



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
CURSO DE ENGENHARIA HÍDRICA



VINÍCIUS SANTANNA CASTIGLIO

**ANÁLISE DO EFEITO DA PRESENÇA DE SEDIMENTOS NA INUNDAÇÃO DE
JANEIRO DE 2017 NO MUNICÍPIO DE ROLANTE/RS**

Porto Alegre
Mai de 2022

VINÍCIUS SANTANNA CASTIGLIO

ANÁLISE DO EFEITO DA PRESENÇA DE SEDIMENTOS NA INUNDAÇÃO DE
JANEIRO DE 2017 NO MUNICÍPIO DE ROLANTE/RS

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
como requisito parcial para a obtenção do título de
Engenheiro Hídrico.

Orientador: Gean Paulo Michel
Coorientadora: Marina Refatti Fagundes

Porto Alegre
Maio de 2022

CIP - Catalogação na Publicação

Santanna Castiglio, Vinicius
ANÁLISE DO EFEITO DA PRESENÇA DE SEDIMENTOS NA
INUNDAÇÃO DE JANEIRO DE 2017 NO MUNICÍPIO DE
ROLANTE/RS / Vinicius Santanna Castiglio. -- 2022.
98 f.
Orientador: Gean Paulo Michel.

Coorientadora: Marina Refatti Fagundes.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Hídrica,
Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Modelo hidrodinâmico. 2. Fluidos
Não-Newtonianos. 3. Reconstrução de eventos de
inundação. I. Paulo Michel, Gean, orient. II. Refatti
Fagundes, Marina, coorient. III. Título.

Vinícius Santanna Castiglio

ANÁLISE DO EFEITO DA PRESENÇA DE SEDIMENTOS NA INUNDAÇÃO DE
JANEIRO DE 2017 NO MUNICÍPIO DE ROLANTE/RS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à obtenção do
título de bacharel em Engenharia Hídrica do
Instituto de Pesquisas Hidráulicas da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Gean Paulo Michel

Aprovado em:Porto Alegre,13 de maio de 2022.

BANCA EXAMINADORA:

Dr. Gean Paulo Michel
Professor PPGRHSA IPH - UFRGS

Msc. Leonardo Rodolfo Paul
Bolsista de Doutorado IPH- UFRGS

Msc. Mel Oliveira Guirro
Bolsista de Doutorado Department of Geography – Durham University/UK

Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva
Professor PPGRHSA IPH - UFRGS

Dedico este trabalho à minha mãe Simone e
minha vó Cibila pelo imenso amor, carinho e
dedicação ao longo desses anos.

AGRADECIMENTOS

À educação pública, gratuita e de qualidade fornecida pela UFRGS e o IPH durante toda a minha formação.

À toda a equipe e aos amigos do GPDEN que me abriram as portas para a iniciação científica e para a pesquisa.

À equipe e aos amigos da Água e Solo que permitiram eu me desenvolver como profissional de engenharia hídrica.

Ao meu orientador Gean e a minha coorientadora Marina, por todo o apoio e conhecimentos transmitidos no desenvolvimento desse trabalho.

À banca examinadora, Leonardo, Mel e Rodrigo por terem aceitado o convite e pelas contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

À equipe de campo, Bruno, Pedro e Rafael, que me acompanharam na realização do levantamento topográfico desse trabalho.

À minha namorada Gisele pela compreensão e por todo o apoio dado durante esse período.

Aos meus familiares e amigos que me apoiaram e estiveram ao meu lado durante essa trajetória. Em especial ao meu irmão Guilherme, por todos os ensinamentos e conselhos passados, e ao meu pai Eduardo e meu padrasto Vitor, por todo o carinho e apoio durante esse período.

RESUMO

A análise e representação de eventos de inundação são frequentemente realizados considerando fluídos com concentração nula de sedimentos, mesmo em episódios no qual o fluído possui uma elevada carga de sedimentos. Essa simplificação pode trazer incertezas nos resultados. Nesse contexto, esse trabalho buscou avaliar a influência dos sedimentos na inundação ocorrida no município de Rolante/RS no ano de 2017. Nesse evento, a ocorrência de uma elevada precipitação nas cabeceiras da bacia hidrográfica do rio Rolante resultou em um transporte considerável de sedimentos, podendo ter influenciado na intensidade do evento de inundação ocorrido no município de Rolante/RS. Dessa forma, a fim de analisar o evento ocorrido, foram realizadas simulações hidrodinâmicas com o modelo HEC-RAS, versão 6.0, variando a concentração de sedimentos em cada uma das simulações. Foram considerados os cenários com concentração de sedimentos nula até a concentração de sedimentos de 28 %. Também, foi avaliado o impacto dos sedimentos na mancha máxima de inundação. Além disso, buscou-se avaliar qual a concentração de sedimentos das simulações hidrodinâmicas que apresentaram um melhor resultado quando comparado com os pontos de inundação máxima observados no evento de 2017. As análises dos resultados foram realizadas com a ferramenta TAUDEM, sendo definida, através de caminhos preferenciais do Modelo Digital de Terreno, a distância mínima por Pitágoras entre cada uma das manchas máximas de inundação simulada até os pontos de inundação observados no evento. Como resultado foi identificado que a máxima mancha de inundação do cenário com concentração de 19 % de sedimentos apresentou as menores distâncias aos pontos observados. Em contrapartida, as simulações com 0 %, 4 %, 27 % e 28 % apresentaram os piores resultados na comparação entre as outras simulações. Além disso, foi identificado um aumento considerável na mancha de inundação quando acrescido sedimentos no fluído, tendo uma área 24 % maior entre o modelo com concentração de sedimentos nula, menor área inundada, e o modelo com concentração de 27 %, maior área inundada. Também, o cenário com concentração nula apresentou uma área 10 % menor que o cenário com concentração de 19 %.

Palavras-chave: Modelo hidrodinâmico, fluídos Não-Newtonianos, Reconstrução de eventos de inundação.

ABSTRACT

The analysis and representation of flood events are often performed considering fluids with no sediment concentration, even in the case where the fluid has a high sediment load. This simplification can bring uncertainties. In this context, this study aimed to evaluate the influence of sediments on the flooding that occurred in the municipality of Rolante/RS in 2017. In this event, the occurrence of a heavy precipitation in the headwaters of the hydrographic basin of the Rolante River resulted in a high sediment, which may have influenced the intensity of the flood event that occurred in the municipality of Rolante/RS. Thus, to analyze the event, hydrodynamic simulations were carried out with the HEC-RAS model, version 6.0, varying the sediment concentration in each of the simulations. Scenarios with zero sediment concentration up to a sediment concentration of 28 % were considered. Also, the impact of sediments on the maximum flood extent was evaluated. In addition, we evaluated which sediment concentration of the hydrodynamic simulations presented a better result when compared to the maximum flood points observed in the 2017 event. The analysis of the results was carried out with the TAUDEM tool, in which the minimum distance between each of the maximum simulated flood extent to the flood points observed in the event was defined by Pythagoras through Digital Terrain Model preferential paths. As a result, it was identified that the maximum flood extent of the 19 % sediment concentration scenario presented the smallest distance to the observed points. On the other hand, the simulations with 0 %, 4 %, 27 % and 28 % presented the worst results when compared with the other simulations. In addition, a considerable increase in the flood extent was identified when sediments were added to the fluid, with an area 24 % greater between the model with zero sediment concentration, smaller inundated area, and the model with 27 % concentration, greater inundated area. Also, the scenario with zero sediment concentration presented an area 10 % smaller than the scenario with 19 % concentration.

Keywords: Hydrodynamic Model, Non-Newtonian fluid, Reconstruction of Flood Event.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo hidrossedimentológico simplificado.....	19
Figura 2. Propriedades do fluído pela concentração de sedimentos.....	24
Figura 3. Classificação conceitual dos tipos de desastres hidrológicos.....	25
Figura 4. Relação entre a tensão cisalhante e a porcentagem de sedimentos.....	26
Figura 5. Curva de tensão cisalhante por deformação.....	27
Figura 6. Processos ocorridos no evento do Alto do Vale do Itajaí.	32
Figura 7. Fluxograma do trabalho.	39
Figura 8. Área de estudo na bacia hidrográfica do rio Rolante.	40
Figura 9. Perfil longitudinal do rio Rolante na área de estudo.	41
Figura 10. Classificação de solos na bacia hidrográfica do rio Rolante.....	42
Figura 11. Classificação morfológica na bacia hidrográfica do rio Rolante.	43
Figura 12. Pontos de inundação coletados e mancha de inundação gerado pelo modelo HAND.....	44
Figura 13. Registro fotográfico aéreo da inundação.....	45
Figura 14. Registro fotográfico do sedimento depositado após a inundação.	46
Figura 15. Registro fotográfico fluxo no rio Rolante após a inundação do dia 05/07/2017. ...	46
Figura 16. Registro fotográfico área inundada no evento.	46
Figura 17. Escorregamentos na parcela do médio rio Mascarada: a) Situação anterior ao evento, b) situação posterior ao evento.	47
Figura 18. Registro fotográfico das cicatrizes de escorregamento.....	47
Figura 19. Seções transversais levantadas.....	49
Figura 20. Base coletora do RTK.	50
Figura 21. Rover para coleta dos pontos.	50
Figura 22. Estação Total.....	50
Figura 23. Bastão e Prisma.....	50
Figura 24. Levantamento Topográfico Seção P2.....	51
Figura 25. Levantamento Topográfico Seção P4.....	51
Figura 26. Levantamento Topográfico Seção P9.....	51
Figura 27. Levantamento Topográfico Seção P14.....	51
Figura 28. Estrutura – Ponte.....	52
Figura 29. Estrutura – Ponte 2.....	52
Figura 30. Fluxograma da modelagem Chuva-Vazão.....	53

Figura 31. Hidrograma confluência Arroio Riozinho e rio Mascarada com cenário 3Q e 4Q representando a distribuição de Huff (1990) no terceiro e no quarto quartil, respectivamente.	54
Figura 32. Condição de contorno do modelo hidrodinâmico e pontos de análise.....	56
Figura 33. Gráfico e equação da relação entre Tensão Cisalhante inicial e Concentração de Sedimentos.	59
Figura 34. Gráfico e equação da relação entre Viscosidade Dinâmica e Concentração de Sedimentos.	59
Figura 35. Representação dos métodos <i>D-Infinity Distance</i> : a) Down; b) <i>Down Inverso</i>	61
Figura 36. Modelo Iterativo <i>D-Infinity Distance Down</i>	62
Figura 37. Perfil transversal da seção PF10	65
Figura 38. Registros fotográficos da seção PF10 - Margem Esquerda	65
Figura 39. Registros fotográficos da seção PF10 -Vista jusante e Margem Direita.....	65
Figura 40. Perfil transversal da PF2	66
Figura 41. Registros fotográficos da seção PF2 - Margem Esquerda	66
Figura 42. Registros fotográficos da seção PF2 - Margem Direita	66
Figura 43. Modelo Digital de terreno: original e calha do rio Rolante.	67
Figura 44. Uso e Cobertura do Solo utilizado no modelo hidrodinâmico.....	68
Figura 45. Perfil Ponte 1.....	69
Figura 46. Perfil Ponte 2.....	69
Figura 47. Área inundada máxima para diferentes concentrações de sedimentos: a) Sem concentração; b) Concentração de 4 %; c) concentração 10 %; d) concentração 14 %; e) concentração 19 %; f) concentração 22,1 %; g) concentração 25 %; h) concentração 26 %; i) concentração 27 %; j) concentração 28 %.....	70
Figura 48. Relação da área inundada com a concentração de sedimentos.	71
Figura 49. Relação da profundidade pelo tempo: a) Ponto de Montante; b) Ponto de Jusante.	73
Figura 50. Relação da velocidade pelo tempo: a) Ponto de Montante; b) Ponto de Jusante....	73
Figura 51. Relação entre as manchas máximas de inundação com os pontos de inundação observados no evento.	74
Figura 52. Perfil transversal da PF1	87
Figura 53. Registros fotográficos da seção PF1 - Margem Esquerda	87
Figura 54. Registros fotográficos da seção PF1 - Margem Direita	87
Figura 55. Perfil transversal da PF3	88

Figura 56. Registros fotográficos da seção PF3 - Margem Esquerda	88
Figura 57. Registros fotográficos da seção PF3 - Margem Direita	88
Figura 58. Perfil transversal da PF4	89
Figura 59. Registros fotográficos da seção PF4 - Margem Esquerda	89
Figura 60. Registros fotográficos da seção PF4 - Margem Direita	89
Figura 61. Perfil transversal da PF5	90
Figura 62. Registros fotográficos da seção PF5 - Margem Esquerda	90
Figura 63. Registros fotográficos da seção PF5 - Margem Direita	90
Figura 64. Perfil transversal da PF6	91
Figura 65. Registros fotográficos da seção PF6 - Margem Esquerda	91
Figura 66. Registros fotográficos da seção PF6 - Margem Direita	91
Figura 67. Perfil transversal da PF7	92
Figura 68. Registros fotográficos da seção PF7 - Margem Esquerda	92
Figura 69. Registros fotográficos da seção PF7 - Margem Direita	92
Figura 70. Perfil transversal da PF8	93
Figura 71. Registros fotográficos da seção PF8 - Margem Esquerda	93
Figura 72. Registros fotográficos da seção PF8 - Margem Direita	93
Figura 73. Perfil transversal da PF9	94
Figura 74. Registros fotográficos da seção PF9 - Margem Esquerda	94
Figura 75. Registros fotográficos da seção PF9 - Margem Direita	94
Figura 76. Perfil transversal da PF11	95
Figura 77. Registros fotográficos da seção PF11 - Margem Esquerda	95
Figura 78. Registros fotográficos da seção PF11 - Margem Direita	95
Figura 79. Perfil transversal da PF12	96
Figura 80. Registros fotográficos da seção PF12 - Margem Esquerda	96
Figura 81. Registros fotográficos da seção PF12 - Margem Direita	96
Figura 82. Perfil transversal da PF14	97
Figura 83. Registros fotográficos da seção PF14 - Margem Esquerda	97
Figura 84. Registros fotográficos da seção PF14 - Margem Direita	97
Figura 85. Perfil transversal da PF15	98
Figura 86. Registros fotográficos da seção PF15 - Margem Esquerda	98
Figura 87. Registros fotográficos da seção PF15 - Margem Direita	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Diferença entre escoamento turbulento e hiperconcentrado.....	29
Tabela 2. Valores de Manning conforme a <i>National Land Cover Database</i>	55
Tabela 3. Valores de tensão cisalhante inicial e viscosidade dinâmica para fluídos com diferentes concentrações de sedimentos definidos por Rickenmann (1991).....	58
Tabela 4. Valores de tensão cisalhante inicial e viscosidade dinâmica para fluídos com diferentes concentrações de sedimentos extrapolados exponencialmente dos dados de Rickenmann (1991).	59
Tabela 5. Pontos limítrofes observados na inundação de 2017.....	62
Tabela 6. Distância até a borda da mancha de inundação para diferentes concentrações de sedimentos.	75
Tabela 7. Distância até a borda da mancha de inundação para diferentes concentrações de sedimentos.	76

LISTA DE SIGLAS

CFA: Clima Subtropical Úmido

CIMNE: Centro Internacional de Métodos Numéricos em Ingeniería

CN: Curve Number

CNDH: Conselho Nacional dos Direitos Humanos

COBRADE: Classificação e Codificação Brasileira de Desastres

DRH: Departamento de Recursos Hídricos

GIS: Sistema de Informações Geográficas

GNSS: Sistema Global de Navegação por Satélite

GPDEN: Grupo de Pesquisas em Desastres Naturais

HAND: Height Above the Nearest Drainage

HEC-RAS: Hydrologic Engineering Center's -River Analysis System

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MAPGEO: Modelo de Ondulação Geoidal

MDT: Modelo Digital de Terreno

METROPLAN: Fundação Estadual de Planejamento Metropolitano e Regional

OLI: Operational Land Imager

PPP: Posicionamento por Ponto Preciso

RBMC: Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

RGB: Red, Green e Blue

RTK: Real Time Kinematic

SCS-CN: Soil Conservation Service – Curve Number

SEMA: Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do Estado do Rio Grande do Sul

SIRGAS: Sistema de Referência Geodésico das Américas

TAUDEM: Terrain Analysis Using Digital Elevation Models

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UTM: Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1. OBJETIVOS GERAIS	17
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1. ÁGUA E SEDIMENTOS	18
3.2. REOLOGIA	21
3.2.1. Escoamentos Newtonianos e Não-Newtonianos	22
3.2.2. Escoamentos com alta concentração de sedimentos	23
3.2.3. Representação de fluídos com alta concentração de sedimentos	26
3.3. RECONSTRUÇÃO DE EVENTOS DE INUNDAÇÃO	29
3.4. REGISTROS DE INUNDAÇÃO COM ALTA CARGA DE SEDIMENTOS NO BRASIL 31	
3.5. MODELAGEM HIDRODINÂMICA	34
3.6. HEC-RAS	35
3.7. CONSIDERAÇÕES	38
4. METODOLOGIA.....	39
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	40
4.2. INUNDAÇÃO DE 2017	43
4.3. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO	48
4.4. MODELO DIGITAL DE TERRENO	52
4.5. HIDROGRAMA	53
4.6. USO E COBERTURA DO SOLO.....	54
4.7. CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO.....	56
4.8. MODELAGEM HIDRODINÂMICA	57
4.9. ANÁLISE DOS RESULTADOS	60
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1. DADOS DE ENTRADA GERADOS	64
5.2. SIMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS.....	69

5.3. MANCHA DE INUNDAÇÃO DO EVENTO	74
6. CONCLUSÕES.....	78
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
8. APÊNDICE A	87

1. INTRODUÇÃO

Desastres naturais são assim definidos quando eventos naturais impactam uma determinada população ou sistema social, podendo ser classificados em biológico, geofísico, climatológico, hidrológico e meteorológico, dependendo a natureza do evento (SAITO, 2008). Kobiyama *et al* (2010) citam que desastres naturais relacionados com eventos extremos do ciclo hidrológico ainda podem ser divididos em movimentos de massas e inundações. Conforme dados de CRED (2022), desastres naturais envolvendo apenas eventos de inundação representaram mais da metade das ocorrências de desastres em escala mundial para o ano de 2021 e uma média de 163 eventos anuais entre 2001 e 2020.

Os resultados de desastres naturais se materializam sobre um sistema socioeconômico em um ambiente construído, estando, muitas vezes, esse sistema em áreas de perigo desaconselháveis para ocupação (MIGUEZ *et al.*, 2018). Da Silva *et al.* (2016) destacam que a ocupação irregular desses espaços é observado em praticamente todas as cidades brasileiras, tendo a maior parcela da população afetada um baixo poder aquisitivo e condições precárias de habitação.

Nesse contexto, regiões montanhosas comumente acabam sendo ocupadas, mesmo se caracterizando como áreas impróprias para construção de moradias. Essas áreas apresentam eventos intensos de precipitação, podendo ser consideradas áreas propícias para a ocorrência de eventos naturais extremos, como inundações bruscas e fluxo de detritos. Isso devido à declividade acentuada nas encostas, apresentando bacias hidrográficas com baixos tempos de concentração. Guirro (2020) também destaca que eventos rápidos como fluxo de detritos, fluxos hiperconcentrados e inundações bruscas apresentam maior poder destrutivo, difícil previsão e ocorrem principalmente em bacias montanhosas e pequenas.

Inundações em bacias montanhosas podem variar conforme a concentração de sedimentos no fluído e a sua distribuição granulométrica, podendo afetar o comportamento do fluxo e agravar a situação (LE BOUTEILLER *et al.*, 2021). Isso ocorre pela presença de sedimento no fluxo modificar as características do fluído pela interação entre o fluído e o material e entre o próprio material, escoamentos assim passam a ser considerados heterogêneos.

Muito em razão da dificuldade na caracterização do material transportado e por considerar desprezível a concentração de sedimentos no fluxo, a maior parte dos estudos de simulações hidrodinâmicas negligenciam a influência dos sedimentos no escoamento e tratam o fluído apenas como água com concentração nula de material. Contudo, eventos extremos de

inundação, em razão do material erodido e transportado, podem modificar a representação hidrodinâmica do fluido, sendo necessário avaliar o impacto do evento e o seu comportamento de maneira distinta de um fluxo de água.

Nesse contexto, podemos destacar a inundação ocorrida no município de Rolante/RS no ano de 2017, tendo sido observado um elevado número de cicatrizes e fluxos de massas durante o evento. Guirro (2020) reconstruiu o evento de 2017 analisando a hipótese de rompimento de barragens naturais durante o evento de inundação. Dessa forma, pode-se afirmar que a inundação ocorrida em Rolante possuía uma elevada carga de material em seu fluxo, podendo, até mesmo, ter influenciado nas características do fluido.

Modelos hidrodinâmicos são ferramentas importantes para a análise de estudos relacionados com recursos hídricos, sendo muito utilizado na quantificação, mapeamento e na previsão de eventos de cheia. Dentre tantas ferramentas utilizadas na modelagem hidrodinâmica, o HEC-RAS apresenta-se como um dos softwares mais utilizados e reconhecidos na área. Isso ocorre pelo fato de o software possuir livre acesso e atualizações constantes nas suas versões. A partir do HEC-RAS 6.0, foi implementado o módulo de fluidos Não-Newtonianos, sendo possível realizar modelagens hidrodinâmicas de fluidos com diferentes concentrações de sedimentos e analisar o seu efeito ao longo do seu escoamento (USACE, 2020).

Assim, tendo como base esse cenário, o trabalho proposto buscou identificar a influência de sedimentos na inundação de 2017 através de simulações hidrodinâmicas no software HEC-RAS 6.0. Para isso, foram relacionados os conhecimentos de hidrodinâmica e hidrossedimentologia, analisando como o sedimento impacta na hidrodinâmica em um evento de inundação.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

O trabalho tem como objetivo analisar o efeito da presença de sedimentos na propagação de ondas de cheia a partir de um modelo hidrodinâmico no software HEC-RAS, utilizando o estudo de caso da inundação ocorrida em janeiro de 2017 no município de Rolante/RS.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a sensibilidade do modelo a diferentes concentrações de sedimentos;
- Determinar a concentração de sedimentos que melhor descreve o comportamento do evento de 2017;
- Propor uma metodologia para avaliar o desempenho de modelos em mapear áreas inundadas a partir de pontos de inundação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os conceitos abordados na revisão bibliográfica buscam compreender as metodologias utilizadas durante o desenvolvimento desse trabalho. Dessa forma, a revisão bibliográfica apresentou os itens da relação água e sedimentos, reologia de fluídos, reconstrução de eventos de inundação, registros de inundação com a presença de sedimentos, modelagem hidrodinâmica e utilização do software HEC-RAS na modelagem hidrodinâmica.

3.1. ÁGUA E SEDIMENTOS

Dentro dos conceitos de hidrologia, o ciclo da água pode ser considerado o mais importante por representar a base de qualquer estudo hidrológico e como se relaciona as diferentes variáveis dentro do sistema. Collischonn e Dornelles (2015) destacam, que em escala global, o ciclo hidrológico pode ser considerado um sistema fechado; contudo, em escala regional, podem existir subciclos em que a precipitação e a evaporação de um sistema ocorram mais de uma vez antes da água retornar ao oceano.

Tucci (1993) cita que, paralelamente ao ciclo da água e totalmente dependente dele, existe o ciclo hidrossedimentológico, sendo dividido entre as etapas de erosão ou o desprendimento, o transporte e, por fim, a deposição do material. A hidrossedimentologia relaciona a interação entre a água e o sedimento, tendo como base os diferentes processos em suas respectivas áreas de estudos. Zanandrea (2020) cita que os conceitos hidrológicos de sedimentos, hidrossedimentologia e hidrogeomorfologia possuem diversas interfaces, por isso acabam por se confundir em situações específicas. A Figura 1 ilustra, de maneira simplificada, a ocorrência do ciclo hidrossedimentológico.

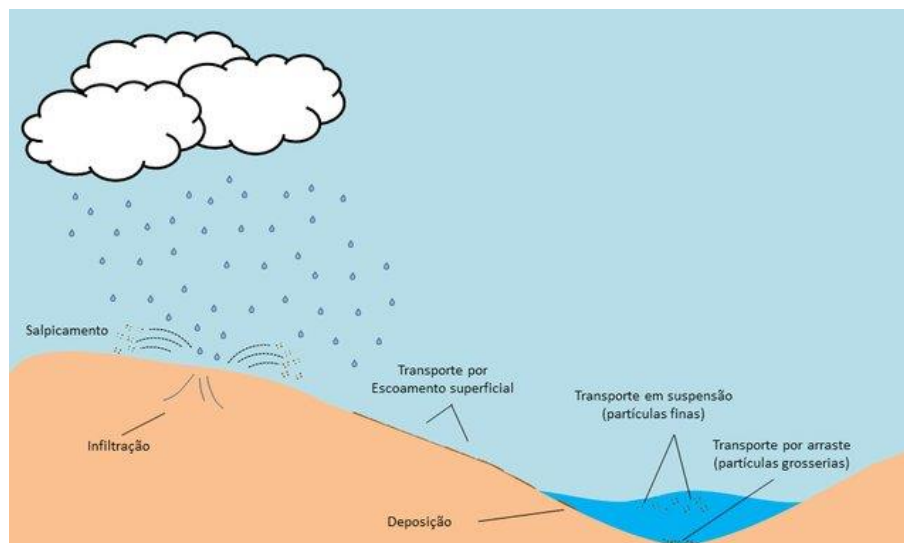


Figura 1. Ciclo hidrossedimentológico simplificado.
 Fonte: Adaptado de Dantas (2016)

A ocorrência da interação água e sedimentos está relacionada com o aumento ou diminuição da topografia de uma região, condições e propriedades do solo, práticas de manejo e uso do solo e cobertura vegetal (IRVEM, 2007). Em razão disso, torna-se essencial o conhecimento do uso do solo e da erosão na bacia, pois grande parte dos sedimentos presentes nos cursos d'água são originados pela ocorrência de erosão na bacia hidrográfica, nas margens e no próprio leito do rio (POLETO, 2019).

A erosão do solo pode ocorrer tanto pela ação do vento ou da água, dependendo da influência exercida, por eles, para a perda do solo. Contudo, a perda de solo está fortemente relacionada com a precipitação, muito por causa do impacto da gota da chuva como fator preponderante no desprendimento do solo e, também, pela sua relação na contribuição de escoamentos superficiais (MORGAN, 2005).

Ressalta-se ainda que o destacamento do solo não tem como consequência o transporte do material, isso está relacionado com o fator de erodibilidade do solo, ou seja, a resistência que o sedimento possui para ser transportado. Censi (2019) cita que o transporte de sedimentos consiste no processo de remoção das partículas destacadas do solo para além do seu lugar de origem, desde que haja energia suficiente para superar a inércia das partículas em estado de repouso.

A erosão hídrica, principalmente pluvial, é predominante no Brasil, ocorrendo com maior amplitude e intensidade em praticamente todo o território brasileiro (BERTOL, 2019). Os principais agentes externos responsáveis pelo desprendimento dos agregados são o impacto da chuva e o escoamento superficial (PRUSCKI, 2009). Em geral, pode-se afirmar que a complementação desses métodos auxilia na ocorrência de processos erosivos, isso porque o desprendimento do material, muitas vezes causado pelo salpicamento, não tem como

característica o transporte do material. Contudo, o salpicamento do material em conjunto com a erosão laminar, pode ter como consequência o desprendimento e transporte do sedimento.

Para a erosão laminar, o impacto da gota de chuva é o mais importante agente erosivo Foster (1985). Esse tipo de processo é o principal causador da erosão laminar, se caracterizando pela remoção de camadas da superfície do solo. Inicialmente a erosão laminar é quase imperceptível, sendo notada apenas com o decorrer do tempo pelo volume elevado de solo removido (PRUSCKI, 2009).

A erosão por sulcos é iniciada quando o escoamento superficial busca caminhos preferenciais, podendo, para isso, gerar micro canais. Conforme Morgam (2005), o escoamento principal cria um caminho secundário em razão da sua componente lateral, no qual os escoamentos superficiais se convergem e se intensificam. Em alguns casos, a erosão pode se dar de forma mais vultuosa quando os sulcos evoluem para ravinas e voçorocas de grande profundidade e largura (CENSI, 2019).

O desenvolvimento de ravinas depende do desenvolvimento de quatro fases do escoamento superficial: escoamento laminar, fluxo linear, microrravinas e microrravinas com cabeceiras (MORGAN, 2005; GUERRA, 2015). Processos erosivos mais avançados podem ter como consequência o desenvolvimento de voçorocas, podendo haver a ocorrência de instabilidade de taludes e processos de movimento de massa (PRUSKI, 2009).

Por fim, um importante processo erosivo é o movimento de massa. Maltman (1997), cita mais de 6 classificações para o movimento de massa propostos por Nemeç (1990), podendo ocorrer individualmente ou simultâneo cada um desses processos. Além disso, os sedimentos transportados para além do ponto de geração comumente alcançam cursos d'água em função da confluência determinada pelo relevo do terreno (CENSI, 2019). O volume de sedimentos transportados por movimento de massa para os rios é consideravelmente mais elevado quando comparado com os processos de erosão laminar, sulcos e voçorocas (MORGAN, 2005).

O transporte fluvial de sedimentos pode ocorrer próximo ao leito do canal ou em suspensão no fluxo. Porém, Carvalho (2000) destaca que a descarga sólida em suspensão representa a maior quantidade dos sedimentos transportados, podendo corresponder de 80 a 90% da descarga sólida total de sedimentos no fluxo. O material transportado no leito do canal é aquele no qual está em contato direto com o seu fundo, podendo ser carregado rolando, deslizando ou saltando. Enquanto o sedimento em suspensão é transportado pela turbulência do fluxo, sem ter contato com o leito por um longo período (BHUIYAN, 2011).

Para a estimativa do diâmetro de sedimento transportado pelo fluxo, uma das principais metodologias utilizadas foi desenvolvida por Shields (1936), sendo definido, através do diagrama de Shields, o início de movimento do sedimento pela relação entre o diâmetro do sedimento e o número de Reynolds estimado para o escoamento (ROWINSKI, 2014). O transporte de sedimentos em um fluxo é definido como descarga sólida de sedimentos, no qual é relacionada a concentração de sedimentos presente no fluxo e a vazão passante.

A representação da descarga sólida de sedimentos pode ser determinada através do perfil de velocidade e da concentração de sedimentos ao longo da coluna da água. Dessa forma, ressalta-se que o ponto que corresponde à maior velocidade geralmente não é o ponto que corresponde à maior concentração de sedimentos na massa de água (SILVA *et al.*, 2007). Isso ocorre em razão do ponto de maior concentração estar próximo ao leito do canal, enquanto as maiores velocidades encontram-se nas regiões de menor atrito, sendo isso próximo à superfície do fluxo.

Silva *et al* (2007) destacaram que a maior quantidade de sedimentos carregados ocorrem em períodos chuvoso, havendo uma distribuição irregular do transporte de sedimentos ao longo do ano. Além disso, nas porções altas de uma bacia hidrográfica são identificados os pontos de maior erosão e transportes de sedimentos, sendo possível observar uma diminuição de sedimento carregados nas porções médias ou baixas das bacias, ou seja, nas parcelas de menor declividade.

Como última etapa no ciclo hidrossedimentológico, ocorre a deposição do material sedimentado. Isso irá ocorrer quando a quantidade de sedimento contida no escoamento superficial é maior do que a sua capacidade de transporte (PRUSKI, 2009). Em relação ao transporte de sedimentos durante eventos de inundação, Ikeda e McEwan (2007) ressaltaram que, ao invadir a planície de inundação, o escoamento acaba por depositar o material transportado na região de planície e, ao retornar para a calha principal, reduz a sua carga de sedimentos transportados no fluxo.

3.2. REOLOGIA

A reologia foi desenvolvida com o intuito de compreender a deformação e o fluxo de matéria, buscando entender o comportamento de fluídos viscosos, viscoelásticos e viscoplásticos (IRGENS, 2014). A alteração na viscosidade de um fluído implica na mudança da sua taxa de deformação, tendo fluídos mais viscosos velocidades menores que fluídos

menos viscosos (FERREIRA, 2007). Dessa forma, um fluido pode ser classificado tanto pela sua resposta para uma pressão externa aplicada quanto pelo efeito da ação de uma tensão no mesmo (CHHABRA e RICHADSON, 2008). Essas características determinam, basicamente, o comportamento do fluido em relação a sua compressibilidade.

Assim, a reologia compreende o comportamento do fluido sobre uma tensão e a resposta para ela através da deformação (USACE-RAS, 2020). A relação entre as duas variáveis pode ser plotada graficamente, analisando o crescimento de um fator ou de outro e definindo a equação do fluxo que caracteriza essa evolução. Em modelos hidráulicos que utilizam a água como fluido no escoamento, a maior parte considera a reologia em suas simulações; porém, é definido uma tensão qualquer para que se inicie o seu movimento (HEC-RAS, 2020).

3.2.1. Escoamentos Newtonianos e Não-Newtonianos

Para a classificação de fluidos como Newtonianos e Não-Newtonianos, deve-se tomar como base a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação do fluido, em que fluidos Newtonianos apresentam um comportamento linear na variação enquanto fluidos Não-Newtonianos uma relação variável ou, até mesmo, um valor inicial para o deslocamento (SILVA *et al.*, 2019). Para determinar se a água pode ser ou não considerada como Newtoniana, utiliza-se a concentração de sedimentos presentes no mesmo, podendo isso, caso muito elevado, modificar a sua viscosidade e, por consequência, o seu comportamento (FERREIRA, 2007).

Fluidos Newtonianos, como a água pura, sofrem deformação imediata quando aplicada uma tensão cisalhante. O fluxo irá variar, podendo diminuir ou aumentar pela variação da taxa de deformação, sendo linear e proporcional os valores (MALTMAN, 1994). Além disso, a viscosidade para fluidos Newtonianos é estimada em função da temperatura, da concentração e da pressão sofrida. Contudo, comumente é calculado apenas pela variação da temperatura (HUILGOL e PHAN-THIEN, 1997). Um fluido Newtoniano incompressível tem como característica uma relação linear com a sua viscosidade, obedecendo a Lei de Newton da viscosidade, expressa pela Equação (1).

$$\tau = \mu\gamma \tag{1}$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento (N/m²), μ é a viscosidade dinâmica do fluido (N.s/m²) e γ é a taxa de deformação (gradiente de velocidade).

Fluídos que não apresentam características que podem ser representadas como Newtonianas são classificados como fluídos Não-Newtonianos. Em sua maioria, os fluidos são classificados como Não-Newtonianos (HUILGOL e PHAN-THIEN, 1997). Eles não apresentam uma linearidade nas curvas de tensão cisalhante e deformação, não podendo ser observada uma relação constante da variação de temperatura, pressão exercida e podendo variar, até mesmo, pelas diferentes condições existentes no escoamento (CHHABRA e RICHARDSON, 2008). Em razão dessas variações, é difícil prever o comportamento de fluidos Não-Newtonianos em fluxos muito complexos, sendo necessário se basear nas propriedades individuais de cada fluido e associando-os com equações que podem representar o seu comportamento (HUILGOL e PHAN-THIEN, 1997).

3.2.2. Escoamentos com alta concentração de sedimentos

Em ambientes naturais, é comum o transporte de sedimentos em rios, tanto por suspensão quanto por carreamento no leito. Quando um fluído transporta uma elevada quantidade de sedimentos, a água deixa de ser a principal matéria presente no fluxo e passa a interagir com os diferentes sólidos presentes no meio. Dessa forma, Takahashi (2007) divide o transporte natural de sedimentos por força gravitacional ou por influência escoamentos.

Um transporte natural de sedimentos em um fluxo de rio irá ocorrer por suspensão, deslizamento, arraste ou saltação, podendo variar conforme a velocidade e a forma do escoamento (CARVALHO, 2008). Fluxos de rio apresentam um volume de água consideravelmente maior do que o de sedimentos, podendo ser desconsiderado a influência dos sedimentos nas características do fluído.

Ao elevar a carga de sedimentos no fluxo, ele pode adquirir características de um fluxo hiperconcentrado. Chanson (2004), cita que as características de fluxos hiperconcentrados ainda não são totalmente compreendidas, mas é claro que, pelas suas propriedades e características, fluídos hiperconcentrados não podem ser representados como a água em estado puro.

Rickenmann (1991) define um fluxo hiperconcentrado como um fluxo uniforme com alta concentração de sedimentos finos e uma viscosidade maior do que a água. Takahashi (2007) cita que um fluxo com sedimento em suspensão com variação entre 2 e 20 % pode apresentar características similares à um escoamento hiperconcentrado. Lavigne (2004) cita que a diferença entre fluídos hiperconcentrados ou fluxo de lama ou fluxo de detritos ainda

não está clara na literatura, devendo ser classificado com base na mecânica do fluido ou do seu comportamento ou, ainda, pela concentração de sedimentos presentes no fluido.

Tanto fluxos de detritos quanta lama apresentam a água como principal agente mobilizador; porém a principal característica que diferencia os dois fluxos é o material transportado. Jakob e Hungr (2005) definem lama como um líquido ou semilíquido em que o principal material transportado são sedimentos finos, enquanto fluxo detritos pode ser definido como uma mistura de água, areia, terra, matéria orgânica e rochas. Assim, podemos afirmar que um fluxo em lama apresentará uma característica quase homogêneo entre a fase líquida e sólida, já um fluxo de detritos terá maior heterogeneidade de material no escoamento.

Dessa forma, um fluxo turbulento, pelo acréscimo de sedimentos passa a se caracterizar como um fluido hiperconcentrado e, caso acrescido mais sedimentos, comporta-se como um fluxo de detritos ou de lama, dependendo da concentração de sedimentos em suspensão, de leito presente na matéria e de sua granulometria. Além disso, a concentração de sólidos em suspensão ou no leito, determina se o escoamento irá ocorrer em fase homogênea ou heterogênea, modificando o seu comportamento e podendo elevar ainda mais a complexidade na representação do fluxo.

A Figura 2 ilustra como o fluido se modifica pelo acréscimo ou decréscimo de sedimento no fluxo. Destaca-se que a concentração de sedimentos no fluxo é uma fase do meio, podendo evoluir ou regredir conforme a concentração total de material.

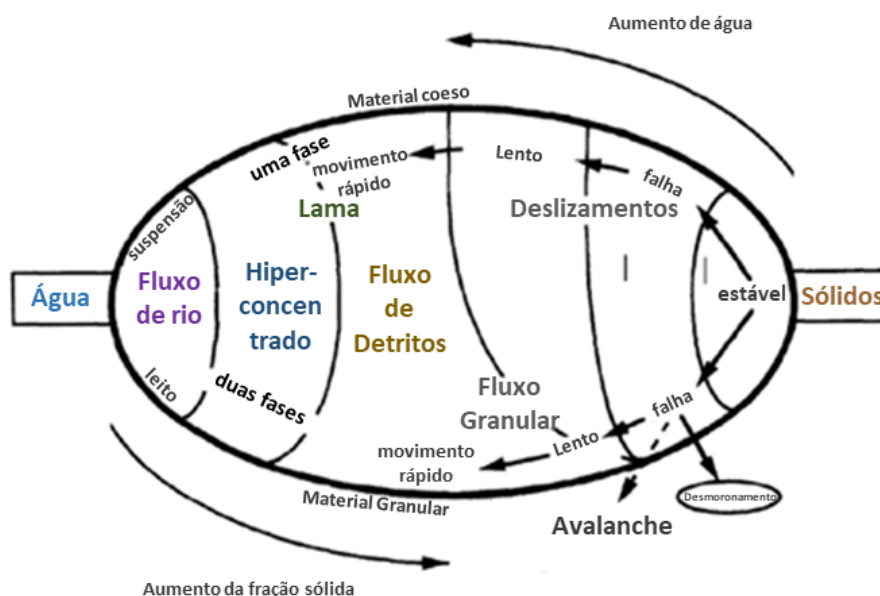


Figura 2. Propriedades do fluido pela concentração de sedimentos.
Fonte: adaptado de USACE-RAS (2020)

Kobiyama *et al* (2019) relacionaram a concentração de sedimentos presentes no fluxo com o tipo de fluído identificado e, por fim, com a velocidade do processo para a ocorrência de desastres hidrológicos, Figura 3. Em geral, a ocorrência de inundações bruscas ou graduais irá depender da região no qual o evento hidrológico está ocorrendo, sendo comumente identificado inundações graduais em regiões com chuvas sazonais bem definidas.

Inundações bruscas tendem a ocorrer em bacias menores, principalmente em regiões de cabeceira, no qual são observados baixos tempos de concentração do escoamento. Além disso, fluxos hiperconcentrados podem ser representados como uma fase transitória ou posterior a ocorrência de inundações bruscas, sendo necessário a evolução desse evento para a ocorrência do outro. Destaca-se que nem sempre o acontecimento de uma inundação brusca vai resultar em um processo de fluxo hiperconcentrado, bem como o acontecimento desse vai evoluir para um fluxo de detritos. Contudo, é necessário a sucessão de cada um desses eventos para a ocorrência do próximo.

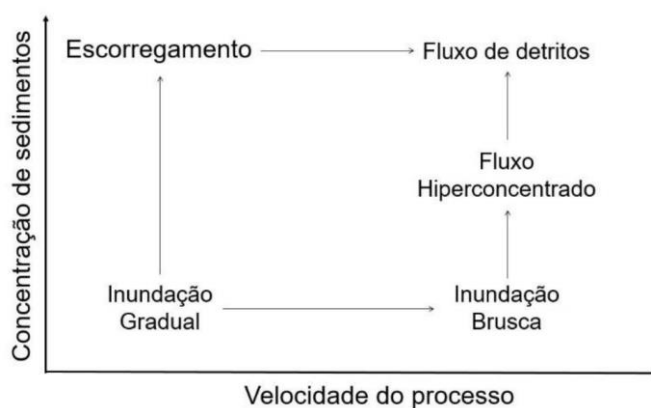


Figura 3. Classificação conceitual dos tipos de desastres hidrológicos
 Fonte: Kobiyama *et al* (2019)

Meunier e Coussot (1995) destacam que em escoamentos hiperconcentrados com concentração de sedimentos variando entre 1 e 25 % é possível observar um transporte de sedimentos por saltação no leito do rio. Contudo, para concentrações mais elevadas, o escoamento perde a competência para suspender o sedimento do leito, havendo apenas o transporte do material em suspensão no escoamento.

Na literatura, a concentração de sedimentos que caracteriza um fluído hiperconcentrado varia entre 20 e 60%, podendo ser definido como um fluído com características fluviais, mas uma alta carga de sedimentos (VALANCE, 2000). Jakob e Weatherly (2007) citam que a transição entre o escoamento com água pura e o fluxo hiperconcentrado ocorre com volumes mínimos de sedimento entre 3 e 10%, sendo dependente do tamanho do sedimento e da sua capacidade em adquirir tensão cisalhante.

Em escoamentos hiperconcentrados é possível observar um aumento na viscosidade do fluido, havendo maior interação entre a sua fase sólida e líquida. O fluido, para essa situação, necessita uma tensão cisalhante inicial para que inicie a sua deformação, podendo ser descrito como um fluido viscoplástico. A Figura 4 ilustra a relação da concentração de sedimentos no fluido com a tensão cisalhante necessária para seu deslocamento.

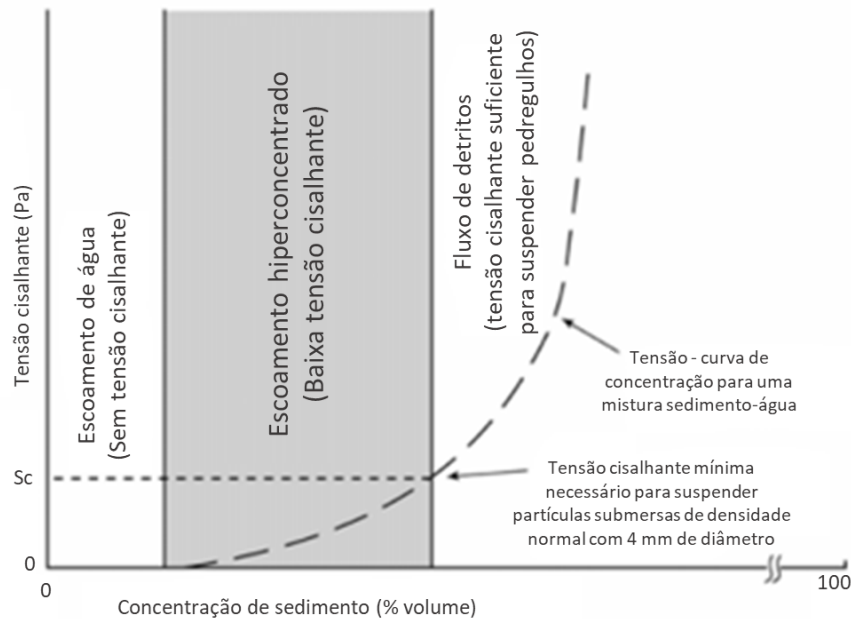


Figura 4. Relação entre a tensão cisalhante e a porcentagem de sedimentos.
 Fonte: Adaptado Jakob *et al* (2005)

Por fim, existem pelo menos duas razões para que fluidos hiperconcentrados não devam ser representados como um fluido Newtoniano. A primeira é a diferença na colisão entre partículas e água ou apenas água, sendo que pelo aumento da concentração de sedimentos é observado, por consequência, um aumento na probabilidade de colisão entre as partículas. A segunda razão é relativo à concentração, que ao atingir um determinado valor, a interação intermolecular entre as partículas deixa de ser negligenciável, tendo como resultado a floculação de partículas no fluido e a ocorrência de propriedades elásticas e plásticas no mesmo (XU *et al.*, 2018).

3.2.3. Representação de fluidos com alta concentração de sedimentos

Fluidos com baixa concentração de sedimentos podem ser caracterizados como água pura, enquanto o aumento na concentração de sedimentos pode alterar as condições hidráulicas do fluido e suas propriedades reológicas (LE BOUTEILLER *et al.*, 2021). Assim, em razão da variação nas propriedades reológicas do fluido, ele deixa de ser representado como um fluido Newtoniano e passa a ser comportar como Não-Newtoniano.

USACE (2020) destaca que escoamento Não-Newtonianos são complicados de serem representados pois não possuem uma equação única e contínua. Dentre as principais classificações utilizadas para a reologia de fluídos com sedimentos, destacam-se as equações de Bingham e de Herschel-Bulkley, podendo esse variar linearmente ou representar um fluído pseudoplástico ou dilatante. O comportamento de cada classificação está destacado na Figura 5.

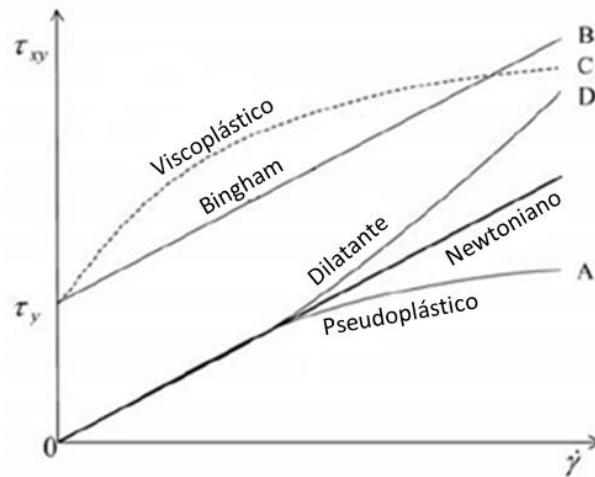


Figura 5. Curva de tensão cisalhante por deformação.
Fonte: Adaptado de Huilgol e Phan-Thien (1997)

Conforme está destacado na Figura 5, um fluído Newtoniano como a água, ao receber uma tensão qualquer, imediatamente inicia um movimento com uma taxa de deformação linear à tensão exercida. Conforme O'Brien e Julien (1988) o aumento na concentração de sedimentos no fluído propicia maior coesão entre o material, acarretando na elevação da sua tensão cisalhante.

Para escoamentos com sedimentos, diferentes representações podem ser realizadas, dependendo da concentração e do tipo de material escoado. Contudo, os métodos de Herschel-Bulkley e Bingham se destacam na representação de fluxo de detritos, lama ou fluxos hiperconcentrados. O método de Herschel-Bulkley comumente é utilizado na representação de fluxo de detritos e lama, enquanto o método de Bingham, por representar um comportamento linear similar ao modelo Newtoniano, é utilizado em fluxos hiperconcentrados.

Escoamento de detritos ou lama tem como característica um processo gradual de destruição das estruturas internas do fluído, com uma deformação lenta no início e incompleta até atingir tensões cisalhantes mais elevadas (HUANG e GARCÍA, 1998). Esse comportamento pode ser expresso pela equação de Herschel-Bulkley (2).

$$\tau = \tau_y + \mu(\dot{\gamma})^{n \neq 1} \quad (2)$$

Onde τ é a tensão cisalhante interna do fluido (Pa), τ_y é a tensão cisalhante inicial (Pa) e μ é a viscosidade dinâmica (Pa) e n define o comportamento de crescimento da curva.

Fluídos hiperconcentrados são caracterizados como viscoplástico, sendo necessária uma tensão cisalhante mínima maior que zero para a sua deformação e o início do escoamento. Essa é a razão para que esse tipo de escoamento não se prolongue em leitos com baixa declividade (LE BOUTEILLER *et al.*, 2021). Assim, quando a tensão for menor que a necessária, o fluido apresentará um comportamento de escoamento similar a um corpo rígido (CHHABRA, 2008). O modelo fluido plástico de Bingham descreve as características de escoamentos hiperconcentrados, lama, detritos e lodo, algo não explicado pelo modelo de fluídos Newtonianos (XU *et al.*, 2018).


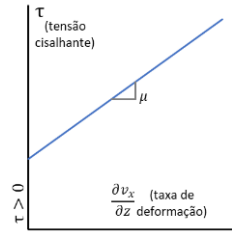
O fluido de Bingham apresenta um comportamento linear, similar a um fluido Newtoniano; porém o início da deformação nunca será na origem entre a tensão cisalhante e deformação. Dessa forma, a tensão cisalhante de um fluido de Bingham pode ser definida pela Equação (3).

$$\tau = \tau_y + \mu(\gamma) \quad (3)$$

Onde τ é a tensão cisalhante interna do fluido (Pa), τ_y é a tensão cisalhante inicial (Pa) e μ é a viscosidade dinâmica (Pa)

A Tabela 1 resume as principais diferenças entre um escoamento com concentração nula ou baixa de sedimentos e um fluido hiperconcentrado.

Tabela 1. Diferença entre escoamento turbulento e hiperconcentrado.

Classificação do escoamento	Processo	Concentração volumétrica	O'brien <i>et al.</i> (1993) componente de cisalhamento	Hershel Bulkeley Componente de cisalhamento	Modelo reológico/geotécnico
Transporte de sedimentos	Transporte de leito e em suspensão	$C_v < 5\%$	-	-	
Hiperconcentrado	Perdas por atrito e viscosidade	$C_v > 5\%$	Bingham $\tau_y + \mu(\gamma)$	Linear $\tau_y + K(\gamma)^{n=1}$	

Fonte: Adaptado de USACE-RAS (2020).

Em geral, o modelo plástico de Bingham representa adequadamente fluídos no qual haja a ocorrência de partículas em suspensão com diâmetro menor que 0,01 mm. Isso ocorre pelo fato de que sedimentos em suspensão menos coesos tem como principal força atuante as colisões entre partículas existentes, enquanto nos mais coesos as forças intermoleculares apresentam predominância. A interação no escoamento entre esses dois cenários facilita a quebra das estruturas floculantes, modificando a viscosidade do fluído (XU *et al.*, 2018).

3.3. RECONSTRUÇÃO DE EVENTOS DE INUNDAÇÃO

O estudo de eventos de inundação, cada vez mais, tem-se mostrado relevante pelo impacto socioeconômico acarretado. Assim, o desenvolvimento de novas metodologias para simulação hidráulica de rios e planícies proporcionaram a elaboração de diferentes técnicas para mapeamento de inundações e áreas de risco (MASOERO *et al.*, 2013).

A reconstrução de eventos extremos necessita de uma base de dados robusta e bem desenvolvida para a sua elaboração, sendo, muitas vezes, essencial possuir informações de nível, vazão, precipitação ou dados relevantes que possam auxiliar na reconstrução do evento. Contudo, no Brasil, em razão da recente implementação da rede de monitoramento hidrometeorológica, é observada uma escassez ou baixa qualidade dos dados hidrológicos associados a eventos extremos de máxima (VANELLI, 2019).

Dessa forma, pela escassez de medições diretas, a reconstrução de eventos extremos torna-se difícil de ser realizada, necessitando o uso de técnicas alternativas para isso. Bradzil *et al* (2006) definiu três formas diferentes para evidenciar o impacto ou o registro de eventos extremos na reconstrução de inundação: medição direta, evidências históricas e evidências físicas.

A medição direta de dados pode ser representada pela rede hidrometeorológica, cujos dados são obtidos através de registros sistemáticos em estações de monitoramento, como, por exemplo, nível de água, vazão, entre outras variáveis (VANELLI, 2019). Bradzil *et al* (2006) citam que evidências históricas auxiliam na compreensão de enchentes, bem como na observação do impacto hidrológico para a sociedade. Além disso, auxiliam na análise do impacto socioeconômico e psicológico do evento, sendo uma importante ferramenta na educação de risco de eventos extremos e na sua percepção.

A documentação histórica pode ser realizada através de manuscritos, notícias, pinturas, artefatos, narrativas, descrições ou qualquer outra informação direta ou indireta que possa refletir ou contextualizar o evento ocorrido (BRADZIL *et al* 2006). As evidências físicas estudam eventos passados que ocorreram antes de uma possível observação humana ou medições diretas não registradas pela hidrologia moderna. (BAKER, 1986).

Estudos de reconstrução de eventos de inundação históricos são importantes para melhorar a gestão de desastres nas bacias hidrográficas, compreendendo as condições hidrometeorológicas necessárias para causar uma inundação extrema (GUIRRO, 2020). Assim, modelos matemáticos de simulação dos eventos de inundação são importantes ferramentas para a reconstrução e análise de eventos históricos (MASOERO *et al.*, 2013).

Diversas metodologias podem ser empregadas para a reconstrução de um evento de inundação, como utilizar apenas uma análise hidrodinâmica do evento, ou uma análise hidrodinâmica complementada pela reconstrução meteorológica do evento. A primeira busca identificar, na reconstrução, os níveis máximos de água no evento ou, também, as vazões ocorridas. Já a segunda tem como base, além dos dados hidrológicos, uma análise da duração e intensidade de precipitação, velocidade do vento, pressão atmosférica, dentre outras variáveis climatológicas.

Outra metodologia muito utilizada é a reconstrução hidrológica-hidrodinâmica. Nessa metodologia é empregado um modelo hidrológico calibrado e validado com dados da série histórica de precipitação, para estimar a vazão do evento, posteriormente aplicam-se esses

valores de vazão no modelo hidrodinâmico a fim de estimar as áreas inundadas (VANELLI, 2019).

Na reconstrução do evento de inundação ocorrido no município de Rolante/RS, foi utilizada a reconstrução hidrológica e hidrodinâmica do evento. A reconstrução hidrológica do evento foi realizada por Guirro (2020), tendo sido desenvolvido um modelo hidrológico através do software HEC-HMS. A modelagem foi baseada nas precipitações monitoradas para o evento de 2017 ao longo de toda a bacia do rio Mascaradas e, posteriormente, na estimativa de vazão gerada em diversos trechos da bacia do rio Rolante. Dessa forma, esse trabalho se propôs a complementar os estudos elaborados por Guirro (2020), reconstruindo de forma hidrodinâmica, com o software HEC-RAS 6.0, o evento de inundação ocorrido em 2017.

3.4. REGISTROS DE INUNDAÇÃO COM ALTA CARGA DE SEDIMENTOS NO BRASIL

Conforme CRED (2022), tendo como base o número total de desastres no mundo, eventos de inundação representam pelo menos metade das ocorrências tanto para o ano 2021 quanto para a média de eventos entre 2001 e 2020. Por consequência, apenas no ano de 2021 o número de mortes ocorridas em decorrência de inundações foi estimado em 4.143, tendo uma média anual de 5.185 mortes entre os anos de 2001 e 2020. Além disso, deve ser ressaltado o elevado prejuízo econômico e social causado por esse tipo de evento.

No Brasil, entre os anos de 1991 e 2012, foram registrados pelo menos 4.691 episódios de inundação (CEPED, 2013). Ainda, as regiões mais afetadas por esses eventos são sudeste (34 %), nordeste (25 %) e sul (22 %). Dentre os episódios de inundação ocorridos, podemos destacar os eventos de Petrópolis/RJ (2022), pelo elevado número de óbitos ocorridos, e os eventos de Rolante/RS (2017) e Alto Vale do Itajaí/SC (2020) pelo fenômeno físico ocorrido.

Sobre o evento de inundação de Rolante/RS, a região do rio Mascarada foi atingida por uma elevada precipitação no dia 05/01/2017, em que pluviômetros registraram um volume entre 100 e 180 mm. Conforme SEMA/RS (2017), foram observados diversos escorregamentos na cabeceira do rio Mascarada. Subsequente aos escorregamentos foram identificados formações de fluxos de detritos. Por fim, o material pode ter sido transportado até o rio Mascarada, um dos afluentes do rio Rolante.

Dessa forma, o material carregado foi transportado ao longo do rio, podendo ter sido um fator determinante na intensidade do evento de inundação ocorrido no município de

Rolante/RS em 2017. Estima-se que pelo menos 15 mil pessoas tenham sido atingidas pelo evento; porém sem registros de fatalidade. Além disso, destaca-se que, após o evento, a elevada carga de sedimentos no rio Rolante impactou o abastecimento público de água durante alguns dias no município de Rolante e nas cidades da Bacia do Rio Sinos.

O desastre do Alto Vale do Itajaí ocorreu entre os dias 16 e 17 de dezembro de 2020, tendo sido observado uma precipitação intensa durante esse período e, por consequência, o desencadeamento de movimentos de massa e inundações bruscas (MICHEL *et al.*, 2021). Devido à intensidade do evento foram registrados ao menos 24 mortes nos municípios atingidos¹. Michel *et al* (2021) ainda destacam que a inundação possuía uma elevada concentração de sedimentos e detritos, muito em razão dos processos de escorregamentos e fluxo de detritos ocorridos na cabeira da bacia e da elevada competência para transporte de sedimentos. Os diferentes processos ocorridos no evento de 2020 no Alto Vale do Itajaí estão ilustrados na Figura 6.



Figura 6. Processos ocorridos no evento do Alto do Vale do Itajaí.
Fonte: Michel *et al* (2021)

O evento de inundação no município de Petrópolis/RJ teve como fonte uma intensa precipitação de 230 mm ocorrida em 3 horas no dia 15 de fevereiro de 2022. Esse evento teve como resultado escorregamentos na área urbana do município e, em conjunto, o transbordamento do rio Piabanha. Para o evento foi estimado um número total de 178 mortos, muito em decorrência dos escorregamentos em área urbana na região². Nesse episódio, o elevado número de escorregamentos foi o principal fator para o número elevado de mortes na

¹ Disponível em: <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2020/12/17/chuva-provoca-mortes-enxurrada-e-estragos-em-santa-catarina-dizem-bombeiros.ghtml>. Acesso em 05/05/2022.

² Disponível em: <https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2022/02/20/tragedia-em-petropolis-maior-registrada-na-historia-o-municipio.ghtml>. Acesso em 05/05/2022

região. Contudo, deve-se destacar que boa parte do material foi transportado até o rio Piabanha, agravando ainda mais a situação na região.

Recentemente, no Brasil, foram observados dois episódios de inundação intensa não relacionados com desastres naturais, tendo sido gerado pelo rompimento de barragens de mineração nas regiões de Mariana e Brumadinho. Eventos desse tipo e dessa magnitude não ocorrem constantemente, pois a sua origem tem maior relação com falhas humanas do que eventos naturais extremos. Ressalta-se, contudo, que eventos naturais extremos podem desencadear o rompimento de barramento; porém o estado de conservação, o gerenciamento e a operação adequada dos reservatórios e a manutenção das barragens são fatores relevantes para a ocorrência ou não desses desastres.

O desastre de Mariana ocorreu pelo rompimento da barragem de Fundão no município de Mariana no dia 5 de novembro de 2015. Conforme CNDH (2017), o rompimento da barragem gerou uma onda de lama e rejeitos de mineração com um volume total de 55 milhões de metros cúbicos. A onda de rejeitos acarretou a morte de 17 pessoas e mais de 600 desabrigados. Além disso, os efeitos tóxicos do material causaram um gravíssimo impacto ambiental ao longo de toda a Bacia do Rio Doce. Destaca-se que o número de afetados pelo rompimento da barragem foi de aproximadamente 3,2 milhões de pessoas.

Em relação ao desastre de Brumadinho, conforme CIMNE (2021), a Barragem I do complexo minerário de Paraopeba rompeu bruscamente no dia 25 de janeiro de 2019 no município de Brumadinho, resultando em uma onda de rejeitos de mineração com um volume de 9,7 milhões de metros cúbicos de material. Além disso, o material apresentava uma característica de lama sem homogeneidade. Deve ser destacado que a barragem já estava inutilizada e não havia ocorrência de eventos hidrológicos ou climatológicos extremos no período. Ao todo foram contabilizados 272 mortes pela ocorrência do rompimento³. Ressalta-se também que, em razão da toxicidade do rejeito, o rompimento causou a mudança na cobertura do solo bem como impactou gravemente a situação ambiental e socioeconômica da região (PEREIRA *et al.*, 2019).

Em todos os eventos de inundação a água foi o principal agente mobilizador; contudo, a presença de sedimentos não pode ser negligenciada pois a concentração de sedimentos altera as propriedades do fluído e, por consequência, o seu comportamento e representação. Nos cenários de Mariana e Brumadinho, a carga de sedimentos foi consideravelmente maior

³Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2021/10/06/interna_gerais,1311834/tragedia-em-brumadinho-vitima-e-identificada-apos-mais-de-2-anos.shtml. Acesso em: 05/05/2022.

quando comparado com os episódios de inundação destacados, podendo ser representados, até mesmo, como um fluxo de lama.

Ressalta-se que, mesmo nos episódios de inundação nos municípios de Rolante/RS, Petrópolis/RJ e Alto Vale do Itajaí/SC, deve-se considerar a presença de sedimentos como um fator relevante na intensidade do evento. Todos esses eventos demonstram uma importante relação entre água e sedimentos nos eventos de inundação, corroborando com a hipótese que a carga de sedimentos presentes no evento de Rolante/RS pode ter influenciado na inundação do município em 2017.

3.5. MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A hidrodinâmica de fluídos tem como objetivo compreender o seu comportamento durante o seu deslocamento, podendo ser dividida em escoamentos sob pressão ou em superfície livre. Porto (2006) cita que trabalhar com escoamentos em superfície livre, apesar das similaridades com condutos forçados, apresenta muito mais dificuldades, por haver rugosidades variadas e geometrias, muitas vezes, complexas.

Conforme Paiva (2009), quando em superfície livre, o escoamento não permanente é o padrão mais comum encontrado nos escoamentos fluviais, sendo representado por modelos hidrodinâmicos, que fornecem a variação no tempo e no espaço das variáveis do escoamento em um rio ou um canal. Além disso, pode ser subdividido entre uniforme, pouco usual; ou variado, rápido ou gradual. Porto (2006) define escoamentos uniformes como um escoamento em que o vetor velocidade é igual, em módulo, direção e sentido, em todos os pontos e no mesmo instante de tempo. Em contrapartida, no momento que o vetor velocidade variar em um ponto qualquer no mesmo instante de tempo, o escoamento é dito variado. Com relação às características de escoamento rápido ou gradual, aquele tende a ocorrer quando existe uma variação brusca no nível de água em uma distância consideravelmente curta, enquanto o gradual representa variações lentas de um escoamento de superfície livre.

Para escoamento em superfície livre, as equações de Saint-Venant são utilizadas comumente por representar adequadamente fluídos em canais, relacionando, basicamente, a equação da continuidade e do momento. Modelos que fazem uso dos princípios da hidrodinâmica tem as equações básicas frequentemente modificadas, simplificadas ou até mesmo renomeadas. Contudo, todas advêm das mesmas equações fundamentais das leis de conservação (JI, 2008; TEIXEIRA, 2019). Para a realização desse tipo de modelagem, alguns parâmetros de entrada são essenciais. Entre eles destacam-se as áreas das seções transversais

do rio, o comprimento do rio, os dados das vazões e as condições de contorno do modelo (FAGUNDES, 2018).

Cheias e eventos extremos são muito complexos de serem analisados, pois trabalham com duas áreas de conhecimento dentro da engenharia, a hidráulica e a hidrologia. Conforme Szymkiewicz (2010), a estimativa e previsão de regiões impactadas por eventos de cheia possui um elevado número de variáveis em seu conjunto, sendo representada por uma matemática complexa e pelas propriedades específicas dos escoamentos em superfície livre.

A modelagem fornece uma ferramenta através da qual o homem pode estudar e obter a compreensão de um determinado fenômeno e, assim, selecionar e desenvolver projetos de engenharia adequados (PINTO, 2007). Além disso, modelos numéricos são importantes ferramentas para compreender eventos de inundação, delimitação de áreas com perigo de inundação e gestão no planejamento de enchentes (PATEL *et al.*, 2017). Assim, através dos modelos matemáticos, é possível obter informações relativas às características do escoamento como níveis de água, tempo de chegada da onda de cheia, perfil de velocidades e permite a geração de manchas de inundação (FAGUNDES *et al.*, 2020).

3.6. HEC-RAS

Para a modelagem hidrodinâmica, o HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System) é uma das ferramentas mais utilizadas por ser um software gratuito, com versões revisadas e melhoradas constantemente, tendo sido desenvolvido pela *US Army Corps of Engineers*. O software permite simulações em 1 dimensão (1D), 2 dimensões (2D) ou a combinação entre 1D/2D para a uma representação completa de canais naturais ou construídos (USACE-RAS, 2020). Além disso, é possível realizar simulações de escoamentos permanentes e não-permanentes.

O número de dimensões em um escoamento é definido pela quantidade de variáveis espaciais independentes necessárias para descrever o escoamento matematicamente (JENPSON, 2011). Conforme o Manual de Modelagem 2D (USACE-RAS, 2020), um modelo 1D pode apresentar resultados tão bons ou melhores que uma modelagem 2D, sendo necessário avaliar qual o objetivo e as características do modelo simulado. Em geral, pode-se afirmar que modelos unidimensionais representam bem escoamentos com uma direção predominante enquanto modelos em 2 dimensões tem como característica uma boa representação para escoamento com múltiplos caminhos.

Tayefi *et al* (2007) cita que por mais que sejam realizadas diversas simplificações, incluindo a unidimensionalidade do escoamento, velocidade uniforme e o nível horizontal da água nas seções transversais, escoamentos em canais são representados de maneira satisfatória em modelos 1D, sem necessitar de uma elevada capacidade computacional. Já os Modelos 2D, observa-se uma melhor representação em regiões com topografia complexa, principalmente áreas alagadas de elevadas extensões como nos trechos da planície de inundação. (BETSHOLTZ & NORDLÖF, 2017).

Modelos 2D começaram a ser usados no mapeamento de inundações associados a eventos extremos; porém, para o mapeamento de risco nas regiões de várzea, o modelo 1D ainda continua sendo muito utilizado. Em geral, o mapeamento de inundações com modelos 1D subestimam as perdas por atrito, a extensão da inundação e as dinâmicas do escoamento (TAYEFI *et al.*, 2007). Destaca-se que modelos 2D tem como base a equação da continuidade (4) e da Conservação da Quantidade de Movimento em duas direções (5 e 6).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f \cdot v = -g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial \left(v_x \cdot h \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial \left(v_y \cdot h \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right)}{\partial y} - \frac{\tau_{bx}}{\rho R} + \frac{\tau_{sx}}{\rho h} \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - f \cdot u = -g \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial \left(v_x \cdot h \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial \left(v_y \cdot h \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \right)}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho R} + \frac{\tau_{sy}}{\rho h} \quad (6)$$

Onde h é a profundidade do fluxo (m), t é o intervalo de tempo (s), u e v são as velocidades nas direções x e y (m/s), q é o fluxo de entrada e saída (m/s), g é a aceleração gravitacional (m²/s), z é a elevação do nível da água (m), v_x e v_y são os coeficientes de viscosidades horizontais turbulentos, t é o intervalo de tempo (s) e f é o parâmetro da força de coriolis.

A modelagem 1D/2D utiliza os benefícios de cada um dos modelos, unindo as características adequadas de cada um. Assim, a modelagem realiza a caracterização do canal através do modelo 1D e a planície de inundação com o 2D (BETSHOLTZ & NORDLÖF, 2017). Para o modelo 1D/2D o algoritmo realiza iterações em intervalos de tempos, permitindo a transferência entre os modelos a qualquer momento. Assim, pode-se dizer que o rio é modelado em 1D havendo uma conexão com modelo 2D em forma de estruturas hidráulicas laterais (USACE-RAS, 2020). Quando se utiliza a metodologia 1D/2D, os dados de entrada do modelo são iguais ao modelo 2D puro (BETSHOLTZ & NORDLÖF, 2017).

Diferente da modelagem 1D, no qual a geometria é determinada pelas seções transversais, o modelo 2D utiliza um grid para a determinação da sua geometria, podendo

uma célula possuir até 8 direções, ou seja, ter 8 células vizinhas em seu entorno. Além disso, cada célula pode conter um ou mais valores de elevação informado. Em razão disso, o modelo 2D necessita que seja incluído um modelo digital de elevação como dado de entrada para a geometria.

Horritt e Bates (2002) compararam diferentes modelos para a previsão de inundação, utilizando como referência dois diferentes eventos e o mesmo modelo digital de terreno, sendo calibrada a área inundada em um dos eventos e validada em outro. Pela diferença entre a mancha de inundação monitorada e a simulada, a modelagem no HEC-RAS apresentou os melhores resultados na previsão dos eventos, destacando-se a extensão da área inundada e o tempo deslocamento da cheia. Contudo, ressalta-se que, por mais que tenham sido desenvolvidos diversos modelos para a previsão de inundações causadas por cheias, todos eles apenas realizam uma aproximação dos eventos naturais, sendo necessária a proposição de diversas simplificações da realidade para isso (HORRITT E BATES, 2002).

A versão 6.0 do HEC-RAS incluiu um novo módulo para escoamento de fluídos Não-Newtonianos como lama, detritos ou fluídos hiperconcentrados. Contudo, atualmente o software realiza apenas simulação com fluídos monofásicos (USACE-RAS, 2020). Como forma de representar a viscosidade do fluído no escoamento, foi adicionado uma variável na equação do momento, conforme está destacado na Equação (7).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f + S_{MD} \right) = 0 \quad (7)$$

Onde Q é a vazão (m^3/s), t é o intervalo de tempo (s), V é a velocidade do escoamento (m/s), g é a aceleração da gravidade (m/s^2), A é a área da seção transversal (m^2), z é o nível da água (m), S_f são as perdas por atrito (adimensional) e S_{MD} são as perdas pela reologia do fluído. (adimensional).

Modelar os fluídos Não-Newtonianos através do efeito por atrito permite importar teorias de reologia na formulação matemática, sendo possível relacionar isso através da tensão cisalhante para cada material (USACE-RAS, 2020). A Equação (8) ilustra como pode ser determinada a variável S_{MD} .

$$S_{MD} = \frac{\tau}{\gamma R} \quad (8)$$

Onde τ é a tensão cisalhante interna do fluído ($N.m^{-2}$), γ é o peso específico do fluído ($N.m^{-3}$) e R é o raio hidráulico (m).

Conforme observado ao longo da revisão bibliográfica, a modelagem hidrodinâmica em 2 dimensões pode representar melhor escoamentos com múltiplos caminhos e com áreas

de topográficas mais complexas. Dessa forma, como o trabalho proposto realizou simulações para um evento de inundação em uma região de planície, as simulações foram desenvolvidas com o modelo 2D do software HEC-RAS 6.0.

3.7. CONSIDERAÇÕES

Tendo como base os itens abordados ao longo da revisão bibliográfica, buscou-se desenvolver os principais conceitos que envolvem eventos de inundação, transporte de sedimentos e modelagem hidrodinâmica. Além disso, destacou-se a revisão, principalmente, da modelagem de fluídos hiperconcentrados, sendo analisado diferentes conceitos da parte de reologia.

Em relação ao tema a ser desenvolvido nesse trabalho, a modelagem hidrodinâmica utilizando HEC-RAS versão 6.0 com fluídos Não-Newtonianos ainda é pouco desenvolvida, em razão desse módulo ter sido adicionada recentemente ao software. Nessas condições, esse trabalho se propõe a elaborar um modelo hidrodinâmico 2D através do software HEC-RAS 6.0 e analisar a influência da concentração de sedimentos no evento de inundação ocorrido em 2017 no município de Rolante, sendo, para isso, utilizado o módulo de fluídos Newtonianos e Não-Newtonianos do software HEC-RAS 6.0.

4. METODOLOGIA

O fluxograma do trabalho realizado está ilustrado na Figura 7, tendo sido dividido entre dados de entrada primário e secundário. Dessa forma, antes de iniciar a simulação hidrodinâmica, foram definidas etapas de preparação do modelo digital de terreno (MDT) a ser inserido no software, sendo utilizado, para isso, os dados topográficos da parte molhada em complementação ao MDT. Em seguida foi definido o coeficiente de Manning para a região inundada, tendo como base o desenvolvimento de um mapa de uso do solo na região.

Inserindo o hidrograma do evento de 2017 na bacia e variando a concentração de sedimentos e as diferentes características de tensão cisalhante inicial e viscosidade dinâmica do fluido, foram simuladas as inundações no HEC-RAS 6.0. As simulações foram realizadas até cobrir todos os pontos de inundação observados no evento. Definido a mancha de inundação com melhor resultado e a sua respectiva concentração de sedimentos, foi analisada a influência da concentração de sedimentos no escoamento e no evento de 2017.

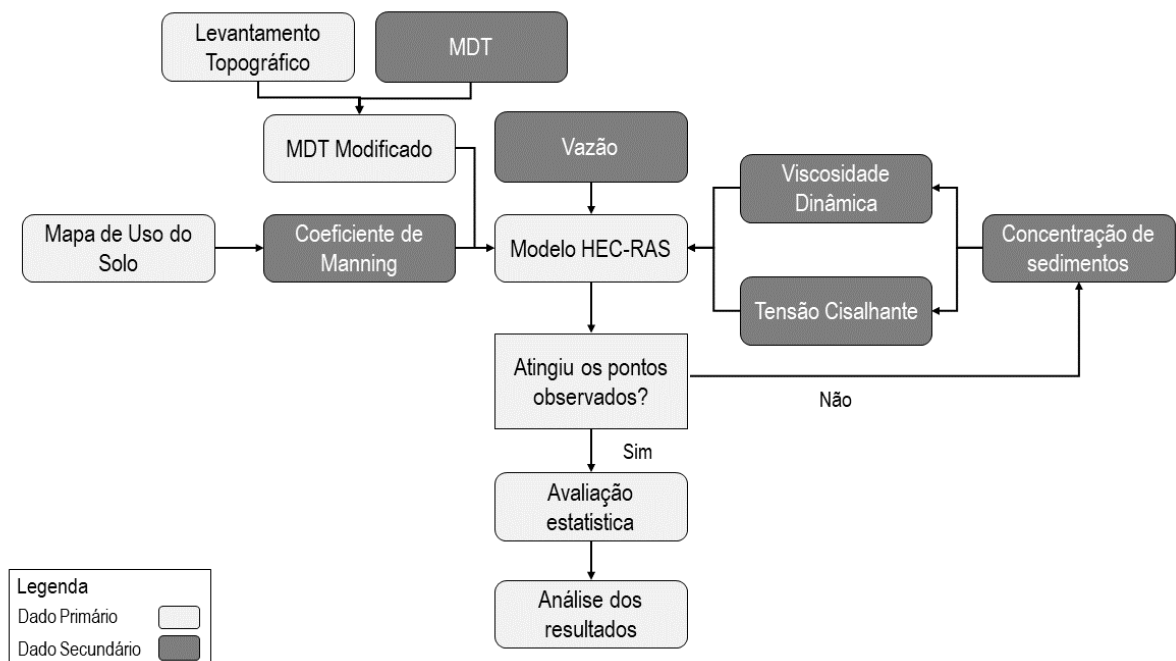


Figura 7. Fluxograma do trabalho.

As simulações comparadas englobaram os cenários sem concentração de sedimentos e a variação da concentração de sedimentos até a representação dos pontos de inundação observados no evento de 2017. As etapas e os métodos utilizados para isso estão detalhados no trabalho.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Rolante possui uma área total de 770 km², estando inserida nos municípios de Rolante, Riozinho e, parcialmente, São Francisco de Paula. A bacia está localizada na porção nordeste do estado do Rio Grande do Sul, sendo um dos afluentes da bacia do rio dos Sinos. A área de estudo está inserida na bacia hidrográfica do rio Rolante, abrangendo a principal área impactada na zona urbana do município de Rolante, com uma população total de 19.485 habitantes conforme o último censo realizado (IBGE, 2010). A Figura 8 ilustra a área de estudo bem como a bacia hidrográfica do rio Rolante.

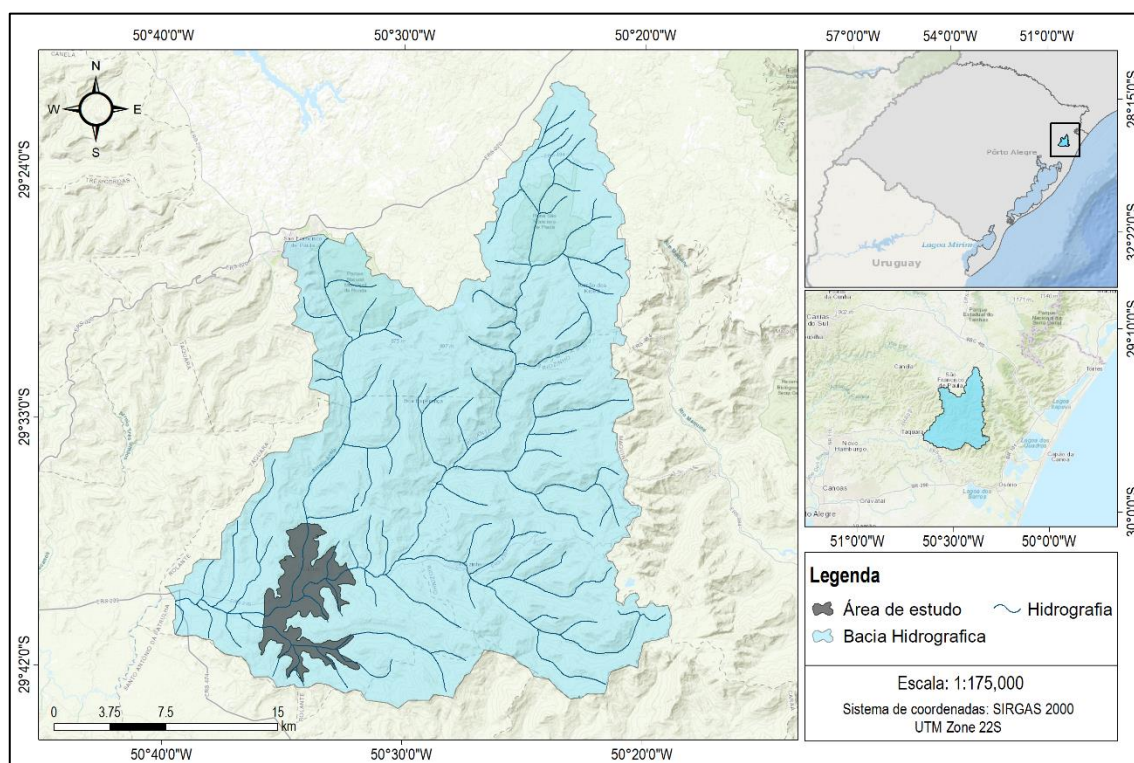


Figura 8. Área de estudo na bacia hidrográfica do rio Rolante.

O comprimento total da área de estudo, considerando apenas o ponto de montante e jusante do rio Rolante, foi estimado em 8,9 km, tendo uma área total de 31,2 km². A cota altimétrica do rio Rolante na parcela de montante foi estimada em 43,5 m, já no ponto do leito de jusante a cota estimado foi de 30,6 m. O perfil longitudinal do trecho do rio Rolante na área de estudo está destacado na Figura 9.

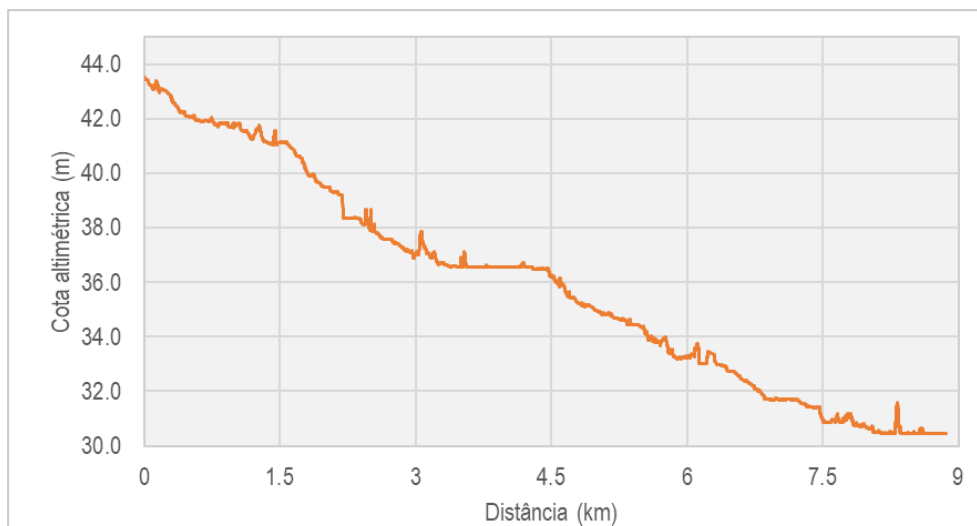


Figura 9. Perfil longitudinal do rio Rolante na área de estudo.

Conforme a classificação climática Köppen-Geiger, a bacia pode ser classificada como clima subtropical úmido (cfa), sem estações secas definidas e temperatura média ao longo do ano variando entre 0 ° e 22 °C. Ressalta-se ainda que nessa bacia a chuva pode ocorrer de forma bastante localizada devido ao efeito orográfico provocado pela grande diferença de altitude na cabeceira da bacia hidrográfica Guirro (2020).

A região hidrográfica possui cinco classificações de solo, segundo Kamp *et al* (2008). Nas regiões de cabeceira da bacia são identificadas parcelas de cambissolo húmico e neossolo regolítico, enquanto na parte baixa da bacia observa-se a predominância de argissolos bruno-acizentado, nitossolo vermelho e cambissolo háplico. As diferentes classificações estão destacadas na Figura 10.

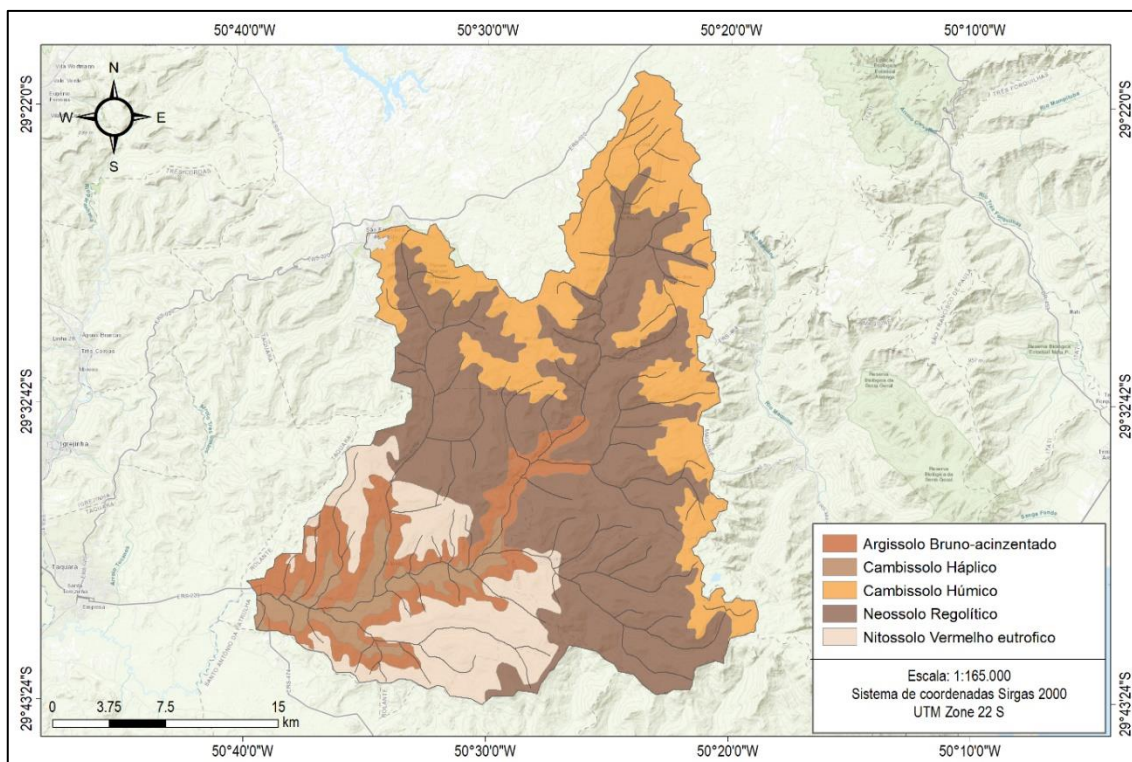


Figura 10. Classificação de solos na bacia hidrográfica do rio Rolante.
 Fonte: Adaptado de KAMPF *et al* (2008)

A geomorfologia da bacia hidrográfica do rio Rolante está classificada em seis tipos diferentes, com predomínio para a formação Gramado. Conforme dados da CRPM (2008), essa formação possui origem de rochas ígneas com litologia basáltica e declividade variando entre 25 e 60 °. Nas regiões de cabeceira estão concentradas as formações Caxias e Várzea do Cedro, possuindo litologia de riodacito e quartzo e derrames vitrofíricos, respectivamente. A declividade nessas áreas varia entre 15 e 35 ° para aquele e 2 a 5 ° para esse.

Por fim, na área baixa da bacia e inseridos na área de estudo, são observadas as geomorfologias de Botucatu e Depósitos Coluviais e/ou Aluviais. Na parcela com origem do Botucatu são identificadas rochas sedimentares com litologia de arenito fino e quartzo enquanto na parte de depósitos Coluviais e/ou aluviais são identificadas predominâncias litológicas de areia e sedimento elúvio-coluvionar.

Com relação as declividades na porção baixa da bacia, a formação do Botucatu apresenta declividades mais elevadas, com variação entre 25 e 60 °. A parcela com geomorfologia de Depósitos Aluviais apresenta declividade quase nula enquanto nos Depósitos Coluviais são identificadas declividades com variação entre 5 e 45 °. A classificação morfológica da bacia hidrográfica está ilustrada na Figura 11.

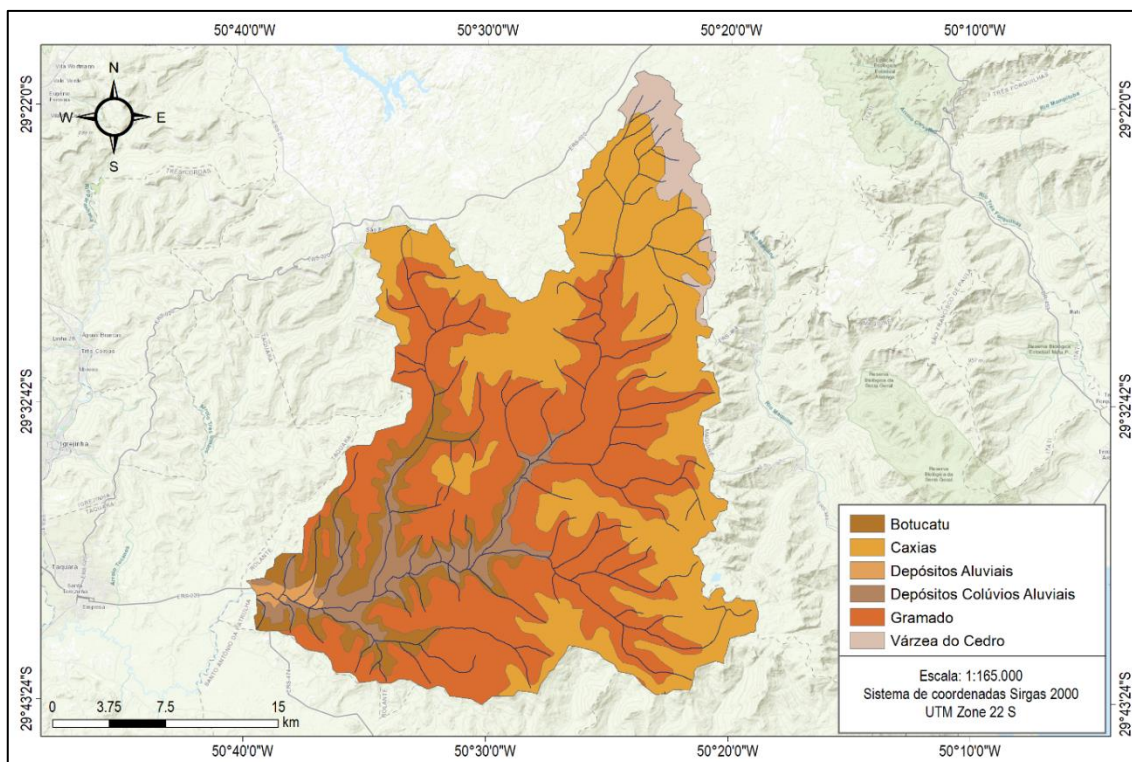


Figura 11. Classificação morfológica na bacia hidrográfica do rio Rolante.
 Fonte: Adaptado de CPRM (2008)

Por fim, com o objetivo de compreender o comportamento das precipitações na bacia e o seu tempo de resposta, foi estimado o tempo de concentração da bacia do rio Rolante através da equação de Kirpich, (Equação 9). A estimativa foi realizada entre o ponto mais distante até o exutório da bacia, tendo sido identificado um tempo de propagação de 489,9 min ou 8,2 h.

$$t_c = 57 \cdot \left(\frac{L^3}{\Delta H}\right)^{0,385} \quad (9)$$

Onde t_c é tempo de propagação (min), L é o comprimento do rio principal (km), H é a diferença de cota do desnível do rio (m).

4.2. INUNDAÇÃO DE 2017

A área de estudo contemplou a região inundada no município de Rolante durante o evento de 05 de janeiro de 2017. Após a ocorrência do evento, nos dias 13 e 14 foram realizadas visitas técnicas na região afetada, sendo, posteriormente, desenvolvido um diagnóstico preliminar do evento para o município de Rolante. O diagnóstico preliminar foi desenvolvido pela SEMA, GPDEN, DRH, Defesa Civil de Rolante e o Comando Ambiental da Brigada Militar.

Conforme o Diagnóstico Preliminar de Rolante SEMA/RS (2017), durante o mês de dezembro de 2016 e início de janeiro de 2017 foram registradas ocorrências frequentes de precipitação, podendo ser um fator determinante para o escoamento superficial observado na inundação. Registros do dia 05 de janeiro de 2017 indicam a ocorrência de uma elevada precipitação entre as 14:00 h e 18:00 h na região de cabeceira do rio Mascarada, um dos afluentes do rio Rolante, havendo registros com variação entre 100 e 180 mm.

A precipitação observada durante o evento totalizou, aproximadamente a média mensal esperada para o mês de janeiro na região. Conforme relato dos moradores, o pico da cheia, no município de Rolante, ocorreu por volta de 23:00 h do mesmo dia. A vazão de pico foi aferida através de levantamento da área da seção e a estimativa de velocidade no trecho. A Figura 12 destaca 61 pontos limítrofes da inundação coletados em campo após o evento e a mancha de inundação gerada através do modelo HAND nos trabalhos desenvolvidos pelo GPDEN.

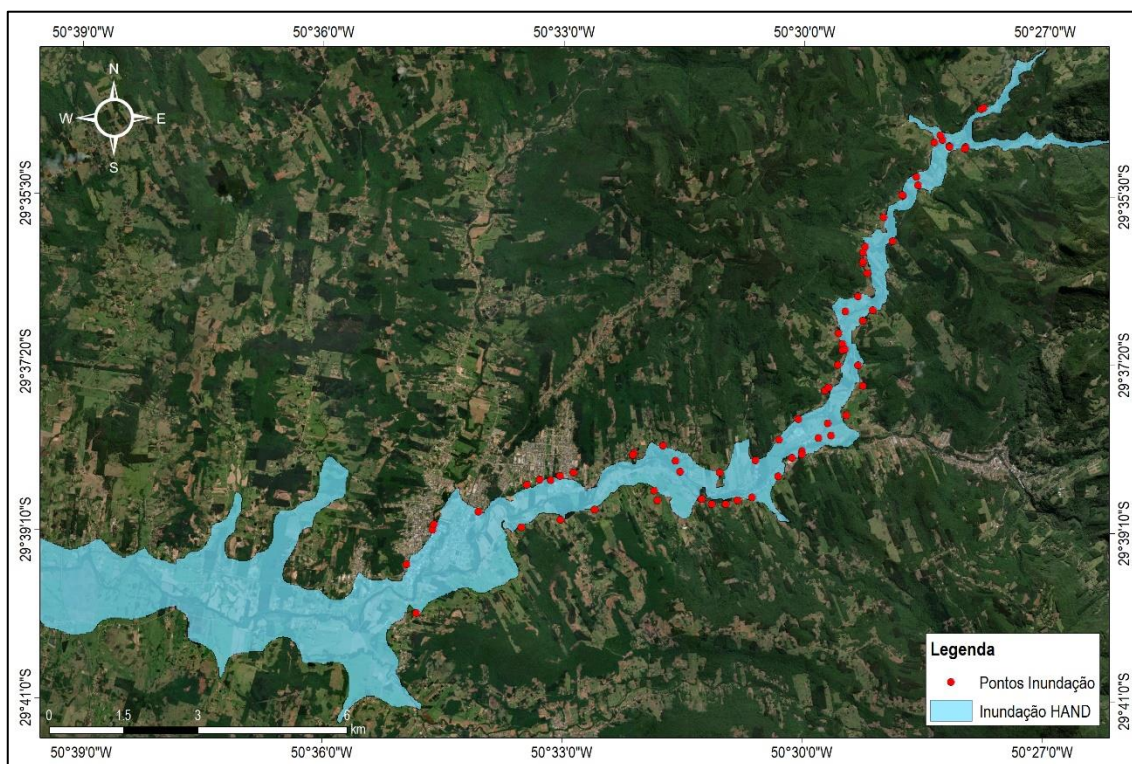


Figura 12. Pontos de inundação coletados e mancha de inundação gerado pelo modelo HAND.
Fonte: Adaptado de SEMA (2017).

Até o evento de 2017, a região não possuía uma rede hidrometeorológica bem estruturada, havendo apenas um pluviômetro oficial para medição no município de Riozinho. Isso dificultou a estimativa adequada da precipitação ocorrida para o evento de 2017, sendo necessário a utilização de dados pluviométricos dos agricultores locais para a estimativa do

volume precipitado. Conforme dados disponibilizados por SEMA/RS (2017) as precipitações ocorridas na região variaram entre 100 e 180 mm.

Após o evento de 2017 o grupo de Pesquisas em desastres naturais iniciou o monitoramento na região, tendo instalado uma estação meteorológica no Corpo de Bombeiros do município de Rolante, um pluviômetro na região de cabeceira do rio Mascaradas e um pluviômetro, sensor de nível e sensor de sedimentos próximo da confluência entre o rio Mascarada e o Arroio Riozinho.

As Figuras 13 e 16 destacam as áreas impactadas e destruição causada pelo evento de inundação de 2017. Conforme pode ser observado nos registros fotográficos, o evento apresentou uma extensa região de impacto. Além disso, foi possível identificar uma elevada carga de sedimentos carregados e depositados nas regiões de impacto, principalmente nas Figuras 14 e 15. Deve ser ressaltado que a quantidade de sedimentos observada nos registros fotográficos corroboram com a hipótese que o fluxo de sedimentos escoados não apresentava característica de um fluido Newtoniano.



Figura 13. Registro fotográfico aéreo da inundação.
Fonte: Adaptado de SEMA (2017).



Figura 14. Registro fotográfico do sedimento depositado após a inundação.
Fonte: Adaptado de SEMA (2017).



Figura 15. Registro fotográfico fluxo no rio Rolante após a inundação do dia 05/07/2017.
Fonte: Portal G1⁴.



Figura 16. Registro fotográfico área inundada no evento.
Fonte: Portal G1⁵.

⁴ Disponível em: <<https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/fotos/2017/01/temporal-provoca-enchente-e-prejuizos-em-rolante-fotos.html#F2278612>> Acesso em: 30/04/2022.

A saturação no solo e a instabilidade nas encostas propiciou o desenvolvimento de diversos escorregamentos de massa durante o evento de 2017. Segundo SEMA/RS (2017), a porção no trecho médio do rio Mascarada foi a região de maiores ocorrências de escorregamentos. As Figuras 17(a) ,17 (b) e 18 destacam, os registros de escorregamentos ocorridos na região após o evento de 2017.

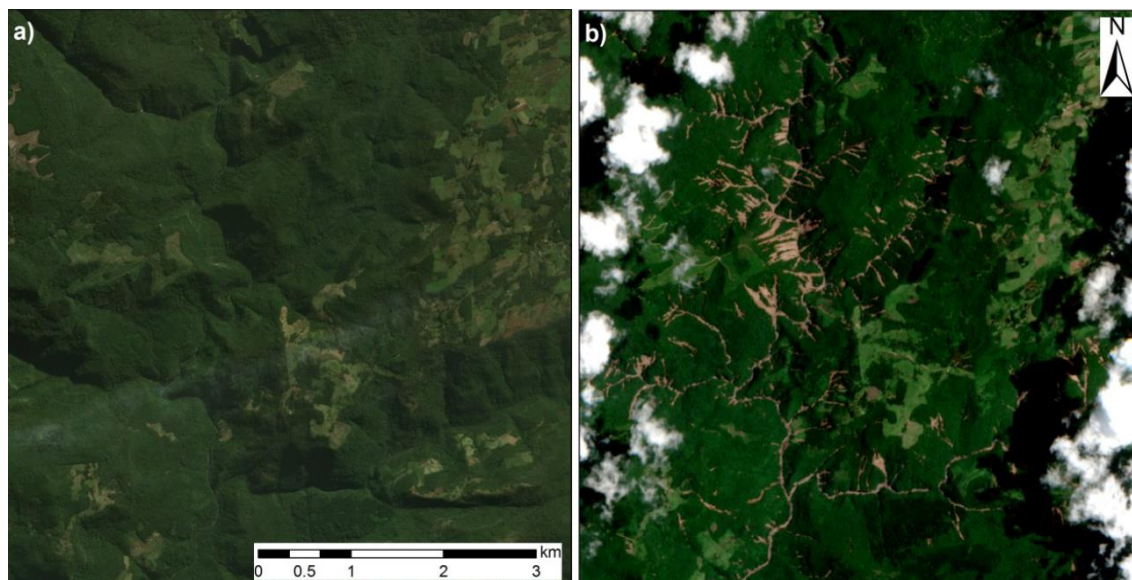


Figura 17. Escorregamentos na parcela do médio rio Mascarada: a) Situação anterior ao evento, b) situação posterior ao evento.

Fonte: SEMA/RS (2017).



Figura 18. Registro fotográfico das cicatrizes de escorregamento.

Fonte: SEMA/RS (2017).

⁵ Disponível em: <<https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/fotos/2017/01/temporal-provoca-enchente-e-prejuizos-em-rolante-fotos.html#F2278628>> Acesso em: 30/04/2022.

Conforme SEMA/RS (2017), as regiões de ocorrências dos escorregamentos apresentavam inclinações próximas de até 70 ° nas encostas. Além disso, são parcelas de solo raso, podendo haver diversas regiões com fraturas e falhas morfológicas. Destaca-se também a presença de neossolo litólico com predomínio de argissolo-vermelho-amarelo nessas regiões.

SEMA/RS (2017) destacou que em algumas regiões, o desprendimento do material convergiu para canais, formando fluxos de detritos em alguns trechos, podendo ter, até mesmo, influenciado nas características do fluxo de água no rio Mascarada e, posteriormente, no rio Rolante. Posto isso, Guirro (2020) avaliou a ocorrência de barramentos naturais durante o evento de 2017 na região do cabeceira do rio mascarada, desenvolvendo um modelo chuva-vazão para a região afetada e analisando o efeito do rompimento de barragens na inundação. Dessa forma, esse trabalho buscou complementar o estudo desenvolvido por Guirro (2020) e SEMA/RS (2017), tendo como objetivo compreender como se o sedimento pode ter sido um fator impactante na mancha de inundação.

4.3. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

O levantamento topográfico foi realizado como forma de complementar as informações do MDT da região de Rolante que será apresentado na seção 4.4. MODELO DIGITAL DE TERRENO. O levantamento ocorreu no trecho mais urbanizado do município de Rolante entre os dias 02/02/2022 e 04/02/2022. Ao todo foram levantadas 14 seções transversais ao longo de, aproximadamente, 8,5 km do rio Rolante.

O início do levantamento e o final estão em acordo com a região urbanizada do município impactada pelo evento de 2017. A distância longitudinal média entre cada uma das seções transversais foi de, aproximadamente, 600 m. Em relação aos pontos das seções transversais, foi definido um caminhamento médio de 5 m na parte molhada, quando possível, ou nos trechos que necessitassem o levantamento de alguma singularidade.

O levantamento topográfico na região foi realizado com RTK (*Real Time Kinematic*) e Estação Total. A utilização de cada equipamento dependeu das características identificadas em cada seção. Contudo, é importante ressaltar que quase todo o levantamento foi realizado com RTK, visto a rapidez no levantamento e por ter apresentado qualidade fixa do sinal GNSS em quase todos os pontos levantados.

Nas margens, foi identificado uma variação de trechos com mata fechada e outros com pouca ou nenhuma vegetação. Posto isso, os levantamentos das margens foram



Figura 20. Base coletora do RTK.



Figura 21. Rover para coleta dos pontos.

Nos pontos que o RTK não apresentou uma boa qualidade de levantamento, foi utilizado a Estação Total da marca Spectra, modelo Focus 2. A base e o prisma estão destacados nas Figuras 22 e 23.



Figura 22. Estação Total



Figura 23. Bastão e Prisma

As Figuras 24, 25, 26 e 27 ilustram alguns registros fotográficos do levantamento realizado no rio Rolante.



Figura 24. Levantamento Topográfico Seção P2



Figura 25. Levantamento Topográfico Seção P4



Figura 26. Levantamento Topográfico Seção P9



Figura 27. Levantamento Topográfico Seção P14

Em relação às estruturas, a região de interesse possui duas pontes ao longo do trecho trabalhado, tendo, os mesmos, sido inseridos no modelo hidrodinâmico. Os registros fotográficos das Pontes 1 e 2 estão destacados nas Figuras 28 e 29, respectivamente.



Figura 28. Estrutura – Ponte



Figura 29. Estrutura – Ponte 2

Por fim, foi realizado o processamento das bases de cada uma das seções levantadas e a sua correção planimétrica e altimétrica. Em média, o tempo de rastreamento de cada uma das bases foi de, aproximadamente, 1:00 h, tendo sido realizado o seu processamento através do PPP-IBGE (Posicionamento por Ponto Preciso). A correção, após o processamento das bases, foi realizada, também, no restante dos pontos de cada seção.

4.4. MODELO DIGITAL DE TERRENO

É essencial que para a modelagem hidrodinâmica da inundação seja utilizado um modelo digital de terreno de elevada qualidade. Em razão da calha principal do rio ter sido representada pela topografia, o MDT serviu de apoio para a representação da planície de inundação do rio Rolante. Dessa forma na parte seca da região foi utilizado um MDT com escala de 1:25.000 e resolução espacial de 2,5 m, estando o mesmo referenciado em altitude ortométrica no sistema de projeção SIRGAS 2000, Zona 22S.

O MDT foi desenvolvido pela Diretoria de Serviços Geográficos do Exército Brasileiro em conjunto com a Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão do estado do Rio Grande do Sul⁶. A qualidade do MDT gerado foi classificado como Classe A, tendo sido produzido a partir de ortoimagens com resolução de 35 cm,

Por fim, o modelo digital de terreno da região de estudo foi desenvolvido pela integração entre as seções topográficas levantadas no trecho do rio Rolante em conjunto com o MDT gerado pelo levantamento aerofotogramétrico. Dessa forma, foi obtido um MDT com resolução espacial de 2,5 m e um alto nível de detalhamento, sendo esse o modelo de entrada do modelo hidrodinâmico.

⁶ O projeto encontra-se em desenvolvimento, mas, futuramente, estará disponível em <https://iede.rs.gov.br/porta1/apps/webappviewer/index.html?id=9281ea56855448adb150cc41f4d4f420>. Acessado em 16/05/2022.

4.5. HIDROGRAMA

Guirro (2020) desenvolveu um modelo chuva-vazão para o evento ocorrido em 2017 na bacia do Rolante. A modelagem foi feita tendo como base as precipitações registradas na bacia e os dados de nível monitorado no rio Mascarada. Como citado anteriormente, a região, até o evento de 2017, possuía uma rede de monitoramento hidrometeorológico composto por poucos postos de medição, sendo isso um fator de dificuldade no desenvolvimento do modelo chuva-vazão para evento. O fluxograma do modelo hidrológico desenvolvido está ilustrado na Figura 30.

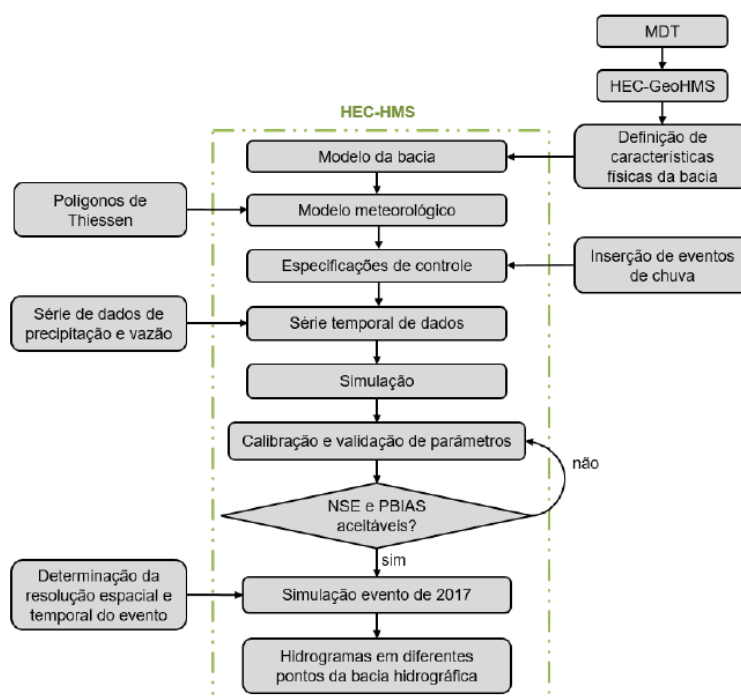


Figura 30. Fluxograma da modelagem Chuva-Vazão.
Fonte: Guirro (2020)

Guirro (2020) desenvolveu o do modelo chuva-vazão tendo como base o método SCS-CN para as perdas, o Hidrograma unitário de Clark para a transformação da chuva em escoamento e o método da onda cinemática para a propagação da cheia ao longo da bacia. O CN foi determinado através dos parâmetros de uso do solo e tipo de solo nas sub-bacias.

Em razão da escassez de dados de vazão monitorados no evento de 2017, Guirro (2020) elaborou uma curva-chave com dados monitorados posteriores a inundação, sendo realizada a calibração do modelo através de quatro eventos e a validação com outros três eventos distintos. Por fim, com o modelo chuva-vazão calibrado e validado, Guirro (2020) simulou o evento de 2017 com as precipitações monitoradas na bacia. Vale ressaltar que a distribuição da chuva na bacia foi realizada pelo método dos Polígonos de Thiessen.

O hidrograma utilizado como referência para as simulações foi o definido por Guirro (2020) no trecho de confluência entre os rios Rolante e o Riozinho. Guirro (2020) determinou a resolução temporal do evento em acordo com a distribuição de Huff (1990), tendo observado maior similaridade com as distribuições temporais hipotéticas de chuva de 3° e 4° quartil. A diferença entre os cenários está na forma de distribuição e temporalidade da concentração de precipitações no evento. O resultado da modelagem para a confluência entre os rios Rolante e Riozinho com os diferentes Quartis está destacado na Figura 31.

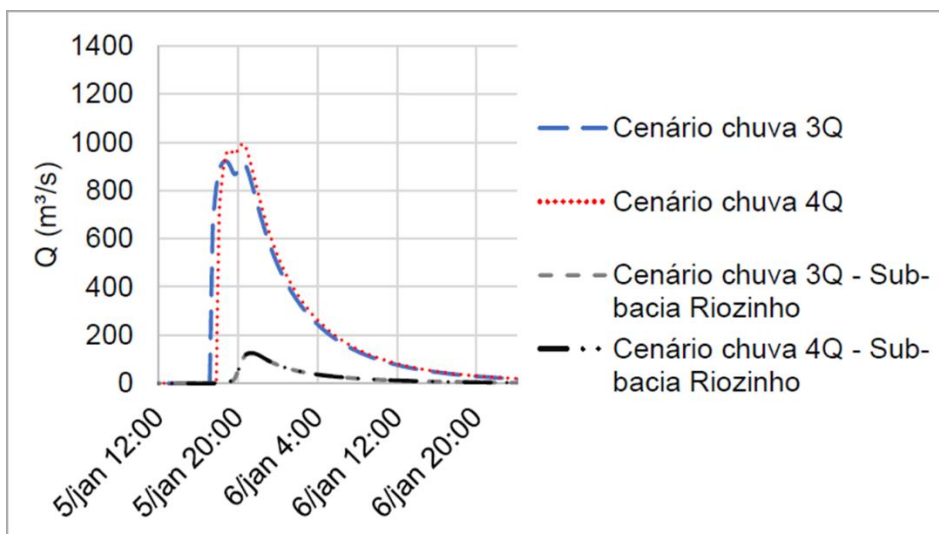


Figura 31. Hidrograma confluência Arroio Riozinho e rio Mascarada com cenário 3Q e 4Q representando a distribuição de Huff (1990) no terceiro e no quarto quartil, respectivamente.

Fonte: Adaptado de Guirro (2020)

Em razão do cenário do cenário 4Q apresentar o maior pico de vazão no hidrograma, o mesmo foi utilizado na simulação hidrodinâmica do evento. O hidrograma teve início às 00:00 h do dia 05/01/2017 e término às 23:50 h do dia 08/01/2017. O pico de vazão máxima no hidrograma foi de, aproximadamente, 970 m³/s.

4.6. USO E COBERTURA DO SOLO

Os diferentes usos e coberturas do solo são fatores de influência direta no escoamento de um fluido, podendo haver uma elevada variação de nível e velocidade em um escoamento dependendo da camada presente no terreno. Essa influência pode ser ainda maior quando o fluido excede a calha principal do rio e atinge zonas da planície de inundação.

Essas parcelas, por apresentarem diferentes camadas e, por consequência, características distintas no escoamento, podem modificar consideravelmente o seu comportamento e o deslocamento do fluido na região. Nesse estudo, em razão da região não

apresentar grande variedade de uso e cobertura do solo e buscando sua simplificação, optou-se em utilizar apenas quatro classes para uso e cobertura do solo.

Os usos e coberturas do solo na região foram determinados através de imagens do Satélite Landsat 8⁷ por ser gratuito e de fácil acesso. Essa missão de observação foi lançada em 2013 e segue em operação até os dias atuais. O satélite está equipado de um sensor OLI (*Operational Land Imager*), podendo variar, para esse sensor, em até 9 bandas espectrais e possuindo uma resolução espacial de 30 m.

Para a determinação do uso do solo na região foram utilizadas a combinação entre as bandas Infravermelho Próximo, Vermelho e Verde, 5, 4 e 3, respectivamente. Essa combinação de bandas tem como resultado uma imagem em infravermelho colorido, sendo possível destacar facilmente as parcelas de vegetação, mancha urbana e água no Software GIS. A vegetação foi definida como de Floresta Estacional Semidecidual, tendo como base os dados da FEPAM (2010).

A combinação das bandas foi realizada utilizando a ferramenta *Composite Bands* do software ArcGis 10.5. A determinação dos diferentes usos e coberturas do solo na região foi realizada através da ferramenta de Classificação Supervisionado também do Software ArcGis 10.5. Para isso são amostradas os diferentes tipos de uso e cobertura do solo presentes na região. O software, através das diferentes cores RGB presentes no pixel, processa automaticamente e distingue cada um dos diferentes tipos de parcelas amostrados, tendo como base as amostragens realizadas.

Por fim, deve ser atribuído para cada um dos usos e coberturas do solo um número de Manning. O número de Manning tem como objetivo representar a resistência de um fluido em seu deslocamento sobre uma determinada superfície, sendo, para isso, definido um coeficiente de rugosidade variável para cada tipo de material. Os coeficientes de rugosidade utilizados no modelo estão destacados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de Manning conforme a *National Land Cover Database*.

Uso e Cobertura do Solo	Coefficiente de Manning
Rio	0,025
Zona Urbana Média	0,08
Floresta Estacional Semidecidual	0,08
Campo	0,025

⁷ Disponível em: < <https://earthexplorer.usgs.gov/> > Acesso em: 30/04/2022.

4.7. CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

Condições iniciais e de contorno são restrições impostas ao modelo para a simulação hidrodinâmica. Essa restrição pode ser tanto uma faixa de variação de uma variável dentro do modelo quanto a região simulada. No modelo 2D do HEC-RAS deve ser definido a área no qual a simulação irá ocorrer, sendo delimitada uma poligonal no próprio software e tendo as áreas de maior elevação como limítrofes do contorno.

A região de contorno foi estipulada muito além dos pontos observados da inundação com o objetivo de permitir que a simulação seja realizada sem impeditivos computacionais. Além disso, mesmo com uma área consideravelmente maior que a região observada na inundação, não foi identificado lentidão na etapa de processamento.

Para a determinação dos trechos de início e fim da simulação, nos modelos 2D do HEC-RAS, é necessário definir uma linha na região de montante da simulação e outra na de jusante. Destaca-se também que foram utilizados dois pontos de apoio nas análises dos resultados das simulações, um próximo ao início, montante; e outro no final do modelo, jusante. A área 2D definida para o modelo, os pontos de apoio para a análise de resultados e as linhas de início e fim das simulações estão destacados na Figura 32.

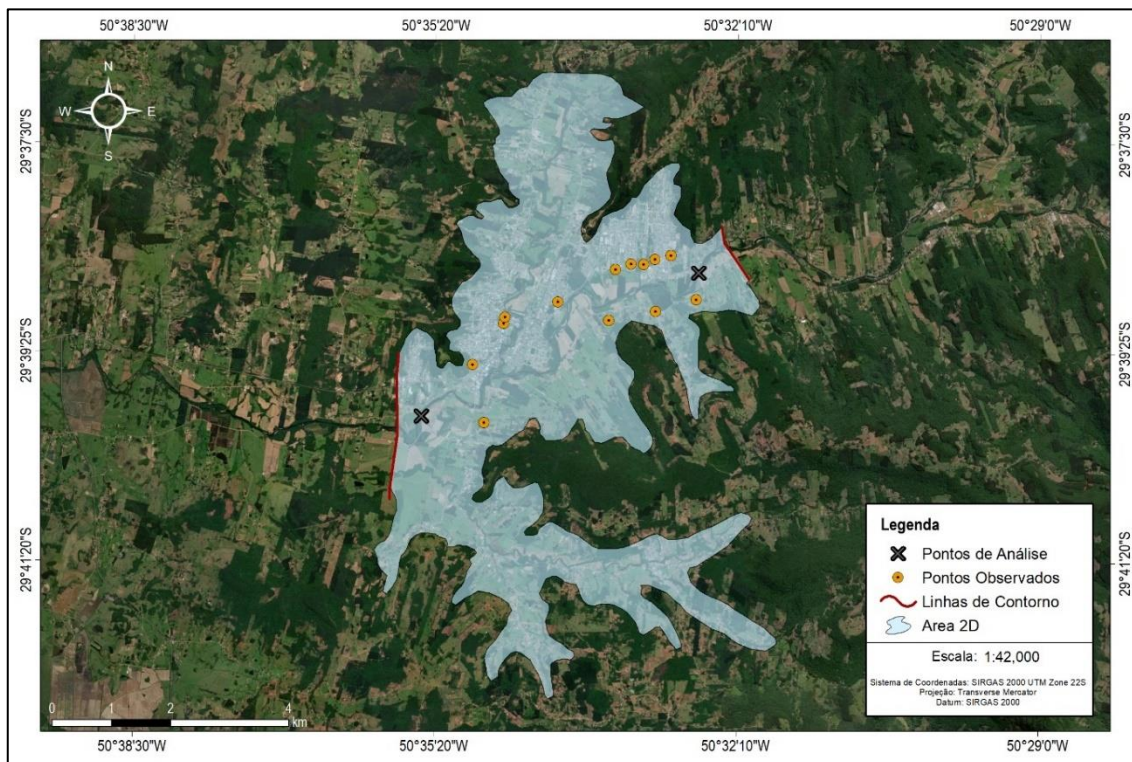


Figura 32. Condição de contorno do modelo hidrodinâmico e pontos de análise

Para a condição inicial de contorno do modelo, foi definido como dado de entrada o hidrograma elaborado por Guirro (2020) para o evento de inundação de 2017. O dado de

entrada iniciou às 00:00 h do dia 05/01/2017 e terminou às 23:50 h do dia 08/01/2017, sendo realizado uma simulação de 96 horas.

Em relação à linha de contorno de jusante, a condição de saída foi definida pela profundidade normal do escoamento, tendo sido utilizado a declividade média do canal como parâmetro de entrada para o modelo. A declividade média foi calculada através do comprimento total do trecho de rio no modelo e a diferença entre a cota da profundidade máxima da primeira seção de montante com a última seção de jusante.

Com o objetivo de otimizar o tempo de simulação e por não apresentar nenhuma ou pouca influência no evento abordado, foi desconsiderada a ação da evapotranspiração, velocidade do vento, contribuições laterais, precipitação na região simulada e características qualitativas do sedimento ao longo do escoamento. Essa abordagem foi adotada com o intuito de diminuir as variáveis de entrada do modelo e pela pouca influência que cada uma possui no evento.

4.8. MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Concomitante ao evento ocorrido no ano de 2017, foi identificado uma elevada quantidade de sedimentos, após o recuo da água para a calha principal do rio, depositados na área impactada pela inundação. Essa situação pode ser observado nos registros fotográficos realizados após e durante o evento de 2017. A presença de sedimentos no fluxo pode modificar as características do fluido e do escoamento através da interação entre as partículas e entre o fluido e as partículas.

Em razão do volume elevado de sedimentos no fluxo, o trabalho considerou que, durante o evento, o fluido poderia ter características similares de um fluxo hiperconcentrado. Além disso, conforme indicado por USACE (2020), escoamentos com pelo menos 5 % de sedimentos em sua concentração volumétrica podem ser considerados como fluidos hiperconcentrados.

A diferença no comportamento de um fluido com pouca ou nenhuma concentração de sedimentos e um fluido hiperconcentrado está na concentração de sedimentos presentes no escoamento, não havendo uma concentração exata dos limites mínimos e máximos do sedimento no fluxo para a sua definição. A alteração na concentração de sedimento tem como consequência uma variação na tensão de cisalhamento inicial do fluido, bem como na sua viscosidade dinâmica, devendo ser considerado que, quanto maior a concentração de sedimentos no fluido maior será a sua tensão de cisalhamento inicial e viscosidade dinâmica.

Conforme Julian e Lan (1991), silte e argila em suspensão, com uma concentração volumétrica variando entre 15 e 45 % podem apresentar uma viscosidade dinâmica 1,5 à 4 vezes maior do que a viscosidade dinâmica da água. A mudança nessas características do fluido tem como resultado uma alteração da representação do seu escoamento, variando de um escoamento Newtoniano para um escoamento Não-Newtoniano.

Um escoamento Não-Newtoniano pode ser representado por diferentes métodos, sendo, a sua escolha, dependente das propriedades do fluido trabalhado. O USACE (2020) orienta, para a representação de um escoamento com fluidos hiperconcentrados, a utilização do método de Bingham em modelagens hidrodinâmicas. Dessa forma, o modelo de entrada no HEC-RAS 6.0 para escoamentos Não-Newtonianos foi o método de Bingham.

Devido à ausência de sensores de medição de sedimentos e a não amostragem de material durante o evento de 2017, os parâmetros de entrada do modelo Não-Newtoniano foram obtidos pela análise reológica de sedimentos desenvolvida por Rickenmann (1991). O trabalho analisou a influência do transporte de sedimentos em fluxos hiperconcentrados tendo como base os seus efeitos com o aumento da densidade e da viscosidade do fluido.

Nesse cenário Rickenmann definiu, através de um viscosímetro rotacional, a tensão cisalhante inicial e a viscosidade dinâmica para Fluidos de Bingham com diferentes concentrações de sedimentos. Rickenmann variou a concentração de argila Opalinus de 0 até 22,1 % e definiu sua tensão cisalhante inicial e viscosidade dinâmica em diferentes cenários. Os dados reométricos obtidos estão destacados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de tensão cisalhante inicial e viscosidade dinâmica para fluidos com diferentes concentrações de sedimentos definidos por Rickenmann (1991).

Concentração de Sedimentos (%)	Tensão Cisalhante inicial (Pa)	Viscosidade Dinâmica (centipoise)
0,0	0,0	1,02
4,7	0,44	1,93
10,0	2,82	3,60
14,4	7,29	5,92
19,6	23,6	20,0
22,1	40,8	34,3

Como o trabalho de Rickenmann limitou a estimativa das tensões cisalhantes inicial e viscosidade dinâmica até uma concentração de 22,1 % de sedimentos, foi necessário extrapolar os resultados até a concentração de 28,0 % através de uma linha de tendência exponencial e definir uma equação da relação entre os dados. O gráfico dos dados, bem como a linha de tendência e a equação gerada, estão destacados nas Figuras 33 e 34.

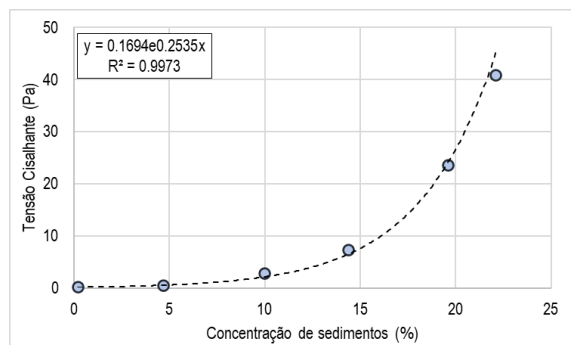


Figura 33. Gráfico e equação da relação entre Tensão Cisalhante inicial e Concentração de Sedimentos.

Fonte: Adaptado de Rickenmann (1991).

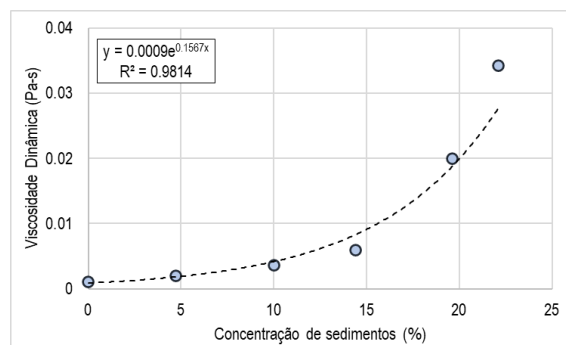


Figura 34. Gráfico e equação da relação entre Viscosidade Dinâmica e Concentração de Sedimentos.

Fonte: Adaptado de Rickenmann (1991).

Através da extrapolação dos dados reométricos estimados por Rickenmann (1991) na relação entre tensão cisalhante inicial, viscosidade dinâmica e concentração de sedimentos, foram estimados valores dessas variáveis até a concentração de sedimentos de 28 % no fluido. Essa concentração foi definida como o ponto no qual a mancha de inundação se sobrepôs aos pontos de inundação observados no evento. Os valores de tensão cisalhante inicial e viscosidade dinâmica extrapolados dos dados de Rickenmann estão destacados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores de tensão cisalhante inicial e viscosidade dinâmica para fluidos com diferentes concentrações de sedimentos extrapolados exponencialmente dos dados de Rickenmann (1991).

Concentração de Sedimentos (%)	Tensão Cisalhante Inicial (Pa)	Viscosidade Dinâmica (Pa-s)
25	95,7	0,0452
26	123,4	0,0529
27	159,0	0,0619
28	204,9	0,0724

Em razão do trabalho proposto identificar o comportamento da inundação variando a concentração de sedimentos e, por consequência, a tensão cisalhante inicial e a viscosidade dinâmica, foram realizadas simulações tanto com água (concentração nula de sedimentos) quanto com fluidos com maior carga de sedimentos. Visto esse cenário, foi necessário realizar as simulações com fluido Newtoniano e Não-Newtoniano, dependendo da concentração de sedimentos simulado.

Além disso, as simulações foram realizadas utilizando o modelo de Difusão (DWE). Conforme USACE (2020), ela apresenta maior estabilidade nas simulações quando comparado com o método de Ondas Rasas, sendo recomendado a sua utilização em simulações hidrodinâmicas.

O trabalho foi composto de 10 simulações no total, tendo sido realizado simulações com os dados medidos por Rickenmann (1991) e os dados extrapolados até uma concentração

de 28 % de sedimentos. Essa metodologia foi adotada com o objetivo de identificar a influência e a sensibilidade do sedimento na inundação. Destaca-se que a vazão de entrada bem como os outros parâmetros foram mantidos iguais em todos os cenários.

Todas as simulações foram realizadas considerando um período de warming up do modelo de 10 horas e um Ramp Up Friction de 0,1. O valor do parâmetro theta utilizado foi de 1,0, ou seja, favorecendo a estabilidade do modelo. Os demais parâmetros da simulação foram deixados nas configurações padrão do HEC-RAS. Além disso, em razão da estabilidade do modelo numérico, o intervalo computacional utilizado nas simulações foi de 1 minuto.

As simulações abrangeram todo o período do hidrograma definido por Guirro (2020), tendo iniciado em 05/01/2017 às 00:00 h e finalizado em 08/01/2017 às 23:50 h. Por fim, destaca-se também que o hidrograma utilizado no modelo de entrada possui uma resolução de 10 minutos.

4.9. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados tem como objetivo identificar, através das diferentes manchas máximas de simulação, as simulações que apresentaram os melhores resultados entre os cenários propostos. Como foram coletados pontos em campo após o evento de 2017 foi possível identificar a área de abrangência da inundação, tendo sido definido, como melhor resultado, a mancha que tivesse maior proximidade com esses pontos observados.

Buscando uma análise métrica, além da visual, foi utilizado o módulo TAUDEM (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Model*) junto ao software ArcGis 10.5 para a análise da mancha com área mais próxima dos pontos observados. Essa ferramenta tem como objetivo auxiliar no processamento de informações hidrológicas através da topografia do terreno.

A ferramenta dentro do TAUDEM utilizada na análise das manchas de inundação foi o *D-Infinity Distance Down*. Como dado de entrada para a ferramenta é necessário inserir o MDT, a rede de drenagem e o *raster* da Direções infinitas do escoamento. Ela tem como objetivo estimar a distância percorrida do escoamento entre cada célula de um determinado Grid percorrendo uma distância no sentido de maior altitude até o de menor altitude.

Para o cenário em que os pontos observados estão fora da mancha de inundação, foi possível calcular a distância utilizando o MDT modificado do modelo hidrodinâmico. Contudo, na situação em que os pontos estavam dentro da mancha de inundação, foi

necessário inverter o MDT, forçando para que a maior cota estivesse dentro da área inundada e a menor cota fora da área.

Dessa forma, foi possível estimar as distâncias entre as manchas de inundação e os pontos observados limítrofes da inundação levantados em campo através do método *D-Infinity Distance Down* e o *D-Infinity Distance Down Inverso*. A Figura 35 ilustra simplificada como os dois métodos estimam a menor distância através de caminhos preferenciais em cada pixel do MDT.

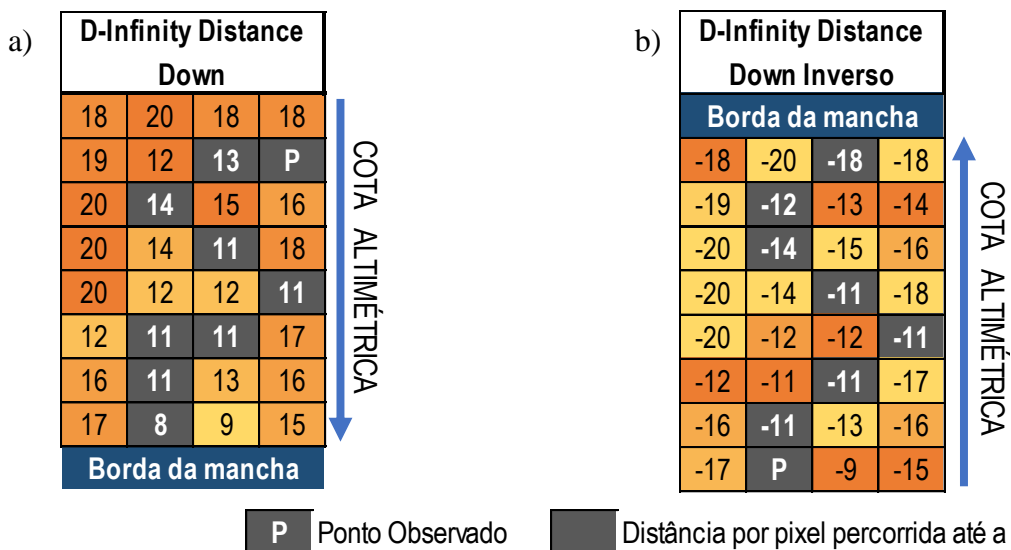


Figura 35. Representação dos métodos *D-Infinity Distance*: a) *Down*; b) *Down Inverso*.

A ferramenta *D-Infinity Distance Down* calcula, através dos caminhos preferenciais, a distância do ponto observado até a borda da mancha de inundação, sendo o primeiro em uma cota mais elevada que o segundo. A estimativa das distâncias foram realizadas pelo método de Pitágoras, tendo como base o menor caminho possível de caminamento.

Como o uso da ferramenta está direcionado para a rede de drenagem do MDT, foi necessário tratar o MDT para a estimativa da distância até a borda das manchas de inundação. O tratamento consistiu em definir a borda da mancha de inundação como a rede de drenagem do MDT. Assim, como a ferramenta *D-Infinity Distance Down* utiliza esse parâmetro como entrada no modelo, o método tratou como rede de drenagem a borda da mancha de inundação, forçando o cálculo da menor distância por Pitágoras até a sua borda. O mesmo foi feito com o modelo *D-Infinity Distante Down inverso*; porém com cotas invertidas do MDT.

O tratamento foi realizado em cada um dos cenários simulados, tendo sido utilizado um método iterativo para agilizar o processamento das informações em cada um dos cenários. A iteração foi realizada com a ferramenta *ModelBuilder* do software ArcGis 10.5, sendo destacado nas Figuras 36 o passo a passo dos procedimentos.

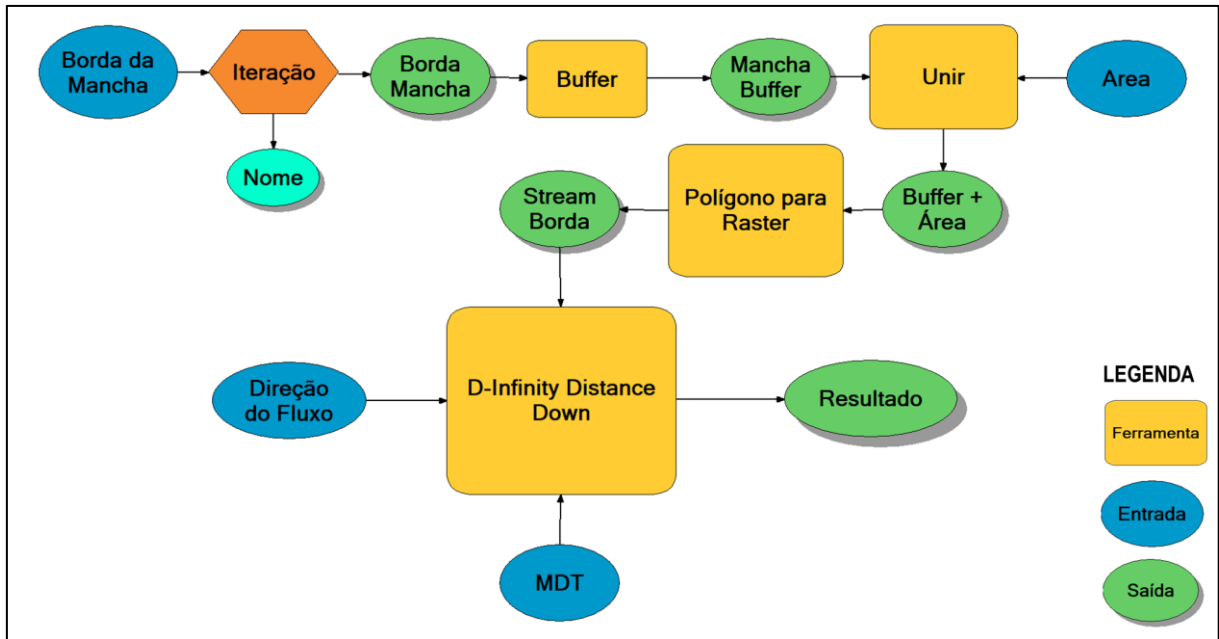


Figura 36. Modelo Iterativo *D-Infinity Distance Down*.

No Modelo *D-Infinity Distance Down* foi utilizado como parâmetro de entrada o menor caminho por Pitágoras para 8 direções, tendo como resultado um *raster* com as distâncias dos caminhos preferenciais até as bordas de cada mancha de inundação. Dessa forma, nos pontos de inundação observados, utilizou-se a ferramenta *Extract Multi-Values*, definindo-se a distância dos pontos até a borda da mancha de inundação máxima em cada um dos cenários simulados.

Inicialmente, foi analisado visualmente a relação entre os pontos observados com as manchas simuladas no HEC-RAS 6.0. Posterior a isso, foi utilizado a ferramenta *D-Infinity Distance Down* com o intuito de padronizar a análise da distância entre as manchas de inundação e os pontos observados. As coordenadas dos pontos observados na inundação utilizados como referência métrica estão destacados na Tabela 5.

Tabela 5. Pontos limítrofes observados na inundação de 2017.

Ponto Observado	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Altitude ortométrica (m)
P1	543772.74	6720784.50	46.7
P2	543504.14	6720718.81	46.3
P3	543311.01	6720635.57	44.5
P4	543097.30	6720638.61	46.9
P5	542832.89	6720544.88	44.1
P6	544197.50	6720037.19	51.5
P7	541856.44	6719999.64	44.0
P8	543511.64	6719833.77	47.2
P9	540961.75	6719740.56	41.7

Ponto Observado	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Altitude ortométrica (m)
P10	542721.19	6719686.13	44.1
P11	540938.52	6719633.60	41.7
P12	540413.88	6718943.08	39.0
P13	540604.44	6717956.45	39.8

Por fim, como forma de identificar a mancha com menor distância entre os pontos observados e a borda da área inundada na simulação, foram definidas a média, o desvio padrão das distâncias e o Erro Médio Quadrático (RMSE), Equação (10), de cada uma das manchas máximas de inundação.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\gamma_i - \gamma)^2} \quad (10)$$

Onde n é o número de pontos observados, γ_i é a distância mínima obtida (m) e γ é a distância mínima pretendida (m).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. DADOS DE ENTRADA GERADOS

A etapa inicial do trabalho foi analisar o levantamento topográfico das 14 seções no rio Rolante, tendo sido avaliada a existência de pontos espúrios no levantamento bem como se a seção transversal estava condizente com os registros fotográficos feitos em campo. Após a consistência dos dados, foram processados o PPP de cada uma das bases rastreadas nas seções. A partir dos dados dos PPPs processados pode-se corrigir os pontos topográficos coletados nas seções.

Tendo sido corrigido o levantamento topográfico, foram transformadas as altitudes elipsoidais de cada um dos pontos em altitudes ortométricas. As ondulações geoidais de cada um dos pontos foram obtidas pelo software MAPGEO 2015, disponibilizado pelo IBGE. Por fim, foram extraídas as altitudes do MDT original de 2,5 m e comparadas com as altitudes dos pontos topográficos levantados em campo. Essa comparação foi útil para avaliar se as altitudes entre os dois levantamentos estavam consistentes e apresentavam similaridades.

Como forma de exemplificar a consistência das informações, foram destacados os Perfis Transversais das Seções PF10 e PF02, Figuras 37 e 40 respectivamente. Os registros fotográficos das seções PF10 e PF02 estão ilustrados nas Figuras 38 e 39, e 41 e 42, respectivamente. As demais seções levantadas em campo são apresentadas no APÊNDICE A.

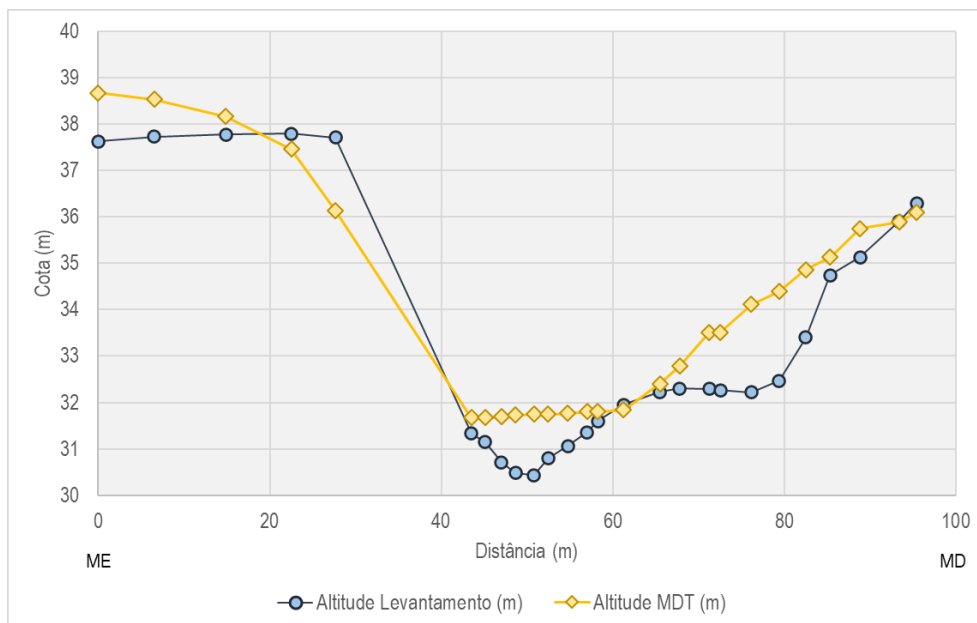


Figura 37. Perfil transversal da seção PF10



Figura 38. Registros fotográficos da seção PF10 - Margem Esquerda



Figura 39. Registros fotográficos da seção PF10 - Vista jusante e Margem Direita

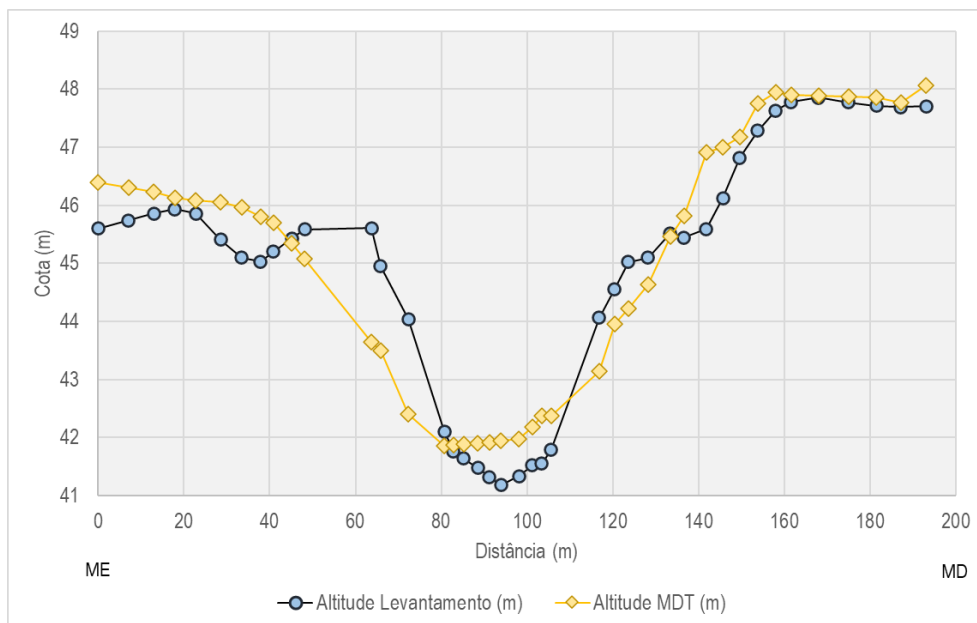


Figura 40. Perfil transversal da PF2



Figura 41. Registros fotográficos da seção PF2 - Margem Esquerda

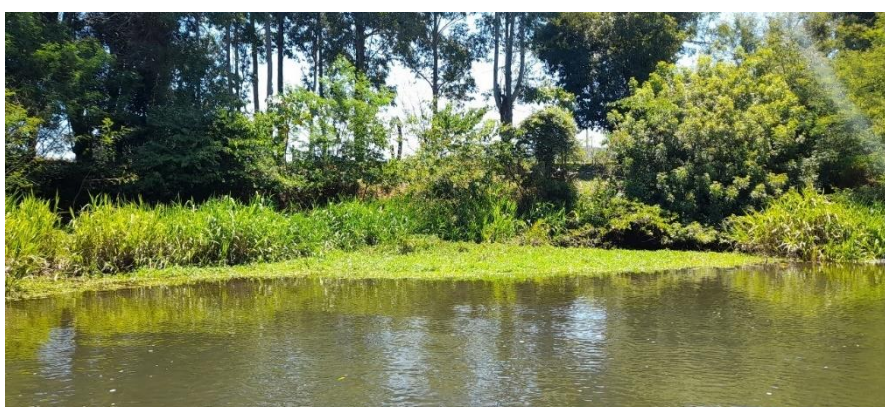


Figura 42. Registros fotográficos da seção PF2 - Margem Direita

No Software HEC-RAS 6.0 foram importados os pontos topográficos levantados e o MDT da região trabalhada. Além disso, foi definida uma linha longitudinal centralizada no meio do canal, tendo como objetivo delimitar o rio Rolante no trecho de interesse. As seções

topográficas foram interpoladas entre si e, posteriormente, foram avaliadas junto com o MDT original. Também, buscando suavizar qualquer possível degrau ou inconsistência entre os dois parâmetros, foram ajustados os pontos nas margens em relação ao MDT.

No módulo *RAS Mapper* do HEC-RAS 6.0, através das seções topográficas levantadas e interpoladas, foi gerado um MDT da calha do rio Rolante. Em posse desse MDT e do MDT da região de Rolante, foi gerado um novo MDT, tendo o primeiro sobreposto o segundo. O trecho modificado da calha principal, bem como o MDT original estão destacados na Figura 43.

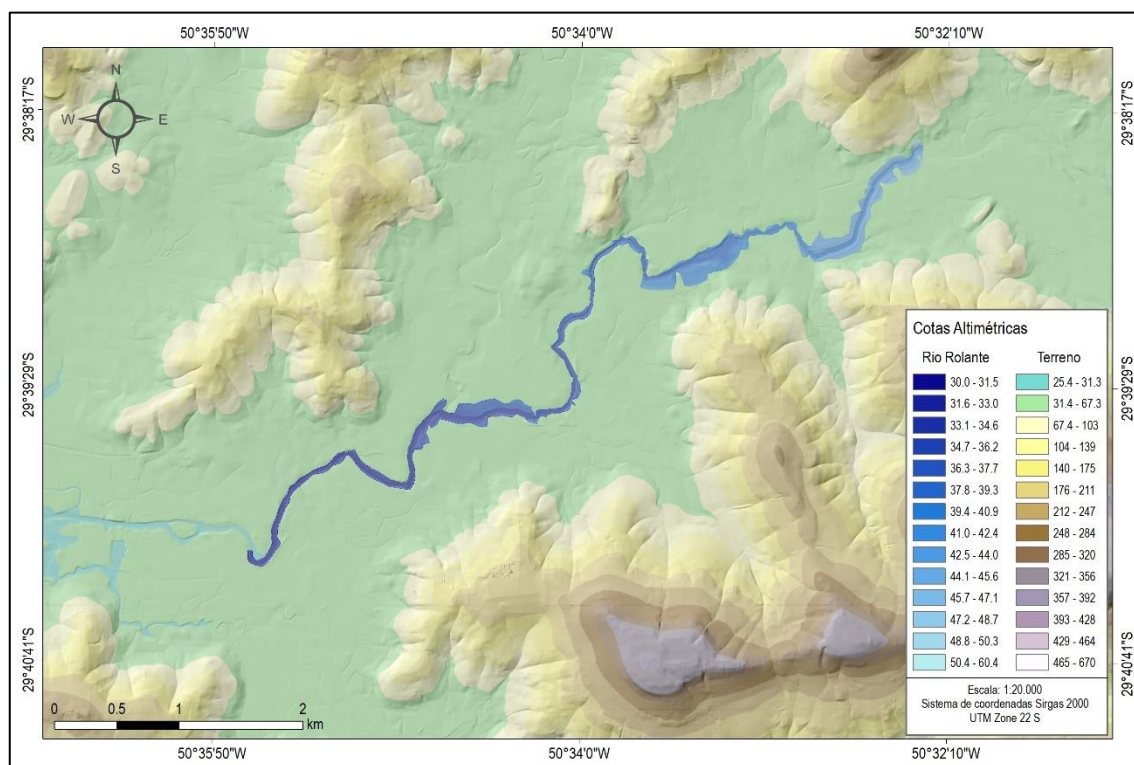


Figura 43. Modelo Digital de terreno: original e calha do rio Rolante.

O uso e cobertura do solo foi definido por uma imagem em Infravermelho Colorido do *LandSat 8*. Através dessa imagem definiu-se amostras de uso e cobertura do solo na região, tendo sido amostradas as áreas urbanas, os campos, as mata e a água. Após um número adequado de amostragens, foi utilizado a ferramenta *Interactive Supervised Classification* do software ArcGis 10.5.

Conforme a classificação do uso e cobertura do solo na área de estudo, a região possui maior predominância de áreas de mata representando 14.8 km² da área total. Em seguida são observados 8,2 e 7,9 km² de áreas de campo e zonas urbanas, respectivamente. A calha principal do rio Rolante representou apenas 0.27 km² na área de estudo. O resultado da classificação supervisionada está ilustrado na Figura 44.

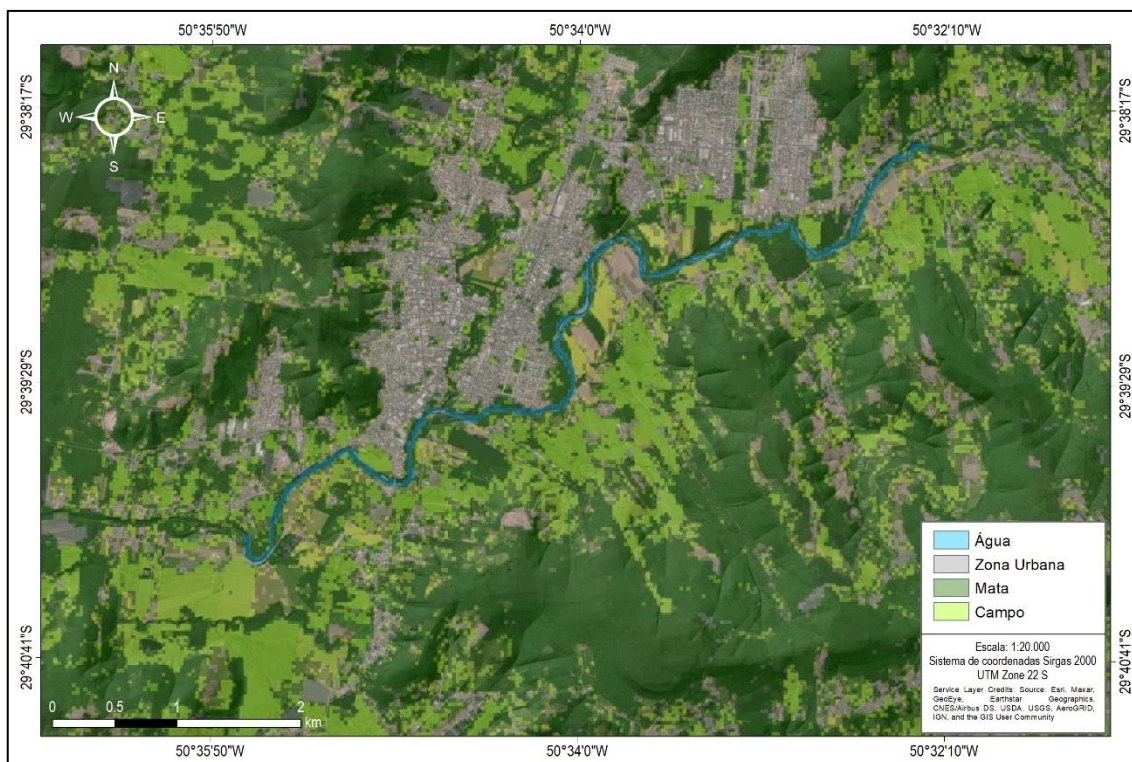


Figura 44. Uso e Cobertura do Solo utilizado no modelo hidrodinâmico.

Por fim, foram atribuídos valores de Manning para cada um dos usos e cobertura do solo, conforme destacado na Metodologia. Para a importação do *raster* gerado, no HEC-RAS 6.0, foi utilizado a ferramenta *Land Cover Layer* no módulo *Ras Mapper*.

O trecho do rio Rolante, na calha do rio principal, possui apenas duas estruturas que podem interferir no escoamento, uma ponte próxima da seção 2 e outra da seção 10. Durante o levantamento topográfico foram realizados levantamentos de pontos para definir o comprimento, a largura e as cotas das pontes. Através desses pontos levantados, foram definidas as dimensões das estruturas.

Para a modelagem, as pontes foram dimensionadas apenas com a estrutura superior, não sendo considerado os pilares existentes. Essa condição foi proposta por não haver disponibilidade de dados dos vãos entre os pilares, largura e comprimento dos mesmos. Os perfis das pontes modeladas estão ilustrados nas Figuras 45 e 46.

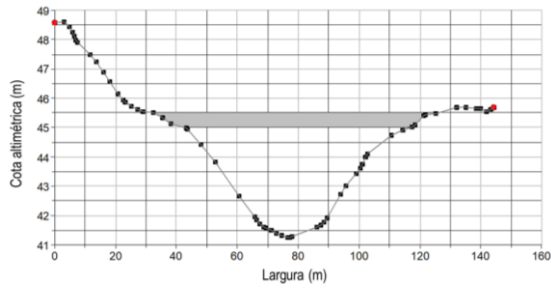


Figura 45. Perfil Ponte 1
 Fonte: Adaptado de HEC-RAS 6.0

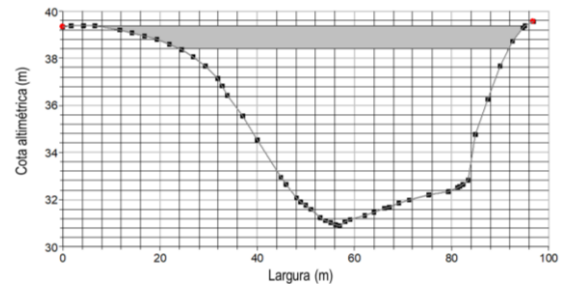
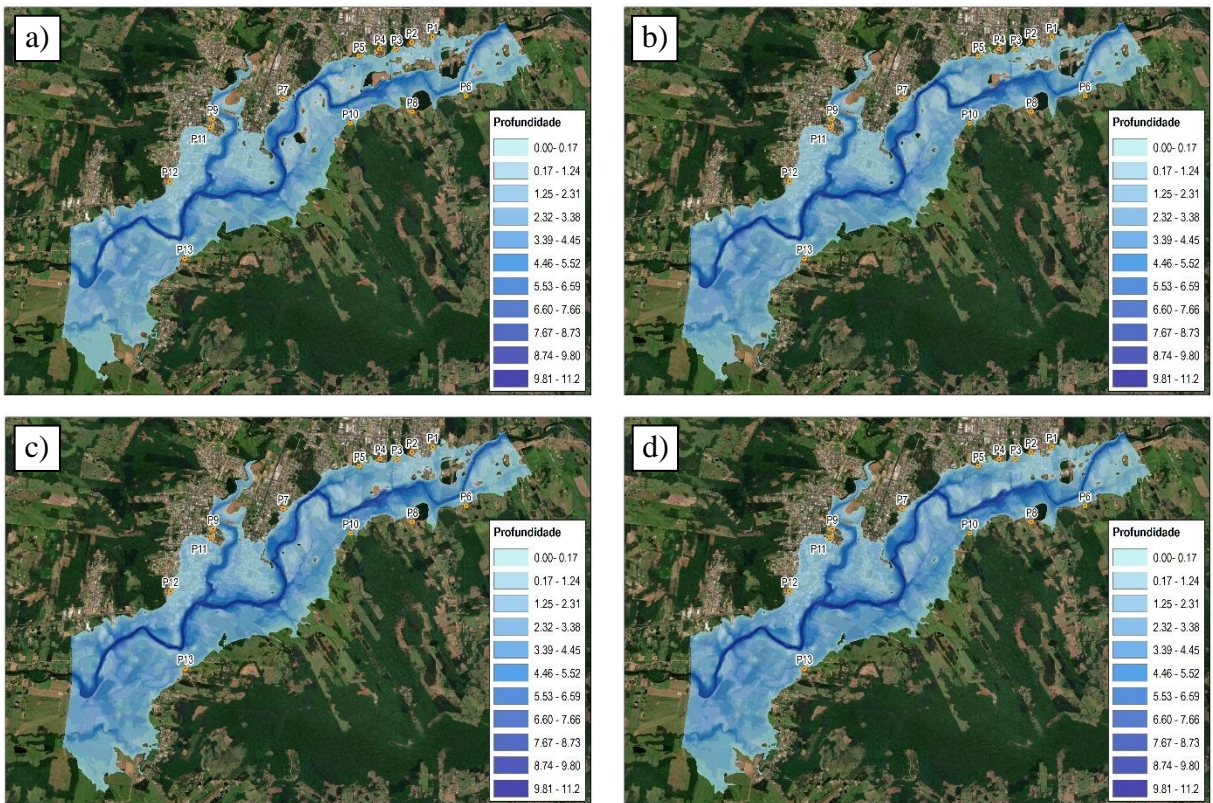


Figura 46. Perfil Ponte 2
 Fonte: Adaptado de HEC-RAS 6.0

5.2. SIMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS

O HEC-RAS 6.0, como resultado da modelagem 2D, gera um *raster* com as profundidades calculadas durante a simulação e, também, as suas respectivas velocidades. As manchas de inundação máximas obtidas nas simulações estão destacadas na Figura 47.



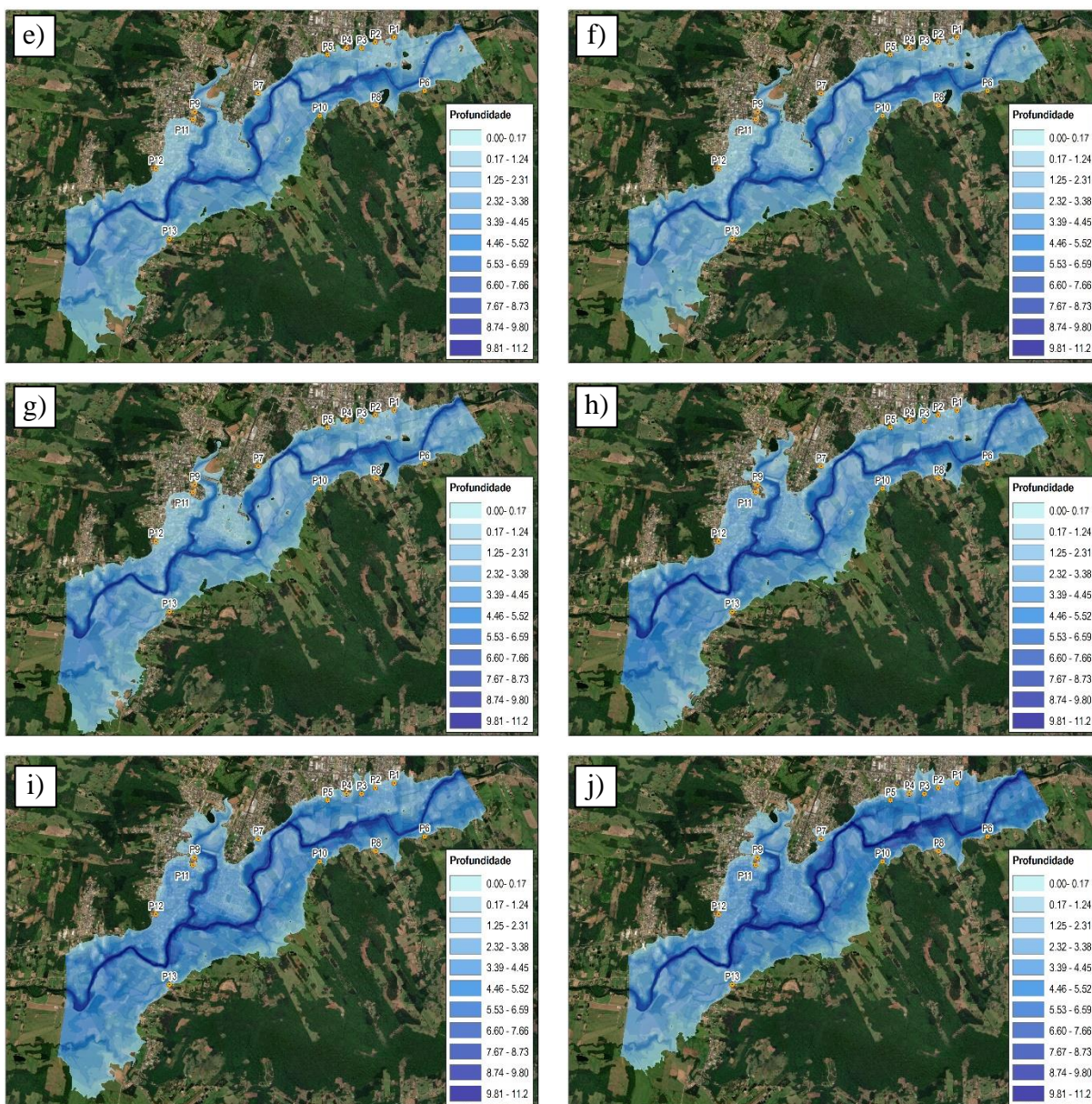


Figura 47. Área inundada máxima para diferentes concentrações de sedimentos: a) Sem concentração; b) Concentração de 4 %; c) concentração 10 %; d) concentração 14 %; e) concentração 19 %; f) concentração 22,1 %; g) concentração 25 %; h) concentração 26 %; i) concentração 27 %; j) concentração 28 %.

As simulações foram realizadas até o momento no qual todos os pontos observados da inundação de 2017 foram atingidos ou sobrepostos. Nesse cenário, pode ser observado que essa situação somente é atingida nas Figuras 47(i) e (j), cenários em que as simulações apresentaram as maiores profundidades.

Conforme identificado na Figura 47(a), o cenário sem concentração de sedimentos foi validado apenas pelos pontos P3, P5, P10, P12 e P13, tendo, o restante dos pontos, apresentado zonas sem inundação. Pelo acréscimo de sedimentos foi observado um aumento nas manchas de inundação máximas, tanto na área quanto nas profundidades de cada um dos

cenários simulados. Contudo, conforme destacado na Figura 48, a relação entre Área x Concentração de sedimentos apresentou um crescimento permanente.

É possível observar que, inicialmente, após o aumento na concentração de sedimentos, tem-se uma evolução aproximadamente linear entre a área e concentração de sedimentos até o cenário com 14 %, apresentando uma estabilidade até o cenário de 19 %. Após um pequeno decréscimo de área, até o cenário com concentração de sedimentos de 27 % foi observado uma rápida elevação na área inundada. Por fim, destaca-se o acentuado decréscimo de área entre a concentração de 27 % e 28 %.

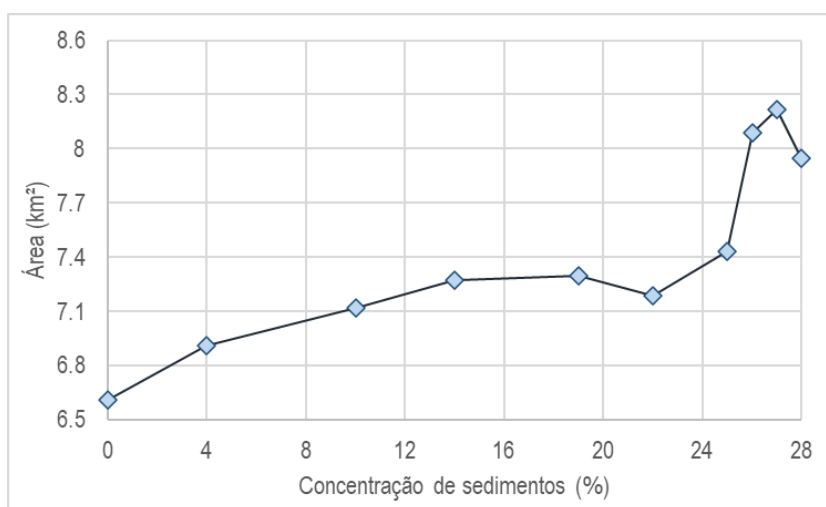


Figura 48. Relação da área inundada com a concentração de sedimentos.

Conforme analisado nos diferentes cenários propostos, a simulação com concentração de sedimentos nula, apresentou a menor área nas simulações, havendo uma subestimativa da área inundada quando validado com os pontos observados no evento. Contudo, apesar das áreas apresentarem um crescimento com a elevação da concentração de sedimentos, é possível identificar uma concentração de pico limitante para a área, tendo o cenário de maior concentração de sedimentos uma área menor que a concentração de 27 %. Isso pode ter ocorrido em razão do escoamento não ter energia suficiente para propagar a inundação ao longo da sua planície, limitando a sua abrangência em uma área menor quando comparado com um fluido de menor concentração de sedimentos.

Por fim, foram alocados dois pontos nas simulações, um à montante e outro à jusante da modelagem hidrodinâmica. Através desses pontos pode-se observar o comportamento das profundidades e as velocidades ocorridas durante as simulações. Todos os cenários apresentaram uma rápida elevação na profundidade e nas velocidades simuladas, partindo do valor zero. Essa situação ocorreu devido ao hidrograma não apresentar uma vazão de base e se elevar rapidamente até a vazão de pico do evento.

Buscando facilitar a visualização do comportamento do escoamento nas diferentes simulações realizadas, foram analisadas apenas as relações de profundidade e velocidades do escoamento nos cenários sem concentração de sedimentos, com concentração de 14 %, 19 %, 26 % e 28 %

As Figuras 49 e 50 destacam a relação da profundidade pela concentração de sedimentos e da velocidade do escoamento pela concentração de sedimentos, respectivamente, nos pontos de montante e jusante analisados. Em geral, pode-se perceber que, com o aumento da tensão cisalhante inicial e da viscosidade dinâmica, as profundidades verificadas aumentaram e, por contrário, as velocidades do escoamento diminuíram.

Além disso, do cenário com concentração nula até o cenário com concentração de 19 % de sedimentos foi observado um ponto de pico de profundidade logo no início das simulações e um rápido decaimento quase linear da profundidade durante a simulação, principalmente no ponto de Montante. Com relação ao ponto de jusante, esse decaimento apresentou menor similaridade entre esses cenários, tendo a simulação com 19 % um decaimento mais suave da profundidade.

Nos cenários com maior concentração de sedimentos, 26 e 28 %, foi possível observar um crescimento menos abrupto no ponto inicial dos gráficos, apresentando maior suavidade na propagação da inundação. Destaca-se, além disso, a inversão entre esses cenários, tendo, no ponto de montante, o modelo de maior concentração apresentado uma profundidade maior e o inverso ocorrendo no ponto de jusante.

Comparando os cinco cenários, foi possível identificar que, entre a simulação nula e a concentração de 19 %, ocorreu um pico de elevação da profundidade e, posteriormente, um decaimento, enquanto nas simulações de maior concentração, a profundidade, nos dois pontos, se mantiveram quase constantes até o final da simulação. Essa situação pode ter ocorrido devido a elevada tensão cisalhante necessária para o deslocamento do fluido, assim, após a passagem da onda de cheia, o escoamento não teve energia suficiente, devido à baixa declividade do terreno, para se propagar.

Em relação às velocidades do escoamento, foi possível identificar uma relação direta entre a concentração de sedimentos e a sua velocidade, tendo o fluido sem concentração apresentado velocidades consideravelmente maiores quando comparado com o fluido de maior concentração, principalmente no ponto de jusante. Também, no cenário sem concentração de sedimento, é possível observar que as velocidades de pico tanto no ponto de

montante quanto no ponto de jusante apresentaram valores similares, enquanto os cenários de maior concentração apresentaram maior discrepância entre os valores.

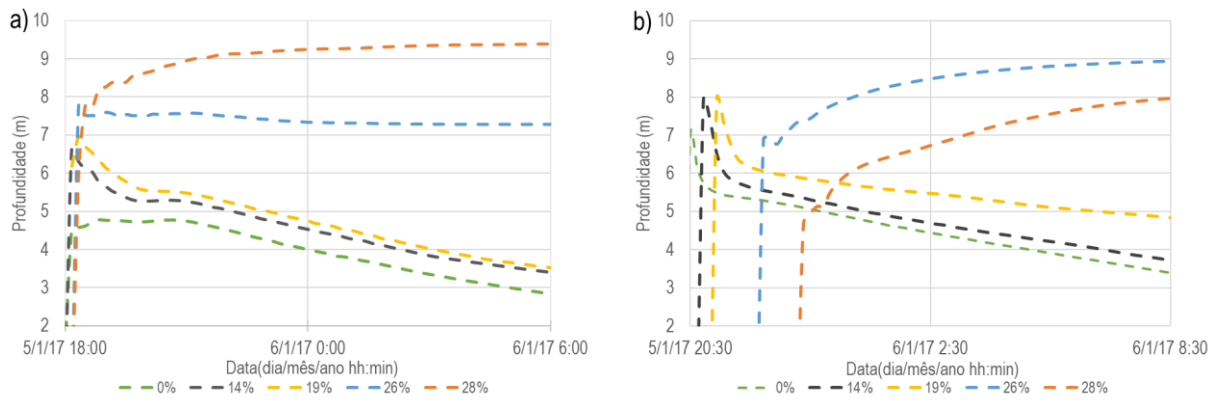


Figura 49. Relação da profundidade pelo tempo: a) Ponto de Montante; b) Ponto de Jusante.

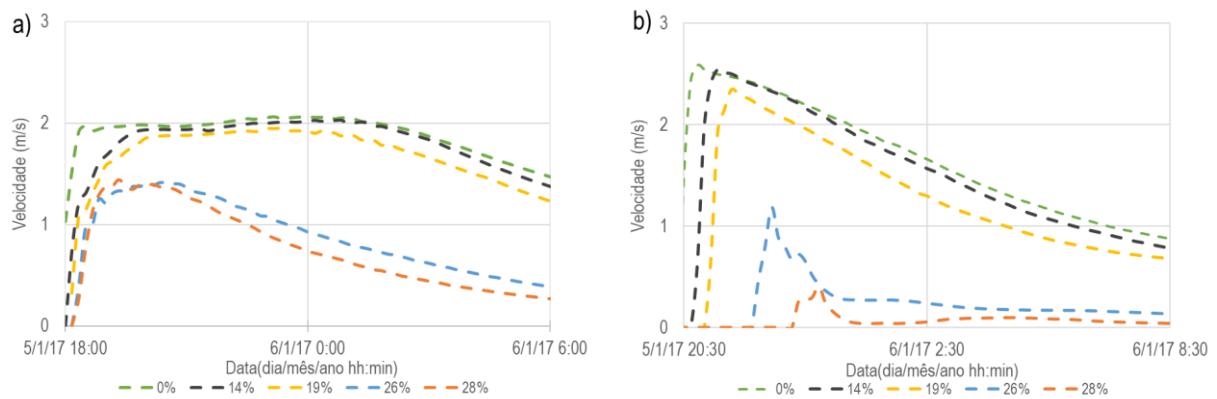


Figura 50. Relação da velocidade pelo tempo: a) Ponto de Montante; b) Ponto de Jusante.

Por fim, quando comparado o tempo de propagação entre os diferentes cenários, foi observado um atraso no deslocamento das ondas, principalmente na parte de jusante da simulação. Dessa forma, a onda com concentração nula de sedimentos apresentou o menor tempo de deslocamento em comparação aos outros cenários. Concomitante a isso, foi possível identificar que a elevação na concentração de sedimentos no fluido aumentou consideravelmente o tempo de propagação da onda de cheia.

O tempo de propagação entre os dois pontos analisados foram de 2:30 h, 2:40 h, 3:00 h, 4:00 h e 5:00 h para a concentração nula, 14 %, 19 %, 26 % e 28 %, respectivamente. A diferença entre o menor e o maior tempo de propagação foi de 2:30 h, cenário com concentração nula e concentração de 28 %. É possível observar, dessa forma, um aumento considerável do tempo de propagação com o aumento da concentração de sedimentos no fluido. Isso ocorreu em razão da diminuição das velocidades na propagação do escoamento.

5.3. MANCHA DE INUNDAÇÃO DO EVENTO

As simulações hidrodinâmicas auxiliaram na compreensão do evento de 2017 em Rolante; contudo, todas as informações obtidas nas simulações não podem ser reconhecidas como absolutas, sendo necessário uma análise ponderada dos resultados. Dessa forma, tendo como base esses aspectos e em razão da inexistência de informações do evento de 2017, como vazão e concentração de sedimentos no fluídos, foi proposto a identificação da mancha e, por consequência, da concentração de sedimentos que melhor se adequou aos pontos limítrofes observados na inundação. A relação entre os pontos observados e as manchas de inundação está destacada na Figura 51.

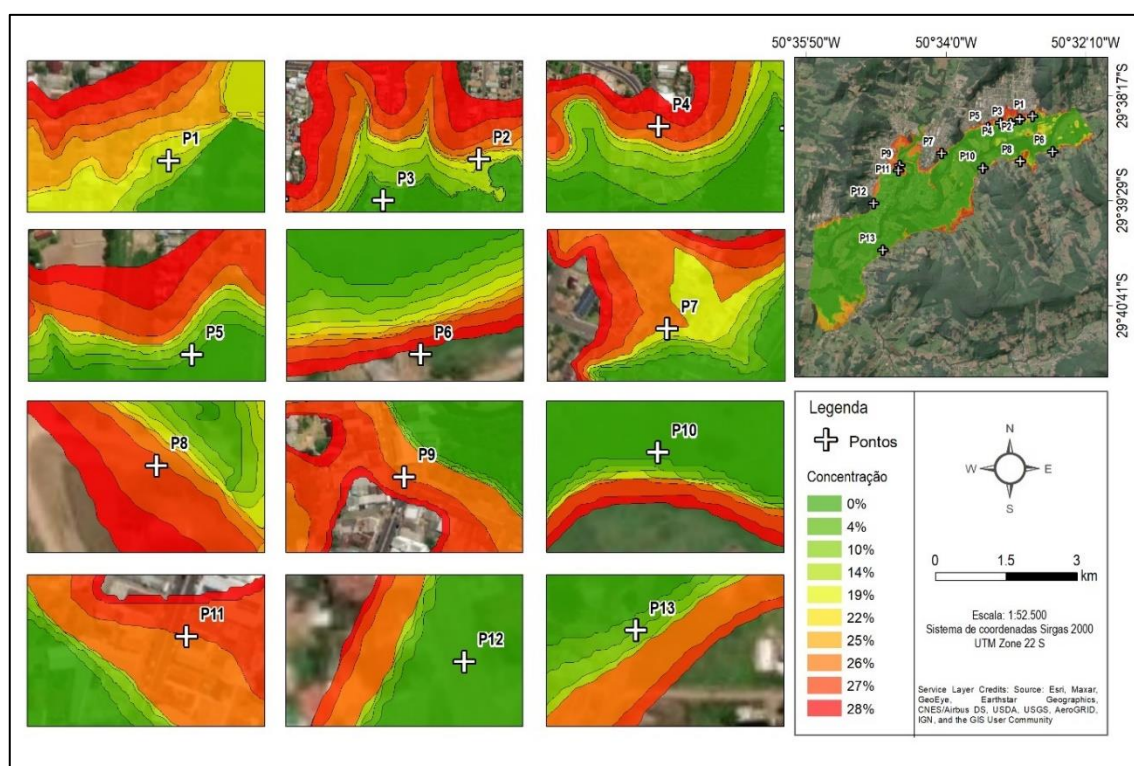


Figura 51. Relação entre as manchas máximas de inundação com os pontos de inundação observados no evento.

Além da análise visual da relação entre mancha de inundação e pontos observados, foi proposto uma avaliação métrica dos resultados através da ferramenta *D-Infinity Distance Down* do método TAUDEM. Os resultados extraídos da distância mínima por Pitágoras entre a mancha de inundação e os pontos observados no evento estão ilustrados na Tabela 6.

Tabela 6. Distância até a borda da mancha de inundação para diferentes concentrações de sedimentos.

Pontos Observados	Concentração de Sedimentos (%)									
	0	4	10	14	19	22	25	26	27	28
	Distância até a borda da mancha (m)									
P1	10.61	10.61	7.07	0	14.61	20.63	34.76	47.9	62.03	84.73
P2	24.77	24.77	21.24	7.07	0	6.04	16.64	29.77	64.51	150.06
P3	30.78	44.93	103.39	141.25	147.28	150.83	154.36	168.5	206.37	295.64
P4	119.62	84.27	49.94	35.8	25.2	28.73	25.2	6.04	15.64	42.9
P5	0	3.54	14.18	17.71	21.24	21.24	21.24	30.85	58.11	105.15
P6	29.57	22.63	17.53	14.11	11.44	9.05	9.05	9.05	2.69	0
P7	19.57	10	5	2.5	0	0	5	30.8	83.23	97.4
P8	20.28	13.14	9.62	9.62	6.12	6.12	6.12	0	9.62	22.77
P9	33.3	26.23	26.23	26.23	26.23	33.3	33.3	0	0	0
P10	0	0	2.5	5.1	5.1	5.1	5.1	7.57	12.66	15.13
P11	59.53	48.9	41.83	41.83	45.37	59.53	56	0	0	0
P12	10.61	13.11	13.11	16.67	16.67	10.61	13.11	22.77	25.26	28.87
P13	0	0	3.54	3.54	3.54	0	0	17.71	21.24	21.24

Através do método *D-Infinity Distance Down*, foi possível calcular a distância de todos os pontos até a borda das respectivas manchas de inundação. Contudo, devemos destacar que o P3 desde a simulação com concentração nula de sedimentos apresentou uma considerável distância até a borda da mancha máxima de inundação, estando dentro da área inundada e não próximo da área limítrofe da mancha. Ressalta-se também que os pontos vizinhos ainda estavam distantes da mancha de inundação enquanto o já P3 estava inserido na mancha. Tendo como base essa avaliação, o ponto foi desconsiderado nos cálculos da distância por gerar um peso inconsistente nos resultados.

Destaca-se que a inconsistência do P3 em relação as manchas de inundação pode estar relacionado com a coleta incorreta do ponto na região limítrofe da inundação ou, até mesmo, um erro relacionado ao equipamento utilizado para coleta. Posto isso, o ponto foi utilizado apenas como referencial visual na análise da mancha de melhor correspondência, não entrando nos parâmetros estatísticos de definição.

A análise da mancha de inundação foi realizada pelos parâmetros de distância média, desvio padrão e erro médio quadrático, conforme destacado na Tabela 7. No geral, a mancha que apresentou o melhor resultado foi a com concentração de 19 %, tendo sido observado a menor distância entre todos os parâmetros estatísticos utilizados. Contudo, é importante destacar que os cenários entre 10 % e 26 % apresentaram pouca variação nos resultados de

distância observados, podendo ser considerada uma faixa de resultados aceitáveis na estimativa da área de inundação.

Ressalta-se ainda que os piores resultados foram identificados nas simulações extrema, ou seja, nas simulações com concentração nula até 4 % e com concentração de 27 até 28 %. Por fim, é importante ressaltar que o único cenário que cobriu todos os pontos inundados foi com concentração de 28 %; porém, para isso a mancha teve de se expandir consideravelmente na região dos pontos P1, P2, P5 e P7, inviabilizando a sua utilização como simulação de referência.

Tabela 7. Distância até a borda da mancha de inundação para diferentes concentrações de sedimentos.

Concentração de sedimentos (%)	Média	Desvio Padrão	RMSE
	Distância até a borda da mancha (m)		
0	27.3	33.73	40.64
4	21.4	24.05	30.22
10	17.6	15.11	21.93
14	15	13.46	19.01
19	14.6	13.36	18.67
22	16.7	17.33	22.62
25	18.8	16.29	23.47
26	16.9	15.59	21.64
27	29.6	29.24	39.13
28	47.4	49.73	64.52

A análise métrica foi um fator auxiliar, além da visual, para identificar o cenário e, por consequência, a concentração de sedimentos que teve melhor correspondência ao evento de 2017, podendo ser identificado uma concentração de 19 % como a de melhor relação. Contudo, é importante ressaltar que, mesmo os melhores resultados terem apresentado uma concentração elevada de sedimentos no fluído, não pode ser afirmado que a inundação tenha ocorrido com essa concentração e nem mesmo que o fluído escoado durante o evento tivesse características de hiperconcentrado, visto que não foram realizadas estimativas de vazão e de concentração de sedimentos durante a inundação.

Tendo como base todas essas ressalvas, as simulações realizadas demonstraram uma forte relação entre a carga de sedimentos presentes no fluído e os pontos observados da inundação de 2017 no município de Rolante/RS, podendo esse ter sido um fator agravante durante o evento. Além disso, deve ser destacado o aumento considerável de área inundada

entre o fluído com concentração nula de sedimentos e com concentração de 27 %, representando um aumento de, aproximadamente, 24 %, entre esses cenários.

Por fim, destaca-se que a diferença entre da área inundada do cenário de maior compatibilidade aos pontos de inundação observados, concentração 19 %, e do cenário com concentração nula de sedimentos foi de 10 %. A diferença entre as áreas inundadas demonstra que a carga de sedimentos pode influenciar em eventos de inundação que apresentem características similares ao ocorrido em Rolante/RS. Além disso, simulações com concentração nula de sedimentos podem subestimar a propagação da área máxima inundada nesses eventos, devendo ser utilizado com cautela em zoneamento de áreas inundáveis ou estudos que buscam estimar a propagação de ondas de cheia.

6. CONCLUSÕES

- O trabalho proposto conseguiu identificar uma relação consistente da influência do sedimento na intensidade do evento de 2017 no município de Rolante/RS, tendo sido observado uma diferença de, aproximadamente 24 % entre a área do cenário sem concentração de sedimento e o cenário com concentração de 27 % de sedimentos. Ressalta-se, contudo, que as análises não devem ser consideradas absolutas, devido as simulações numéricas, pela elevada complexidade de processamento, realizarem diversas simplificações na solução dos resultados, podendo gerar erros e inconsistências nas estimativas.
- Foi possível identificar, através das simulações, um agravamento nos cenários de inundação quando a concentração de sedimentos se aproximou ou ultrapassou 19 %. Dessa forma, simulações que buscam avaliar o impacto de inundações em regiões urbanas, tendo como base apenas fluídos Newtonianos, podem subestimar áreas afetadas. Além disso, estudos que propagam ondas de cheias como rompimento de barragens, em algumas situações, podem também apresentar discrepâncias entre cenários sem e com concentração de sedimentos, sendo necessário estudos mais aprofundados sobre isso.
- É necessário que futuros trabalhos sejam desenvolvidos em outros eventos de inundação para que se possa avaliar de forma concreta a influência de sedimentos nessas situações. Além disso, pode-se propor, para regiões similares, uma porcentagem de sedimentos adequada em simulações hidrodinâmicas para zoneamento de áreas suscetíveis a eventos de inundação.
- No estudo proposto, o cenário que apresentou melhor resultado foi com concentração de 19 % de sedimentos no fluído. Conforme analisado na revisão bibliográfica, essa faixa está dentro do esperado para fluídos considerados hiperconcentrados. Dessa forma, corrobora-se com a hipótese que a intensidade do evento de 2017 em Rolante, tenha influência da elevada carga de sedimentos no fluído, podendo, até mesmo, ter ocorrido com fluído hiperconcentrado.
- A medição e a coleta de dados para eventos de inundação ainda são atividades complexas e de difícil obtenção. Isso está relacionado com o monitoramento insuficiente e a baixa disponibilidade de informações hidrológicas no Brasil, principalmente em bacias hidrográficas pequenas. Outro fator a ser ressaltado é quanto a utilização de equipamento e a sua conservação em eventos de inundação com essa

magnitude, sendo, praticamente, impossível de realizar amostragens de sedimentos e medição de descarga líquida durante essas ocorrências.

- Deve-se ressaltar também que as simulações computacionais são importantes ferramentas na obtenção e análise de dados de eventos extremos, podendo auxiliar no gerenciamento, mitigação e resposta para desastres naturais. Contudo, é necessário a manutenção e a continuidade no monitoramento de dados hidrológicos, pois somente assim os resultados simulados podem ser calibrados e validados. Além disso, dados hidrológicos de qualidade são essenciais no desenvolvimento de novas tecnologias e ferramentas de simulação, sendo fatores determinantes na busca por resultados melhores e mais consistentes.
- Por fim, a ferramenta *D-Infinity Distance Down* mostrou-se consistente para a avaliação métrica de resultados de inundação com pontos observados em campo. Também, por utilizar caminhos preferenciais no MDT, pode-se definir um padrão na avaliação dos resultados, diminuindo a possibilidade de questionamentos ou interpretação dúbia das informações.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAKER, V. R. Paleoflood hydrology and extraordinary flood events. **Journal of Hydrology**, v. 96, n. 1-4, p. 79-99, 1987.
- BERTOL, I.; De AZEVEDO, CASSOL, E. A.; BARBOSA, F.T. **Manejo e Conservação do Solo e da Água**. 1ª edição, cap. 14, 2019.
- BETSHOLTZ, A.; NORDLÖF, B. **Potentials and limitations of 1D, 2D and coupled 1D-2D flood modelling in HEC-RAS**. TVVR17/5003, 2017.
- BHUIYAN, F. (Ed). **Sediment Transport: Flow and Morphological Processes**. BoD–Books on Demand, 2011.
- BRÁZDIL, R.; KUNDZEWICZ, Z. W.; BENITO, G. Historical hydrology for studying flood risk in Europe. **Hydrological Sciences Journal**, v. 51, n. 5, p. 739-764, 2006.
- CARVALHO, N. D. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2º edição. Editora Interciência, 2008.
- CARVALHO, N. O.; FILIZOLA, N. J.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J.; E. F. **Guia de Práticas Sedimentométricas**. ANEEL Brasília, 2000.
- CENSI, G. **Regionalização do tank model para produção de sedimentos**. Dissertação (Mestrado), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019
- CEPED, UFSC. **Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012**. Florianópolis, CEPED UFSC, 2013.
- CHANSON, H. **Hydraulics of open channel flow**. 2ª edição. Elsevier, 2004.
- CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. **Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications**. 2ª edição. Butterworth-Heinemann, 2008.
- CENTRO INTERNACIONAL DE MÉTODOS NUMÉRICOS EM INGENIERÍA. **Relatório Final: Análise computacional da ruptura da barragem I na mina do Corrego do Feijão, em Brumadinho**. Espanha/Catalunha, UPC, 2021.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2º edição, p. 336, 2015.

CONSELHO NACIONAL DOS DIREITOS HUMANOS. **Relatório sobre o rompimento da barragem de rejeitos da mineradora Samarco e seus efeitos sobre o Vale do Rio Doce**. Brasília: CNDH 2017. 59 p.

COUSSOT, P.; MEUNIER, M. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. **Earth-Science Reviews**, v. 40, n. 3-4, p. 209-227, 1995.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa geológico do Rio Grande do Sul, escala 1:750.000**. 2008. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br>>. Acesso em: 29 abr. 2022.

CRED. **2021 Disasters in numbers**. Brussels: CRED; 2022.

DANTAS, J. C. **Processos hidrossedimentológicos na bacia do Rio Taperoá**. Monografia – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

DA SILVA, A. M. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. 2ª edição. Rima, 2007.

DA SILVA, C. M.; JUNIOR, T.L.S.; JUNIOR, I. M. P. Caracterização reológica de fluidos Não-Newtonianos e sua aplicabilidade na indústria. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS**, v. 5, n. 2, p. 285, 2019.

DA SILVA, M. M. N.; DANIELA, F. L.; JUNIOR, A. M. S.; CARVALHO, C. C. A. Segregação socioespacial: os impactos das desigualdades sociais frente a formação e ocupação do espaço urbano. **Revista Monografias Ambientais**, v. 15, n. 1, p. 256-263, 2016.

FAGUNDES, M. R. **Modelagem Hidrológica e Hidrodinâmica a fim de auxiliar na definição de um critério para o fechamento da trilha do rio do Boi**. Monografia, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

FAGUNDES, M. R.; FAN, F.M.; KOBIYAMA, M.; CAMPAGNOLO, K.; PAIXAO, M.A. Comparação de soluções para simulação de cheias em rios declivosos utilizando o HEC-RAS. **Encontro Nacional de Desastres (2.: 2020: Porto Alegre, RS, etc.)**. [Anais]. [Porto Alegre: ABRHidro, 2021], 2021.

FEPAM, Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Rossler. **Mapa de Unidades de Vegetação, Rio Grande do Sul, RADAM**. 2010. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/wp-content/uploads/2010/05/vegetacao-rio-grande-do-sul.jpg>>. Acesso em: 29 de jan. 2022.

FERREIRA, F. de O. **Abordagem matemática de roll waves em escoamentos hiperconcentrados com superfície livre**. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2007.

FOSTER, G. R.; MEYER, L. D. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. In: **Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources ARS-S-40**. [s.l.] USDA-ARS, 1975. p. 190–207.

GUERRA, A. T.; DA SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Bertrand Brasil, 10^a edição, 2015.

GUIRRO, M. O. **Reconstrução Hidrológica e Hidrodinâmica de evento de inundação, tendo a hipótese de rompimento de barragem natural**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

HORRITT, M. S.; BATES, P. D. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. **Journal of hydrology**, v. 268, n. 1-4, p. 87-99, 2002.

HUANG, X.; GARCÍA, M. H. A Herschel–Bulkley model for mud flow down a slope. **Journal of Fluid Mechanics**, 374, p 305–333, 1998.

HUILGOL, R. R.; PHAN-THIEN, N. **Fluid mechanics of viscoelasticity: general principles, constitutive modelling, analytical and numerical techniques**. Elsevier, 1997.

IKEDA, S.; MCEWAN, I. K. (Ed.). **Flow and sediment transport in compound channels: the experience of Japanese and UK research**. CRC Press, 2007.

INSTITUO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2010). Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/rolante/panorama>

IRGENS, F. **Rheology and non-newtonian fluids**. Springer International Publishing, 2014.

IRVEM, A.; TOPALOĞLU, F.; UYGUR, V. Estimating spatial distribution of soil loss over Seyhan River Basin in Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 336, n. 1-2, p. 30-37, 2007.

JAKOB, M.; HUNGR, O. **Debris-flow Hazards and Related Phenomena**. Springer. 2005

JAKOB, M.; WEATHERLY, H. Integrating uncertainty: Canyon Creek hyperconcentrated flows of November 1989 and 1990. **Landslides**, v. 5, n. 1, p. 83-95, 2007.

- JENPSON, R. **Open channel flow: Numerical methods and computer applications**. CRC Press, 2011.
- JI, Z. G. **Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes, and estuaries**. John Wiley & Sons, 2017.
- JULIEN, P. Y.; LAN, Y. Rheology of hyperconcentrations. **Journal of Hydraulic Engineering**, n 117, p. 346-353, 1991.
- KÄMPF, N. *et al.* Metodologia para classificação de solos quanto à resistência a impactos ambientais decorrentes da disposição final de resíduos. **Fepam em Revista**, v. 2, n. 1, p. 11–17, 2008.
- KOBIYAMA, M.; CHAFFE, P. L. B.; GOERL, R. F.; GIGLIO, J. N.; REGINATTO, G. M. P. Hydrological disasters reduction: lessons from hydrology. In: **Science and Technology for Environmental Studies: Experiences from Brazil, Portugal and Germany**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, p 49-72, 2010.
- KOBIYAMA, M.; VANELLI, F. M.; MOREIRA, L. L.; MENEZES, D.; GODOY, J. V. Z. Aplicação de Hidrologia na Gestão de Riscos e de Desastres Hidrológicos. In: CASTRO, D. (org.). **Ciclo das Águas na bacia hidrográfica do rio Tramandaí**. Porto Alegre, RS: Sapiens, 2019. 135 – 140.
- LAVIGNE, F.; SUWA, H. Contrasts between debris flows, hyperconcentrated flows and stream flows at a channel of Mount Semeru, East Java, Indonesia. **Geomorphology**, v. 61, n. 1-2, p. 41-58, 2004.
- LE BOUTEILLER, C.; CHAMBON, G.; NAAIM-BOUVET, F.; MATHYS, N. Hydraulics and rheology of natural hyperconcentrated flows from Draix-Bleone observatory, French Alps. **Journal of Hydraulic Research**, v. 59, n. 2, p. 181-195, 2021.
- MALTMAN, A. **The geological deformation of sediments**. 1ª edição. Springer Science & Business Media, 1994.
- MASOERO, A. **Reconstruction and analysis of the Po River inundation of 1951**. 2013.
- METROPLAN. **Estudos Básicos: Produto N° 8 Relatório Aerofotogramétrico**. Porto Alegre, RS: Fundação Estadual de Planejamento Metropolitano e Regional, 2016.

MICHEL, G.P.; SCHWARZ, H.; ABATTI, B.H.; PAUL, L.R.; SILVA, M.A.; ZANANDREA, F.; SALVADOR, C.G.; CENSI, G.; BIEHL, A.; KOBAYAMA, M. **Relatório técnico dos desastres de dezembro de 2020 nos municípios de Presidente Getúlio, Ibirama e Rio do Sul -SC**. Volume I. Porto Alegre: GPDEN/IPH/UFRGS, 2021. 53 p.

MIGUEZ, M. G.; GREGÓRIO, L. DI T.; VERÓL, A. P.; **Gestão de Riscos e Desastres Hidrológicos**. 1ª edição. Elsevier, 2018.

MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion and Conservation**. 3ª edição. Oxford: Blackwell Publishing, 2005.

NEMEC, W. D. Remarks on terminology and classification. Coarse-grained deltas. Special Publication 10: **International Association of Sedimentologists**, p. 3-12, 1990.

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y. Laboratory analysis of mudflow properties. **Journal of hydraulic engineering**, v. 114, n. 8, p. 877-887, 1988.

PAIVA, R. C. D. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias estudo de caso: bacia do rio Solimões**. 2009.

PATEL, D. P.; RAMIREZ, J. A.; SRIVASTAVA, P. K.; BRAY, M.; HAN, D. Assessment of flood inundation mapping of Surat city by coupled 1D/2D hydrodynamic modeling: a case application of the new HEC-RAS 5. **Natural Hazards**, v. 89, n. 1, p. 93-130, 2017.

PATEL, D. P.; SRIVASTAVA, P. K. Flood hazards mitigation analysis using remote sensing and GIS: correspondence with town planning scheme. **Water resources management**, v. 27, n. 7 p. 2353-2368, 2013.

PEREIRA, L. F.; DE BARROS, G. C.; GUIMARÃES, R. M. F. Impactos do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, Brasil: uma análise baseada nas mudanças de cobertura da terra. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, p. 122-129, 2019.

PINTO, A. C. B. **Modelo Unidimensional para Simulação de Cheias em Rios e Áreas Urbanas**. 2007.

POLETO, C. **Hidrossedimentologia**. Editora Interciência, 2019.

PORTO, R. de M. **Hidráulica básica**. 4ª edição. São Carlos: EESC-USP, Projeto REENGE, 2006.

- PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água**. 2ª edição. Universidade Federal de Viçosa, 2009.
- RICKENMANN, D. Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. **Journal Hydraulic Engineering**, n. 117, p. 1419-1439, 1991.
- ROWINSKI, P. (Ed). **Fluvial hydrodynamics**. Capítulo 4. Berlin: Springer, 2014.
- SAITO, S. M. **Desastres naturais: conceitos básicos. I Escola de primavera sobre soluções espaciales para el manejo de desastres naturales y respuestas de emergências inundaciones**. Santa Maria, INPE-CRS, 2008.
- SEMA. **Diagnóstico Preliminar: Descritivo dos eventos ocorridos no dia 5 de janeiro de 2017 entre as regiões dos municípios de São Francisco de Paula e Rolante/RS**. Porto Alegre, RS: Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2017.
- SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B.; **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas**. Rima, 2007
- SZYMKIEWICZ, R. **Numerical modeling in open channel hydraulics**. Springer Science & Business Media, 2010.
- TAKAHASHI, T. **Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures**. Taylor & Francis, 2007.
- TAYEFI, V.; LANE, S. N.; HARDY, R. J.; YU, D. A comparison of one-and two-dimensional approaches to modelling flood inundation over complex upland floodplains. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 21, n. 23, p. 3190-3202, 2007.
- TEIXEIRA, T. M. de N. **Modelagem hidrodinâmica tridimensional do Lago Paranoá para análise dos efeitos da operação do reservatório**. 2019.
- TUCCI, Carlos EM *et al.* **Hidrologia: ciência e aplicação**. 1993.
- VALENCIO, N. **O desastre como locus da barbárie: apontamentos sobre o caso brasileiro**. Sociologia dos desastres—construção, interfaces e perspectivas no Brasil, 2010.
- VALLANCE, J. W.; IVERSON, R. **Encyclopedia of volcanoes**. 2000.

VANELLI, F. M. **Reconstrução hidrológica e hidrodinâmica do evento de 1974 em Tubarão**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

USACE-RAS. Hydrologic Modeling System, **HEC-RAS v6.1 – User Manual**. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 705 p., 2020.

USACE-RAS. Hydrologic Modeling System, **HEC-RAS v6.1 – Mud and Debris Flow Manual**. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 58 p., 2020.

XU, H.; BAI, Y.; LI, C. Hydro-instability characteristics of Bingham fluid flow as in the Yellow River. **Journal of Hydro-Environment Research**, v. 20, p. 22-30, 2018.

ZANANDREA, F. **Índice de Conectividade Hidrossedimentológica para Bacias Montanhosas**. Tese (Doutorado), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

8. APÊNDICE A

Seções transversais levantadas em campo.

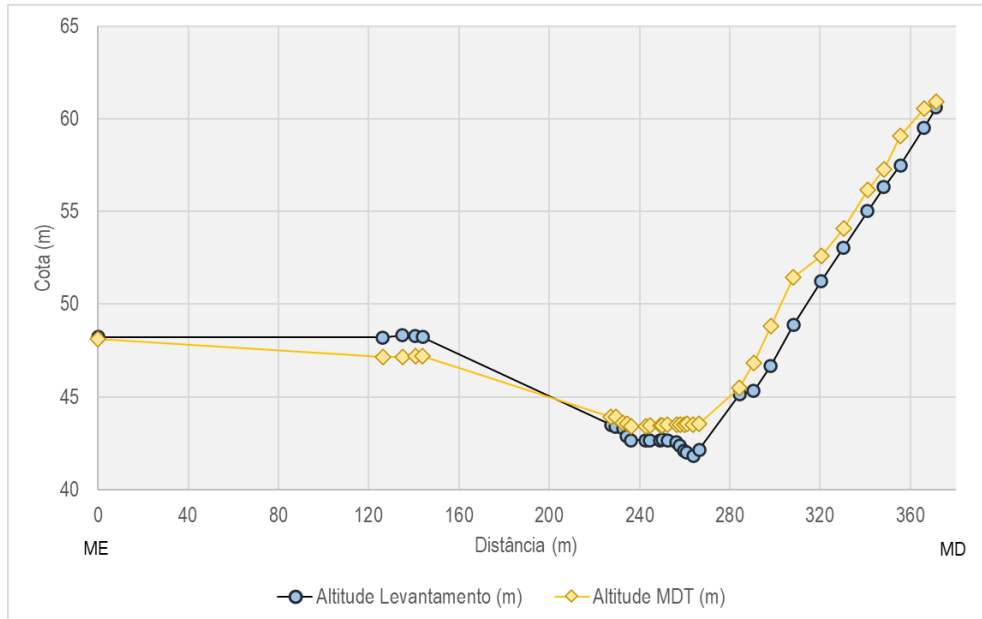


Figura 52. Perfil transversal da PF1



Figura 53. Registros fotográficos da seção PF1 - Margem Esquerda



Figura 54. Registros fotográficos da seção PF1 - Margem Direita

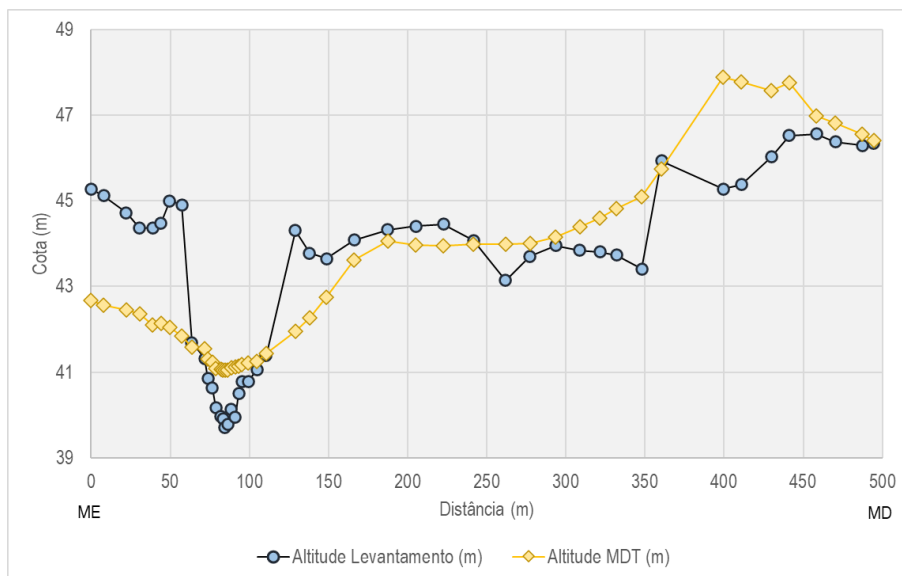


Figura 55. Perfil transversal da PF3



Figura 56. Registros fotográficos da seção PF3 - Margem Esquerda



Figura 57. Registros fotográficos da seção PF3 - Margem Direita

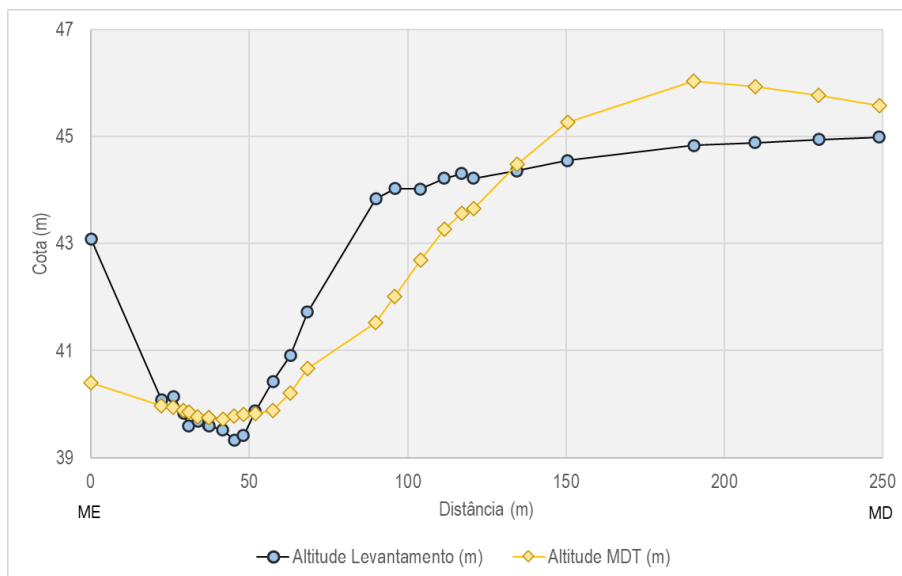


Figura 58. Perfil transversal da PF4

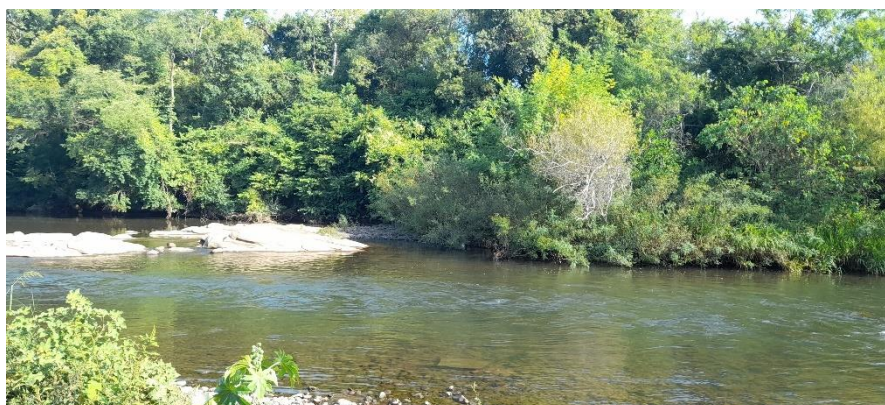


Figura 59. Registros fotográficos da seção PF4 - Margem Esquerda

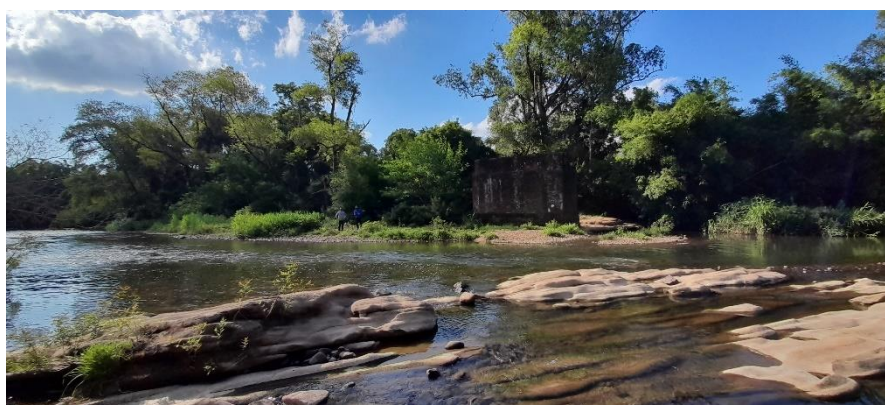


Figura 60. Registros fotográficos da seção PF4 - Margem Direita

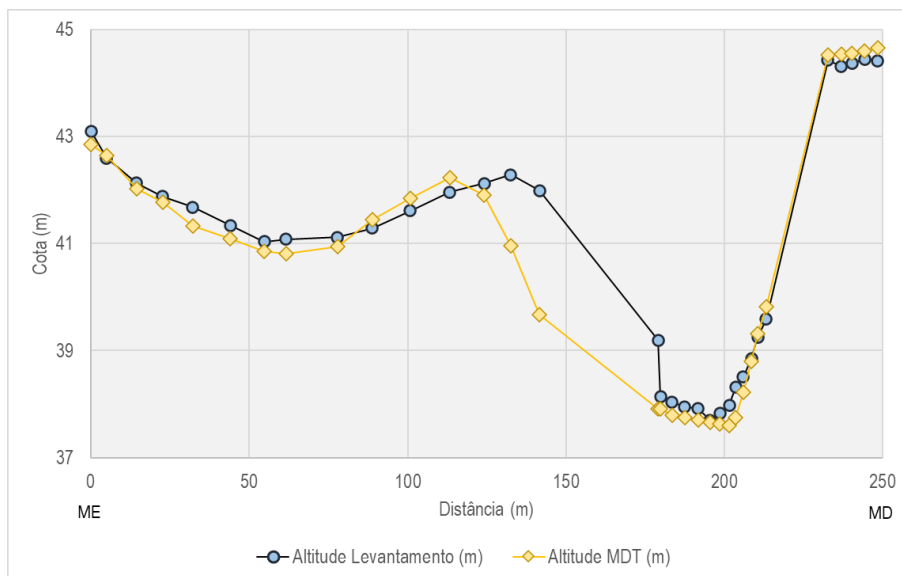


Figura 61. Perfil transversal da PF5



Figura 62. Registros fotográficos da seção PF5 - Margem Esquerda

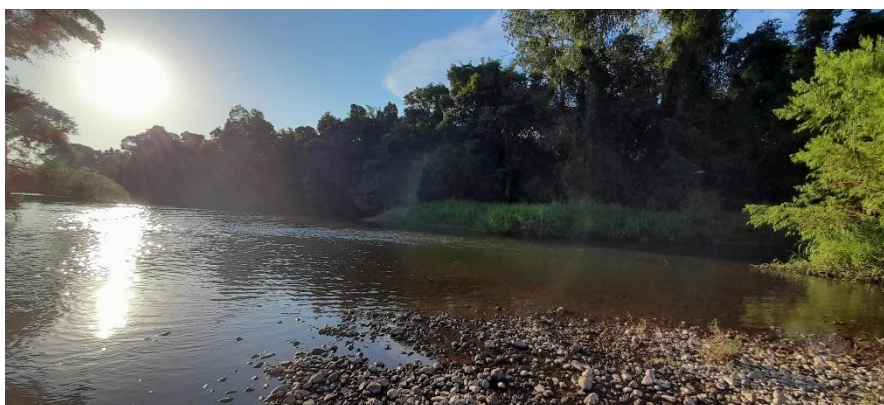


Figura 63. Registros fotográficos da seção PF5 - Margem Direita

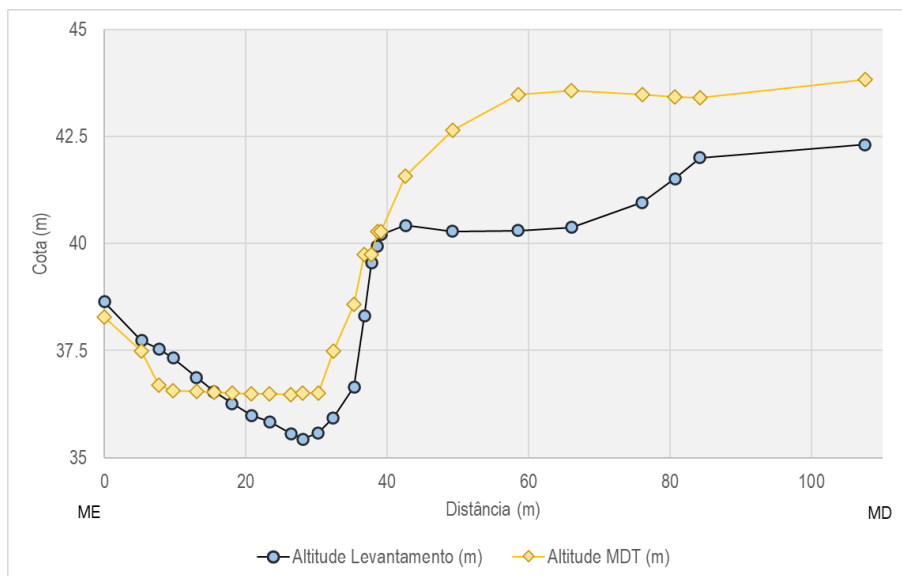


Figura 64. Perfil transversal da PF6



Figura 65. Registros fotográficos da seção PF6 - Margem Esquerda



Figura 66. Registros fotográficos da seção PF6 - Margem Direita

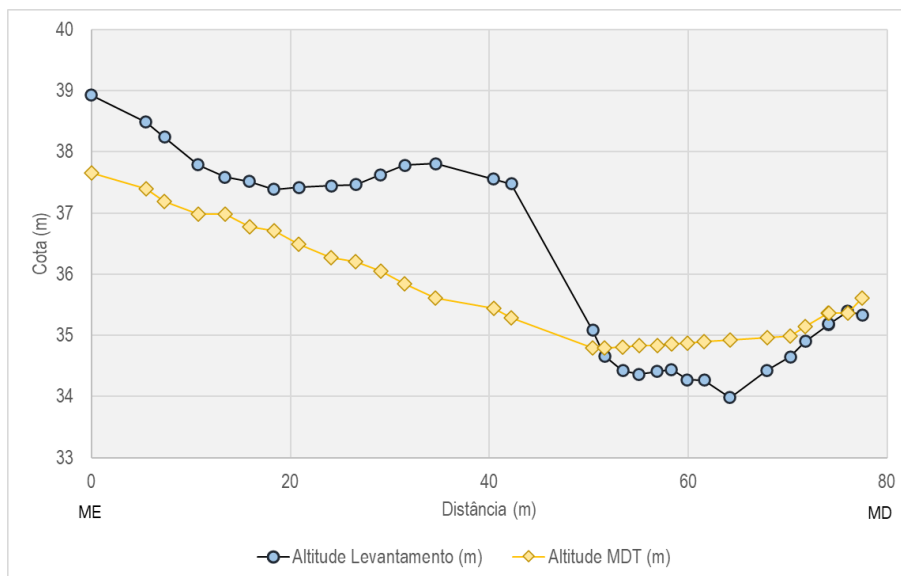


Figura 67. Perfil transversal da PF7



Figura 68. Registros fotográficos da seção PF7 - Margem Esquerda

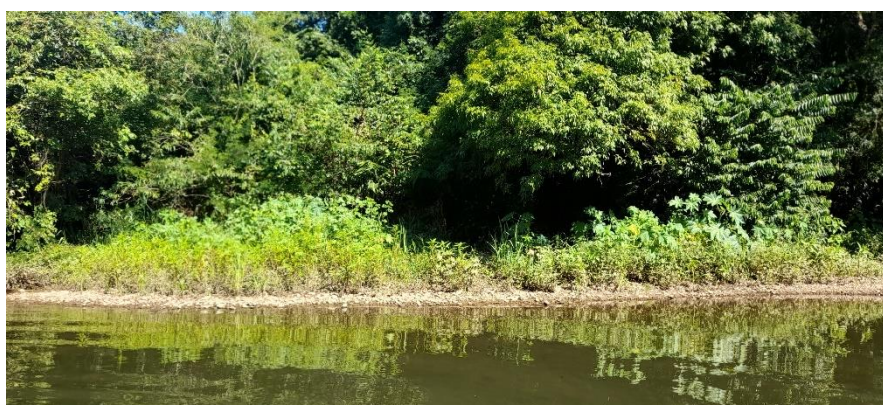


Figura 69. Registros fotográficos da seção PF7 - Margem Direita

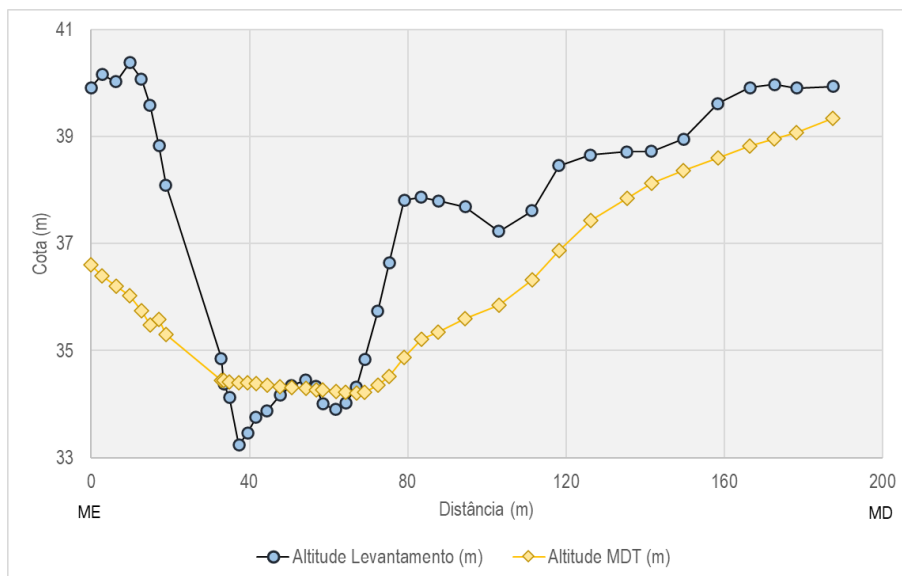


Figura 70. Perfil transversal da PF8



Figura 71. Registros fotográficos da seção PF8 - Margem Esquerda



Figura 72. Registros fotográficos da seção PF8 - Margem Direita

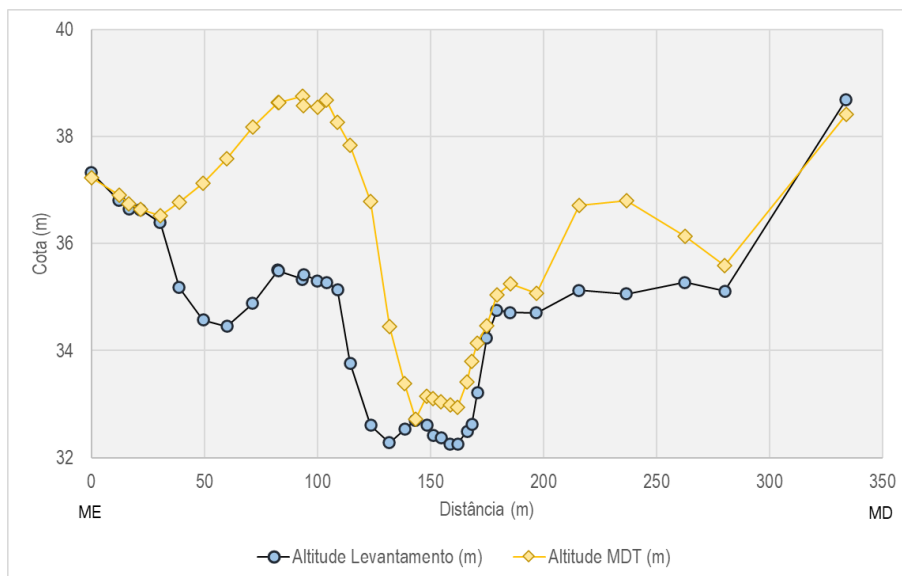


Figura 73. Perfil transversal da PF9



Figura 74. Registros fotográficos da seção PF9 - Margem Esquerda



Figura 75. Registros fotográficos da seção PF9 - Margem Direita

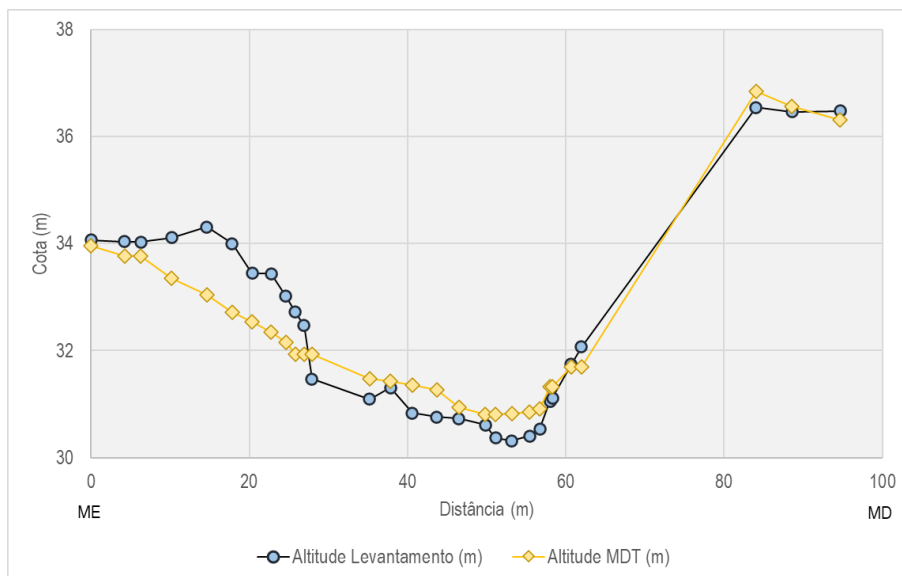


Figura 76. Perfil transversal da PF11

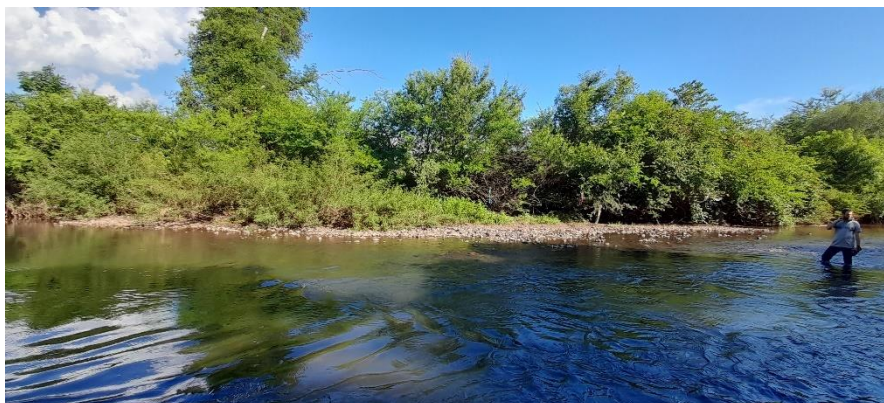


Figura 77. Registros fotográficos da seção PF11 - Margem Esquerda



Figura 78. Registros fotográficos da seção PF11 - Margem Direita

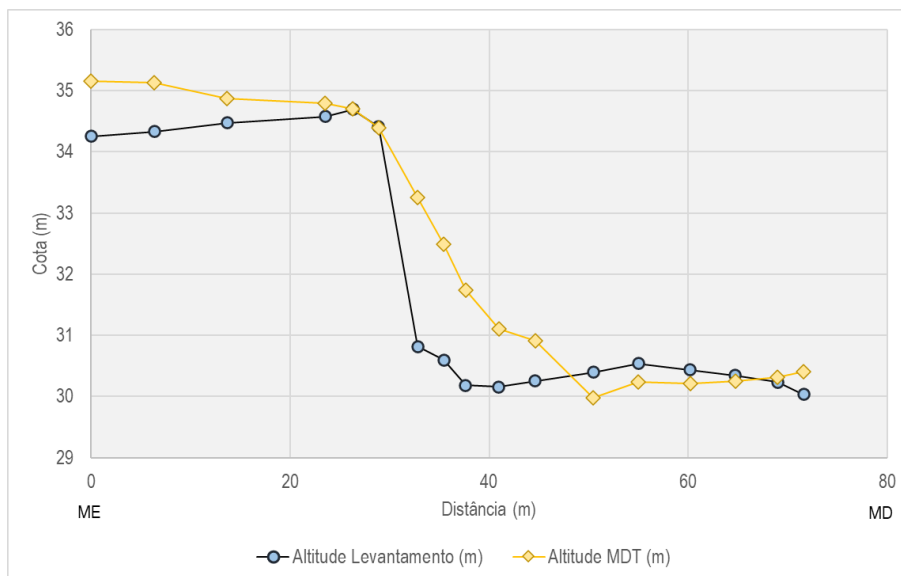


Figura 79. Perfil transversal da PF12



Figura 80. Registros fotográficos da seção PF12 - Margem Esquerda



Figura 81. Registros fotográficos da seção PF12 - Margem Direita

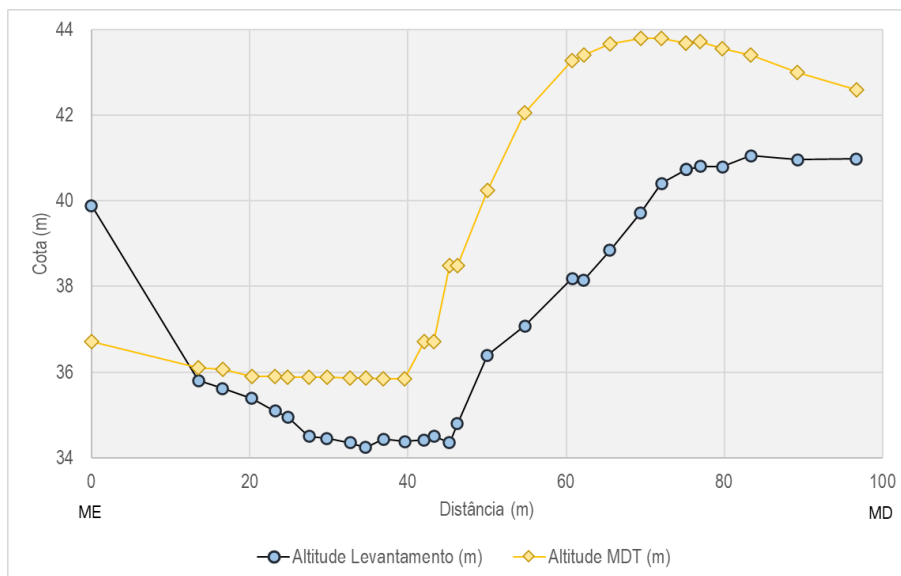


Figura 82. Perfil transversal da PF14



Figura 83. Registros fotográficos da seção PF14 - Margem Esquerda



Figura 84. Registros fotográficos da seção PF14 - Margem Direita

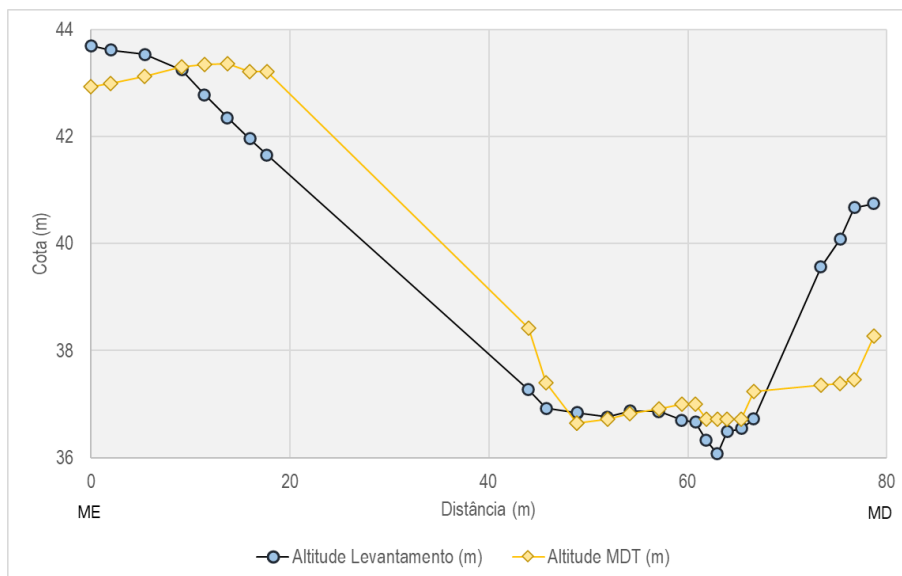


Figura 85. Perfil transversal da PF15



Figura 86. Registros fotográficos da seção PF15 - Margem Esquerda



Figura 87. Registros fotográficos da seção PF15 - Margem Direita