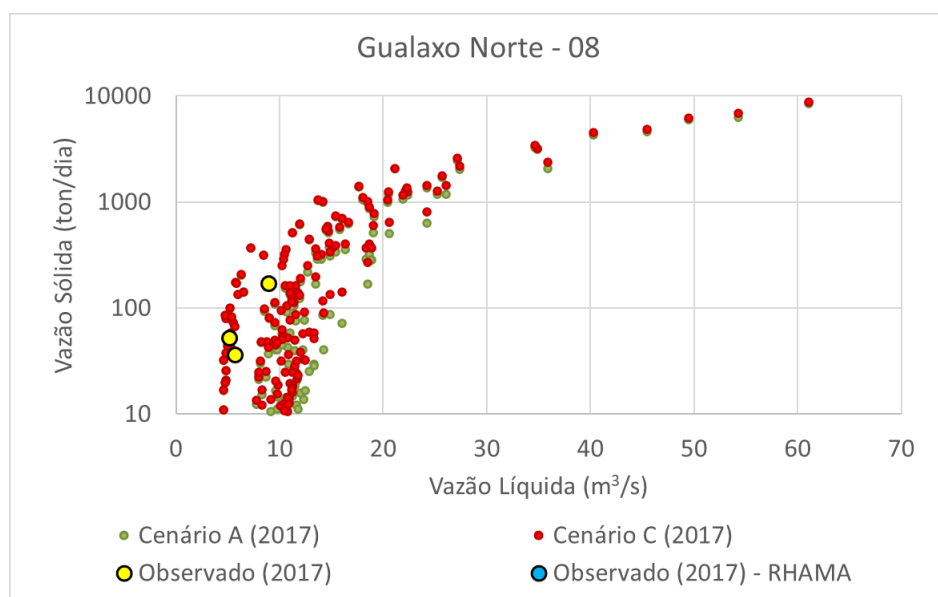


Figura 105. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2017 (dezembro).

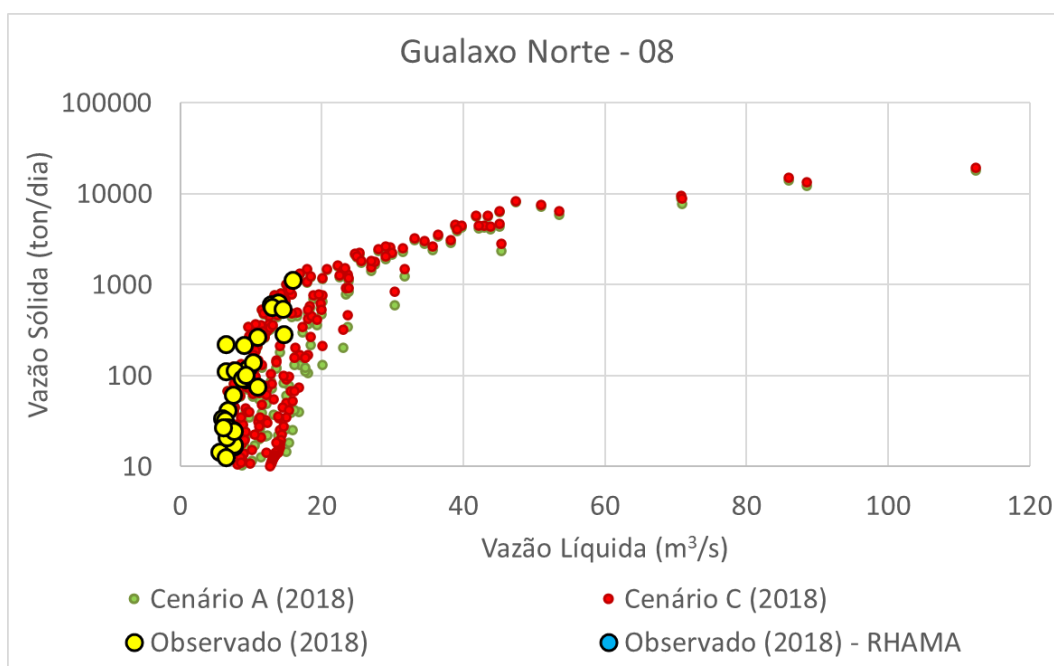


Figura 106. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2018.

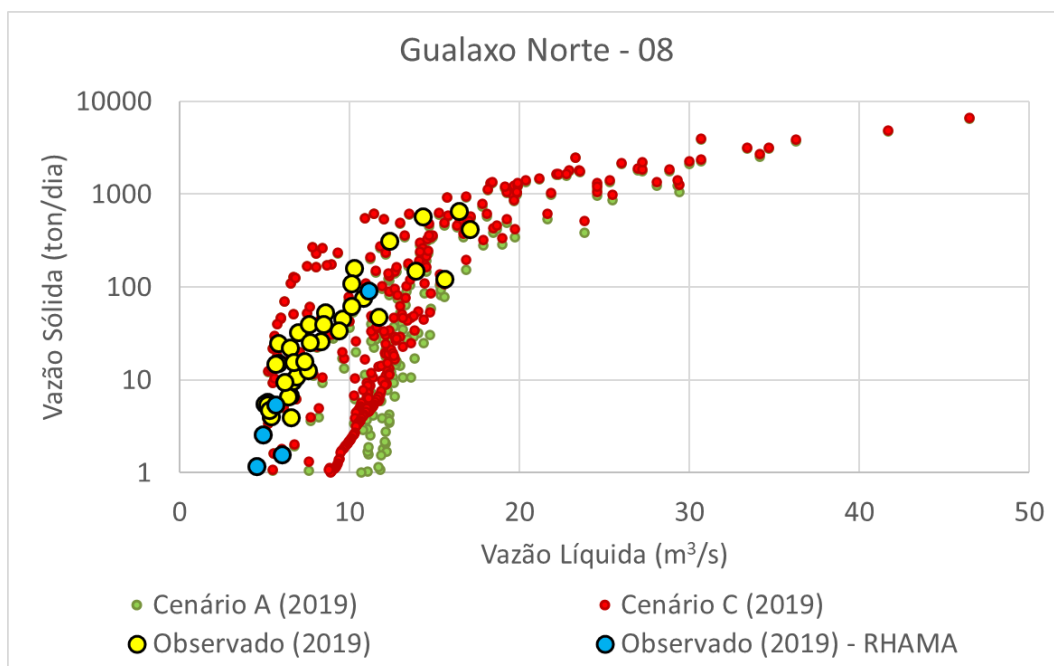


Figura 107. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2019.

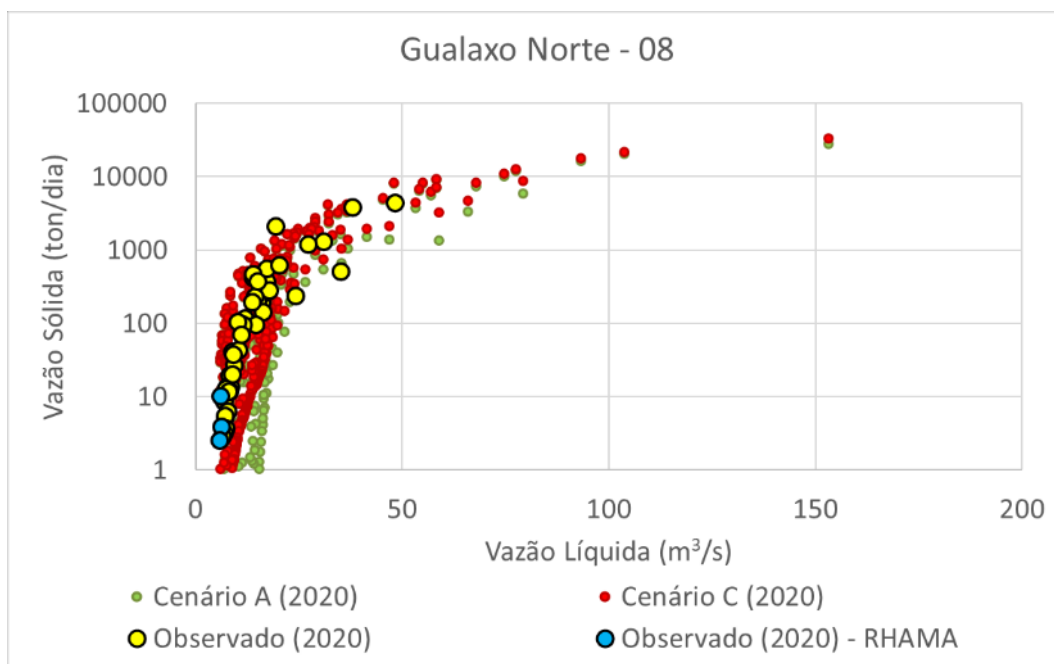


Figura 108. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2020.

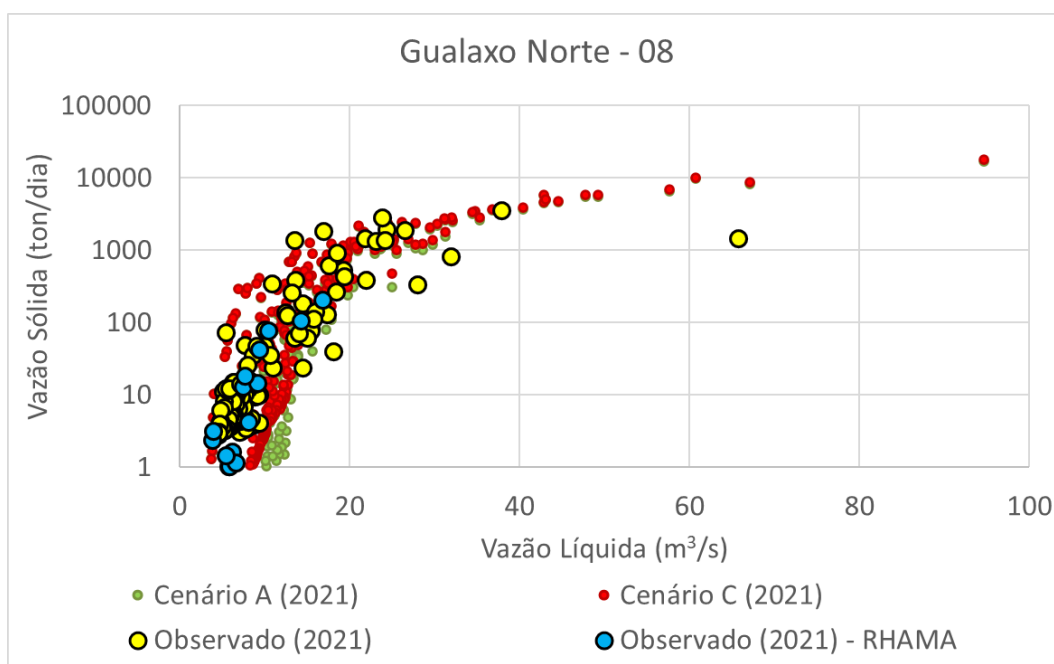


Figura 109. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2021.

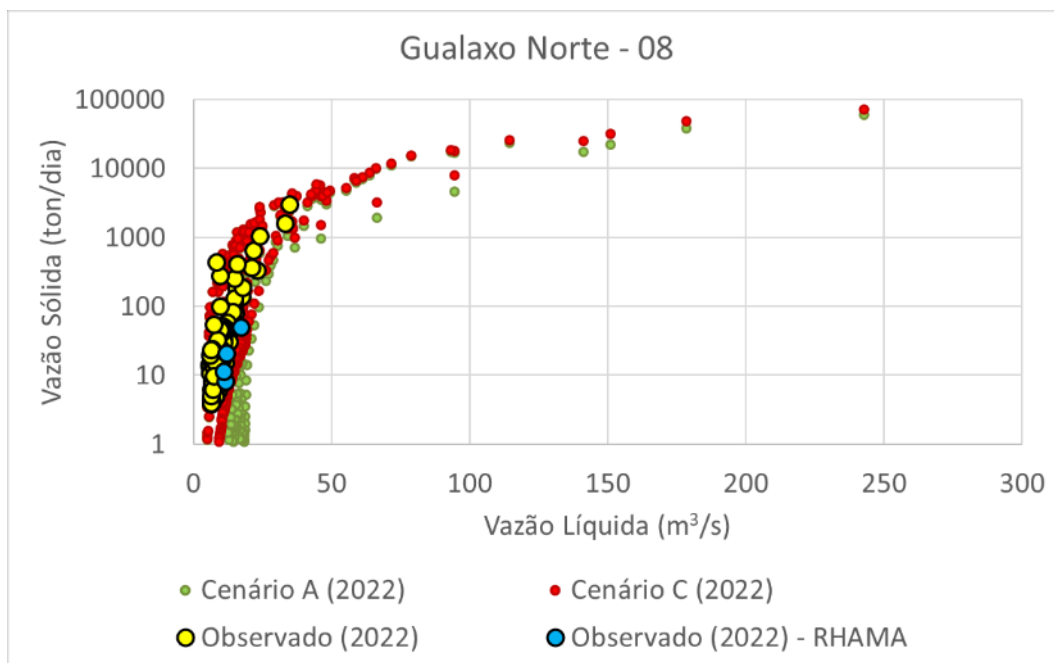


Figura 110. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2022.

As estações 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) e 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante), são as que apresentam maior impacto com efeitos mais elevados da ressuspensão de material depositado devido ao rompimento. Nestas duas estações, o modelo simulou bem as descargas sólidas e representou a tendência de aumento das concentrações com a ressuspensão.

Para as figuras referentes ao ano de 2015 e 2017 em Fazenda Cachoeira D'Antas, podem ser notados 2 pontos com elevadas vazões sólidas que não foram captados pelo modelo com precisão.

Na estação 56850000 (Governador Valadares), localizada alguns quilômetros a jusante da UHE Baguari, observa-se um aumento das descargas sólidas observadas nos anos de 2015 e 2016, o que foi bem representado pelo modelo ao considerar o processo de ressuspensão do material depositado no leito dos rios devido ao rompimento de Fundão. Para os demais anos, os dados medidos nesta estação correspondem a valores de vazões líquidas baixas, o que são próximos dos valores simulados. Nesta estação, simulações a partir do ano de 2019 apresentam comportamento muito semelhante àquele observado antes do rompimento e do cenário A.

A estação 56920000 (Tumiritinga) tem comportamento semelhante à estação 56850000 (Governador Valadares). Nela também se verifica um aumento das descargas sólidas observadas nos anos de 2015 e 2016, o que foi bem representado pelos modelos ao considerar o processo de ressuspensão do material depositado no leito dos rios devido ao rompimento de Fundão. Para os demais anos, há poucos dados medidos nesta estação e os valores observados são próximos dos valores simulados. Nesta estação, simulações a partir do ano de 2019 apresentam comportamento muito semelhante àquele observado antes do rompimento e do cenário A.

A estação 56994500 (Colatina) foi a que menos teve impacto da onda de cheia devido ao rompimento, no entanto concentrações mais elevadas de sedimentos foram observadas até 2017 em relação ao período antes do rompimento. As relações entre vazões sólidas e líquidas e dados observados ano a ano mostram elevadas descargas sólidas em 2015, as quais foram representadas no cenário C. No entanto, para os demais anos a quantidade de dados observados é pequena, dificultando uma comparação com as simulações. Por outro lado, verifica-se um aumento das descargas sólidas no cenário C em relação ao cenário A, embora essa diferença seja menor do que nas estações mais a montante. Além disso, a estação de Colatina está a jusante das 4 principais barragens existentes ao longo do rio Doce, de forma que parte dos sedimentos transportados são retidos estes reservatórios.

Na Tabela 32 é apresentado o balanço de massa por contribuição nos trechos do PMR. Os volumes apresentados são valores acumulados ao longo de toda a simulação.

Tabela 32. Balanço entre os volumes de sedimentos depositados e escoados em cada trecho definido no Programa de Manejo de Rejeitos e Reservatórios, no período simulado do cenário C.

Trecho PMR	Volumes [m³]						
	VOL _M	VOL _{aflu}	VOL _{bac}	VOL _{trecho}	VOL _{res}	VOL _{plan}	VOL _J
T-06	23.954	0	15.905	1.614	0	3.887	37.586
T-07	54.556	0	13.294	36.911	0	2.431	102.329
T-08	102.099	0	74.319	135.554	0	3.644	308.329
T-09	308.015	272.215	605.663	692.617	0	117.672	1.760.838
T-10	1.742.639	408.964	70.352	609.426	0	87.996	2.743.384
T-11	2.731.444	1.308.784	14.647	208.419	0	660	4.262.635
T-12	4.218.966	0	20.653	188.133	1.361.090	17.353	3.049.308
T-13	3.116.235	10.196.090	75.730	9.561.114	2.948.882	1.166.229	18.834.057
T-14	18.440.012	8.366.201	278.864	1.691.777	7.948.976	521.417	20.306.461
T-15	19.944.815	1.906.080	47.704	28.177	0	45.671	21.881.105
T-16	21.735.507	892	1.687	2.691	0	80.309	21.660.469

4.4. Cenário Futuro

A versão do modelo de sedimentos utilizada nesse cenário foi a mesma adotada nos cenários A e C, ou seja, uma versão adaptada para, além de estimar a contribuição natural de sedimentos da bacia para o trecho de estudo, estimar a contribuição de sedimentos proveniente da calha, resultante do processo de ressuspensão dos rejeitos depositados com a passagem da onda de cheia do rompimento e que foram estimados no Cenário B.

Assim, esse cenário envolveu a simulação do rio Doce para o futuro, a fim de procurar projetar a sua recuperação. Nesta simulação foi feita uma análise com base nas precipitações, considerando séries estocásticas de chuva estimadas para o futuro. Considerando as séries disponíveis de precipitação desde a década de 70 até dezembro de 2022, são cerca de 53 anos de dados.

Nesse cenário, a simulação das condições futuras do rio Doce foi feita a partir do início de 2023. Com isso, buscou-se avaliar se todos os trechos tendiam a convergir para o cenário sem rompimento (cenário A) nos próximos 40 anos, e como se comportariam as vazões sólidas e quais os volumes depositados residuais nos trechos de rios.

É importante destacar que o passo de tempo adotado por um modelo para aplicação em bacias deve ser compatível com o tempo de concentração da mesma. No caso do rio Gualaxo do Norte, esse tempo de trânsito é inferior a um dia. No entanto, para uso de um modelo com passo de tempo compatível com o tempo de concentração, seriam necessários dados de entrada (chuva, vazão, clima, dentre outros) também compatíveis com essa escala temporal, o que não está disponível para a bacia. Por este motivo, o estudo considerou o passo de tempo diário, compatível com os dados existentes para o estudo.

Desta forma, é possível que os valores de material removidos do leito possam estar subestimados e o tempo de recuperação seja menor. Por outro lado, o modelo apresentou boas estimativas da variação do volume de depósitos ao longo dos anos quando comparados com os volumes medidos, o que demonstra que a tendência de redução está sendo representada.

Ainda, considerando que o modelo simula os fluxos de sedimentos em escala temporal diária, e que não há informação disponível de aporte das planícies impactadas nesta escala, sendo disponível apenas o valor médio anual (GOLDER, 2022), a contribuição das planícies foi considerada nos resultados médios anuais estimados com o modelo. Essa premissa é válida pois o balanço realizado é anual, de forma que a variabilidade interanual do aporte diário de sedimentos dessas áreas seria desprezível. Por outro lado, essa idealização assume que a taxa de aporte de sedimentos das planícies impactadas (áreas extracalha) será constante, independentemente do regime de chuva do ano, e não tenderá a reduzir com o aumento da recuperação dessas áreas.

O tempo necessário para recuperação do trecho de estudo, ou seja, aquele para o qual ocorre uma redução dos rejeitos depositados a valores assumidos aqui como insignificantes¹⁰, depende do comportamento hidrológico futuro da bacia. Parte dos sedimentos depositados no fundo dos trechos fluviais avaliados vão se tornando indisponíveis para ressuspensão e remobilização devido a compactação do material de fundo. Este estoque que se consolida no leito do rio pode vir a ser remobilizado em casos de eventos hidrológicos extremos. No entanto, mesmo no cenário de ocorrência de um evento extremo, a energia do escoamento pode não causar a remobilização deste material consolidado no fundo.

Para simular condições futuras, é necessário conhecer as vazões e precipitações futuras. Considerando que as vazões e o aporte de sedimentos dos próximos anos são

¹⁰ Neste estudo, considerou-se valores insignificante quando o volume de rejeitos na calha dos rios é inferior a 10% do volume total depositado, ou que a variação da remobilização de sedimentos do depósito seja pequena entre um ano e outro, assumindo que este percentual esteja dentro da faixa de incerteza das próprias estimativas do monitoramento de campo.

desconhecidos, uma forma de estimar o comportamento futuro das vazões e do transporte de sedimentos é por meio da simulação da área de estudo considerando uma análise estocástica com base na precipitação. Para isso, admite-se que cada ano futuro seja sorteado com igual probabilidade de ocorrência entre os anos do passado, com base na geração de números aleatórios. Para se obter uma estimativa de cada ano futuro, são realizadas 'n' gerações desses anos a fim de se obter um valor esperado e uma faixa de incerteza de rejeitos em cada ano.

Uma amostra estatística para geração de séries estocásticas necessita de, ao menos, 30 anos de dados. Considerando as séries disponíveis de precipitação no período de 1970 a 2022 (nessa atualização a base de dados foi atualizada com as informações mais recentes no período de 01/2020 a 12/2022, **atendendo assim a demanda (f) apresentada no item 1.3.,** tem-se 53 anos de dados cuja geração estocástica sorteou anos aleatórios para compor uma série de precipitação futura. Ao total, foram avaliadas 100 simulações com horizonte escolhido de 40 anos futuros, iniciando em 2023. Para cada ano futuro i , o valor esperado de rejeitos remanescentes (RR) na calha em cada um dos trechos T06 a T16 foi estimado pela equação abaixo, onde j indica o número de simulações realizadas, variando de 1 a 100.

$$RR(i) = \frac{\sum RR(i,j)}{j} \quad 23$$

Para representar as condições "naturais" dos fluxos de sedimentos no trecho de estudo, as 100 simulações também foram realizadas considerando o Cenário A, ou seja, supondo que não houve rompimento da barragem, o qual será o cenário de referência para avaliar a recuperação do trecho. Desta forma, para cada ano futuro i , também foi avaliado o ajuste das curvas de vazão sólida e vazão líquida no cenário futuro com rompimento (Cenário Futuro) em relação àquela esperada na condição sem rompimento (Cenário A).

Para cada ano futuro (i) de cada simulação (j), foi obtida a diferença entre as vazões sólidas totais a jusante de cada trecho entre os cenários E e A, buscando identificar quando essa diferença tende a valores considerado aqui como pequenos¹¹ e, consequentemente, indicando que o fluxo de sedimentos em cada trecho voltou às condições pré rompimento. O valor esperado dos rejeitos das vazões sólidas (RQs) entre os cenários E e A dos trechos T06 a T16 foi estimado pela equação abaixo, onde j indica o número de simulações realizadas, variando de 1 a 100.

¹¹ Neste estudo, foram considerados como valores pequenos quando a descarga sólida simulada possui diferença de até 5% em relação à descarga sólida do cenário hipotético sem o rompimento. Os dados observados e seus respectivos métodos de obtenção possuem muitas incertezas (McMillan et al., 2018), com magnitudes nos dados hidrológicos da ordem de 10% a 40%. Navratil et al. (2011) encontraram erros variando de 10% a 70% usando procedimentos tradicionais de estimativas da concentração de sedimentos em suspensão (CSS). Desta forma, o percentual considerado está dentro de faixas de incertezas dos próprios dados observados e acredita-se que representa um volume com contribuição que leva a pequenas alterações nas relações descargas sólidas x líquidas.

$$RQs(i) = \frac{\sum RQs(i,j)}{j} \quad 24$$

4.4.1. Contribuição da área extracalha impactada

A área extracalha impactada é a área de planícies de inundação da bacia (extracalha), junto às margens do rio, que recebeu lama do escoamento produzido pelo rompimento. O cálculo do aporte de sedimentos provenientes das áreas de depósito extracalha estão relacionados a taxas de erosão que foram obtidas diretamente das análises realizadas pela Golder Associates e apresentadas no estudo da NHC (2020), a qual elaborou um balanço dos fluxos de sedimentos a montante de Risoleta Neves no período de 2017 a 2019. Considerando que as simulações de cenários futuros iniciam no ano de 2023, neste estudo foram consideradas as taxas de erosão [t/km²/ano] mais recentes, obtidas da estação chuvosa de outubro de 2018 a março de 2019: Tx1 = 5,9 t/km²/ano para a área vegetada (área recuperada) e Tx2 = 312,1 t/km²/ano para a área de solo exposto (área não recuperada).

Considerando as taxas médias anuais, a produção de sedimentos SEDplan_i [t/ano] foi obtida a partir das informações das áreas impactadas, vegetada ou não, em cada trecho i de T06 a T16. O valor foi estimado conforme a equação 2, sendo Tx1 [t/km²/ano] a taxa de erosão da área vegetada extracalha, Av_i [km²] é a área vegetada extracalha do trecho i, Tx2 [t/km²/ano] a taxa de erosão da área de solo exposto extracalha, Anv_i [km²] é a área de solo exposto extracalha (não vegetada) do trecho i:

$$SEDplan_i = Tx1 \cdot Av_i + Tx2 \cdot Anv_i \quad 25$$

O estudo da NHC (2020) apresenta os valores das áreas de planície impactadas vegetadas e de solo exposto total nos trechos "T06 a T09" e "T10 a T11". Para discretizar essas áreas entre os seis trechos de estudo, foram considerados os valores totais das áreas de planícies impactadas apresentados por trecho por GOLDER (2022). O percentual de área de planície impactada indicado em cada trecho foi adotado sobre os valores apresentados pela NHC (levantados em agosto de 2019) referentes às áreas totais de planícies impactadas revegetadas e não revegetadas (solo exposto) nos trechos T06 a T09 e T10 a T11. Desta forma, obteve-se a área de planície revegetada e não revegetada (solo exposto) em cada trecho, conforme apresentado na Tabela 33.

Tabela 33. Áreas extracalhas impactadas pelo rompimento, vegetada ou de solo exposto, discretizada por trecho de estudo.

Trecho	GOLDER (2022)		NHC (2020)		Adotado	
	Área (km²)	% Área	Av ¹ (km²)	Anv ² (km²)	Av (km²)	Anv (km²)
T-06	0,90	10,5	8,37	0,45	0,88	0,05
T-07	0,21	2,4			0,20	0,01
T-08	0,70	8,1			0,68	0,04

T-09	6,81	79,0			6,61	0,35
Total	8,63	100,00	-		8,37	0,45
T-10	1,94	82,5	1,85	0,05	1,52	0,04
T-11	0,41	17,5			0,32	0,01
Total	2,35	100,00	-		1,85	0,05

¹ AV: área revegetada.

² Anv: área não revegetada.

Considerando que a informação disponível sobre a erosão das planícies é a perda de solo média anual, essa variável do balanço foi incluída nos resultados anuais do modelo. Além disso, estimativas de taxa de erosão disponíveis recentes referente estão disponíveis para um período de análise de 6 meses da estação chuvosa de outubro de 2018 a março de 2019 (NHC, 2020). Desta forma, esse estudo considera que essa taxa de erosão das planícies será fixa, tanto no período chuvoso como no seco, e se mantém constante ao longo dos anos. Essa idealização tende a superestimar o aporte no período seco, mas pode subestimar o aporte em períodos chuvosos com taxas de precipitação maiores do que as observadas entre 2018 e 2019. Por outro lado, o próprio estudo da NHC (2020) indica que a área vegetada tem aumentado ao longo dos anos e, com isso, a perda de solo da planície (vegetada e solo exposto) tende a reduzir, o que não está sendo considerado neste estudo.

4.4.2. Prognóstico do transporte de sedimentos

Rejeitos remanescentes

A partir da simulação do cenário futuro E, foi possível avaliar como o volume de depósitos¹² é transportado da calha do rio em cada trecho de estudo, nos próximos 40 anos (2023 a 2063). Da Figura 111 a Figura 120 está apresentada a variação da carga de rejeito remanescente na calha dos trechos T-06 a T-16 (exceto o trecho T-12 por ser o reservatório de Risoleta Neves) nas simulações futuras do transporte de sedimentos buscando avaliar a recuperação do trecho. Considerando as 100 simulações realizadas nesse cenário, o valor esperado de depósito remanescente (residual) ao final de cada ano é dado pela equação abaixo:

$$RR(i) = RR(i-1) - R(i) \quad 26$$

onde $RR(i-1)$ é o volume de depósito remanescente no início i (final do ano anterior $i-1$), $RR(i)$ é o volume de depósito remanescente no final do ano i e início do ano $i+1$ e $R(i)$ é o volume de depósito eliminado no ano i . O desvio padrão é dado pela equação abaixo.

$$\sigma(i) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{100} (RR(i,j) - \overline{RR}(i))^2}{\overline{RR}(i)}} \quad 27$$

¹² O termo “depósitos” nesse contexto indica a mistura sedimentos + rejeitos depositados no fundo do trecho fluvial investigado. Portanto, indica sedimentos contendo rejeitos.

onde j indica o número de simulações realizadas, variando de 1 a 100.

Os resultados indicam que os trechos a montante de Risoleta Neves tiveram menores variações das quantidades de depósitos remanescentes na calha, como é o caso do trecho T-06 com variação de 10% ao longo dos anos. Nos trechos T-09 a T-10 observa-se uma redução mais lenta do volume total depositado, enquanto o trecho T-11 foi o que teve redução maior até o final do período simulado.

A jusante de Risoleta Neves, o trecho T-13 apresenta 11% do volume total ao final da simulação, enquanto o trecho T-14 fica com valores abaixo de 5% a partir de 2040 e o T-15 a partir de 2060.

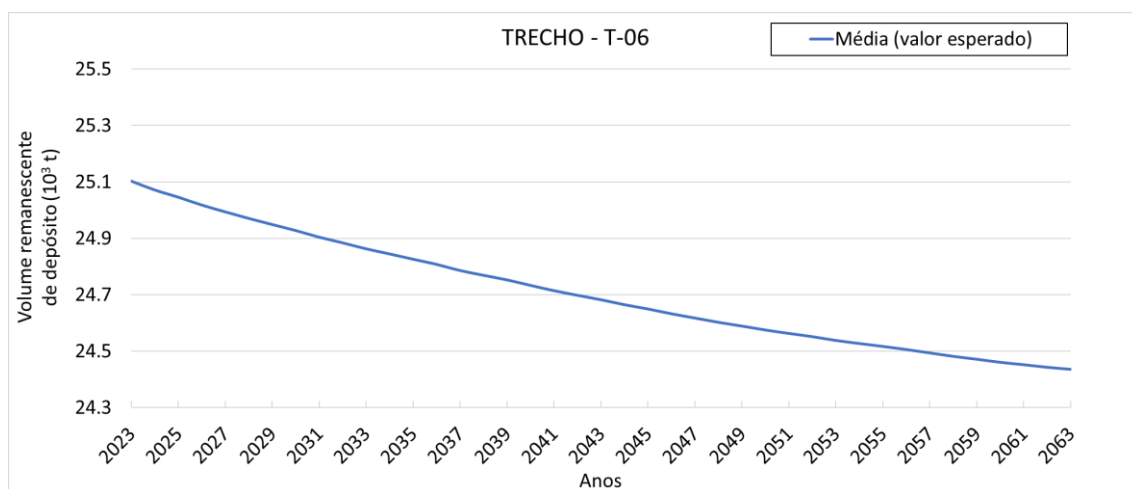


Figura 111. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-06 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.

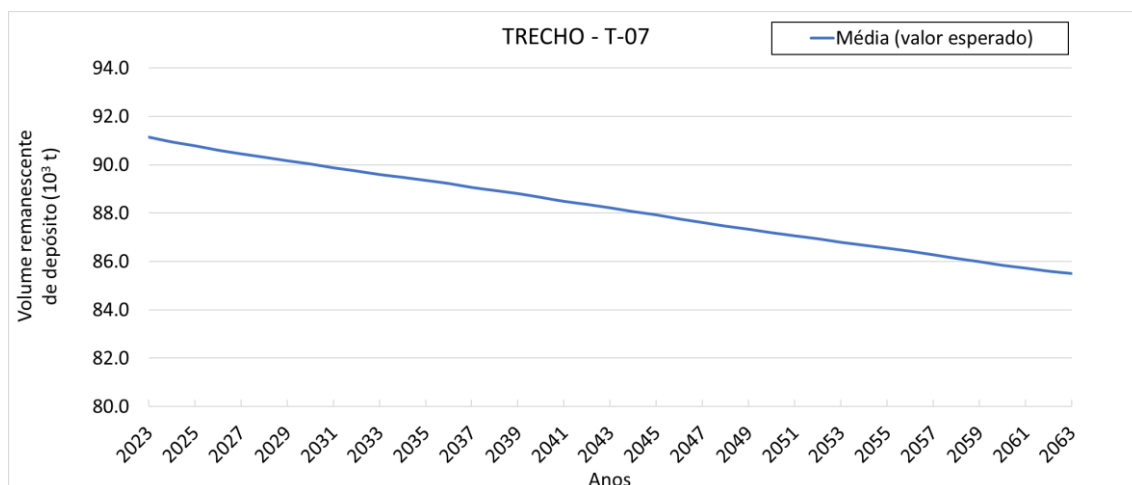


Figura 112. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-07 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.

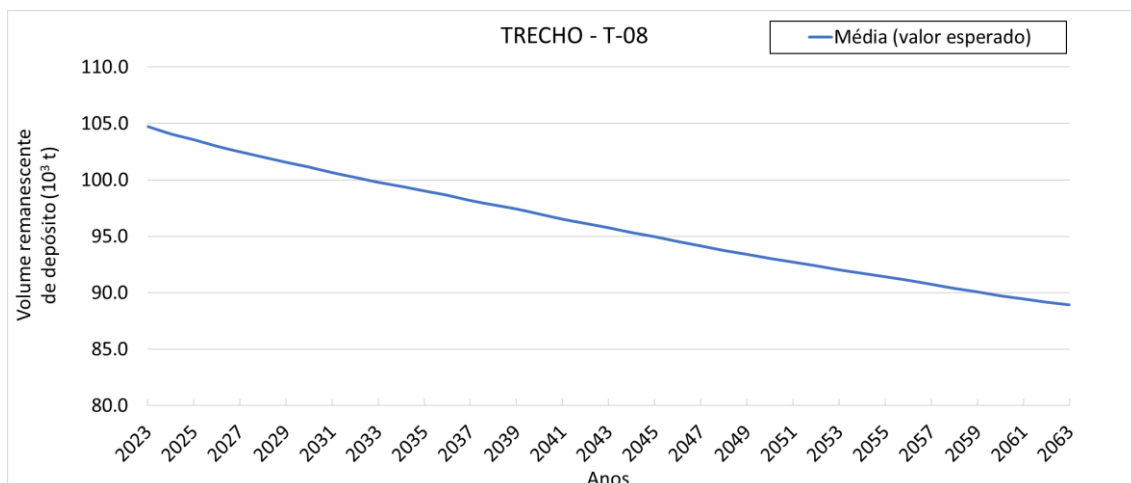


Figura 113. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-08 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.

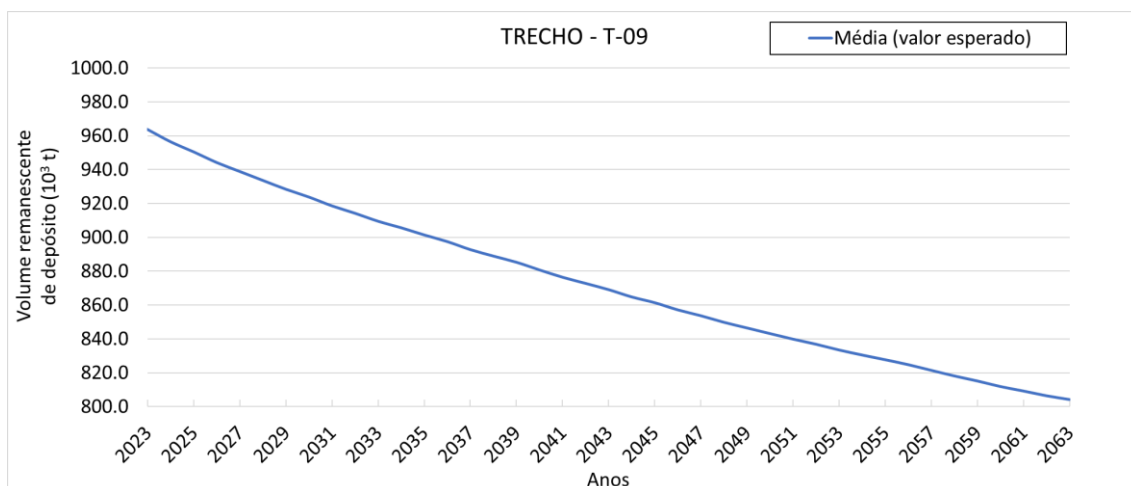


Figura 114. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-09 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.

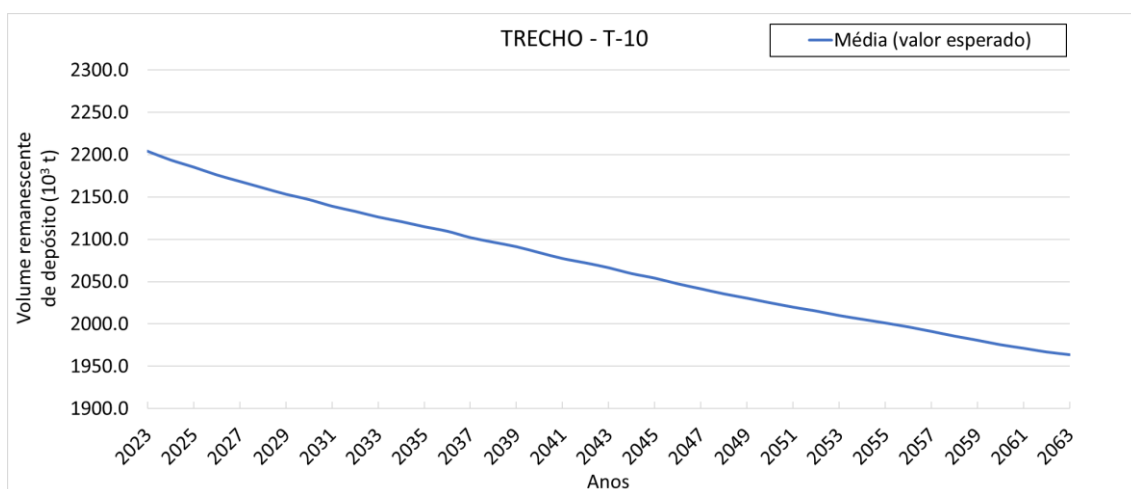


Figura 115. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-10 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.

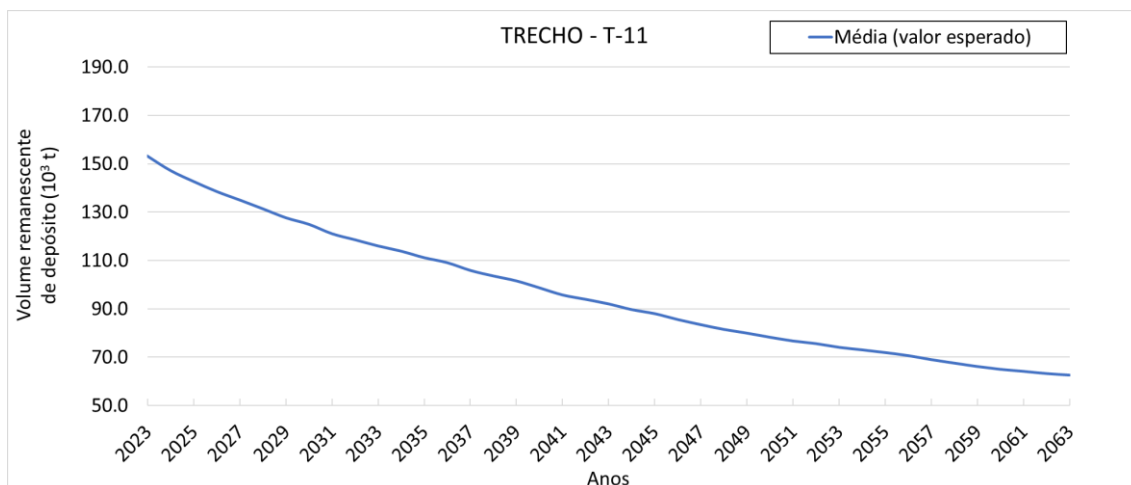


Figura 116. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-11 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.

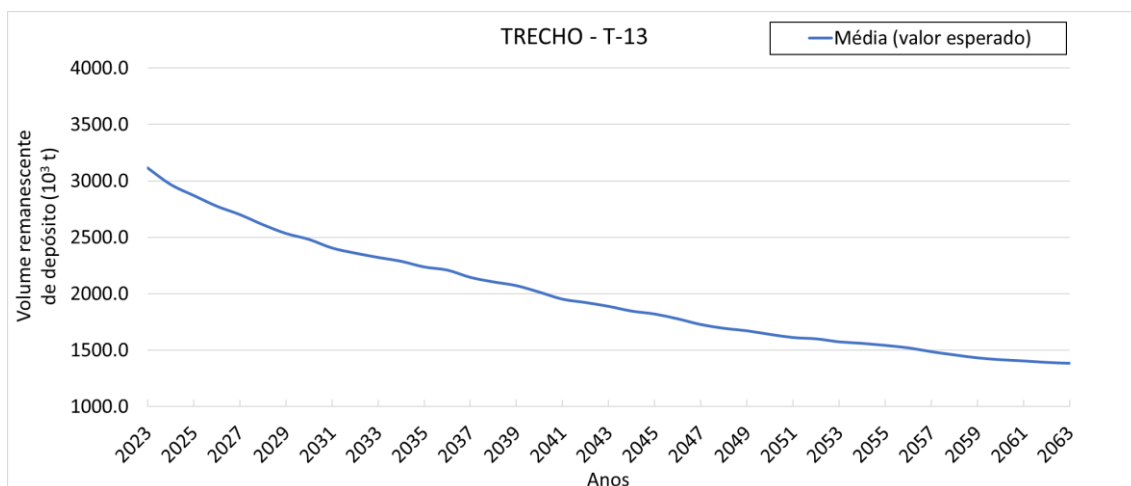


Figura 117. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-13 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.

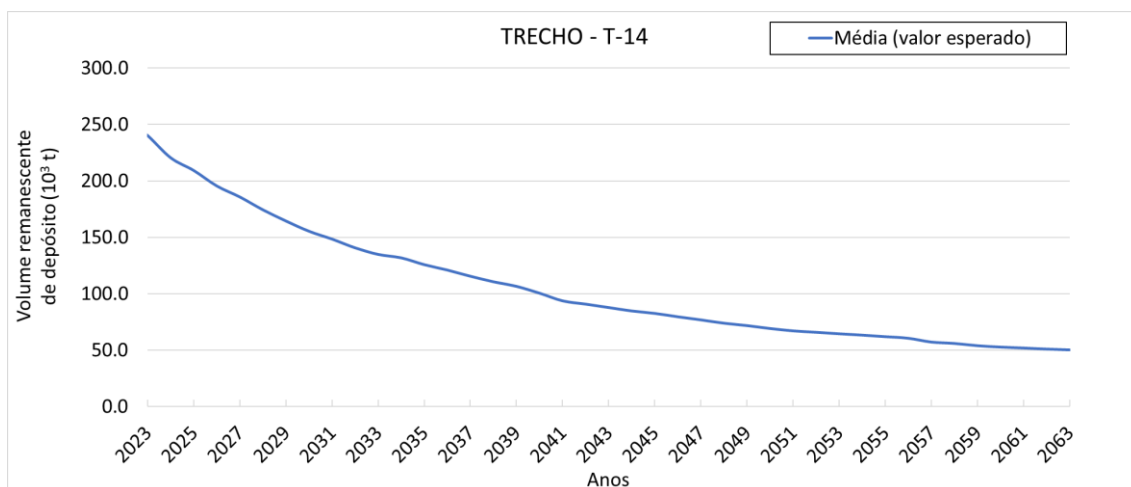


Figura 118. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-14 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.

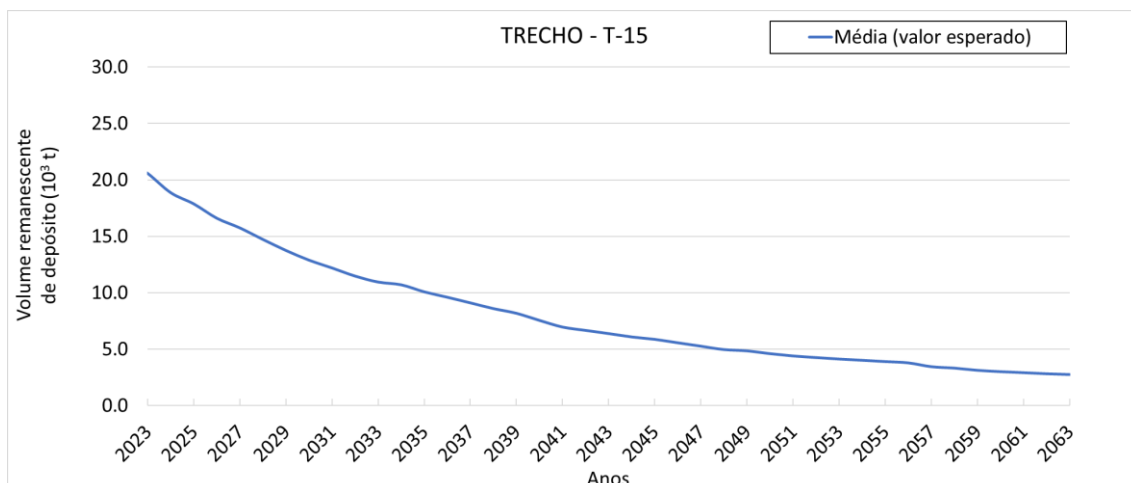


Figura 119. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-15 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.

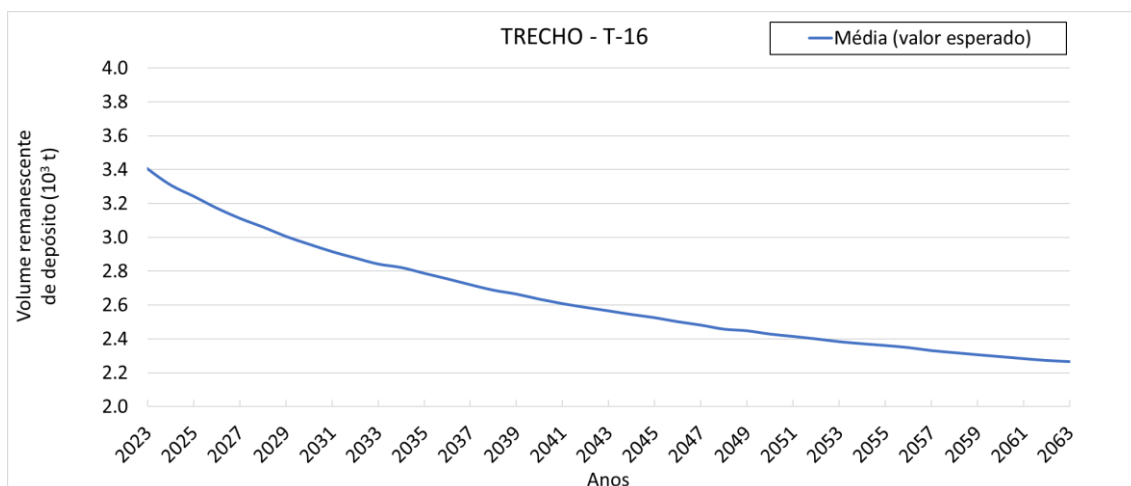


Figura 120. Volume esperado (média entre as 100 simulações realizadas) de rejeito remanescente na calha do trecho T-16 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.

Descargas sólidas

A partir das simulações dos cenários futuros E (após rompimento) e A (de referência, assumindo uma condição natural esperada de ocorrer se não houvesse o rompimento), foi possível avaliar a variação da descarga sólida anual e sua tendência a retornar a valores próximos do esperado caso não houvesse rompimento (cenário A). Destaca-se que, considerando que a informação disponível sobre as taxas de erosão das áreas extracalha vegetada e de solo exposto são valores médios anuais, o aporte de sedimentos dessas áreas foram acrescentados às descargas sólidas anuais estimadas pelo modelo. Desta forma, os resultados de descargas sólidas apresentados neste item consideram o aporte das áreas extracalhas.

Conforme apresentado, esse estudo considera uma taxa de erosão da extracalha fixa, tanto no período chuvoso como no seco, e se mantém constante ao longo dos anos. Considerando um balanço anual, a idealização de contribuição anual das cargas

extracalha tem pouco impacto, pois embora possa subestimar o aporte em períodos chuvosos com taxas de precipitação maiores do que as observadas entre 2018 e 2019 (período de estimativa das taxas de erosão), tende a superestimar o aporte dessas regiões no período seco. Ainda, o aporte dessas áreas é pequeno comparado ao aporte da bacia e espera-se que, para os maiores eventos de chuva, o aporte da bacia e a ressuspensão na calha sejam ainda maiores que o aporte da extracalha.

Da Figura 121 à Figura 130 estão apresentadas as variações percentuais da descarga sólida (Q_s) entre o cenário futuro e o cenário A, em cada trecho de análise, resultantes das simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho buscando avaliar a recuperação do trecho. Nas figuras, a linha vermelha indica a variação do percentual esperado (RQs) em cada ano (i), dado pela média das diferenças das descargas sólidas q_s das 100 simulações realizadas, em cada ano (i).

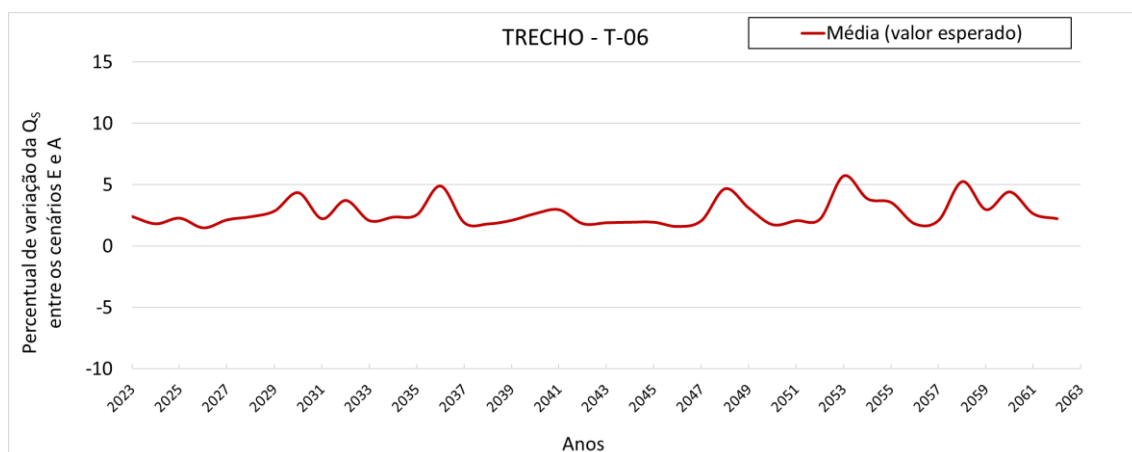


Figura 121. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-06 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho. A linha azul indica o percentual esperado (RQs) em cada ano. As linhas tracejadas indicam os limites superiores (laranja) e inferiores (verde).

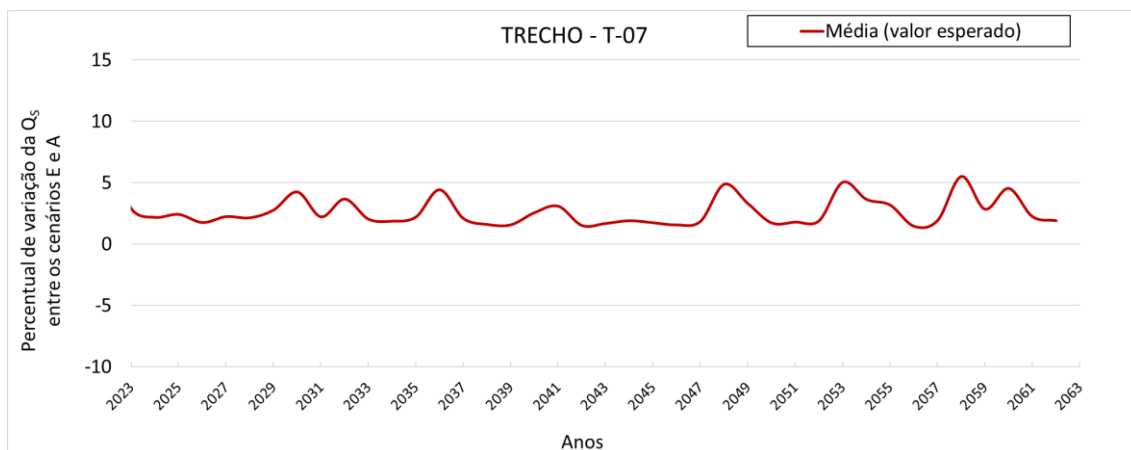


Figura 122. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-07 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.

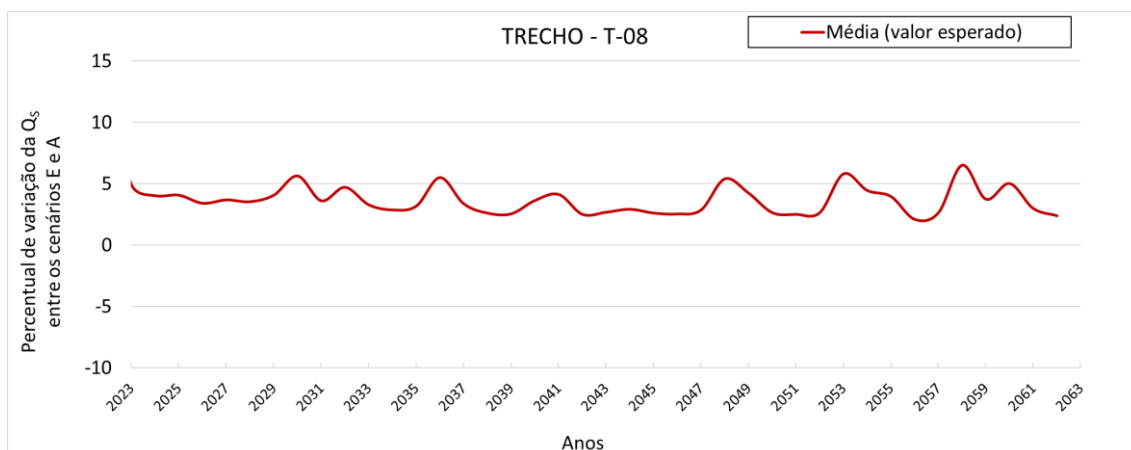


Figura 123. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-08 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.

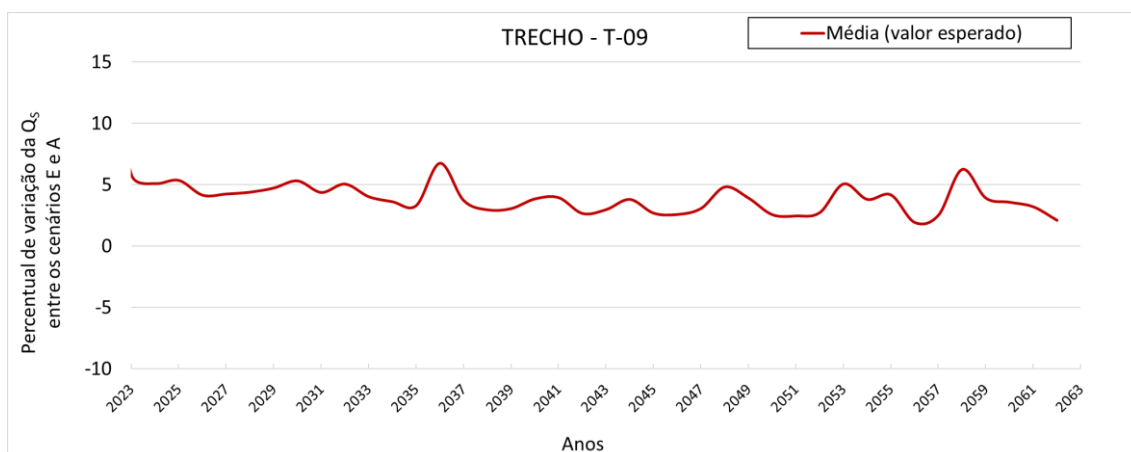


Figura 124. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-09 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.

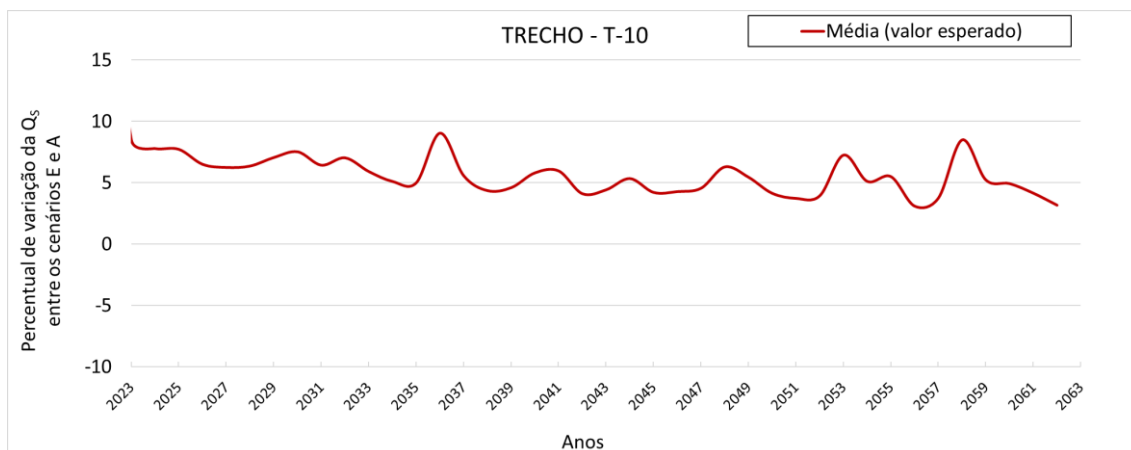


Figura 125. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-10 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.

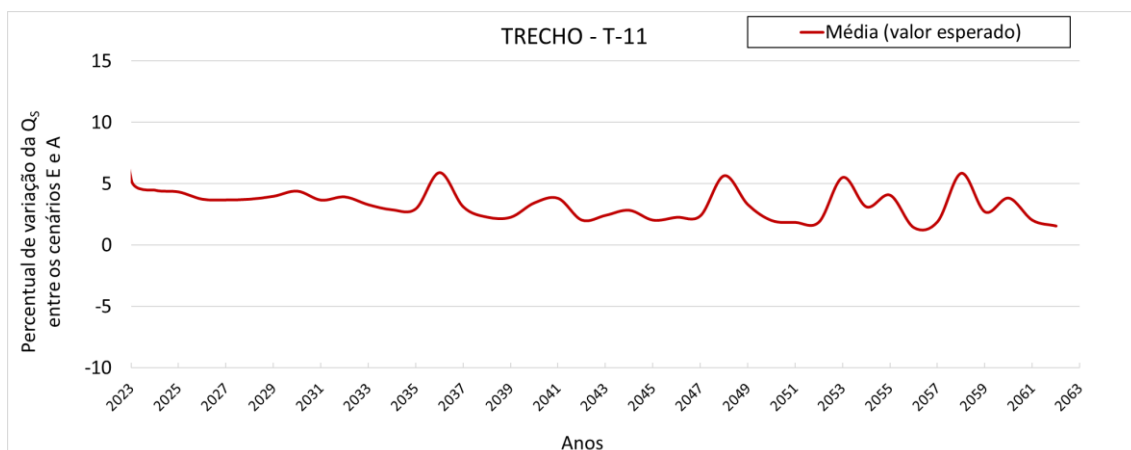


Figura 126. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-11 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.

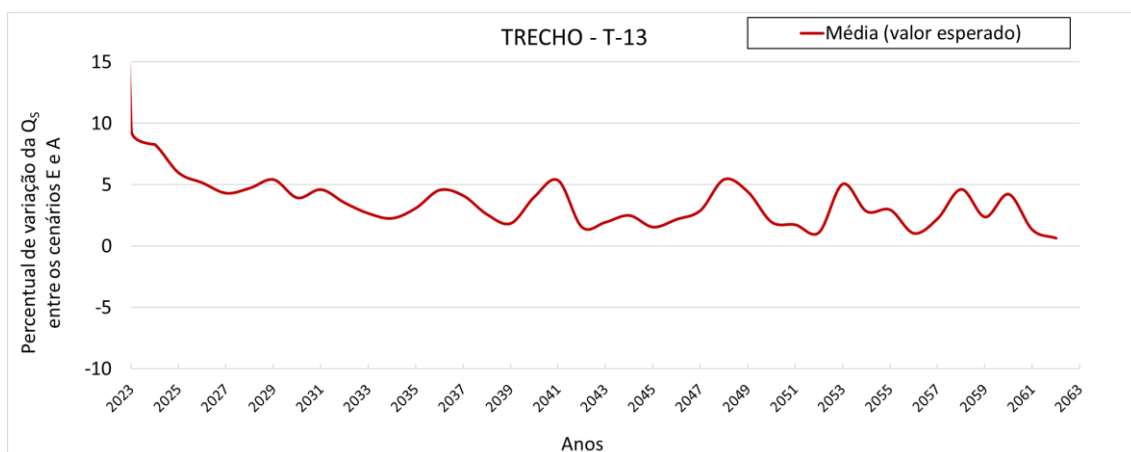


Figura 127. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-13 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.

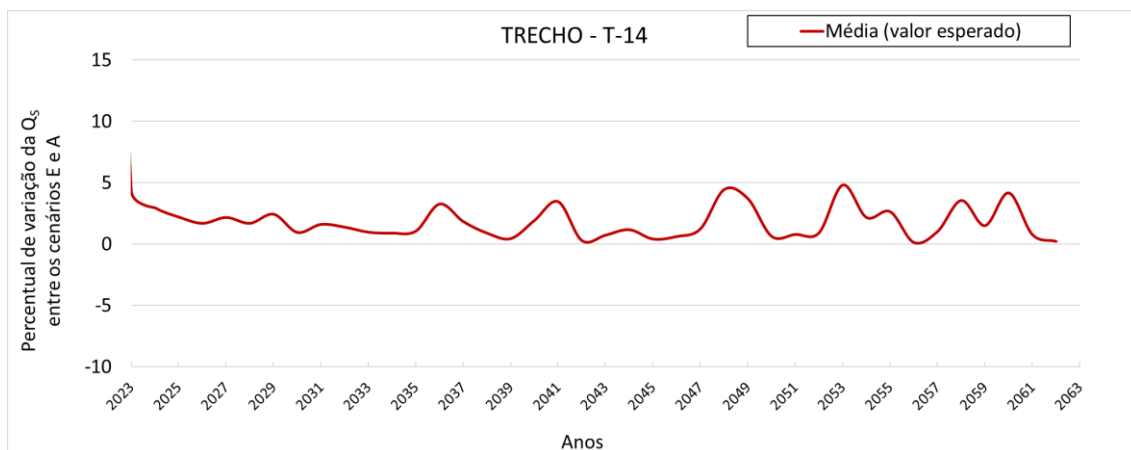


Figura 128. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-14 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.

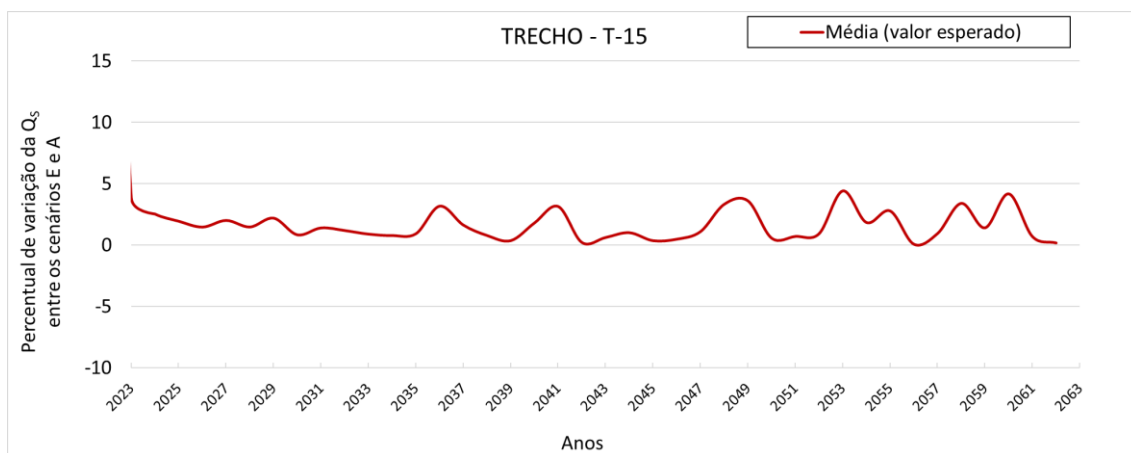


Figura 129. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-15 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.

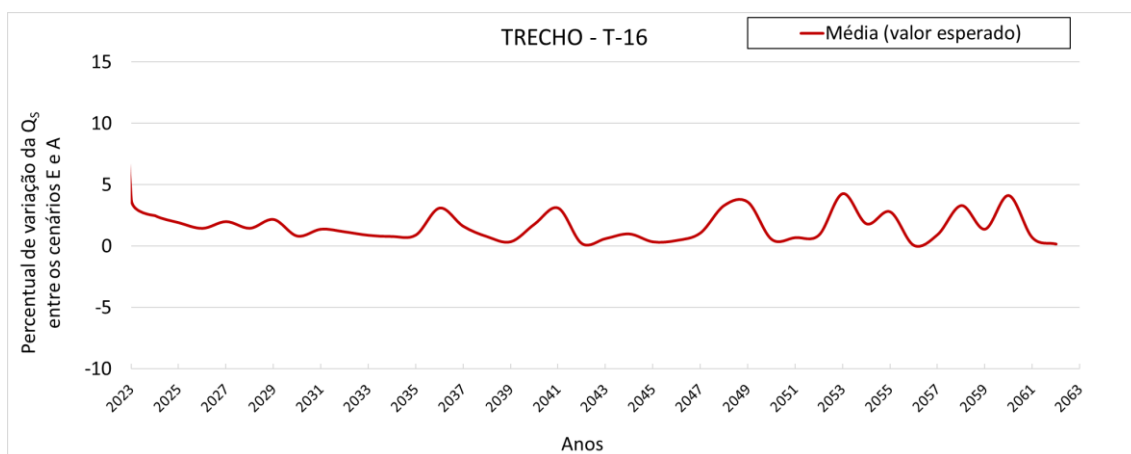


Figura 130. Variação percentual da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), do trecho T-16 nas simulações futuras do transporte de sedimentos no trecho.

Apesar dos trechos apresentarem rejeitos remanescente na calha, a relação da descarga líquida e descarga sólida nestes trechos mostram tendências de representar o comportamento “natural” do trecho, chegando ao final do período simulado com percentual máximo médio de 5% de diferença entre a Qs nos cenários Futuro e A. No entanto, observa-se que diferenças pequenas abaixo de 10% ocorrem em todos os trechos já a partir de 2023.

Importante destacar que o incremento de descarga sólida no cenário futuro com rompimento se deve aos eventos com maiores vazões, os quais tendem a remover mais facilmente rejeitos do fundo, mas as vazões máximas que produzem maiores discrepâncias entre os cenários são aquelas que ocorrem em apenas 5% do tempo.

Na Figura 131 está apresentado um gráfico com as variações percentuais médias (valores esperados nas 100 simulações desse cenário) da descarga sólida (Qs) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento) para todos os trechos (T-06 a T-16). A linha reta tracejada indica a tendência geral dessas variações, a mostra uma tendência de redução ao longo do tempo na diferença no transporte de sedimentos entre os cenários. Também é possível observar que em todos os trechos a variação é inferior a 10% já desde o início do período futuro em 2023, com alguns trechos apresentando variação menores que 5%. O trecho T-10 é o que apresenta as maiores diferenças entre os cenários.

Apesar da baixa diferença entre as Qs nos cenários, observa-se que alguns anos há picos indicando uma maior descarga sólida no período do cenário futuro. Essas variações ocorrem devido ao efeito dos anos aleatórios de chuva selecionados para cada ano das simulações futuras, que irão impactar de forma diferente a dinâmica dos sedimentos nas calhas dos rios caso sejam selecionados anos majoritariamente de cheias.

O que se observa dos resultados desse estudo é que, avaliando os volumes remanescentes de depósitos e as descargas sólidas ao longo dos anos, o comportamento hidrossedimentológico do rio Doce já retornou ou está em processo de retorno às condições pretéritas ao rompimento, mesmo havendo depósitos remanescentes oriundos do rompimento. Portanto, ainda que exista um determinado volume remanescente de depósitos oriundos do rompimento, a taxa de transporte de sedimentos pode retornar a valores similares ao período anterior ao rompimento. Acredita-se que as taxas de transporte de sedimentos sejam mais relevantes para avaliação do retorno do comportamento hidrossedimentológico dos rios estudados do que o volume dos depósitos, ainda remanescentes.

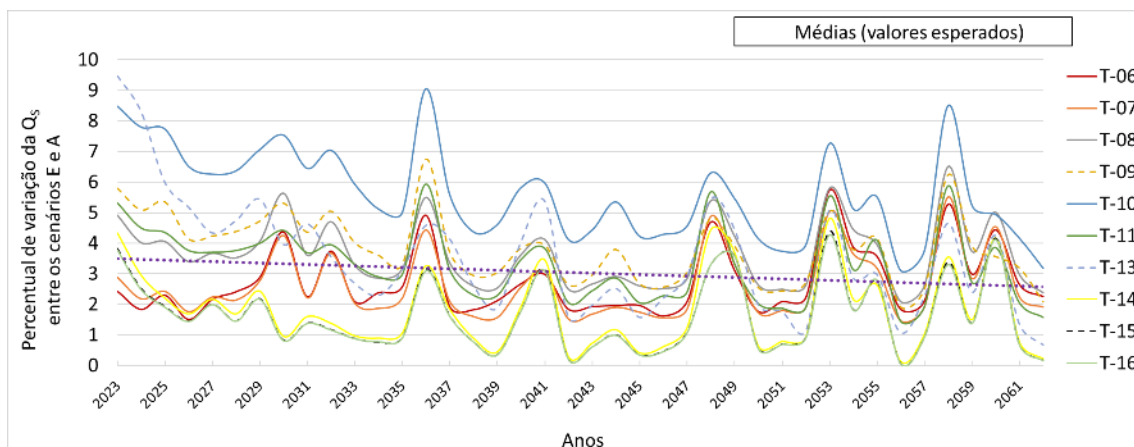


Figura 131. Variação percentual média da descarga sólida (Q_s) entre os cenários E (com rompimento) e o cenário A (de referência, assumindo condição natural possivelmente ocorrida sem o rompimento), em todos os trechos nas simulações futuras do transporte de sedimentos. A linha tracejada preta indica a tendência geral da variação.

4.5. Síntese da discussão

O Cenário A representou o cenário desejado para o rio *sem o rompimento da barragem*, ao longo do período simulado de 2015 a 2022. Os dados de volume depositados nos diferentes trechos e nos reservatórios foram estimados.

O Cenário B corresponde à simulação do período compreendido entre os dias 5 e 25 de novembro, que ocorre desde a ocorrência do rompimento até a chegada da onda a jusante próximo do mar, e obteve o hidrograma de rompimento, a propagação da onda de cheia, a propagação das concentrações simuladas e a estimativa dos volumes de sedimentos acumulados nos trechos e reservatórios, os quais representam as condições iniciais do cenário C.

Na Tabela 34 são apresentados os volumes totais retidos, em todos os trechos sem os reservatórios¹³, no rio Doce para o período com dados até 2022 (cenário C – Cenário A), mostrando que foi estimado uma redução de 63,6 %.

Tabela 34. Valores de volume total retido no rio Doce e a redução para o período (cenário C).

Cenário C		
Ano	Volume	Redução
	hm ³	%
2015	18,2	7,3
2016	14,1	28,2
2017	13,9	29,4
2018	13,6	31,0
2019	13,5	31,3
2020	10,2	48,0
2021	10,1	48,5
2022	7,2	63,6

¹³ Os volumes retidos nos reservatórios depois do rompimento não saem e ficam retidos, portanto, foram analisados em separado.

Observa-se que no início de 2020 e 2022 houve períodos chuvosos significativos, de forma que a redução ficou acima da média com relação a estas simulações.

Os resultados foram analisados separando os volumes depositados por trechos retidos a montante e a jusante da UHE Risoleta Neves. A taxa de ressuspensão do material depositado no leito do rio não é suficiente para ressuspender todo o volume que foi depositado com o rompimento. De fato, grande parte do material depositado tende a se consolidar ao longo do tempo, com possível crescimento de vegetação, além de haver possível formação de encouraçamento (*armouring*)¹⁴. A remobilização deste material pode estar vinculada a ocorrência de eventos de alta magnitude, como os ocorridos durante a passagem da onda de rompimento.

Os dados medidos nos períodos mais recentes mostram uma redução das concentrações e descargas sólidas em relação àquelas observadas logo após o rompimento, o que tem sido um comportamento bem representado pelo modelo adotado neste trabalho. Ressalta-se que os cenários futuros utilizaram como prognósticos cenários hidrológicos já observados no passado, definindo assim anos úmidos e secos. A ocorrência de anos anômalos, com maior quantidade de vazão escoando nos rios pode levar ao aumento das taxas de ressuspensão do material consolidado, transportando os estoques de material depositado para jusante.

No cenário Futuro, a avaliação da recuperação dos trechos de rios afetados pelo rompimento da barragem é analisada segundo a curva vazão sólida x vazão líquida que retratam as condições de transporte de sedimentos em suspensão e pela quantidade remanescente de sedimentos depositados no fundo do rio.

Foram selecionados os postos fluviométricos no qual existiam dados hidrossedimentológicos antes do rompimento e depois do rompimento para determinação da relação vazão sólida x vazão líquida. Existem postos com estes dados somente a jusante da Barragem de Risoleta Neves. Para o trecho de montante (trechos 6 a 11) existe um posto com dados após o rompimento. Os resultados mostraram que o rio indica comportamento de recuperação desta importante função hidrossedimentológica.

A outra avaliação de recuperação do rio é realizada quanto ao volume de rejeitos/sedimentos de fundo resultante do cenário de rompimento. As simulações permitiram estimar que o trecho T-06 tende a reduzir pouco o volume depositado. Nos trechos T-09 a T-10 observa-se uma redução mais lenta do volume total depositado. O trecho T-11 foi o que teve redução maior, mas conforme apresentado essas reduções não são significantes para o transporte de sedimentos nos trechos analisados.

¹⁴ Encouraçamento (*armouring*): processo no qual se retém uma camada de material de granulometria mais grosseira no leito de rios, que tende a reduzir o transporte total devido à maior energia necessária para mobilizá-los e por impedir o movimento dos sedimentos mais finos retidos sob ela (Guia de Assoreamento de Reservatório da ANEEL). Trata-se de uma camada de sedimento mais grosseiro protegendo da erosão uma camada de sedimentos mais finos abaixo dela

A jusante de Risoleta Neves, o trecho T-13 apresenta 11% do volume total ao final do período simulado, enquanto o trecho T-14 alcança valores abaixo de 5% a partir de 2040 e o T-15 a partir de 2060.

O volume de fundo do rio contém sedimentos/rejeitos que tendem a reduzir com o tempo. Este volume de sedimentos adicional no fundo rio pode produzir um aumento de sedimentos durante enchentes de maior magnitude pela ressuspensão deste volume residual.

Apesar de haver volumes remanescente de depósitos, para todos os trechos do rio Doce a curva vazão sólida x vazão líquida mostrar-se voltar à relação anterior ao rompimento, que deve ocorrer provavelmente a partir de 2025, exceto em períodos de cheias como as de 2020 e 2022 que tendem a aumentar a ressuspensão e, consequentemente, elevar as descargas sólidas em suspensão.

Portanto, os resultados desse estudo deixam claro que o rio já retornou as condições que se encontrava antes do rompimento em termos de transporte de sedimentos, que pode ser observado com descarga sólida simulada possuindo diferença de até 5% em relação à descarga sólida do cenário hipotético sem o rompimento. Ainda, verifica-se uma influência baixa da presença de depósitos remanescentes de sedimentos contendo rejeito no transporte de sedimentos em suspensão no rio Doce, o qual está limitada a grandes eventos de vazão que ocorrem em menos de 5% do tempo.

4.5.1. Limitações e Incertezas Associadas

O uso de modelos matemáticos para representação de sistemas físicos apresenta incertezas relacionadas às limitações dos próprios modelos em representar a realidade de um sistema das proporções da bacia do rio Doce. O módulo hidrológico possui uma precisão maior na estimativa da vazão máxima. Na simulação da produção dos sedimentos aumentam as incertezas devido à variabilidade das características dos sedimentos e sua distribuição como a granulometria e o efeito integrado dos processos de erosão e transporte de sedimentos. As incertezas nestes processos são maiores do que na simulação dos processos chuva – vazão.

A amostragem hidrológica dos períodos climáticos foi um fator importante no caso do rio Doce. O regime de vazões na bacia logo após o rompimento se encontrava abaixo da média histórica para toda a bacia, fator que aumenta a tendência de acúmulo de sedimentos no leito do rio.

Como apresentado na descrição do método, a simulação dos fluxos de sedimentos aplicada ao longo de múltiplos anos pode ser utilizada para fornecer estimativas do tempo redução dos sedimentos contendo rejeitos depositados pelo evento nos rios. Destaca-se que além das incertezas mencionadas inerentes aos dados utilizados para ajustar o modelo no período pós rompimento, não se pode prever o comportamento hidrológico dos próximos anos hidrológicos. A avaliação estocástica buscou reduzir a incerteza na representação de períodos futuros. A tendência de redução observada foi associada a dados de dois períodos chuvosos (2018 e 2019), podendo não corresponder

ao comportamento médio de longo período com alternância de estações secas e chuvosas.

Os resultados apresentados foram obtidos a partir da simulação do trecho de estudo (trechos T-06 a T-16). Neste trecho do rio Gualaxo do Norte não há dados disponíveis de concentrações de sedimentos em suspensão para o período anterior ao rompimento. O modelo de sedimentos adotado neste estudo teve seus parâmetros calibrados em 33 estações com dados de sedimentos distribuídos na bacia do rio Doce e, embora nenhuma estação de sedimento exista no rio Gualaxo do Norte, os resultados de descargas sólidas a jusante do rio Gualaxo do Norte podem estar subestimando as descargas sólidas provenientes do Gualaxo do Norte.

Desta forma, nos cenários futuros, a contribuição natural da bacia pode ser representada pelo modelo. Apesar disso, o uso de modelos matemáticos para representação de sistemas físicos apresenta incertezas relacionadas às limitações dos próprios modelos em representar a realidade de um sistema das proporções da área de estudo. Na simulação da produção dos sedimentos há incertezas devido à variabilidade das características dos sedimentos e sua distribuição espaço-temporal, além do efeito integrado dos processos de erosão e transporte de sedimentos.

No cenário B, no qual foi simulado o rompimento da barragem de Fundão, foram estimados os volumes de rejeitos depositados nos trechos de rios impactados. Como resultado, todo o volume de sedimentos depositados estimado corresponde a material proveniente da barragem

Importante considerar que a passagem da onda de cheia gerada pelo rompimento da barragem de Fundão levou à formação de depósitos de rejeitos ao longo das planícies de inundação dos trechos de rios impactados a montante da UHE Risoleta Neves. Para efeitos deste estudo, assim como adotado no balanço realizado por NHC (2020), considera-se que os depósitos extracalha estão estabilizados e a sua contribuição de carga de sedimentos é estimada como carga de “planície de inundação” (área impactada) e foram adotadas a taxas de erosão obtidas diretamente das análises realizadas pela empresa Golder e apresentadas no estudo da NHC (2020). No entanto, como os valores das taxas são médios anuais, a contribuição das planícies em cada trecho foi acrescentada aos resultados do modelo para se estimar o aporte de sedimentos final. Embora os valores sejam pequenos comparados ao fluxo total de sedimentos, a taxa de erosão das planícies foi assumida como constante a cada ano futuro, independentemente de o regime hidrológico ser acima ou abaixo da média. Nos anos secos, por exemplo, a contribuição percentual das planícies impactadas será maior do que nos anos úmidos. Além disso, os percentuais da área de planície vegetada e de solo exposto foram mantidos constantes ao longo das simulações, embora espere-se um aumento da área vegetada ano a ano e, com isso, uma redução progressiva do aporte total das planícies impactadas.

Além das limitações e incertezas apresentadas acima, inclui-se:

- Foram considerados processos de ressuspensão e deposição de material coesivo, estando a ressuspensão limitada ao volume de material depositado que foi estimado pela simulação do rompimento de Fundão (cenário B) e eventual deposição ao longo das simulações;
- Todo o processo de ressuspensão de material coesivo (silte e argila) é complexo e os resultados obtidos são uma aproximação do que ocorreu após o evento, tendo sido ajustados aos dados observados;
- A estimativa da redução de depósitos contendo rejeitos da calha dos trechos de rios impactados depende das condições hidráulicas do escoamento, as quais são dependentes das características das seções dos rios como largura, profundidade, rugosidade e declividade. Tais características foram obtidas a partir de modelos digitais de elevação e os resultados hidrológicos e hidráulicos do modelo foram avaliados com a calibração dos parâmetros (ver RHAMA (2020), capítulos 5 e 6). Apesar do modelo ter conseguido representar bem o comportamento hidrológico e hidráulico da área de estudo, há incertezas nos resultados e, consequentemente, nas estimativas de redução de depósitos contendo rejeitos do fundo em cada trecho;
- A geração estocástica dos anos futuros, utilizado no prognóstico do transporte de sedimentos para jusante, assume uma distribuição uniforme de probabilidades para os anos passados, esta distribuição assume que cada ano tem uma probabilidade uniforme de ocorrer num cenário futuro. Desta forma, desconsidera-se eventuais efeitos de mudanças climáticas ou alterações do regime hidrológicos da bacia;
- A taxa de remoção de sedimento das planícies foi considerada como uma contribuição aos resultados do modelo, porém adotou-se uma taxa constante ao longo dos anos e percentuais de áreas vegetadas e de solo expostos fixos. Essa idealização tende a superestimar o aporte no período seco, mas pode subestimar o aporte em períodos chuvosos com taxas de precipitação maiores do que as observadas nos períodos chuvosos dos anos (2018 e 2019) considerados no estudo que as estimaram. Por outro lado, verifica-se uma tendência de aumento da área extracalha vegetada e redução da de solo exposto, com consequente redução da erosão nessas áreas, o que não está sendo considerado neste estudo. Desta forma há incertezas em relação a real contribuição futura dessas áreas impactadas;
- O passo de tempo de um modelo deve ser compatível com o tempo de concentração da bacia. Neste estudo, embora o rio Gualaxo tenha tempo de concentração inferior a 24h, o modelo adotou passo de tempo diário devido às limitações de dados existentes apenas nessa escala de tempo. Desta forma, é possível que haja uma subestimativa na ressuspensão de rejeitos da calha pelo fato do modelo não representar necessariamente os picos das vazões e, consequentemente, pode levar à uma redução do tempo para a redução dos depósitos de sedimentos contendo rejeitos.

5. CONCLUSÕES

Esse estudo realizou simulações hidrológica e sedimentológica da bacia do rio Doce para cenários relacionados com o rompimento da barragem de Fundão, avaliação do balanço hídrico, hidrológico e de sedimentos da bacia. Com esse propósito, foram utilizados dados hidrossedimentológicos disponíveis na bacia, coletados antes e depois do rompimento da barragem, para dar suporte ao estudo.

A simulação da produção, transporte e balanço de sedimentos na bacia do rio Doce foi desenvolvida utilizando-se um modelo hidrossedimentológico e o modelo foi capaz de representar a produção de sedimentos na bacia hidrográfica e seu transporte pela rede drenagem, gerando resultados para os trechos T-6 a T-16 do PMR.

O presente estudo apresentou resultados avaliados de forma distribuída e integrada em toda a área de estudo. As contribuições da bacia, assim como o impacto do rompimento e a dinâmica dos sedimentos pós rompimento foram avaliados com critérios e adotando dados observados para respaldar os resultados. Desta forma, as simulações realizadas apresentam-se como informações úteis para o estudo dos fluxos de sedimentos e para avaliação da recuperação da área.

Para representar o comportamento hidrossedimentológico do rio Doce foi utilizado e adaptado um modelo distribuído hidrológico e de sedimentos de toda a bacia do rio Doce, o MGB-SED. Este modelo foi calibrado e validado com dados hidrológicos e sedimentológicos observados, ou seja, dados obtidos ou coletados em campo. Dessa forma, o modelo MGB-SED desenvolvido é considerado satisfatório, sendo também importante uma análise visual (gráficos) dos dados observados e simulados para adequada interpretação dos resultados.

Para simular as condições relacionados ao rompimento da bacia foram definidos quatro cenários, para os quais foram apresentados resultados para todos os locais com dados na bacia e os volumes acumulados foram estimados para cada um dos trechos definidos nos PMRs. Os resultados desses cenários foram analisados separando os volumes depositados por trechos retidos a montante e a jusante da UHE Risoleta Neves. A taxa de ressuspensão do material depositado no leito do rio não é suficiente para ressuspender todo o volume que foi depositado com o rompimento. De fato, grande parte do material depositado tende a se consolidar ao longo do tempo, com possível crescimento de vegetação, além de haver possível formação de encouraçamento (*armouring*)¹⁵. A remobilização deste material pode estar vinculada a ocorrência de eventos de alta magnitude, como os ocorridos durante a passagem da onda de

¹⁵ Encouraçamento (*armouring*): camada superior do leito com a presença predominante de sedimentos mais grosseiros que se encontra em contato com o fluxo, que por sua vez atenua a erosão e o transporte do material mais fino que se encontra abaixo dela (tendência a diminuir a taxa de transporte de sedimentos). Esse fenômeno é amplamente documentado em manuais técnicos de instituições nacionais e internacionais, e literatura técnica especializada (Carvalho et. al, 2000; USBR, 1987, USACE, 1999, 2016; ICOLD, 1989; Carvalho, 2008; VANONI, 1977; dentre outros)

rompimento, porém esses são evento que tendem a ocorrer com baixa frequência, em menos de 5% do tempo.

Os resultados do cenário C indicam a redução dos volumes específicos de depósitos de sedimentos remanescentes na calha ao longo do rio Doce com o tempo. Destaca-se que os volumes remanescentes em cada ano não correspondem necessariamente à rejeitos da barragem de Fundão, visto que, ao longo do tempo, o volume disponível para remoção passa a ser uma soma de rejeito depositado após o rompimento e de parcela de sedimentos finos provenientes da bacia. Os trechos T-13 e T-14 foram aqueles com maior percentual de redução do volume de depósito de sedimentos remanescentes, e, portanto, são os que mais tendem a se aproximar do cenário que simula a situação da bacia sem a ocorrência do rompimento (cenário A).

Ainda no período após o rompimento, de 2015 a 2022, os resultados desse estudo indicam que, ao longo dos anos, há uma tendência de redução das vazões sólidas, se aproximando ao cenário sem rompimento (cenário A) e, conseqüentemente, ao período anterior ao rompimento. Já nos trechos mais a jusante, especialmente após os reservatórios de Aimorés e Mascarenhas, os resultados do modelo indicam que as descargas sólidas foram menos afetadas pelo rompimento e já teriam um comportamento semelhante àquele antes do evento tendo como base o cenário A, o qual representa um comportamento esperado caso o evento não tivesse ocorrido.

Portanto, os resultados do modelo para o cenário C indicam que a concentração de sedimentos em suspensão e as descargas sólidas se encontram semelhantes àquelas observadas no período pré-rompimento em 95% do tempo, em todos os trechos.

Para uma condição futura (a partir de 2023), os resultados do modelo indicam que a relação da descarga líquida e descarga sólida mostra tendências de representar o comportamento “natural” dos trechos já a partir de 2025, quando é possível observar que diferenças pequenas entre 5% e 10% ocorrem em todos os trechos. Importante destacar que o incremento de descarga sólida no cenário futuro com rompimento se deve aos eventos com maiores vazões, os quais tendem a remover mais facilmente sedimentos do fundo, mas as vazões máximas que produzem maiores discrepâncias entre os cenários são aquelas que ocorrem em apenas 5% do tempo. Destaca-se que os sedimentos transportados de montante para jusante são aqueles finos que permanecem em suspensão e chegam ao oceano e, dessa forma, não se depositam nos trechos de rio de jusante em volume importante.

Em termos de volumes de depósitos na intracalha, a partir das simulações, estima-se que o trecho T-06 tende a reduzir pouco o volume depositado (10% ao longo de todo o período simulado futuro). Nos trechos T-09 a T-10 observa-se uma redução mais lenta do volume total depositado, restando ainda ao final do período simulado cerca de 50%. O trecho T-11 foi o que teve redução maior, restando certa de 16% ao final do período futuro. A jusante de Risoleta Neves, o trecho T-13 apresenta 11% do volume total, enquanto o trecho T-14 e T-15 ficam com valores abaixo de 5%.

Apesar de haver volumes remanescente de depósitos, para todos os trechos do rio Doce a curva vazão sólida x vazão líquida mostra o retorno à relação anterior ao rompimento, que deve ocorrer provavelmente a partir de 2025, exceto em períodos de cheias como as de 2020 e 2022 que tendem a aumentar a ressuspensão e, consequentemente, elevar as descargas sólidas em suspensão. Portanto, a recuperação natural do rio está em processo avançado e o rio já se encontra visivelmente com menor concentração de sedimentos.

Apesar dos trechos apresentarem rejeitos remanescente na calha, a relação da descarga líquida e descarga sólida nestes trechos mostram tendências de representar o comportamento “natural” do trecho, chegando ao final do período futuro simulado com percentual máximo médio de 5% de diferença entre as descargas sólidas (Q_s) nos cenários futuro e A. No entanto, observa-se que diferenças pequenas abaixo de 10% ocorrem em todos os trechos já a partir de 2025.

Portanto, os resultados desse estudo deixam claro que o rio já retornou as condições de transporte de sedimentos que se encontrava antes do rompimento, apresentando influência baixa da presença de depósitos remanescentes de sedimentos contendo rejeito nesse transporte e limitada a grandes eventos de vazão que ocorrem em menos de 5% do tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987). NBR-7217. AGREGADOS – DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA. RIO DE JANEIRO.
- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS - ANA HIDROWEB. DISPONÍVEL EM: <[HTTP://WWW](http://www.ana.gov.br)
- ALMEIDA, L.M. (2021). ANÁLISE DE METODOLOGIAS PARA O CÁLCULO DE DESCARGA DE FUNDO, APLICADA AO RIO DOCE, ES. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO. UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, VITÓRIA, ES. 152 P.
- DELA COSTA, F. P. (2021). IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA VAZÃO E NA DINÂMICA DE SEDIMENTOS EM GRANDES BACIAS HIDROGRÁFICAS: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO DOCE. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO. UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, VITÓRIA, ES. 163 P.
- ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M.; SPAVOREK, G. (2013). KÖPPEN'S CLIMATE CLASSIFICATION MAP FOR BRAZIL. METEOROLOGISCHE ZEITSCHRIFT, V. 22, N. 6, P. 711-728. DISPONÍVEL EM [HTTPS://WWW.IPEF.BR/GEODATABASE/](https://www.ipef.br/geodatabase/). ACESSO EM 23 ABR. 2019.
- AMBILEV (2017). ESTUDOS AMBIENTAIS DE AVALIAÇÃO DO RISCO DE CONTAMINAÇÃO DAS LAGOAS - LINHARES.
- AMBILEV OCEANOGRAFIA E HIDROGRAFIA LTDA (2018). ESTUDOS AMBIENTAIS DE AVALIAÇÃO DO RISCO DE CONTAMINAÇÃO DAS LAGOAS – LINHARES (PLAN 007_REV00.DWG).
- AMBILEV OCEANOGRAFIA E HIDROGRAFIA LTDA (2019). LEVANTAMENTO TOPOBATIMÉTRICO E TESTEMUNHAGEM AO LONGO DO RIO GUALAXO DO NORTE.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2005). RESERVA DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA PARA O APROVEITAMENTO HIDRELÉTRICO DE BAGUARI. NOTA TÉCNICA Nº 323/SOC/2005. PROCESSO NÚMERO 02501.000849/2005-81. 27 P.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2009). MEDIÇÃO DE DESCARGA LÍQUIDA EM GRANDES RIOS. MANUAL TÉCNICO/ANA – BRASÍLIA. 88 P, ISBN: 987-85-89629-34-8.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2014). GEONETWORK. MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE) DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL (CÉLULAS DE 1 M), IMAGENS DE SATÉLITE DE ALTA RESOLUÇÃO (0,5 M), PONTOS DE CONTROLE E CURVAS DE NÍVEL COM EQUIDISTÂNCIA DE 1 M PARA OS 26 MUNICÍPIOS ELENCADOS PELO COMITÊ DE BACIA DO RIO DOCE. DISPONÍVEL EM: [HTTP://METADADOS.ANA.GOV.BR/GEONETWORK/SRV/PT/MAIN.HOME](http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home). ACESSO EM: 03 JUN. 2019.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2016). ENCARTE ESPECIAL SOBRE A BACIA DO RIO DOCE: ROMPIMENTO DA BARRAGEM EM MARIANA (MG). INFORME 2015, BRASÍLIA.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2018). BOLETIM DE MONITORAMENTO DOS RESERVATÓRIOS DA BACIA DO RIO DOCE. BRASÍLIA, V. 13, Nº 11, 22 P.

- APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (2017). STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. 23 ED. WASHINGTON, EUA: APHA, AWWA, WEF. 1v.
- ARINO, O. R., KALOGIROU, V., BONTEMPS, S., DEFOURNY, P., & VAN BOGAERT, E. (2009). GLOBAL LAND COVER MAP FOR 2009 (GLOBCOVER 2009). © EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA) & UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN (UCL), DOI:10.1594/PANGAEA.787668.
- BATES, P. D., HORRITT M. S., FEWTRELL T. J. (2010). A SIMPLE INERTIAL FORMULATION OF THE SHALLOW WATER EQUATIONS FOR EFFICIENT TWO-DIMENSIONAL FLOOD INUNDATION MODELLING, J. HYDROL., v. 387, pp. 33–45.
- BAYER, D. M.; COLLISCHONN, W. (2013). "DEFORESTATION IMPACTS ON DISCHARGE OF THE JI-PARANÁ RIVER BRAZILIAN AMAZON" IN ANAIS DO CLIMATE AND LAND SURFACE CHANGES IN HYDROLOGY PROCEEDINGS OF H01, IAHS-IAPSOIASPEI ASSEMBLY.
- BIEDENHARN, D. S. ET AL (2000). EFFECTIVE DISCHARGE CALCULATION: A PRACTICAL GUIDE. ENGINEER RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER CATALOGING – IN- PUBLICATION DATA. P. 63.
- BIGARELLA, J. (2003). ESTRUTURA E ORIGEM DAS PAISAGENS TROPICAIS E SUBTROPICAIS. FLORIANÓPOLIS: EDITORA UFSC v.3, p. 877-1436.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). RESOLUÇÃO CONAMA Nº 357, DE 17/03/2005. DISPÕE SOBRE A CLASSIFICAÇÃO DOS CORPOS DE ÁGUA E DIRETRIZES AMBIENTAIS PARA O SEU ENQUADRAMENTO, BEM COMO ESTABELECE AS CONDIÇÕES E PADRÕES DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES, E DÁ OUTRAS PROVIDÊNCIAS.
- BRUNET, R.A. (2014). MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE DESCARGA SÓLIDA EM RIOS – ANÁLISE COMPARATIVA. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO. UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, VITÓRIA, ES. 147 P.
- BRUNNER, G. W. (2008). HEC-RAS, RIVER ANALYSIS SYSTEM, HYDRAULIC REFERENCE MANUAL: VERSION 4.0. DAVIS, CALIFORNIA: US ARMY CORPS OF ENGINEERS, HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 747P.
- BUARQUE, D. C. (2015). "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 (IPH-UFRGS), PORTO ALEGRE, BRAZIL, P. 182.
- BUARQUE, D. C. ; FAN, F. M. ; PAZ, A. R. ; COLLISCHONN, W. (2009). COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA DEFINIR DIREÇÕES DE ESCOAMENTO A PARTIR DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVACÃO. REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS, v. 14, p. 91-103.
- BUARQUE, D. C.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. (2008). EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE PARÂMETROS FÍSICOS DE BACIAS HIDROGRÁFICAS A PARTIR DO MNT PARA UTILIZAÇÃO EM

- MODELOS HIDROLÓGICOS. IN SIMPÓSIO SUL-SUDESTE DE RECURSOS HÍDRICOS, ABRH, RIO DE JANEIRO (RJ).
- CANDONGA (2019). CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS. UHE RISOLETA NEVES. DISPONÍVEL EM: [HTTP://WWW.CANDONGA.COM.BR/](http://www.candonga.com.br/). ACESSO EM 23/05/2019.
- CARMO, F. F., ET AL. (2017). FUNDÃO TAILINGS DAM FAILURES: THE ENVIRONMENT TRAGEDY OF THE LARGEST TECHNOLOGICAL DISASTER OF BRAZILIAN MINING IN GLOBAL CONTEXT. PERSPECTIVE IN ECOLOGY AND CONSERVATION, V. 15 (3), PP. 145-151. DOI 10.1016/J.PECON.2017.06.002.
- CARVALHO, N. O., FILIZOLA JUNIOR, N.P., SANTOS, P.M.C., LIMA, J.E.F.W. (2000). GUIA DE PRÁTICAS SEDIMENTOMÉTRICAS. BRASÍLIA: ANEEL. 154 P.
- CBDB – COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (2009). MAIN BRAZILIAN DAMS III: DESIGN, CONSTRUCTION AND PERFORMANCE. CAPÍTULO 2, PÁG. 19-31.
- CENTRO DE INOVAÇÃO E TECNOLOGIA SENAI -CIT. AMBIENTES AQUÁTICOS EM MINAS GERAIS: QUALIDADE ECOLÓGICA / ORGANIZADORES HELENA LÚCIA MENEZES FERREIRA, MÁRCIA COUTO DE MELO, MARIANA D'ÁVILA FONSECA P. P. FREITAS, SYLVIA T. MEYER, MÔNICA DE CÁSSIA SOUZA CAMPOS, GLAYSIMARA A. FELIPE – BELO HORIZONTE: CIT, 2017
- CFT – GRUPO DA FORÇA-TAREFA. (2015). AVALIAÇÃO DOS EFEITOS E DESDOBRAMENTOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO EM MARIANA-MG. DISPONÍVEL EM: [HTTP://WWW.AGENCIAMINAS.MG.GOV.BR/CKEDITOR_ASSETS/ATTACHMENTS/770/RELATORIO_FINAL_FT_03_02_2016_15H5MIN.PDF](http://www.agenciaminas.mg.gov.br/ckeditor_assets/attachments/770/relatorio_FINAL_FT_03_02_2016_15H5MIN.PDF).
- CH2M (2017). PLANO DE MANEJO DE REJEITO. FUNDAÇÃO RENOVA, JULHO DE 2017.
- CHANG H. H. (1988). FLUVIAL PROCESSES IN RIVER ENGINEERING. JOHN WILEY & SONS, NEW YORK 432 P.
- CHANSON, H. (2004). THE HYDRAULICS OF OPEN CHANNEL FLOW: AN INTRODUCTION. BUTTERWORTH-HEINEMANN, 2 ED., OXFORD, UK.
- CHRISTOFOLETTI, A. (1981). GEOMORFOLOGIA FLUVIAL. SÃO PAULO: EDGAR BLUCHER LTDA. 313 P.
- COLLISCHONN, W. (2001). SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DE GRANDES BACIAS. TESE. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL, UFRGS.
- COLLISCHONN, W. ; BUARQUE, D. C. ; PAZ, A. R. ; MENDES, C. A. B. ; FAN, F. M. (2010). IMPACT OF PIT REMOVAL METHODS ON DEM DERIVED DRAINAGE LINES IN FLAT REGIONS. IN: AWRA SPECIALTY CONFERENCE GIS AND WATER RESOURCES VI, 2010, ORLANDO. AWRA SPECIALTY CONFERENCE GIS AND WATER RESOURCES VI.
- COLLISCHONN, W., TUCCI, C.E.M. (2001). SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DE GRANDES BACIAS. TESE DE DOUTORADO. INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (IPH-UFRGS), PORTO ALEGRE, BRAZIL, P. 270.
- COPPETEC - FUNDAÇÃO COORDENAÇÃO DE PROJETOS, PESQUISAS E ESTUDOS TECNOLÓGICOS (2016). AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA RUPTURA DA BARRAGEM DE REJEITOS DE FUNDÃO EM

MARIANA NOVE MESES APÓS O DESASTRE. CAPÍTULO 2 – AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA. COPPE 20275, 82 p.

- COPPETEC (2020). RELATÓRIO DE PROCESSOS SEDIMENTOLÓGICOS CONEXOS AO RIO DOCE E AOS RIOS ADJACENTES – ETAPA 3. RELATÓRIO TÉCNICO PREPARADO PARA VALE S.A. E FUNDAÇÃO RENOVA. MAIO DE 2020.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (2016). MONITORAMENTO ESPECIAL DA BACIA DO RIO DOCE. RELATÓRIO 04: HIDROMETRIA, SEDIMENTOMETRIA E QUALIDADE DA ÁGUA NAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA RHN APÓS A RUPTURA DA BARRAGEM DE REJEITO. BELO HORIZONTE, MAIO DE 2016.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (2019). SISTEMA DE GEOCIÊNCIAS DO SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. DISPONÍVEL EM [HTTP://GEOSGB.CPRM.GOV.BR/](http://geosgb.cprm.gov.br/). ACESSO EM 23 ABR.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. DISPONÍVEL EM GEO SGB (<[HTTP://GEOSGB.CPRM.GOV.BR](http://geosgb.cprm.gov.br/))
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL; ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2015). MONITORAMENTO ESPECIAL DA BACIA DO RIO DOCE. RELATÓRIO 01: ACOMPANHAMENTO DA ONDA DE CHEIA. BELO HORIZONTE, DEZEMBRO DE 2015.
- CRISCI, M.; CHRETIES, C.; SILVEIRA, L. (2015). SIMULACIÓN HIDROLÓGICA CONTINUA EN LA CUENCA DEL RÍO CUAREIM CON EL MODELO MGB-IPH. INNOTECH, v. 10, pp. 40-48.
- CUNHA, S. B. (2001A). GEOMORFOLOGIA FLUVIAL. IN: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. (ORGS.) GEOMORFOLOGIA UMA BASE DE ATUALIZAÇÃO E CONCEITOS. 4. ED. RIO DE JANEIRO: BERTRAND BRASIL, p. 211-252.
- DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. (1996). A GIS PROCEDURE FOR AUTOMATICALLY CALCULATING THE USLE LS FACTOR ON TOPOGRAPHICALLY COMPLEX LANDSCAPE UNITS. JOURNAL OF SOIL AND WATER CONSERVATION, v. 51, pp. 427-433. DIRECTIVA DE ÁGUAS DA COMUNIDADE EUROPÉIA, 2001. DIRECTIVA AAE EUROPEIA 2001/42/CE.
- DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (2016). CADASTRO NACIONAL DE BARRAGENS DE MINERAÇÃO-DENTRO DA PNSB. ENDEREÇO: [HTTP://WWW.ANM.GOV.BR/ASSUNTOS/BARRAGENS/ARQUIVOS-BARRAGENS/CADASTRO-NACIONAL-DE-BARRAGENS-DE-MINERACAO-DENTRO-DA-PNSB/VIEW](http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/arquivos-barragens/cadastro-nacional-de-barragens-de-mineracao-dentro-da-pnsb/view). ACESSO EM 30 DE JANEIRO DE 2019.
- DOTTORI, F.; TODINI, E. (2013). TESTING A SIMPLE 2D HYDRAULIC MODEL IN AN URBAN FLOOD EXPERIMENT. HYDROLOGICAL PROCESSES, v. 27, pp. 1301-1320.
- DUNNE, T.; BLACK, R. D. (1970). PARTIAL AREA CONTRIBUTIONS TO STORM RUNOFF IN A SMALL NEW ENGLAND WATERSHED. WATER RESOURCES RESEARCH, v. 6, n. 5, pp. 1296-1311.
- DUNSTER, J.; DUNSTER, K. (1996). DICTIONARY OF NATURAL RESOURCE MANAGEMENT. UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA. APRIL. ISBN: 077480503X.
- ENGENHARIA CF - TOPOGRAFIA E AEROLEVANTAMENTO (2018). BATIMETRIA E AEROLEVANTAMENTO COM VANT – LAGO UHE RISOLETA NEVES (TOPOBATIMETRIA 0418.DWG).

- ERG ENGENHARIA (2015).RELATÓRIO DO LEVANTAMENTO TOPOBATIMÉTRICA DA BARRAGEM DA UHE BAGUARI - GOVERNADOR VALADARES
- FAGUNDES, H. O.; FAN, F. M. ; PAIVA, R. C. D. ; BUARQUE, D. C. . SIMULAÇÃO HIDROSSEDIMENTOLÓGICA PRELIMINAR NA BACIA DO RIO DOCE COM O MODELO MGB-SED. IN: II CONGRESSO INTERNACIONAL DE HIDROSSEDIMENTOLOGIA, 2017, FOZ DO IGUAÇU. II CONGRESSO INTERNACIONAL DE HIDROSSEDIMENTOLOGIA, 2017.
- FAGUNDES, H. O. (2018). MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA DE GRANDES BACIAS COM APOIO DE DADOS IN SITU E SENSORIAMENTO REMOTO. DISSERTAÇÃO. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL, UFRGS.
- FAGUNDES, H. O., FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D. (2019). AUTOMATIC CALIBRATION OF A LARGE-SCALE SEDIMENT MODEL USING SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION, WATER QUALITY, AND REMOTE SENSING DATA. BRAZILIAN JOURNAL OF WATER RESOURCES. PORTO ALEGRE, V. 24, E26. [HTTPS://DOI.ORG/10.1590/2318-0331.241920180127](https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180127).
- FAGUNDES, H. O., PAIVA, R. C. D.; FAN, F. M.; BUARQUE, D. C.; FASSONI, A. C. (2020). SEDIMENT MODELING OF A LARGE-SCALE BASIN SUPPORTED BY REMOTE SENSING AND IN-SITU OBSERVATIONS. CATENA, 190. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.CATENA.2020.104535](https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104535).
- FAGUNDES, H. O.; FAN, F. M. ; PAIVA, R. C. D. ; SIQUEIRA, V. A. ; BUARQUE, D. C. ; KORNOWSKI, L. W. ; LAIPELT, L. ; COLLISCHONN, W. . SEDIMENT FLOWS IN SOUTH AMERICA SUPPORTED BY DAILY HYDROLOGIC-HYDRODYNAMIC MODELING. WATER RESOURCES RESEARCH, v. 57, p. 1-26, 2021.
- FAGUNDES, H. O.; FLEISCHMANN, A. S. ; FAN, F. M. ; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W.; BORRELLI, P. . HUMAN-INDUCED CHANGES IN SOUTH AMERICAN RIVER SEDIMENT FLUXES FROM 1984 TO 2019. WATER RESOURCES RESEARCH, v. 2023, p. 1-24, 2023A.
- FAGUNDES, H. O.; PAIVA, R. C. D.; BRÊDA, J. P. L. F.; FASSONI-ANDRADE, A. C.; BORRELLI, P.; FAN, F. M.. AN ASSESSMENT OF SOUTH AMERICAN SEDIMENT FLUXES UNDER CLIMATE CHANGES. SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT, v. 879, p. 163056, 2023B.
- FAN, F. M.; BUARQUE, D. C.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. (2015B). UM MAPA DE UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA PARA A AMÉRICA DO SUL. XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO E RECURSOS HÍDRICOS, PP. 1–8.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. (2014). INTEGRAÇÃO DO MODELO MGB-IPH COM SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA. REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS, V. 19, N. 1, PP. 243-254.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; MELLER, A.; BOTELHO, L. C. M. (2014A). ENSEMBLE STREAMFLOW FORECASTING EXPERIMENTS IN A TROPICAL BASIN: THE SÃO FRANCISCO RIVER CASE STUDY. JOURNAL OF HYDROLOGY, V. 519, PP. 2906-2919.

- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; QUIROZ, K.; SORRIBAS, M.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A. (2016). "FLOOD FORECASTING ON THE TOCANTINS RIVER USING ENSEMBLE RAINFALL FORECASTS AND REAL-TIME SATELLITE RAINFALL ESTIMATES". JOURNAL OF FLOOD RISK MANAGEMENT 9.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; SORRIBAS, M. V.; PONTES, P. R. M. (2013). SOBRE O INÍCIO DA REDE DE DRENAGEM DEFINIDA A PARTIR DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVÇÃO. REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS, v. 18, p. 241-257.
- FAN, F. M.; FLEISCHMANN, A. S.; COLLISCHONN, W.; AMES, D. P.; RIGO, D. (2015A). "LARGE-SCALE ANALYTICAL WATER QUALITY MODEL COUPLED WITH GIS FOR SIMULATION OF POINT SOURCED POLLUTANT DISCHARGES". ENVIRONMENTAL MODELLING & SOFTWARE 64.
- FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; PAIVA, R. C. D. (2014B). AVALIAÇÃO DE UM MÉTODO DE PROPAGAÇÃO DE CHEIAS EM RIOS COM APROXIMAÇÃO INERCIAL DAS EQUAÇÕES DE SAINT-VENANT. REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS, v. 19, n. 4, pp. 137-147.
- FASSONI-ANDRADE, A.C. AND PAIVA, R.C.D. (2019). MAPPING SPATIAL-TEMPORAL SEDIMENT DYNAMICS OF RIVER-FLOODPLAINS IN THE AMAZON. REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 221, P. 94–107
- FEDERAL INTERAGENCY STREAM RESTORATION WORKING GROUP - FISRWG: PRINCIPLES, PROCESSES AND PRACTICES, OCTOBER/1998. USDA, GOV/STREAM _ RESTORATION (RIVERINE EROSION HAZARD)
- FERNANDES, G.W., ET AL. (2016). DEEP INTO THE MUD: ECOLOGICAL AND SOCIO-ECONOMIC IMPACTS OF THE DAM BREACH IN MARIANA, BRAZIL. NATUREZA & CONSERVAÇÃO, 14, pp. 35-45. DOI 10.1016/J.NCON.2016.10.003.
- FEST - FUNDAÇÃO ESPÍRITO-SANTENSE DE TECNOLOGIA (2013). MAPA BATIMÉTRICO E DETALHAMENTO DA REGIÃO PRÓXIMA AO BARRAMENTO (MAPA BATIMÉTRICO UHE MASCARENHAS.PDF).
- FEST – FUNDAÇÃO ESPÍRITO-SANTENSE DE TECNOLOGIA (2014). SERVIÇO DE LEVANTAMENTO TOPO-BATIMÉTRICO E MONITORAMENTO SEDIMENTOMÉTRICO E SEDIMENTOLÓGICO – 2º CICLO. UHE MASCARENHAS. RELATÓRIO TÉCNICO, CONTRATO NÚMERO: 4600015088. VITÓRIA, 23 P.7
- FEST-RRDM – FUNDAÇÃO ESPÍRITO-SANTENSE DE TECNOLOGIA - REDE RIO DOCE MAR (2019). RELATÓRIO ANUAL 2019 DO PMBA/FEST-RRDM. ANEXO 3 DULCÍCOLA – MONITORAMENTO DE FLUXOS DE ÁGUA E SEDIMENTOS. RT-18C RRDM/NOV19. RELATÓRIO TÉCNICO. NOVEMBRO DE 2019.
- FLEISCHMANN, A., PAIVA, R., & COLLISCHONN, W. (2019A). CAN REGIONAL TO CONTINENTAL RIVER HYDRODYNAMIC MODELS BE LOCALLY RELEVANT? A CROSS-SCALE COMPARISON. JOURNAL OF HYDROLOGY X, 3, 100027.
- FLEISCHMANN, A.; COLLISCHONN, W.; PAIVA, R.; TUCCI, C.E. (2019B). MODELING THE ROLE OF RESERVOIRS VERSUS FLOODPLAINS ON LARGE-SCALE RIVER HYDRODYNAMICS. NAT. HAZARDS 99, 1075–1104. [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/s11069-019-03797-9](https://doi.org/10.1007/s11069-019-03797-9)

- FLEISCHMANN, A. S., BRÊDA, J. P. F., PASSAIA, O. A., WONGCHUIG, S. C., FAN, F. M., PAIVA, R. C. D., MARQUES, G. F., & COLLISCHONN, W. (2021). REGIONAL SCALE HYDRODYNAMIC MODELING OF THE RIVER-FLOODPLAIN-RESERVOIR CONTINUUM. JOURNAL OF HYDROLOGY, 596. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.JHYDROL.2021.126114](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126114)
- FÖEGER, LIZANDRA BROSEGHINI. (2019). MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA DE GRANDES BACIAS COM PROPAGAÇÃO INERCIAL DE VAZÃO: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO MADEIRA. 2019. 161 F. DISSERTAÇÃO (MESTRADO) - CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL, CENTRO TECNOLÓGICO, UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, VITÓRIA.
- FÖEGER, L. B.; BUARQUE, D. C.; PONTES, P. R. M; FAGUNDES, H. O.; FAN, F. M.. LARGE-SCALE SEDIMENT MODELING WITH INERTIAL FLOW ROUTING: ASSESSMENT OF MADEIRA RIVER BASIN. ENVIRONMENTAL MODELLING & SOFTWARE, v. 149, p. 105332, 2022.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. SOIL MAP OF THE WORLD: VOLUME IV SOUTH AMERICA. PARIS, 1971.
- FRISSELL, C. A.; LISS, W.J.; WARREN, C.E.; HURLEY, M. D. (1986). A HIERARCHICAL FRAMEWORK FOR STREAM HABITAT CLASSIFICATION: VIEWING STREAMS IN A WATERSHED CONTEXT. ENVIRONMENTAL MANAGEMENT, v. 10, I.2, pp 199-214.
- GETIRANA, A. C. V.; BONNET, M. P.; ROTUNNO FILHO, O. C.; COLLISCHONN, W.; GUYOT, J. L.; SEYLER, F.; MANSUR, W. J. (2010). HYDROLOGICAL MODELLING AND WATER BALANCE OF THE NEGRO RIVER BASIN: EVALUATION BASED ON IN SITU AND SPATIAL ALTIMETRY DATA. HYDROLOGICAL PROCESSES, v. 24, pp. 3219-3236.
- GIL, A. P.; COELHO, A.L.N. (2015). ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESPAÇO-TEMPORAL DAS GEOFORMAS FLUVIAIS DO BAIXO CURSO DO RIO DOCE COM O AUXÍLIO DE IMAGENS ORBITAIS LANDSAT 8 - LINHARES, ES. ANAIS XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, JOÃO PESSOA-PB, BRASIL, 25 A 29 DE ABRIL DE 2015, INPE.
- GOLDER (2016). AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS NO MEIO FÍSICO RESULTANTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO. BELO HORIZONTE, MG. OUTUBRO, 2016. REF: RT-023_159-515-2282_00-J.PDF.
- GOLDER (2022). AVALIAÇÃO DOS VOLUMES DE REJEITO E SEDIMENTOS NOS TRECHOS DOS PMRs. BELO HORIZONTE, MG., 2022.
- GOLDER (2023). MONITORAMENTO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO NOS TRECHOS 6 A 11, A MONTANTE DA UHE RISOLETA NEVES. DADOS DISPONIBILIZADOS PELA FUNDAÇÃO RENOVA, 2023.
- GRAY, J.R., GLYSSON, G.D., TURCIOS, L.M., SCHWARZ, G.E. (2000). COMPARABILITY OF SUSPENDED-SEDIMENT CONCENTRATION AND TOTAL SUSPENDED SOLIDS DATA. U.S. GEOLOGICAL SURVEY, WATER-RESOURCES INVESTIGATION REPORT 00-4191. RESTON, VIRGINIA.
- GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. (1999). STATUS OF AUTOMATIC CALIBRATION FOR HYDROLOGIC MODELS: COMPARISON WITH MULTILEVEL EXPERT CALIBRATION. JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING, v. 4, N. 2, p. 135-143.

- HANASAKI, N., KANAE, S., & OKI, T. (2006). A RESERVOIR OPERATION SCHEME FOR GLOBAL RIVER ROUTING MODELS. JOURNAL OF HYDROLOGY, 327(1-2), 22-41. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.JHYDROL.2005.11.011](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.011)
- HAWKER, L.; NEAL, J.; BATES, P. (2019). ACCURACY ASSESSMENT OF THE TANDEM-X 90 DIGITAL ELEVATION MODEL FOR SELECTED FLOODPLAIN SITES. REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, v. 232, pp. 2-15.
- HDC – HYDROLOGIC DATA COLLECTIONS (2014). LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO DO RESERVATÓRIO DA USINA HIDRELÉTRICA RISOLETA NEVES, RIO DOCE – MG. CONSÓRCIO UHE RISOLETA NEVES. BELO HORIZONTE, MG. 19 P.
- HICKIN, E. (1995). RIVER GEOMORPHOLOGY. CALIFÓRNIA: JOHN WILEY & SON LTD.
- HIDROLOGIA DE GRANDE ESCALA (HGE). HIDROLOGIA DE GRANDE ESCALA. DISPONÍVEL EM: <[HTTPS://WWW.UFRGS.BR/HGE/](https://www.ufrgs.br/hge/)>. ACESSO EM: 08 DEZ DE 2019.
- HIDROTOPO - CONSULTORIA E PROJETOS LTDA (2015). LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO NO RESERVATÓRIO DA USINA DE AIMORÉS – HIDRELÉTRICA ELIEZER BATISTA AIMORÉS – MG.
- HOOKE, J. (2003). COARSE SEDIMENT CONNECTIVITY IN RIVER CHANNEL SYSTEMS: A CONCEPTUAL FRAMEWORK AND METHODOLOGY. GEOMORPHOLOGY, v.56, pp. 79-94.
- IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (2015). LAUDO TÉCNICO PRELIMINAR: IMPACTOS AMBIENTAIS DECORRENTES DO DESASTRE ENVOLVENDO O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO, EM MARIANA, MINAS GERAIS. DIRETORIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL – DIPRO, p. 38.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. BRASIL: INFORMAÇÕES AMBIENTAIS. MONITORAMENTO DA COBERTURA E USO DA TERRA (2016). DISPONÍVEL EM [HTTPS://WWW.IBGE.GOV.BR/NFORMAÇÕES/CARTAS-E-MAPAS/NFORMAÇÕES-AMBIENTAIS/15831-COBERTURA-E-USO-DA-TERRA-DO-BRASIL.HTML?=&t=o-que-e](https://www.ibge.gov.br/nformacoes/cartas-e-mapas/nformacoes-ambientais/15831-cobertura-e-uso-da-terra-do-brasil.html?=&t=o-que-e). ACESSO EM 29 ABR. 2019.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. BASES CARTOGRÁFICAS (2015). DISPONÍVEL EM [HTTPS://MAPAS.IBGE.GOV.BR/BASES-E-REFERENCIAIS/BASES-CARTOGRAFICAS/MALHAS-DIGITAIS](https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais). ACESSO EM 03 MAI. 2019.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA; EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. MAPA DE SOLOS DO BRASIL. RIO DE JANEIRO: IBGE, 2001 – ESCALA 1:5.000.000. DISPONÍVEL EM [HTTP://WWW.DPI.INPE.BR/AMBDATA/MAPA_SOLOS.PHP](http://www.dpi.inpe.br/AMBDATA/MAPA_SOLOS.PHP). ACESSO EM 23 ABR. 2019.
- IBIO AGB DOCE – AGÊNCIA TÉCNICA DA BACIA DO RIO DOCE. DISPONÍVEL EM <[HTTP://WWW.IBIOAGBDOCE.ORG.BR](http://www.ibioagbdoce.org.br)>
- IDG - ENGENHARIA E CONSULTORIA (2019). RELATÓRIO MENSAL DE PROGRESSO E RESULTADOS DE LEVANTAMENTOS BATIMÉTRICOS.
- IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. PORTAL DO MEIO AMBIENTE DE MG. MAPAS. DISPONÍVEL EM: <[HTTP://WWW.IGAM.MG.GOV.BR/INDEX](http://www.igam.mg.gov.br/index)>

- KIRKBY, M. J.; CHORLEY, R. J. (1967). THROUGHFLOW, OVERLAND FLOW AND EROSION: INTERNAT. ASSOC. SCI. HYDROLOGY BULL., v. 12, nº. 3, pp. 5-21.
- LEOPOLD, L. B. (1994). A VIEW OF THE RIVER. HARVARD UNIVERSITY PRESS. CAMBRIDGE, MASSACHUSSETS. LONDON, ENGLAND. 1994. 298p.
- LISBOA, A. M., GOMES, G., FAN, F. M., COLLISCHONN, W., & TUCCI, C. E. (2015). USO DEL MODELO MGB EN LA PREDICCIÓN DE CAUDALES EN ITAIPÚ. REVISTA DE LA SOCIEDAD CIENTÍFICA DEL PARAGUAY, V. 20, p. 189-203.
- LOPES, V. A. R. (2017). MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA INTEGRADA DE BACIAS E SISTEMAS LAGUNARES COM INFLUÊNCIA DO VENTO. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO. INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 215 pp.
- MACHADO, NATHÁLIA COUTO. RETROANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DECORRENTE DA RUPTURA DA BARRAGEM DO FUNDÃO COM DIFERENTES MODELOS NUMÉRICOS E HIPÓTESES DE SIMULAÇÃO. 2017. 188 F. DISSERTAÇÃO (MESTRADO) - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS, UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, BELO HORIZONTE, 2017.
- MACKLIN, M.G., HUDSON-EDWARDS, K.A., DAWSON, E.J. (1997). THE SIGNIFICANCE OF POLLUTION FROM HISTORIC METAL MINING IN THE PENNINE OREFIELDS ON RIVER SEDIMENT CONTAMINANT FLUXES TO THE NORTH SEA. SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT, v. 194-195, pp. 391-397. DOI 10.1016/ S0048-9697(96)05378-8.
- MATOS, ANA CLARA; ELEUTÉRIO, JULIAN. MODELLING THE FLOOD WAVE AND THE POTENTIAL REDUCTION OF EXPECTED LIFE LOSSES FOR BENTO RODRIGUES VILLAGE DUE TO THE FAILURE OF FUNDÃO TAILINGS DAM (BRAZIL). E-PROCEEDINGS OF THE 38TH IAHR WORLD CONGRESS, PANAMÁ, 2019.
- MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. (2003). A REVIEW OF EROSION AND SEDIMENT TRANSPORT MODELS. ENVIRONMENTAL MODELLING & SOFTWARE, v. 18, n. 8-9, p. 761-799.
- MERTEN, G. H.; MINELLA, G. P. G.; HOROWITZ, A. J.; MORO, M. (2014). DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO EM RIO COM USO DE TURBIDÍMETRO. PORTO ALEGRE.
- MILLER, W. A.; CUNGE, J. A. EM: MAHMOOD, K.; YEVJEVICH, V. (EDS). (1975). UNSTEADY FLOW IN OPEN CHANNELS. FORT. COLLINS: WATER RESOURCES PUBLICATIONS. v.1.
- MOORE, R. J.; CLARKE, R. T. (1981). A DISTRIBUTION FUNCTION APPROACH TO RAINFALL-RUNOFF MODELING. WATER RESOURCES RESEARCH, v. 17, n. 5, pp. 1367-1382.
- MORGENSTERN, N.R. (CHAIR); VICK, S. G.; VIOTTI, C. B.; WATTS, B. D. (2016) REPORT ON THE IMMEDIATE CAUSES OF THE FAILURE OF THE FUNDÃO DAM. IN: FUNDÃO TAILINGS DAM REVIEW PANEL. DISPONÍVEL EM: <[HTTP://FUNDAOINVESTIGATION.COM/THE-REPORT/](http://fundaoinvestigation.com/the-report/)>. ACESSO EM AGOSTO DE 2018.

- MORIASI, D. N. ET AL. (2007). MODEL EVALUATION GUIDELINES FOR SYSTEMATIC QUANTIFICATION OF ACCURACY IN WATERSHED SIMULATIONS. TRANSACTIONS OF THE ASABE, V. 50, N. 3, P. 885-900.
- MORRIS, G.; FAN, J. (1998). RESERVOIR SEDIMENTATION HANDBOOK. MCGRAW-HILL BOOK CO., NEW YORK
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1992). RESTORATION OF AQUATIC ECOSYSTEMS – SCIENCE, TECHNOLOGY AND PUBLIC POLICY. NATIONAL ACADEMY PRESS. WASHINGTON, D.C. 1992.
- NAVRATIL, O.; ESTEVES, M.; LEGOUT, C.; GRATIOT, N.; NEMERY, J.; WILLMORE, S.; GRANGEON, T. (2011). GLOBAL UNCERTAINTY ANALYSIS OF SUSPENDED SEDIMENT MONITORING USING TURBIDIMETER IN A SMALL MOUNTAINOUS RIVER CATCHMENT. JOURNAL OF HYDROLOGY, V. 398, PP. 246-259.
- NEAL, J.; SCHUMANN, G.; BATES, P.D. (2012). "A SUBGRID CHANNEL MODEL FOR SIMULATING RIVER HYDRAULICS AND FLOODPLAIN INUNDATION OVER LARGE AND DATA SPARSE ÁREAS". WATER RESOURCES RESEARCH, 48.
- NHC BRASIL CONSULTORES LTDA. (2020). ATUALIZAÇÃO DO BALANÇO DE MASSA DE SEDIMENTOS NOS TRECHOS 06 A 11: PERÍODO DE ANÁLISE DEZ/2017 À MAR/2019. SÃO PAULO. JANEIRO DE 2020.
- NÓBREGA, M. T., COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; PAZ, A. R. (2011). UNCERTAINTY IN CLIMATE CHANGE IMPACTS ON WATER RESOURCES IN THE RIO GRANDE BASIN, BRAZIL. HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES, V. 15, PP. 585-595.
- NOVO, E. M. L. M. (2008). AMBIENTES FLUVIAIS. IN: FLORENZANO, T.G. (ORG.). GEOMORFOLOGIA: CONCEITOS E TECNOLOGIAS ATUAIS. SÃO PAULO: OFICINA DE TEXTOS. P.219-246.
- OLIVEIRA, K. S. S.; QUARESMA, V. S. TEMPORAL VARIABILITY IN THE SUSPENDED SEDIMENT LOAD AND STREAMFLOW OF THE DOCE RIVER. JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES, V. 78, P. 101-115, 2017. [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.JSAMES.2017.06.009](http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2017.06.009).
- PAIVA, R. C. D. (2009). MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA DE GRANDES BACIAS. ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO SOLIMÕES. DISSERTAÇÃO. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL, UFRGS.
- PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (2011). LARGE SCALE HYDROLOGIC AND HYDRODYNAMIC MODELING USING LIMITED DATA AND A GIS BASED APPROACH. JOURNAL OF HYDROLOGY, V. 406, P. 170-181.
- PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C. (2013A). VALIDATION OF A FULL HYDRODYNAMIC MODEL FOR LARGE-SCALE HYDROLOGIC MODELLING IN THE AMAZON. HYDROLOGICAL PROCESSES, V. 27, PP. 333-346.
- PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C; COLLISCHONN, W.; BONNET, M-P.; FRAPPART, F.; CALMANT, S.; MENDES, C. A. B. (2013B). LARGE-SCALE HYDROLOGIC AND

- HYDRODYNAMIC MODELING OF THE AMAZON RIVER BASIN. WATER RESOURCES RESEARCH, V. 49, PP. 1–18, DOI:10.1002/WRCR.20067.
- PALU, M. C. (2019). FLOODWAVE AND SEDIMENT TRANSPORT ASSESSMENT ALONG THE DOCE RIVER AFTER THE FUNDÃO TAILINGS DAM COLLAPSE (BRAZIL). 2019. 175 F. TESE (DOUTORADO) - CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING, COLORADO STATE UNIVERSITY, FORT COLLINS.
- PALU, MARCOS C.; JULIEN, PIERRE Y.. MODELING THE SEDIMENT LOAD OF THE DOCE RIVER AFTER THE FUNDÃO TAILINGS DAM COLLAPSE, BRAZIL. JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING, V. 145, N. 5, 2019. AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE).
- PANDEY, A. ET AL. (2016). PHYSICALLY BASED SOIL EROSION AND SEDIMENT YIELD MODELS REVISITED. CATENA, V. 147, P. 595-620.
- PAZ, A ; COLLISCHONN, W. ; RISSO, A ; MENDES, C . (2008). ERRORS IN RIVER LENGTHS DERIVED FROM RASTER DIGITAL ELEVATION MODELS. COMPUTERS & GEOSCIENCES, V. 34, P. 1584-1596.
- PAZ, A. R. ; COLLISCHONN, W. (2007). RIVER REACH LENGTH AND SLOPE ESTIMATES FOR LARGE-SCALE HYDROLOGICAL MODELS BASED ON A RELATIVELY HIGH-RESOLUTION DIGITAL ELEVATION MODEL. JOURNAL OF HYDROLOGY (AMSTERDAM), V. 343, P. 127-139.
- PAZ, A. R. ; COLLISCHONN, W. (2008). DERIVAÇÃO DE REDE DE DRENAGEM A PARTIR DE DADOS DO SRTM. REVISTA GEOGRÁFICA ACADÊMICA, V. 2, P. 84-95.
- PAZ, A. R. ; COLLISCHONN, W. ; SILVEIRA, A. L. L. (2006). IMPROVEMENTS IN LARGE-SCALE DRAINAGE NETWORKS DERIVED FROM DIGITAL ELEVATION MODELS. WATER RESOURCES RESEARCH, V. 42, P. W08502.
- PEREIRA, M.; KAYSER, R.B.; COLLISCHONN, W. (2012). "INTEGRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO PARA GRANDES BACIAS MGB-IPH E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS PARA SUPORTE À DECISÃO DE OUTORGA DE DIREITO DE USO DA ÁGUA". REVISTA DE GESTÃO DA AMÉRICA LATINA 9.
- PONTES, P. R. M. (2016). MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA INTEGRADA DA BACIA DO RIO DA PRATA. TESE DE DOUTORADO. INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (IPH-UFRGS), PORTO ALEGRE, BRAZIL.
- PONTES, P. R. M.; FAN, F. M.; FLEISCHMANN, A. S.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A.; JARDIM, P. F.; SORRIBAS, M. V.; COLLISCHONN, W. (2017). MGB-IPH MODEL FOR HYDROLOGICAL AND HYDRAULIC SIMULATION OF LARGE FLOODPLAIN RIVER SYSTEMS COUPLED WITH OPEN SOURCE GIS. ENVIRONMENTAL MODELLING & SOFTWARE, V. 94, PP. 1-20.
- PONTES, R. M.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C. (2015). MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE GRANDE ESCALA COM PROPAGAÇÃO INERCIAL DE VAZÕES. REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS, V. 20, N. 4, PP. 888-904.
- POTAMOS – ENGENHARIA E HIDROLOGIA (LTDA). (2017). AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS FRENTES DE ASSOREAMENTO NAS CURVAS DE REMANSO DO RESERVATÓRIO DA UHE CANDONGA. PRODUTO 05. SÍNTESE DOS ESTUDOS E PROPOSIÇÃO DO PLANO DE MONITORAMENTO

- HIDROSSEDIMENTOMÉTRICO E TOPOBATIMÉTRICO. POTREM000-1-TC-RTE-0004. BELO HORIZONTE, 2018.
- POTAMOS (2019). AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DAS FRENTES DE ASSOREAMENTO NAS CURVAS DE REMANSO DA UHE RISOLETA NEVES 1D/2D. PRODUTO 01: ANÁLISE E CONSOLIDAÇÃO DE DADOS BÁSICOS. NOVEMBRO DE 2019.
- RADA – RELATÓRIO DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL (2007). USINA HIDRELÉTRICA RISOLETA NEVES, CONSÓCIO CANDONGA. VOLUME 1. PONTE NOVA, MG. 594 P.
- RASMUSSEN, P. P. ET AL. (2009). GUIDELINES AND PROCEDURES FOR COMPUTING TIME-SERIES SUSPENDED-SEDIMENT CONCENTRATIONS AND LOADS FROM IN-STREAM TURBIDITY-SENSOR AND STREAMFLOW DATA. U.S. USGS.
- RASMUSSEN, P.P., GRAY, J.R., GLYSSON, G.D., ZIEGLER, A.C. (2011). GUIDELINES AND PROCEDURES FOR COMPUTING TIME-SERIES SUSPENDED-SEDIMENT CONCENTRATIONS AND LOADS FROM IN-STREAM TURBIDITY-SENSOR AND STREAMFLOW DATA. U.S. GEOLOGICAL SURVEY TECHNIQUES E METHODS, BOOK 3, CHAP. C4, 52 P.
- RAWLS, W. J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D.; SHIRMOHAMMADI, A. (1993). INFILTRATION AND SOIL WATER MOVEMENT. IN: HANDBOOK OF HYDROLOGY (ED. BY D. MAIDMENT), 5.1–5.51. MCGRAW-HILL, NEW YORK, USA.
- RHAMA (2016). AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE VAZÃO LÍQUIDA E TURBIDEZ – PROGNÓSTICO. RELATÓRIO Nº 2. OUTUBRO DE 2016.
- RHAMA (2020A) ESTUDOS DOS PROCESSOS FLUVIAIS E DE SEDIMENTOS A JUSANTE DA BARRAGEM DE FUNDÃO, NO RIO DOCE. PRODUTO 01. RELATÓRIO TÉCNICO Nº 01. REVISÃO Nº2. MARÇO DE 2020.
- RHAMA (2020B). ANÁLISE INTEGRADA SOBRE O TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E ALTERAÇÕES GEOMORFOLÓGICAS A JUSANTE DA UHE RISOLETA NEVES. PRODUTO 03. AGOSTO DE 2020.
- RIBEIRO, L. S.; ALVES, M. DA G. (2007). QUANTIFICAÇÃO DE PERDA DE SOLO POR EROÇÃO NO MUNICÍPIO DE CAMPOS DOS GOYTACAZES/RJ ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO. ANAIS... XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, P. 3039–3046.
- ROSMAN, P. C. (2022). EIXO 1 – ANÁLISES HIDROSSEDIMENTOLÓGICAS NO ESTUÁRIO DO RIO DOCE E ZONA COSTEIRA ADJACENTE À SUA FOZ. RIO DE JANEIRO: VALE S.A.
- SAMARCO MINERAÇÃO S.A. (2016A). GERMANO - GERAL - OBRAS EXTERNAS - LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO DA ÁREA DO DIQUE PCH BICAS - GD01 (G006980-K-100016_R-01.DWG).
- SAMARCO MINERAÇÃO S.A. (2016B). GERMANO - GERAL - OBRAS EXTERNAS - LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO DA ÁREA DO DIQUE JUSANTE DE BICAS - GD2 (G006980-K-100015_R-01.DWG).
- SAMARCO MINERAÇÃO S.A. (2016C). GERMANO - GERAL - OBRAS EXTERNAS - LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO DO DIQUE TRIBUTÁRIO 51 - GD03 - BARRA LONGA (G006980-K-100009_R-01.DWG).

- SAMARCO MINERAÇÃO S.A. (2016D). GERMNO GERAL – OBRAS EXTERNAS – RECONST. DAS COMUNI - ESTUDOS HIDRODINÂMICOS EM BARRA LONGA – TOPOBATIMETRIA – PLANTA E PERFIL (G006983-G-100027).
- SAMARCO MINERAÇÃO S.A. (2018A). GERMANO BARRAGENS - VALE DO SANTARÉM - DIQUE S4 - TOPOGRAFIA E BATIMETRIA (G102383-K-100054_R-00.DWG).
- SAMARCO MINERAÇÃO S.A. (2018B). GERMANO BARRAGENS - VALE DO SANTARÉM - DIQUE S3 - TOPOGRAFIA E BATIMETRIA (G102383-K-100050_R-00.DWG).
- SAMARCO MINERAÇÃO S.A. (2018C). GERMANO BARRAGENS - VALE DO SANTARÉM - ORTOFOTO, TOPOGRAFIA E BATIMETRIA - CARTA TOPOBATIMÉTRICA (G102383-K-100052_FOLHA-01_R-01.DWG).
- SANTOLIN, C.V.A. (2015). QUANTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO AMBIENTAL DA CONTAMINAÇÃO POR METAIS E ARSÊNIO EM SEDIMENTOS DA BACIA DO RIO DOCE – MG. TESE DE DOUTORADO. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, BELO HORIZONTE, MG. 162 P.
- SARI, V. (2017). MONITORAMENTO E MODELAGEM DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA NO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL. 2017. 314 F. TESE (DOUTORADO) - CURSO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, PORTO ALEGRE.
- SCHOENBERGER, E. (2016). ENVIRONMENTALLY SUSTAINABLE MINING: THE CASE OF TAILINGS STORAGE FACILITIES. *RESOURCES POLICY*, 49, pp. 119-128.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS BÁSICOS DO BRASIL, MARIANA – FOLHA SF.23-XB-1. ESTADO DE MINAS GERAIS. ESCALA 1:100.000. ORG. POR ORISVALDO FERREIRA BALTAZAR E FREDERICO OZANAM RAPOSO. BRASÍLIA, DNPM/CPRM. 196 P. 1993
- SHIN, S., POKHREL, Y., & MIGUEZ-MACHO, G. (2019). HIGH-RESOLUTION MODELING OF RESERVOIR RELEASE AND STORAGE DYNAMICS AT THE CONTINENTAL SCALE. *WATER RESOURCES RESEARCH*, 55, 787–810.
- SHUTTLEWORTH, W. J. (1993). EVAPORATION. IN: MAIDMENT, D. R. (ED.), *HANDBOOK OF HYDROLOGY*, MCGRAW-HILL, NEW YORK.
- SILVA, F. D. G. B. DA; MINOTTI, R. T.; LOMBARDI NETO, F.; PRIMAVESI, O.; CRESTANA, S. (2010). PREVISÃO DA PERDA DE SOLO NA FAZENDA CANCHIM - SP (EMBRAPA) UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO E O USLE 2D. *ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, V. 15, N. 2, P. 141–148.
- SILVA, D. S.; MEDEIROS, J. D. F. (2018). APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO MGB-IPH NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRANHAS-AÇU. IN: ANAIS DO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, ABRHIDRO, MACEIÓ-AL.
- SILVA, F. H. (2000). MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL DE BACIAS HIDROGRÁFICAS A PARTIR DE LEVANTAMENTOS PEDOLÓGICOS. RIO DE JANEIRO.
- SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A.; JARDIM, P. F.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. (2016). IPH-HYDRO TOOLS: UMA FERRAMENTA OPEN SOURCE PARA DETERMINAÇÃO DE

INFORMAÇÕES TOPOLÓGICAS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS INTEGRADA A UM AMBIENTE SIG.
REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS, v. 21, n. 1, p. 274-287.

- SIQUEIRA, V. A.; PAIVA, R. C. D.; FLEISCHMANN, A. S.; FAN, F. M.; RUHOFF, A. L.; PONTES, P. R. M.; PARIS, A.; CALMANT, S.; COLLISCHONN, W. (2018). TOWARD CONTINENTAL HYDROLOGIC-HYDRODYNAMIC MODELING IN SOUTH AMERICA. *HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES*, v. 22, p. 4815-4842.
- SORRIBAS, M. V.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN W. (2011). BUSCANDO ÁREAS DE DRENAGEM MÍNIMA PARA DEFINIÇÃO DA REDE DE DRENAGEM A PARTIR DA LITOLOGIA. XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. MACEIÓ.
- SRK (2020). MEMORANDO TÉCNICO ENVIADO PARA PEDRO IVO DIOGENIS BELO, SOBRE CONSOLIDAÇÃO DAS ARGUMENTAÇÕES TÉCNICAS DA FUNDAÇÃO RENOVA EM RESPOSTA À DELIBERAÇÃO CIF 396/2020 E NOTA TÉCNICA Nº CT-GRSA 05/2020 SOBRE AVALIAÇÃO DOS ESTUDOS DOS INDICADORES E METAS DAS AÇÕES RELATIVAS AO MANEJO DE REJEITOS NOS TRECHOS 1 A 11. MATERIAL FOI DISPONIBILIZADO PELA FUNDAÇÃO RENOVA POR MEIO DIGITAL.
- STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. (2017). GEOMORFOLOGIA FLUVIAL. SÃO PAULO: OFICINA DE TEXTOS, 336 p.
- SUEKAME, H. K.; COMMAR, L. F. S`A; GONÇALVES, F. V.; CARVALHO, G. A.; CAMPOS, M.; PEREIRA, R. B. 2020. MODELAGEM HIDROLÓGICA DE LARGA ESCALA COM ABORDAGEM INERCIAL / LARGE SCALE HYDROLOGICAL MODELING WITH INERCIAL APPROACH. *BRAZILIAN JOURNAL OF DEVELOPMENT*, CURITIBA, v. 6, n. 2, p.6615-6625, ISSN 2525-8761.
- SUGUIO K.; BIGARELLA, J. J. (1990). AMBIENTES FLUVIAIS. 2. ED. CURITIBA: UFPR, 183 p.
- TODINI, E. (1996). THE ARNO RAINFALL-RUNOFF MODEL. *JOURNAL OF HYDROLOGY*, v. 175, pp. 339-382.
- TOPGEO (2017). LEVANTAMENTO PLANIALTIMÉTRICO DO ENTORNO DAS LAGOAS JUPARANÃ, LAGOA NOVA, LAGOA MONSARAS, LAGOA AREAL E LAGOA PANDOLFI E CANAIS DE LIGAÇÃO AO RIO DOCE.
- TUCCI, C.E.M. (2002). *HIDROLOGIA: CIÊNCIA E APLICAÇÃO*. EDITORA DA UFRGS/ABRH, PORTO ALEGRE, 3ED. ISBN 85-7025-663-9. PÁG. 262, CAP. 7.
- TUCCI, C.E.M.; GENZ, F. (1995). CONTROLE DO IMPACTO DA URBANIZAÇÃO. IN: TUCCI, C. E. M., PORTO, R. L.; BARROS, M. T. – ORGANIZADORES; *DRENAGEM URBANA*, COLEÇÃO ABRH DE RECURSOS HÍDRICOS, VOLUME 5, EDITORA DA UNIVERSIDADE, PORTO ALEGRE.
- UHE BAGUARI (2019). CARACTERÍSTICAS DO EMPREENDIMENTO. UHE BAGUARI, DISPONÍVEL EM: [HTTP://WWW.UHEBAGUARI.COM.BR/QUEM-SOMOS](http://www.uhebaguari.com.br/quem-somos). ACESSO EM: 23/05/2019.
- VÁZQUEZ-FERNÁNDEZ, G. Á.; VÁZQUEZ-FERNÁNDEZ, G. Á.; FORMAGGIO, A. R.; ET AL. DETERMINAÇÃO DE SEQUÊNCIAS CULTURAIS EM MICROBACIA HIDROGRÁFICA PARA CARACTERIZAÇÃO DO FATOR C DA EUPS, UTILIZANDO FOTOGRAFIA AÉREA. VIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, p. 63–67, 1996.

- VENTE, J. ET AL. (2007). THE SEDIMENT DELIVERY PROBLEM REVISITED. PROGRESS IN PHYSICAL GEOGRAPHY: EARTH AND ENVIRONMENT, V. 31, N. 2, P. 155-178.
- VENTE, J. ET AL. (2008). SPATIALLY DISTRIBUTED MODELLING OF SOIL EROSION AND SEDIMENT YIELD AT REGIONAL SCALES IN SPAIN. GLOBAL AND PLANETARY CHANGE, V. 60, N. 3-4, P. 393-415.
- WEBER, E., HASENACK, H., & FERREIRA, C. (2004). ADAPTAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVÇÃO DO SRTM PARA O SISTEMA DE REFERÊNCIA OFICIAL BRASILEIRO E RECORTE POR UNIDADE DA FEDERAÇÃO. PORTO ALEGRE, UFRGS CENTRO DE ECOLOGIA. ISBN 978-85-63843-02-9. FONTE: [HTTP://WWW.ECOLOGIA.UFRGS.BR/LABGEO](http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo). ACESSO EM 23 ABR. 2019.
- WILKINSON, S. N. ET AL. (2009). MODELLING AND TESTING SPATIALLY DISTRIBUTED SEDIMENT BUDGETS TO RELATE EROSION PROCESSES TO SEDIMENT YIELDS. ENVIRONMENTAL MODELLING & SOFTWARE, V. 24, N. 4, P. 489-501.
- WILLIAMS, J. R. (1975). SEDIMENT-YIELD PREDICTION WITH UNIVERSAL EQUATION USING RUNOFF ENERGY FACTOR. IN: PRESENT AND PROSPECTIVE TECHNOLOGY FOR PREDICTING SEDIMENT YIELD AND SOURCES. PUBLICATION ARS-S-40. US DEPARTMENT OF AGRICULTURE: WASHINGTON, DC; 244-252.
- WILLIAMS, J. R. (1995). CHAPTER 25. THE EPIC MODEL. P. 909-1000. IN: COMPUTER MODELS OF WATERSHED HYDROLOGY. WATER RESOURCES PUBLICATIONS. HIGHLANDS RANCH, CO.
- WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (2000). TERRAIN ANALYSIS: PRINCIPLES AND APPLICATIONS. NEW YORK: JOHN WILEY & SONS, PP.1-27.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. (1978). PREDICTING RAINFALL EROSION LOSSES: A GUIDE TO CONSERVATION PLANNING. WASHINGTON, DC: USDA, AGRICULTURE HANDBOOK, 537.
- WOLMAN, GORDN M. (1995). THE NATURAL CHANNEL OF BRANDYWINE CREEK PENNSYLVANIA. GEOLOGICAL SURVEY PROFESSIONAL PAPER 271. UNITED STATES GOVERNMENT PRINTING OFFICE, WASHINGTON. WU, J. H.; WANG, Y. M. (2006). MEASURING KMS SUCCESS: A RESPECIFICATION OF THE DELONE AND MCLEAN'S MODEL. JOURNAL OF INFORMATION & MANAGEMENT, V. 43, PP. 728-739.
- WSP-GOLDER (2022). MONITORAMENTO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO - PERÍODO CHUVOSO 2017/2018 AO PERÍODO CHUVOSO 2021/2022. Relatório técnico número RT-010_209-535-7742_02 preparado para a Fundação Renova. Dezembro de 2022.
- WU, W. (2008). COMPUTATIONAL RIVER DYNAMICS. TAYLOR & FRANCIS, LONDON, 494 P.
- WU, W.; WANG, S. S. Y. (2006). FORMULAS FOR SEDIMENT POROSITY AND SETTLING VELOCITY. J. HYDRAULIC ENG., ASCE, 132(8), 858-862.
- YAMAZAKI, D.; DE ALMEIDA, G. A. M.; BATES, P. D. (2013). "IMPROVING COMPUTATIONAL EFFICIENCY IN GLOBAL RIVER MODELS BY IMPLEMENTING THE LOCAL INERTIAL FLOW EQUATION AND A VECTOR-BASED RIVER NETWORK MAP". WATER RESOUR. RES., 49.

- YAMAZAKI, D.; IKESHIMA, D.; TAWATARI, R.; YAMAGUCHI, T.; O'LOUGHLIN, F.; NEAL, J. C.; SAMPSON, C. C.; KANAE, S.; BATES, P. D. (2017). A HIGH ACCURACY MAP OF GLOBAL TERRAIN ELEVATIONS. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, v.44, p. 5844-5853.
- YANG, C. T. (1973). INCIPIENT MOTION AND SEDIMENT TRANSPORT. J. HYDR. DIV., 99(10), pp. 1679-1704.
- YANG, C. T. (1984). UNIT STREAM POWER EQUATION FOR GRAVEL. JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING, v. 110.
- YIGZAW, W., LI, H.-Y., DEMISSIE, Y., HEJAZI, M. I., LEUNG, L. R., VOISIN, N., & PAYN, R. (2018). A NEW GLOBAL STORAGE-AREA-DEPTH DATASET FOR MODELING RESERVOIRS IN LAND SURFACE AND EARTH SYSTEM MODELS. WATER RESOURCES RESEARCH TECHNICAL, 54(12), 10,372–10,386.

ANEXO A. MODELOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS RELEVANTES

Tabela A1. Modelos hidrossedimentológicos levantados e suas características.

Modelo	Equipe de desenvolvimento	Forma de obtenção	Dimensão	Representação de hidráulica/hidrodinâmica	Disponibilidade	Trabalhos
CCHE	National Center for Computational Hydroscience and Engineering	Download < https://www.ncche.olemiss.edu/downloads/ >	1D/2D/3D	Sim	Livre	ZHANG, Y. <i>et al.</i> Numerical Simulation of Sediment Transport and Morphological Change of JiJi Wier Reservoir. World Environmental and Water Resources Congress, 2009.
CH 3D SED (Computational Hydraulics 3D - Sediment)	Dr. Y. Peter Sheng - Aeronautical Research Associates of Princeton	Entrar em contato pelo e-mail: pete@coastal.ufl.edu	3D	Sim	Pago	GESSLER, D. <i>et al.</i> Application of 3D Mobile Bed, Hydrodynamic Model. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 125, 1999.
DELFT	Laboratórios DELFT Hydraulics, Delft University of Technology, Holanda	Download < https://oss.deltares.nl/web/delft3d/downloads >	2D/3D	Sim	Livre	DYKES, J.D. <i>et al.</i> Application of Delft3D in the Nearshore Zone. Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, Mississippi, 2014.
EFDC (Environmental Fluid Dynamic Code)	EE Modelling System	Download < https://www.epa.gov/ceam/environment-fluid-dynamics-code-efdc-download-page >	1D/2D	Sim	Pago	JAMES, S.C. <i>et al.</i> Advances in sediment transport modelling. Journal of Hydraulic Research, vol. 48, 2010.

Modelo	Equipe de desenvolvimento	Forma de obtenção	Dimensão	Representação de hidráulica/hidrodinâmica	Disponibilidade	Trabalhos
GSTARS (Generalized Sediment Transport for Alluvial River Simulation)	U.S. Bureau of Reclamation	Download < https://www.engr.colostate.edu/ce/facultystaff/yang/gstars.html >	1D	Sim	Livre	YANG, C.T. <i>et al.</i> Generalized Sediment Transport Models for Alluvial Rivers and Reservoirs. US-China Workshop on Advanced Computational Modelling in Hydrosience & Engineering, Estados Unidos da América, 2005.
HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System)	U.S. Army Corps of Engineers (USACE) Hydrologic Engineering Center (HEC)	Download < https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/ >	1D	Sim	Livre	HAGHIABI, A.H. e ZAREDEHDASHT, E. Evaluation of HEC-RAS Ability in Erosion and Sediment Transport Forecasting. World Applied Sciences Journal, Ed. 17, pg 1490-1497, 2012.
MGB-SED	Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul	Download < https://www.ufrgs.br/hge/mgb-sed-plugin-qgis/ >	2D	Sim	Livre	FAGUNDES, H.O. <i>et al.</i> Análise comparativa do transporte de sedimentos utilizando os modelos MGB-SED e HEC-RAS. XIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. 2018.
MIKE 11 – River Modelling	DHI-Software (Danish Hydraulic Institute)	Download < https://www.mikropoweredbydhi.com/download/mike-2020 >	1D	Sim	Livre	ODUYEMI, K. The application of MIKE 11 river modelling package to modelling the middle reaches of an estuary. University of Abertay Dundee, 1994.
MIKE 21C - 2D River Hydraulics and Morphology	DHI Group (Danish Hydraulic Institute)	Download < https://www.mikropoweredbydhi.com/download/mike-2020 >	2D	Sim	Livre	CHAUDHARY, H.P. <i>et al.</i> Integrated 1D and 2D numerical model simulations for flushing of sediment from reservoirs. ISH Journal of Hydraulic Engineering, vol. 25, pg. 19-27, 2019.

Modelo	Equipe de desenvolvimento	Forma de obtenção	Dimensão	Representação de hidráulica/hidrodinâmica	Disponibilidade	Trabalhos
MIKE 3	DHI Group (Danish Hydraulic Institute)	Download < https://www.mikepoweredbydhi.com/download/mike-2020 >	3D	Sim	Livre	FAIRLEY, I. <i>et al.</i> The cumulative impact of tidal stream turbine arrays on sediment transport in the Pentlan Firth. Renewable Energy, vol. 80, pg. 755-769, 2015.
MOHID (Three Dimensional Water Modeling System)	MOHID - Water Modelling System	Download < http://www.mohid.com/ >	3D	Sim	Livre	FRANZ, G. <i>et al.</i> Modelling of sediment transport and morphological evolution under the combined action of waves and currents. Ocean Science, vol. 13, pg. 673-690, 2017.
River2D	Universidade de Alberta, Canadá	Download < https://www.river2d.ca/ >	2D	Sim	Livre	PECINI, B. Aplicação do modelo River 2D em Estudos de Desvios de Rios. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, na área de Recursos Hídricos Energéticos e Ambientais, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Unicamp, 2016.
RMA 10 (Resource Management Associates)	Resources Management Associates - Water Resources Engineering	Contato: < https://www.rmanet.com/ >	2D	Sim	Fechado	PRASTICA, R.M.S. <i>et al.</i> Developing Hydrodynamic and Sediment Transport Modelling on Lakes: A Preliminary Study. International Journal of Environmental Science and Development, vol. 9, 2008.
SED2D	The U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station	-	2D	Sim	-	GAD, M.A. <i>et al.</i> Hydrodynamic Modeling of Sedimentation in the Navigation Channel of Damietta Harbor in Egypt. Coastal Engineering Journal, vol. 55, 2013.

Modelo	Equipe de desenvolvimento	Forma de obtenção	Dimensão	Representação de hidráulica/hidrodinâmica	Disponibilidade	Trabalhos
SIC (Simulation of Irrigation Canals)	Irstea (ex-Cemagref)	-	1D	Sim	Pago	BAUME, J.P. <i>et al.</i> SIC: A 1D Hydrodynamic Model for River and Irrigation Canal Modeling and Regulation. 2005.
SisBAHIA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental)	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro	Download < http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/ >	2D/3D	Sim	Livre	CORRÊA, G.P. Aplicação do Modelo de Qualidade de Água SisBAHIA no Reservatório do Rio Verde, RMC/PR. Dissertação de mestrado em Engenharia Ambiental, no curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2013.
SMS (Surface-Water Modeling System)	Aquaveo	Download < https://www.aquaveo.com/downloads >	1D/2D/3D	Sim	Pago	SAMMANY, M.S. e MOUSTAFA, A.M. Adaptation of Surface Water Modeling System for Sediment Transport Investigations in Lake Nasser. Nile Basin Water Science & Engineering Journal, vol. 4, 2011.
SRH-1D (Sedimentation and River Hydraulics - One Dimensional)	Bureau of Reclamation e Environmental Protection Agency	Download < https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/computer%20software/models/srh1d/index.html >	1D	Sim	Livre	HUANG, J. e GREIMANN, B.P. Sediment Transport Channel Morphology Model in the San Joaquin River from Friant Dam to Mendota Dam, California. 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, 2010.

Modelo	Equipe de desenvolvimento	Forma de obtenção	Dimensão	Representação de hidráulica/hidrodinâmica	Disponibilidade	Trabalhos
SRH-2D (Sedimentation and River Hydraulics - Two Dimensional)	Bureau of Reclamation e Environmental Protection Agency	Download < https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/computer%20software/models/srh2d/index.html >	2D	Sim	Livre	SANI, S. J. <i>et al.</i> Evaluation of Hydrodynamic and Sediment Transport Equations and Parameter Sensitivity Analysis Using the SRH-2D Model. Department of Civil Engineering, Mahabad Branch, Islamic Azad University, Mahabad, Irã, 2015.
SSIIM (Sediment Simulation in Intakes with Multiblock Option)	Norwegian University of Science and Technology	Dowonload < http://folk.ntnu.no/nilsol/ssiim/ >	3D	Sim	Livre	ZHANG, Q. <i>et al.</i> Simulation of non-uniform sediment transport in a german reservoir with the SSIIM model and sensitivity analysis. IAHR World Congress, Holanda, 2015.
SWAT (Soil and Water Assessment Tools)	Texas A&M University, Texas A&M AgriLife Research e Agricultural Research Service	Download < https://swat.tamu.edu/software >	1D	Não	Livre	CAPRARIO, J. <i>et al.</i> Simulação Hidrossedimentológica da Bacia Hidrográfica do Rio Quatorze, Francisco Beltrão (Paraná, Brazil). Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2017.
TABS2	The U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station	-	2D	Sim	-	LEE H.Y. e SHIH, S.S. Impacts of vegetation changes on the hydraulic and sediment transport characteristics in Guandu mangrove wetland. Ecological Engineering, vol. 23, pg. 85-94, 2004.
TELEMAC	TELEMAC - MASCARET	Download < http://www.opentelemac.org/index.php/download >	2D	Sim	Livre	VILLARET, C. <i>et al.</i> Morphodynamic modeling using the Telemac finite-element system. Computers & Geosciences, vol. 53, pg. 105-113, 2013.

APÊNDICE A - Modelo MGB

O MGB (Modelo de Grandes Bacias), inicialmente desenvolvido por Collischonn (2001), modificado por Paiva (2009) e posteriormente por Pontes (2016), é um modelo hidrológico distribuído de grandes escalas (área acima de 1.000 km²) baseado em processos, e que utiliza equações físicas e conceituais para simular os processos hidrológicos na superfície terrestre.

O modelo já foi utilizado em importantes bacias hidrográficas da América do Sul (GETIRANA et al. 2010; NÓBREGA et al. 2011; FAN et al., 2014a; CRISCI et al., 2015; PONTES et al. 2017), incluindo trabalhos com sistema de suporte à decisão (PEREIRA, et al., 2012), análise de uso da terra (BAYER; COLLISCHONN, 2013), versões modificadas que incluem avaliação da qualidade da água (FAN et al., 2015a) e geração e transporte de sedimentos (BUARQUE, 2015; FAGUNDES et al., 2019), desenvolvimento de sistema de previsão hidrológica (FAN et al. 2016) e aplicação em escala continental com modelagem hidrológica e hidrodinâmica de toda a América do Sul (SIQUEIRA et al., 2018). Maiores detalhes sobre o modelo podem ser obtidos em Collischonn (2001), Paiva (2009), Paiva et al. (2013a), Paiva et al. (2013b) e Pontes (2016).

Em sua formulação, o MGB adota uma discretização da bacia em pequenas áreas de drenagem denominadas "minibacias", onde cada uma é drenada por um único trecho de rio. As minibacias são ainda subdivididas em classes de Unidades de Respostas Hidrológicas (URH), que são áreas de comportamento hidrológico similares, definidas por uma combinação de mapas de cobertura da terra e de tipo do solo. Em cada minibacia as características de uso de solo, cobertura vegetal e tipo de solo são sintetizadas nas URH.

O modelo utiliza passo de tempo diário e está dividido em quatro módulos: balanço hídrico no solo (1); balanço de energia e evapotranspiração (2); interceptação, geração e propagação de escoamentos superficial, sub superficial e subterrâneo nos elementos da bacia (3); e um módulo de propagação de vazão na rede de drenagem (4).

Para aplicação do modelo, são necessários dados hidrológicos e meteorológicos, que devem ser associados aos centroides das minibacias por interpolação dos dados disponíveis em postos na bacia. Os arquivos devem conter informações de vazão, chuva e clima e, para os dados climáticos, utilizam-se informações sobre temperatura, pressão, insolação, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

O balanço vertical de água e energia são computados de maneira independente para cada URH em cada minibacia. A interceptação de água pela cobertura vegetal é representada por um reservatório cuja capacidade é função do Índice de Área Foliar (IAF)¹⁶. O balanço de água no solo é realizado em uma camada, considerando o solo como um reservatório único de água. O conceito de área de contribuição variável baseado no modelo ARNO (TODINI, 1996) é utilizado para computar a infiltração de água no solo e o escoamento superficial. Para o balanço de energia o modelo utiliza

¹⁶ O Índice de Área Foliar (IAF) expressa a relação entre a área das folhas de todas as plantas e da área de uma parcela de solo (COLLISCHONN, 2001).

variáveis meteorológicas de superfície, sendo a evaporação do solo, da vegetação e do dossel estimada com base na equação de Penman-Monteith (SHUTTLEWORTH, 1993).

Em cada URH das minibacias são determinados os volumes de escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo. Para a determinação do escoamento subsuperficial é usada uma equação semelhante à equação de condutividade hidráulica não-saturada de Brooks e Corey (RAWLS et al., 1993). O volume percolado da camada superficial do solo ao lençol freático é estimado por uma relação linear simples entre o armazenamento atual e o máximo de armazenamento de água no solo. Os volumes de escoamentos gerados a nível das URH dentro de cada minibacia são propagados para a rede de drenagem usando três reservatórios lineares simples, sendo um para cada tipo de escoamento.

Em sua versão mais recente, na rede de drenagem, o volume total de escoamento gerado em cada minibacia é propagado utilizando o método de Muskingum-Cunge (COLLISCHONN; TUCCI, 2001) ou a propagação inercial (BATES et al., 2010). Para o transporte na rede de drenagem, independentemente do método de propagação, cada trecho de rio é subdividido, segundo critérios específicos, e os hidrogramas de vazão podem ser avaliados no exutório das minibacias bem como em qualquer outro ponto ao longo da rede de drenagem representada. A seguir, são apresentados os processos hidrológicos e hidráulicos simulados pelo modelo MGB baseados na descrição original de Collischonn (2001) e nas descrições atualizadas de Paiva et al. (2009), Buarque (2015) e Pontes (2016).

Processos hidrológicos verticais

O balanço de água no solo e o de energia são feitos independentemente em cada URH das minibacias, utilizando suas características e parâmetros associados. Os processos verticais simulados pelo modelo MGB envolvem o balanço de água no solo, a interceptação, a percolação da água para o aquífero e o fluxo ascendente e a geração dos escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo. Estes processos estão apresentados no esquema da Figura 132.

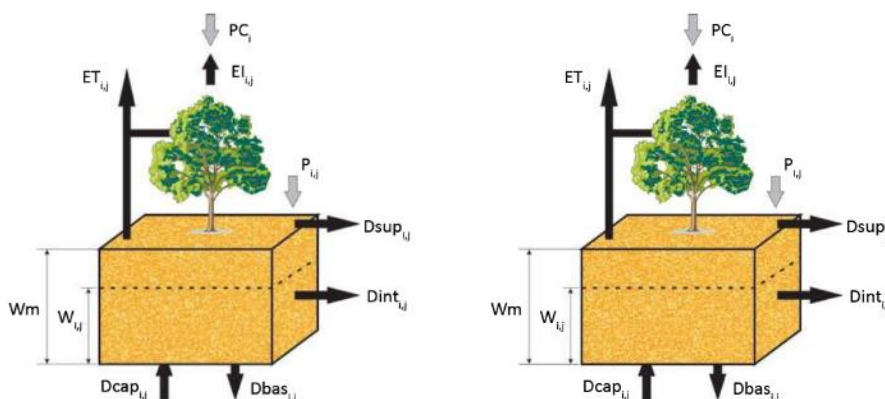


Figura 132. Esquema do balanço de água no solo do modelo MGB para uma URH. Para uma URH (j) de uma minibacia (i), são representados a precipitação (PC), a evaporação (ET) a evapotranspiração (EI), a percolação da água para o aquífero (P) e o fluxo ascendente ($Dcap$) e a geração dos escoamentos superficial ($Dsup$), subsuperficial ($Dint$) e subterrâneo ($Dbas$).

Fonte: Buarque (2015).

Interceptação

A interceptação é o processo de retenção de água da chuva pela vegetação antes de sua chegada à superfície do solo. No modelo, o processo é representado por um reservatório de volume máximo (S_{max}) que depende da densidade de vegetação de cobertura do solo, indicada pelo Índice de área foliar (IAF). Este índice expressa a relação entre a área total das folhas da vegetação e a área superficial do solo, e seu valor depende do tipo de vegetação. É usual adotar valores menores que 1,0 para vegetação rasteira e 6,0 ou mais em florestas, mas o índice pode variar ao longo do ano em casos como o de culturas agrícolas. O valor S_{max} do reservatório de interceptação é dado por:

$$S_{max_j} = \alpha * IAF_j \quad (28)$$

sendo S_{max_j} e IAF_j o volume máximo de interceptação [mm] e o Índice de Área Foliar [$m \cdot m^{-1}$] da URH j de uma minibacia i . O parâmetro da lâmina de interceptação α [mm] possui valor fixo e igual a 0,2 mm. No reservatório de interceptação, o balanço hídrico é dado pelas seguintes equações:

$$S_{i,j}^t = \min(S_{i,j}^{t-1} + PC_i, S_{max_j}) \quad (29)$$

$$P_{i,j} = PC_i - (S_{i,j}^t + S_{i,j}^{t-1}) \quad (30)$$

$$S_{i,j}^t = S_{i,j}^t - EI_{i,j} \quad (31)$$

$$EI_{i,j} = \min(S_{i,j}^t, EPI_{i,j}) \quad (32)$$

sendo: $S_{i,j}$ [mm] a lâmina de água interceptada na URH j da minibacia i ; PC_i [mm] a precipitação no topo da cobertura vegetal em qualquer minibacia i ; $P_{i,j}$ a precipitação sobre a camada superficial do solo na URH j da minibacia i ; $EI_{i,j}$ [mm] e $EPI_{i,j}$ [mm] as evaporações real e potencial, respectivamente, da lâmina d'água interceptada na URH j da minibacia i . A evaporação potencial da lâmina d'água interceptada é calculada pela equação de Penman-Monteith (SHUTTLEWORTH, 1993) com o parâmetro resistência superficial igual a zero. Os índices $t - 1$ e t correspondem ao início e ao final do intervalo de tempo de cálculo, respectivamente.

Balanço hídrico no solo

O balanço da água no solo, computado para cada URH j da minibacia i , é descrito pelo modelo por meio da equação abaixo:

$$W_{i,j}^t = W_{i,j}^{t-1} + (P_{i,j} - ET_{i,j} - D_{sup_{i,j}} - D_{int_{i,j}} - D_{bas_{i,j}} + D_{cap_{i,j}}) \quad (33)$$

sendo: $W_{i,j}^t$ [mm] o armazenamento de água na camada superficial do solo na URH j da minibacia i ; $P_{i,j}$ [mm] a parcela da precipitação que atinge a superfície do solo; $ET_{i,j}$ [mm] a evapotranspiração da água no solo; $D_{sup,i,j}$ [mm] o escoamento superficial; $D_{int,i,j}$ [mm] o escoamento subsuperficial ou interno; $D_{bas,i,j}$ [mm] o escoamento subterrâneo; $D_{cap,i,j}$ [mm] o escoamento ascendente do aquífero para a camada superficial do solo.

Evapotranspiração

O modelo calcula a evapotranspiração por meio da equação de Penman-Monteith, a qual utiliza dados meteorológicos e parâmetros relativos às características aerodinâmicas e dos estômatos das plantas:

$$ET = \frac{fc}{\lambda * \rho_w} \left[\frac{\Delta * (S_n - L_n - G) + \rho_a * c_p * \left(\frac{e_s - e_d}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma * \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \right] \quad (34)$$

sendo: ET [mm.dia⁻¹] a taxa de evaporação da água; λ [MJ.kg⁻¹] o calor latente de vaporização; ρ_w [kg.m⁻³] a massa específica da água, que corresponde a 1000 kg.m⁻³; Δ [kPa.°C⁻¹] o gradiente da pressão de saturação do vapor em relação à temperatura; S_n [MJ.m⁻².s⁻¹] a radiação líquida de onda curta; L_n [MJ.m⁻².s⁻¹] a radiação líquida de onda longa; G [MJ.m⁻².s⁻¹] o fluxo de energia para o solo; ρ_a [kg.m⁻³] a massa específica do ar; c_p [MJ.kg⁻¹. °C⁻¹] o calor específico do ar úmido, que equivale a 1,013.10⁻³ MJ.kg⁻¹. °C⁻¹; e_s [kPa] a pressão de saturação do vapor; e_d [kPa] a pressão do vapor; γ [kPa.°C⁻¹] a constante psicrométrica, igual a 0,66 kPa. °C⁻¹; r_a [s.m⁻¹] a resistência aerodinâmica; r_s [s.m⁻¹] a resistência superficial da vegetação; fc um fator de conversão de unidades, que equivale a 3,6.10⁻⁶.

A energia disponível para a evapotranspiração é primeiramente utilizada para evaporar a água interceptada e o restante da energia, se ainda houver, fica disponível para atender a transpiração da vegetação. A evaporação potencial (EPI) é calculada utilizando a equação (34), considerando a resistência superficial (r_s) nula e a resistência aerodinâmica dependente da velocidade do vento e da altura média da vegetação.

Escoamento superficial

O escoamento superficial gerado em cada URH é o escoamento direto efetivo, que corresponde àquele que chega rapidamente à rede de drenagem. No modelo, considera-se que a ocorrência de escoamento superficial ocorre apenas em áreas saturadas, as quais são variáveis em função do nível de saturação da bacia seguindo um processo Dunniano (DUNNE; BLACK, 1970). Para a geração desse escoamento, utiliza-se uma relação probabilística entre umidade do solo e fração de área saturada (áreas onde a infiltração é nula) conforme apresentada por Moore e Clarke (1981):

$$X = 1 - \left(1 - \frac{W}{W_m}\right)^{\frac{b}{b+1}} \quad (35)$$

sendo X a fração de área que está saturada; W [mm] o volume de água armazenado no solo; W_m [mm] é a capacidade máxima de armazenamento de água no solo; b [-] um parâmetro do modelo associado à URH que define o grau de heterogeneidade da capacidade de armazenamento de água no solo.

O escoamento superficial $Dsup$ entre dois passos de tempo consecutivos ($t - 1$ e t) é obtido para cada URH j de uma minibacia i por:

$$Dsup_{i,j} = P_{i,j} * \Delta t - (Wm_j - W_{i,j}^{t-1}) \quad \text{Se } A \leq 0 \quad (36)$$

$$Dsup_{i,j} = P_{i,j} * \Delta t - (Wm_j - W_{i,j}^{t-1}) + Wm_j + A^{b_j+1} \quad \text{Se } A > 0 \quad (37)$$

sendo $P_{i,j}$ [mm] a precipitação efetiva que chega à superfície do solo da URH j da minibacia i ; $Dsup_{i,j}$ [mm] o escoamento superficial da URH j da minibacia i ; A é um limite dado pela expressão:

$$A = \left[\left(1 - \frac{W_{i,j}^{t-1}}{Wm_j}\right)^{\frac{b}{b+1}} - \frac{P_{i,j} * \Delta t}{Wm_j * (b_j + 1)} \right] \quad (38)$$

Escoamento subsuperficial

O escoamento subsuperficial é aquele mais lento que o superficial, porém mais rápido que o subterrâneo. Para descrever este escoamento, o modelo utiliza uma equação não-linear com relação à umidade do solo que relaciona a condutividade hidráulica do solo com sua textura, semelhante à equação apresentada por Brooks e Corey (RAWLS et al., 1993). A equação é dada por:

$$Dint_{i,j} = Kint_j * \left(\frac{W_{i,j}^{t-1} - Wz_j}{Wm_j - Wz_j} \right)^{3 + \frac{2}{\lambda_j}} \quad (39)$$

sendo $Dint_{i,j}$ [mm] o volume de escoamento subsuperficial na URH j da minibacia i ; $Kint_j$ [mm.dia⁻¹] um parâmetro de drenagem subsuperficial; Wz_j [mm] o limite mínimo de armazenamento de água no solo a partir do qual haverá geração de escoamento superficial; λ_j [-] o índice de porosidade de solo.

Escoamento subterrâneo

O volume percolado para o aquífero é calculado por uma relação linear do volume de água armazenado no solo. Para cada intervalo de tempo, o volume de escoamento subterrâneo $Dbas_{i,j}$ de cada URH j da minibacia i é obtido por:

$$Dbas_{i,j} = Kbas_j * \left(\frac{W_{i,j}^{t-1} - Wc_j}{Wm_j - Wc_j} \right) \quad (40)$$

sendo Wc_j [mm] o limite mínimo de armazenamento de água no solo a partir do qual não há percolação; $Kbas_j$ [mm] o parâmetro que define a máxima percolação quando o solo está saturado.

Fluxo ascendente

Em situações de stress hídricos, quando a zona saturada do aquífero se encontra em baixas profundidades, pode ocorrer uma transferência de água do reservatório subterrâneo para a zona não saturada de solo. Este movimento ascendente ocorre por diferença de potencial ou pela existência de vegetação com raízes profundas o suficiente para retirar água diretamente do aquífero. No modelo, o fluxo ascendente é determinado por:

$$Dcap_{i,j} = \left(\frac{Wc_j - W_{i,j}^{t-1}}{Wc_j} \right) * DMcap_j \quad (41)$$

sendo Wc_j [mm] o limite máximo de armazenamento de água no solo para existir fluxo ascendente; $DMcap_j$ [mm] o máximo fluxo ascendente no solo.

Processos hidrológicos horizontais

Nem todo o volume dos escoamentos gerados nas minibacias chega à sua correspondente rede de drenagem no mesmo passo de tempo, mas sofrem retardo e amortecimento. No modelo, esses retardos e amortecimentos dos hidrogramas dos escoamentos são considerados através da passagem deles por três reservatórios lineares, sendo um para cada tipo de escoamento gerado: superficial, subsuperficial (ou interno) e subterrâneo. Os volumes armazenados nos três reservatórios são computados por:

$$Vsup_i^{t'} = Vsup_i^{t-1} + \sum_{j=1}^{N_{URH}} (1000 * Dsup_{i,j} * A_{i,j}) \quad (42)$$

$$Vint_i^{t'} = Vint_i^{t-1} + \sum_{j=1}^{N_{URH}} (1000 * Dint_{i,j} * A_{i,j}) \quad (43)$$

$$Vbas_i^{t'} = Vbas_i^{t-1} + \sum_{j=1}^{N_{URH}} (Dbas_{i,j} - Dcap_{i,j}) * 1000 * A_{i,j} \quad (44)$$

sendo $Vsup_i$ [m³], $Vint_i$ [m³] e $Vbas_i$ [m³] os volumes nos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo, respectivamente, na minibacia i , e A [km²] a área da URH j da minibacia i . O índice j indica o número da URH e N_{URH} é o número de URHs existentes, ambos relacionados à minibacia i considerada.

A vazão de saída de cada reservatório com destino à rede de drenagem é computada como uma função linear do respectivo volume armazenado no reservatório e do tempo de concentração da minibacia. As equações que estimam as vazões de saídas são:

$$Q_{sup_i} = \frac{1}{TKS_i} * V_{sup_i}^{t'} \quad (45)$$

$$Q_{int_i} = \frac{1}{TKI_i} * V_{int_i}^{t'} \quad (46)$$

$$Q_{bas_i} = \frac{1}{TKB_i} * V_{bas_i}^{t'}, \text{ com } TKB = CB * 3600 \quad (47)$$

sendo Q_{sup_i} [$m^3.s^{-1}$], Q_{int_i} [$m^3.s^{-1}$] e Q_{sub_i} [$m^3.s^{-1}$] as vazões de saída dos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo, respectivamente, na minibacia i ; TKS_i [s], TKI_i [s] e TKB_i [s] os tempos de retardo dos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo, respectivamente, na minibacia i ; CB [h] um parâmetro calibrável que controla o retardo do escoamento subterrâneo na minibacia e pode ser pré-estimado a partir dos dados de recessão dos hidrogramas.

Os valores de TKS e TKI são obtidos em função do tempo de concentração Tc_i [s] da minibacia e controlados pelos parâmetros calibráveis CS [-] e CI [-]:

$$TKS_i = CS * Tc_i \quad (48)$$

$$TKI_i = CI * Tc_i \quad (49)$$

O tempo de concentração Tc_i [s] da minibacia i é calculado pela fórmula de Kirpich:

$$Tc_i = a \frac{L_i^b}{S_i^c} \quad (50)$$

sendo L_i [km] e S_i [$m.m^{-1}$] o comprimento e a declividade, respectivamente, do maior afluente do rio principal da minibacia i . Os índices a , b e c são fixos, com valores iguais a 239,04; 0,77 e 0,385 respectivamente.

Finalmente, a vazão Q_{mini_i} [$m^3.s^{-1}$] que chega ao trecho de rio da minibacia é o somatório das vazões dos escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo.

$$Q_{mini_i} = Q_{sup_i} + Q_{int_i} + Q_{bas_i} \quad (51)$$

Propagação na rede de drenagem

As minibacias da discretização são interligadas entre si pela sua rede de drenagem, de forma que cada uma escoar para uma minibacia de jusante através do seu próprio exutório. A vazão gerada em uma minibacia é somada às vazões de montante do seu rio principal para posterior propagação até o seu exutório, ou a considerada diretamente como a vazão no seu exutório, conforme o caso. Nas minibacias de cabeceira, aquelas que não possuem escoamento vindo de montante, o modelo não realiza a propagação de vazão nos trechos de rios correspondentes, mas considera que toda vazão saindo dos reservatórios lineares das minibacias é destinada diretamente ao exutório dela. Apenas

nas minibacias internas, aquelas que recebem contribuição de montante, é realizada a propagação de vazão em seus respectivos trechos de rio. Um esquema dos processos de geração e propagação de escoamentos nas minibacias e de propagação de vazão na rede de drenagem está ilustrado na Figura 133.

No modelo MGB, a propagação tradicional de vazões nos trechos de rios das minibacias é realizada utilizando o método de Muskingum-Cunge (COLLISCHONN; TUCCI, 2001). Em cada trecho de rio são consideradas diversas seções de cálculo, as quais são definidas discretizando o trecho em subtrechos de acordo com critérios de precisão numérica, de forma que os hidrogramas de saída podem ser avaliados tanto no exutório de cada minibacia (fim do subtrecho mais de jusante do trecho) como em cada uma dessas seções. Para uma melhor precisão no tempo de viagem e no amortecimento do hidrograma, além da subdivisão dos trechos de rios, o passo de tempo diário também é subdividido pelo modelo em intervalos menores durante a propagação.

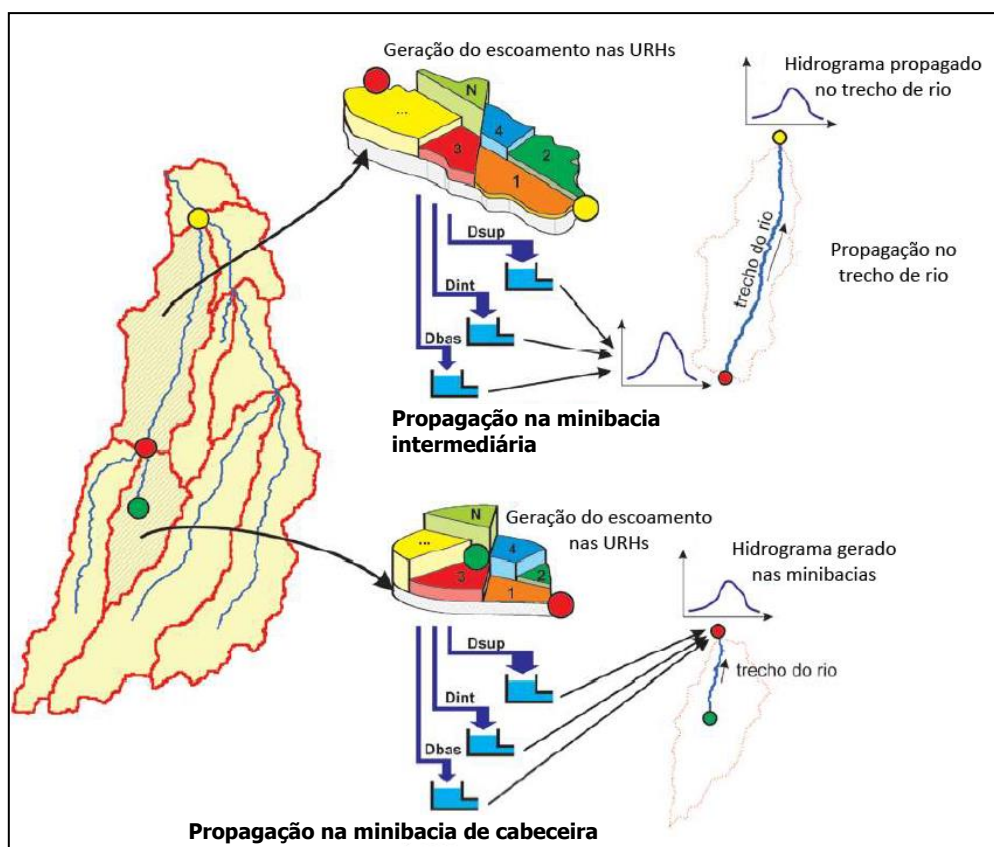


Figura 133. Esquema dos processos de geração e propagação de escoamentos nas minibacias e propagação de vazão na rede de drenagem, considerando minibacias de cabeceira (esquema inferior) e minibacias intermediárias (esquema superior).

A vazão de saída de um trecho de rio em um intervalo de tempo qualquer é obtida em função das vazões de entrada e saída no intervalo de tempo anterior e da vazão de entrada no intervalo atual, como mostra a Equação (52).

$$Q_{i+1}^{t+1} = C1 * Q_i^t + C2 * Q_i^{t+1} + C3 * Q_{i+1}^t \quad (52)$$

sendo Q [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$] a vazão; i e $i + 1$ as seções de cálculo de montante e jusante de determinado subtrecho de rio; t e $t + 1$ o início e o final do intervalo de tempo de cálculo Δt [s]. Os coeficientes $C1$, $C2$ e $C3$ são calculados pelas expressões:

$$C1 = \frac{2 * K * X + \Delta t}{2 * K * (1 - X) + \Delta t} \quad (53)$$

$$C2 = \frac{\Delta t - 2 * K * X}{2 * K * (1 - X) + \Delta t} \quad (54)$$

$$C3 = \frac{2 * K * (1 - X) - \Delta t}{2 * K * (1 - X) + \Delta t} \quad (55)$$

com seus parâmetros de tempo K [s] e de espaço X [-] dados por:

$$K = \frac{\Delta t}{c_0} \quad (56)$$

$$X = 0,5 - \frac{Q_0}{B_0 * S_0 * c_0 * \Delta x} \quad (57)$$

sendo Q_0 [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$] uma vazão de referência; B_0 [m] a largura do rio; S_0 [$\text{m}.\text{m}^{-1}$] a declividade do subtrecho; c_0 [$\text{m}.\text{s}^{-1}$] a celeridade cinemática; Δx [m] o comprimento do subtrecho de rio.

Dada a escala de aplicação do modelo, a vazão de referência Q_0 e a largura do rio B_0 são estimados utilizando "relações geomorfológicas" construídas relacionando cada uma destas variáveis à área de contribuição da bacia a montante do trecho de rio. O comprimento e a declividade dos trechos podem ser obtidos através de Modelos Digitais de Elevação (MDE). A celeridade cinemática é obtida da equação de Manning, considerando o caso particular de um canal com seção retangular:

$$c_0 = \frac{5}{3} * \frac{Q_0^{0,4} * S_0^{0,3}}{n^{0,6} * B_0} \quad (58)$$

sendo n [-] o coeficiente de Manning do trecho.

O intervalo de tempo de cálculo Δt [s] e o comprimento do subtrecho Δx [m] são dados por:

$$\Delta t \leq \frac{T_s}{M} \quad (59)$$

$$\Delta x \leq 0,5 * \Delta t * \left[1 + \left(1 + \frac{3 * Q_0}{2 * B_0 * S_0 * c_0^2 * \Delta t} \right) \right] \quad (60)$$

sendo T_s [s] o tempo de subida da onda de cheia e M um parâmetro que deve ser sempre maior que 5.

Propagação de vazões na rede de drenagem com o modelo inercial

O método de Muskingum-Cunge consiste em uma metodologia simplificada para calcular o processo de propagação de vazões na rede de drenagem, e que nem sempre consegue representar todas as características da hidráulica fluvial em grandes rios, geralmente mantenedores de extensas planícies de inundação e significativos efeitos de remanso. Embora seja um aspecto importante no comportamento de muitas bacias hidrográficas de grandes escalas, particularmente naquelas que apresentam um sistema e drenagem relativamente plano, a hidrodinâmica do rio pode ser prejudicada com a utilização de métodos simplificados de propagação.

Buscando considerar os casos acima, Pontes (2016) introduziu no modelo MGB um modelo de propagação inercial de vazões. O modelo incorporado possui base física e simula vazões e níveis em redes de canais com confluências e defluências, planícies de inundação e condições de contorno internas. Este método de propagação tem sido considerado um modelo hidrodinâmico por apresentar resultados muito semelhantes à resolução completa das equações de Saint Venant (FAN et al., 2014b), sendo a opção adotada por diversos autores (NEAL et al., 2012; DOTTORI; TODINI, 2013; YAMAZAKI et al., 2013; PONTES, 2016).

Fan et al. (2014b) compararam os resultados apresentados por diferentes modelos de propagação e concluíram que, para grande parte das situações, os resultados obtidos com o modelo inercial se assemelham muito aos resultados obtidos com a solução completa das equações de Saint-Venant, com a vantagem da simplicidade de sua formulação. O método inercial representa melhor as vazões das bacias com grandes planícies inundáveis, quando comparado ao método de Muskingum-Cunge, devido sua representação dos processos hidráulicos nos rios (PONTES et al., 2015).

Para possibilitar a sua aplicação em grandes bacias hidrográficas, que geralmente apresentam grande escassez de dados, o modelo considera dados usualmente encontrados em escalas globais e uso de algoritmos baseados em GIS para extração de parâmetros e das informações necessárias diretamente de Modelos Digitais de Elevação (MDE).

O escoamento unidimensional em rios e canais pode ser descrito pelas equações de Saint-Venant (MILLER; CUNGE, 1975; CHANSON, 2004) que são descritas como:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (61)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gAS_0 - gAS_f \quad (62)$$

onde Q é a vazão; A é a área da seção transversal ao escoamento; x é a distância no sentido longitudinal; t é o tempo; h é a profundidade do rio; S_0 é a declividade do fundo do rio; S_f é a perda de energia por atrito com o fundo e as margens; g é aceleração da

gravidade. A equação (61) é chamada equação da continuidade, enquanto a equação (62) é a equação dinâmica que, por sua vez, pode ser dividida em cinco termos:

$$F1 = gAS_f \quad (\text{força de atrito}) \quad (63)$$

$$F2 = gAS_0 \quad (\text{força peso}) \quad (64)$$

$$F3 = gA \frac{\partial h}{\partial x} \quad (\text{força de pressão}) \quad (65)$$

$$F4 = \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} \quad (\text{inércia advectiva}) \quad (66)$$

$$F5 = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (\text{inércia local}) \quad (67)$$

O modelo inercial (BATES et al., 2010), despreza o termo de inércia advectiva (F4) na equação dinâmica, resultando em:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} - gAS_0 + gAS_f = 0 \quad (68)$$

Ou combinando o termo de pressão (F3) e do peso (F2):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (69)$$

onde y é o nível da superfície da água em relação a um referencial.

A equação (68) e a equação (69) são equivalentes, mas a equação (69) é considerada mais conveniente do ponto de vista computacional. A combinação da equação (61) e da equação (69) recebe o nome de modelo inercial. Pontes (2016), utilizou o modelo inercial para aperfeiçoamento do módulo de propagação de vazões do modelo MGB, com aplicação na Bacia do Prata, além de permitir avanços na discretização da bacia hidrográfica com a representação de regiões muito planas, de drenagem complexa.

APÊNDICE B - HIDROGRAMAS E CURVAS DE PERMANÊNCIA NA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO HIDROLÓGICA

Período de calibração do modelo hidrológico MGB-IPH

A calibração dos parâmetros do modelo hidrológico foi realizada no período de 1990 a 2014. O período apresentado nos gráficos é de 2006 a 2009, considerado representativo de todo o período e permitindo uma melhor visualização do resultado da calibração.

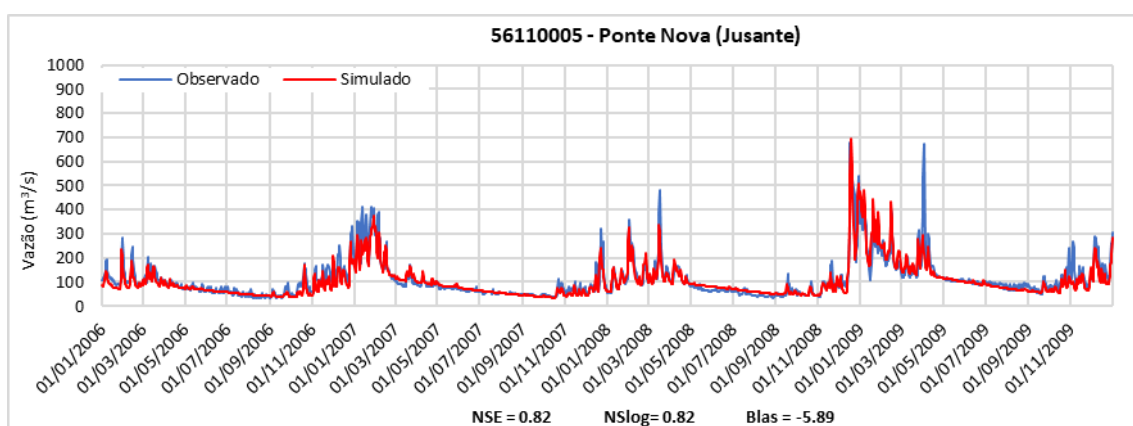


Figura 134. Hidrogramas simulado e observado na estação Ponte Nova (56110005), a estação mais a jusante do rio Piranga, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014. O período apresentado no gráfico é de 2006 a 2009, para melhor visualização.

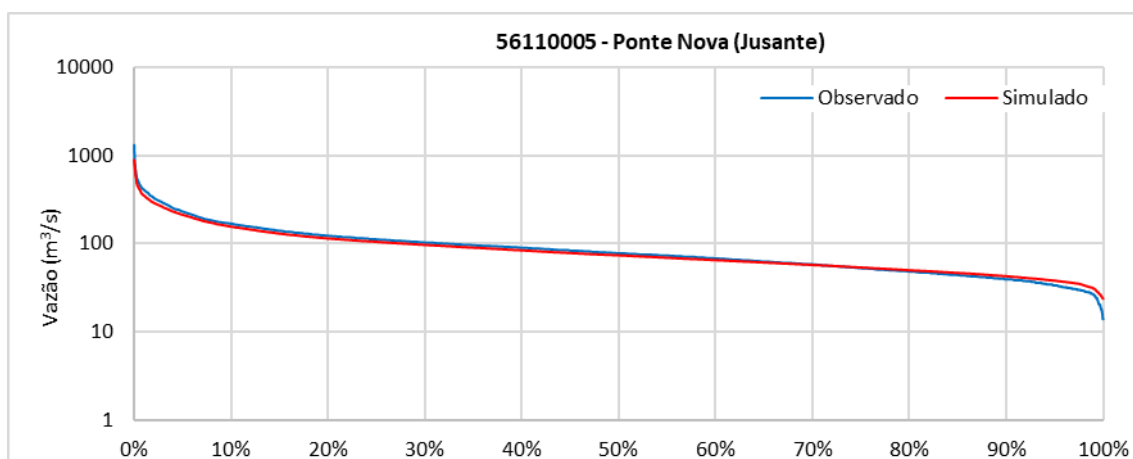


Figura 135. Curvas de permanência simulada e observada na estação Ponte Nova (56110005), a estação mais a jusante do rio Piranga, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014.

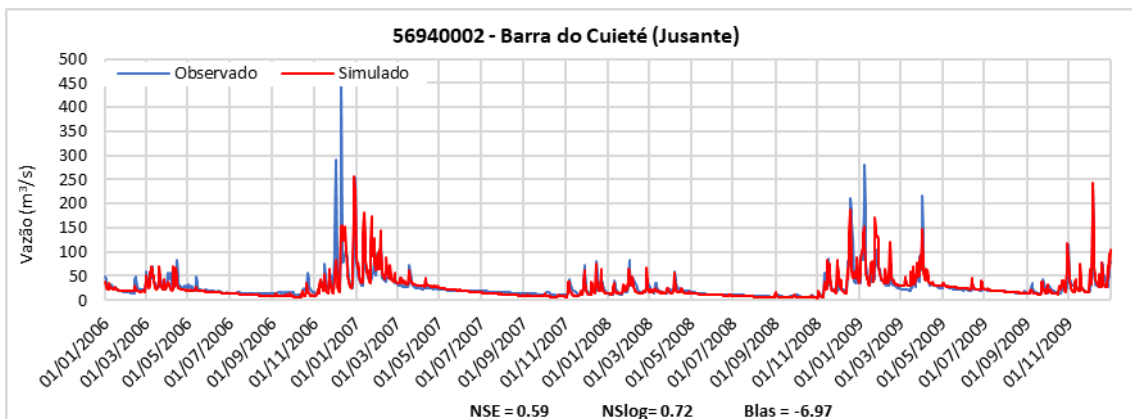


Figura 136. Hidrogramas simulado e observado na estação Barra do Cuieté (56940002), a estação mais a jusante do rio Caratinga, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014. O período apresentado no gráfico é de 2006 a 2009, para melhor visualização.

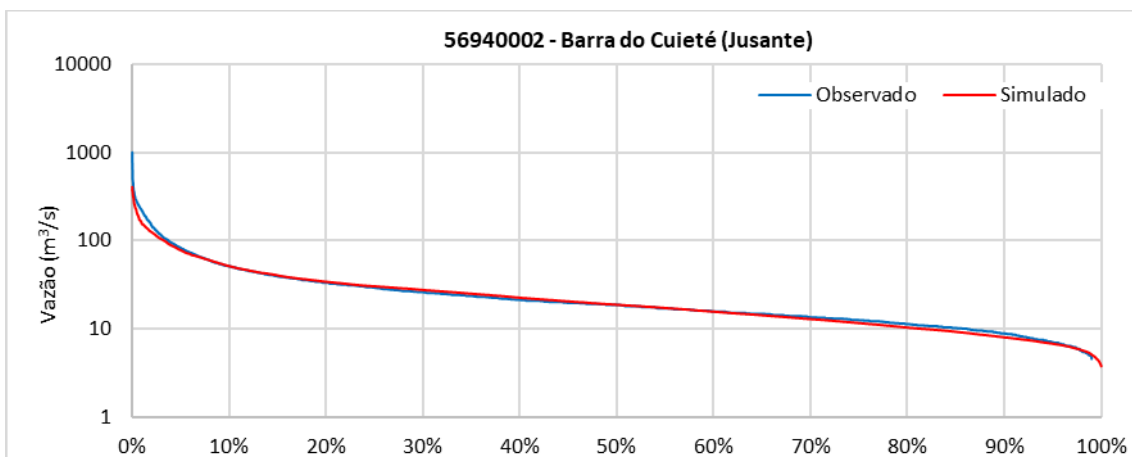


Figura 137. Curvas de permanência simulada e observada na estação Barra do Cuieté (56940002), a estação mais a jusante do rio Caratinga, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014.

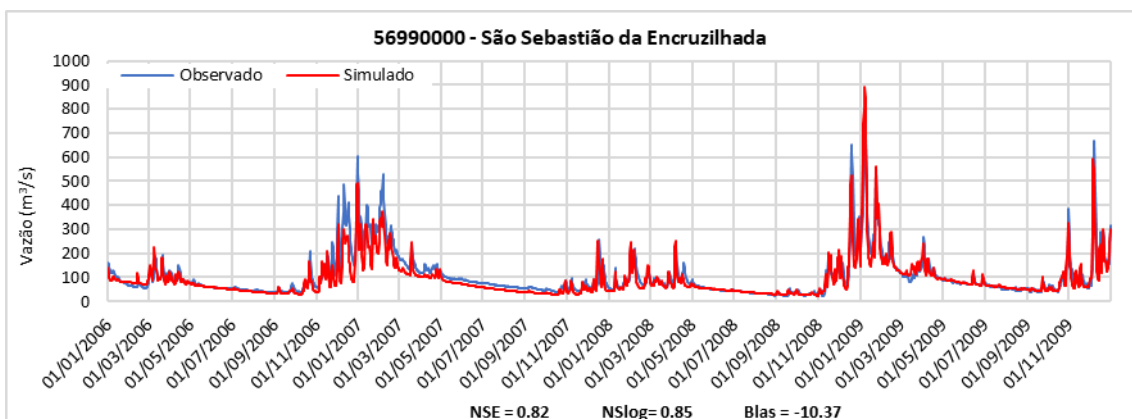


Figura 138. Hidrogramas simulado e observado na estação São Sebastião da Encruzilhada (56990000), a estação mais a jusante do rio Manhaçu, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014. O período apresentado no gráfico é de 2006 a 2009, para melhor visualização.

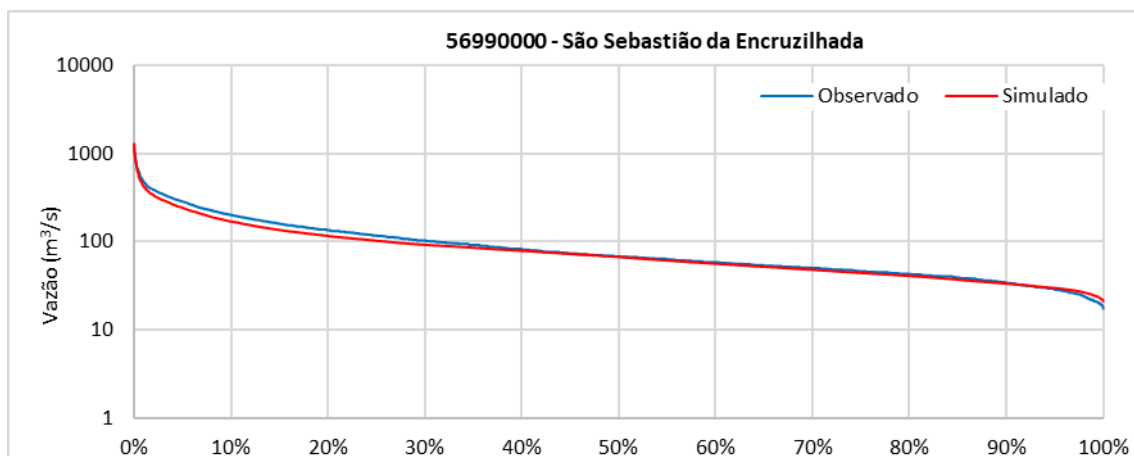


Figura 139. Curvas de permanência simulada e observada na estação São Sebastião da Encruzilhada (56990000), a estação mais a jusante do rio Manhaçu, no período de janeiro de 1990 a dezembro de 2014.

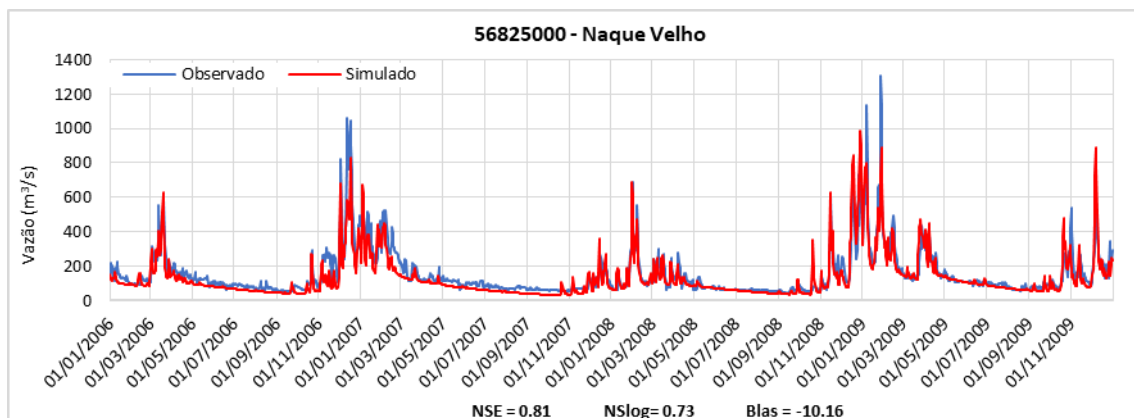


Figura 140. Hidrogramas simulado e observado na estação Naque Velho (56825000), a estação mais a jusante do rio Santo Antônio, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014. O período apresentado no gráfico é de 2006 a 2009, para melhor visualização.

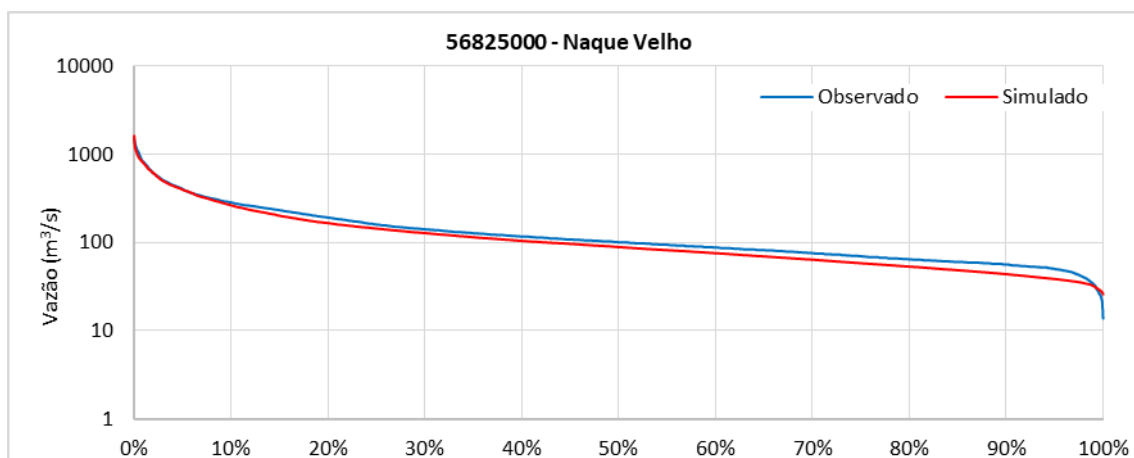


Figura 141. Curvas de permanência simulada e observada na estação Naque Velho (56825000), a estação mais a jusante do rio Santo Antônio, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014.

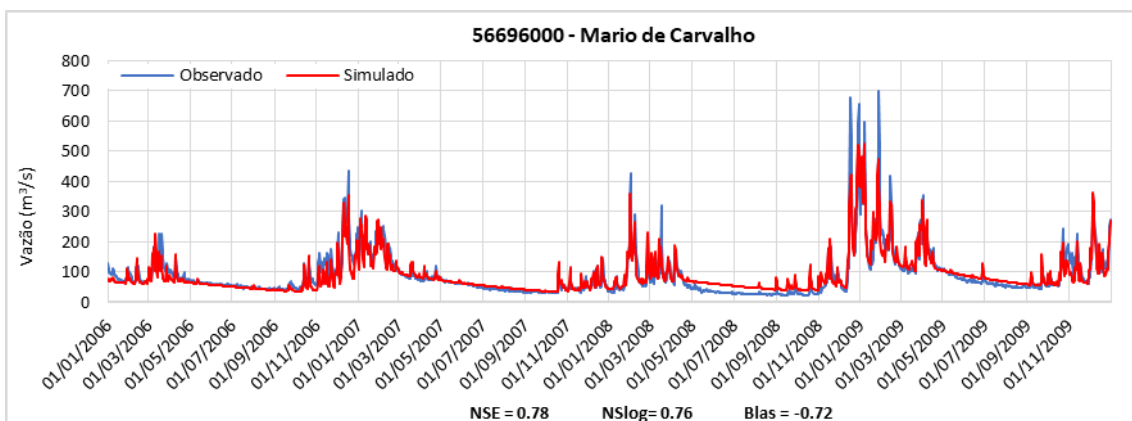


Figura 142. Hidrogramas simulado e observado na estação Mario de Carvalho (56696000), a estação mais a jusante do rio Piracicaba, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014. O período apresentado no gráfico é de 2006 a 2009, para melhor visualização.

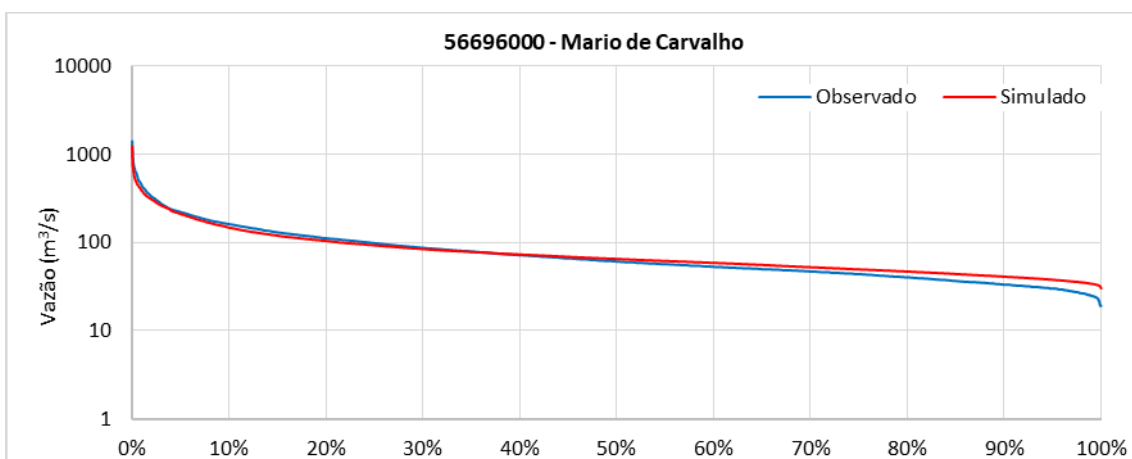


Figura 143. Curvas de permanência simulada e observada na estação Mario de Carvalho (56696000), a estação mais a jusante do rio Piracicaba, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014.

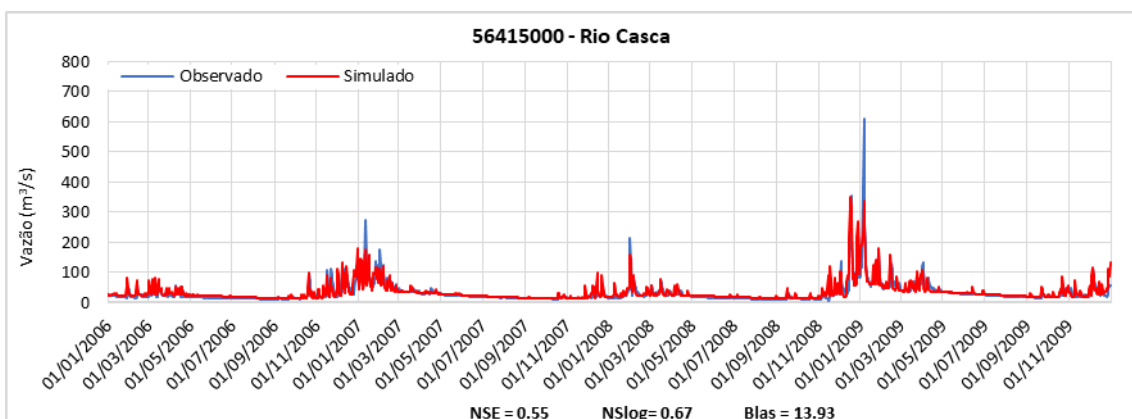


Figura 144. Hidrogramas simulado e observado na estação Rio Casca (56415000), a estação mais a jusante do rio Casca, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014. O período apresentado no gráfico é de 2006 a 2009, para melhor visualização.

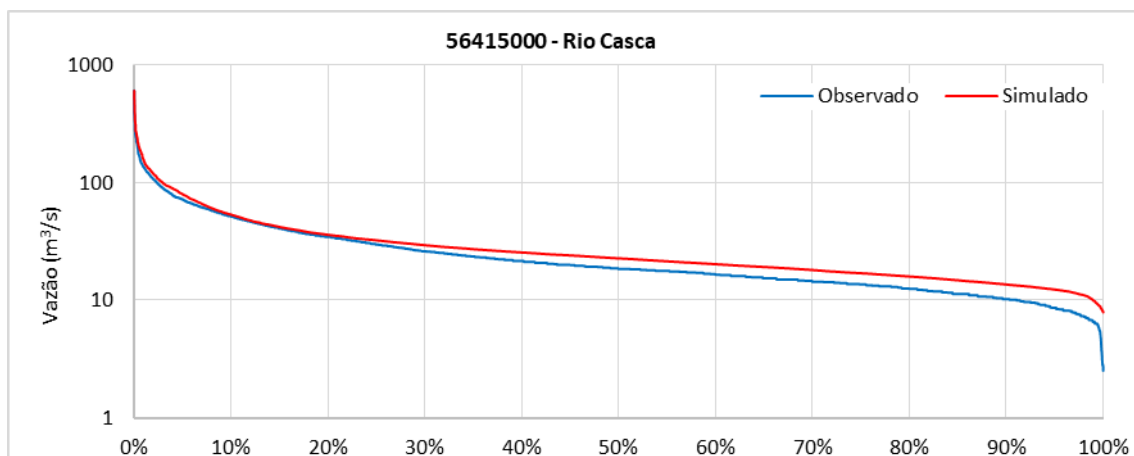


Figura 145. Curvas de permanência simulada e observada na estação Rio Casca (56415000), a estação mais a jusante do rio Casca, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014.

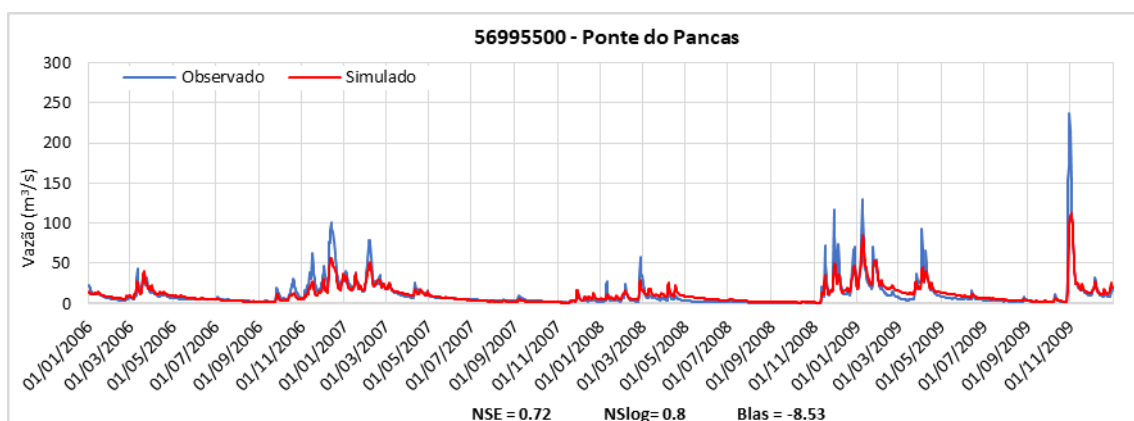


Figura 146. Hidrogramas simulado e observado na estação Ponte do Pancas (56995500), a estação mais a jusante do rio Pancas, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014. O período apresentado no gráfico é de 2006 a 2009, para melhor visualização.

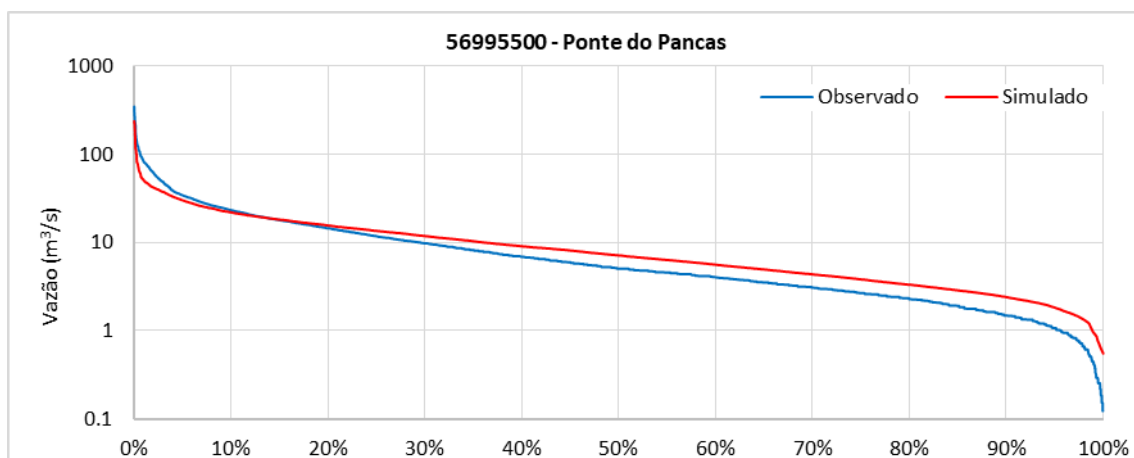


Figura 147. Curvas de permanência simulada e observada na estação Ponte do Pancas (56995500), a estação mais a jusante do rio Pancas, no período simulado de janeiro de 1990 a dezembro de 2014.

Período de validação do modelo hidrológico MGB-IPH

A validação dos parâmetros do modelo hidrológico foi realizada no período de 1970 a 1989. O período apresentado nos gráficos é de 1981 a 1983, considerado representativo de todo o período e permitindo uma melhor visualização do resultado da validação.

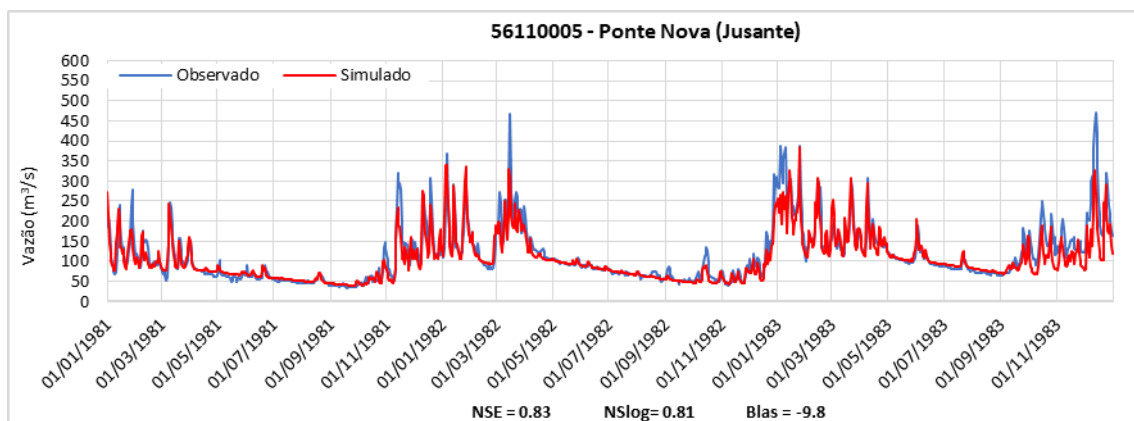


Figura 148. Hidrogramas simulado e observado na estação Ponte Nova (56110005), a estação mais a jusante do rio Piranga, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989. O período apresentado no gráfico é de 1981 a 1983, para melhor visualização.

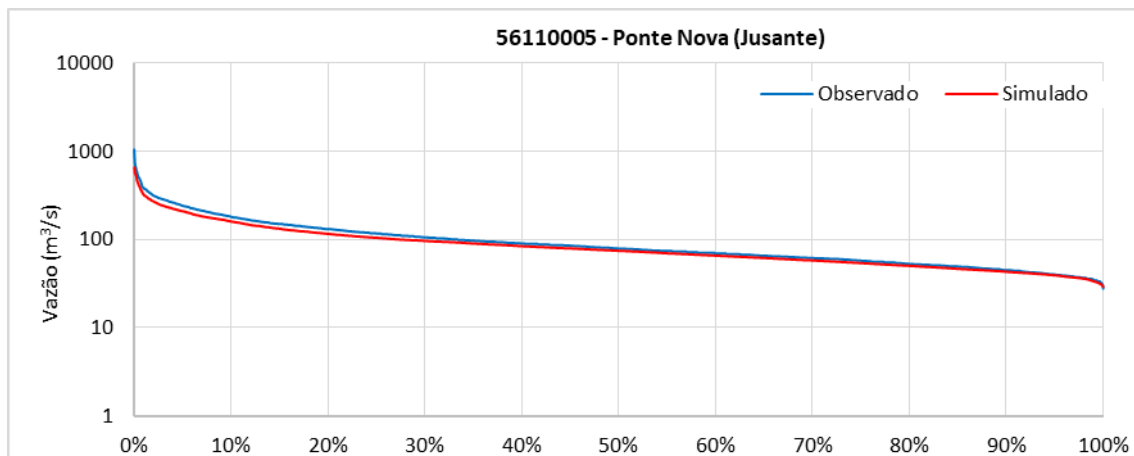


Figura 149. Curvas de permanência simulada e observada na estação Ponte Nova (56110005), a estação mais a jusante do rio Piranga, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989.

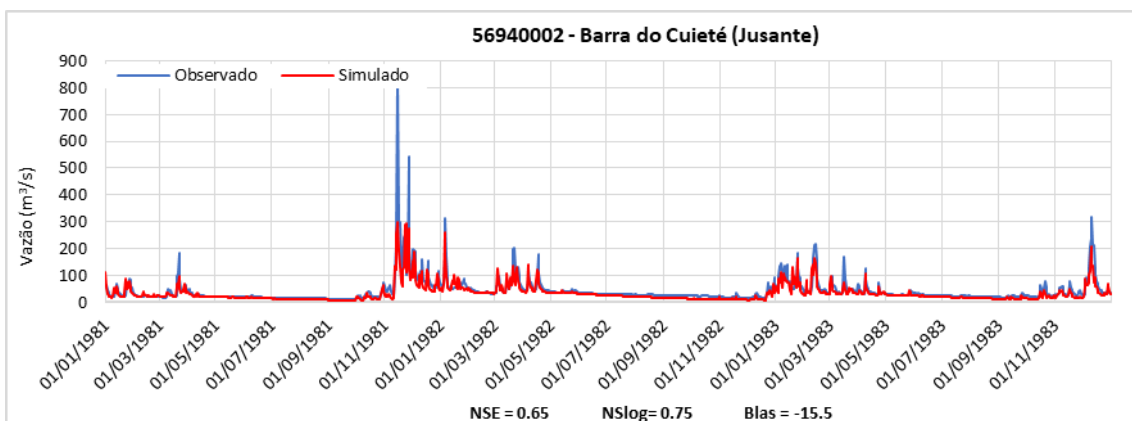


Figura 150. Hidrogramas simulado e observado na estação Barra do Cuieté (56940002), a estação mais a jusante do rio Caratinga, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989. O período apresentado no gráfico é de 1981 a 1983, para melhor visualização.

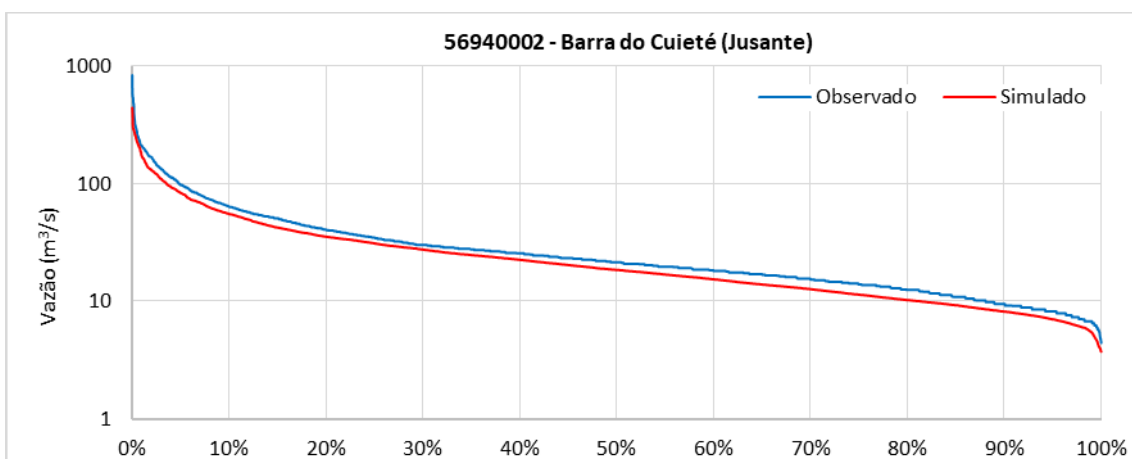


Figura 151. Curvas de permanência simulada e observada na estação Barra do Cuieté (56940002), a estação mais a jusante do rio Caratinga, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989.

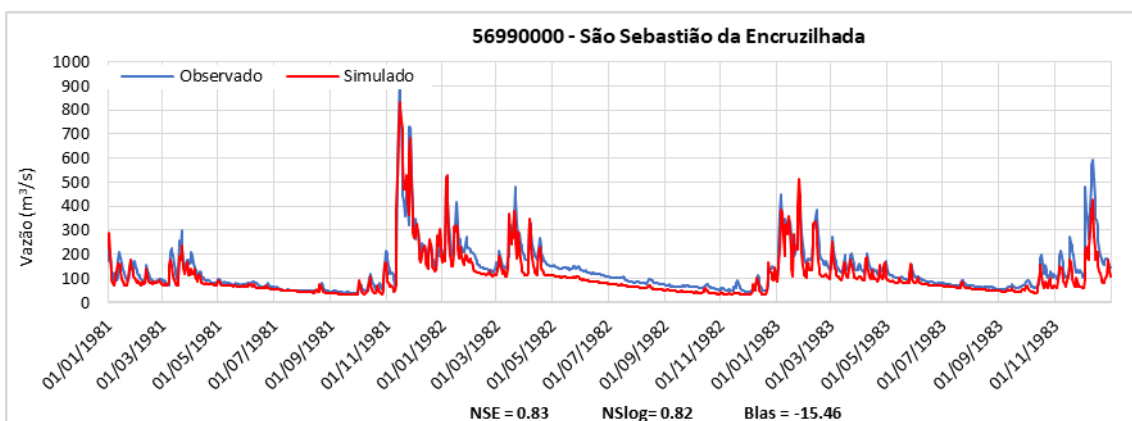


Figura 152. Hidrogramas simulado e observado na estação São Sebastião da Encruzilhada (56990000), a estação mais a jusante do rio Manhaçu, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989. O período apresentado no gráfico é de 1981 a 1983, para melhor visualização.

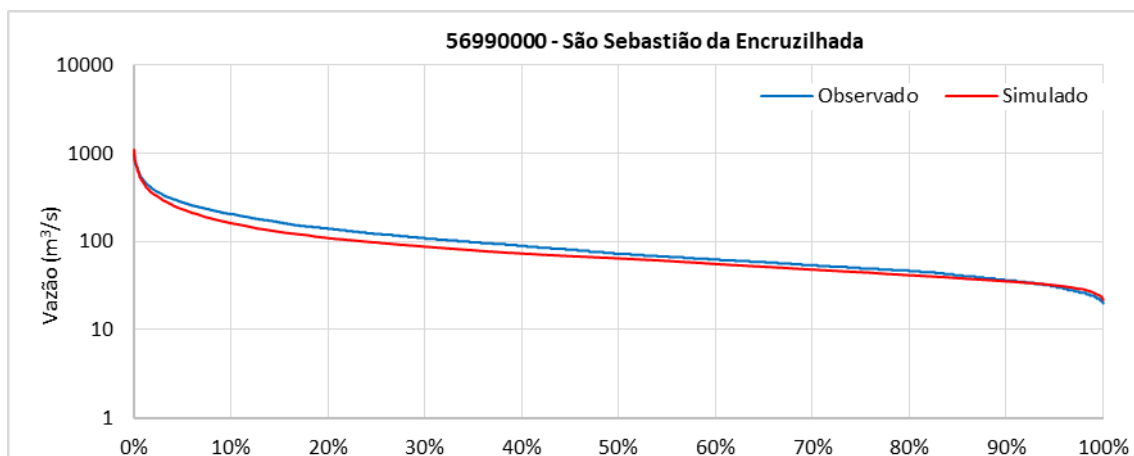


Figura 153. Curvas de permanência simulada e observada na estação São Sebastião da Encruzilhada (56990000), a estação mais a jusante do rio Manhaçu, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989.

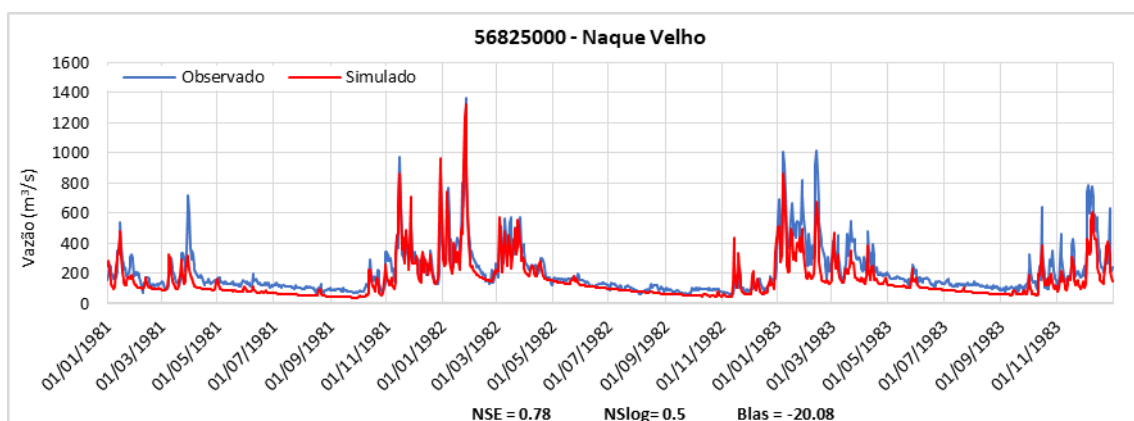


Figura 154. Hidrogramas simulado e observado na estação Naque Velho (56825000), a estação mais a jusante do rio Santo Antônio, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989. O período apresentado no gráfico é de 1981 a 1983, para melhor visualização.

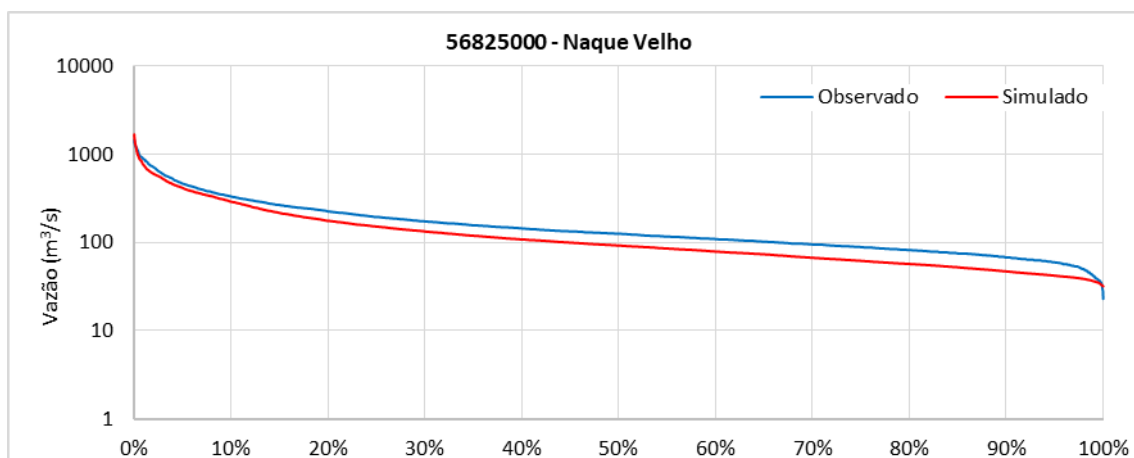


Figura 155. Curvas de permanência simulada e observada na estação Naque Velho (56825000), a estação mais a jusante do rio Santo Antônio, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989.

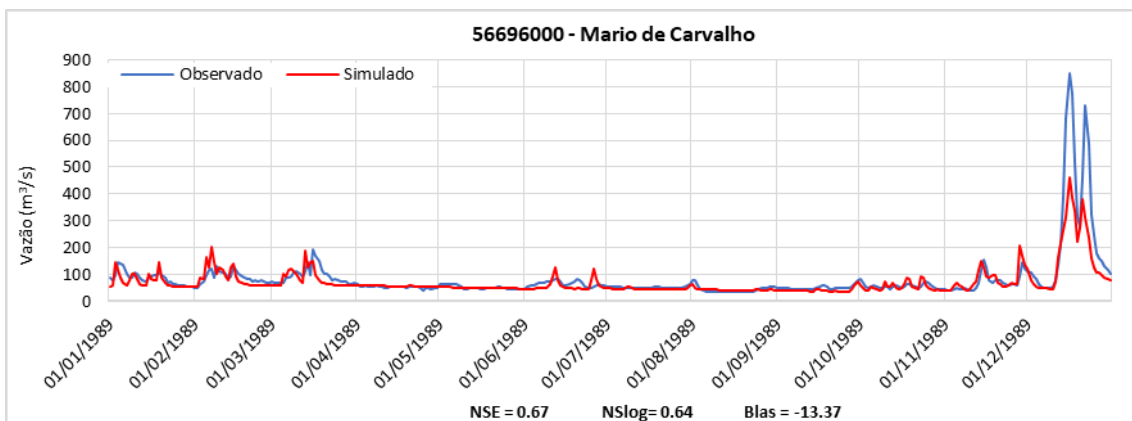


Figura 156. Hidrogramas simulado e observado na estação Mario de Carvalho (56696000), a estação mais a jusante do rio Piracicaba, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989. O período apresentado no gráfico é de 1981 a 1983, para melhor visualização.

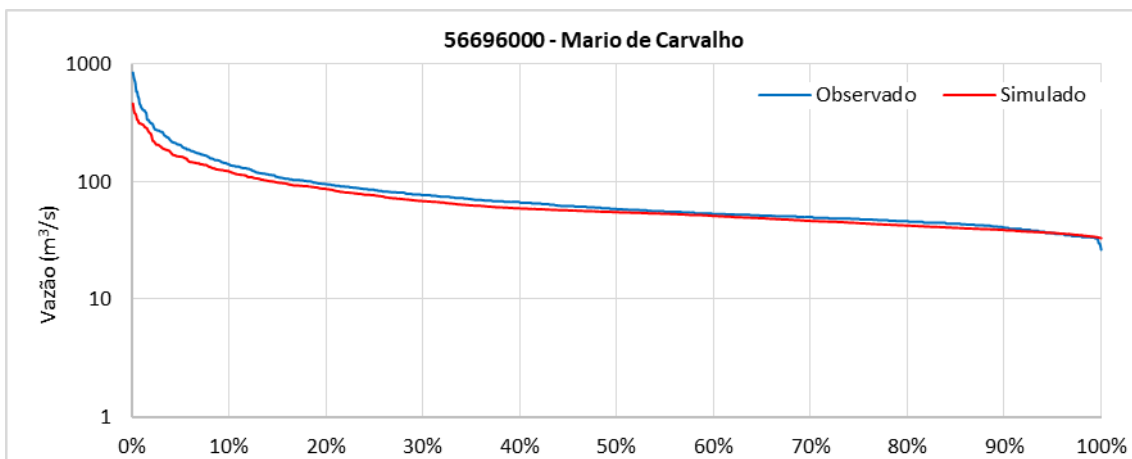


Figura 157. Curvas de permanência simulada e observada na estação Mario de Carvalho (56696000), a estação mais a jusante do rio Piracicaba, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989.

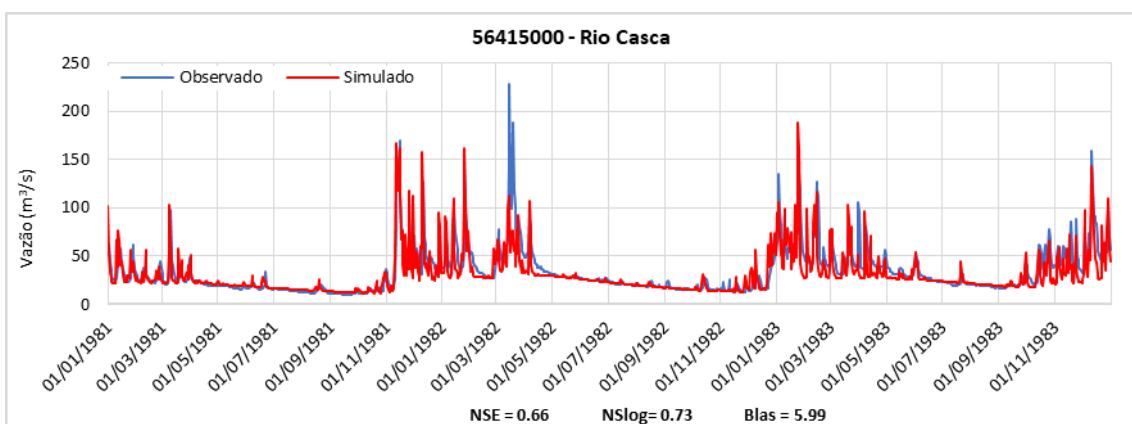


Figura 158. Hidrogramas simulado e observado na estação Rio Casca (56415000), a estação mais a jusante do rio Casca, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989. O período apresentado no gráfico é de 1981 a 1983, para melhor visualização.

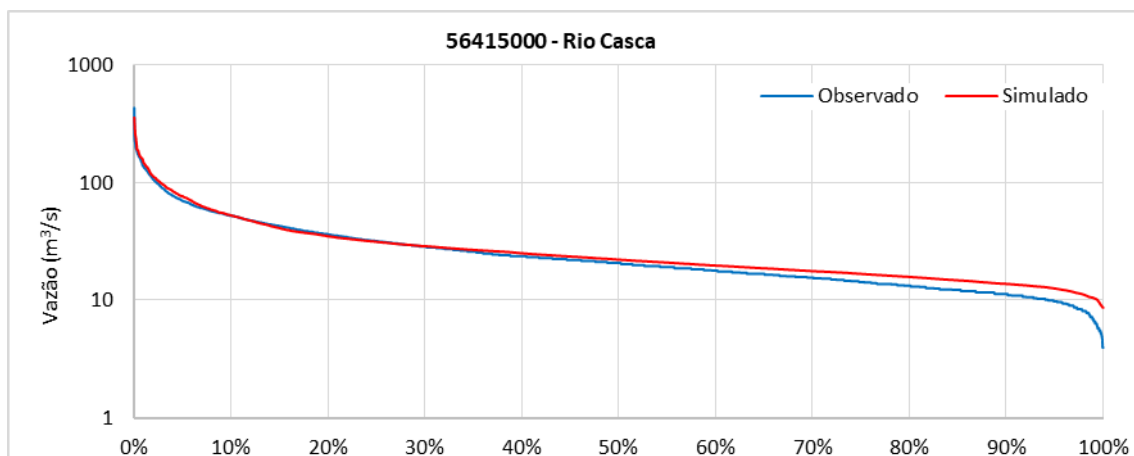


Figura 159. Curvas de permanência simulada e observada na estação Rio Casca (56415000), a estação mais a jusante do rio Casca, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989.

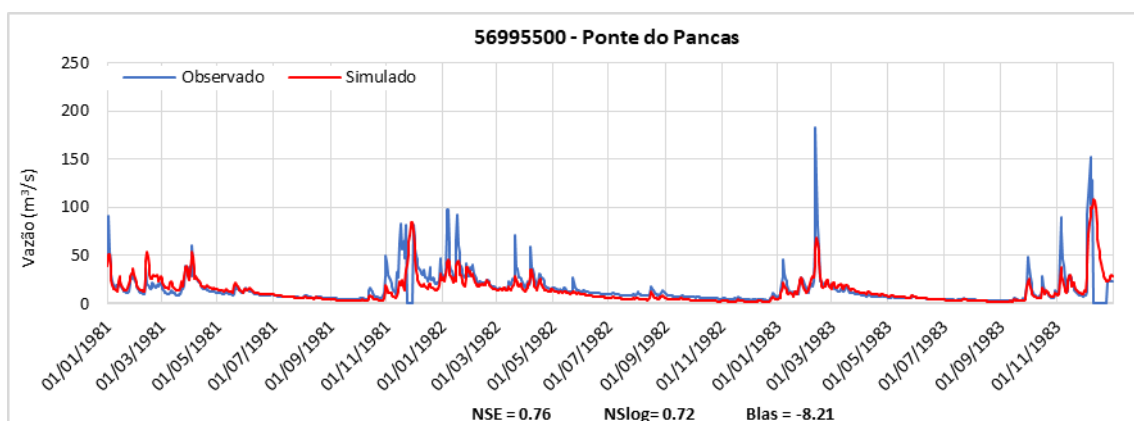


Figura 160. Hidrogramas simulado e observado na estação Ponte do Pancas (56995500), a estação mais a jusante do rio Pancas, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989. O período apresentado no gráfico é de 1981 a 1983, para melhor visualização.

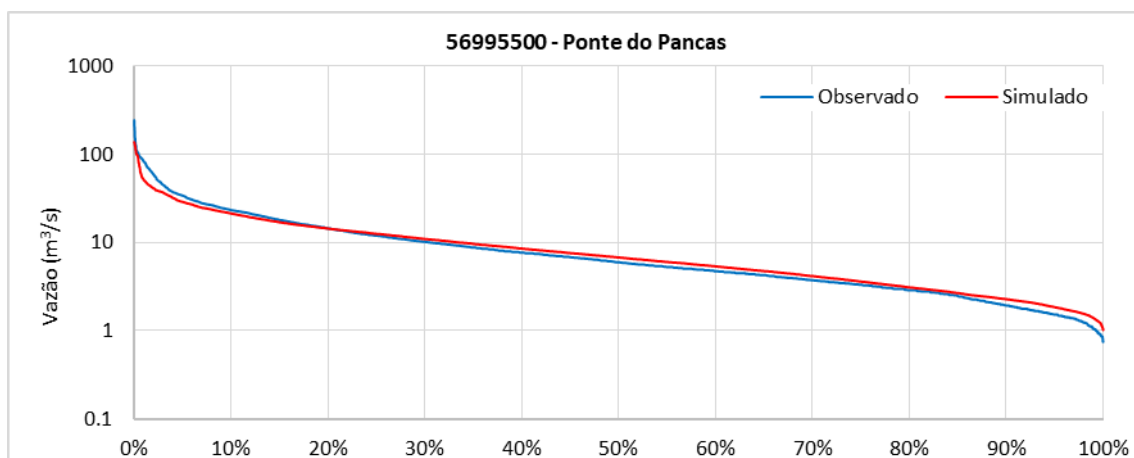


Figura 161. Curvas de permanência simulada e observada na estação Ponte do Pancas (56995500), a estação mais a jusante do rio Pancas, no período simulado de janeiro de 1970 a dezembro de 1989.

APÊNDICE C -Descrição do modelo hidrossedimentológico

O modelo hidrossedimentológico MGB-SED (FÖEGER, 2019), consiste no acoplamento de um modelo de geração de sedimentos na bacia e de transporte de sedimentos na rede de drenagem, desenvolvido inicialmente por Buarque (2015) e alterado por Fagundes (2018), à versão mais recente Modelo de Grandes Bacias (MGB), que conta com o método inercial para o cálculo de propagação das ondas de cheia nos rios (PONTES et al., 2017).

O volume de escoamento superficial gerado pelo MGB é considerado para estimativa da geração de sedimentos em cada minibacia, enquanto as vazões simuladas nos rios são consideradas para a propagação das cargas de sedimentos. O modelo MGB-SED também utiliza o conceito de minibacias para representar as características topográficas e topológicas da bacia. As subdivisões das minibacias em Unidades de Resposta Hidrológica (URH) também são consideradas no módulo de sedimentos, onde são realizadas as estimativas da geração de sedimentos e realizada as propagações de volumes de sedimentos gerados (os quais são divididos em classes de partículas de silte, argila e areia) para os rios por meio de reservatórios lineares combinados a um coeficiente de retardo (ver Figura 162).

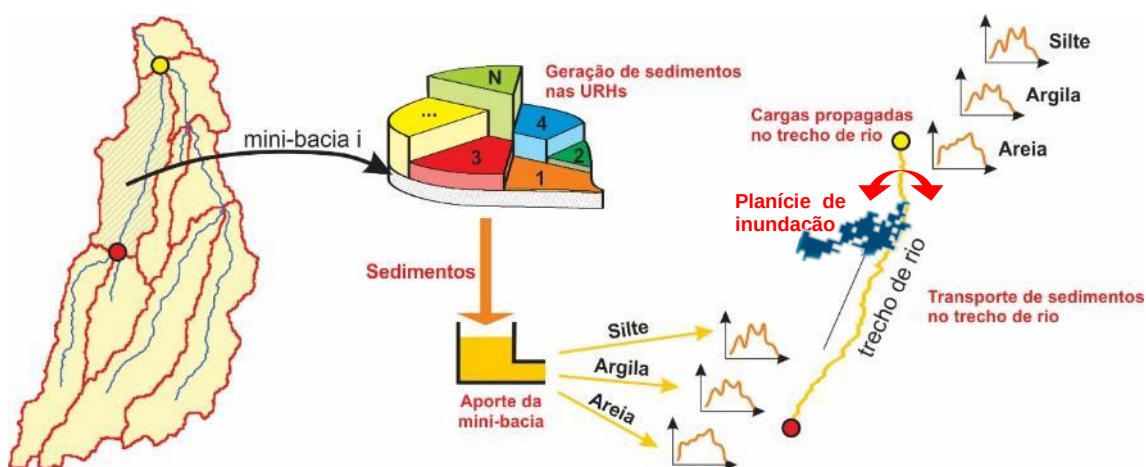


Figura 162. Esquema dos processos de geração e propagação de sedimentos das minibacias e propagação de sedimentos na rede de drenagem.

A Equação Universal de Perda de Solo Modificada - MUSLE (WILLIAMS, 1975) é utilizada para estimativa da perda de solo em cada URH de uma minibacia. O aporte de sedimentos para os cursos d'água é feito por meio de um reservatório linear simples para cada fração do solo considerada (silte, argila e areia) a fim de retardar o volume de sedimentos que chega ao curso d'água, já que nem todo o volume de sedimentos gerado chega simultaneamente (BUARQUE, 2015).

O transporte de sedimentos em suspensão no rio, caracterizado pelo transporte das partículas de silte e argila, é realizado utilizando uma equação de difusão-advecção, não havendo deposição ou erosão dessas partículas no canal. No entanto, é permitida a

troca lateral de sedimentos em suspensão entre os rios e suas planícies de inundação, onde pode existir a deposição dessas frações.

As partículas de areia são consideradas como carga de fundo, para as quais o transporte é realizado utilizando a equação da continuidade dos sedimentos, conhecida como Equação de Exner, sofrendo processos de erosão e deposição no canal. A erosão e a deposição no leito são calculadas como função da capacidade de transporte do escoamento conforme a equação de Yang (1984).

O módulo de transporte de sedimentos utiliza os resultados de vazão de um dos modelos de propagação de vazão e o aporte de sedimentos das minibacias para propagar as cargas de sedimentos ao longo da rede de drenagem, considerando os processos de erosão ou deposição (BUARQUE, 2015). Com o MGB-SED é possível estimar a quantidade de sedimento erodido e depositado para cada trecho de rio, bem como identificar quais regiões da bacia que mais contribuem com a carga de sedimentos. A interação com ambiente SIG e utilização de uma metodologia simplificada na estimativa da distribuição espacial e temporal dos sedimentos acoplado ao modelo permite que as cargas e concentrações de sedimentos sejam estimadas de maneira simplificada, mesmo para uma grande bacia. A necessidade de poucos parâmetros de entrada pode ser considerada uma das principais vantagens do modelo (FAGUNDES, 2018).

O módulo de sedimentos está dividido em três componentes (BUARQUE, 2015): bacia, rio e planícies de inundação. Na componente bacia é estimada a perda de solo na camada superficial das minibacias, bem como o aporte das cargas de sedimentos geradas para a rede de drenagem.

Na componente rio ocorre a propagação das cargas de sedimentos provenientes das minibacias, a qual é separada em três classes de partículas (silte, argila e areia), sendo as partículas de silte e argila transportadas como carga em suspensão e as de areia como carga de fundo. É nessa componente que os volumes erodidos ou depositados de material de fundo em cada trecho de rio são computados. Quando a propagação de vazões é realizada pelo modelo inercial, o módulo permite ainda a troca lateral de cargas de sedimentos em suspensão entre os rios e suas respectivas planícies de inundação.

Módulo bacia

A erosão do solo na bacia é estimada para cada Unidade de Resposta Hidrológica j da minibacia i , utilizando a MUSLE (WILLIAMS, 1975). São utilizadas informações obtidas diretamente do MDE a partir de aplicações SIG e algoritmos computacionais. Considerando que o MDE é uma representação espacial da topografia em formato raster, sua estrutura pode ser descrita por uma matriz $k < l, c >$, de l linhas e c colunas, que armazena informações em $l \times c$ posições (pixels). No modelo a MUSLE foi aplicada a cada pixel, de forma que a equação original pode ser escrita como:

$$SED_{i,j}^k = 11,8 * (Dsup_{i,j}^k * qpico_{i,j}^k * Ap_{i,j}^k)^{0,56} * K_j * C_j * P_j * LS_{i,j}^K \quad (70)$$

onde i e j são índices que indicam as minibacias e a URH, k o pixel ao qual a equação está sendo aplicada. Na equação, SED [t] é a carga de sedimentos resultante da erosão do solo, Q_{sup} [mm.ha⁻¹] é o volume de escoamento superficial, $qpico$ [m³.s⁻¹] é a taxa de pico do escoamento superficial, A_p [ha] é a área superficial do pixel, K [0,013.t.m².h.(m³.t.cm)⁻¹] é o fator de erodibilidade do solo, C [-] é o fator de cobertura e manejo do solo, P [-] é o fator de práticas conservacionistas, LS [-] é o fator topográfico.

O volume de escoamento superficial ($Dsup$) é originado pelo módulo hidrológico do modelo MGB, e a taxa de pico do escoamento superficial em cada pixel k é obtida considerando um volume de escoamento uniforme ao longo do dia:

$$qpico_{i,j}^k = \frac{Dsup_{i,j}^k * A_{i,j}^k}{86,4} \quad (71)$$

O fator K de erodibilidade do solo corresponde à equação utilizada no modelo EPIC (WILLIAMS, 1995), que é a mesma empregada no modelo SWAT. São necessárias apenas informações sobre as porcentagens de silte, argila, areia e matéria orgânica de cada tipo de solo da bacia, conforme a equação:

$$K_j = Fag_j * Fcs_j * Forg_j * Fa_j \quad (72)$$

onde Fag é o fator de areia grossa, sendo seus valores baixos para solos com grande quantidade de areia e altos para solos com pouca areia; Fcs é o fator argila-silte, que reduz o valor de K para solos com elevada concentração de silte; $Forg$ é o fator que reduz o valor de K de solos com grandes quantidades de carbono orgânico e Fa é o fator que reduz o valor de K em solos com elevada quantidade de areia. Esses valores são calculados por Williams (1995) como:

$$Fag_j = 0,2 + 0,3 * \exp \left[-0,256 * SAN_j * \left(1 - \frac{SIL_j}{100} \right) \right], \quad (73)$$

$$Fcs_j = \left(\frac{SIL_j}{ARG_j + SIL_j} \right)^{0,3}, \quad (74)$$

$$Forg_j = 1 - \frac{0,25 * orgC_j}{orgC_j + \exp(3,72 - 2,95 * orgC_j)}, \quad (75)$$

$$Fa_j = 1 - \frac{0,7 * \left(1 - \frac{SAN_j}{100} \right)}{\left(1 - \frac{SAN_j}{100} \right) + \exp \left[-5,51 + 22,9 * \left(1 - \frac{SAN_j}{100} \right) \right]}, \quad (76)$$

onde SAN , SIL , ARG e $orgC$ são as porcentagens de areia, silte, argila e carbono orgânico, respectivamente, presentes na camada superior do solo de uma URH j .

O fator topográfico LS é a combinação dos fatores comprimento da rampa L e declividade S , representando a contribuição do escoamento superficial no processo de erosão hídrica. No módulo de sedimentos foi implementada uma rotina computacional para determinar o fator LS automaticamente para cada pixel $k < l, c >$ do MDE. O fator

L é obtido conforme Desmet e Govers (1996) para aplicação em um terreno bidimensional usando o conceito de área de contribuição unitária de Kirkby e Chorley (1967), em outras palavras, a área de contribuição acumulada por unidade de comprimento. O fator de declividade S é calculado pela equação de Wischmeier e Smith (1978). A rotina utiliza produtos derivados da etapa de discretização da bacia hidrográfica, o modelo digital de elevação, o plano de direções de escoamento, minibacias e unidades de resposta hidrológica. Esses planos são úteis para a localização de cada pixel nas respectivas minibacias, e identificação das URH de cada um.

A equação do fator L aplicada a cada pixel do MDE é escrita da seguinte maneira:

$$L_k = \frac{(Am_k + Lp_k^2)^{m+1} - Am_k^{m+1}}{Lp^{m+2} * Xdir_k^m * (22,13)^m}, \quad (77)$$

sendo L [-] o fator de comprimento do pixel k , Am [m²] a área de drenagem acumulada na entrada do pixel, que corresponde ao somatório das áreas das superfícies de todos os pixels de montante; Lp [m] a largura do pixel; $Xdir$ [-] o fator de direção de aspecto para o pixel, que é definido como igual a 1 se a direção entre os pixels for ortogonal ou igual a $\sqrt{2}$ se a direção for diagonal; m [-] é um expoente do comprimento do declive, que pode ser obtido pelas condições apresentadas abaixo:

Valor de m	Condição
0,2	$Sf < 1$
0,3	$1 \leq Sf < 3$
0,4	$3 \leq Sf < 5$
0,5	$Sf \geq 5$

Sf [%] corresponde à declividade do pixel.

A declividade Sf representa a taxa de variação da elevação na direção do maior declive e é obtida no modelo para cada pixel, utilizando as elevações z [m] dos seus quatros vizinhos nas direções ortogonais, conforme Wilson e Gallant (2000):

$$Sf = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}, \quad (78)$$

onde $\partial z/\partial x$ e $\partial z/\partial y$ são derivadas parciais de primeira ordem que descrevem a taxa de variação local da elevação z [m] com as distâncias ortogonais x e y , e são calculadas utilizando diferenças finitas centradas:

$$\frac{\partial z}{\partial x} \approx \frac{z_l^{c+1} - z_l^{c-1}}{2 * Lp}, \quad (79)$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} \approx \frac{z_{l+1}^c - z_{l-1}^c}{2 * Lp}, \quad (80)$$

onde l e c correspondem à linha e coluna que determinam a posição do pixel na matriz $k < l, c >$.

O fator de declividade S é calculado conforme Wischmeier e Smith (1978):

$$S_k = 65,41 * \sin^2(\theta_k) + 4,56 * \sin(\theta_k) + 0,065 , \quad (81)$$

sendo θ o valor de Sf em graus.

O fator de fragmentos grosseiros considera a possibilidade de existência de rochas na camada superior do solo, e seu valor é estimado por:

$$FG = \exp (-0,053 * frocha) , \quad (82)$$

onde $frocha$ [%] corresponde à porcentagem de rocha na camada superior do solo.

O volume total de sedimentos gerados em cada URH de uma minibacia e armazenado no reservatório é calculado pela seguinte equação:

$$VSED_{i,j}^t = VSED_{i,j}^{t-1} + \sum_{k=1}^{NP_j} VSED_{i,j}^k , \quad (83)$$

onde $VSED_{i,j}$ [t] é o volume no reservatório de sedimentos da URH j da minibacia i em questão; NP é o número de pixels da URH; e os índices t e $t - 1$ indicam os passos de tempo atual e anterior respectivamente.

A estimativa da descarga sólida QS [t.s-1] de saída para cada URH é dada por:

$$QS_{i,j}^t = \frac{1}{TKS_i} * VSED_{i,j}^t , \quad (84)$$

onde TKS [s] corresponde ao tempo de retardo do reservatório superficial.

O total de sedimentos aportado de cada minibacia é dividido em três classes: silte, argila e areia, e cada classe é definida de acordo com sua porcentagem na camada superior de cada tipo de solo das URH, dadas pelos parâmetros SIL , ARG , SAN , respectivamente. O aporte das três classes de partículas de cada minibacia com destino à rede de drenagem é calculado por:

$$SEDsil_i^t = \sum_{j=1}^{N_{URH}} (QS_{i,j}^t * FRAC_{i,j}^t * SIL_j) * \Delta t , \quad (85)$$

$$SEDarg_i^t = \sum_{j=1}^{N_{URH}} (QS_{i,j}^t * FRAC_{i,j}^t * ARG_j) * \Delta t , \quad (86)$$

$$SEDsan_i^t = \sum_{j=1}^{N_{URH}} (QS_{i,j}^t * FRAC_{i,j}^t * SAN_j) * \Delta t , \quad (87)$$

onde $SEDsil$ [t], $SEDarg$ [t], $SEDsan$ [t] são as cargas de silte, argila e areia, respectivamente, que saem do reservatório de sedimentos e chegam à rede de drenagem em cada passo de tempo Δt . O termo $FRAC$ corresponde a fração do volume de sedimentos existente no reservatório correspondente a cada URH da minibacia, obtido por:

$$FRAC_{i,j}^t = \frac{VSED_{i,j}^t}{\sum_{j=1}^{N_{URH}} VSED_{i,j}^t} \quad (88)$$

Módulo rio

O processo de transporte em suspensão do silte e argila na rede de drenagem é representado por um modelo de escoamento não permanente que considera que a velocidade do escoamento e os processos advectivos são dominantes. A equação de transporte é dada por:

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} = q_{sm} - q_{sfl}, \quad (89)$$

onde A [m^2] é a área molhada da seção; C [$t.m^{-3}$] é a concentração média de sedimento; Q [$m^3.s^{-1}$] é a vazão líquida; x [m] é a distância na direção do escoamento; t [s] o tempo; q_{sm} [$t.m^{-1}.s^{-1}$] é a contribuição lateral de sedimentos da minibacia; e q_{sfl} [$t.m^{-1}.s^{-1}$] é a descarga de troca de sedimentos entre o rio e a planície de inundação, por unidade de comprimento do rio. O termo q_{sfl} é incluído quando é utilizado o método de propagação hidrodinâmico (inercial), em que as planícies de inundação são consideradas, e é considerado nulo quando é utilizado o método de propagação Muskingum-Cunge.

A equação anterior é resolvida numericamente por meio de um esquema de diferenças finitas, aplicado para cada trecho, de montante para a jusante, para cada classe de partícula em suspensão:

$$\frac{A_i^t * C_i^t - A_{i-1}^{t-1} * C_{i-1}^{t-1}}{\Delta t} + \theta * \frac{Q_i^t * C_i^t - Q_{i-1}^t * C_{i-1}^t}{\Delta x} + (1 - \theta) * \frac{Q_{i-1}^{t-1} * C_{i-1}^{t-1} - Q_i^{t-1} * C_i^{t-1}}{\Delta x} = q_{sm}^t - q_{sfl}^t \quad (90)$$

onde os índices $i - 1$ e i referem-se às seções transversais do rio a montante e a jusante do trecho; os índices $t - 1$ e t referem-se ao início e ao final do intervalo de tempo; Δt é o intervalo de tempo de cálculo; Δx é o comprimento do trecho de rio (m) da minibacia; e θ é o ponderador dos termos temporais, cujo valor varia entre 0 e 1.

O transporte das partículas de areia nos trechos de rios das minibacias é realizado utilizando a equação de Exner (CHANG, 1988), também conhecida como a equação da continuidade de sedimentos:

$$(1 - \lambda) \frac{\partial A_b}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} - q_{sm} = 0, \quad (91)$$

onde A_b [m^2] é a área transversal de um reservatório de sedimentos de fundo correspondente ao volume depositado ou erodido no trecho; Q_s [$t.s^{-1}$] é a descarga sólida de sedimento do leito; q_{sm} [$t.m^{-1}.s^{-1}$] é a contribuição lateral de sedimentos da minibacia; e λ é a porosidade do depósito.

A variação da área transversal correspondente ao volume depositado ou erodido pode ser explicitada em função das outras variáveis:

$$\Delta A_b = -\frac{\Delta t}{1-\lambda} \left(\frac{\partial Q_s}{\partial x} - q_{sm} \right) \quad (92)$$

onde o termo de derivada espacial de Q_s representa o gradiente de sedimentos no trecho, comparando a concentração que entra com a que sai.

A equação acima é resolvida utilizando um esquema implícito considerando, inicialmente, que a concentração de sedimentos de fundo na seção de jusante do trecho ao final do intervalo de tempo corresponde à Capacidade de Transporte do escoamento nesta seção.

$$\Delta A'_{bi}{}^t = -\frac{\Delta t}{1-\lambda} \left[\theta * \frac{Q_i^t CT_i^t - Q_{i-1}^t CT_{i-1}^t}{\Delta x} + (1-\theta) * \frac{Q_i^{t-1} CT_i^{t-1} - Q_{i-1}^{t-1} CT_{i-1}^{t-1}}{\Delta x} - \frac{QS_m^t + QS_m^{t-1}}{2 * \Delta x} \right], \quad (93)$$

onde CT [ppm] é a concentração de sedimentos correspondente a Capacidade de Transporte do escoamento na seção i de interesse. Em termos de área transversal Ab do volume depositado ou erodido, uma variação positiva da área Ab indica tendência à deposição no trecho, sendo o contrário indicativo de tendência à erosão.

O modelo considera que o volume de sedimentos disponível para erodir será sempre suficiente para suprir a capacidade de transporte. Mas em um passo de tempo do modelo, nem todo o excesso ou déficit de sedimentos no escoamento pode ser convertido em depósito ou erosão, respectivamente, ao longo do trecho de rio, e para tal situação, foram adotados limitadores de deposição e erosão semelhantes aos utilizados por (BRUNNER, 2008) no modelo HEC-RAS.

O limitador da deposição representa a porcentagem do excesso de sedimentos no escoamento que realmente consegue depositar, sendo estimado por:

$$\alpha_d = \frac{\omega_s * \Delta t}{H_{ef}}, \quad (94)$$

onde α_d é o coeficiente de eficiência de deposição; ω_s é a velocidade de queda da partícula; Δt é o intervalo de tempo; e H_{ef} é a distância vertical efetiva. O limitador da erosão representa a porcentagem do déficit de sedimentos no escoamento que consegue ser atendido por erosão, sendo expresso pela relação:

$$\alpha_e = \begin{cases} 1,368 \cdot \exp^{-\left(\frac{\Delta x}{30 \cdot h}\right)} & \text{para } \Delta x \leq 30h; \\ 1 & \text{para } \Delta x > 30h, \end{cases} \quad (95)$$

onde α_e é o coeficiente de eficiência de erosão, Δx é a distância percorrida pelo escoamento e h é a profundidade do escoamento.

Considerando que tanto a erosão quanto a deposição ocorrem de forma uniforme no fundo do trecho de rio, o volume de sedimentos depositado ou erodido é dado por:

$$DEP^t = (\Delta A_b^t * \alpha_d) * \Delta x = \Delta A_b^t * \Delta x \quad \text{se } \Delta A_b^t > 0, \quad (96)$$

$$EROS^t = -(\Delta A_b^t * \alpha_e) * \Delta x = -\Delta A_b^t * \Delta x \quad \text{se } \Delta A_b^t < 0, \quad (97)$$

sendo b a variação real da área transversal do reservatório de sedimentos de fundo, ao final do intervalo de tempo t . No caso de ocorrência de deposição, o percentual da carga não depositada no passo de tempo fica disponível para ser transportada, ou depositada, no próximo passo de tempo e a concentração propagada para jusante é igual à capacidade de transporte.

A concentração de sedimentos na seção de jusante do trecho ao final do intervalo de tempo efetivamente propagada para jusante como carga de fundo é recalculada a partir da equação:

$$C_i^t = \frac{\left(\frac{QS_m^t + QS_m^{t-1}}{\Delta x} \right) + \theta * Q_{i-1}^t * C_{i-1}^t - (1 - \lambda) * \Delta x * \frac{\Delta A_b^t}{\Delta t}}{\theta Q_i^t - \frac{(1 - \theta) * (Q_i^{t-1} * C_i^{t-1} - Q_{i-1}^{t-1} * C_{i-1}^{t-1})}{\theta Q_i^t}}, \quad (98)$$

sendo ΔA_b^t [m²] a variação real da área transversal do reservatório de sedimentos de fundo.

Em todas as seções, e em todos os intervalos de tempo, o modelo calcula a capacidade de transporte para a classe de partícula utilizando a equação de Yang (Yang, 1973, 1984), escrita como (WU, 2008):

$$\log CT_i^t = M_i^t + N_i^t * \log \left(\frac{U_i^t * S_f}{\omega_s} - \frac{Uc_i^t * S_f^t}{\omega_s} \right), \quad (99)$$

sendo CT [ppm] a concentração por peso; U [m.s⁻¹] a velocidade média na seção; Uc [m.s⁻¹] a velocidade média crítica do escoamento; S_f a declividade de atrito e ω_s a velocidade de queda da partícula.

Os coeficientes M e N são calculados para sedimentos com diâmetros d entre 0,063 e 2 mm de diâmetro por:

$$M_i^t = 5,435 - 0,286 + \log \left(\frac{\omega_s * d}{\nu} \right) - 0,457 * \log \left(\frac{U_{*i}^t}{\omega_s} \right) \quad (100)$$

$$N_i^t = 1,799 - 0,409 + \log \left(\frac{\omega_s * d}{\nu} \right) - 0,314 * \log \left(\frac{U_{*i}^t}{\omega_s} \right) \quad (101)$$

Já para sedimentos de 2 mm a 10 mm de diâmetro, são calculados por:

$$M_i^t = 6,681 - 0,633 + \log \left(\frac{\omega_s * d}{\nu} \right) - 4,816 * \log \left(\frac{U_{*i}^t}{\omega_s} \right) \quad (102)$$

$$N_i^t = 2,874 - 0,305 + \log\left(\frac{\omega_s * d}{\nu}\right) - 0,282 * \log\left(\frac{U_{*i}^t}{\omega_s}\right) \quad (103)$$

Nas equações anteriores U_* é a velocidade de cisalhamento, dada por:

$$U_* = \sqrt{g * Rh * S_f} \quad (104)$$

onde Rh é o raio hidráulico da seção e g é a aceleração da gravidade.

A velocidade média crítica do escoamento é determinada conforme a fórmula de Yang (1973):

$\frac{U_c}{\omega_s}$	Condição
$0,66 + \frac{2,25}{\left[\log\left(\frac{U_* * d}{\nu}\right) - 0,06\right]}$	se $1,2 < \frac{U_* * d}{\nu} < 70$
$2,05$	se $\frac{U_* * d}{\nu} \geq 70$

A velocidade de queda da partícula é determinada utilizando a equação proposta por Wu e Wang (2006):

$$\omega_s = \frac{M * \nu}{N * d} * \left[\sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{4 * N}{3 * M^2} * D_*^3\right)^{\frac{1}{np}}} - \frac{1}{2} \right]^{np} \quad (105)$$

Sendo:

$$M = 53,5 * \exp(-0,65 * S_p) \quad (106)$$

$$N = 5,65 * \exp(-2,5 * S_p) \quad (107)$$

$$np = 0,7 + 0,9 * S_p \quad (108)$$

$$D_* = d * \left[\frac{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) * g}{\nu} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (109)$$

onde S_p é o fator de forma de Corey, d [m] é o diâmetro nominal representativo da classe de partícula, D_* é o diâmetro adimensional da partícula e $\frac{\rho_s}{\rho} = G \approx 2,65$ é a gravidade específica do sedimento.

A determinação dos parâmetros de velocidade de cisalhamento U_* , raio hidráulico Rh , profundidade h e declividade de atrito S_f dependem do método adotado para propagação das vazões em cada trecho de rio. No método de Muskingum Cunge a declividade de atrito é considerada equivalente à declividade de fundo S_0 extraída automaticamente do modelo digital de elevação, e em todas as seções e intervalos de tempo a profundidade h da água é estimada pela equação de Manning, assumindo raio hidráulico igual à profundidade h . Porém com a aplicação do método inercial a

profundidade em cada seção em cada passo de tempo é estimada pelo modelo e a declividade de atrito passa a ser calculada pela equação:

$$S_f^t = \frac{n^2 * \left(\frac{Q}{B}\right)^t * \left|\left(\frac{Q}{B}\right)^t\right|}{(hflow^t)^{\frac{10}{3}}}, \quad (110)$$

onde n é o coeficiente de rugosidade de Manning; e $\bar{U}$ e Rh são a velocidade e o raio hidráulico médios no trecho; $hflow$ refere-se à profundidade na seção transversal; Q é a vazão da minibacia; e B é a largura do canal.

Módulo planície

A vazão líquida de troca rio-planície q_{fl} [$m^3.s^{-1}$] é dada pelo modelo hidrológico. Se ela for positiva significa que existe fuga de água do rio para a planície com uma concentração de sedimentos finos igual à concentração média existente no trecho de rio, entre as seções de montante e jusante, ao final do intervalo de tempo. Para cada classe de partícula em suspensão, a descarga sólida QS_{fl} [$t.s^{-1}$] de troca entre rio e planície no final do intervalo de tempo é estimada por:

$$QS_{fl}^t = q_{sfl}^t * \Delta x = q_{fl}^t * \left(\frac{C_i^t + C_{i-1}^t}{2}\right) * \Delta x \quad (111)$$

Caso q_{fl} seja negativo, existe fuga de água da planície para o rio com concentração igual à concentração C_{fl} [$t.m^{-3}$] existente na planície, resultando numa descarga sólida igual a:

$$C_{fl}^{*t} = \frac{C_{fl}^{t-1} * V_{fl}^{t-1} + \left(\frac{q_{fl}^{t-1} + q_{fl}^t}{2}\right) * \Delta x * \Delta t}{V_{fl}^t} \quad (112)$$

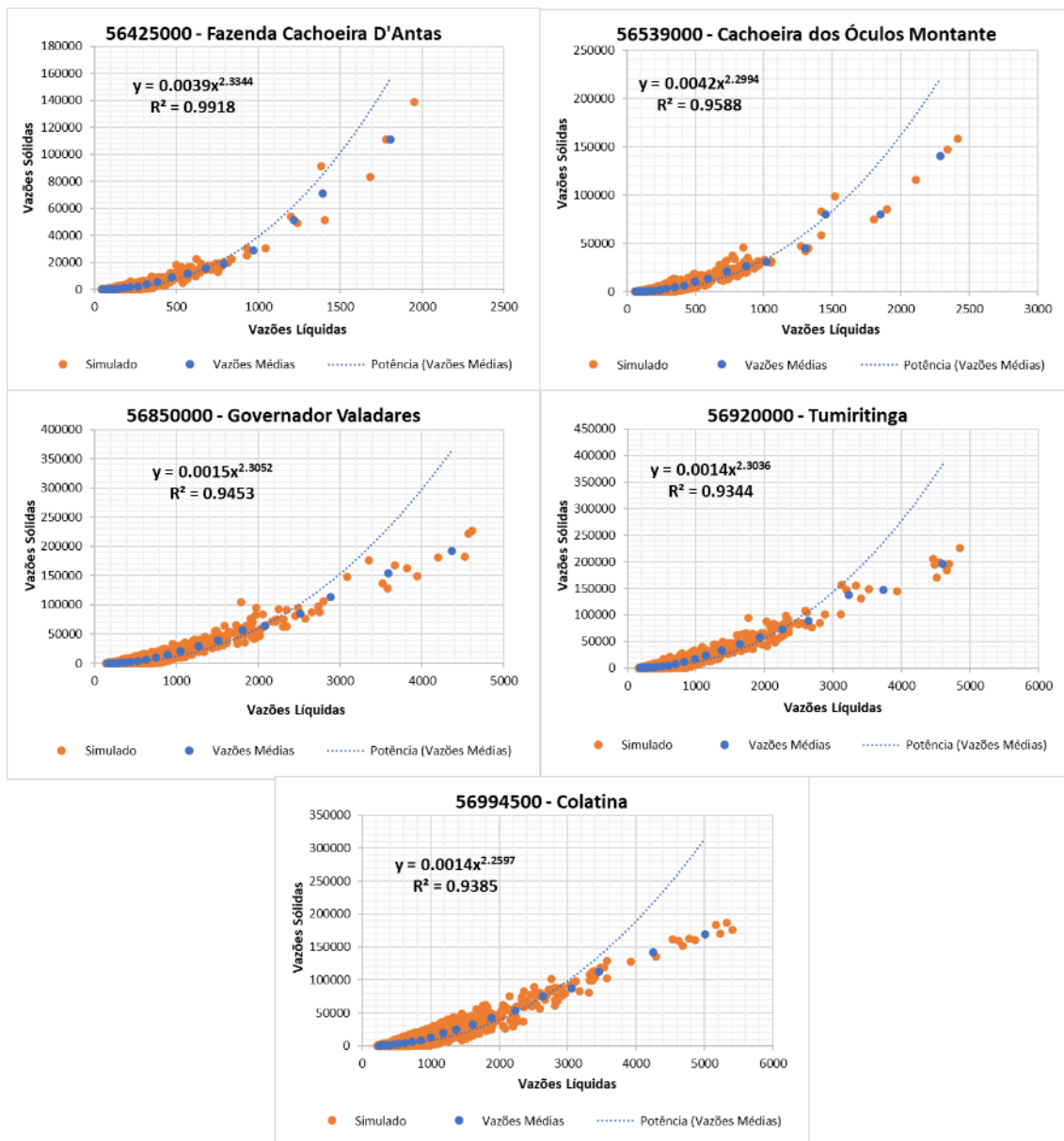
No caso do modelo inercial, o volume da planície é estimado diretamente pelo modelo. Em cada intervalo de tempo e para cada classe de partícula fina, parte da carga em suspensão poderá depositar, reduzindo a concentração. O percentual de sedimentos depositado na planície é determinado comparando a profundidade média da planície H_{fl} com a distância vertical média percorrida por cada classe de partícula no intervalo de tempo, a qual é função de sua velocidade de queda w_s [$m.s^{-1}$]. O volume depositado ao final do passo de tempo é dado por:

$$DEP_{fl}^t = C_{fl}^t * V_{fl}^t * \left(\frac{\omega_s * \Delta t}{H_{fl}}\right) \quad (113)$$

E a concentração ao final do intervalo de tempo é:

$$C_{fl}^t = C_{fl}^{*t} - \frac{DEP_{fl}^t}{V_{fl}^t} \quad (114)$$

APÊNDICE D - CENÁRIO A PÓS-ROMPIMENTO: RELAÇÃO ENTRE VAZÃO SÓLIDA E VAZÃO LÍQUIDA PARA ESTAÇÕES DE INTERESSE AO LONGO DO RIO DOCE



APÊNDICE E - CENÁRIO B: detalhamento

Este cenário corresponde ao período compreendido entre os dias 5 e 25 de novembro de 2015, que contempla a ocorrência do rompimento e o deslocamento da onda para jusante. Após a ruptura da Barragem de Fundão, a Barragem de Santarém, localizada imediatamente a jusante da Barragem de Fundão, sofreu um processo de galgamento, armazenando parte do rejeito, e o material liberado fluiu através do curso do córrego Santarém, adentrando em seguida o rio Gualaxo do Norte, que deságua no Rio do Carmo a aproximadamente 73 km a jusante, que por sua vez é tributário do Rio Doce (MACHADO, 2017). A onda de cheia originada do colapso da barragem de Fundão foi propagada por aproximadamente 670 km ao longo da bacia do rio Doce.

Nesse cenário foram considerados os dados do monitoramento de acompanhamento da onda de cheia devido ao rompimento, realizado pela Agência Nacional de Águas (ANA) e pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), buscando mapear os impactos do rompimento de Fundão na bacia (CPRM e ANA, 2015).

Para representar o evento de ruptura, buscou-se ajustar: os picos das vazões e das concentrações de sedimentos em suspensão (CSS) simuladas aos picos observados destas variáveis durante o monitoramento da onda de cheia; o tempo de pico dos hidrogramas e sedimentogramas; o volume do hidrograma de ruptura; e o *timing* dos eventos. Para as concentrações (CSS), o ajuste do pico considerou o processo de deposição do material liberado pelo rompimento, de forma que os volumes depositados ao longo do rio Doce, em cada trecho de interesse e nos reservatórios, foram estimados com base nas condições hidráulicas do escoamento e do transporte de sedimentos, ajustando as variáveis de vazão e concentração aos dados observados.

Para realizar a simulação do evento de rompimento algumas mudanças foram implementadas no modelo MGB-SED: adaptação do modelo para considerar passos de tempos menores que um dia; redução dos comprimentos dos trechos de rio ao longo do rio Doce, adotando-se no trecho do rio principal Doce e no rio Gualaxo do Norte um limite de extensão de trechos de rio de 1 km e, nos demais tributários, trechos com extensão de 10 km.

Considerações Gerais

Conforme apresentado anteriormente, o modelo de sedimentos MGB-SED utiliza o passo de tempo diário para realizar as simulações hidrológicas, hidráulicas e de sedimentos. No entanto, o evento do rompimento consistiu em um evento rápido, com duração de minutos/horas. Sendo assim, uma adequada representação por meio da modelagem exige cálculo com intervalos de tempo bem menores que 1 dia.

Desta forma, para realizar a simulação do evento de rompimento algumas mudanças foram implementadas no modelo MGB-SED. A primeira dela consistiu na adaptação do modelo de sedimentos para considerar passos de tempos menores que um dia. Com isso, buscou-se considerar sub passos de tempo do modelo de propagação de vazões inercial.

A segunda alteração necessária buscou evitar instabilidades no modelo bem como controlar o processo de difusão numérica. Para isso, considerando a redução do passo de tempo do modelo, foi necessário reduzir os comprimentos dos trechos de rio do longo do rio Doce, o que está relacionado com a discretização das minibacias. Neste contexto, a Figura 9 apresenta a visão espacial das 2256 minibacias delimitadas para a bacia do rio Doce, adotando-se no trecho do rio principal Doce e no rio Gualaxo do Norte um limite máximo de extensão de trechos de rio para 1 km e nos demais tributários, trechos com extensão máxima de 10 km.

Por fim, para considerar o novo passo de tempo do modelo e a discretização da bacia, a equação de transporte de sedimentos em suspensão foi ajustada para a equação 113 cuja discretização é apresentada na equação 115.

$$\frac{d(V \cdot C)}{dt} = (Q \cdot C + QS_{mini})_{in} - (Q \cdot C)_{out} - k \cdot V \cdot C \quad (115)$$

$$\frac{(V^t \cdot C^t - V^{t-1} \cdot C^{t-1})}{\Delta t} = (Q \cdot C^{t-1} + QS_{mini})_{in} - (Q \cdot C^{t-1})_{out} - V^{t-1} \cdot k \cdot C^{t-1} \quad (116)$$

$$C^t = \frac{V^{t-1} \cdot C^{t-1} + \Delta t \cdot ((Q \cdot C + QS_{mini})_{in} - (Q \cdot C)_{out} - V^{t-1} \cdot k \cdot C^{t-1})}{V^t} \quad (117)$$

onde, V é o volume [m^3] de água total existente no trecho (rio e na planície de inundação), C é a concentração de sedimentos em suspensão no trecho [ton/m^3], Q é a vazão [m^3/s] no trecho, QS_{mini} é a descarga sólida [ton/s] que chega da minibacia correspondente ao trecho de rio, t e $t - 1$ indicam os instantes de tempo atual e anterior, respectivamente, e k é uma taxa de deposição conforme apresentado por Palu e Julien (2019), definida por:

$$k = \frac{\omega}{h} \quad (118)$$

onde, ω corresponde à velocidade de queda da partícula [m/s] e h é a profundidade do escoamento [m]. A taxa de deposição k é aqui considerada como um parâmetro de calibração da equação. Os índices *in* e *out* indicam cargas entrando e saindo do trecho, respectivamente.

Para a análise da simulação do rompimento, os resultados são apresentados em locais de interesse na bacia ao longo do rio Doce. Os pontos selecionados estão apresentados na Tabela 34 e na Tabela 35. O ponto P0 corresponde ao final do trecho do córrego Santarém, na confluência com o rio Gualaxo do Norte. Os pontos P1 e P2 correspondem a locais intermediários ao longo do rio Gualaxo entre P1 e a sua confluência com o rio do Carmo, e o ponto P3 é a barragem de Risoleta Neves. Ao longo do rio Doce, foram identificados os pontos G1 a G6, que correspondem aos locais onde foram realizadas coletas de dados de vazão e de concentração de sedimentos em suspensão, e um ponto adicional (S4) no qual foram coletadas apenas dados referentes à concentração de sedimentos em suspensão. As medições nestes locais foram realizadas pela Agência Nacional de Águas (ANA) e pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), buscando mapear os impactos do rompimento de Fundão na bacia (CPRM e ANA, 2015).

Com base no monitoramento de acompanhamento da onda de cheia devido ao rompimento, os valores registrados dos picos de vazões observados nas estações G1 a G6 são apresentados na Tabela 36. A Tabela 37 resume as maiores concentrações medidas no rio Doce após o rompimento da barragem para alguns dos pontos de interesse selecionados, sendo importante destacar que o máximo valor registrado não necessariamente representa o pico das concentrações que de fato ocorreram, visto que as medições realizadas foram espaçadas de maneira irregular (PALU, 2019).

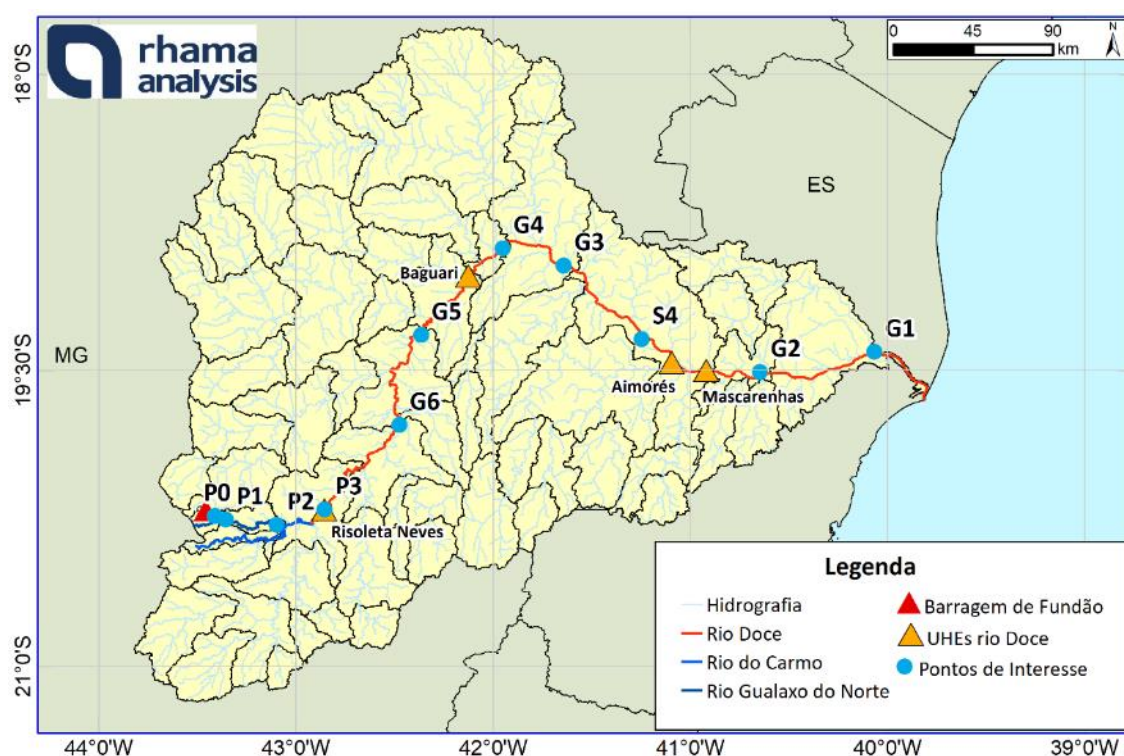


Figura 163. Pontos de interesse selecionados ao longo do rio Doce para a avaliação da simulação do rompimento da barragem de Fundão.

Tabela 35. Descrição dos pontos de interesse ao longo do rio Doce.

Ponto	Latitude	Longitude	Distância acumulada (km)	Local
P0	-20,240	-43,411	0	Santarém
P1	-20,257	-43,357	8,30	Gualaxo do Norte (jusante 3)
P2	-20,285	-43,099	55,47	Fazenda Ocidente
P3	-20,207	-42,855	100,50	Risoleta Neves
G6	-19,777	-42,476	192,13	Cachoeira dos Óculos
G5	-19,321	-42,365	274,2	Belo Oriente
G4	-18,883	-41,951	349,92	Governador Valadares
G3	-18,971	-41,642	398,05	Tumiritinga
S4	-19,343	-41,246	471,75	Resplendor - Jusante

Ponto	Latitude	Longitude	Distância acumulada (km)	Local
G2	-19,502	-40,655	561,05	Colatina
G1	-19,408	-40,065	626,38	Linhares

Tabela 36. Picos de vazão observados após o rompimento da barragem de Fundão ao longo do rio Doce.

Local	Distância do rompimento (km)	Data e hora local	Tempo decorrido (h)	Vazão máxima observada (m³/s)
Barragem de Risoleta	118,3	06/11/2015 10:00	18,2	1900
G6	213,1	07/11/2015 7:45	40,0	871
G5	286,7	08/11/2015 1:45	58,0	704
G4	368,9	08/11/2015 16:00	72,2	635
G3	412,3	09/11/2015 7:00	87,2	554
G2	559,7	10/11/2015 8:30	112,7	394
G1	624,4	11/11/2015 17:00	145,3	286

Fonte: adaptado de CPRM e ANA (2015) e Palu (2019).

Tabela 37. Concentrações máximas observadas no rio Doce após o evento de rompimento da barragem de Fundão.

Local	Distância acumulada (km)	Data e hora local do máximo	Número de medições	Tempo decorrido (h)	Concentração máxima observada (mg/L)
G6	213,1	7/11/2015 12:00	10	44,25	419
G5	286,7	8/11/2015 8:00	10	64,25	305
G4	368,9	10/11/2015 12:00	13	116,25	51
G3	412,3	12/11/2015 11:00	14	163,25	31
S4	476,3	15/11/2015 11:00	10	235,25	7,7
G2	559,7	20/11/2015 8:00	11	352,25	2,2
G1	624,4	21/11/2015 20:00	6	388,25	1,5

Fonte: adaptado de CPRM e ANA (2015) e Palu (2019).

O hidrograma e a concentração de rejeitos considerados para simular o rompimento foram estimados com base em estudos que avaliaram o evento (MACHADO, 2017; MATOS; ELEUTÉRIO, 2019; PALU, 2019; PALU; JULIEN, 2019). Desta forma, para definir as condições de contorno do modelo MGB-SED para a simulação do rompimento, foram considerados dados observados e as informações dos estudos citados.

Considerando a dificuldade em estabelecer um hidrograma de rompimento exatamente na barragem de fundão, o trabalho de Matos e Eleutério (2019) foi utilizado como base para a confecção do hidrograma que representasse o rompimento ocorrido. O estudo forneceu valores chaves para aproximação, como a vazão de pico do evento, o tempo de pico e o volume do hidrograma. O hidrograma de rompimento está apresentado na Figura 164. A vazão de pico (Q_{pico}) foi definida por Matos e Eleutério (2019) e apresentada no estudo da Golder (2022) como sendo da ordem de 36.000 m^3/s , o tempo de pico do hidrograma (T_p) de cerca de 1200 segundos, e o volume do hidrograma foi de aproximadamente 50 hectômetros cúbicos. No entanto, este hidrograma está localizado ao final do trecho do córrego Santarém, no ponto P0.

De acordo com Machado (2017), a concentração volumétrica de sedimentos estimada com o rompimento da barragem de Santarém (2km a jusante de Fundão) é da ordem de 47%. Com base nesta informação, e adotando uma densidade volumétrica do rejeito da ordem de 2,65 ton/m^3 , foi estabelecida uma concentração de sedimentos no rompimento de 1,2 ton/m^3 , associada ao hidrograma de rompimento.

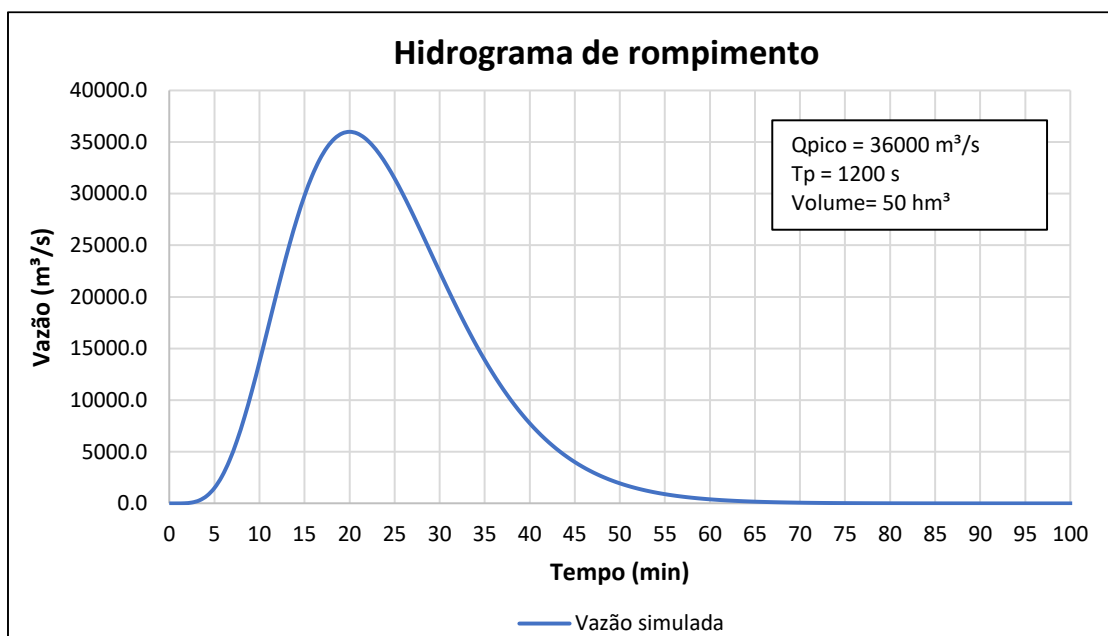


Figura 164. Hidrograma de rompimento estimado no ponto P0 para a simulação com o modelo MGB-SED. Q_{pico} é a vazão de pico do hidrograma, T_p é o tempo de pico, e Volume é o volume de água do hidrograma.

Propagação da Onda de Cheia Simulada

Com a simulação da onda de cheia devido ao rompimento de Fundão, foram estimados os hidrogramas de cheia desde Santarém até Linhares, obtidos nos pontos de interesse definidos anteriormente.

A Figura 165 apresenta os hidrogramas nos pontos P1 a P3, enquanto que a Figura 166 apresenta os hidrogramas ao longo do rio Doce, nos pontos G6 a G1 e S4. O tempo de propagação da onda de cheia simulada, desde o ponto P0 (confluência do córrego Santarém com o rio Gualaxo do Norte) até Linhares (G1) foi de 142 horas, o que está compatível com os valores observados.

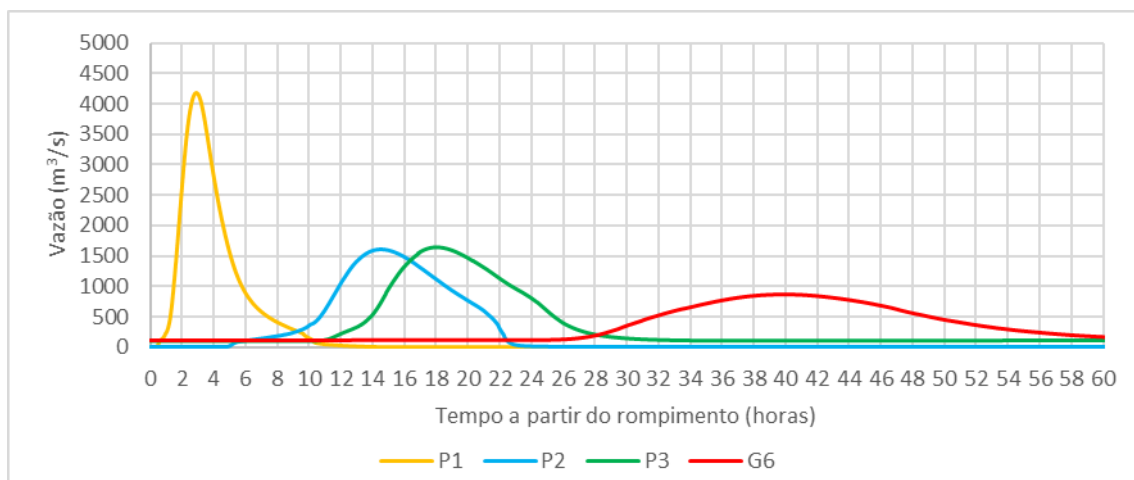


Figura 165. Hidrogramas simulados após o rompimento da barragem de Fundão, nos pontos P1, P2, P3 e G6.

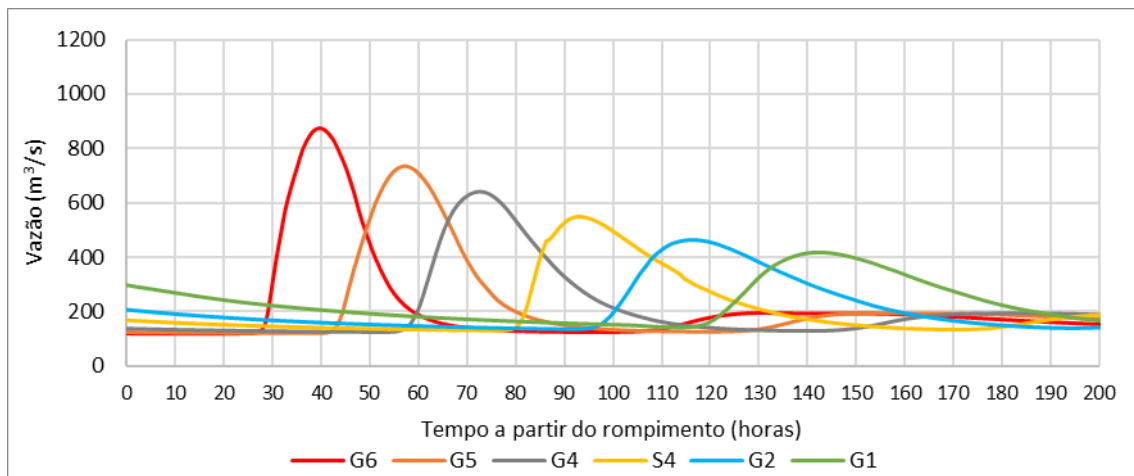


Figura 166. Hidrogramas simulados ao longo do rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão, nos pontos G6 a G1 e S4.

A Tabela 38 apresenta os resultados das vazões máximas simuladas em cada ponto de interesse e o respectivo tempo decorrido desde o rompimento. Para facilitar a visualização desses resultados, a Figura 167 apresenta um gráfico com as vazões máximas em função da distância a partir do local do rompimento na qual se observa um bom ajuste dos resultados do modelo em representar a propagação da onda de cheia.

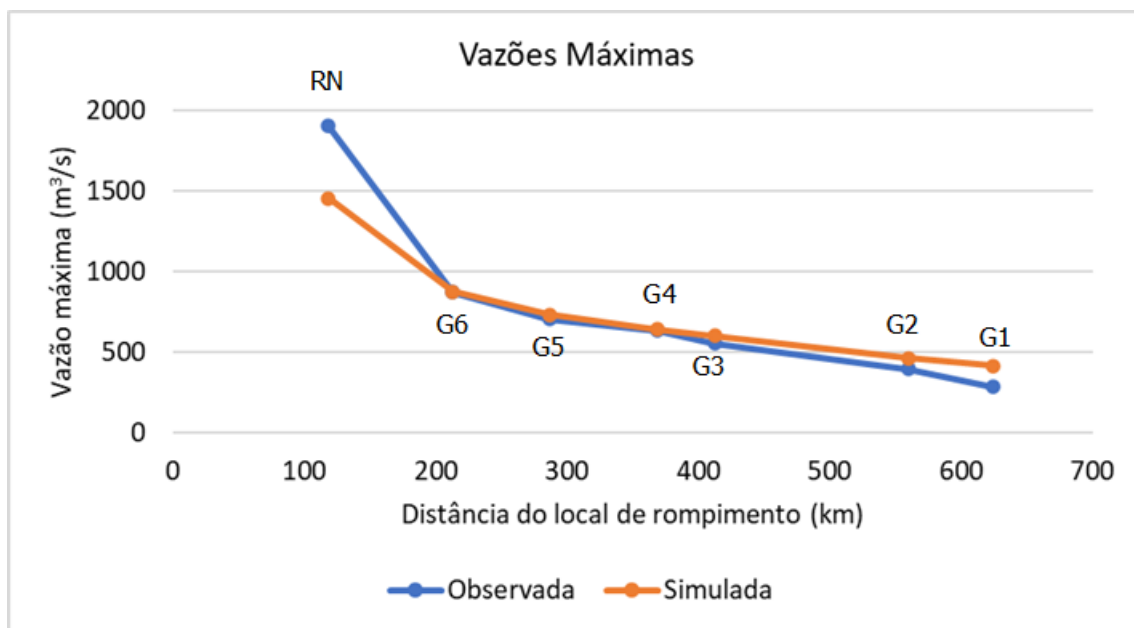


Figura 167. Comparação entre os picos de vazão simulados e observados após o rompimento da barragem de Fundão ao longo do rio Doce.

Tabela 38. Picos de vazão observados e simulados após o rompimento da barragem de Fundão em diferentes pontos de interesse ao longo do rio Doce, e respectivos tempos decorridos a partir do evento de rompimento da barragem de Fundão.

Local	Distância do rompimento (km)	Tempo decorrido (h)		Vazão máxima (m³/s)	
		Observado*	Simulado	Observada*	Simulada
Barragem de Risoleta	118,3	18,2	18,4	1900	1454
G6	213,1	40,0	39,7	871	874
G5	286,7	58,0	57,2	704	734
G4	368,9	72,2	72,6	635	641
G3	412,3	87,2	83,2	554	602
G2	559,7	112,7	116,3	394	463
G1	624,4	145,3	142,3	286	417

*Fonte: adaptado de CPRM e ANA (2015) e Palu (2019).

Propagação das Concentrações Simuladas

Com a simulação da onda de cheia devido ao rompimento da barragem de Fundão, foram estimados os sedimentogramas de concentrações em suspensão de cheia desde Santarém até Linhares, obtidos nos pontos de interesse definidos anteriormente.

A Figura 168 apresenta os hidrogramas e as concentrações ao longo do rio Doce, nos pontos G6 a G1 e S4, e Figura 169 apresenta as concentrações que passaram nos pontos P1 a P3. O tempo de propagação da onda de cheia simulada, desde o ponto P0 (confluência do córrego Santarém com o rio Gualaxo do Norte) até Cachoeira dos Óculos (G6) foi de 48 horas, o que está compatível com os valores observados. Até Linhares (G1), o tempo estimado para a chegada do pico da concentração foi de 339 horas.

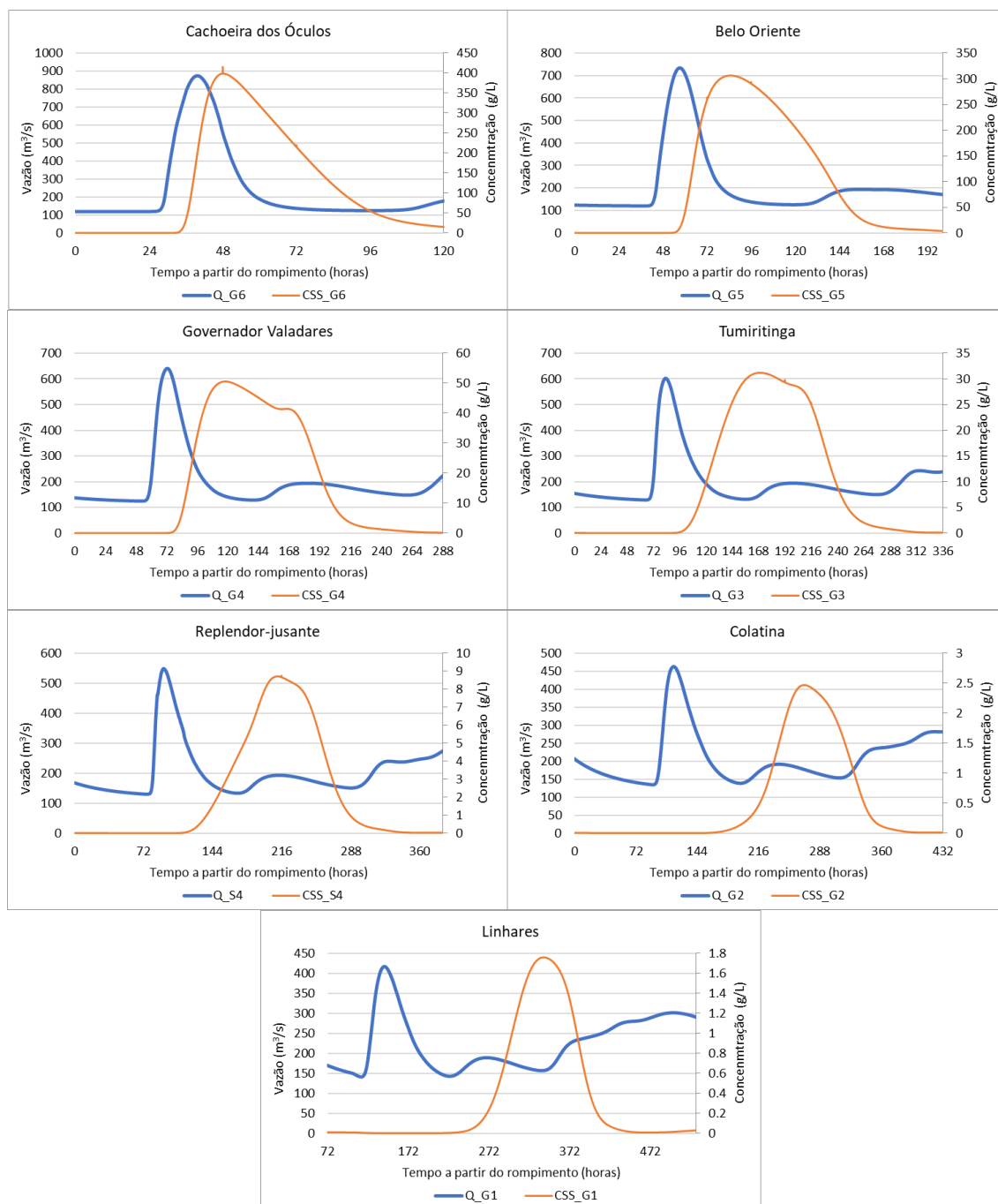


Figura 168. Concentrações e vazões simuladas após o rompimento da barragem de Fundão, nos pontos G6 a G1 e no S4.

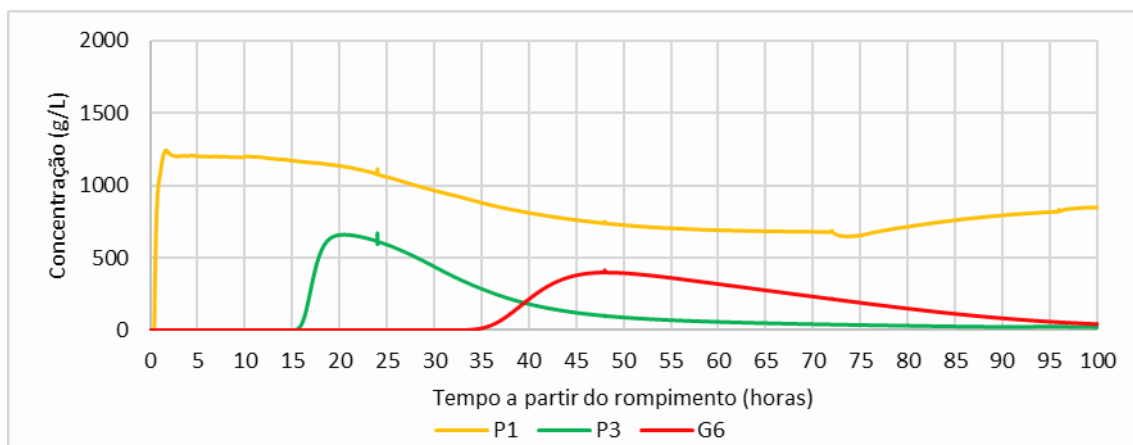


Figura 169. Concentrações simuladas após o rompimento da barragem de Fundão, nos pontos P1, P3 e G6.

É possível observar, a partir dos dados observados e simulados, a defasagem temporal entre a propagação da onda de cheia e o transporte de sedimentos em suspensão ao longo do rio Doce. Esse efeito ocorre devido ao retardo dos reservatórios sobre os sedimentos e, principalmente, devido a elevada celeridade da onda de cheia em relação a velocidade média do escoamento que transporta os sedimentos. A celeridade média da onda de cheia estimada com os tempos de picos dos hidrogramas observados nas estações G6 a G1 e a distância percorrida foi de 1,2 m/s. Já a velocidade de média do escoamento, considerando o tempo de propagação do pico das concentrações e a distância percorrida é estimado em 0,51 m/s.

A Tabela 39 apresenta os resultados das concentrações máximas simuladas em cada ponto de interesse e o respectivo tempo decorrido desde o rompimento. Para facilitar a visualização desses resultados, a Figura 170 apresenta um gráfico com as concentrações máximas em função da distância a partir do local do rompimento, na qual se observa um bom ajuste dos resultados do modelo em representar a propagação das concentrações, especialmente no trecho mais impactado entre Fundão e Cacheira dos Óculos.

Tabela 39. Concentrações máximas observadas e simuladas em diferentes pontos de interesse ao longo do rio Doce e respectivos tempos decorridos a partir do evento de rompimento da barragem de Fundão.

Local	Distância acumulada (km)	Tempo decorrido (h)		Concentração máxima observada (g/L)	
		Observada*	Simulada	Observada*	Simulada
G6	213,1	44,25	48,0	418,8	415,4
G5	286,7	64,25	84,8	304,64	306,3
G4	368,9	116,25	117,9	50,9	50,6
G3	412,3	163,25	168,0	31,1	31,2
S4	476,3	235,25	216,0	7,7	8,8
G2	559,7	352,25	269,3	2,2	2,5
G1	624,4	388,25	339,4	1,5	1,8

Fonte: adaptado de CPRM e ANA (2015) e Palu (2019).

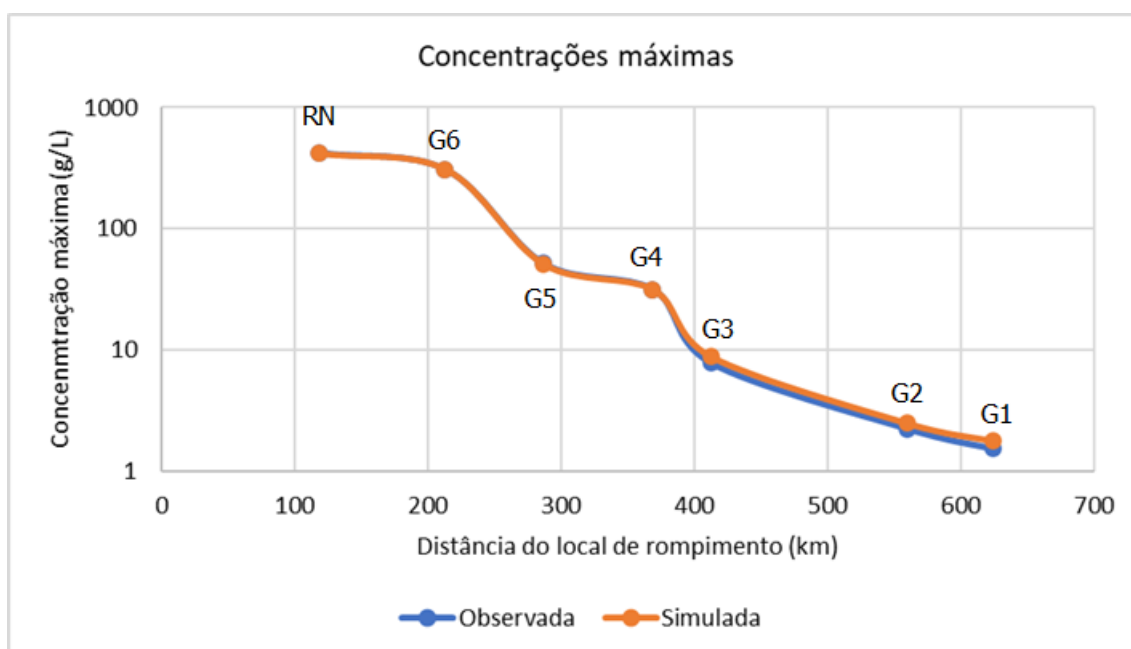


Figura 170. Comparação entre os picos de concentração simulados e observados após o rompimento da barragem de Fundão ao longo do rio Doce.

APÊNDICE F - CENÁRIO C: RELAÇÃO ENTRE VAZÃO SÓLIDA E VAZÃO LÍQUIDA PARA ESTAÇÕES DE INTERESSE AO LONGO DO RIO DOCE

Neste apêndice são apresentadas as relações entre vazões líquidas e sólidas simuladas diárias, e observadas, nos cenários A e C, para os locais das estações de sedimentos da ANA localizadas ao longo do rio Doce, que continham dados no período simulado de 2015 a 2022. Cada figura corresponde a um ano do período simulado (2015 a 2022), exceto nas estações Barra Longa (Gualaxo do Norte RGN08) e RDO01 para a qual são apresentados apenas os anos de 2017 a 2022, que são aqueles que possuem dados observados. Adicionalmente, para as estações RCA02 e RGN06 as *relações entre vazões líquidas e sólidas simuladas diárias, e observadas*, nos cenários A e C são apresentadas a partir de 2018, devido ao início dos dados observados. Para o ano de 2015, são considerados apenas os dados observados e simulados nos meses de novembro e dezembro, após o rompimento da barragem de Fundão.

É importante destacar que apesar da quantidade limitada de medições realizadas a cada ano, os resultados das simulações são coerentes e mostram valores comparáveis com as observações, permitindo retratar as condições de transporte de sedimentos da bacia e ao longo dos trechos avaliados de forma adequada.

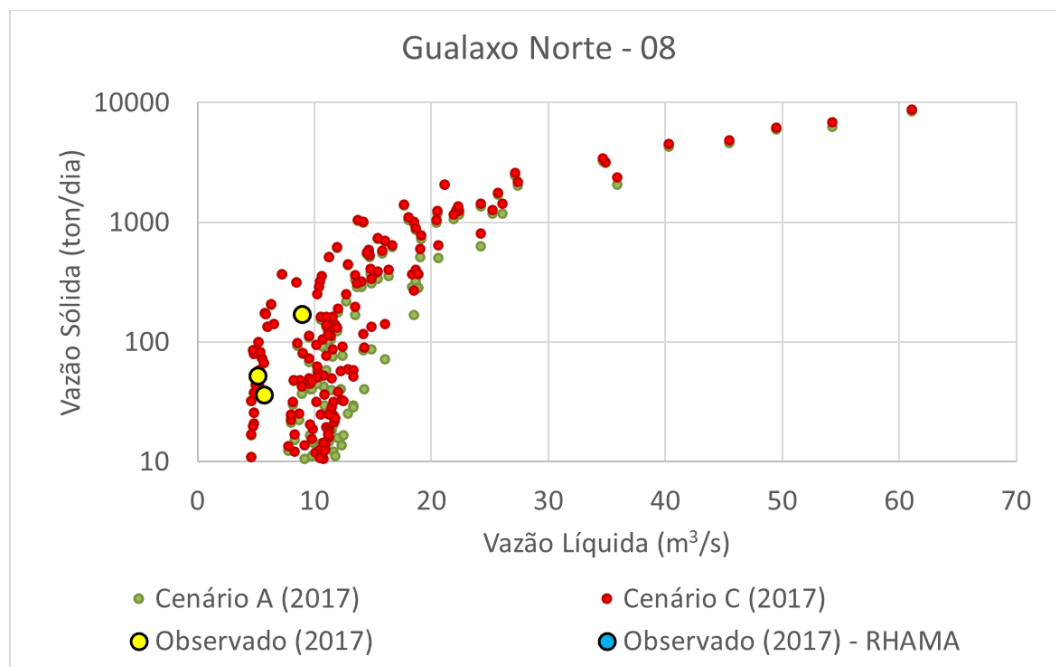


Figura 171. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2017 (dezembro).

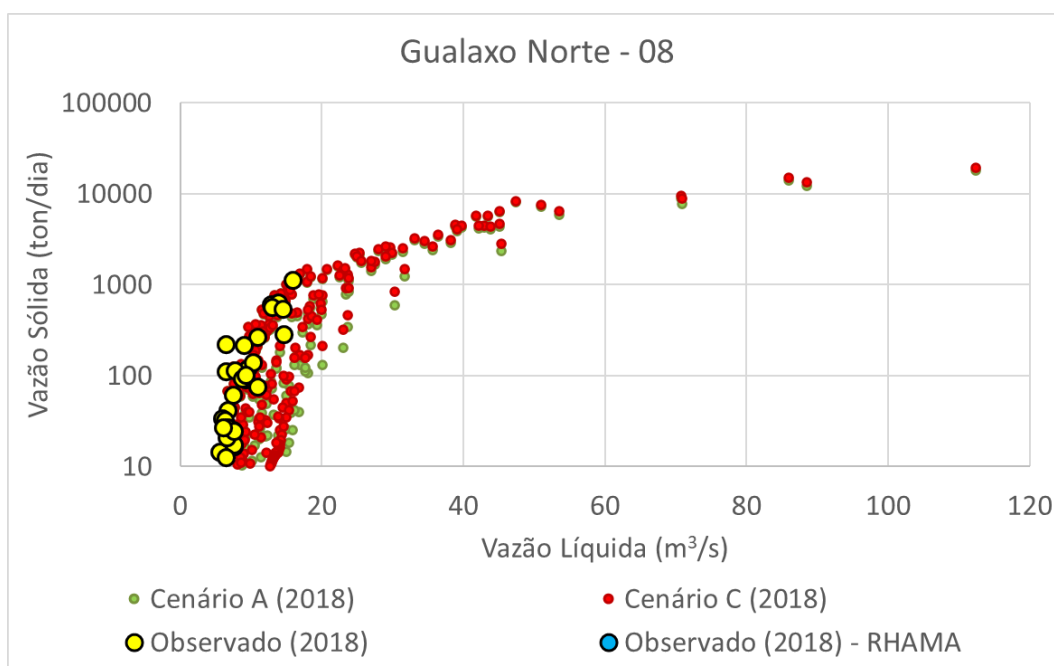


Figura 172. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2018.

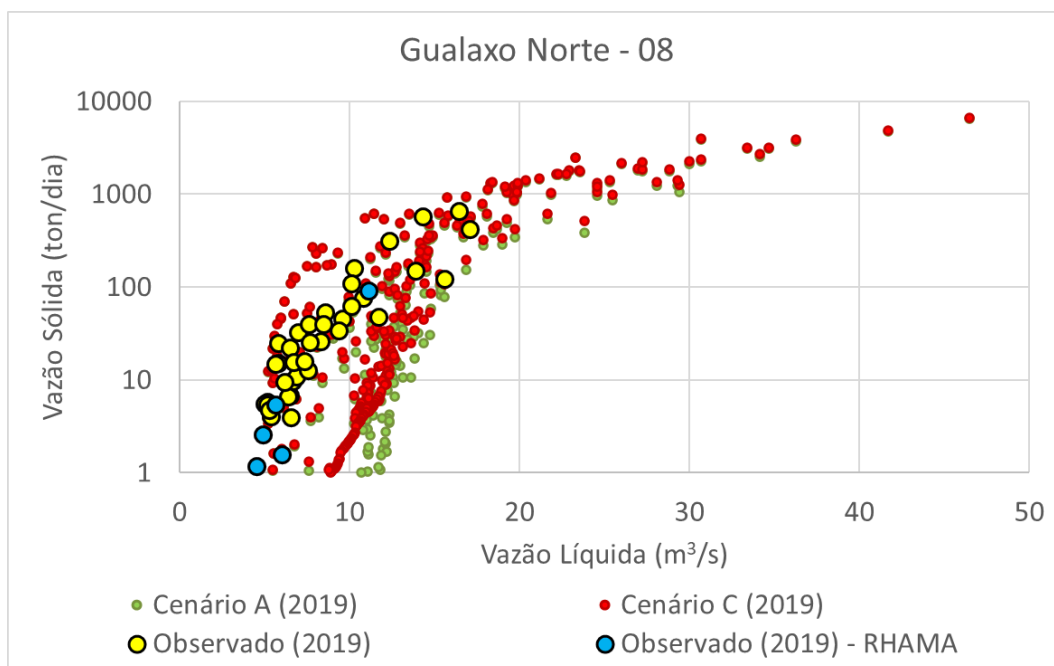


Figura 173. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2019.

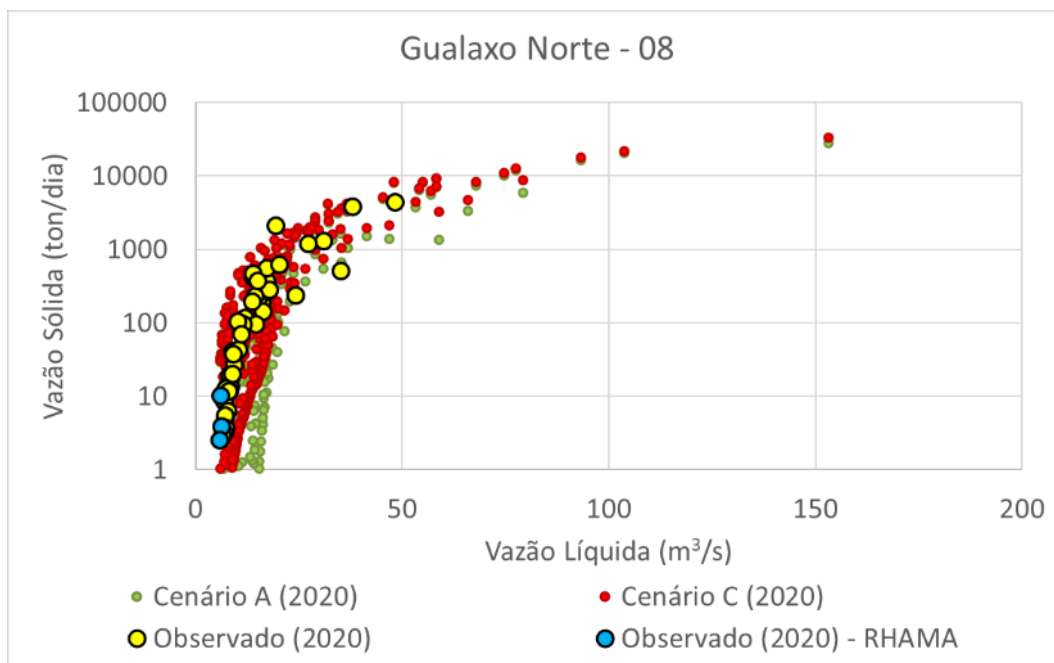


Figura 174. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2020.

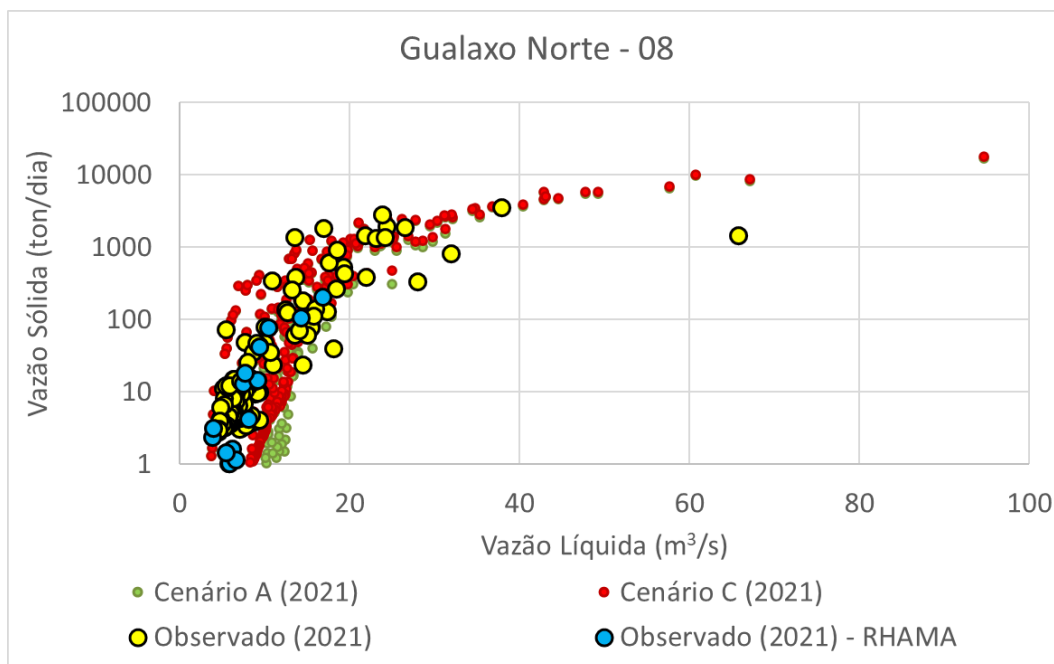


Figura 175. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2021.

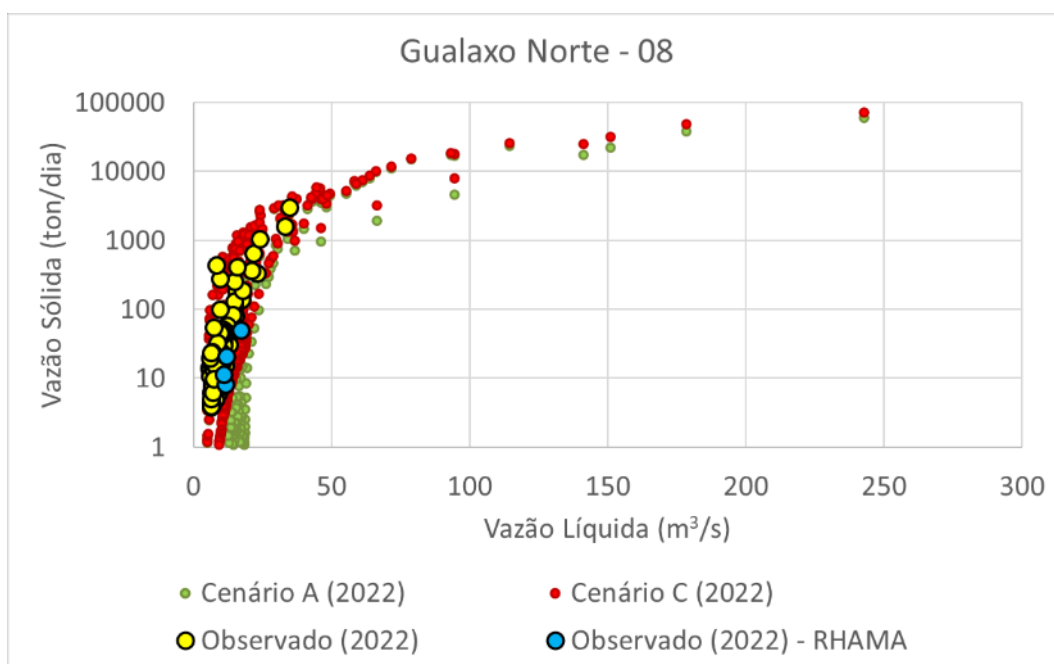


Figura 176. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação Barra Longa (Gualaxo do Norte) no ano de 2022.

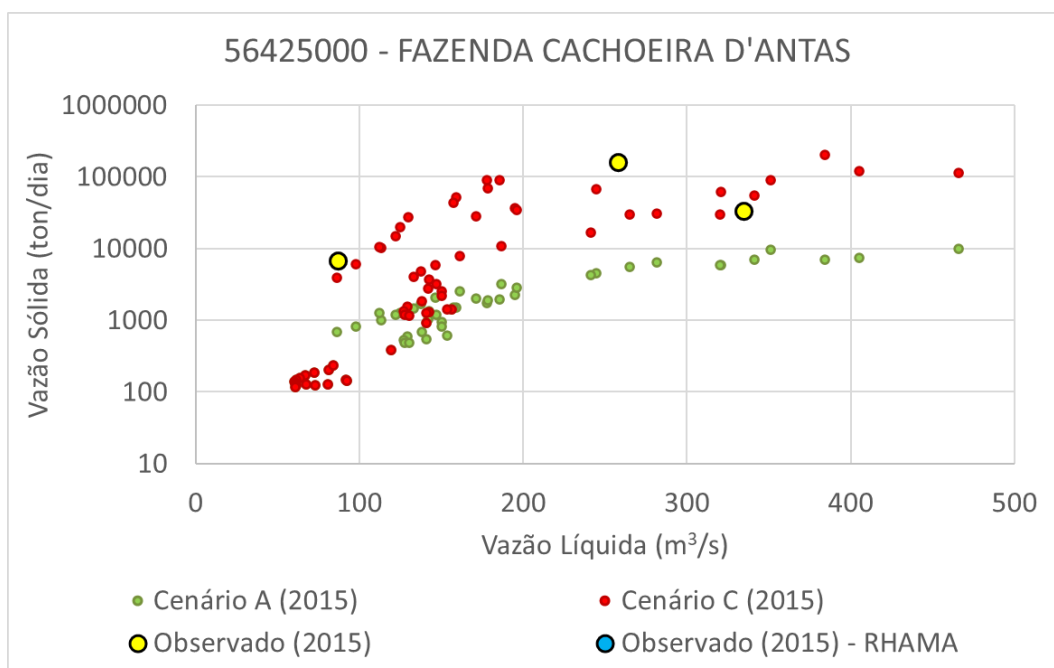


Figura 177. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) no período de 01/11/2015 a 31/12/2015.

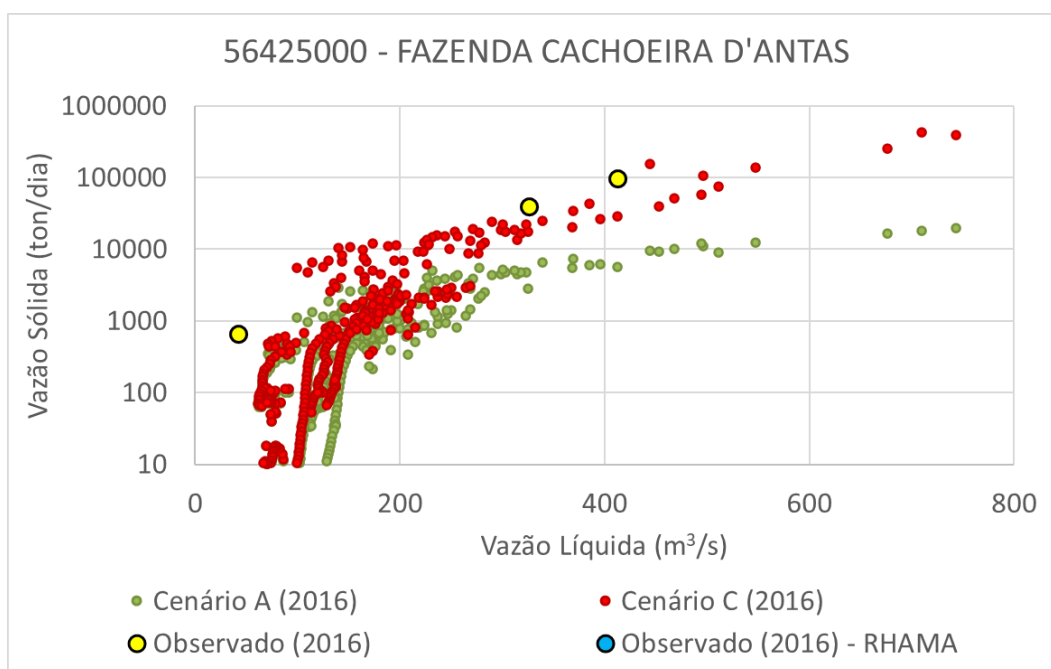


Figura 178. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) no ano de 2016.

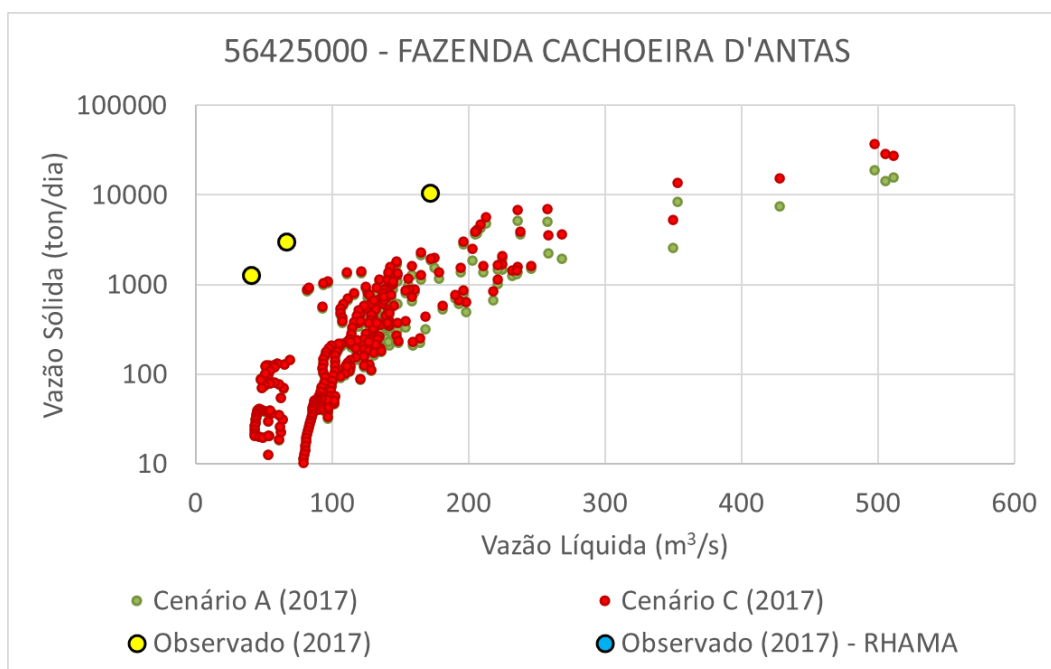


Figura 179. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) no ano de 2017.

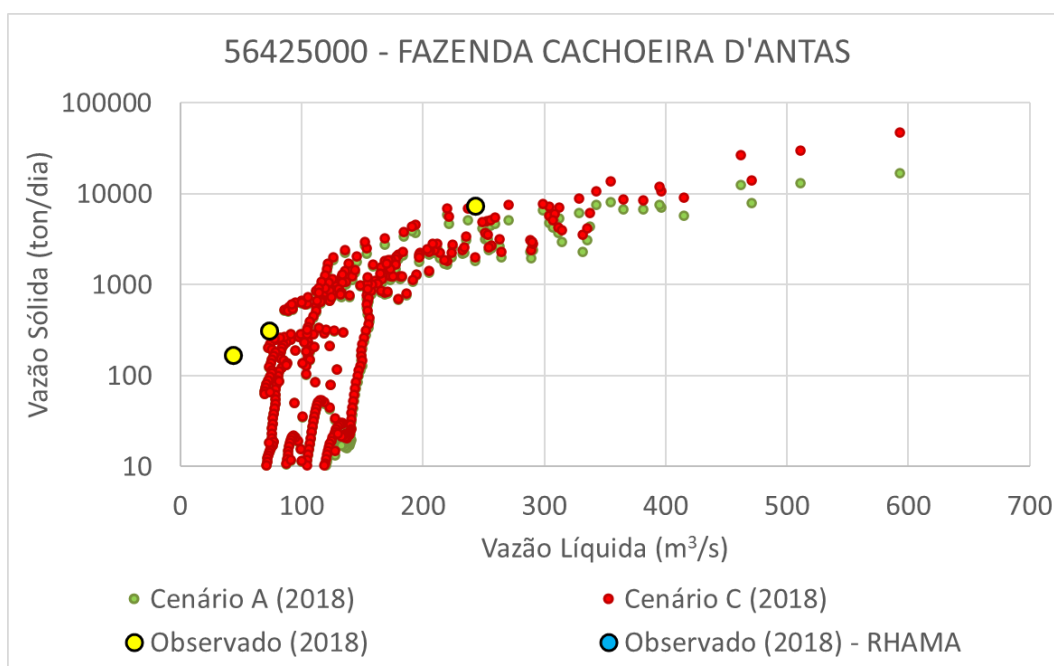


Figura 180. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) no ano de 2018.

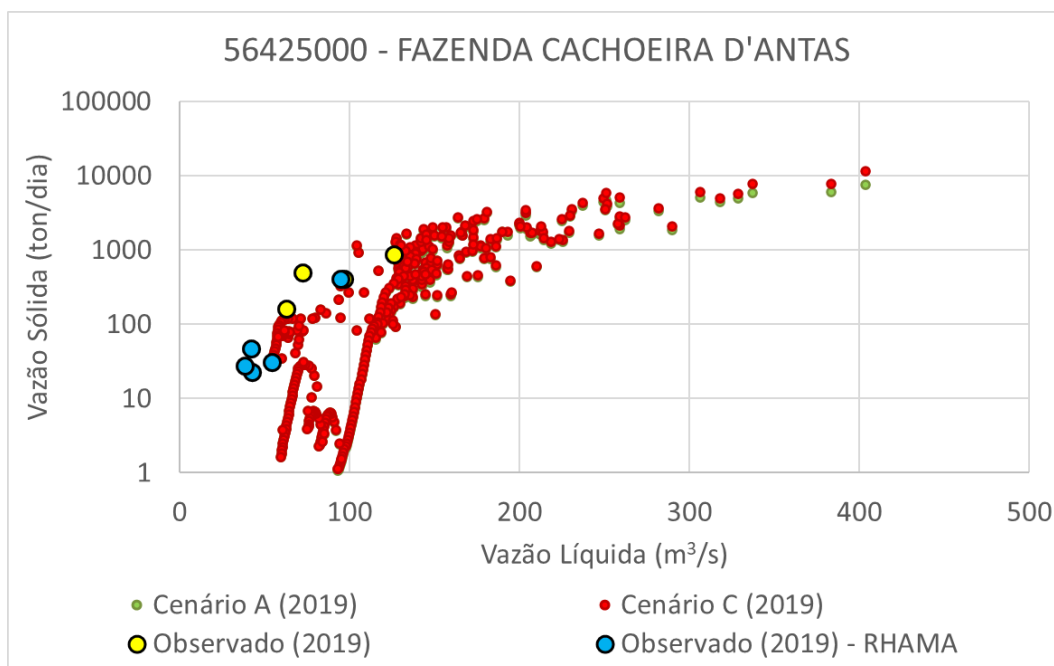


Figura 181. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) no ano de 2019.

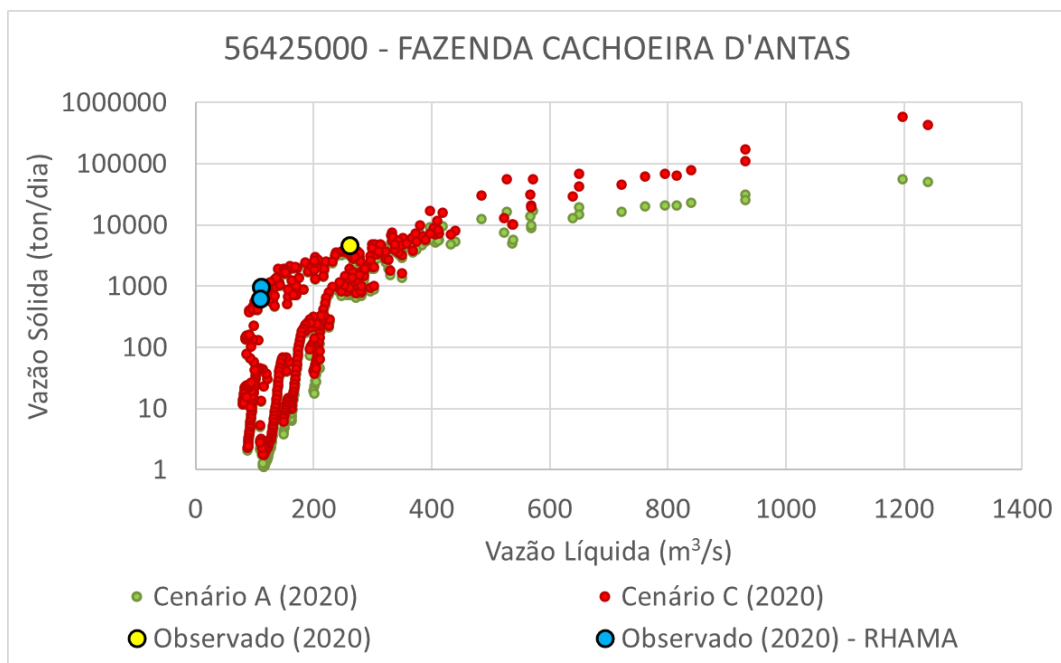


Figura 182. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) no ano de 2020.

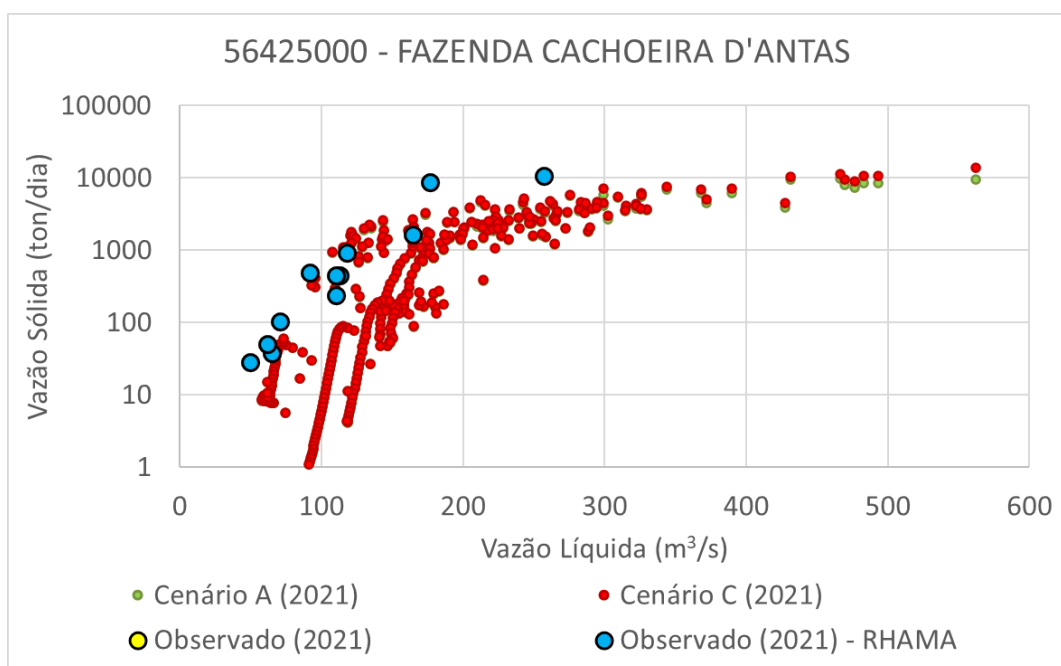


Figura 183. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) no ano de 2021.

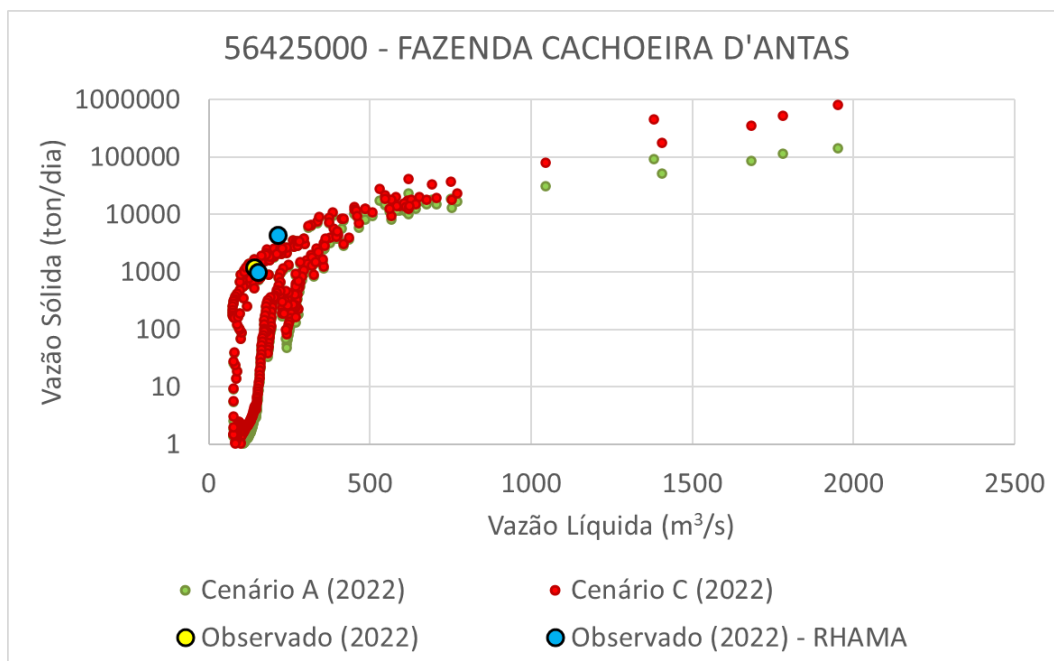


Figura 184. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56425000 (Fazenda Cachoeira D'Antas) no ano de 2022.

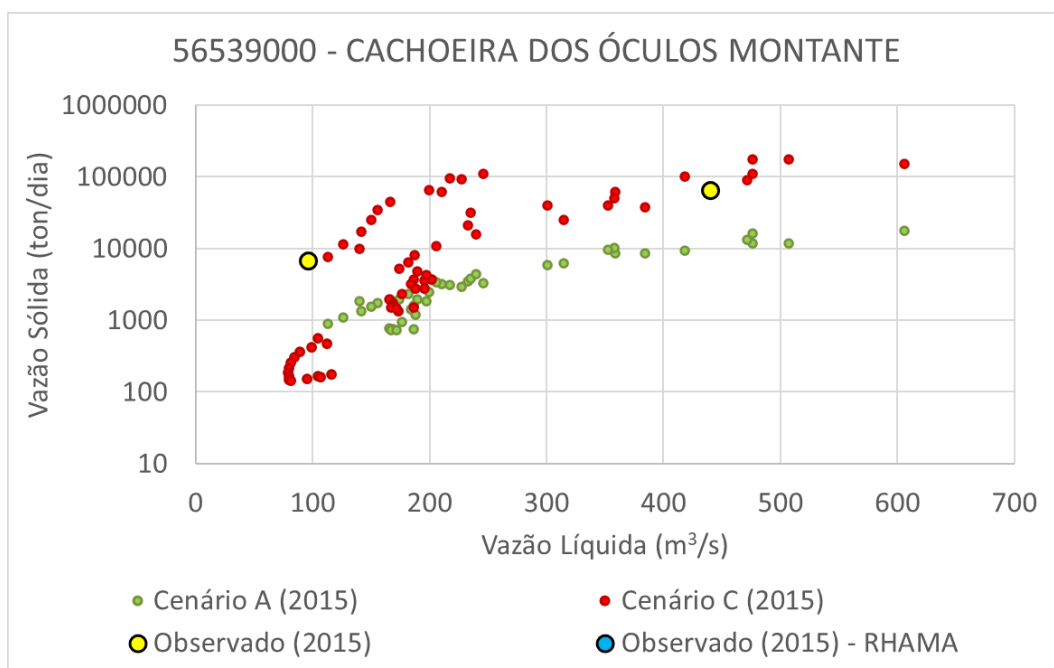


Figura 185. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante) no período de 01/11/2015 a 31/12/2015.

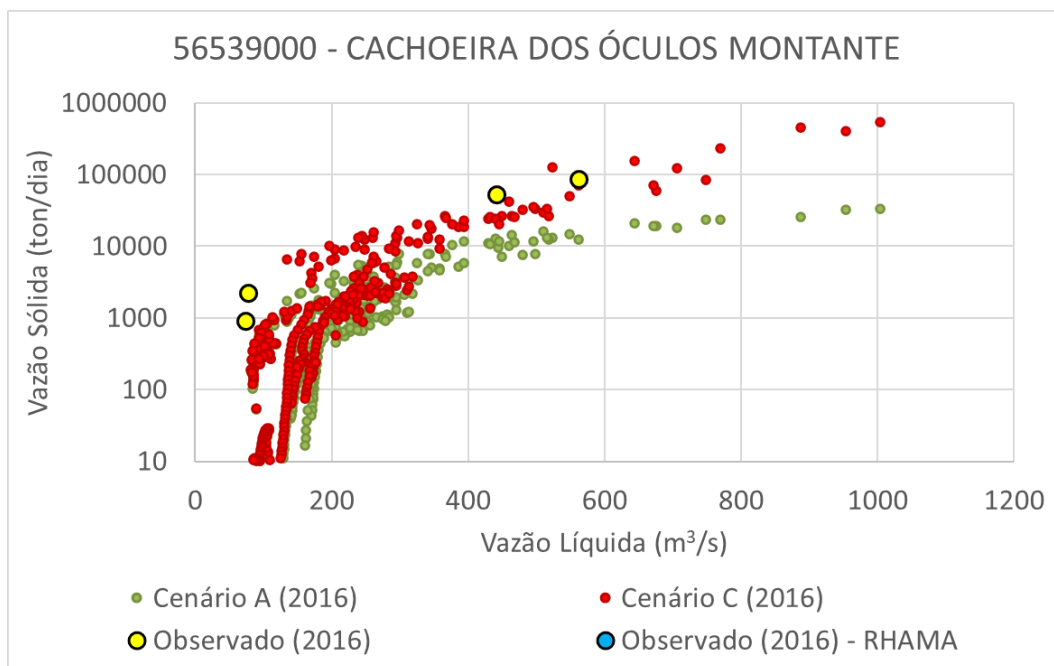


Figura 186. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante) no ano de 2016.

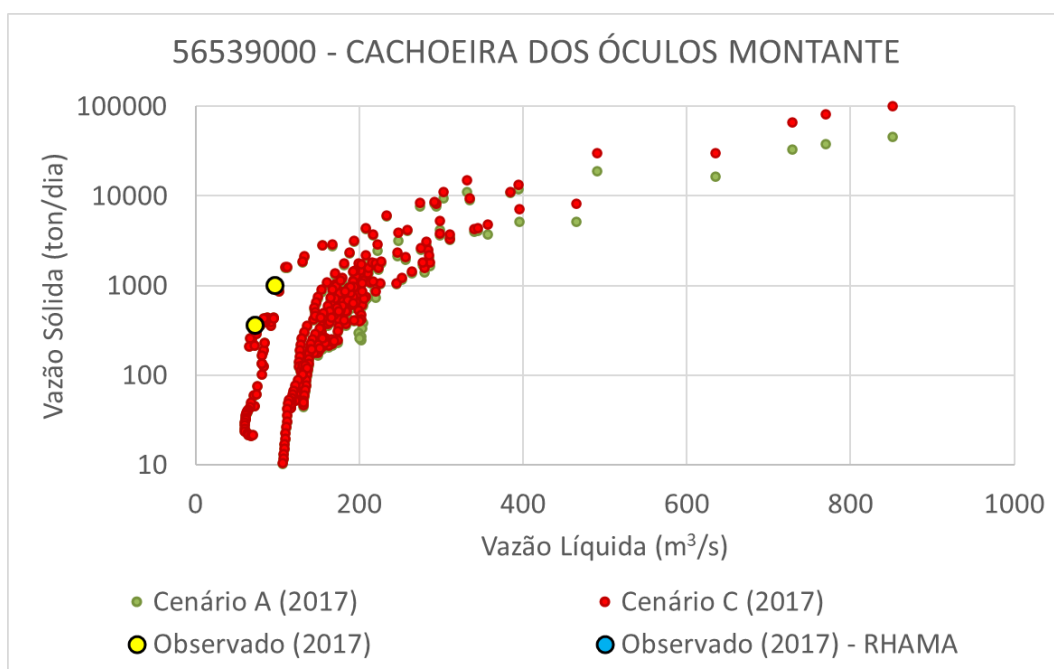


Figura 187. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante) no ano de 2017.

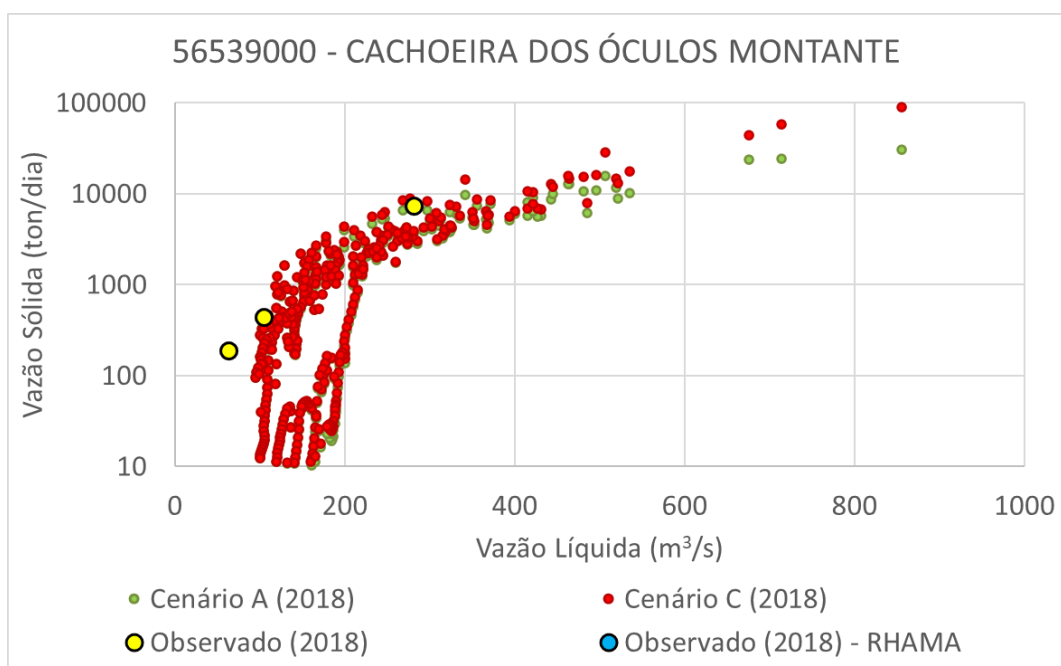


Figura 188. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante) no ano de 2018.

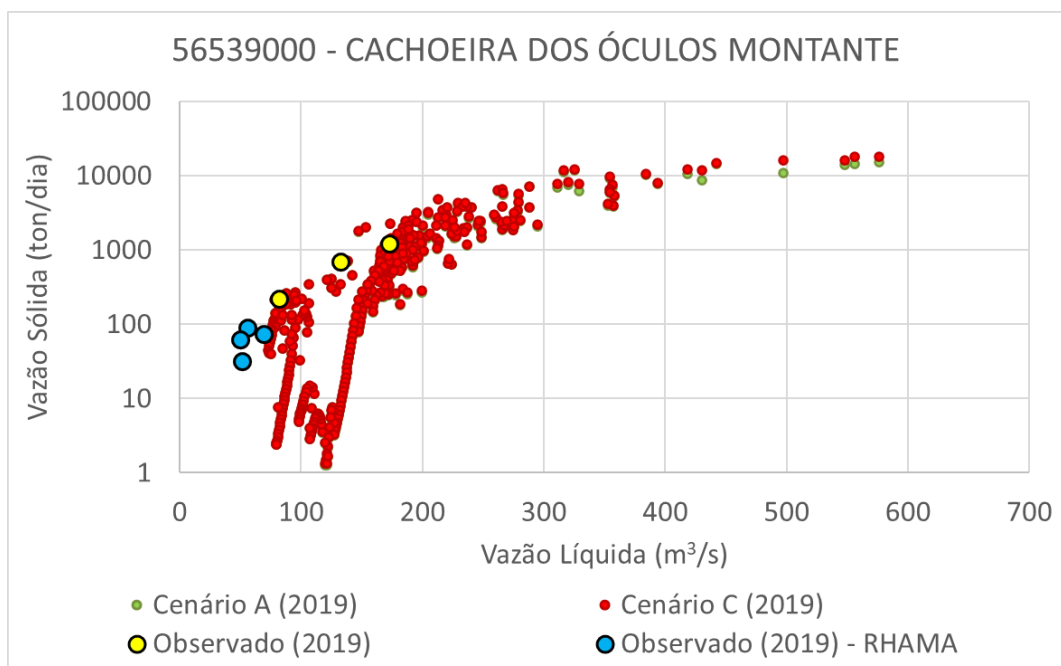


Figura 189. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante) no ano de 2019.

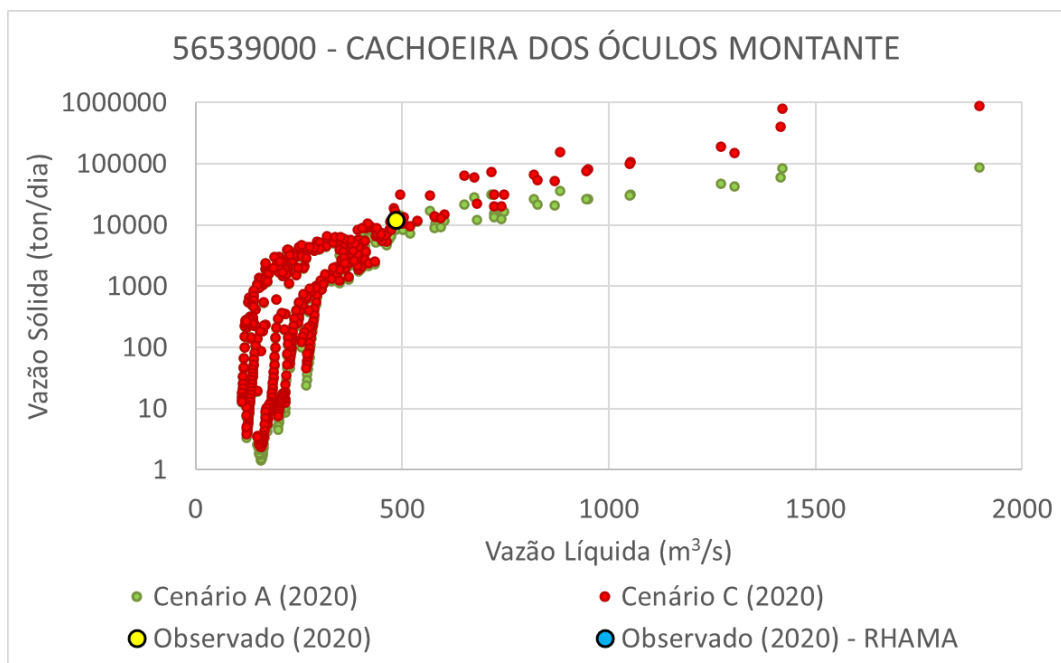


Figura 190. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante) no ano de 2020.

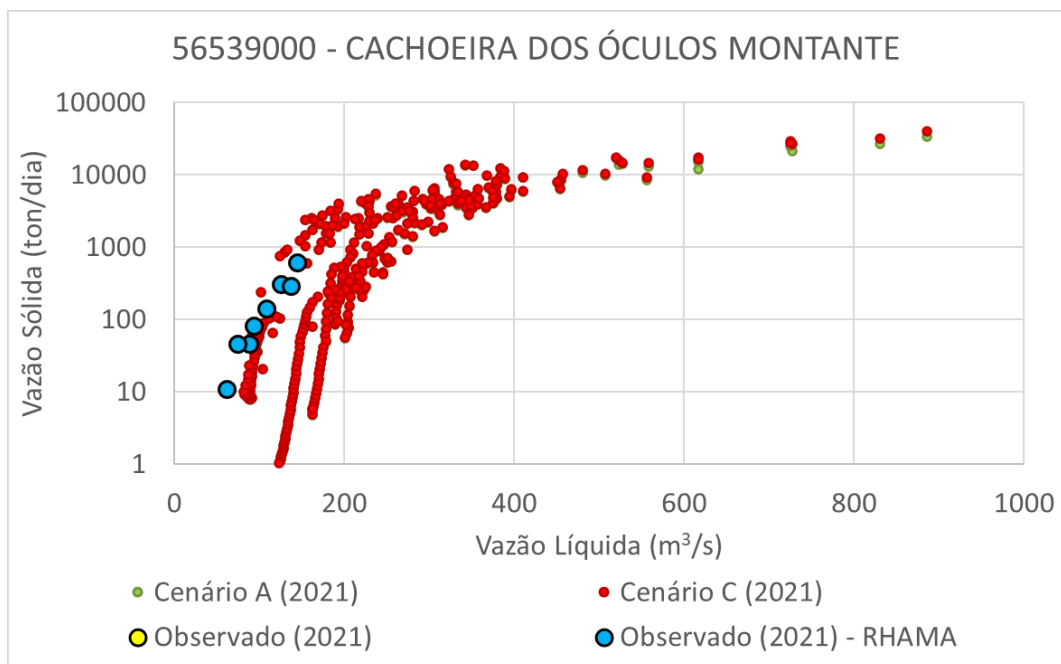


Figura 191. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante) no ano de 2021.

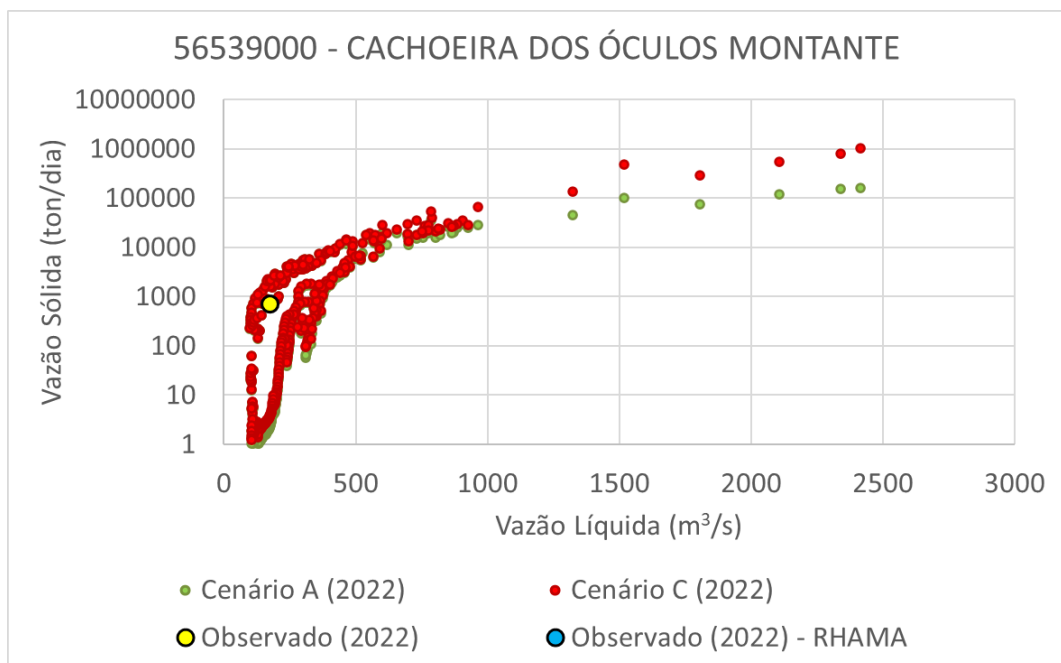


Figura 192. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56539000 (Cachoeira dos Óculos Montante) no ano de 2022.

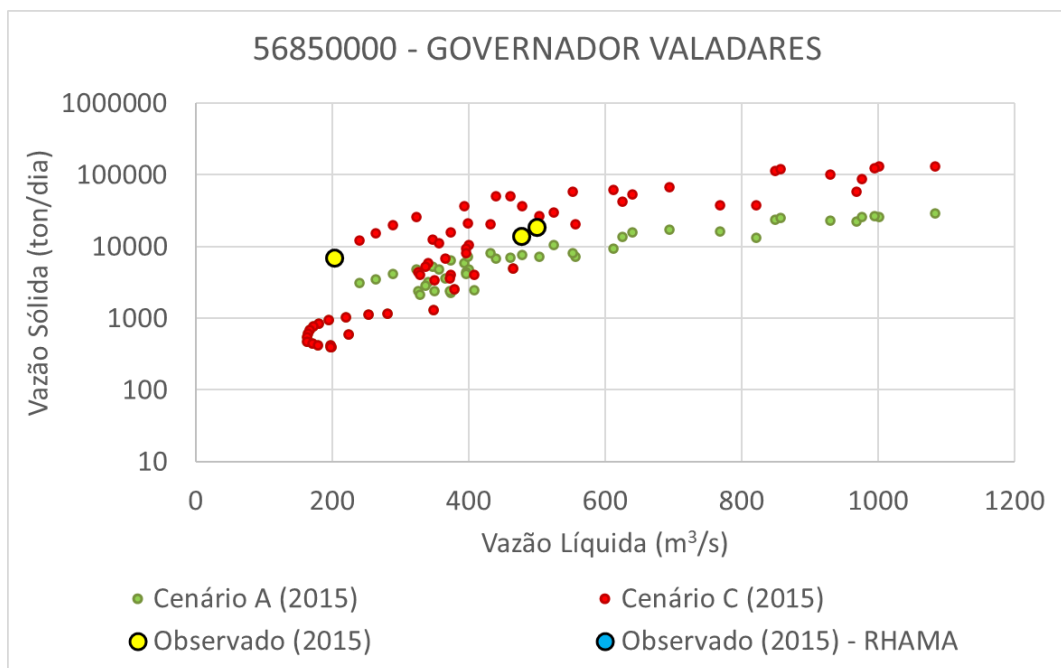


Figura 193. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56850000 (Governador Valadares) no período de 01/11/2015 a 31/12/2015.

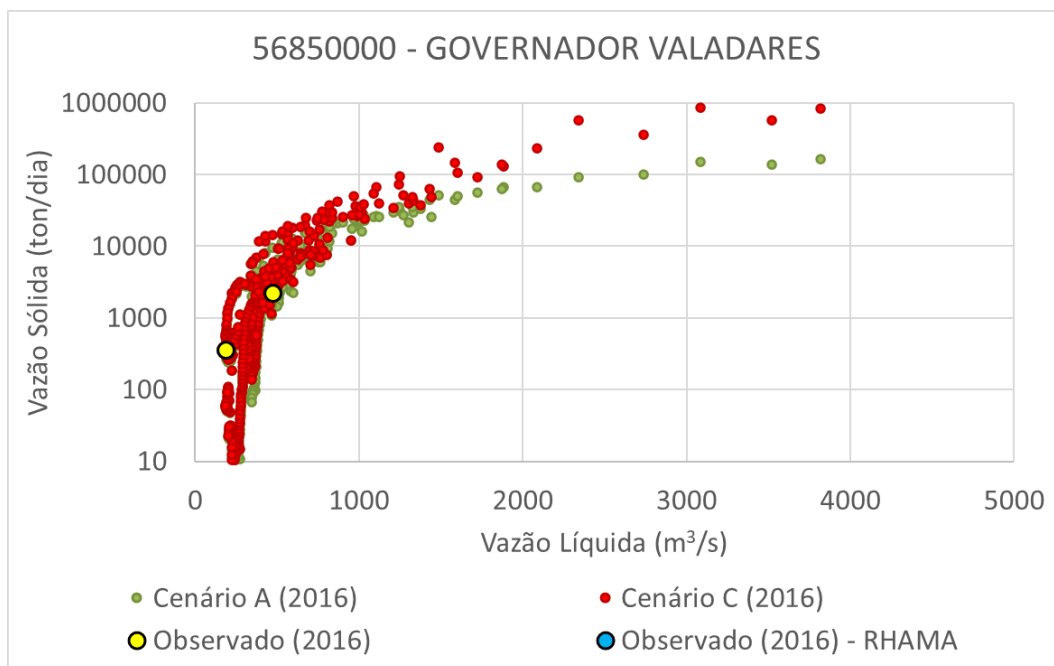


Figura 194. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56850000 (Governador Valadares) no ano de 2016.

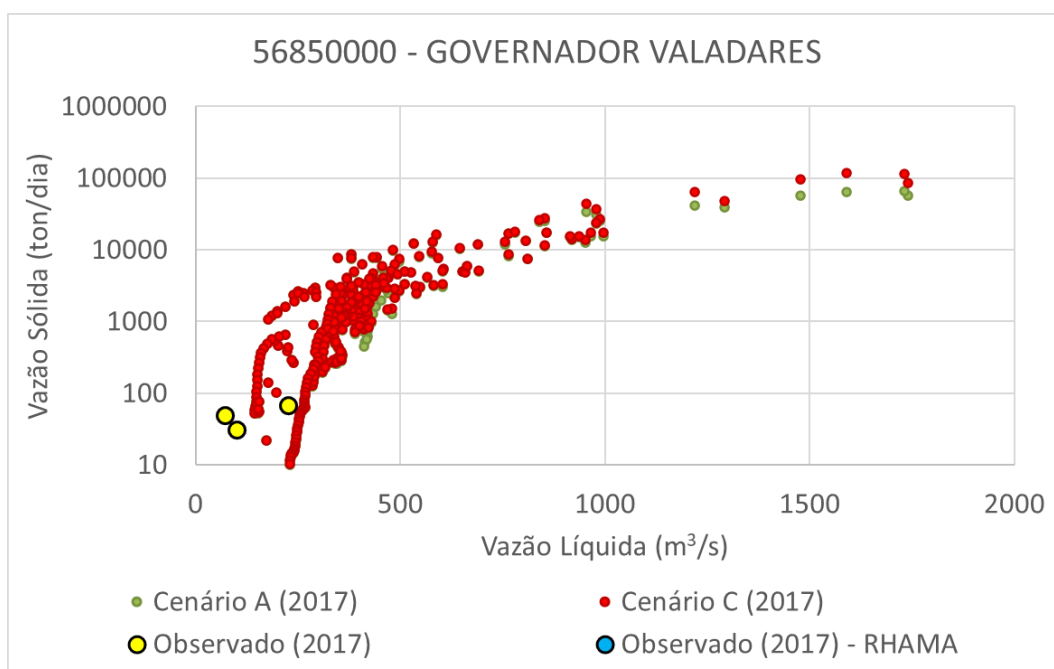


Figura 195. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56850000 (Governador Valadares) no ano de 2017.

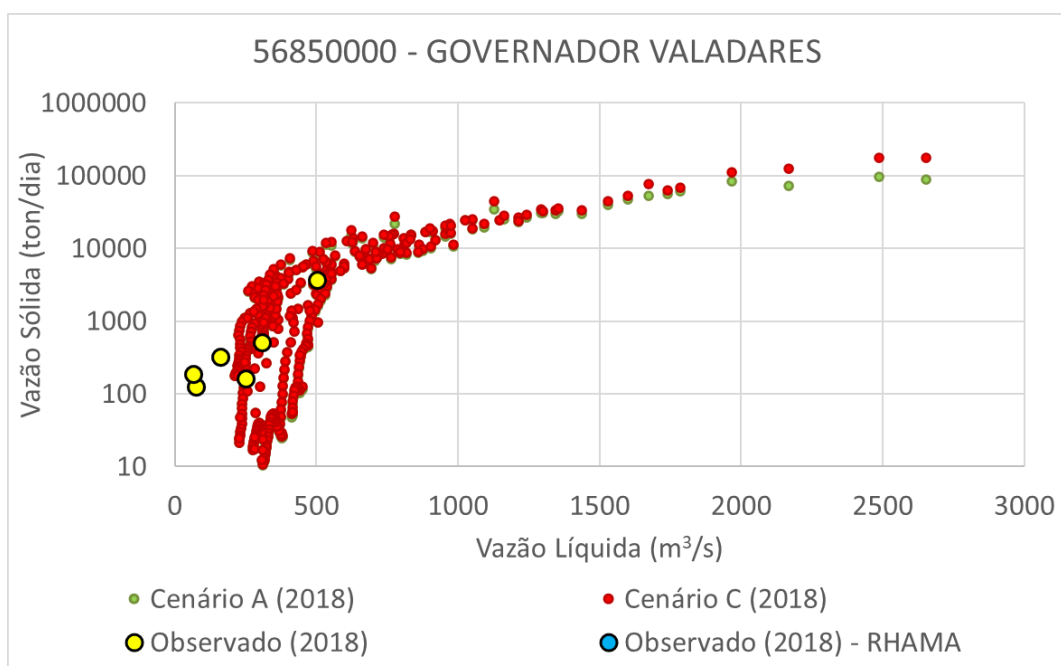


Figura 196. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56850000 (Governador Valadares) no ano de 2018.

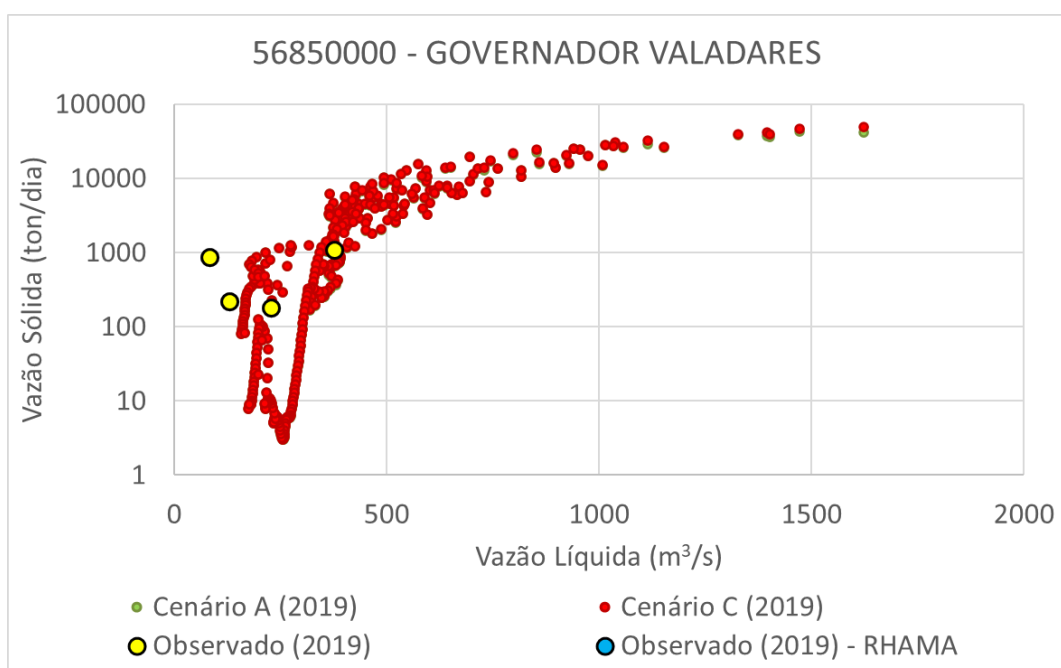


Figura 197. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56850000 (Governador Valadares) no ano de 2019.

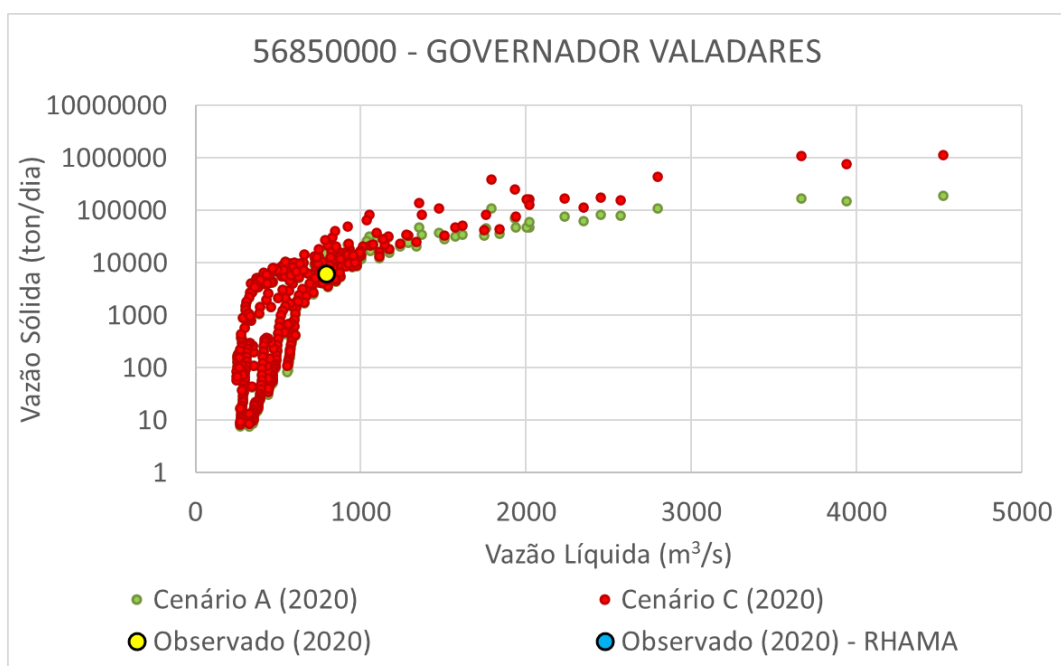


Figura 198. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56850000 (Governador Valadares) no ano de 2020.

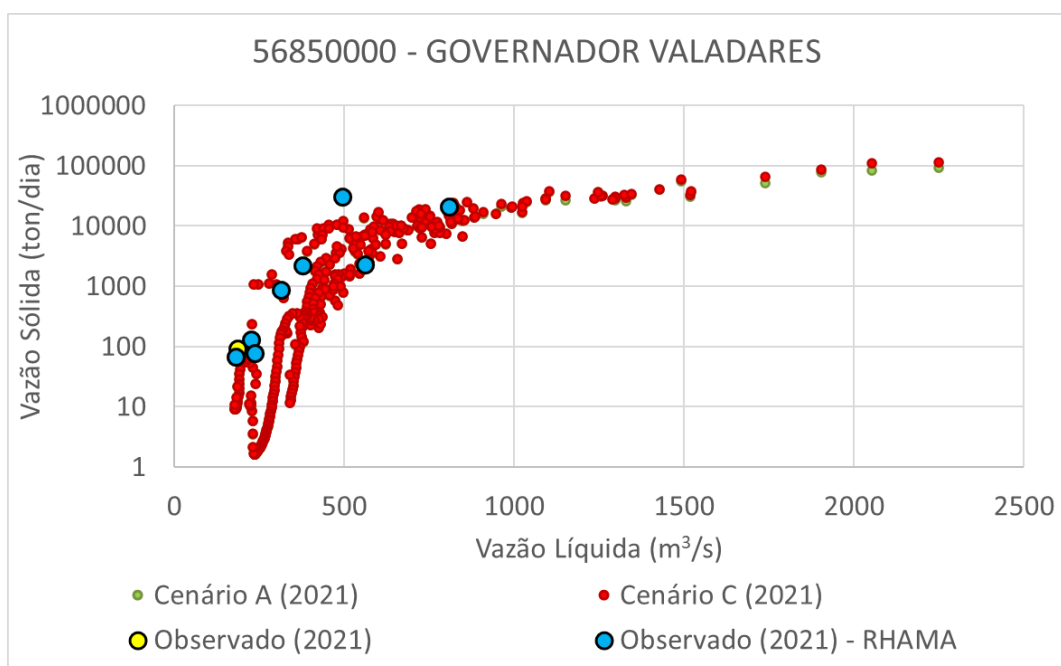


Figura 199. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56850000 (Governador Valadares) no ano de 2021.

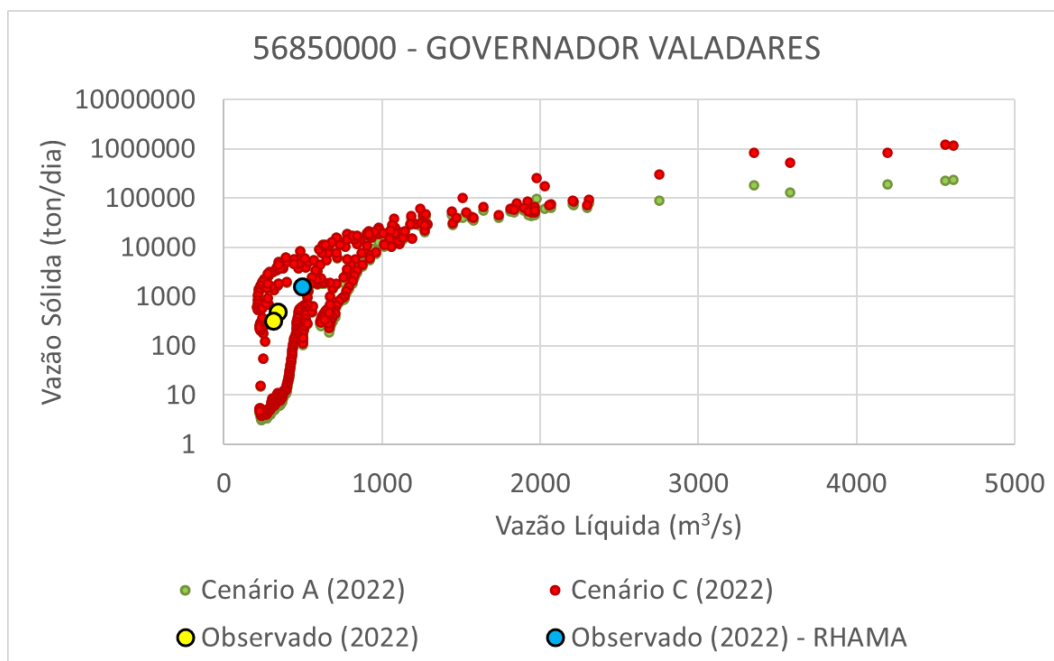


Figura 200. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56850000 (Governador Valadares) no ano de 2022.

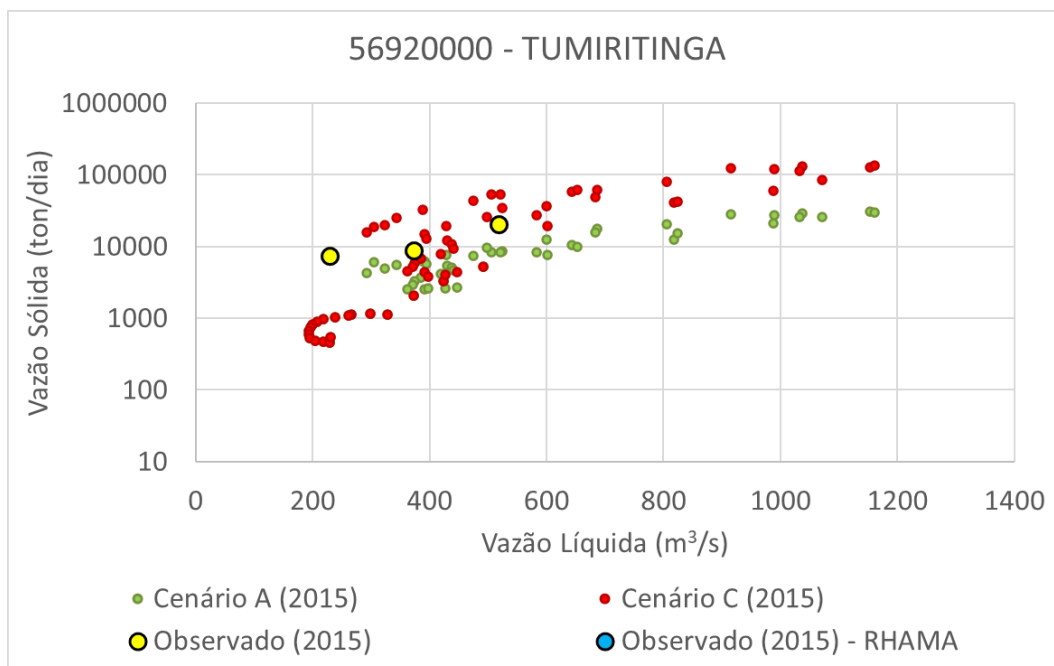


Figura 201. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56920000 (Tumiritinga) no período de 01/11/2015 a 31/12/2015.

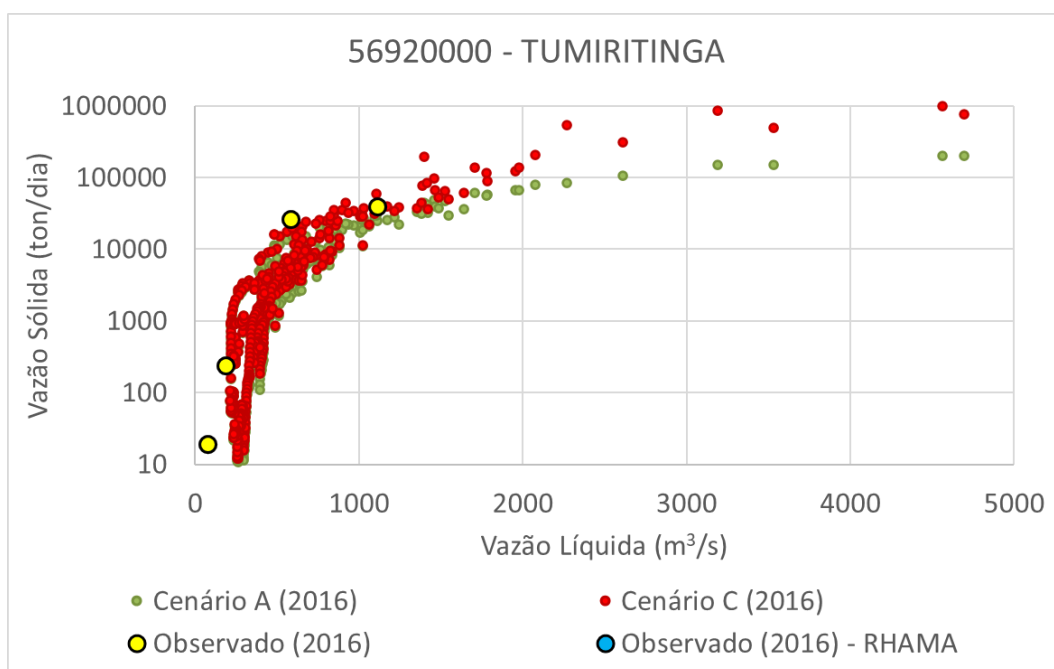


Figura 202. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56920000 (Tumiritinga) no ano de 2016.

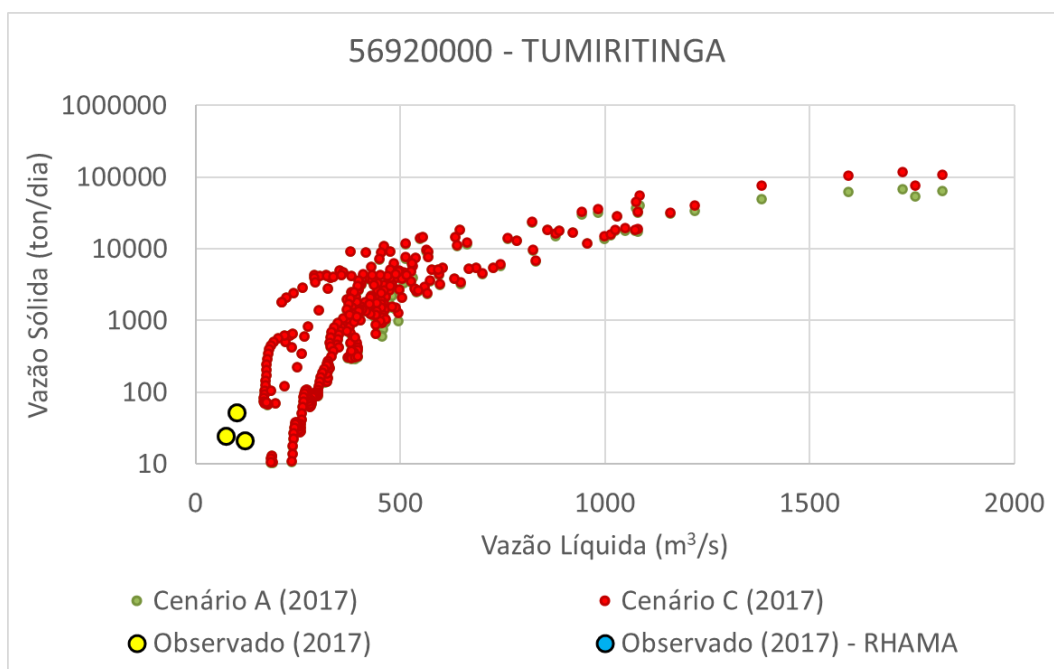


Figura 203. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56920000 (Tumiritinga) no ano de 2017.

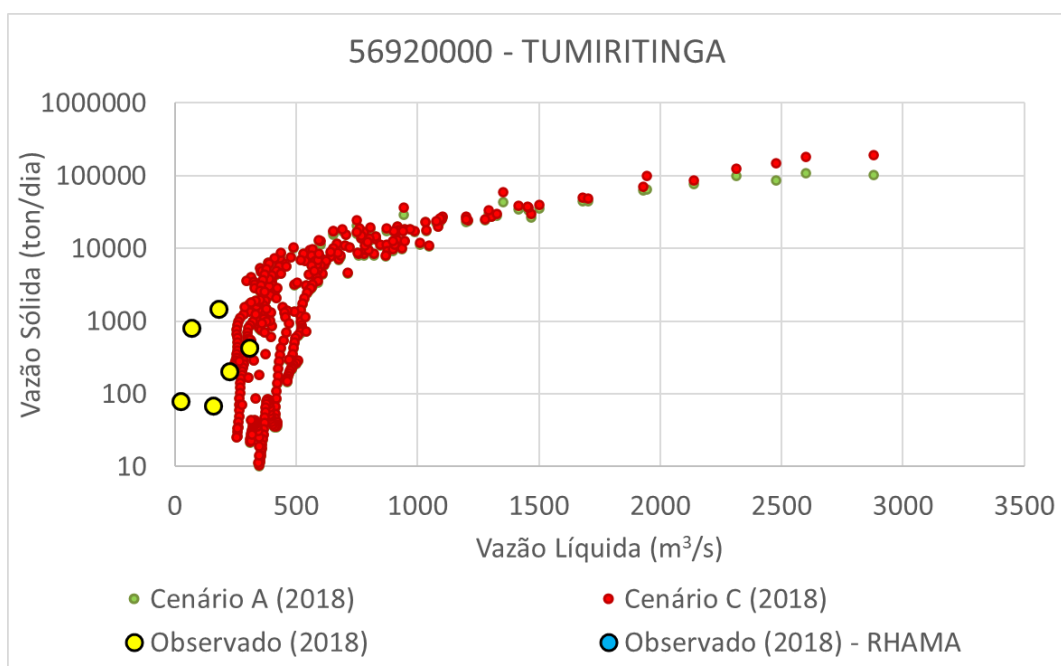


Figura 204. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56920000 (Tumiritinga) no ano de 2018.

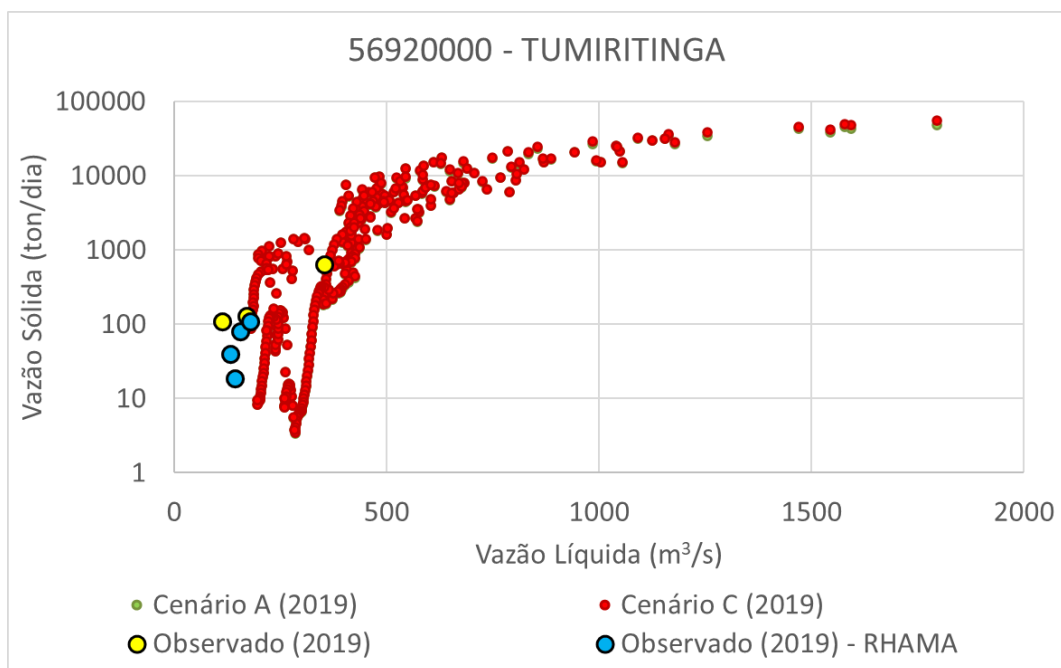


Figura 205. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56920000 (Tumiritinga) no ano de 2019.

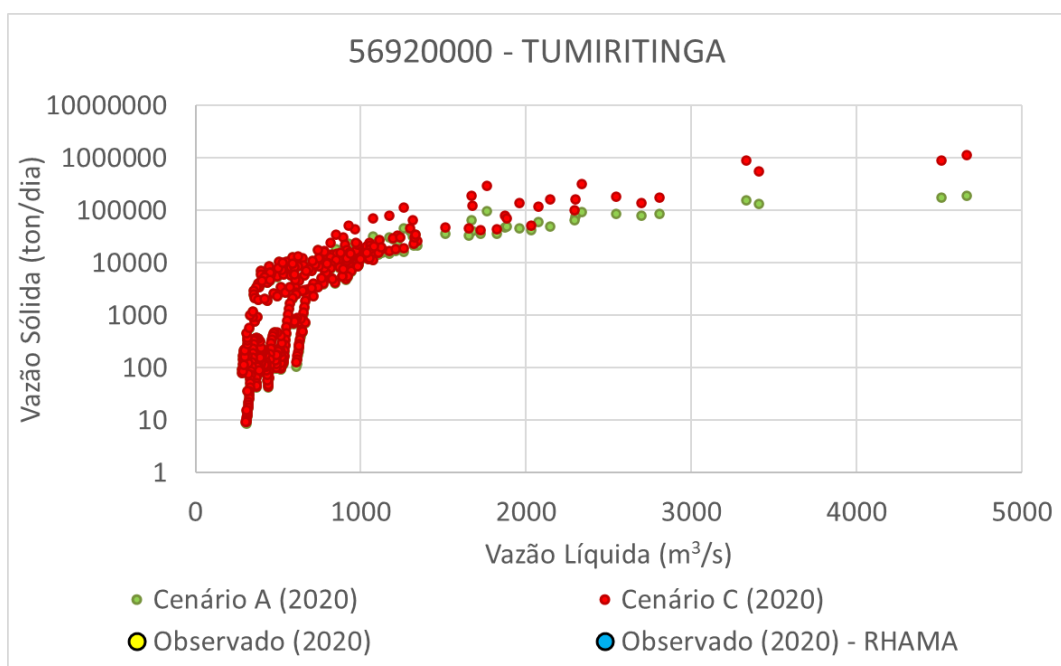


Figura 206. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56920000 (Tumiritinga) no ano de 2020.

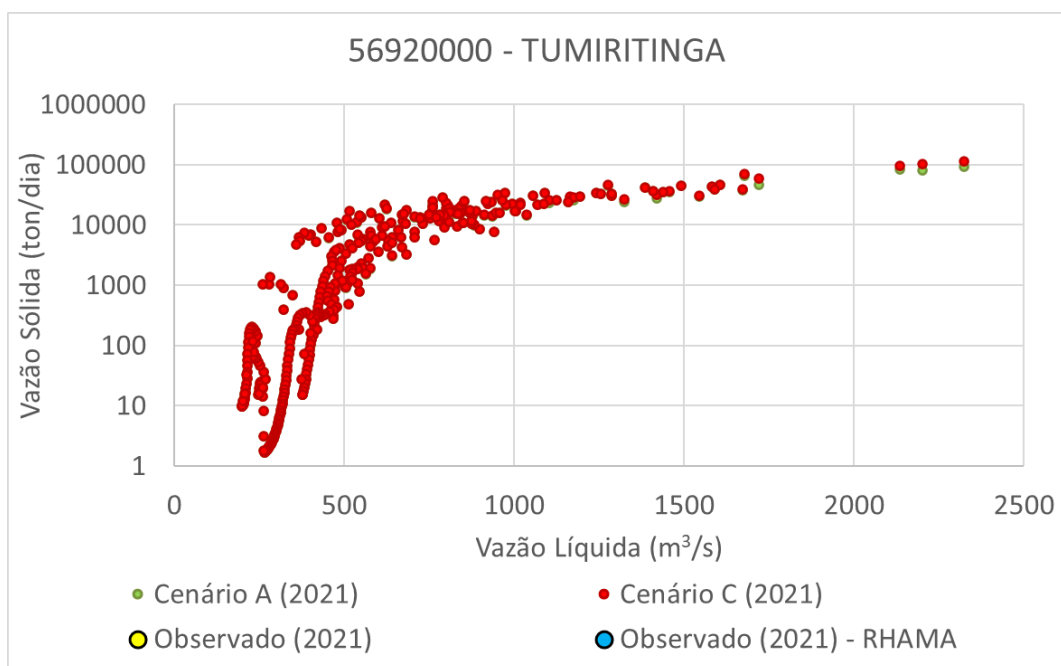


Figura 207. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56920000 (Tumiritinga) no ano de 2021.

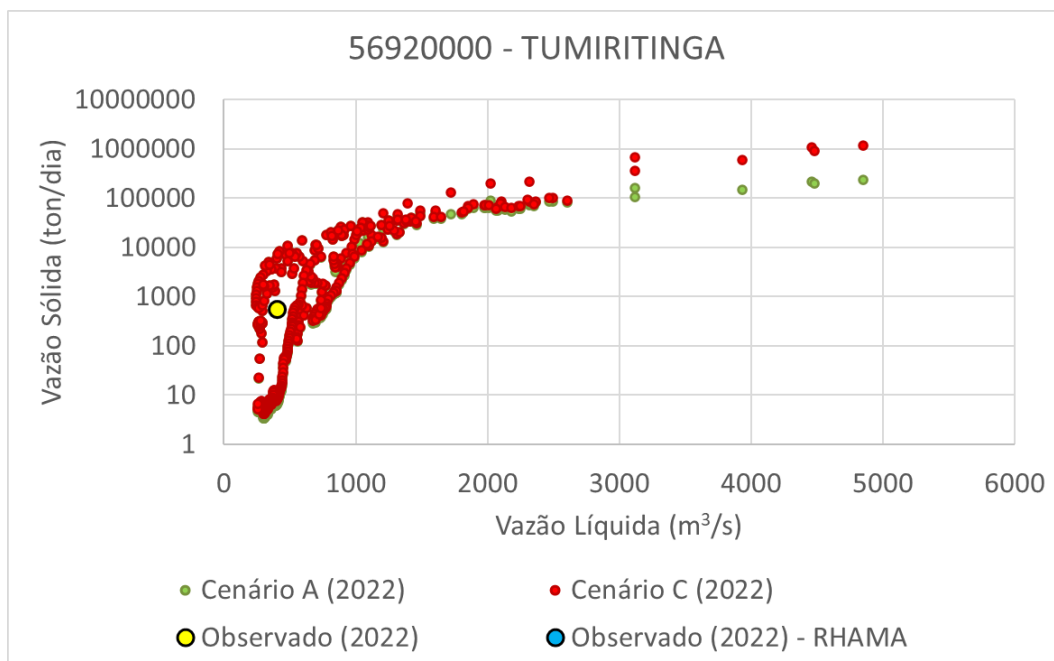


Figura 208. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56920000 (Tumiritinga) no ano de 2022.

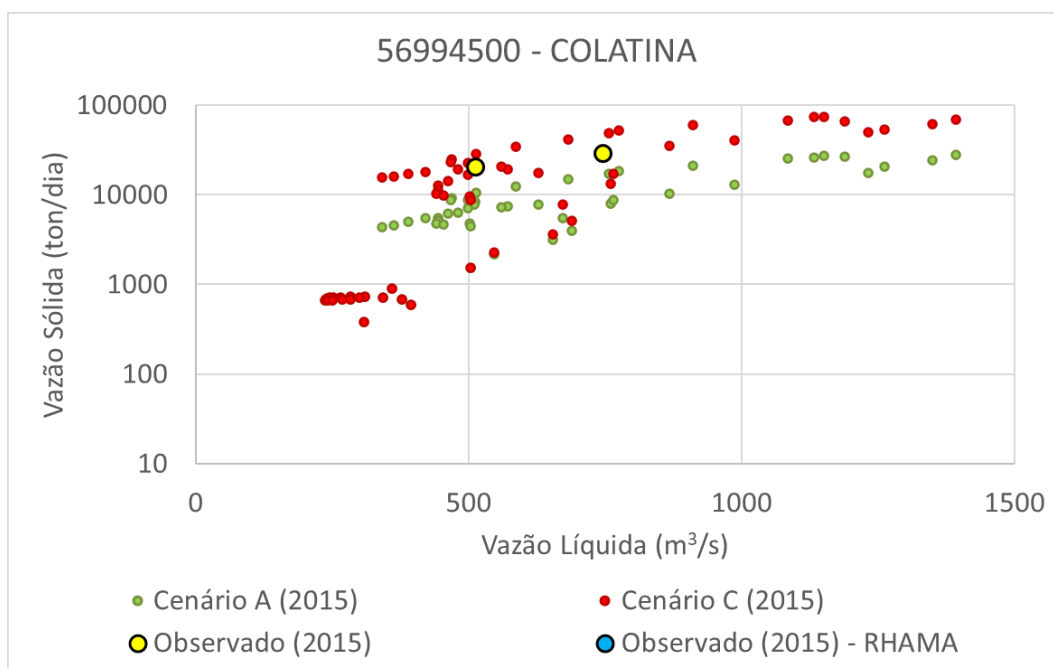


Figura 209. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56994500 (Colatina) no período de 01/11/2015 a 31/12/2015.

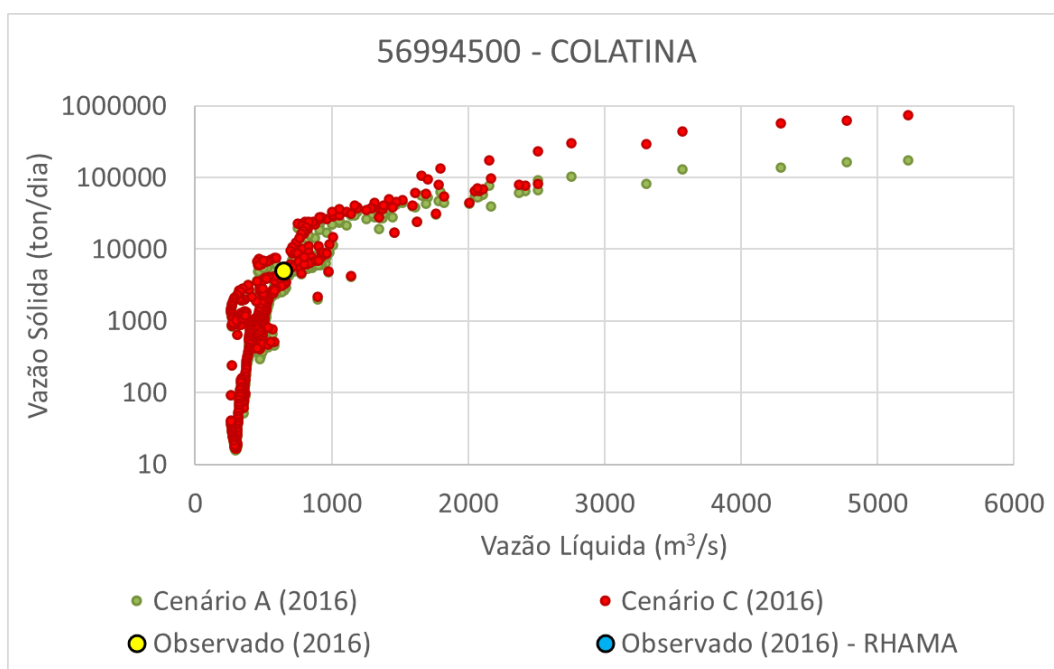


Figura 210. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56994500 (Colatina) no ano de 2016.

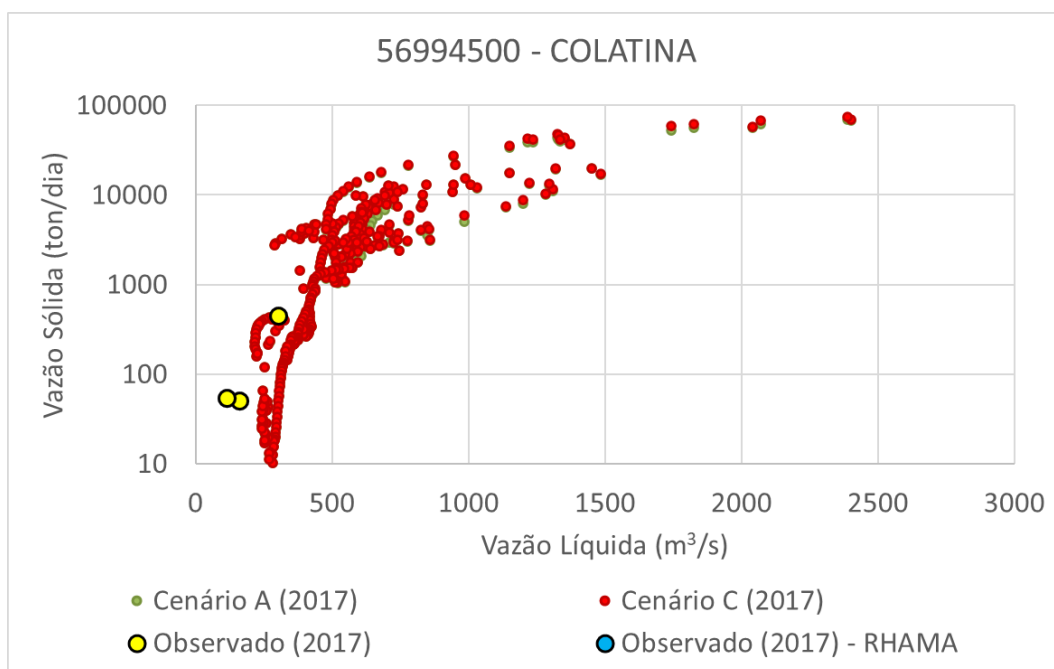


Figura 211. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56994500 (Colatina) no ano de 2017.

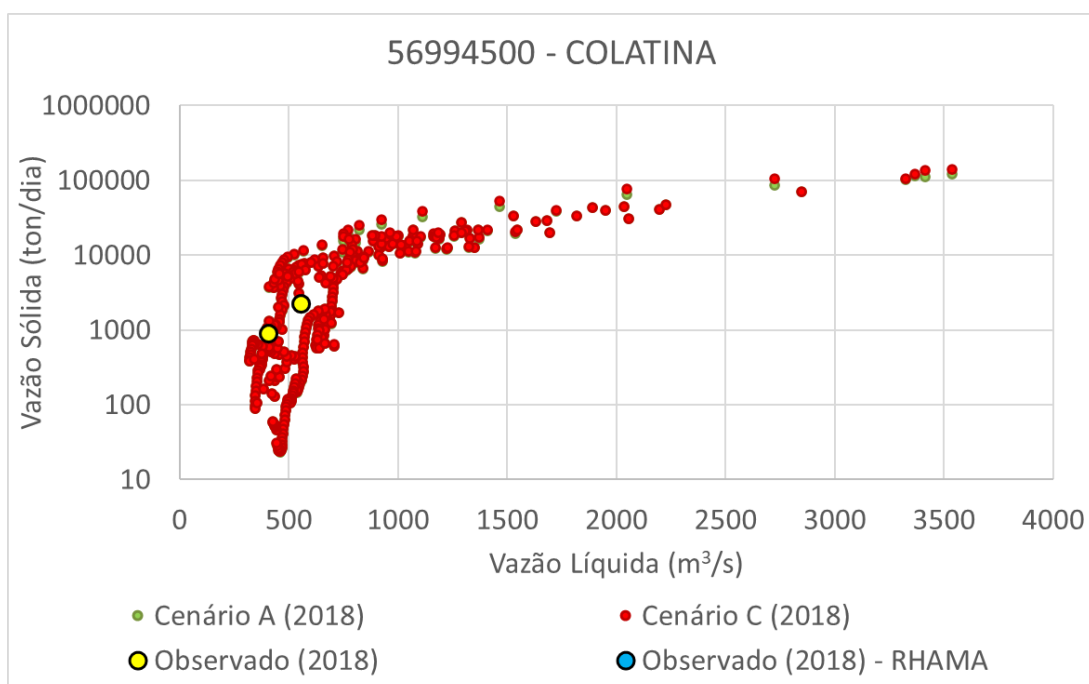


Figura 212. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56994500 (Colatina) no ano de 2018.

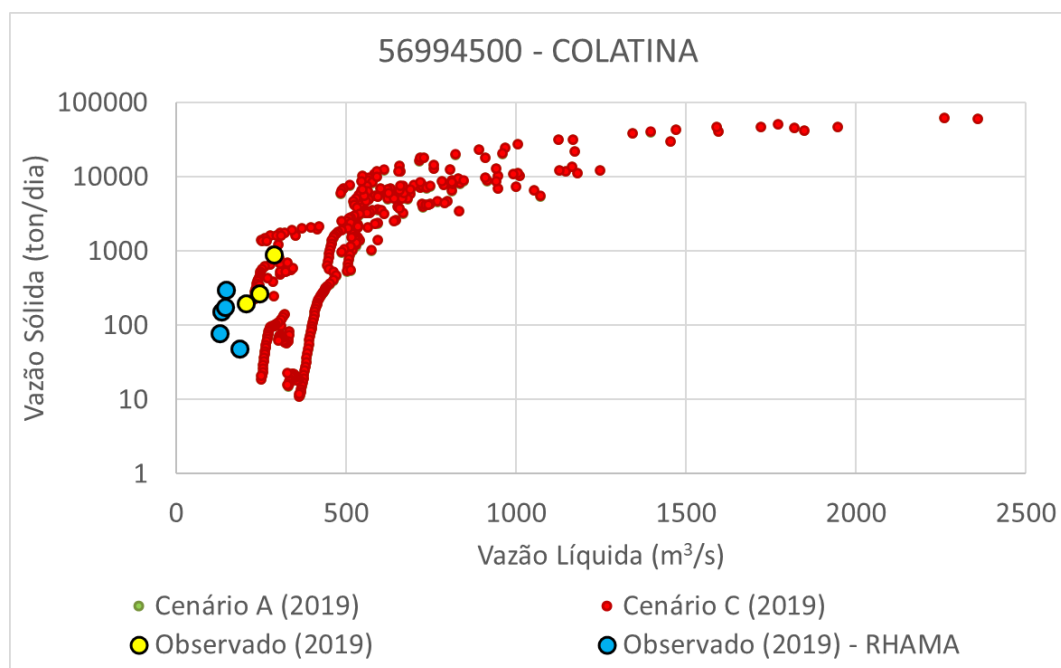


Figura 213. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56994500 (Colatina) no ano de 2019.

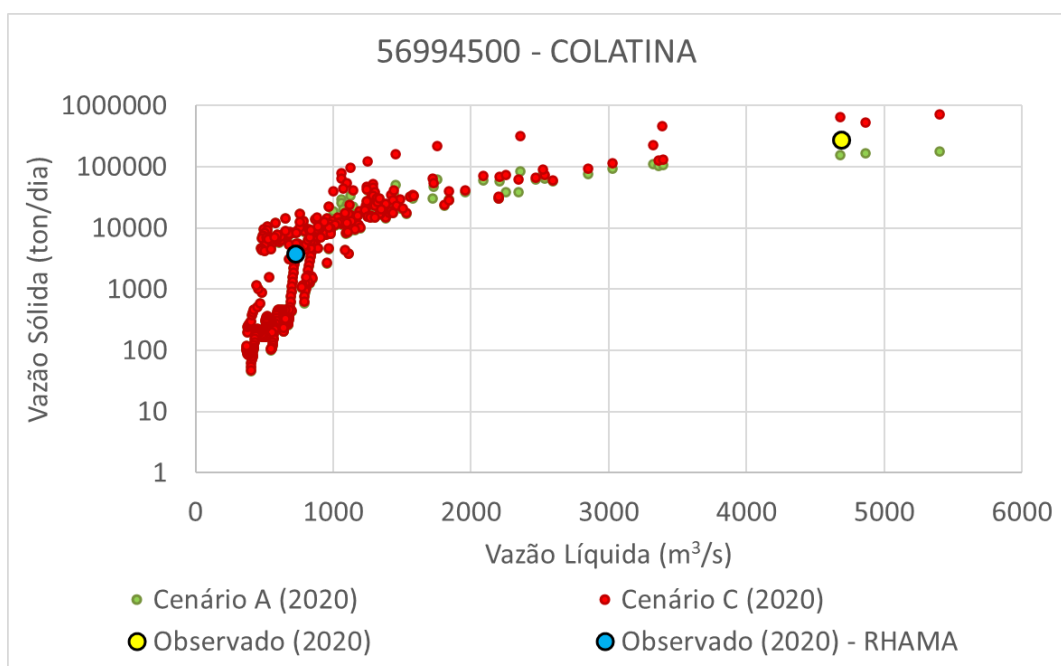


Figura 214. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56994500 (Colatina) no ano de 2020.

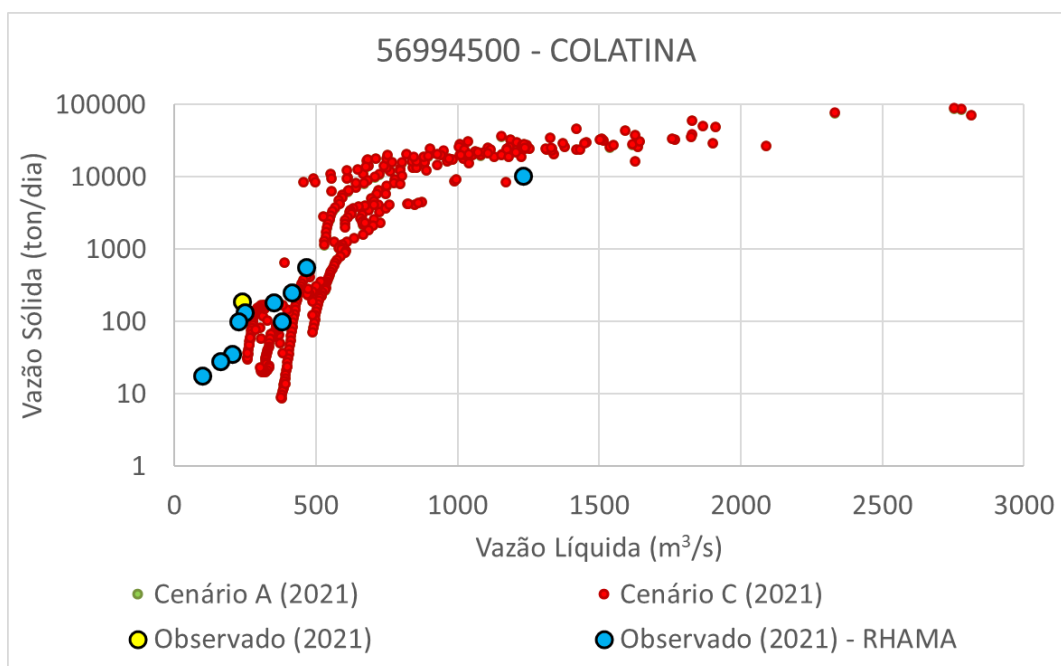


Figura 215. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56994500 (Colatina) no ano de 2021.

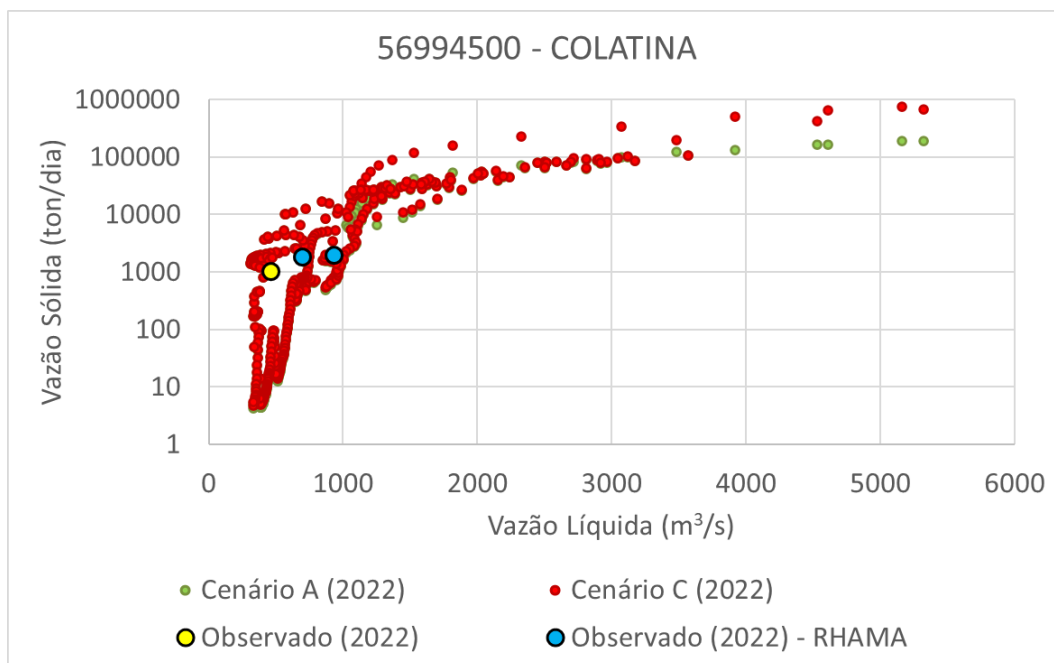


Figura 216. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação 56994500 (Colatina) no ano de 2022.

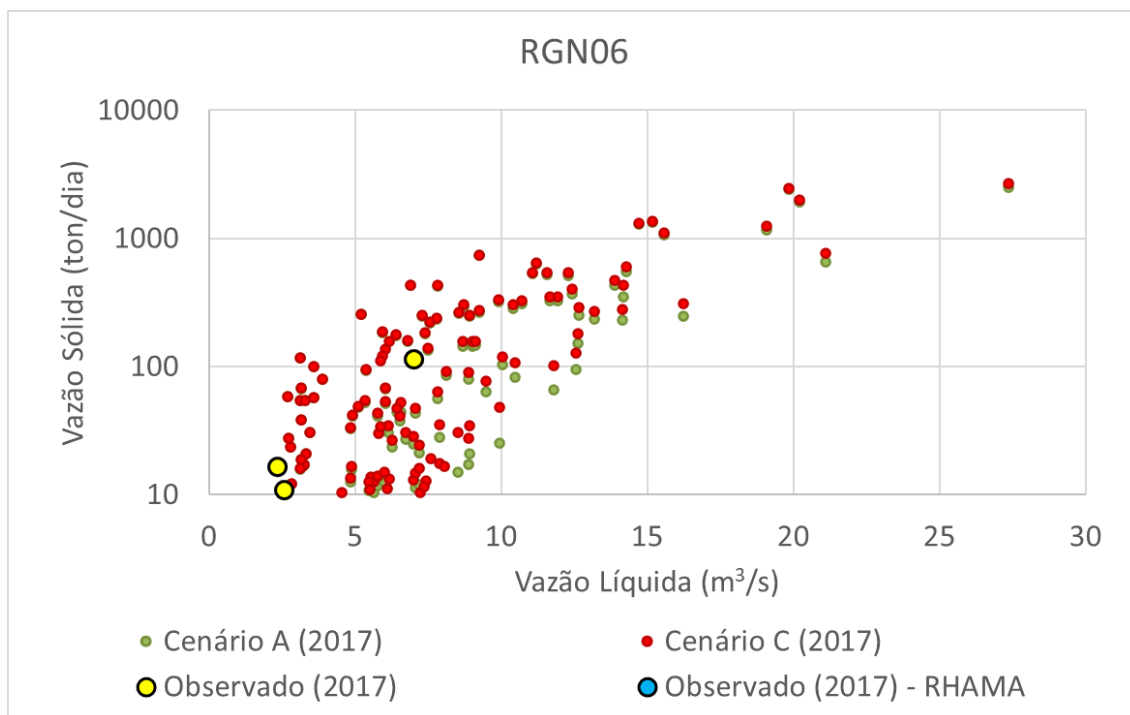


Figura 217. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RGN06 no ano de 2017.

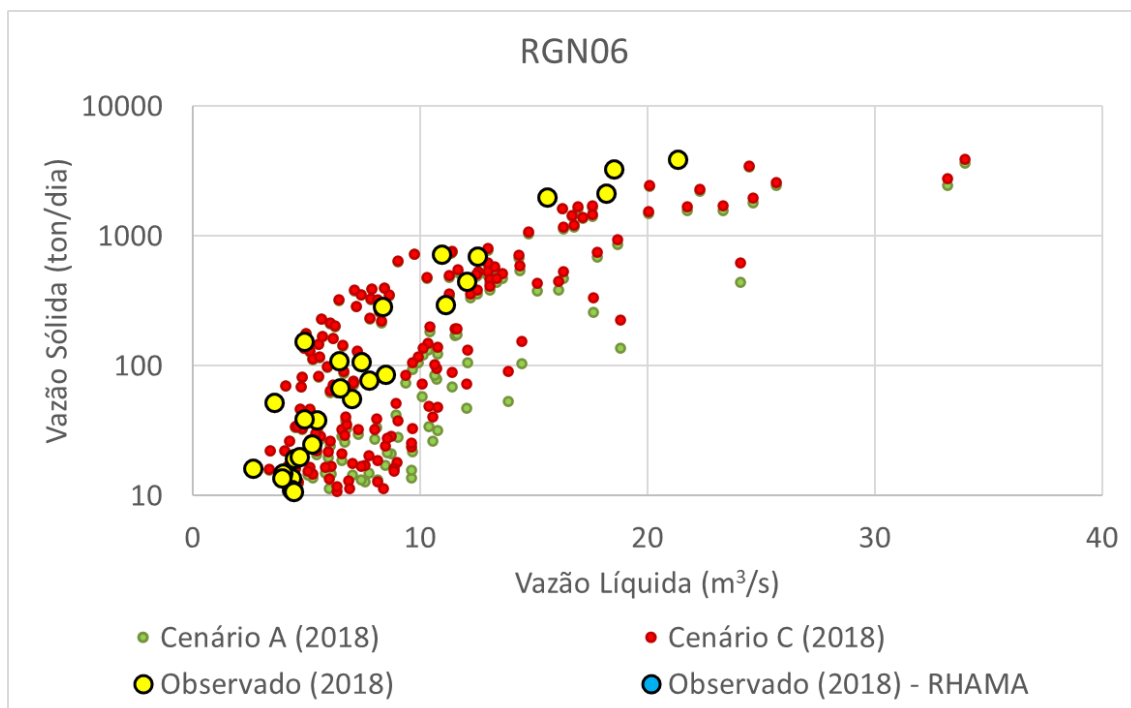


Figura 218. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RGN06 no ano de 2018.

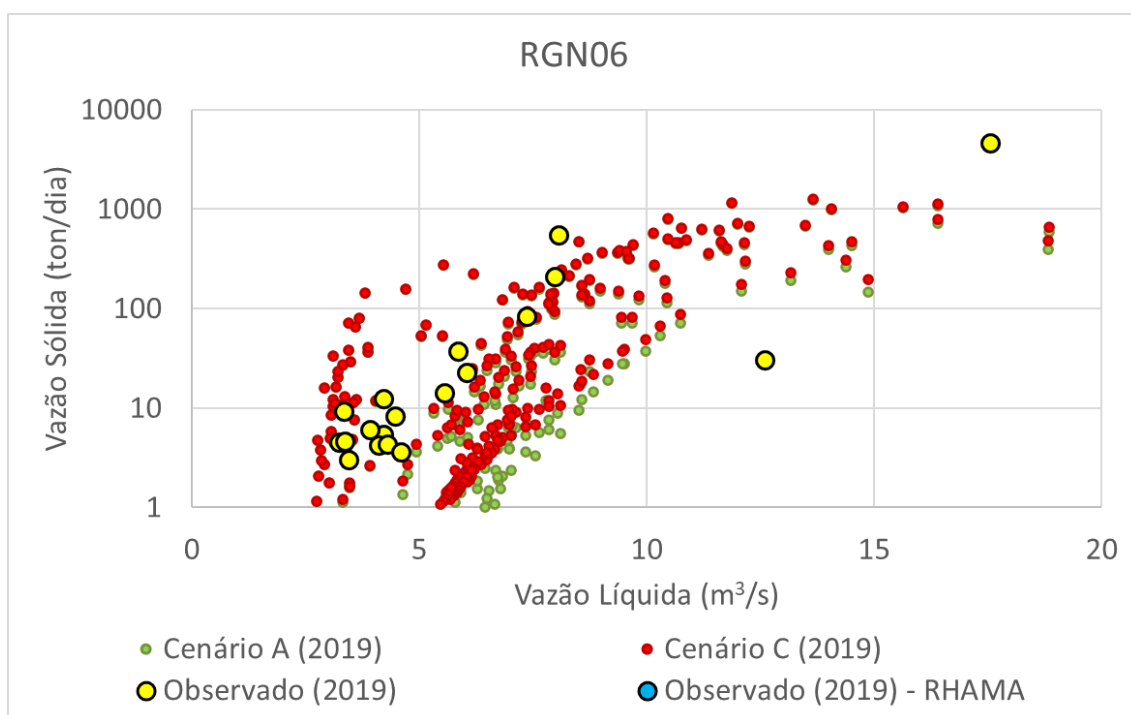


Figura 219. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RGN06 no ano de 2019.

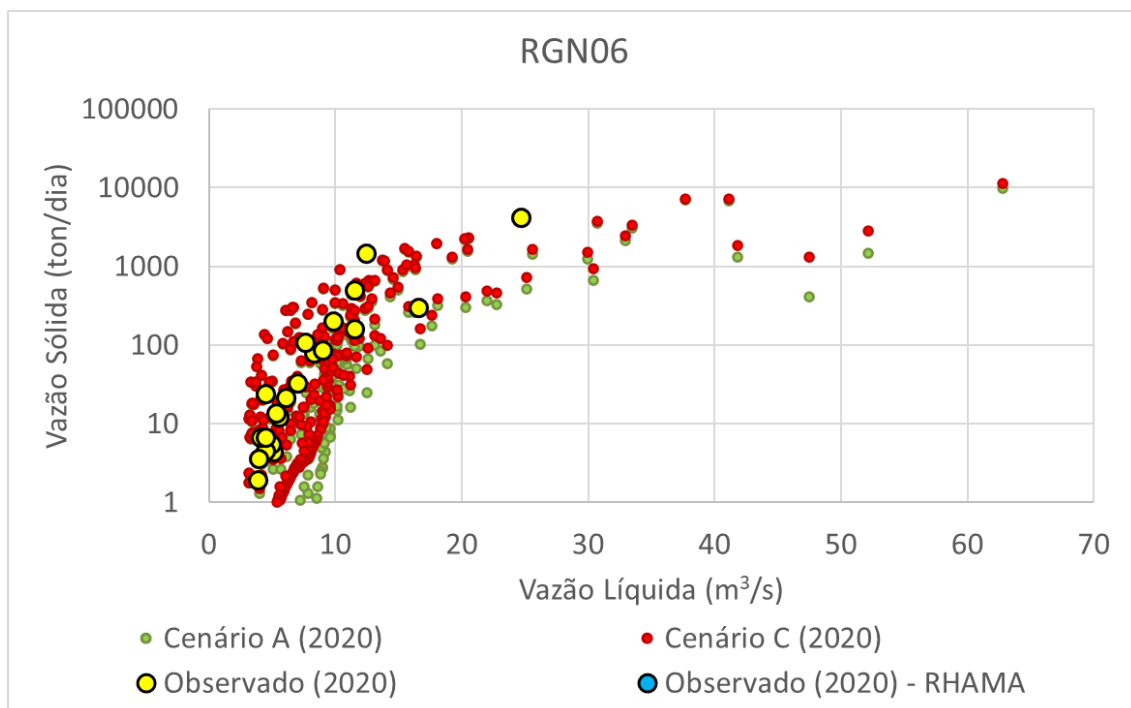


Figura 220. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RGN06 no ano de 2020.

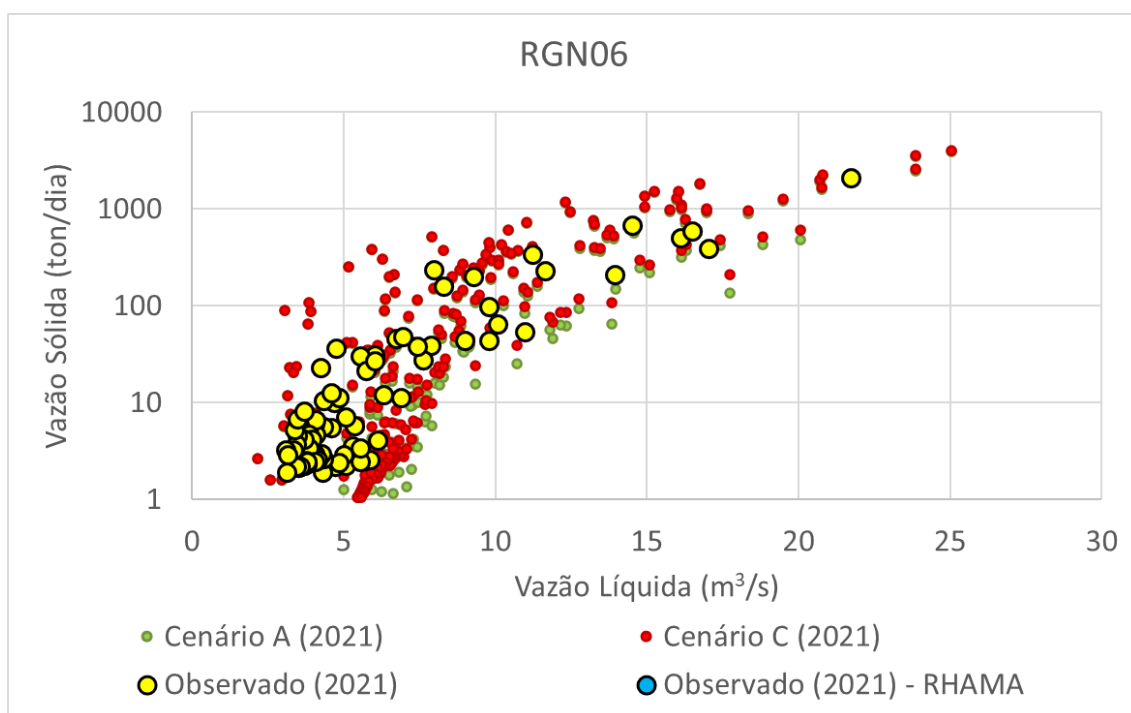


Figura 221. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RGN06 no ano de 2021.

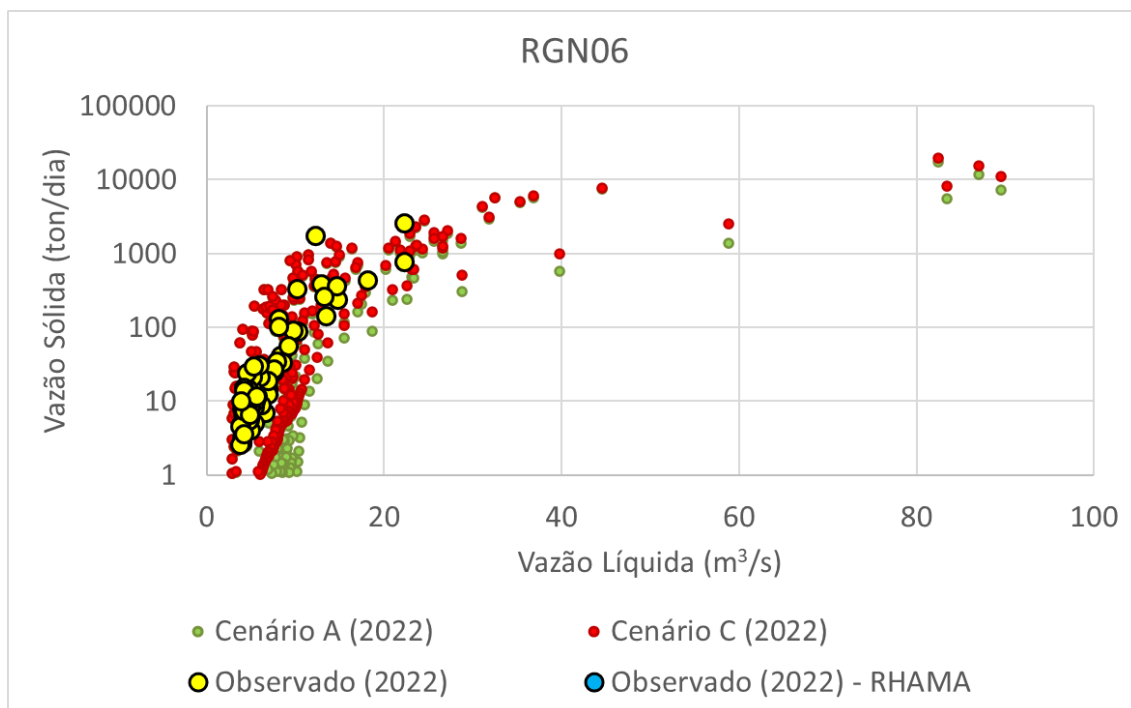


Figura 222. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RGN06 no ano de 2022.

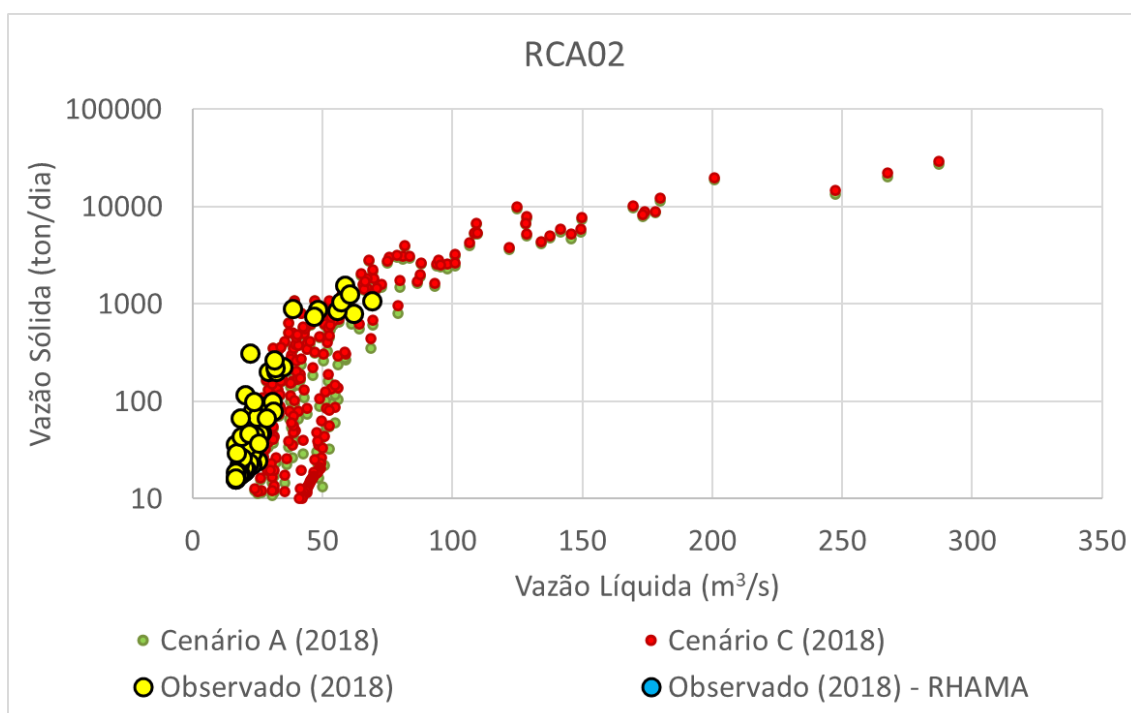


Figura 223. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RCA02 no ano de 2018.

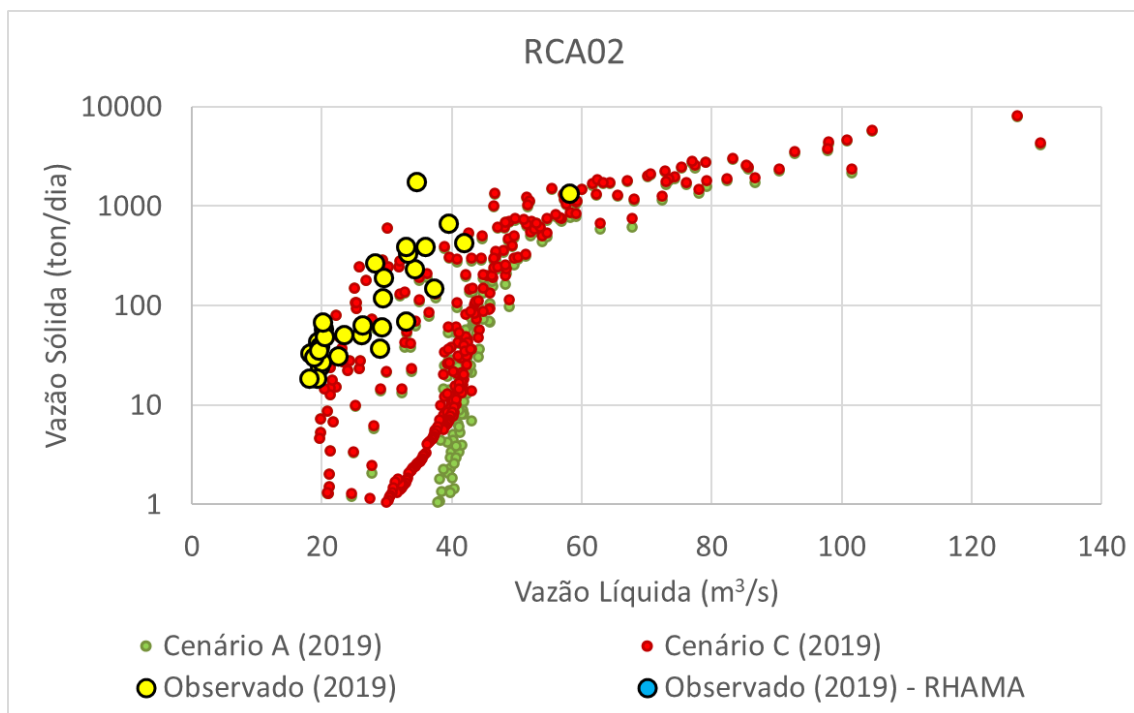


Figura 224. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RCA02 no ano de 2019.

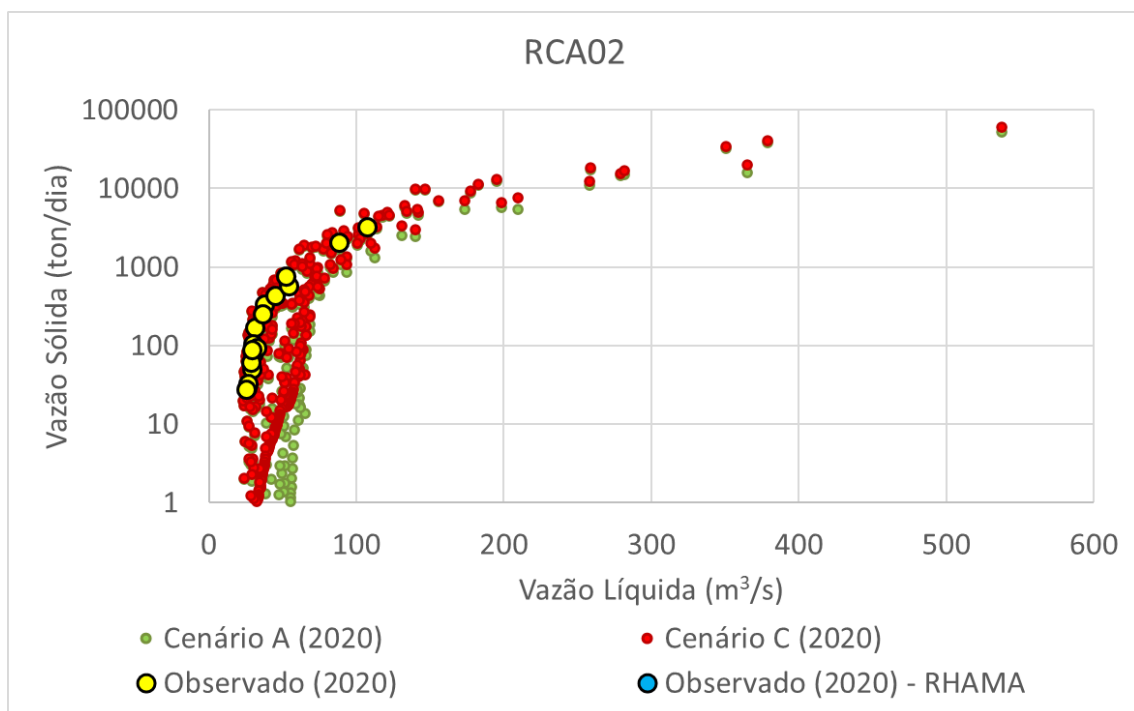


Figura 225. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RCA02 no ano de 2020.

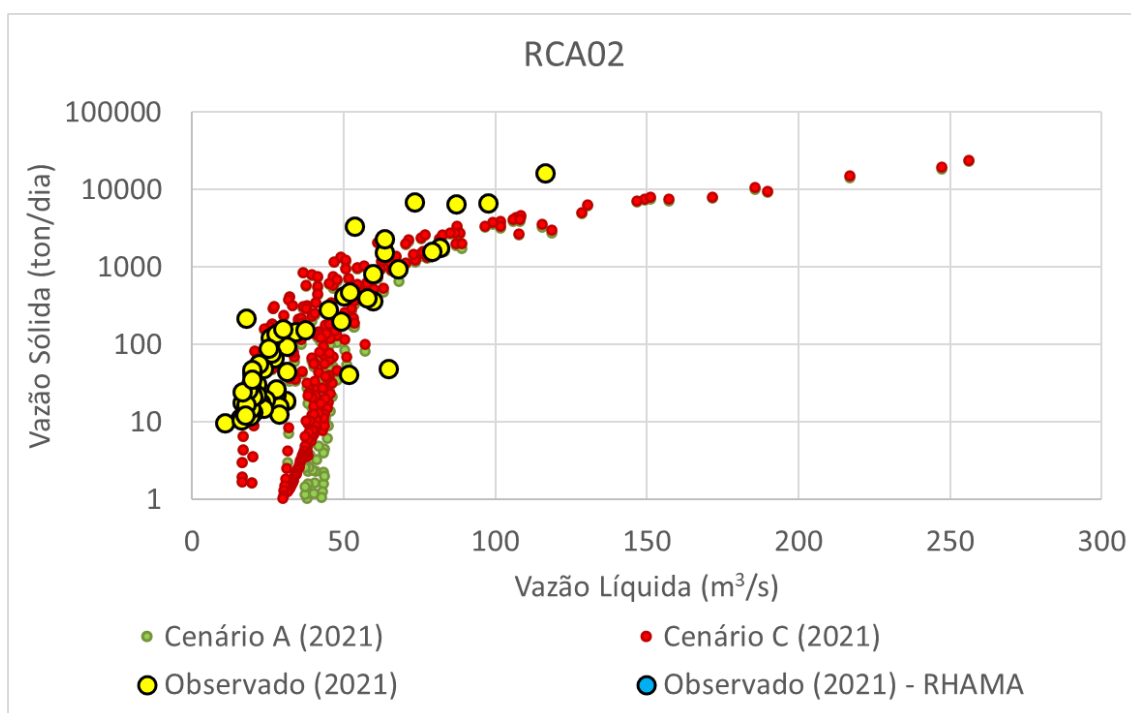


Figura 226. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RCA02 no ano de 2021.

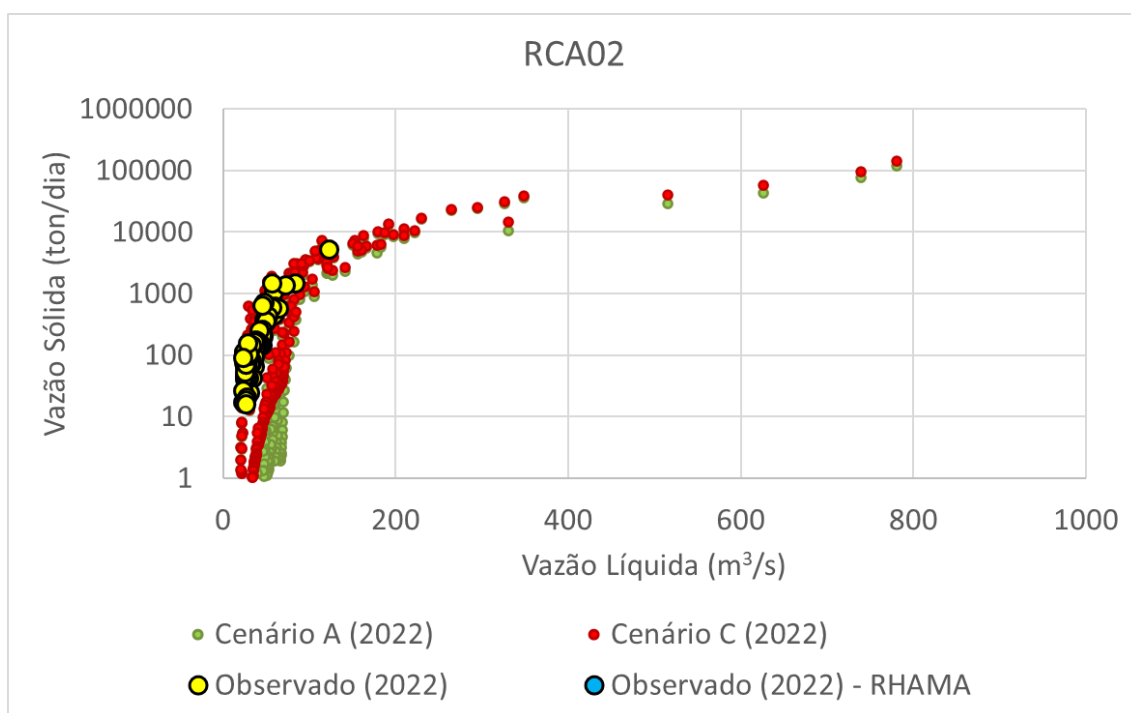


Figura 227. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RCA02 no ano de 2022.

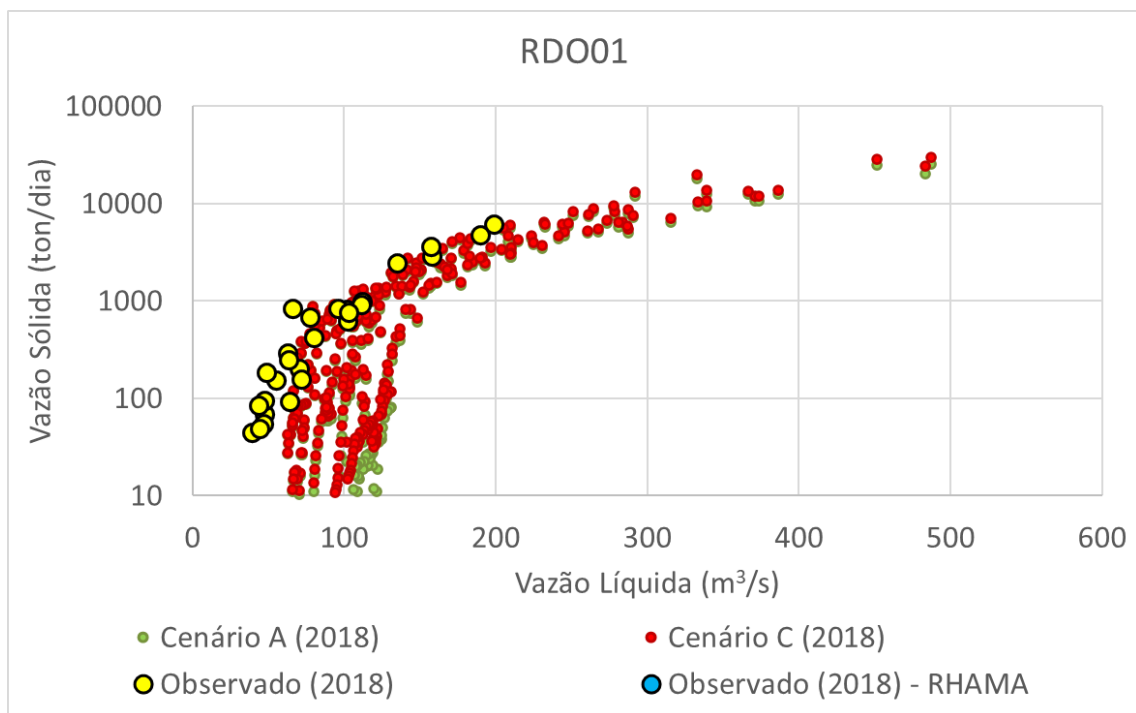


Figura 228. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RDO01 no ano de 2018.

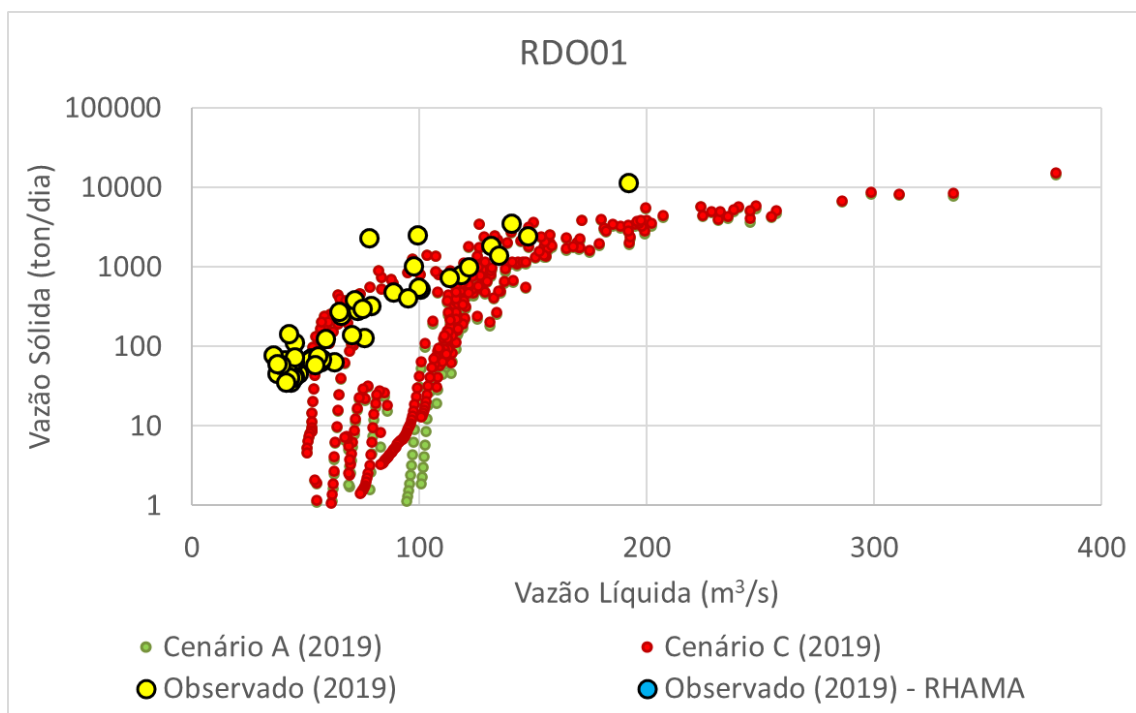


Figura 229. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RDO01 no ano de 2019.

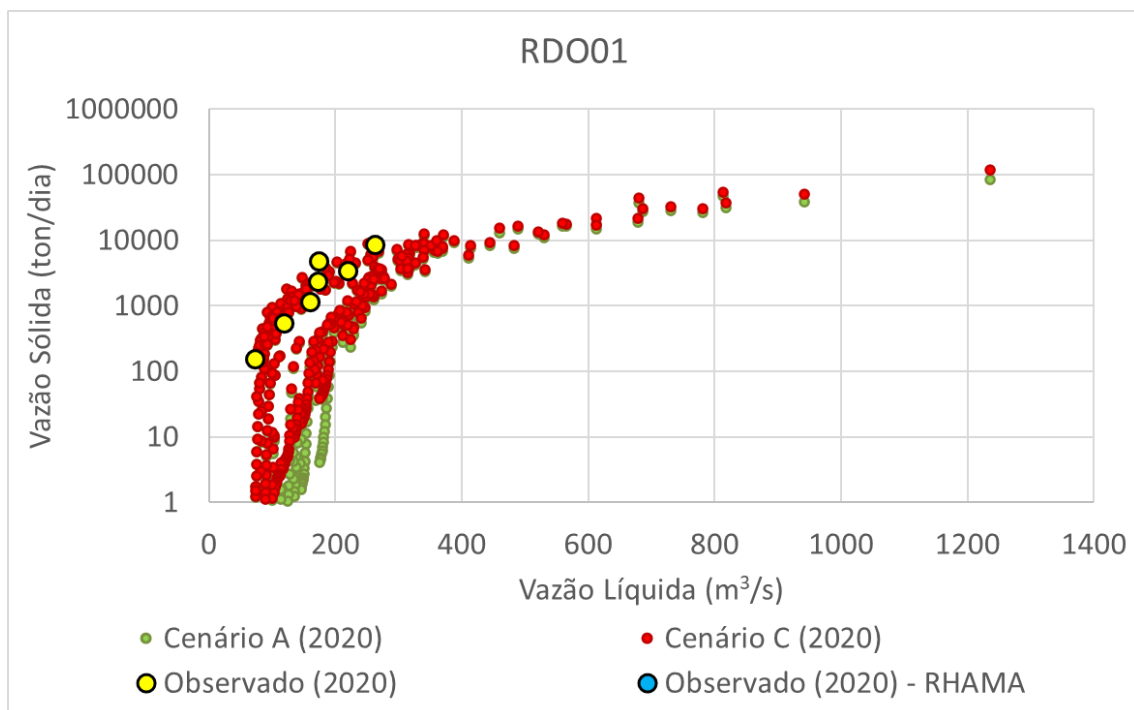


Figura 230. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RDO01 no ano de 2020.

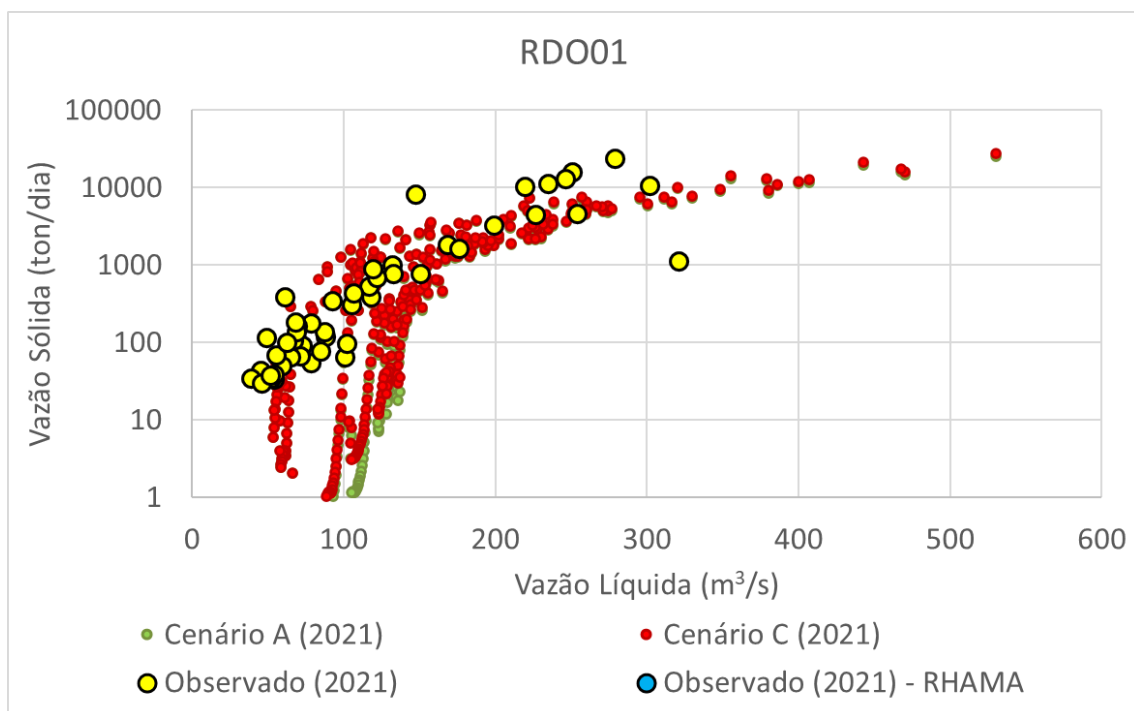


Figura 231. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RDO01 no ano de 2018.

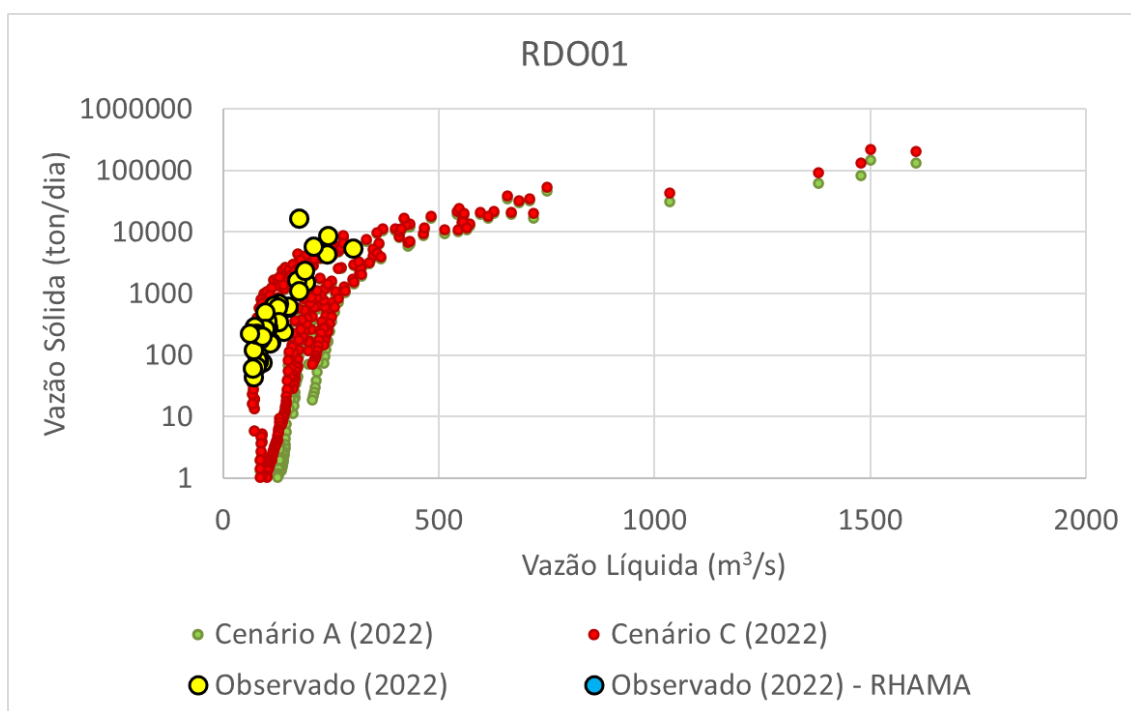


Figura 232. Curvas de vazão líquida e vazão sólida simuladas para os cenários A e C na estação RDO01 no ano de 2018.



rhama-analysis.com
contato@rhama-analysis.com