



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

BRUNA BAGGIO GIORDANI

**USO DE DADOS NÃO SISTEMÁTICOS PARA CALIBRAÇÃO
HIDRODINÂMICA DO MODELO MGB: ESTUDO DE CASO DA REGIÃO DO
VALE DO RIO TAQUARI (RS) PARA A INUNDAÇÃO DE JULHO DE 2020**

Porto Alegre

2021

BRUNA BAGGIO GIORDANI

USO DE DADOS NÃO SISTEMÁTICOS PARA CALIBRAÇÃO HIDRODINÂMICA DO
MODELO MGB: ESTUDO DE CASO DA REGIÃO DO VALE DO RIO TAQUARI (RS)
PARA A INUNDAÇÃO DE JULHO DE 2020

Trabalho de Conclusão apresentado ao curso de
Engenharia Ambiental da Universidade Federal do
Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan

PORTO ALEGRE

2021

CIP - Catalogação na Publicação

Giordani, Bruna Baggio
Uso de dados não sistemáticos para calibração
hidrodinâmica do modelo MGB: estudo de caso da região
do Vale do Rio Taquari (RS) para a inundação de julho
de 2020 / Bruna Baggio Giordani. -- 2021.
111 f.
Orientador: Fernando Mainardi Fan.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. Inundações. 2. MGB. 3. Ciência Cidadã. 4. Bacia
do rio Taquari-Antas. 5. Vale do Taquari. I. Fan,
Fernando Mainardi, orient. II. Título.

BRUNA BAGGIO GIORDANI

USO DE DADOS NÃO SISTEMÁTICOS PARA CALIBRAÇÃO HIDRODINÂMICA DO
MODELO MGB: ESTUDO DE CASO DA REGIÃO DO VALE DO RIO TAQUARI (RS)
PARA A INUNDAÇÃO DE JULHO DE 2020

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em **21/05/2021** pela Comissão avaliadora constituída por:

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva – Departamento de Hidromecânica e Hidrologia

.....
Msc. Franciele Maria Vanelli – Bolsista de Doutorado IPH - UFRGS

.....
Msc. Vinícius Alencar Siqueira - Bolsista de Doutorado IPH - UFRGS

Conceito: A

*Dedico este trabalho à minha família, que me apoiou
durante todo período de graduação.*

AGRADECIMENTOS

Os meus sinceros agradecimentos:

Primeiramente aos meus pais Etacir e Andréia, e minha irmã Fernanda, os quais não mediram esforços para que eu pudesse realizar este sonho. Esta conquista é de vocês também!

Aos meus amigos, principalmente os que fiz durante a graduação. Em especial, aos colegas Pâmela, Gabriele, Natália, Leonardo, Julia, Sabrina, Bianca, Maria, Rodrigo e Débora, que estiveram comigo durante estes anos de graduação, me apoiando, sendo companheiros e tornando esta caminhada mais leve.

À UFRGS, pela infraestrutura e recursos fornecidos para que eu pudesse realizar este curso e também a todos os professores que contribuíram para a minha formação, em especial ao meu orientador, professor Fernando Mainardi Fan, que me auxiliou neste trabalho e em tantos outros momentos ao longo do curso, servindo como um exemplo de profissional e professor.

Ao meu namorado Mateus, por toda paciência, atenção e incentivo que sempre me destes, me auxiliando a alcançar este objetivo.

À todas as pessoas com que cruzei nesta caminhada acadêmica: na iniciação científica, projetos de extensão, Empresa Júnior e estágios. Todos contribuíram de alguma forma para minha formação, obrigada!

Aos demais amigos e familiares, obrigada por todo apoio que me deram.

RESUMO

GIORDANI, B. B. Uso de dados não sistemáticos para calibração hidrodinâmica do modelo MGB: estudo de caso da região do Vale do Rio Taquari (RS) para a inundação de julho de 2020. 2021. 111 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas e Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Diversas cidades do Vale do Taquari, região que integra a bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, a qual se localiza a nordeste do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, frequentemente são atingidas por inundações ribeirinhas que causam grandes impactos socioeconômicos. Um dos eventos mais críticos de inundação registrados na região é o de julho de 2020, que foi ocasionado por episódios de chuvas intensas ocorridos no estado. Em paralelo à esta informação, ressalta-se que calibração de modelos hidrológicos-hidrodinâmicos para condições extremas, como é o caso do evento de inundação mencionado, é dificultada por inúmeros motivos, sendo o principal a falta de dados provenientes de monitoramento fluviométrico ou sensoriamento remoto. Neste sentido, a coleta de dados baseada em informações disponibilizadas por cidadãos, ou seja, dados não sistemáticos, vem ganhando espaço. Com a disseminação rápida dos *smartphones*, aliada ao elevado número de usuários hospedados em plataformas online de compartilhamento de vídeos e em redes sociais, a disponibilização de dados coletados por cidadãos, também chamada de “ciência cidadã”, acontece de forma praticamente simultânea à ocorrência de um evento de inundação, o que permite a utilização destes dados para calibrar os modelos nestas condições. Assim, este trabalho teve como objetivo principal utilizar dados não sistemáticos para calibrar o módulo hidrodinâmico do modelo MGB, tendo como estudo de caso a região do Vale do Taquari e a inundação ocorrida em julho de 2020. A primeira etapa do estudo consistiu em selecionar vídeos e imagens disponíveis em redes sociais e plataformas de compartilhamento de vídeos. Em seguida, foi calibrado o coeficiente de Manning do modelo e comparadas as manchas de inundação simuladas com os pontos demarcados através da observação das imagens e vídeos selecionados (dados não sistemáticos), avaliando o erro horizontal associado. Posteriormente, foi realizada a validação do modelo com base nos hidrogramas das estações fluviométricas da região (dados sistemáticos), verificando se a calibração foi eficaz. A partir dos resultados obtidos constatou-se que, apesar de terem sido identificadas algumas limitações associadas a metodologia aplicada, a utilização dos dados não sistemáticos confere um valor adicional para a preparação do modelo pois inclui uma nova dimensão à avaliação, a área inundada, esta que provavelmente não seria avaliada, na etapa de calibração, sem os dados provenientes de ciência cidadã. Ainda, observou-se que o coeficiente de Manning que apresentou menor erro horizontal médio na calibração ($0,045 \text{ s/m}^{1/3}$) não é o que apresentou maior Nash médio na validação ($0,030 \text{ s/m}^{1/3}$), o que é esperado visto que os parâmetros hidrológicos do MGB regional utilizado neste estudo foram calibrados originalmente para o coeficiente de Manning de $0,030 \text{ s/m}^{1/3}$. Entretanto, é ressaltado que utilizando o Manning de $0,045 \text{ s/m}^{1/3}$ são obtidos melhores resultados para as manchas de inundação sem degradar muito o valor de Nash, o que indica, portanto, que se os parâmetros hidrológicos fossem reajustados, existe potencial para obter bons resultados de manchas de inundação e também de Nash. Por fim, é concluído que este estudo avança no sentido de difundir o uso de dados provenientes da ciência cidadã na área de hidrologia, podendo, inclusive, implementar a utilização destes dados não sistemáticos em aplicações mais rotineiras de modelagem de inundações, complementando os dados sistemáticos para atividades de calibração e validação.

Palavras-chave: Inundações. MGB. Ciência cidadã. Bacia do rio Taquari-Antas. Vale do Taquari.

ABSTRACT

A big number of towns on Vale do Taquari, a region that integrates the hydrographic basin of the Taquari-Antas river, which is located in the northeast of the state of Rio Grande do Sul, Brazil, are frequently affected by riverside floods that cause great socioeconomic impacts. One of the most critical flood events recorded in the region is that of July 2020, which was caused by episodes of heavy rains in the state. In parallel to this information, it is noteworthy that calibration of hydrological-hydrodynamic models for extreme conditions, like the case of the mentioned flood event, is hampered for several reasons, the main one being the lack of data from fluvimetric monitoring or remote sensing. In this sense, data collection based on information obtained by citizens, which means non-systematic data, is gaining space. With the fast spread of smartphones, associated with the high number of users hosted on online video sharing platforms and present on social networks, the availability of data collected by citizens, also called “citizen science”, happens almost simultaneously with the occurrence of a flood event, which allows the use of this data to calibrate the models in these conditions. Thus, this work had as main objective to use non-systematic data to calibrate the hydrological MGB model, taking as a case study the region of Vale do Taquari and the flood that happened in July 2020. The first stage of the study consisted in select videos and images available on social networks and video sharing platforms. Then, the model’s Manning coefficient was calibrated and comparing the flood mapping simulated with the demarcated points through the observation of selected images and videos (non-systematic data), evaluating the associated horizontal error. Subsequently, the validation of the model was based on the hydrographs of the river stations in the region (systematic data), verifying whether the calibration was effective. From the results obtained, it was found that, although some limitations associated with the applied methodology have been identified, the use of non-systematic data provides an additional value for the preparation of the model because it includes a new dimension to the assessment, the flooded area, that probably would not be evaluated, in the calibration stage, without data from citizen science. Still, it was observed that the Manning coefficient that presented the lowest average horizontal error in the calibration ($0,045 \text{ s/m}^{1/3}$) is not the one that presented the highest average Nash in the validation ($0,030 \text{ s/m}^{1/3}$), which is expected seen that the hydrological parameters of the regional MGB used in this study were originally calibrated to the Manning coefficient of $0,030 \text{ s/m}^{1/3}$. However, it is emphasized that using the $0,045 \text{ s/m}^{1/3}$ Manning, better results are obtained for the flood-spots without degrading the Nash value too much, which indicates, therefore, that if the hydrological parameters were readjusted, there is potential to obtain good results from flood mapping and also Nash. Finally, it is concluded that this study advances towards spreading the use of data from citizen science in the area of hydrology, and may even implement the use of these non-systematic data in more routine flood modeling applications, complementing the systematic data for calibration and validation activities.

Keywords: Floods. MGB. Citizen science. Taquari-Antas river basin. Vale do Taquari.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Características dos leitos de um rio.	21
Figura 2. Modelo de curva hipsométrica relacionando cota e área alagada.....	38
Figura 3. Representação esquemática do ciclo hidrológico simulado pelo MGB.....	39
Figura 4. Localização da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.....	42
Figura 5. Identificação dos municípios e rios que compõe a região do Vale do Taquari.....	43
Figura 6. Precipitação acumulada observada (mm) no Rio Grande do Sul no período de 27/06/2020 a 03/07/2020.....	45
Figura 7. Precipitação acumulada observada (mm) no Rio Grande do Sul. no período de 04/07/2020 a 10/07/2020.....	45
Figura 8. Precipitação acumulada observada (mm) no Rio Grande do Sul no período de 11/07/2020 a 17/07/2020.....	46
Figura 9. Fluxograma resumo da metodologia do trabalho.....	49
Figura 10. Exemplo da demarcação de pontos, destacados em vermelho, para representação da extensão da mancha de inundação (à esquerda) com base em imagens e/ou vídeos (à direita). ..	51
Figura 11. Limites do MGB do Rio Grande do Sul Hidrológico.	52
Figura 12. Postos pluviométricos utilizados como dado de entrada para validação do MGB.	54
Figura 13. Exemplo da demarcação do erro horizontal, entre as manchas simuladas e os pontos demarcados através dos dados não sistemáticos.....	55
Figura 14. Postos pluviométricos utilizados como dado de entrada para validação do MGB.	56
Figura 15. Postos pluviométricos utilizados para validação dos resultados do modelo.	57
Figura 16. Exemplo de comparação entre hidrograma simulado e observado.....	59
Figura 17. Área de cobertura da mancha de inundação pelas fotos e vídeos selecionados.....	62
Figura 18. Frame de fotos extraídas do vídeo de sobrevoos da extensão da inundação no município de Muçum, no dia 08 de julho de 2020.	63
Figura 19. Frame de fotos extraídas do vídeo de sobrevoos da extensão da inundação no município de Roca Sales, nos dias 08 e 12 de julho de 2020.	63
Figura 20. Exemplos de imagens aéreas que mostram a extensão da inundação no município de Encantado, no dia 08 de julho de 2020.....	64
Figura 23. Frame de fotos extraídas do vídeo de sobrevoos da extensão da inundação no município de Arroio do Meio, nos dias 08 e 09 de julho de 2020.....	64
Figura 21. Frame de fotos extraídas do vídeo de sobrevoos da extensão da inundação no município de Colinas, no dia 08 de julho de 2020.	65
Figura 22. Frame de fotos extraídas do vídeo de sobrevoos da extensão da inundação no município de Lajeado, no dia 08 de julho de 2020.....	65
Figura 24. Exemplos de imagens aéreas que mostram a extensão da inundação no município de Estrela, no dia 09 de julho de 2020.	65

Figura 25. Frame de fotos extraídas do vídeo de sobrevoo da extensão da inundação no município de Bom Retiro do Sul, no dia 09 de julho de 2020.....	66
Figura 26. Distribuição das estações pluviométricas e precipitação acumulada. (A) Período de 27 de junho a 03 de julho de 2020; (B) Período de 04 de julho a 10 de julho de 2020; (C) Período de 11 de julho a 17 de julho de 2020.....	67
Figura 27. Erro horizontal médio, para os diferentes coeficientes de Manning, nos três eventos analisados.	68
Figura 28. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 08 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Muçum e Roca Sales.	69
Figura 29. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 09 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Arroio do Meio e Colinas.	70
Figura 30. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 12 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Encantado e Roca Sales.....	70
Figura 31. Manchas de inundação diárias, na região do Vale do Taquari, nos dias 08, 09 e 12 de julho.	71
Figura 32. Manchas de inundação diárias, nos municípios mais a montante no rio Taquari, nos dias 08, 09 e 12 de julho.	72
Figura 33. Manchas de inundação diárias, nos municípios mais a jusante no rio Taquari, nos dias 08, 09 e 12 de julho.	72
Figura 34. Hidrograma observado e simulado para diferentes valores de Manning na minibacia da estação 86580000 – Santa Lúcia. (A) Período simulado, (B) zoom no evento extremo de 2020.	76
Figura 35. Hidrograma observado e simulado para diferentes valores de Manning na minibacia da estação 86510000 – Muçum. (A) Período simulado, (B) zoom no evento extremo de 2020.....	77
Figura 36. Hidrograma simulado para diferentes valores de Manning na minibacia da estação 86720000 – Encantado. (A) Período simulado, (B) zoom no evento extremo de 2020 - a estação não possui dados observados neste período.	78
Figura 37. Hidrograma simulado para diferentes valores de Manning na minibacia da estação 86895000 – Porto Mariante. (A) Período simulado, (B) zoom no evento extremo de 2020 - a estação não possui dados observados neste período.....	79
Figura 38. Erro horizontal médio (calibração) <i>versus</i> E_{NS} médio (validação) para diferentes valores de Manning.....	80
Figura 39. Erro horizontal médio (calibração) <i>versus</i> E_{NS-LOG} médio (validação) para diferentes valores de Manning.....	81
Figura 40. Erro horizontal médio (calibração) <i>versus</i> ΔV médio (validação) para diferentes valores de Manning.....	81
Figura 41. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 08 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Muçum e Roca Sales.	103

Figura 42. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 08 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Encantado e Roca Sales.....	104
Figura 43. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 08 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Arroio do Meio e Colinas.	105
Figura 44. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 08 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Lajeado e Estrela.	106
Figura 45. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 09 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Arroio do Meio e Roca Sales.	107
Figura 46. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 09 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Arroio do Meio e Colinas.	108
Figura 47. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 09 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Bom Retiro do Sul.....	109
Figura 48. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 09 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Lajeado e Estrela.	110
Figura 49. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 12 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Encantado e Roca Sales.....	111

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Resumo das características dos dados sistemáticos e não sistemáticos.	24
Quadro 2. Caracterização dos dados quanto à sua validade e confiabilidade.	25
Quadro 3. Descrição das estações fluviométricas selecionadas para validação.	56
Quadro 4. Testes de calibração por enumeração para o coeficiente de Manning.	60
Quadro 5. Faixas de valores para o coeficiente de Manning em canais naturais.	60
Quadro 6. Detalhamento das informações dos vídeos selecionados.	62
Quadro 7. Detalhamento das informações das imagens selecionadas.	63
Quadro 8. Estações pluviométricas selecionadas para calibração e validação do MGB.	98
Quadro 9. Precipitação observada acumulada nas estações pluviométricas utilizadas na calibração do MGB.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Cotas de eventos históricos de inundação no município de Muçum e Estrela.	47
Tabela 2. Informações sobre a quantidade de pessoas afetadas e os prejuízos econômicos para os municípios do Vale do Taquari na inundação de julho de 2020.....	47
Tabela 3. Resultados dos testes para diferentes Mannings na calibração do modelo – Erro horizontal.	68
Tabela 4. Resultados dos testes para diferentes valores de Manning – Parâmetro E_{NS}	73
Tabela 5. Resultados dos testes para diferentes valores de Manning – Parâmetro E_{NS-LOG}	74
Tabela 6. Resultados dos testes para diferentes valores de Manning – Parâmetro ΔV	74

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
COBRADE	Classificação e Codificação Brasileira de Desastres
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CRH	Classes de Resposta Hidrológica
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSMA	<i>Global System Mobile Association</i>
GSWO	<i>Global Surface Water Occurrence</i>
HAND	<i>Height Above the Nearest Drainage</i>
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System</i>
HEC-RAS	<i>Hydrologic Engineering Center - River Analysis System</i>
HGE	Hidrologia de Grande Escala
IDW	<i>Inverse Distance squared Weighting</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
MGB	Modelo de Grandes Bacias
RHN	Rede Hidrometeorológica Nacional
RSH	Rio Grande do Sul Hidrológico
SACE	Sistema de Alerta de Eventos Críticos
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura
SIG	Sistema de Informação Geográfica
S2ID	Sistema Integrado de Informações sobre Desastres
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
URH	Unidade de Resposta Hidrológica
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

LISTA DE SÍMBOLOS

A (m ²)	Área da seção transversal ao escoamento
Ad (km ²)	Área de drenagem
B (m)	Largura do rio
B_{rio} (m)	Largura da calha na minibacia
E_{NS}	Coefficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe das vazões calculadas e observadas
E_{NS-Log}	Coefficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões calculadas e observadas
g (m/s ²)	Aceleração da gravidade
h (m)	Profundidade do escoamento
H (m)	Elevação da superfície d'água
H_{rio} (m)	Profundidade da calha na minibacia
n	Coefficiente de rugosidade de Manning
N	Número de intervalos de tempo da série de dados avaliada
Q (m ³ /s)	Vazão
Q_{obs} (m ³ /s)	Vazão observada
$\overline{Q_{obs}}$ (m ³ /s)	Vazão média observada no período de simulação
Q_{sim} (m ³ /s)	Vazão simulada
R (m)	Raio hidráulico
S_o	Declividade do fundo do curso d'água
S_f	Perda de energia por atrito com o fundo e as margens
t (s)	Tempo
x (m)	Distância no sentido longitudinal
y (m)	Distância ao longo do eixo y
$\alpha, \beta, \gamma, \theta$	Parâmetros de ajuste de equações
ΔV (%)	Erro relativo de volume total dos hidrogramas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	REVISÃO BILIOGRÁFICA.....	20
3.1	ENCHENTES E INUNDAÇÕES	20
3.2	GERENCIAMENTO DE INUNDAÇÕES.....	22
3.3	DADOS HIDROLÓGICOS NO CONTEXTO DE INUNDAÇÕES	24
3.3.1	Dados sistemáticos	26
3.3.2	Dados não sistemáticos.....	28
3.4	MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES	32
3.4.1	Métodos simplificados.....	32
3.4.2	Modelagem matemática.....	33
3.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	41
4	ESTUDO DE CASO	42
4.1	APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	42
4.2	INUNDAÇÃO DE JULHO DE 2020.....	44
4.3	ESTUDOS ANTERIORES NA REGIÃO	47
5	MATERIAL E MÉTODOS	49
5.1	SELEÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS NÃO SISTEMÁTICOS.....	50
5.2	APLICAÇÃO DO MODELO MGB.....	51
5.2.1	Descrição do MGB Rio Grande do Sul Hidrológico	51
5.2.2	Calibração.....	53
5.2.3	Validação.....	55
5.2.4	Calibração por enumeração - coeficiente de Manning	59
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
6.1	DADOS NÃO SISTEMÁTICOS SELECIONADOS	61
6.2	CALIBRAÇÃO	66
6.2.1	Análise da precipitação acumulada	66
6.2.2	Resultados da calibração	67
6.2.3	Mancha de inundação	71
6.3	VALIDAÇÃO.....	73
6.4	CALIBRAÇÃO <i>VERSUS</i> VALIDAÇÃO.....	80
6.5	DISCUSSÃO SOBRE AS INCERTEZAS ASSOCIADAS	82
6.5.1	Topobatimetria e discretização do modelo	82
6.5.2	Coeficiente de rugosidade de Manning	83

6.5.3	Dados não sistemáticos utilizados para calibração.....	83
6.5.4	Dados sistemáticos utilizados para validação.....	84
6.6	BANCO DE DADOS PARA ESTUDOS FUTUROS.....	84
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	86
7.1	CONCLUSÕES	86
7.2	RECOMENDAÇÕES.....	87
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
	ANEXOS	98
ANEXO A.	DESCRIÇÃO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS	98
ANEXO B.	PRECIPITAÇÃO ACUMULADA NAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS ...	101
ANEXO C.	MANCHAS DE INUNDAÇÃO.....	103

1 INTRODUÇÃO

O crescimento desordenado da maioria das cidades brasileiras ao longo de rios e corpos hídricos, principalmente na segunda metade do século XX, ocasionou diversos problemas que atingem diretamente à sociedade, dentre eles as inundações (TUCCI, 2005), que são consideradas, de acordo com a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE, [s. d.]), desastres naturais hidrológicos causados pelo extravasamento da calha principal de um curso d'água.

Entre os diferentes tipos de desastres naturais ocorridos ao redor do mundo, as inundações são um dos eventos que causam os maiores danos socioeconômicos. Considerando o período de 2009 a 2018, a média anual de impactados com as inundações foi de 71,9 milhões de pessoas, totalizando 4913 mortes anuais e uma média anual de perdas econômicas de 40 bilhões de dólares (CRED, 2019). Enquanto isso, no Brasil, os episódios de inundações severas chegam a representar cerca de 12% do total de ocorrências de desastres naturais (CEPED; UFSC, 2013).

As inundações de áreas ribeirinhas caracterizam-se pela tomada da planície de inundação pelo escoamento pluvial. Diversas cidades do Vale do Taquari, região que integra a bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, a qual localiza-se a nordeste do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, têm sofrido inundações frequentes com essa característica. Um dos eventos mais críticos de inundação registrados na região é o de julho de 2020, que foi ocasionado por episódios de chuvas intensas ocorridos no estado, resultando em cotas históricas no rio Taquari, sendo algumas delas as maiores já monitoradas na região (SEMA, 2020).

Para minimizar os impactos socioeconômicos das inundações, as soluções disponíveis consistem na implementação de medidas estruturais ou não-estruturais. Normalmente, medidas não-estruturais são financeiramente mais viáveis, e possuem foco na prevenção para melhorar a convivência da população com as enchentes (TUCCI, 2001, 2003a). Como exemplo destas medidas, podem ser citados o mapeamento de inundações, que tem importância no zoneamento de uso e ocupação do solo e na identificação de áreas vulneráveis; e os sistemas de previsão, que possibilitam que informações como o nível ou vazão de rios sejam conhecidas com certa antecedência a um evento de inundação. Se acopladas, estas medidas não-estruturais citadas podem servir como um sistema de alerta à população sobre a ocorrência destes eventos.

Destaca-se, entretanto, que para a adoção destas medidas preventivas, todas as informações hidrológicas envolvidas no processo de identificação e monitoramento dos locais que são atingidos por inundações são de suma importância. Atualmente, o delineamento de enchentes é baseado,

principalmente, em modelagem hidrológica e hidráulica, coleta de dados *in-situ* e sensoriamento remoto. Apesar das vantagens dessas ferramentas, elas também apresentam algumas limitações específicas, sejam intrínsecas às abordagens ou vinculadas às restrições do contexto local.

De acordo com Sivapalan *et al.* (2010), métodos tradicionais para medição de variáveis hidrológicas *in-situ* são limitados espacial e temporalmente, principalmente em países em desenvolvimento. Já a o mapeamento de inundações utilizando modelos matemáticos se mostra como a alternativa mais utilizada na maioria dos casos. Modelos hidráulicos e hidrodinâmicos unidimensionais, baseados na solução das equações completas de Saint-Venant, como por exemplo o HEC-RAS (USACE, 2016), são frequentemente utilizados para mapeamento de inundação. Entretanto, estes modelos podem ser pouco acurados em locais com amplas planícies de inundação por não representarem processos importantes de fluxos difusos nas mesmas, mas sua validade depende da finalidade de aplicação do modelo. Os modelos hidrodinâmicos bidimensionais, por sua vez, apresentam boa precisão na maioria das aplicações, porém são considerados inviáveis para áreas maiores que 1000 km² devido demandarem elevada capacidade computacional (TENG *et al.*, 2017).

Apesar de geralmente eficiente, a modelagem matemática utilizada no processo de mapeamento de inundação requer como entrada dados que incluem medições ou estimativas de vazões a montante do local de interesse ou a informação de nível. Estes dados nem sempre se encontram disponíveis no monitoramento fluviométrico, que no caso do Brasil é coordenado pela Agência Nacional de Águas (ANA, [s. d.]).

Desta forma, os modelos hidráulicos são frequentemente acoplados à modelos hidrológicos, que, segundo Tucci (1998), a partir de dados de precipitação e de um conjunto de parâmetros associados, permitem completar vazões desconhecidas ou estimar as mesmas para novos cenários. Assim, é possível não somente realizar o mapeamento de eventos já observados ou cenários hipotéticos, como também atuar na previsão de enchentes. Este é o caso do Modelo de Grandes Bacias (MGB) (PONTES *et al.*, 2017), que é um modelo hidrológico e hidrodinâmico que representa o processo de transformação de chuva em vazão de forma distribuída na bacia hidrográfica e foi escolhido para ser aplicado neste estudo.

Embora não seja necessário fornecer dados fluviométricos como informação de entrada para a realização de simulações no MGB, os mesmos são necessários na etapa de calibração dos parâmetros do modelo (COLLISCHONN *et al.*, 2020a). Nesta etapa, os dados de vazão observada são comparados com os dados simulados visando a melhor representação dos processos de transformação de chuva em vazão e propagação do escoamento. Contudo, novamente estes dados

são condicionados à existência de estações fluviométricas próximas aos locais desejados e que as mesmas possuam curva-chaves consolidadas e série temporal suficientemente longa.

Como alternativa é possível utilizar, também, informações provenientes de sensoriamento remoto, como imagens de satélite (e.g. MARINHO *et al.*, 2012; GARRAFIEL, 2018; SILVEIRA; GUASSELLI, 2019), para identificação da mancha de inundação e posterior comparação com os resultados do modelo. Neste caso, ressalta-se que a técnica pode ser dificultada devido à presença de elevada nebulosidade que geralmente ocorre inclusive nos dias subsequentes ao evento (no caso de sensores ópticos) ou pela baixa resolução espacial e cobertura temporal das imagens.

Frente a estas dificuldades, a coleta de dados baseada em informações disponibilizadas por cidadãos, ou seja, dados não sistemáticos, que se caracterizam por serem não constantes no espaço e no tempo, vem ganhando espaço. Com a disseminação rápida dos, amplamente disponíveis, *smartphones*, aliada ao elevado número de usuários hospedados em plataformas online de compartilhamento de vídeos e em redes sociais, a disponibilização de dados coletados por cidadãos acontece de forma praticamente simultânea à ocorrência de um evento de inundação, o que permite a utilização destes dados para, por exemplo, calibrar um modelo hidrológico para condições extremas (FOHRINGER *et al.*, 2015; ASSUMPÇÃO *et al.*, 2018). De acordo com See (2019), os dados fornecidos pelos cidadãos melhoram a disponibilidade espacial, visto que são registrados na escala em que o impacto ocorre, e também a disponibilidade temporal de informações para resposta e gerenciamento de desastres.

Assim, tendo em vista a problemática das inundações na região do Vale do Taquari, a magnitude do evento de inundação de julho de 2020 e as dificuldades de falta de dados constantemente enfrentadas no processo de calibração de modelos hidrológicos-hidrodinâmicos em grandes bacias hidrográficas, esta pesquisa tem como principal objetivo avaliar a utilização de dados não sistemáticos de imagens e vídeos, coletados e publicados *online* por cidadãos via *smartphone*, para calibração hidrodinâmica do MGB. Ainda, visto que desde 2018 o MGB vem sendo utilizado pela Sala de Situação da Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura (SEMA) para previsão e alerta de cheias no estado do Rio Grande do Sul (GIACOMELLI *et al.*, 2019), esta pesquisa pretende contribuir positivamente para o atual sistema de alerta, podendo implicar num benefício econômico e social.

Também se ressalta que, caso os resultados apresentados neste trabalho demonstrarem a viabilidade do uso dos dados não-sistemáticos na preparação do modelo, acredita-se que esta abordagem pode ser implementada em aplicações mais rotineiras do modelo junto com os dados sistemáticos para atividades de calibração e validação.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a utilização de dados não sistemáticos, como vídeos e imagens, para calibração hidrodinâmica do modelo hidrológico MGB na região do Vale do Taquari, localizada na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, e o evento de inundação ocorrida em julho de 2020.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos consistem em:

- Propor e verificar um método de obtenção de dados de inundação a partir de fontes de dados não sistemáticos;
- Avaliar a acurácia das manchas de inundação simuladas pelo modelo para diferentes valores de coeficiente de Manning, através da análise de erro com dados não sistemáticos;
- Avaliar o impacto da calibração das manchas de inundação sobre as vazões simuladas do MGB;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica apresenta os principais conceitos teóricos utilizados para atingir os objetivos da pesquisa. Desta forma, inicialmente são apresentados conceitos e perspectivas gerais sobre inundações, bem como a importância do monitoramento, do estudo e do respectivo mapeamento de inundações. Após, é apresentada a diferenciação entre dados sistemáticos e não sistemáticos no contexto de eventos de inundação, indicando exemplos, vantagens e limitações de cada tipo de dado. Em seguida, é apresentada uma revisão a respeito do mapeamento de inundações através de modelos matemáticos, focando no modelo MGB, o qual será utilizado neste trabalho.

3.1 ENCHENTES E INUNDAÇÕES

De acordo com Tucci (2005), os problemas com as inundações acompanham a história do desenvolvimento humano visto que o homem sempre procurou localizar-se próximo a rios para usá-los como transporte, abastecimento de água e disposição de dejetos. Desse modo, grande parte das cidades se desenvolveram próximas às margens dos rios. Inicialmente a população procurava habitar zonas mais altas das cidades, entretanto, “com o crescimento desordenado e acelerado das cidades, principalmente na segunda metade do século 20, as áreas de risco considerável, como as várzeas inundáveis, foram ocupadas, trazendo, como consequência, prejuízos humanos e materiais de grande monta resultantes das inundações subsequentes” (TUCCI, 2005, p. 43).

As inundações compõem o grupo dos desastres naturais hidrológicos segundo a COBRADE ([s. d.]), a qual refere-se às mesmas como “submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas”. A classificação indica, ainda, que o transbordamento ocorre de modo gradual, geralmente ocasionado por chuvas prolongadas em áreas de planície.

Os rios são constituídos por um leito menor, onde a água escoia pela maior parte do tempo, e um leito maior. Assim sendo, difere-se os termos enchente, ou cheia, e inundação de acordo com o leito do rio que o volume de água atingiu. As enchentes/cheias consistem na elevação do nível de água de um rio, acima de sua capacidade natural de escoamento, podendo causar ou não inundações. Já o termo inundação é utilizado para definir o excesso do volume de água que não consegue ser drenado pelo canal principal (leito menor), inundando as áreas ribeirinhas (leito maior ou planície de inundação) (CASTRO, 1998; ECKHARDT, 2008; TUCCI, 2005). A diferenciação entre os leitos dos rios é apresentada na Figura 1.

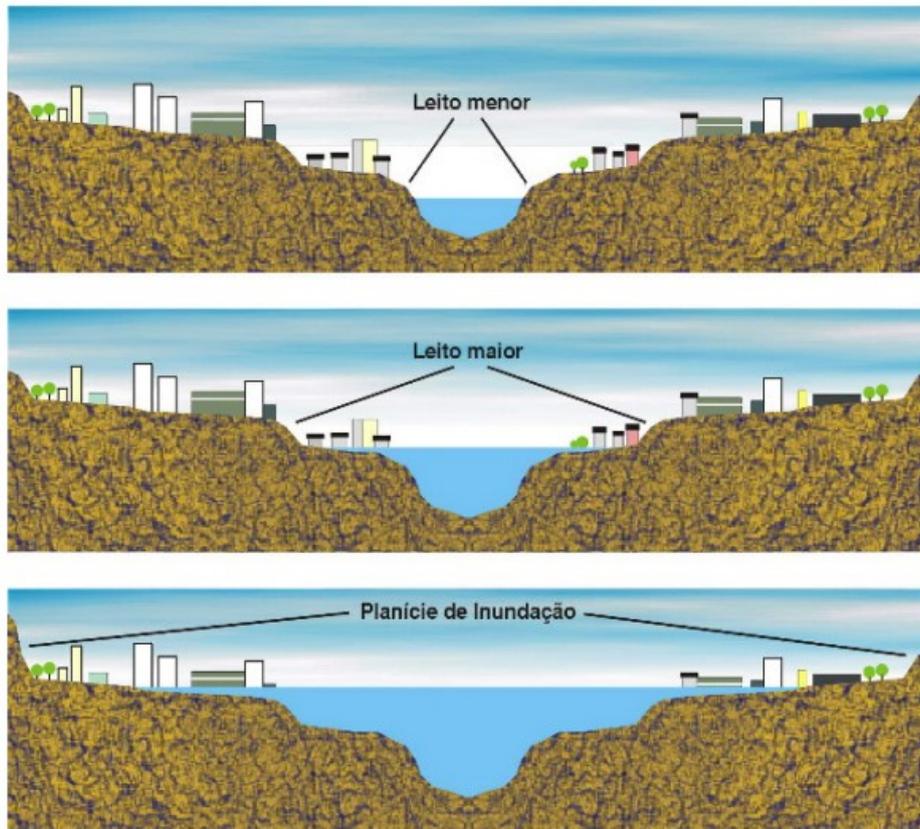


Figura 1. Características dos leitos de um rio.
(Fonte: ECKHARDT, 2008, p. 27)

Segundo Tucci (2005), o escoamento pluvial pode produzir inundações e impactos nas áreas urbanas resultantes de dois processos, que ocorrem isoladamente ou combinados: inundações de áreas ribeirinhas e/ou inundações resultantes da urbanização. O primeiro tipo refere-se às inundações naturais que ocorrem no leito maior dos rios, derivadas das variabilidades temporal e espacial da precipitação e do escoamento na bacia hidrográfica, enquanto que as inundações resultantes da urbanização são inundações que ocorrem na drenagem urbana por conta do efeito da impermeabilização do solo, da canalização do escoamento ou de obstruções ao escoamento. Em relação às inundações ribeirinhas, que são as estudadas neste trabalho, Tucci (2003a) explica o processo devido ao qual as mesmas ocorrem:

Quando a precipitação é intensa e o solo não tem capacidade de infiltrar, grande parte do volume escoar para o sistema de drenagem, superando sua capacidade natural de escoamento. O excesso de volume que não consegue ser drenado ocupa a várzea inundando de acordo com a topografia áreas próximas aos rios. Estes eventos ocorrem de forma aleatória em função dos processos climáticos locais e regionais. (TUCCI, 2003a, p. 45)

Em paralelo a esse conhecimento, é preciso compreender que um desastre natural apenas ocorre quando determinado fenômeno natural, neste caso as inundações, afeta pessoas física ou economicamente (KOBAYAMA *et al.*, 2006). É destacado por Tucci (2003b) que quando a população ocupa o leito maior, que são áreas de risco, os impactos são frequentes. Ocorrem

prejuízos de perdas materiais e humanas, interrupção da atividade econômica das áreas inundadas, contaminação por doenças de veiculação hídrica, danos aos sistemas de abastecimento de água, dentre outros.

De acordo com Kobiyama *et al.* (2006), vêm aumentando gradativamente a frequência com que ocorrem as inundações e os prejuízos que as mesmas causam, o que pode estar associado ao aumento do número de ocupações nas planícies de inundação. Estatísticas do Centro de Investigação sobre a Epidemiologia dos Desastres (CRED, 2019) mostram que, somente no ano de 2019, houveram 194 registros¹ de inundações no mundo, enquanto que a média de registros anuais, do período de 2009 a 2018, é de 149 registros de inundações. Neste mesmo período (2009 a 2018), a média anual de impactados com as inundações foi de 71,9 milhões de pessoas, totalizando 4913 mortes anuais e resultando em uma média anual de perdas econômicas de 40 bilhões de dólares.

No Brasil, de acordo com o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED; UFSC, 2013), os episódios de inundações severas entre 1991 e 2012 totalizam 4691 registros oficiais, número que representa 12% do total de ocorrências de desastres naturais ocorridos no Brasil neste período. Quando se analisa por região brasileira, as inundações ocorridas na região Sul, no mesmo período mencionado, correspondem a 22% do total de ocorrências de inundações do país, sendo esta uma das regiões mais afetadas.

3.2 GERENCIAMENTO DE INUNDAÇÕES

Visto a problemática existente em relação às inundações, um gerenciamento adequado pode ser útil para minimizar os impactos causados pelas mesmas. Desta forma, as medidas existentes para o controle de inundações podem ser do tipo estruturais ou não-estruturais. Conforme apresentado por Tucci (2001), “as medidas estruturais são aquelas que modificam o sistema fluvial evitando os prejuízos decorrentes das enchentes, enquanto que as medidas não-estruturais são aquelas em que os prejuízos são reduzidos pela melhor convivência da população com as enchentes”.

Medidas estruturais possuem um elevado custo construtivo associado e envolvem obras como: reservatórios e bacias de amortecimento para retardar o escoamento; construção de diques

¹ O número engloba inundações ribeirinhas, inundações costeiras, enxurradas e inundações devido a congestionamentos de gelo.

que aumentam a capacidade de descarga dos rios, acelerando o escoamento; modificações na morfologia do rio através da redução da rugosidade, dragagem ou corte de meandro, ampliando a área protegida e acelerando o escoamento; obras de canais de desvios, reduzindo a vazão no canal principal.

Entretanto, além do elevado custo associado, Tucci (2001) destaca também que as medidas estruturais não são projetadas para dar uma proteção completa pois isso é fisicamente e economicamente inviável na maioria das situações. Também é destacado por White (1945) e Di Baldassarre *et al.* (2019) que as medidas estruturais podem criar uma falsa sensação de segurança e ampliar a ocupação das áreas inundáveis, de modo a reduzir a consciência do risco, tornando, assim, as pessoas mais vulneráveis a eventos de grandes magnitudes.

Já as medidas não-estruturais, que são de caráter preventivo, geralmente são mais viáveis economicamente, sendo elas: zoneamento de áreas de inundação por meio de regulamentação do uso da terra, construções à prova de enchentes, seguro de enchente e previsão e alerta de inundação (TUCCI, 2001). A combinação destas medidas não-estruturais citadas permite reduzir os impactos dos eventos de inundação, sendo imprescindível que sejam utilizadas em conjunto:

Como o zoneamento pressupõe a ocupação com risco, torna-se necessário que exista um sistema de alerta para avisar a população sobre os riscos durante a enchente. O seguro e a proteção individual contra enchente são medidas complementares, necessárias para minimizar impactos sobre a economia da população. (TUCCI, 2001, p. 630)

Como exemplo de medidas não-estruturais para controle de inundações podem ser destacados o mapeamento de inundações e os sistemas de previsão. Quando acopladas, estas duas medidas podem servir como sistemas de alerta que auxiliam na mitigação de perdas, sendo seu uso comum em vários países.

Parte dos sistemas de alerta, as previsões hidrológicas servem para antever a ocorrência de um evento danoso e possibilitam que informações como o nível ou vazão de rios sejam conhecidas com certa antecedência, aumentando o tempo de reação disponível. São exemplos de abordagens para modelos de previsão hidrológicas na área de estudo deste trabalho: regressões múltiplas lineares (ECKHARDT, 2008); modelos conceituais chuva-vazão, como o MGB (SIQUEIRA *et al.*, 2015), que terá seu funcionamento detalhado no item 3.4.2.1; e Redes Neurais Artificiais (RNAs) (PEDROLLO, 2017).

Os mapas de manchas de inundação abrangem o conceito de medidas não-estruturais e são uma continuidade dos sistemas de alertas hidrológicos (CPRM, [s. d.]). Podem ser utilizados como ferramentas de planejamento urbano e como incremento ao sistema de alerta, que, em função

dos resultados de previsão das cotas de inundação, permite alertar autoridades, Defesa Civil e a população em geral sobre as áreas a serem atingidas por uma enchente ou inundação.

3.3 DADOS HIDROLÓGICOS NO CONTEXTO DE INUNDAÇÕES

A delimitação de manchas de inundação pode ser realizada através de diversas metodologias: podem ser levantadas em campo após um evento; simuladas por um modelo hidrológico e/ou hidráulico associado às vazões e cotas do rio; através de ferramentas de geoprocessamento utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e dados de sensoriamento remoto; e, através de metodologias não convencionais, que vem ganhando espaço frente ao avanço da tecnologia.

Estas metodologias citadas são aplicadas utilizando diferentes tipos de dados. Segundo Vanelli, Fan & Kobiyama (2020), podem ser utilizados dados sistemáticos ou dados não sistemáticos. Os referidos autores comentam que os dados sistemáticos são dados quantitativos, mensurados continuamente ao longo do tempo e com intervalo temporal pré-definido em um determinado local. Já os dados não sistemáticos são provenientes de uma grande variedade de outras fontes de dados que se caracterizam, principalmente, por registros cuja posição e intervalo temporal são variáveis. O Quadro 1 apresenta um resumo destas características.

Quadro 1. Resumo das características dos dados sistemáticos e não sistemáticos.

	Dados sistemáticos	Dados não sistemáticos
Intervalo temporal	Constante; registro pré-definido resultando em série histórica	Registro irregular e descontínuo
Local de registro	Constante ao longo do tempo	Não constante ao longo do tempo
Tipo de dados	Quantitativos	Qualitativos; inferências quantitativas a partir dos dados qualitativos; registros pontuais quantitativos

(Fonte: adaptado de VANELLI; FAN; KOBİYAMA, 2020)

Os mesmos autores sugerem o uso dos seguintes termos quanto à origem dos tipos de fonte de dados:

- Evidência instrumental: mensurações de variáveis, direta ou indiretamente com equipamentos e procedimentos técnicos associados à hidrologia;
- Evidência natural: aspectos geomorfológicos, geológicos, sedimentológicos, botânicos, geoquímicos, dentre outros aspectos que indicam alterações no ambiente natural em decorrência do evento;

- Evidência documental: registros inseridos em um contexto histórico e social, tais como documentos oficiais, notícias veiculadas pelos meios de comunicação, registros e/ou observações realizadas pela população.

Vanelli, Fan & Kobiyama (2020) ressaltam que os diferentes dados disponíveis podem ser analisados de forma crítica e conjunta tendo o evento ocorrido (realidade) como alvo. “O que se espera em um estudo é que os dados sistemáticos e não sistemáticos de diferentes fontes sejam capazes de fornecer informações válidas e confiáveis, ou seja, consistentes entre si e que converjam para a representação do evento” salientam os autores. O Quadro 2 apresenta a caracterização dos dados quanto à sua validade e confiabilidade.

Quadro 2. Caracterização dos dados quanto à sua validade e confiabilidade.

Representação dos dados	Descrição
Não válidos e não confiáveis	Informações extraídas dos dados são dispersas e não convergem para representação do evento ocorrido
Não válidos, mas confiáveis	Informações consistentes entre si, porém não são úteis para representar o evento ocorrido
Dados válidos e confiáveis	Informações consistentes entre si e que convergem para a representação do evento

(Fonte: adaptado de VANELLI; FAN; KOBİYAMA, 2020)

A integração entre dados sistemáticos e não sistemáticos ainda é um desafio na hidrologia. Geralmente considera-se que os dados sistemáticos apresentam maior confiabilidade do que os dados não sistemáticos visto que a ciência hidrológica é baseada em princípios e métodos quantitativos (VANELLI; FAN; KOBİYAMA, 2020). O uso destes dados de forma integrada já foi realizado em alguns estudos, como o de Vanelli *et al.* (2020), que realizou a reconstrução de uma enchente histórica ocorrida no rio Tubarão em 1974 com base na memória da enchente e em dados quantitativos, demonstrando a importância de associar o uso de dados sistemáticos e não sistemáticos para o estudo de eventos hidrológicos extremos passados.

Os dados não sistemáticos provenientes de evidências documentais (assunto detalhado no item 3.3.2.2) vem surgindo como um meio para estabelecer a interação e coparticipação entre a pesquisa, o engajamento público e as autoridades durante as emergências (LANFRANCHI *et al.*, 2014; NJUE *et al.*, 2019). Entretanto, conforme destacado por Assumpção *et al.* (2018) se faz necessário demonstrar a importância da utilização destes dados no mapeamento e previsão de enchentes, além de aumentar a aceitação destes dados pelos gestores de recursos hídricos.

A seguir é apresentado brevemente as principais características de alguns dos tipos das fontes de dados mencionadas, classificadas em dados sistemáticos ou não sistemáticos, destacando exemplos em que foram empregadas com eficiência e vantagens e desvantagens de cada uma.

3.3.1 Dados sistemáticos

3.3.1.1 Evidência instrumental in-situ

Esta fonte de dados é relacionada aos dados sistemáticos provenientes do monitoramento através de estações hidrometeorológicas, que são usualmente compostas por estações pluviométricas e fluviométricas. No caso do Brasil, a ANA é responsável pela coordenação da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) que, por sua vez, disponibiliza as informações coletadas à população através do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

O sistema da RHN abriga um total de 4641² pontos de monitoramento no país, divididos em 1874 estações que monitoram parâmetros relacionados aos rios (e.g. níveis, vazões, qualidade da água e transporte de sedimentos), e outras 2767 estações que monitoram as chuvas (ANA, [s. d.]). Apesar destes números parecerem altos, dependendo do uso desejado pelos usuários frequentemente são observadas limitações espaciais e temporais nos dados disponíveis. Este problema não é enfrentado somente no Brasil, visto que, segundo Kidd *et al.* (2017), apenas uma pequena parcela das bacias no mundo é monitorada.

Tratando-se de eventos hidrológicos extremos, como as inundações, as limitações e qualidade dos dados das estações de monitoramento aumentam. Conforme destacado por Vanelli, Fan & Kobiyama (2020) estes eventos têm maior magnitude e menor frequência, possuindo, assim, poucos registros ao longo do tempo, com incremento nas incertezas associadas ao equipamento de medição, já que o fluxo violento da água pode ser perigoso ao operador ou aos equipamentos, ou no método de estimativa aplicado, como no caso da extrapolação da curva-chave³.

3.3.1.2 Evidência instrumental por sensoriamento remoto

Visto que os avanços tecnológicos incrementaram as fontes de dados hidrológicos, os mesmos, atualmente, também podem ser provenientes de produtos de sensores terrestres e orbitais, os quais são classificados, por Vanelli, Fan & Kobiyama (2020), como dados sistemáticos.

² Os números se referem ao inventário de estações da ANA em 03/04/2018, podendo se alterar com certa frequência, em função da incorporação de novas estações ou de sua extinção.

³ Curva que utiliza um determinado intervalo de dados medidos em campo de nível de água (cota) para inferir os dados de vazão (descarga líquida).

Segundo Tominaga, Santoro & Amaral (2009), com a disseminação do uso do sensoriamento remoto os estudos que envolvem o mapeamento de áreas vulneráveis a desastres naturais tiveram um grande desenvolvimento a partir da década de 1990, especialmente devido à possibilidade de mapeamento em regiões pouco monitoradas.

Destaca-se que uso destes dados têm se mostrado útil não somente na identificação direta de manchas de inundação, o que é possível, por exemplo, através de produtos que usam a série do Landsat, podendo citar o *Global Surface Water Occurrence* (GSWO) (PEKEL *et al.*, 2016), sensores ópticos e sensores *Synthetic Aperture Radar* (SAR) (JENSEN, 2009), como também para obtenção de variáveis hidrológicas envolvidas no processo de formação de escoamento (e.g. precipitação, umidade superficial do solo e armazenamento de água na terra), conforme citado por Tschiedel *et al.* (2018). Desta forma, os sensores remotos são úteis, também, para o fornecimento de informações necessárias para obtenção de manchas de inundação através de modelos hidrológicos e hidráulicos, ou até mesmo para auxiliar na calibração dos mesmos.

Aplicações de dados de sensoriamento remoto associadas à técnicas de geoprocessamento para identificação de manchas de inundação foram utilizadas por Marinho *et al.* (2012), Garrafiel (2018), Silveira e Guasselli (2019), dentre outros. Marinho *et al.* (2012) e Garrafiel (2018) utilizaram imagens de radar de abertura sintética (SAR) para a identificação das manchas, entretanto, Garrafiel (2018) salientou que, apesar do potencial de utilização das imagens, os resultados são sensivelmente afetados pelos limiares adotados como limite para a separação da classe de água do restante da imagem, o que torna os mesmos subjetivos.

Assim, apesar da obtenção da extensão de manchas de inundação para eventos específicos a partir do uso de sensores remotos ser vantajosa visto o fornecimento dos dados quase que simultaneamente ao evento, ressalta-se que a técnica pode ser dificultada devido à presença de elevada nebulosidade que geralmente ocorre inclusive nos dias subsequentes ao evento, no caso de sensores ópticos, e também pela não passagem do sensor durante ou após o evento, no caso de sensores SAR. Quanto às imagens de SAR, Teng *et al.* (2017) ressaltam que elas apresentam algumas desvantagens como o aumento do retroespalhamento do sinal devido a turbulência, vento e vegetação, o que dificulta a determinação da extensão da inundação em alguns casos. Além disso, a resolução espacial dos subprodutos dos dados de satélite, como por exemplo os MDEs, que são um dado de entrada que pode ser usado para o mapeamento de inundação através de técnicas de geoprocessamento (JAFARZADEGAN; MERWADE, 2017), também pode ser um empecilho para obtenção de mapas com boa qualidade.

Frente a estas dificuldades, vêm ganhando espaço no sensoriamento remoto o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), que podem fornecer dados de alta resolução visto que geralmente são complementados com sensores ópticos e até mesmo *smartphones*, tendo, portanto, um grande potencial para detecção rápida e precisa de áreas inundadas. Trabalhos de identificação de manchas de inundação a partir de imagens de VANTs foram desenvolvidos por Feng, Liu e Gong (2015), Tschiedel *et al.* (2018) e Argoud (2019).

Conforme destacado por Vanelli, Fan & Kobiyama (2020), “as evidências instrumentais podem ser fontes de dados sistemáticos e não sistemáticos, dependendo da posição e do intervalo temporal”. Assim, destaca-se que como os dados de VANTs possuem um registro irregular e descontínuo e não são constantes no tempo, eles são caracterizados como não sistemáticos, tendo sua descrição apresentada no capítulo a seguir.

3.3.2 Dados não sistemáticos

3.3.2.1 Evidência instrumental in-situ

O mapeamento de inundações *in-situ* relacionado a dados não sistemáticos se refere ao mapeamento que é realizado no local em que ocorreu a inundação, sendo geralmente feito com o auxílio de um equipamento Sistemas de Posicionamento Global - *Global Positioning System* (GPS). Caracteriza-se como não sistemático devido ao seu registro ser pontual, ou seja, é um dado quantitativo, mas que não está inserido em uma série histórica.

Exemplos de mapeamento utilizando este tipo de dados foram realizados por Paixão *et al.* (2018), que identificaram e mapearam a mancha de inundação com GPS no município de Rolante/RS e Magalhães *et al.* (2011) que geraram um mapa de risco de inundação do município de Guaçuí/ES por coleta de dados em campo. Também destaca-se o estudo de Moraes (2015) que realizou o mapeamento das áreas e edificações atingidas pelas inundações do rio Taquari na área urbana do município de Lajeado/RS através de geoprocessamento, mas para validar as manchas de inundação obtidas utilizou pontos de controle marcados *in-situ* durante o pico de uma inundação, também com GPS.

Apesar de ser um método relativamente simples de ser aplicado, é necessário levar em conta a disponibilidade de equipamentos para levantamentos de campo, como GPS, estações totais e outras ferramentas que permitem a coleta de dados georreferenciados, além de uma equipe técnica qualificada para sua operação. Ainda, devido a este dado não estar inserido em uma série histórica ocorrem incrementos na sua incerteza (VANELLI; FAN; KOBİYAMA, 2020).

3.3.2.2 Evidência documental

Essa fonte de dados não sistemáticos se refere a registros, tais como observações, comunicações orais, documentos, registros audiovisuais, dentre outros, realizados pela população afetada pelo evento (VANELLI; FAN; KOBIYAMA, 2020). Recentemente, devido ao avanço tecnológico e a ampla disseminação do uso de *smartphones*, vem ganhando destaque, no registro de eventos de inundação, as evidências documentais audiovisuais.

Com uma precisão posicional planimétrica que pode variar entre 5 e 20 metros, os *smartphones* são dispositivos promissores para a realização de levantamentos de campo com informações georreferenciadas (ALFONSO; LOBBRECHT; PRICE, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2019). Além disso, seu funcionamento não requer conhecimentos técnicos específicos, sendo atualmente uma ferramenta à disposição de mais de 65% da população mundial, número este que deve chegar à 80% até 2025, de acordo com estatísticas da GSMA (2020).

Em paralelo à disseminação do uso dos *smartphones*, vêm crescendo consideravelmente o uso de plataformas online de compartilhamento de vídeo, o que permite a disponibilização dos dados de forma praticamente simultânea à ocorrência de um evento de inundação. O exemplo mais disseminado deste tipo de plataforma é o YouTube, que, devido ao seu domínio livre e à diversidade de traduções disponível, chega a mais de 2 bilhões de usuários ativos por mês (YOUTUBE, 2021).

Conforme observado por Tschiedel *et al.* (2018), o YouTube vem se consolidando como um banco de observações hidrológicas que pode ser consultado por hidrólogos com interesse na identificação da extensão de manchas de inundação locais, uma vez que é possível a obtenção, a partir de vídeos publicados filmados por VANTs, ou outros veículos aéreos, dessas informações georreferenciadas. O autor mapeou uma inundação em Paragominas/PA e uma em Rolante/RS através de um modelo fotogramétrico aerorestituído gerado a partir de fotografias sequenciais de vídeos de sobrevoo das respectivas áreas.

Utilizando a mesma metodologia, Argoud (2019) obteve manchas de inundação para diferentes locais, também a partir do uso de vídeos hospedados em plataformas online de compartilhamento. Apesar de ter constatado limitações na aplicação do método, como por exemplo inconsistência nas extremidades das manchas devido à falta de sobreposição de imagens e mudanças abruptas durante as filmagens, a autora concluiu que os resultados apresentaram manchas de inundações passíveis a serem identificadas, sendo as plataformas online de compartilhamento de vídeos possíveis fontes de dados hidrológicos.

Além das plataformas online de compartilhamento de vídeo, outra ferramenta de compartilhamento imediato de informações são as redes sociais. Podem ser citadas, dentre as mais utilizadas atualmente no Brasil, o Facebook, Instagram e Twitter. Segundo Fohringer *et al.* (2015) informações fornecidas por usuários das redes sociais são uma fonte de informação valiosa, que deve ser explorada de forma mais eficaz. Os autores propuseram uma metodologia que aproveita o conteúdo da mídia social para apoiar o mapeamento de inundações, incluindo a extensão da inundação e a profundidade da água, obtendo excelentes resultados para o evento de junho de 2013 na cidade de Dresden, Europa Central.

Todas estas iniciativas baseadas em informações disponibilizadas por cidadãos são abordadas na literatura através de conceitos como mapeamento colaborativo (*crowdsourcing*), informação geográfica voluntária (*Volunteered Geographical Information – VGI*), observatório cidadão (*citizen observatory*) e ciência cidadã (*citizen science*) (e.g. ALFONSO; LOBBRECHT; PRICE, 2010; HORITA *et al.*, 2015; LE COZ *et al.*, 2016; STARKEY *et al.*, 2017; ASSUMPÇÃO *et al.*, 2018; HIRATA *et al.*, 2018; SEIBERT *et al.*, 2019).

Apesar de similares, estes conceitos podem ser diferenciados de acordo com o nível de engajamento da população. De acordo com Haklay (2013) conceitos como *crowdsourcing* e *volunteered geographical information* estão no nível inicial de engajamento, em que os cidadãos participam apenas como coletores de dados. Mas existem casos em que os cidadãos estão totalmente envolvidos na pesquisa científica em questão, participando da definição do problema, coleta de dados e análises, sendo este nível de engajamento definido como *extreme citizen science*. Assim, o termo *citizen science* pode ser classificado como mais abrangente que os demais.

Deve ser enfatizado que o uso de registros de imagens e vídeos via *smatphones* vem se mostrando útil não somente no registro e compartilhamento imediato de eventos de inundação, como também no processamento destes dados transformando em informações. Segundo Ribeiro *et al.* (2020), o desenvolvimento de aplicativos móveis baseados em localização, com foco no gerenciamento de riscos e desastres, foi impulsionado especialmente na última década.

Um exemplo de aplicativo de *smartphone* utilizado no mapeamento colaborativo no Brasil é o Hidromapp, que, a partir de informações disponibilizadas pelos usuários, coleta marcas de cheias nos locais informados. Os dados deste aplicativo foram utilizados em estudos de mapeamento de inundações no município de Jaqueira/PE, onde as informações foram processadas por meio de técnicas de geoprocessamento e comparadas com resultados de modelagem hidrodinâmica. Ribeiro *et al.* (2020) comentam que o aplicativo demonstrou bom desempenho para a coleta de dados em campo e o método aplicado possibilitou uma estimativa parcialmente

adequada do evento reconstituído, em que a extensão da inundação apresentou alto grau de similaridade com o modelo comparado, porém com ressalvas para as profundidades da lâmina d'água, em que foram detectadas discrepâncias consideráveis em alguns pontos da área de estudo.

Em diversos estudos que abordaram o potencial da ciência cidadã na previsão e mapeamento de inundação, foi destacado que a mesma representa uma abordagem complementar aos demais métodos e traz novas perspectivas para o processo, fornecendo dados complementares às redes tradicionais de monitoramento e até mesmo novos dados, sobretudo em regiões pouco monitoradas (BUYTAERT *et al.*, 2014; MAZZOLENI *et al.*, 2017; SY *et al.*, 2017; ASSUMPÇÃO *et al.*, 2018; HIRATA *et al.*, 2018). Em relação à utilização dos dados provenientes de informação geográfica voluntária diretamente na modelagem de inundações, Mazzoleni *et al.* (2017) e Assumpção *et al.* (2018) destacam que isto ainda é um desafio, no entanto, os dados podem ser integrados na construção de modelos, para melhorar seu desempenho geral, ou diretamente nos modelos, por assimilação de dados, para melhorar as previsões imediatas.

A importância de informações geográficas voluntárias na validação de modelos de inundação foi avaliada por Rollason *et al.* (2018). Os autores propuseram um método para a validação de modelos hidráulicos de inundação utilizando informações coletadas por meio de pesquisa participativa com pessoas afetadas por inundações severas em Corbridge, no nordeste da Inglaterra, sendo que os resultados do estudo demonstram que os dados VGI podem ser usados para reconstruir de forma eficaz de dinâmica de eventos de inundação.

Ainda tratando-se de vantagens que o mapeamento colaborativo pode trazer, Ferri *et al.* (2019) analisaram o custo benefício da ciência cidadã para a redução do risco de enchentes em uma bacia hidrográfica da região norte da Itália, onde a colaboração dos cidadãos acontece através de fornecimento de dados de níveis e outras informações por meio de aplicativos móveis, e, os dados coletados são assimilados a um modelo hidrológico-hidráulico usado para alerta. Os autores concluíram que, embora atualmente seja uma hipótese pois o projeto ainda está em desenvolvimento, o mapeamento colaborativo diminui a vulnerabilidade social do risco de inundação consideravelmente. Os resultados mostraram uma redução nos danos causados pelos eventos extremos de 45% em comparação com um cenário usual, ou seja, sem o mapeamento colaborativo implementado.

Apesar das inúmeras vantagens que a utilização de dados provenientes de informação geográfica voluntária proporciona, deve ser destacado que ainda existem desafios na utilização destes dados, como por exemplo, a disponibilidade irregular, e a precisão variável (MAZZOLENI *et al.*, 2017). Ainda, conforme destacado por Buytaert *et al.* (2014), a natureza e a qualidade dos

dados coletados em experimentos de ciência cidadã são potencialmente muito diferentes dos dados sistemáticos, o que se traduz em desafios em termos de seu processamento, interpretação e uso, especialmente no que diz respeito à assimilação do conhecimento tradicional, a quantificação de incertezas e seu papel no suporte à decisão.

3.4 MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES

As modelagens matemáticas permitem a realização de simulações numéricas em ambiente computacional e, conseqüentemente, delimitação de várzeas referente a eventos passados ou cenários hipotéticos. Teng *et al.* (2017) classificam os métodos de modelagem de inundação em três tipos: métodos empíricos; modelos hidrodinâmicos unidimensionais (1D), bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D); e, modelos conceituais simplificados:

Embora os métodos empíricos possam ser suficientes para monitoramento de inundações e avaliação pós-desastre, modelos hidrodinâmicos são necessários para representar a dinâmica de fluxo detalhada e para investigar os impactos do rompimento de barragens, tsunamis ou enchentes. Modelos conceituais simplificados podem ser bons candidatos para avaliação probabilística de risco de inundação e modelagem de múltiplos cenários em uma grande planície de inundação com canais bem definidos. (TENG *et al.*, 2017, tradução nossa)

A seguir são apresentadas explicações referentes ao mapeamento de inundações através de métodos simplificados, como os descritores de terreno, e, em seguida, através de modelagem matemática.

3.4.1 Métodos simplificados

Os modelos conceituais simplificados não envolvem nenhuma simulação do processo físico de inundação e são baseados em conceitos hidráulicos simplificados. Um exemplo deste tipo de modelo, que pode ser intitulado, de forma mais adequada, como um descritor de terreno, é o HAND, proposto por Nobre *et al.* (2011) e utilizado em diversos estudos recentes para obtenção de manchas de inundação (e.g. MOMO *et al.*, 2016; GOERL; MICHEL; KOBAYAMA, 2017; SPECKHANN *et al.*, 2018; ZANANDREA *et al.*, 2018).

O HAND normaliza a topografia de acordo com as alturas relativas locais encontradas ao longo da rede de drenagem e determina a extensão de inundação próxima selecionando as células circundantes cujos valores são menores que um nível de referência. Teng *et al.* (2017) destacam que, em geral, os modelos conceituais simplificados possuem uma demanda computacional menor do que os modelos hidrodinâmicos 2D ou até mesmo 1D, tornando-os ferramentas úteis para aplicações em grande escala, onde os efeitos dinâmicos são insignificantes e apenas a extensão

final da inundação e os níveis de água são necessários. Entretanto, o mesmo autor destaca que este tipo de modelo não é adequado, por exemplo, para fluxos de variações rápidas.

3.4.2 Modelagem matemática

Os modelos hidrodinâmicos são modelos matemáticos que simulam o movimento da água resolvendo equações formuladas pela aplicação de leis da física. Em geral, para a modelagem do escoamento nos modelos hidrodinâmicos de uma dimensão (1D) são utilizadas as equações unidimensionais de Saint-Venant, que são formadas pela equação da continuidade (1) e pela equação da quantidade de movimento (2), apresentadas a seguir.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A^2} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA S_0 - gAS_f \quad (2)$$

Onde x é a distância (m) no sentido longitudinal, Q é a vazão (m^3/s), t é o tempo (s), A é a área (m^2) da seção transversal ao escoamento, h é a profundidade do escoamento (m), S_0 é a declividade do fundo no curso d'água, S_f é a perda de energia por atrito com o fundo e as margens e g é a aceleração da gravidade (m/s^2).

Na equação de quantidade de movimento (2) podem ser observados, da esquerda para a direita, termos relativos à inércia local, inércia advectiva, força de pressão, força de gravidade e força de atrito. Conforme salientado por Fan *et al.* (2014), a supressão total ou parcial destes termos da equação de quantidade de movimento resultam em modelos unidimensionais simplificados.

Apesar de serem computacionalmente eficientes e apresentarem resultados com boa precisão em locais com características topográficas e de ocupação pouco complexas, ou seja, onde o escoamento na planície de inundação segue a direção do leito principal do curso de água (TENG *et al.*, 2017), as versões unidimensionais dos modelos hidrodinâmicos podem ser pouco acuradas em locais com amplas planícies de inundação e áreas urbanizadas, visto que nestes casos é inviável definir um eixo de escoamento. Porém ressalta-se que a validade destes modelos depende da finalidade de aplicação.

Ainda, de acordo com Tucci (1998), os modelos hidrodinâmicos que adotam as equações de Saint-Venant apresentam as seguintes simplificações:

- Funções contínuas: na definição das equações diferenciais, admite-se que as funções são contínuas em relação ao tempo e ao espaço longitudinal;
- Fluido incompressível e homogêneo: considera apenas fluidos em que a compressibilidade é desprezível, por exemplo a água;
- Pressão hidrostática: as pressões consideradas na formulação das equações de Saint-Venant são hidrostáticas, ou seja, a aceleração vertical do escoamento é desconsiderada;
- Escoamento unidimensional: são desprezadas as variações de velocidade nas direções transversal e vertical. Assim, a velocidade média é representativa da variabilidade da velocidade na seção transversal;
- Atrito: a declividade da linha de atrito é obtida pelo uso das equações de movimento uniforme de Chézy e Manning.

Já as versões bidimensionais foram relatadas como capazes de simular inundações com alta precisão (TENG *et al.*, 2017), sendo aplicáveis a cursos hídricos com profundidades insignificantes frente às extensões de lâmina d'água, como lagos bem misturados, não estratificados e várzeas de inundação (ZHEN GANG, 2008). De acordo com Teng *et al.* (2017), apesar de estarem entre os métodos mais utilizados para modelagem de inundação, os modelos bidimensionais são geralmente considerados inviáveis para áreas maiores que 1000 km² e/ou quando a resolução necessária é inferior a 10 m, pois demandam de elevada capacidade computacional para as simulações. O mesmo ocorre com os modelos tridimensionais, que foram desenvolvidos para permitir a representação de recursos verticais nas modelagens de enchentes, como a turbulência vertical e vórtices.

Alguns modelos hidrodinâmicos comumente utilizados para mapeamento de inundação são o HEC-RAS (USACE, 2016) utilizado em estudos como o de Reis e Schmidt (2018) e Vanelli *et al.* (2017); o DELFT3D (DELTARES, 2020) utilizado nos estudos de Baky *et al.* (2020) e Kumbier *et al.* (2018); e o LISFLOOD-FP (BUREK; VAN DER KNIJFF; DE ROO, 2013), utilizado no estudo de Komi *et al.* (2017). Outros modelos utilizados para mapeamento de inundação estão relatados na revisão apresentada por Teng *et al.* (2017).

Apesar de geralmente eficiente no processo de mapeamento de inundação, a modelagem hidrodinâmica requer como dado de entrada informações como estimativas de vazões a montante do local de interesse. Estes dados são condicionados à existência de uma estação fluviométrica próxima ao local desejado e, ainda, que haja uma curva-chave consolidada da referida estação. É recorrente, também, a falta de registro de dados nas estações fluviométricas devido a falhas na

medição do observador ou falhas no equipamento em casos de leituras automáticas, o que dificulta ainda mais a obtenção de dados de vazão adequados para as simulações.

Para sanar este problema, os modelos hidráulicos são frequentemente acoplados à modelos hidrológicos visando uma representação completa de todos os processos envolvidos, permitindo, desta forma, realizar não somente o mapeamento de eventos já observados ou cenários hipotéticos, como também atuar na previsão de enchentes. Para Tucci (1998) os modelos hidrológicos estão fortemente embasados e integrados com a natureza física do processo hidrológico, onde, partindo da precipitação e de um conjunto de parâmetros associados é possível completar vazões desconhecidas ou estimar as mesmas para novos cenários existentes ou previstos para as bacias.

O acoplamento de modelos hidrológicos e hidráulicos pode ser feito de forma direta, onde o *software* utilizado faz o acoplamento das informações dos modelos, ou de forma “*off-line*”. Para o segundo caso pode ser citado como exemplo o estudo realizado por Neto *et al.* (2015), que utilizou o modelo hidrológico de chuva-vazão HEC-HMS (USACE, 2010) para obter as condições de contorno para o modelo hidrodinâmico HEC-RAS com o objetivo de realizar simulações de cheias na bacia hidrográfica do rio Una em Pernambuco.

A metodologia de acoplamento direto é utilizada pelo Modelo de Grandes Bacias (COLLISCHONN; TUCCI, 2001; COLLISCHONN *et al.*, 2007), que é um modelo para aplicação em grandes bacias, que além da simulação hidrodinâmica dos processos de escoamento, inclui também a simulação hidrológica. A seguir é detalhado as funcionalidades do MGB e as variáveis de entrada e saída do modelo.

3.4.2.1 Modelo de Grandes Bacias – MGB

O modelo matemático MGB foi desenvolvido por Collischonn *et al.* (2007) no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). É um modelo hidrológico e hidrodinâmico, que tem o propósito de representar processos hidrológicos em grandes bacias, tendo como base os processos de transformação da chuva em escoamento e de propagação da vazão ao longo dos rios. De acordo com HGE (*Is. d.*) grandes bacias hidrográficas são:

- Regiões geralmente maiores do que 1000 km²;
- Regiões onde os processos de propagação fluvial não podem ser negligenciados, ou seja, que o tempo de viagem da água na rede de drenagem seja grande (alto tempo de

concentração) e que os processos de translação e atenuação de ondas de cheias sejam relevantes na compreensão das dinâmicas da bacia;

- Regiões onde a diferença entre os divisores de água superficial e subterrânea pode ser desprezada;
- Regiões onde a chuva e outras características como tipo e uso de solo não podem ser consideradas homogêneas em toda a área, e por isto os métodos clássicos de hidrologia não são adequados;
- Regiões onde a caracterização do terreno é difícil de ser realizada com medições *in-situ*, sendo necessário o apoio de técnicas de SIG e sensoriamento remoto.

Ao longo do tempo o MGB contou com diversas melhorias conceituais que foram introduzidas por Buarque *et al.* (2008), Paiva *et al.* (2011), Pontes *et al.* (2017) e Fleischmann *et al.* (2018). Atualmente, o MGB é integrado às plataformas de SIG (FAN; COLLISCHONN, 2014; PONTES *et al.*, 2017) através do pacote de ferramentas IPH-Hydro Tools, desenvolvido por Siqueira *et al.* (2016). Tal fato facilita a discretização e geoprocessamento da área de estudo para geração dos dados de entrada para o modelo, bem como auxilia a análise de dados no pós-processamento, fornecendo assim maior precisão aos trabalhos realizados.

Quanto à representação da variabilidade espacial, o MGB é considerado um modelo distribuído, ou seja, que representa as características hidrológicas através da subdivisão da bacia hidrográfica em diversas unidades menores, que podem ser células regulares ou pequenas sub-bacias (PAZ *et al.*, 2011). Na versão original do MGB, apresentada por Collischonn *et al.* (2007), adotava-se uma forma de divisão da área da bacia hidrográfica em unidades regulares (células quadradas de 10 x 10 km). Já na versão atual a bacia hidrográfica é dividida em unidades denominadas minibacias, que são áreas de contribuição imediatas a um segmento de rio e são definidas a partir de dados do relevo de um Modelo Digital de Elevação (MDE). Já as sub-bacias são agrupamentos regionais de minibacias, e são adotadas para facilitar o processo de calibração dos parâmetros do modelo (COLLISCHONN *et al.*, 2020a).

Visto que dentro de uma minibacia podem existir áreas com características físicas muito distintas entre si, de acordo com Collischonn *et al.* (2020a), além da divisão em minibacias o modelo também utiliza uma discretização da bacia em Classes de Resposta Hidrológica (CRH), que são definidas a partir da combinação de mapas de tipos de solos e mapas de tipos de vegetação, ou de classes de uso da terra. A combinação das minibacias com as CRH dá origem às Unidades de Resposta Hidrológica (URH), que são áreas de comportamento hidrológico similar definidas

pela combinação de variáveis relevantes relacionadas ao tipo de solo (e.g capacidade de armazenamento de água, profundidade, porosidade, condutividade hidráulica) e a cobertura vegetal (e.g índice de área foliar, interceptação, profundidade das raízes, albedo).

Fan *et al.* (2015) propuseram um mapa de URHs para toda América do Sul, com resolução espacial de 400 m, a partir de informações de uso e tipo de solo em diferentes escalas, permitindo a sua aplicação direta em modelagem hidrológica de grandes bacias hidrográficas, sendo este um produto que tem sido frequentemente utilizado em diversas aplicações com o modelo MGB. Salienta-se, entretanto, que o mapa de CRH deve ser desenvolvido com os melhores dados disponíveis na região em que o modelo será aplicado (COLLISCHONN *et al.*, 2020a).

Outros atributos relevantes como dado de entrada no MGB são as características das seções transversais dos rios, que por simplicidade são consideradas retangulares, sendo a largura e profundidade estimadas por curvas empíricas (Equações (3) e (4)) que relacionam estas variáveis com a área de drenagem (PAIVA; COLLISCHONN; TUCCI, 2011). Pontes *et al.* (2015) comentam que “o procedimento para obtenção das relações geomorfológicas consiste em utilizar dados medidos de largura e profundidade de rio em diversos pontos com diferentes valores de área de drenagem”. Contudo, quando não existem dados medidos *in-situ* as relações geomorfológicas podem ser obtidas de estações fluviométricas.

$$H_{rio_i} = \alpha Ad_i^\beta \quad (3)$$

$$B_{rio_i} = \gamma Ad_i^\theta \quad (4)$$

Onde H_{rio} é a profundidade da calha (m) na minibacia i , B_{rio} é a largura da calha (m) na minibacia i , Ad é a área de drenagem (m^2) na minibacia i e os parâmetros $\alpha, \beta, \gamma, \theta$ são os parâmetros do ajuste das equações do tipo potencial.

A batimetria da várzea de inundação é obtida através de uma curva hipsométrica, que relaciona cota e área (Figura 2), a qual é usada posteriormente para estimar a área alagada em cada minibacia para diferentes valores do nível da água (PONTES *et al.*, 2015). De forma geral, a curva hipsométrica obtida não contempla a parte submersa da topografia devido aos levantamentos hipsométricos disponíveis em larga escala, como por exemplo o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), serem Modelos Digitais de Superfície (MDS), e não Modelos Digitais do Terreno (MDT). Assim, segundo Siqueira *et al.* (2018) é necessário realizar uma correção da curva hipsométrica incluindo a parte submersa, o que é feito considerando que a média de elevação dos pixels que estão sobre a rede de drenagem em uma determinada minibacia corresponde ao nível

de calha cheia, e que abaixo desse nível está a calha do rio com a largura e a profundidade obtida da relação geomorfológica.

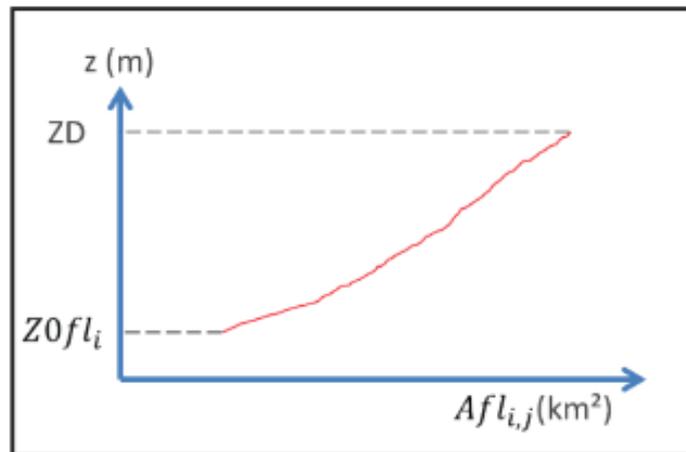


Figura 2. Modelo de curva hipsométrica relacionando cota e área alagada. (Fonte: PONTES *et al.*, 2015).

Além destas informações espaciais, para aplicação do modelo MGB são necessárias informações meteorológicas da bacia hidrográfica. O modelo necessita de dados de precipitação, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, insolação e pressão atmosférica para calcular as vazões dos rios da bacia. Desta forma, para realizar uma simulação com o MGB não é necessário fornecer dados de vazão. Entretanto, para realizar a calibração dos parâmetros do modelo geralmente torna-se necessário utilizar dados fluviométricos em alguns locais para comparar com os resultados obtidos (COLLISCHONN *et al.*, 2020a).

Como um modelo-chuva vazão convencional, o principal resultado gerado pelo MGB é a vazão nas minibacias que compõem a área simulada. Contudo, outras variáveis hidrológicas também são calculadas, como o balanço de água no solo, evapotranspiração diária e precipitação diária em cada minibacia (FAN; COLLISCHONN, 2014). Também podem ser obtidos mapas de inundação da área de interesse, para os quais o MGB utiliza conceitos similares aos utilizados pelo HAND. Segundo Collischonn *et al.* (2020a), com base no nível da água calculado pelo modelo é possível estimar a área inundada a cada intervalo de tempo: as áreas do MDE com valores de HAND inferiores ao nível de água acima da calha cheia, dentro de uma mesma minibacia, são consideradas inundadas.

A estrutura do modelo MGB, que tem um esquema geral apresentado na Figura 3, pode ser melhor compreendida considerando uma divisão em três módulos principais (COLLISCHONN *et al.*, 2020a):

1. Módulo de balanço de água e energia no solo;
2. Módulo de escoamento interno na minibacia;
3. Módulo de escoamento na rede de drenagem.

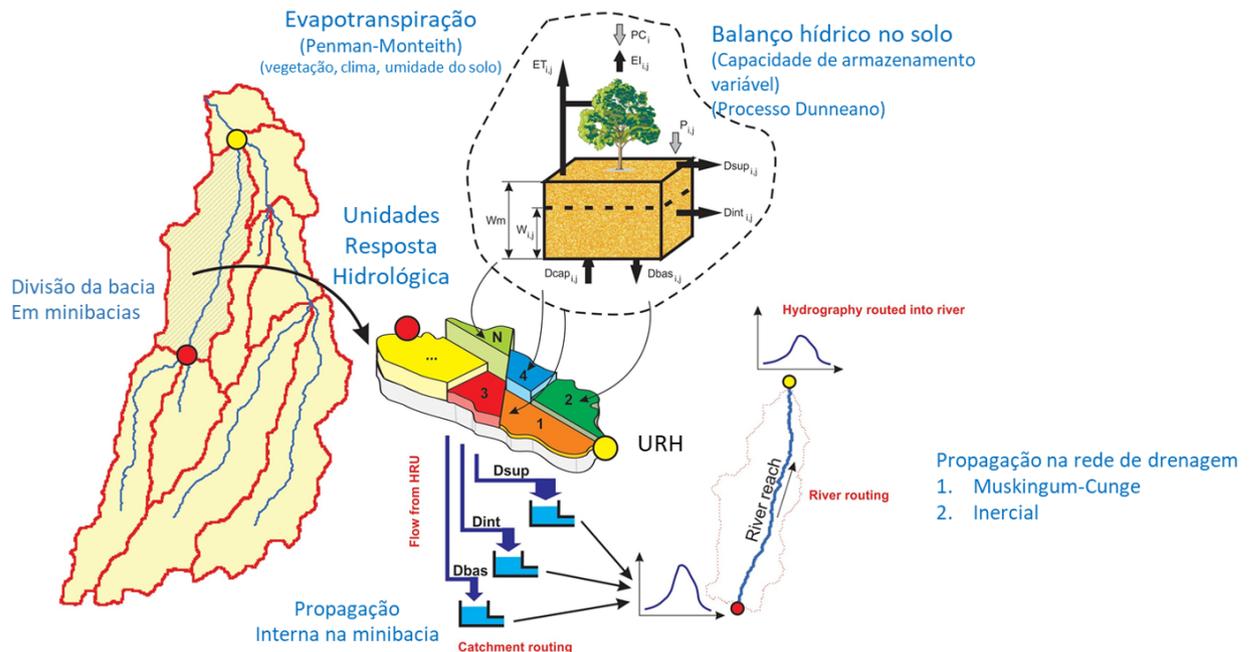


Figura 3. Representação esquemática do ciclo hidrológico simulado pelo MGB.
(Fonte: HGE, [s. d.]).

De acordo com Collischonn *et al.* (2020a) o primeiro módulo (balanço de água e energia no solo) é a parte do modelo MGB em que são realizados os cálculos relativos aos processos hidrológicos verticais, ou seja, em que predomina o fluxo da água da atmosfera para o solo (precipitação); o fluxo de água do solo para o aquífero (infiltração) e o fluxo de água do solo e da vegetação para a atmosfera (evapotranspiração). Já o segundo módulo (escoamento interno na minibacia) representa os processos hidrológicos horizontais que ocorrem dentro de uma minibacia, desde a origem do escoamento, que se dá no módulo de balanço de água, até atingir a rede de drenagem principal da bacia, que é representada explicitamente no terceiro módulo (escoamento na rede de drenagem).

No MGB estão disponíveis duas metodologias de cálculo para propagação de vazão na rede de drenagem: o método Muskingum-Cunge, utilizado na primeira versão do MGB, e o método inercial, utilizado atualmente.

O método Muskingum-Cunge (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988) é relativamente simplificado e é menos exigente do ponto de vista computacional. Entretanto, segundo Pontes *et al.* (2015), há certos tipos de rios e bacias hidrográficas em que as abordagens simplificadas não

são adequadas, como é o caso de rios de baixa declividade (inferior a 20 cm por km), rios com longos trechos submetidos ao remanso de barragens, rios com planícies de inundação, e rios das regiões litorâneas que sofrem os efeitos das marés. Para estes casos, existem alguns modelos que utilizam no seu módulo de propagação de vazões as equações completas do escoamento unidimensional em rios, ou seja, as equações unidimensionais de Saint-Venant, apresentadas anteriormente. Contudo, uma opção de complexidade intermediária que pode ser adotada é utilizar no módulo de propagação uma aproximação das equações de Saint-Venant que despreza apenas o termo de inércia advectiva na equação dinâmica (Equação (2)).

Assim, conforme detalhado por Collischonn *et al.* (2020a), utilizando a equação dinâmica sem o termo da inércia advectiva e adotando as simplificações de que o rio tem uma seção transversal retangular, que o valor de S_f pode ser estimado pela equação empírica de Manning (Equação (5)) e que o raio hidráulico é igual à profundidade, o que é razoável para canais naturais, que são muito mais largos do que profundos, a equação dinâmica simplificada é escrita conforme apresentado na Equação (6).

$$S_f = \frac{Q |Q| n^2}{A^2 R^{4/3}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g B h \frac{\partial y}{\partial x} + g \frac{Q |Q| n^2}{h^{7/3}} = 0 \quad (6)$$

Onde Q é a vazão (m^3/s), A é a área (m^2) da seção transversal ao escoamento, R é o raio hidráulico (m), n é o coeficiente de rugosidade de Manning; B é a largura do rio, h é a profundidade do escoamento (m).

Esta aproximação, que é adotada atualmente no MGB, é chamada de modelo inercial, ou modelo de inércia local. A resolução numérica da equação inercial utilizada no MGB foi proposta inicialmente por Bates *et al.* (2010), e o MGB com método inercial está descrito em Pontes *et al.* (2015).

A grande vantagem do modelo inercial é que o mesmo não apresenta limitações relacionadas à declividade dos rios e pode ser aplicado em bacias com rios de alta ou baixa declividade. Além disso, o método inercial permite representar mais adequadamente rios com planícies de inundação. Por outro lado, o modelo inercial exige que os cálculos internos sejam realizados com um passo de tempo muito pequeno, o que resulta em um tempo de processamento significativamente maior comparado com o modelo Muskingum-Cunge (COLLISCHONN *et al.*, 2020a).

Maiores detalhamentos referente às metodologias de cálculo dos processos hidrológicos no modelo MGB podem ser obtidos em Collischonn & Tucci (2001), Collischonn *et al.* (2007), Pontes *et al.* (2015) e Collischonn *et al.* (2020a).

3.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir da revisão bibliográfica apresentada constatou-se que a coleta de dados durante um evento de inundação é dificultada pelos mais diversos motivos, como: ausência de equipamentos e/ou equipe para levantamento de dados *in-situ*; possíveis falhas, falta de consistência, ou não existência, de rede de monitoramento fluviométrico; baixa resolução espacial e cobertura temporal de imagens de sensoriamento remoto; dentre outros. Por consequência, modelos de mapeamento e previsão de inundação carecem de dados para a calibração de condições extremas, o que dificulta que os resultados sejam validados adequadamente.

Neste sentido, o estudo de formas alternativas para a obtenção de informações hidrológicas durante a ocorrência de inundações vem se mostrando necessário. A ciência cidadã é uma destas alternativas, que, aliada ao avanço tecnológico e ao crescente número de usuários hospedados em plataformas online de compartilhamento de vídeos e em redes sociais, permite a obtenção de dados não sistemáticos de forma praticamente simultânea à ocorrência de eventos extremos. Salienta-se, também, a importância de associar o uso de dados sistemáticos e não sistemáticos para o estudo de eventos hidrológicos extremos passados, entretanto, isto ainda é um desafio no campo da ciência hidrológica. O presente trabalho avança nesta via de investigação utilizando-se de vídeos e imagens (dados não sistemáticos) compartilhados durante um evento extremo de inundação para calibração hidrodinâmica do modelo MGB e, posteriormente, validando os resultados obtidos com dados da rede de monitoramento fluviométrico existente (dados sistemáticos).

Outro ponto relevante a ser destacado, é que utilizar-se de dados não sistemáticos para o estudo de eventos de inundação é algo que possibilita validar um modelo hidrológico para a evolução de um evento deste tipo. Neste contexto, pode ser destacado o trabalho de Rollason *et al.* (2018), que realizou um estudo de caso para inundações severas em Corbridge, no nordeste da Inglaterra identificando a importância de informações geográficas voluntárias na validação de modelos em escala local. Entretanto, não foram encontrados na literatura estudos com esta abordagem para grandes bacias hidrográficas, como a bacia do Taquari-Antas.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Na presente pesquisa, foi utilizado como estudo de caso a região do Vale do Taquari, que integra a bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas (Figura 4), a qual está localizada a nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, entre as latitudes 28°10' e 29°57' S e longitudes 49°56' a 52°38' W, fazendo parte da região hidrográfica do Atlântico Sudeste. A bacia Taquari-Antas possui uma área de drenagem de 26.491,82 km², com altitudes que variam de cerca de 1.100 metros, no município de São José dos Ausentes, onde estão localizadas as nascentes sob o nome de rio das Antas, a cerca de 20 metros, no município de Triunfo, onde está localizada a sua foz com o rio Jacuí. O rio das Antas percorre uma distância de 390 km até a confluência com o rio Guaporé, nas imediações da cidade de Muçum, passando então a se chamar rio Taquari, o qual percorre mais 140 km até desembocar no rio Jacuí (BOMBASSARO; ROBAINA, 2010).

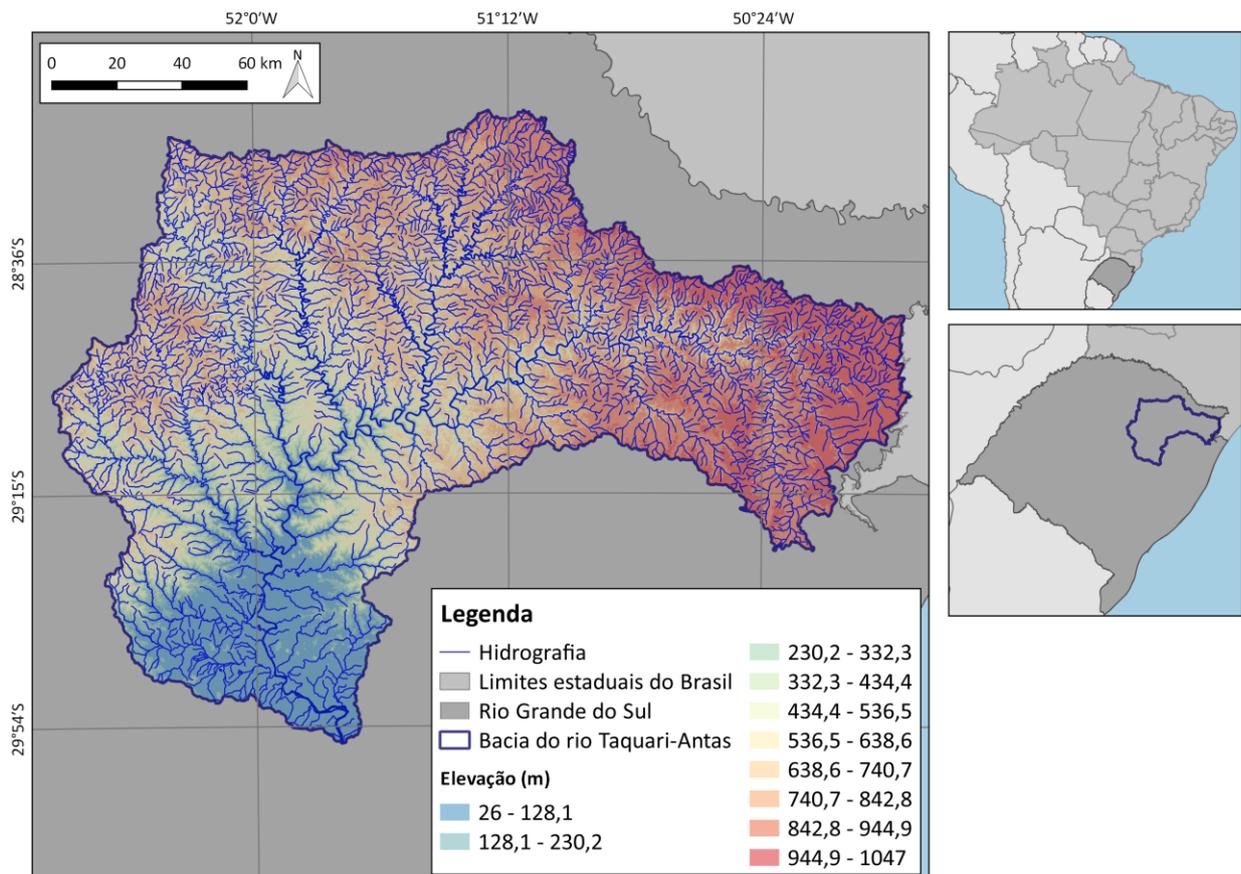


Figura 4. Localização da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.

A região da bacia do rio Taquari-Antas é caracterizada por uma precipitação anual média relativamente bem distribuída ao longo do ano, com variações na faixa entre 1.600 mm a 1.800 mm, e por escoamentos superficiais rápidos e bruscas variações de vazão, cuja ocorrência é

atribuída a fatores como rede de drenagem densa com tendência radial, declividade média elevada, pouca profundidade e baixa permeabilidade dos solos (SIQUEIRA *et al.*, 2015). Estas características promovem a ocorrência de inundações em diversos locais da bacia, mas as de grandes proporções ocorrem no trecho que se inicia na confluência dos rios das Antas e Carreiro, no município de São Valentim do Sul, até sua foz com o rio Jacuí, sendo o trecho mais atingido entre os municípios de Encantado e Cruzeiro do Sul, na margem direita, e, entre Roca Sales e Bom Retiro do Sul, à margem esquerda (DRH/SEMA, 2012). Este trecho que é mais atingido pelas inundações faz parte da região do Vale do Taquari, que é composta por 36 municípios e tem sua localização apresentada na Figura 5, com destaque para os municípios que são banhados pelo rio Taquari.

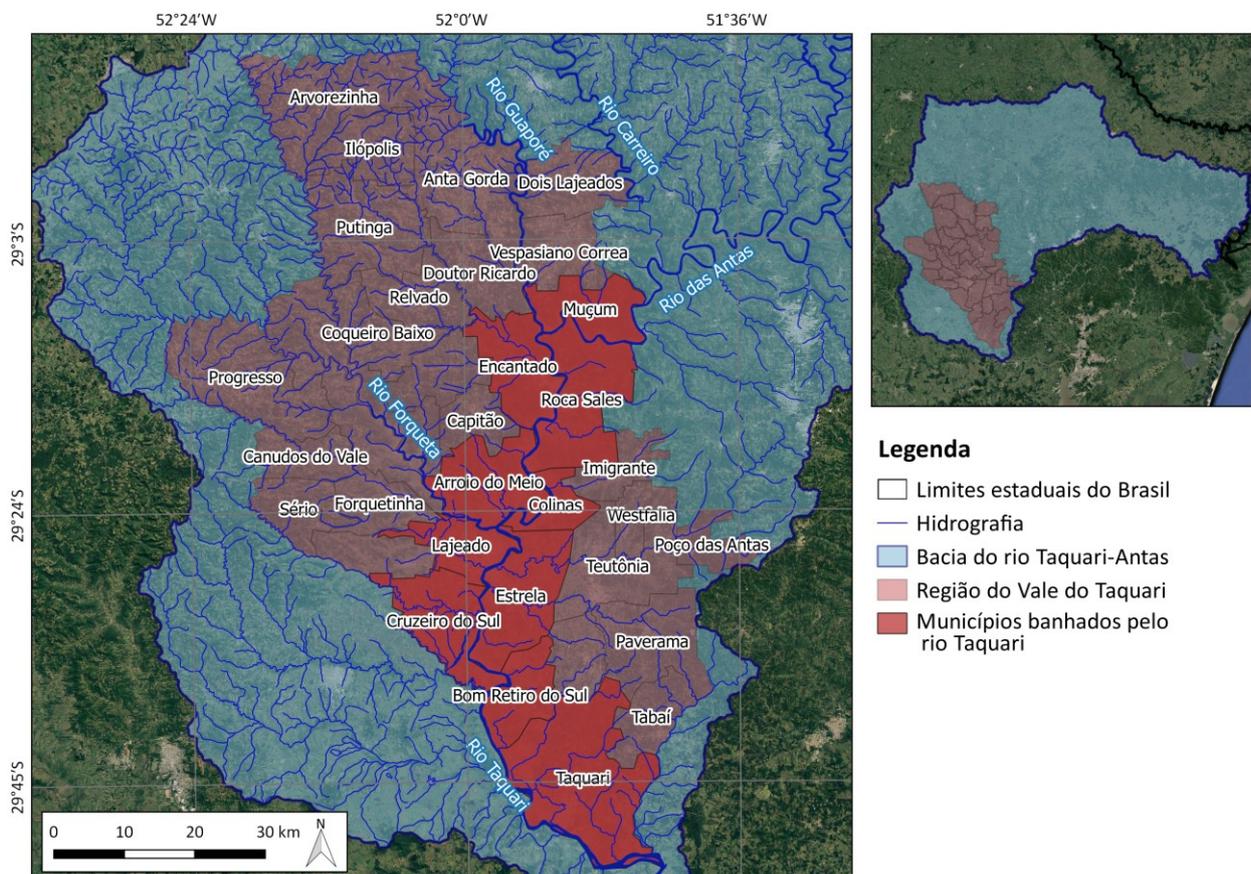


Figura 5. Identificação dos municípios e rios que compõe a região do Vale do Taquari.

Conforme mencionado, devido às características da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, as inundações que ocorrem no Vale do Taquari são, na maioria dos casos, decorrentes de fatores naturais. Ferreira & Both (2001) *apud*. Eckhardt (2008) destacam que as inundações que ocorrem ao longo do rio Taquari não são geradas pelas ações antrópicas, como desmatamento, impermeabilização do solo e obras no canal fluvial, porém estas ações tendem a intensificar o alcance das cotas de inundação, agravando os problemas causados pelas mesmas.

Eckhardt *et al.* (2013) destacam que as inundações no Vale do Taquari causam impactos socioeconômicos e ambientais significativos, sendo a ocupação desordenada e sem planejamento das áreas ribeirinhas do rio Taquari o principal e mais agravante fator causador dos prejuízos gerados pelas inundações. Os autores salientam que os prejuízos decorrentes de apenas um evento de inundação alcançam montantes consideráveis, pois “somente na inundação ocorrida em julho de 2011 os prejuízos econômicos ultrapassaram os 45 milhões de reais e cerca de 83 mil pessoas foram afetadas”.

4.2 INUNDAÇÃO DE JULHO DE 2020

De acordo com Ferri (2012) as enchentes no Vale do Taquari são fatos que acontecem com regularidade praticamente anual e, algumas vezes, mais de uma vez ao ano, sendo que as enchentes que deixaram marcas na história da região foram as de 1858, 1873, 1912, 1941 e 1956, mas diversas outras já ocorreram.

Um dos eventos de inundação mais críticos já registrado no Vale do Taquari ocorreu no mês de julho de 2020 devido a episódios de chuvas intensas registrados no estado. No dia 30 de junho de 2020 um sistema de baixa pressão vindo do Paraguai e reforçado pela umidade da Amazônia originou um ciclone extratropical classificado como “bomba”, fazendo com que as chuvas e ventos fortes ganhassem intensidade no Rio Grande do Sul (SEMA, 2020). Em cerca de uma semana, outro evento de grande magnitude trouxe elevados volumes de chuva ao estado, principalmente nos dias 06 e 07 de julho de 2020. Ainda, na semana seguinte, “novas áreas de instabilidades alimentadas pelo transporte de umidade vindo da região Amazônica voltaram a favorecer a ocorrência de chuva sobre o estado ao longo do dia 16 de julho” (SEMA, 2020).

A precipitação acumulada observada, ao longo dos três eventos de precipitação intensa mencionados, pode ser observada na Figura 6, Figura 7 e Figura 8, que mostram a distribuição da precipitação no estado. Nota-se que a região da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas foi atingida por elevados volumes de chuva, que superaram 100 mm acumulados (chuva acumulada de 06 dias) em todos os três eventos.

Os eventos de chuva ocorridos resultaram em elevações do nível do rio Taquari nos municípios do Vale em três momentos (SEMA, 2020). O primeiro deles foi no dia 01 de julho em resposta ao primeiro evento de chuva, servindo para potencializar o segundo evento de inundação ocorrido visto a baixa capacidade de absorção dos solos neste momento. Este segundo evento de inundações apresentou proporções bem maiores que o primeiro, tendo sido registrado entre os dias

07 e 10 de julho. Posteriormente, no dia 12 de julho, houve um novo pico de cheia, entretanto, desta vez as cotas de inundação estabelecidas pelo SACE/CPRM não foram superadas em todos dos municípios do Vale, ficando o evento caracterizado como enchente.

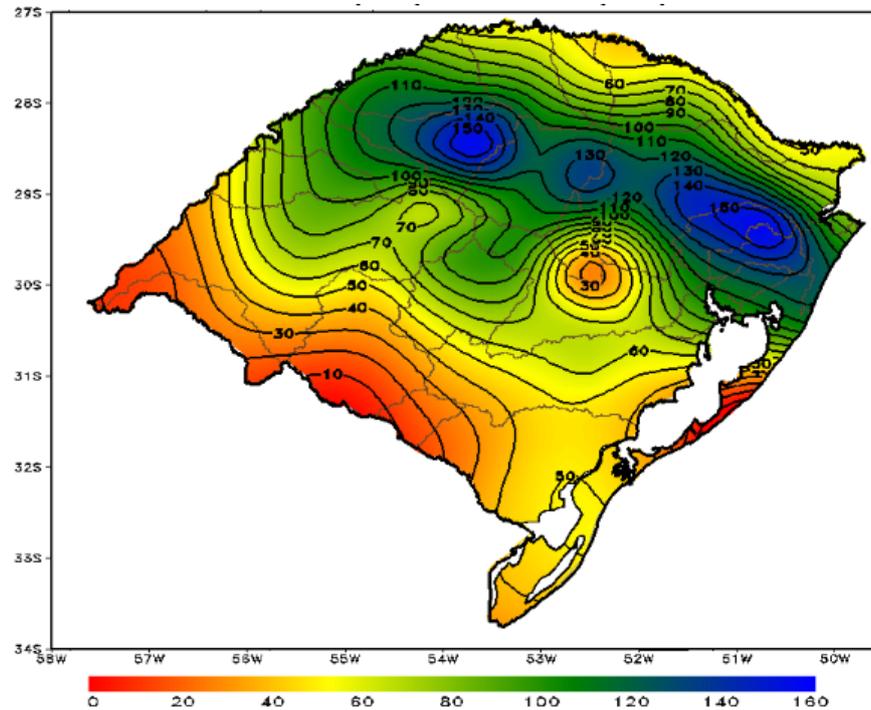


Figura 6. Precipitação acumulada observada (mm) no Rio Grande do Sul no período de 27/06/2020 a 03/07/2020. (Fonte: Adaptado de SEMA, 2020, p. 12)

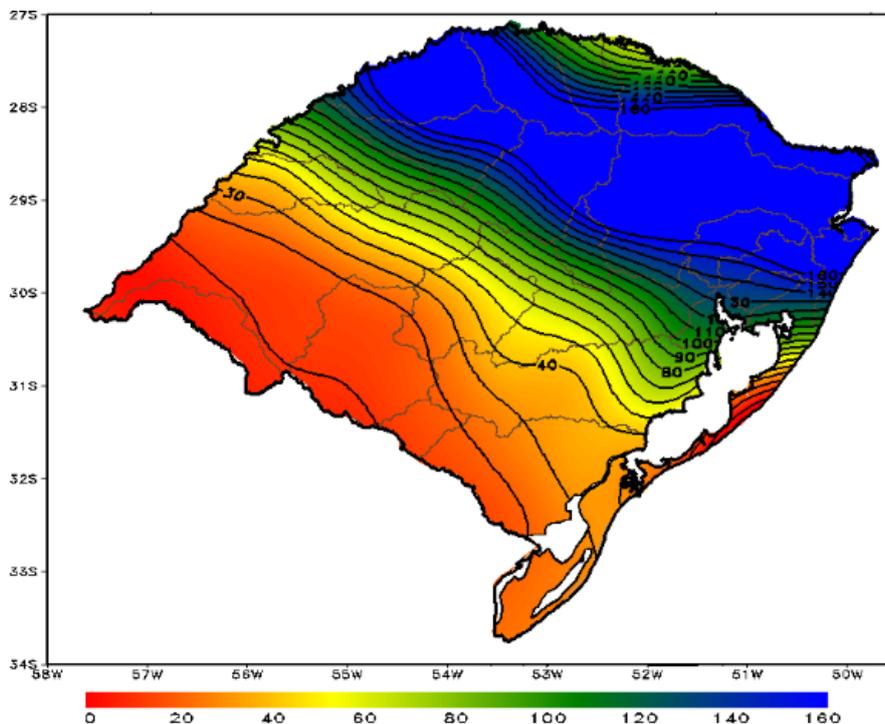


Figura 7. Precipitação acumulada observada (mm) no Rio Grande do Sul. no período de 04/07/2020 a 10/07/2020. (Fonte: Adaptado de SEMA, 2020, p. 12)

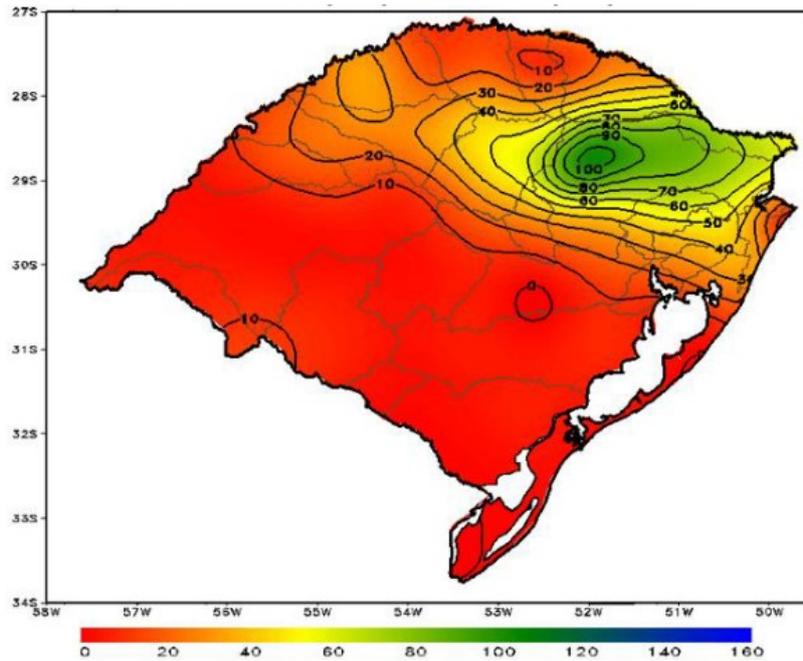


Figura 8. Precipitação acumulada observada (mm) no Rio Grande do Sul no período de 11/07/2020 a 17/07/2020. (Fonte: Adaptado de SEMA, 2020, p. 12)

A magnitude dos eventos de inundação ocorridos é destacada no Boletim especial de Cheias e Inundações (SEMA, 2020) através do nível medido nas estações de monitoramento da Agência Nacional de águas (ANA):

Com relação ao rio Taquari na estação Muçum, pode-se observar que o nível de 22 metros medidos no dia 08 de julho de 2020 ocupa a primeira posição no ranking de máximos históricos medidos por esta estação, a qual possui dados desde o ano de 1940 [...] Já na estação Estrela, o nível do Rio Taquari atingiu a cota de 27,4 metros no dia 09 de julho de 2020, ficando atrás somente dos eventos de cheia ocorridos em 1941 e 1956. (SEMA, 2020, p. 27)

Os dados mencionados estão indicados na Tabela 1, que apresenta as maiores cotas da série histórica observada nos municípios de Muçum e Estrela. Ainda, para o município de Lajeado, segundo dados observados por Moraes (2015), o tempo de retorno da inundação de julho de 2020 é de aproximadamente 30 anos.

Analisando os dados da inundação de julho de 2020 disponíveis no S2ID (DEFESA CIVIL, *[s. d.]*), constata-se que este desastre natural afetou cerca de 64 mil pessoas (entre desabrigados⁴, desalojados⁵ e afetados) e causou prejuízos econômicos de mais de 194 milhões de reais para os municípios do Vale do Taquari, conforme apresentado na Tabela 2.

⁴ Pessoas cujas habitações foram destruídas ou danificadas por desastres, ou estão localizadas em áreas com risco iminente de destruição, e que necessitam de abrigos temporários para serem alojadas.

⁵ Pessoas cujas habitações foram danificadas ou destruídas, mas que não, necessariamente, precisam de abrigos temporários.

Tabela 1. Cotas de eventos históricos de inundação no município de Muçum e Estrela.

Muçum		Estrela	
Data	Nível (m)	Data	Nível (m)
12/09/1989	18,90	06/05/1941	29,92
24/09/1989	18,88	27/09/1954	27,35
31/05/1990	18,50	06/04/1956	28,86
04/08/1997	18,66	09/07/2020	27,40
27/10/2008	19,50		
21/07/2011	20,10		
20/10/2016	18,56		
08/07/2020	22,00		

(Fonte: adaptado de SEMA, 2020)

Tabela 2. Informações sobre a quantidade de pessoas afetadas e os prejuízos econômicos para os municípios do Vale do Taquari na inundação de julho de 2020.

Município	População (habitantes)	Desabrigados (habitantes)	Desalojados (habitantes)	Afetados (habitantes)	Prejuízos informados (R\$)
Muçum	4.791	200	1.630	N.I.	5.233.240,00
Encantado	20.514	372	348	2.080	61.567.500,00
Roca Sales	10.287	40	2.200	N.I.	20.442.778,18
Arroio do Meio	18.783	120	870	3.780	15.374.850,00
Colinas	2.420	0	120	220	1.463.765,00
Estrela	30.628	105	4.023	N.I.	45.527.891,00
Lajeado	71.481	320	1.500	40.000	22.098.131,85
Cruzeiro do Sul	12.331	60	450	5.205	15.516.116,80
Bom Retiro do Sul	11.472	6	278	300	4.600.327,38
Taquari	26.135	19	54	383	2.632.255,00
Total	208.842	1.242	11.473	51.968	194.456.855,21

N.I. corresponde a não informado

Fonte: adaptado de Defesa Civil ([s. d.]).

4.3 ESTUDOS ANTERIORES NA REGIÃO

Visto a problemática das inundações na região do Vale do Taquari, diversos estudos relacionados ao assunto já foram realizados. Eckhardt (2008), Eckhardt *et al.* (2009) e Moraes (2015) realizaram o mapeamento das áreas sujeitas à inundação no município de Lajeado. Kurek (2012) avaliou o tempo de retorno dos níveis das inundações no Vale do Taquari e Both *et al.* (2008), Siqueira *et al.* (2015), Kurek (2016), Pedrollo (2017) e Finck (2020) realizaram estudos para subsídios e/ou elaboração de sistemas de previsão das inundações na região. Ainda, Collischonn *et al.* (2020b) realizaram uma análise da antecedência mínima necessária para previsões de inundações no município de Lajeado, tendo como base o evento de julho de 2020.

Especificamente com o modelo hidrológico MGB, que será utilizado neste trabalho, destacam-se os estudos de Collischonn (2001), de Siqueira *et al.* (2015) e de Kornowski & Fan (2019). O primeiro autor mencionado utilizou a versão precursora do modelo MGB para

representar o comportamento hidrológico da bacia Taquari-Antas, realizando, inclusive, uma análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo, obtendo bons resultados. Já Siqueira *et al.* (2015), apresentaram um estudo do desenvolvimento de um sistema de previsão de cheias experimental na bacia do Taquari-Antas até a cidade de Encantado, com informações obtidas em tempo real a partir de estações telemétricas instaladas na bacia, além de dados de precipitação prevista do modelo atmosférico Eta, em escala regional, do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC).

Kornowski & Fan (2019) objetivaram representar os eventos hidrológicos ocorrentes na região da bacia do rio Taquari-Antas, aplicando o MGB desde as etapas iniciais de processamento dos dados de entrada até a calibração dos parâmetros e a verificação dos resultados, obtendo uma representação classificada de satisfatória a boa dos acontecimentos hidrológicos.

Contudo, nenhum destes estudos prévios teve como objetivo principal a utilização do modelo MGB para o mapeamento de áreas inundadas na região do Vale do Taquari, ou a validação de dados de áreas inundadas geradas pelo modelo na região. Ainda, nenhum dos estudos na região fez uso de dados não sistemáticos para calibração hidrodinâmica do MGB.

5 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada no presente trabalho tem como propósito alcançar os objetivos definidos previamente. A Figura 9 apresenta um fluxograma que representa, de maneira geral, as etapas realizadas e a seguir são descritos os procedimentos de cada etapa.

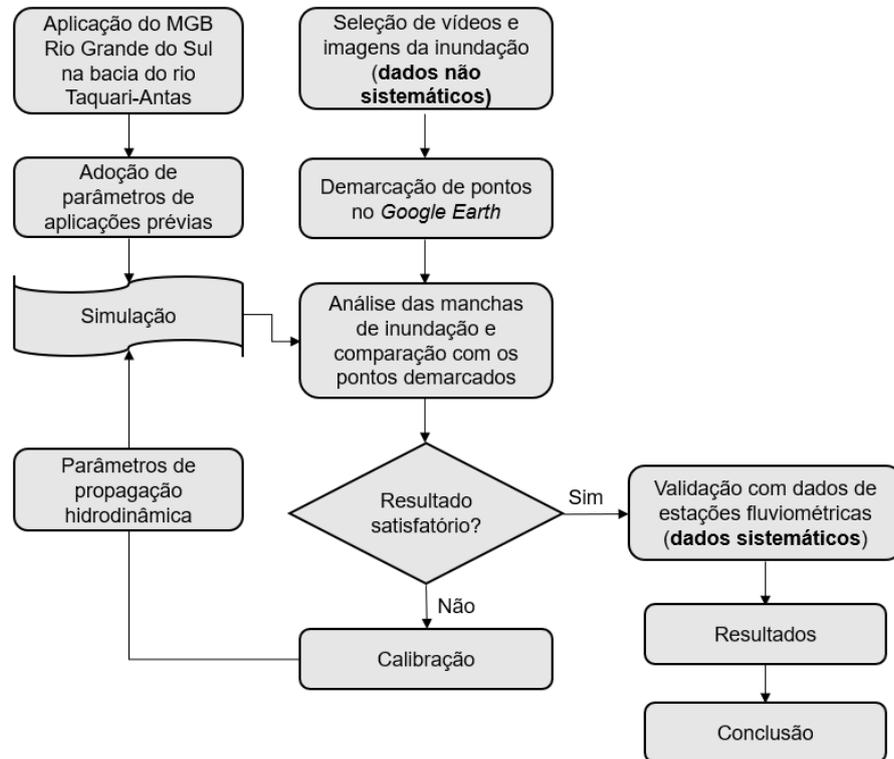


Figura 9. Fluxograma resumo da metodologia do trabalho.

Inicialmente foram selecionados vídeos e imagens (conforme critérios descritos no Item 5.1), disponíveis em redes sociais e plataformas online de compartilhamento de vídeos, referentes ao evento de inundação ocorrido em julho de 2020 na região do Vale do Taquari. Em seguida, com base nas imagens e vídeos selecionados, foram demarcados pontos dos limites da mancha de inundação. Em paralelo a isso, foram realizadas simulações usando a versão do modelo chamada de MGB-RSH (Alves *et al.*, 2020) para a área da bacia do rio Taquari-Antas, adotando parâmetros hidrológicos de aplicações prévias do modelo.

Em seguida, os resultados das manchas de inundação obtidos da simulação foram comparados com os pontos demarcados pela análise visual das imagens e vídeos, e o modelo foi calibrado, alterando parâmetros de propagação hidrodinâmica, para um menor erro entre a manchas observadas nas imagens e vídeos e a manchas resultantes das simulações. Por fim, os resultados foram validados comparando os hidrogramas simulados pelo modelo, e observados em estações fluviométricas.

5.1 SELEÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS NÃO SISTEMÁTICOS

A seleção dos dados não sistemáticos, que neste trabalho consistem em vídeos e imagens publicados *online*, foi realizada através da busca na rede social Facebook⁶ e na plataforma online de compartilhamento de vídeos Youtube⁷. Utilizando a ferramenta de busca destes sites foram pesquisadas palavras chaves ou frases que remetessem ao evento de inundação ocorrido, estando as mesmas descritas a seguir:

- Enchente – cheia – inundação no Vale do Taquari;
- Enchente – cheia – inundação, sucedida pelo nome de algum município de interesse, ou seja, os municípios banhados pelo rio Taquari que foram apresentados na Figura 5;
- Enchente – cheia – inundação no rio Taquari;
- Enchente – cheia – inundação de julho de 2020 no vale do taquari;

No Facebook também foram buscados vídeos e imagens diretamente no perfil das prefeituras dos municípios de interesse. Isto foi feito buscando por “Prefeitura de + *nome do município*”. Em seguida as postagens da página foram avaliadas buscando por aquelas relacionadas ao evento de inundação de julho de 2020.

Para a seleção, foram priorizadas as filmagens e imagens obtidas de plataformas aéreas, como por exemplo helicópteros, drones, VANT’s ou outros, que possibilitassem identificar o contorno da inundação, ou seja, o limite entre a área inundada e não inundada, e não apenas a mancha isoladamente. Além disso, no caso dos vídeos, foram priorizados para a seleção aqueles que acompanhassem a inundação de forma dinâmica sobre a área de interesse. Estes critérios também foram utilizados no estudo de Argoud (2019) e facilitam a identificação da extensão da área inundada. Ainda, foram descartados os vídeos e imagens em que não foi possível identificar a data na qual foram capturados.

Após realizada a seleção dos vídeos e imagens, os mesmos foram analisados visualmente a fim de demarcar pontos da extensão da mancha, utilizando o software *Google Earth Pro*, conforme exemplificado na Figura 10.

⁶ <https://pt-br.facebook.com/>

⁷ <https://www.youtube.com/>



Figura 10. Exemplo da demarcação de pontos, destacados em vermelho, para representação da extensão da mancha de inundação (à esquerda) com base em imagens e/ou vídeos (à direita).

5.2 APLICAÇÃO DO MODELO MGB

Para realização desse estudo, foi utilizado o plugin do MGB disponível para o software QGIS versão 3.4.14. A seguir é apresentada uma breve descrição sobre o modelo utilizado, bem como os procedimentos realizados para calibração do mesmo com dados não sistemáticos e sua validação com dados sistemáticos.

5.2.1 Descrição do MGB Rio Grande do Sul Hidrológico

Neste trabalho, foi aplicado o MGB do Rio Grande do Sul Hidrológico - RSH (ALVES *et al.*, 2020), o qual utiliza o MDE do SRTM, com resolução espacial de 90 metros e resolução vertical de 1 metro (FARR *et al.*, 2007), e adota o mapa de URHs desenvolvido por Fan *et al.* (2015). Este modelo foi aplicado no estudo de Alves, Fan & Fleischmann (2019), para simulações de rompimento de barragens em cascata, e no estudo de Alves *et al.* (2020), para o mapeamento de inundações no rio Uruguai, ambos com resultados satisfatórios.

Em relação aos dados de clima, os quais são utilizados pelo modelo para calcular a evapotranspiração, o MGB – RSH aplica as normais climatológicas mensais obtidas dos dados de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Quanto à discretização do modelo, as minibacias foram delimitadas adotando que o comprimento máximo do trecho de rio em uma

minibacia é de 10 km, assim o modelo possui um total de 8648 minibacias. A Figura 11 apresenta a área de abrangência do RSH, com destaque para a sub-bacia do modelo que foi utilizada neste estudo, a sub-bacia do rio Taquari-Antas.

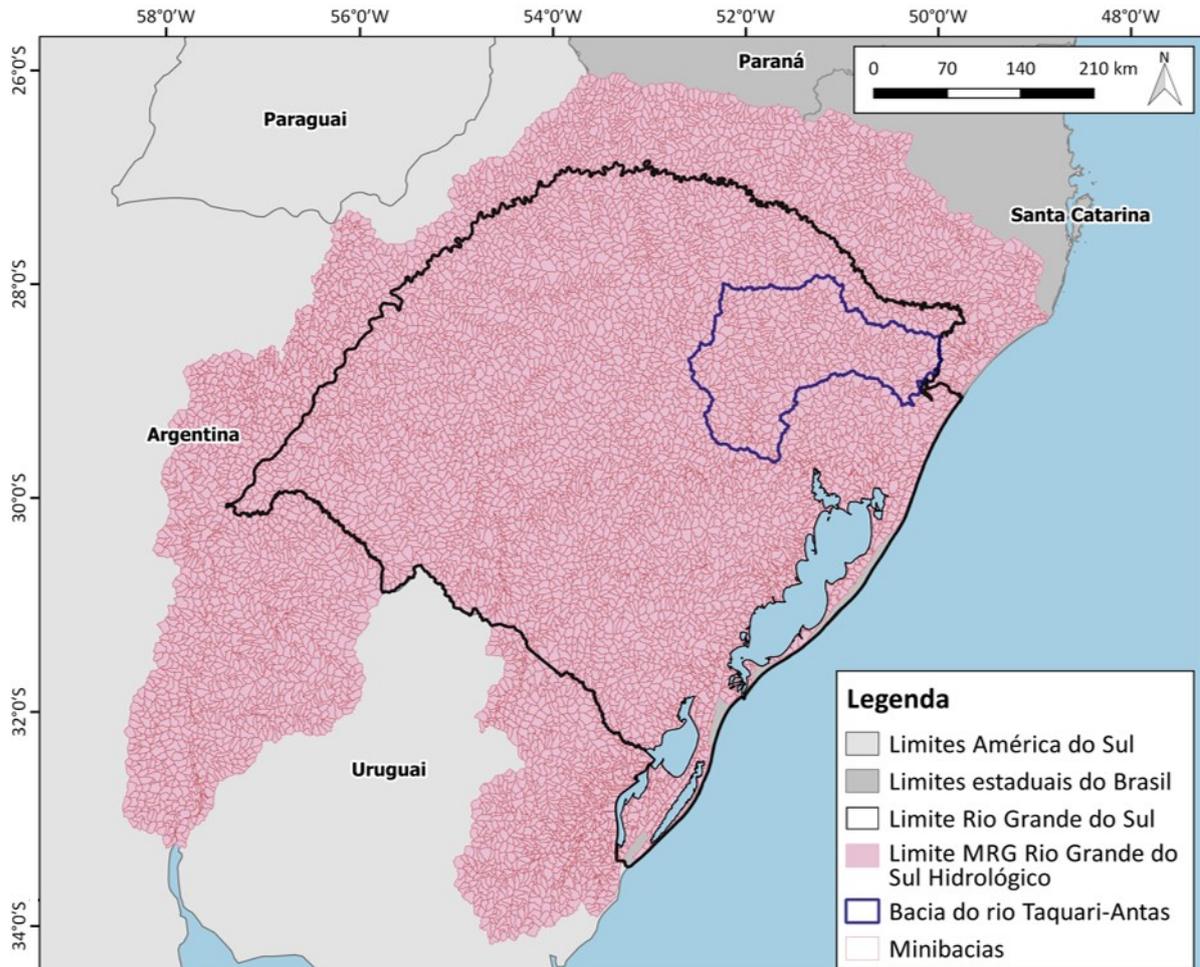


Figura 11. Limites do MGB do Rio Grande do Sul Hidrológico.

Para as relações cota-área, o MGB regional utiliza o Bare-Earth SRTM (O'LOUGHLIN *et al.*, 2016), que é uma versão do MDE do SRTM, com resolução de 90 m, onde a vegetação original foi removida com o objetivo de evitar possíveis erros de elevação no terreno em locais com vegetação densa.

As relações geomorfológicas que o MGB-RSH utiliza foram construídas com base em dados de largura, profundidade e área de drenagem dos resumos de descarga das estações fluviométricas disponíveis no HIDROWEB (ANA, *[s. d.]*) e estão descritas detalhadamente no estudo de Alves & Fan (2020). Para a sub-bacia do rio Taquari-Antas, as relações geomorfológicas que o modelo estabelece para a profundidade e largura estão apresentadas na equação (7) e equação (8), respectivamente, sendo o coeficiente de correlação (R^2) destas equações de 0,7999 para profundidade e 0,8395 para largura, o que indica que são adequadas para representação da região.

$$H_{rio_i} = 0,1101 Ad_i^{0,3744} \quad (7)$$

$$B_{rio_i} = 2,1252 Ad_i^{0,44} \quad (8)$$

Onde H_{rio} é a profundidade da calha (m) na minibacia i , B_{rio} é a largura da calha (m) na minibacia i , Ad é a área de drenagem (m^2) na minibacia i .

Desta forma, não foi necessário a preparação do modelo para parâmetros de solo, clima, relações geomorfológicas e outras variáveis, pois utilizou-se os parâmetros do MGB regional desenvolvido previamente. Destaca-se que o método de propagação de vazões utilizado é o método inercial.

5.2.2 Calibração

A calibração nada mais é do que uma comparação dos resultados simulados com dados observados, onde se busca semelhança entre ambos. Geralmente nos processos de calibração os resultados do modelo são comparados com dados de estações fluviométricas. Contudo, neste estudo, buscou-se calibrar os dados simulados pelo MGB para o evento de inundação de julho de 2020 através dos dados não sistemáticos que foram obtidos de vídeos e imagens do respectivo evento de inundação, conforme descrito no item 5.1. Assim, simulou-se o período de 01 de janeiro de 2020 à 01 de setembro de 2020 e calibrou-se o coeficiente de Manning, que é um dos parâmetros de propagação hidrodinâmica do modelo, através de uma calibração por enumeração, que consiste em testar diferentes valores de coeficientes de Manning e enumerar o melhor e o pior resultado obtido.

5.2.2.1 Dados de precipitação

Foram utilizados, como dado de entrada no MGB, informações de chuva provenientes das estações pluviométricas da ANA, os quais possuem uma escala diária. Foram selecionadas as estações que possuíssem dados no período de interesse, o que totalizou 63 estações pluviométricas, as quais estão apresentadas na Figura 12 e possuem suas informações descritas no ANEXO A.

Em eventos extremos com precipitação intensa e fortes ventos, como é o caso do evento extremo de julho de 2020, a mensuração da precipitação pelos postos pode ser subestimada. Desta forma, para garantir que os dados de entrada de precipitação no modelo estivessem representando adequadamente o evento, analisou-se a precipitação acumulada de cada estação pluviométrica e sua distribuição espacial. Os dados foram interpolados, utilizando ferramentas de

geoprocessamento, pelo método de ponderação do inverso da distância ao quadrado (*Inverse Distance squared Weighting - IDW*), durante o período 27 de junho à 17 de julho de 2020.

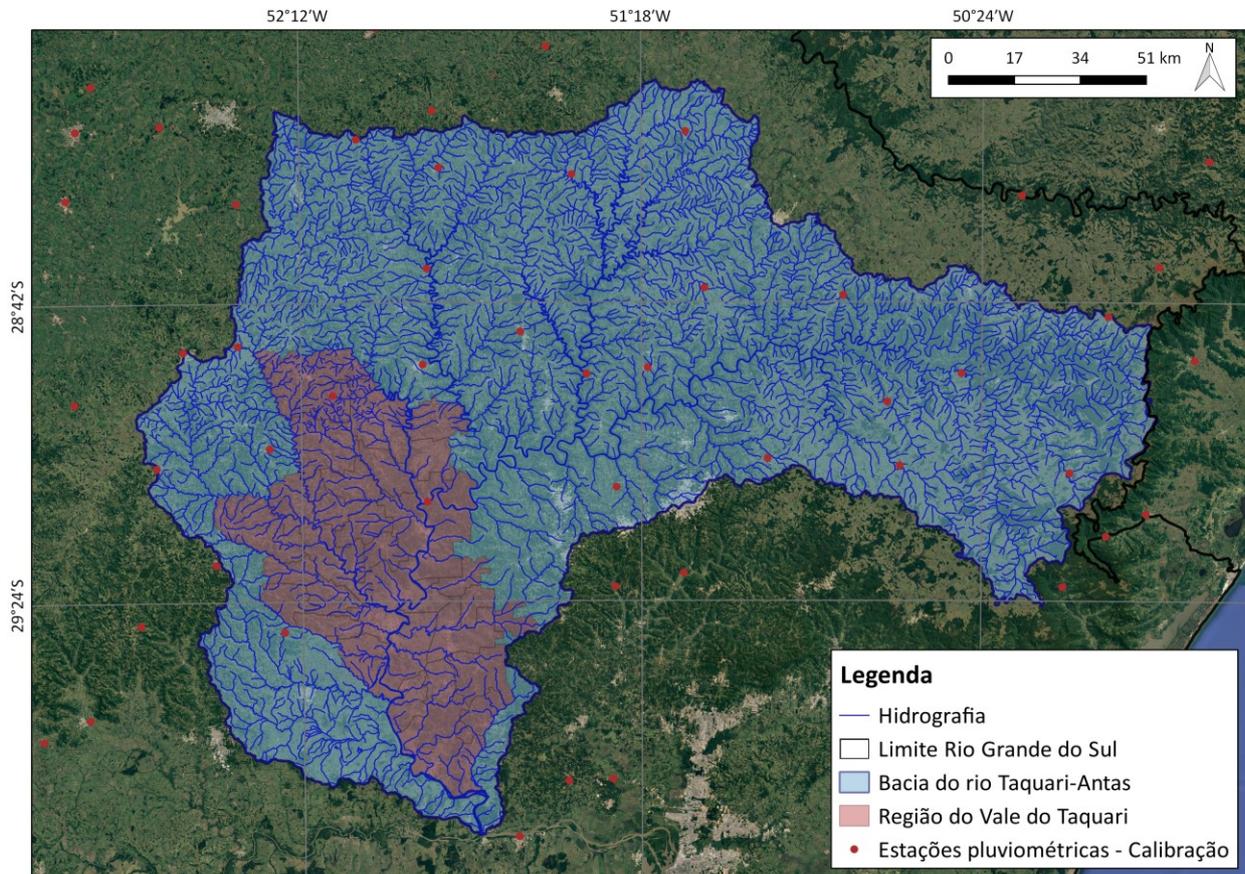


Figura 12. Postos pluviométricos utilizados como dado de entrada para validação do MGB.

5.2.2.2 Métricas de calibração

Como métrica de calibração, buscou-se analisar a distância horizontal, que aqui será tratada como “erro horizontal”, entre a mancha de inundação simulada pelo MGB e os pontos demarcados. Em cada ponto de controle foi analisado o erro horizontal entre a área de inundação mapeada e a observada nos eventos do dia 08, 09 e 12 de julho de 2020, que são os dias que foram encontrados dados não sistemáticos. A Figura 13 apresenta a exemplificação do procedimento realizado. O erro horizontal de cada ponto foi obtido através de ferramentas de geoprocessamento que calculam a menor distância entre o ponto de controle e a mancha de inundação.

Para fins de métrica de calibração, calculou-se a média do erro horizontal absoluto em cada um dos dias do evento, sendo que, em cada ponto, quando o erro fosse menor ou igual a 90 metros, que é o tamanho do pixel do MDE utilizado no MGB, o erro foi considerando igual a zero. Ainda, foi calculada a média dos erros horizontais dos 3 dias analisados.

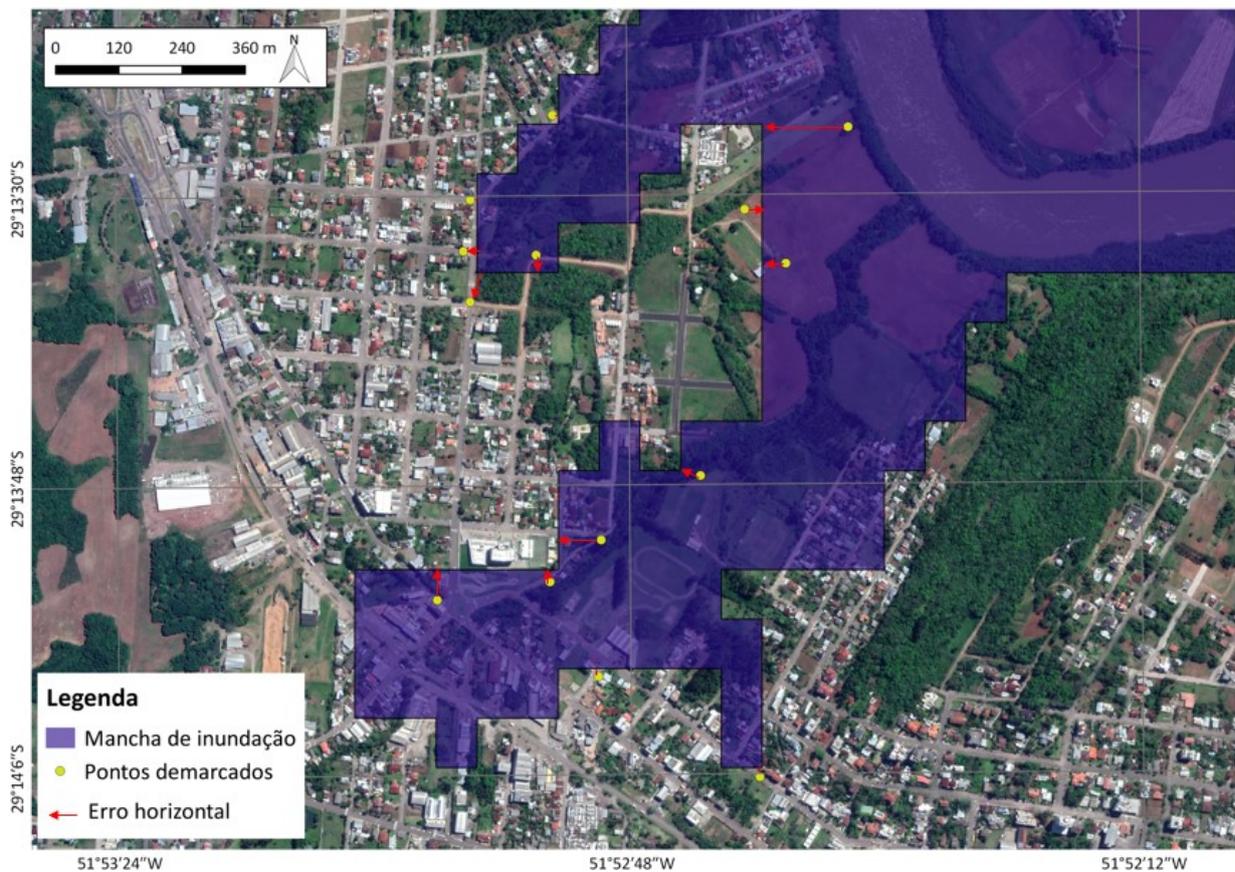


Figura 13. Exemplo da demarcação do erro horizontal, entre as manchas simuladas e os pontos demarcados através dos dados não sistemáticos.

5.2.3 Validação

O período utilizado para validação do modelo foi de 01 de setembro de 1999 à 01 de setembro de 2020, sendo o primeiro ano considerado para aquecimento do modelo e os demais para o cálculo das métricas de validação, totalizando assim um período de 20 anos analisados.

5.2.3.1 Dados de precipitação e vazão

A localização dos postos pluviométricos utilizados como dado de entrada de chuva neste período pode ser visualizada na Figura 14 e a descrição dos mesmos se encontra, novamente, no ANEXO A. Foram selecionados postos pluviométricos que possuíssem disponibilidade de dados adequada, o que totalizou 75 postos selecionados, 12 a mais que os selecionados para calibração do modelo.

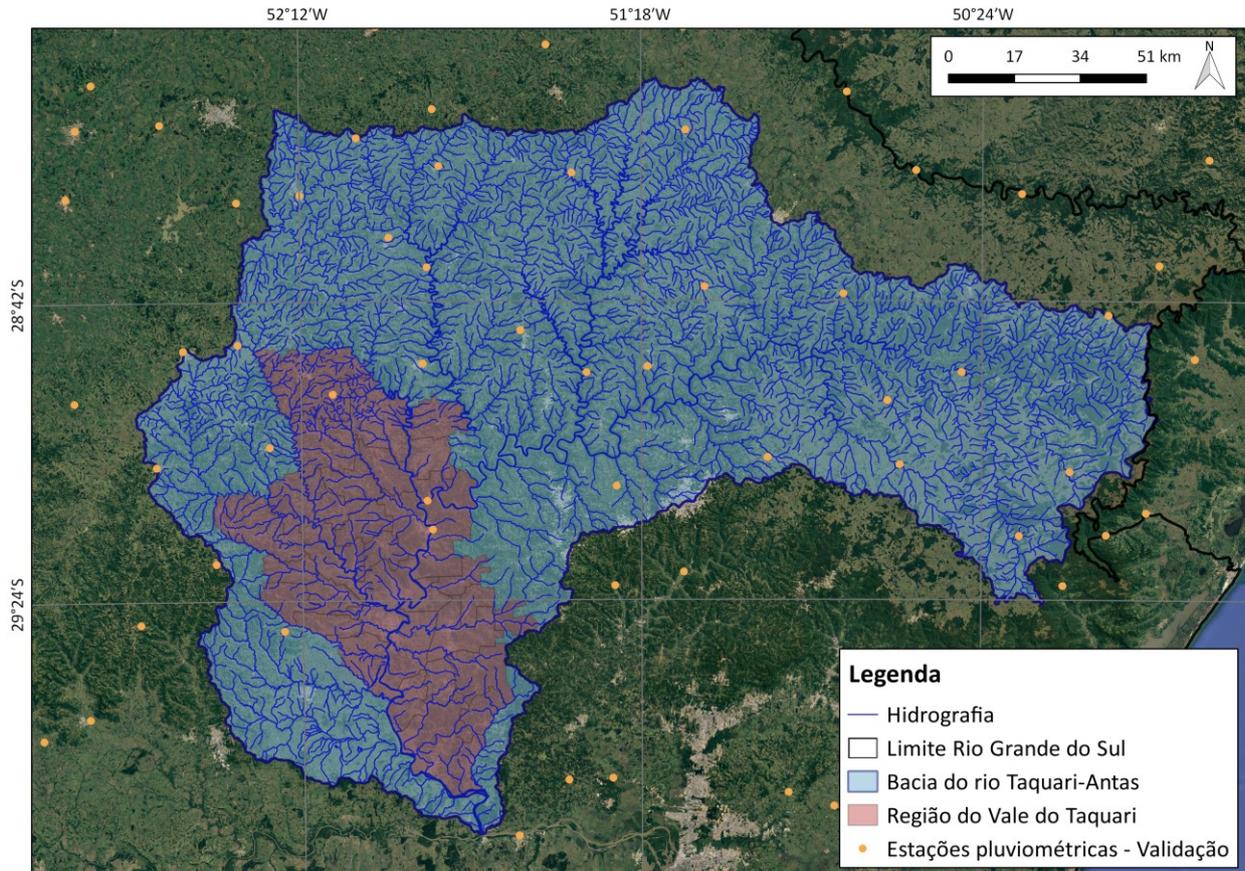


Figura 14. Postos pluviométricos utilizados como dado de entrada para validação do MGB.

A etapa de validação tem por objetivo verificar se os parâmetros de simulação estabelecidos permitem realizar boas aproximações nos hidrogramas de saída quando forem considerados outros períodos de análise, além do de calibração. Portanto, para verificar se a calibração do modelo foi adequada comparou-se os dados de vazão simulados com os dados de vazão observados em quatro estações fluviométricas localizadas na região do baixo Taquari-Antas que possuíssem área de drenagem maior que 2000 km². O Quadro 3 apresenta a descrição das estações selecionadas, e na Figura 15 pode ser visualizada sua localização.

Quadro 3. Descrição das estações fluviométricas selecionadas para validação.

Código	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Município	Rio	Área de Drenagem (Km ²)	Disponibilidade de dados (%) ¹
86580000	Santa Lúcia	-29,1197	-51,9119	Doutor Ricardo	Rio Guaporé	2470	99,5
86510000	Muçum	-29,1672	-51,8686	Muçum	Rio Taquari	16000	97,2
86720000	Encantado	-29,2344	-51,8550	Encantado	Rio Taquari	19100	82,0
86895000	Porto Mariante	-29,6947	-51,9692	Venâncio Aires	Rio Taquari	24600	60,7

¹ Disponibilidade considerando o período de validação do modelo (2000 a 2020)

(Fonte: adaptado de ANA, [s. d.])

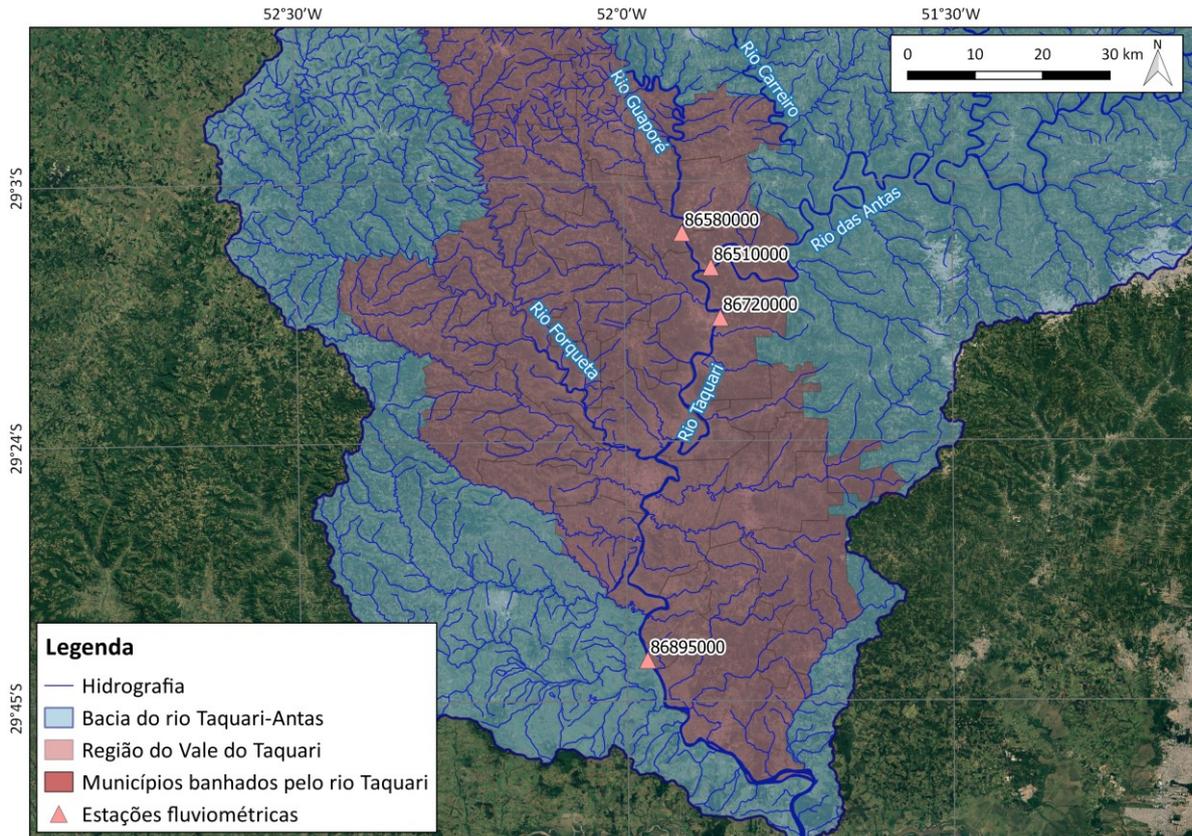


Figura 15. Postos fluviométricos utilizados para validação dos resultados do modelo.

5.2.3.2 Métricas de validação

Para validar o desempenho da simulação, além de comparar visualmente os hidrogramas simulados e observados, foram considerados os seguintes parâmetros: coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe das vazões calculadas e observadas (E_{NS}); coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões calculadas e observadas (E_{NS-Log}); e $BIAS$ absoluto, também denominado erro relativo de volume total dos hidrogramas (ΔV), em porcentagem.

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NASH; SUTCLIFFE, 1970), apresentado na equação (9), pode variar de negativo infinito até 1, apresentando um valor máximo igual a 1 quando se obtém um ajuste perfeito entre as vazões calculadas e observadas e valores negativos quanto mais distantes uma da outra. Este coeficiente é fortemente influenciado por erros nas vazões máximas, razão pela qual, quando E_{NS} é próximo de 1, o modelo está obtendo bom ajuste para as cheias. O desempenho de um modelo é considerado adequado e bom se o valor de E_{NS} supera 0,75 e aceitável se o valor de E_{NS} fica entre 0,36 e 0,75 (COLLISCHONN, 2001).

Já o coeficiente de Nash dos logaritmos das vazões, apresentado na equação (10), que também tem seu valor máximo igual à 1, apresenta, também, certa influência pelos erros nas

vazões máximas, no entanto é mais fortemente influenciado por baixos fluxos. De acordo com Collischonn (2001), valores de E_{NS-Log} próximos de 1 indicam que o modelo está simulando adequadamente os períodos de recessão do hidrograma e estiagens.

O erro no volume, calculado através da equação (11), não tem valor máximo nem mínimo e, diferente dos parâmetros anteriores, não é influenciado de forma diferenciada por períodos de cheias ou estiagens. Ele representa a tendência média dos dados simulados em relação aos dados observados, sendo que valores negativos e positivos de ΔV , indicam, respectivamente, que o modelo subestima ou superestima o fluxo simulado em relação aos dados observados. Segundo Collischonn (2001), é um parâmetro útil para observar se as perdas de água por evapotranspiração estão sendo corretamente calculadas pelo modelo.

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (9)$$

$$E_{NS-LOG} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\log Q_{obs} - \log Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^N (\log Q_{obs} - \log \bar{Q}_{obs})^2} \quad (10)$$

$$\Delta V = 100 \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim} - Q_{obs})_i}{\sum_{i=1}^N Q_{obs}} \quad (11)$$

Onde Q_{obs} é a vazão observada (m^3/s), Q_{sim} é a vazão simulada (m^3/s), N é o número de intervalos de tempo da série de dados avaliada e \bar{Q}_{obs} é a vazão média observada no período de simulação (m^3/s).

A Figura 16 apresenta um exemplo da comparação entre as vazões diárias observadas na estação fluviométrica 86510000, no município de Muçum. No capítulo 6 são apresentadas as discussões pertinentes a respeito destes resultados e a comparação dos hidrogramas simulados e observados nas demais estações.

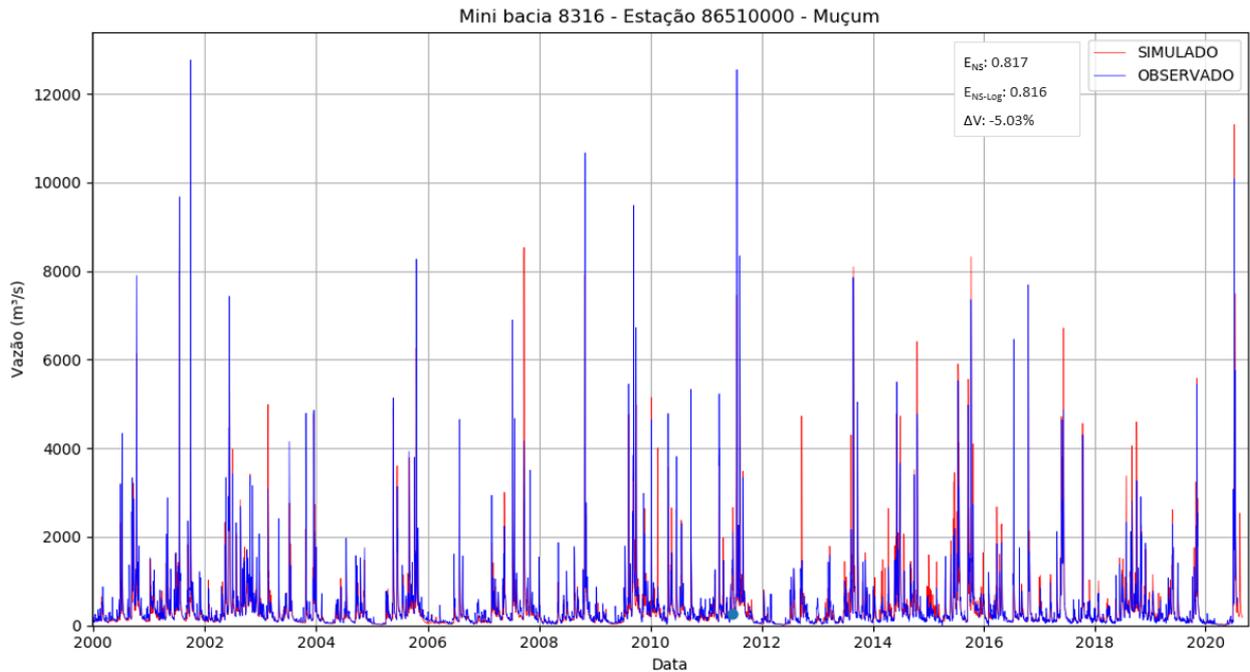


Figura 16. Exemplo de comparação entre hidrograma simulado e observado.

5.2.4 Calibração por enumeração - coeficiente de Manning

A propagação das vazões na rede de drenagem do MGB exige a determinação do valor do coeficiente de rugosidade de Manning, o qual pode ser determinado com base nas características do leito e das margens dos rios, individualmente para cada minibacia, ou, como um valor fixo para toda a bacia.

O modelo MGB do RSH adota em suas aplicações prévias um valor fixo de coeficiente de Manning, sendo este igual a 0,030. Neste trabalho manteve-se o Manning como um valor fixo na bacia, entretanto, buscou-se verificar a influência da variação do coeficiente de Manning em resultados como a extensão das manchas de inundação (na etapa de calibração do modelo) e nos hidrogramas gerados nas minibacias (na etapa de validação do modelo), realizando assim uma calibração por enumeração. Para isso, foram realizados os testes apresentados no Quadro 4. A faixa de valores de coeficiente de Manning utilizada para a determinação dos testes realizados foi baseada em valores de referência para canais naturais obtidos da literatura (Quadro 5).

Quadro 4. Testes de calibração por enumeração para o coeficiente de Manning.

Teste	Coeficiente de Manning ($s/m^{1/3}$) adotado
A	0,020
B	0,025
C	0,030
D	0,035
E	0,040
F	0,045
G	0,050
H	0,060
I	0,070

Quadro 5. Faixas de valores para o coeficiente de Manning em canais naturais.

Tipo de canal e descrição	Coeficiente de Manning ($s/m^{1/3}$)		
	Mínimo	Normal	Máximo
<i>Córregos menores, em planícies</i>			
Limpos, retos, com perfil regular	0,025	0,030	0,033
Limpos, sinuosos, algumas piscinas e bancos de areia	0,033	0,040	0,045
O mesmo do acima, mas irregulares	0,045	0,050	0,060
<i>Rios de montanha</i>			
Fundo de cascalho, com poucas pedras	0,030	0,040	0,050
Pedras com grandes pedregulhos	0,040	0,050	0,070
<i>Planícies de inundação</i>			
Pastagens ou áreas cultivadas	0,025	0,035	0,050
Arbustos e árvores	0,035	0,075	0,160

(Fonte: Adaptado de BOITEN, 2008)

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos ao longo do trabalho. O primeiro item apresenta os dados não sistemáticos que foram selecionados para o trabalho. O segundo item aborda os resultados relacionados à etapa de calibração do MGB-RSH para a bacia do rio Taquari-Antas com dados não sistemáticos, incluindo a avaliação realizada a respeito dos dados de entrada de precipitação do modelo, bem como os resultados da calibração por enumeração do parâmetro de rugosidade (coeficiente de Manning) realizada nesta etapa. No terceiro item são apresentados os resultados relacionados à validação do modelo com dados sistemáticos e, no quarto item, apresenta-se um resumo dos resultados da calibração do modelo *versus* a validação do mesmo. Por fim, no quinto e sexto item, respectivamente, são apresentadas algumas discussões pertinentes a respeito das incertezas e limitações associadas aos resultados obtidos e o banco de dados gerado como contribuição adicional do trabalho.

6.1 DADOS NÃO SISTEMÁTICOS SELECIONADOS

Seguindo os critérios estabelecidos na metodologia, foram selecionados no total 12 vídeos, distribuídos entre os municípios de Muçum, Encantado, Roca Sales, Arroio do Meio, Colinas, Lajeado e Bom Retiro do Sul, além de imagens, divididas entre os municípios de Encantado e Estrela. As datas dos vídeos e imagens selecionados variam, sendo a maioria do dia 08 de julho de 2020, no qual ocorreu o pico da inundação, mas também existem registros do dia 09 de julho de 2020 e 12 de julho de 2020.

Em relação à hora das gravações ou imagens, esta informação é vinculada ao autor da publicação ter informado ou não. Desta forma, a informação de horário está disponível somente em 4 dos vídeos selecionados, sendo um deles na cidade de Muçum, no dia 08 de julho de 2020, um na cidade de Arroio do Meio, também no dia 08 de julho, e os outros 2 nas cidades de Encantado e Roca Sales, ambos no dia 12 de julho de 2020.

A Figura 17 apresenta a área de cobertura das fotos e vídeos que foram selecionados, e o Quadro 6 e o Quadro 7 apresentam, respectivamente, o detalhamento das informações referentes aos vídeos e imagens selecionadas para o estudo. Estão apresentados o município em que a gravação ou imagem foi efetuada; a data; o horário da gravação ou da imagem, quando disponível; a fonte, ou seja, de que plataforma ou rede social o dado foi extraído; e, o autor do vídeo ou imagem.

Quanto à demarcação de pontos representando a extensão da mancha de inundação partir das imagens e vídeos selecionados, se obteve um total de 406 pontos demarcados, sendo 298 deles para o dia 08 de julho, 75 para o dia 09 julho e 33 pontos para o dia 12 julho.

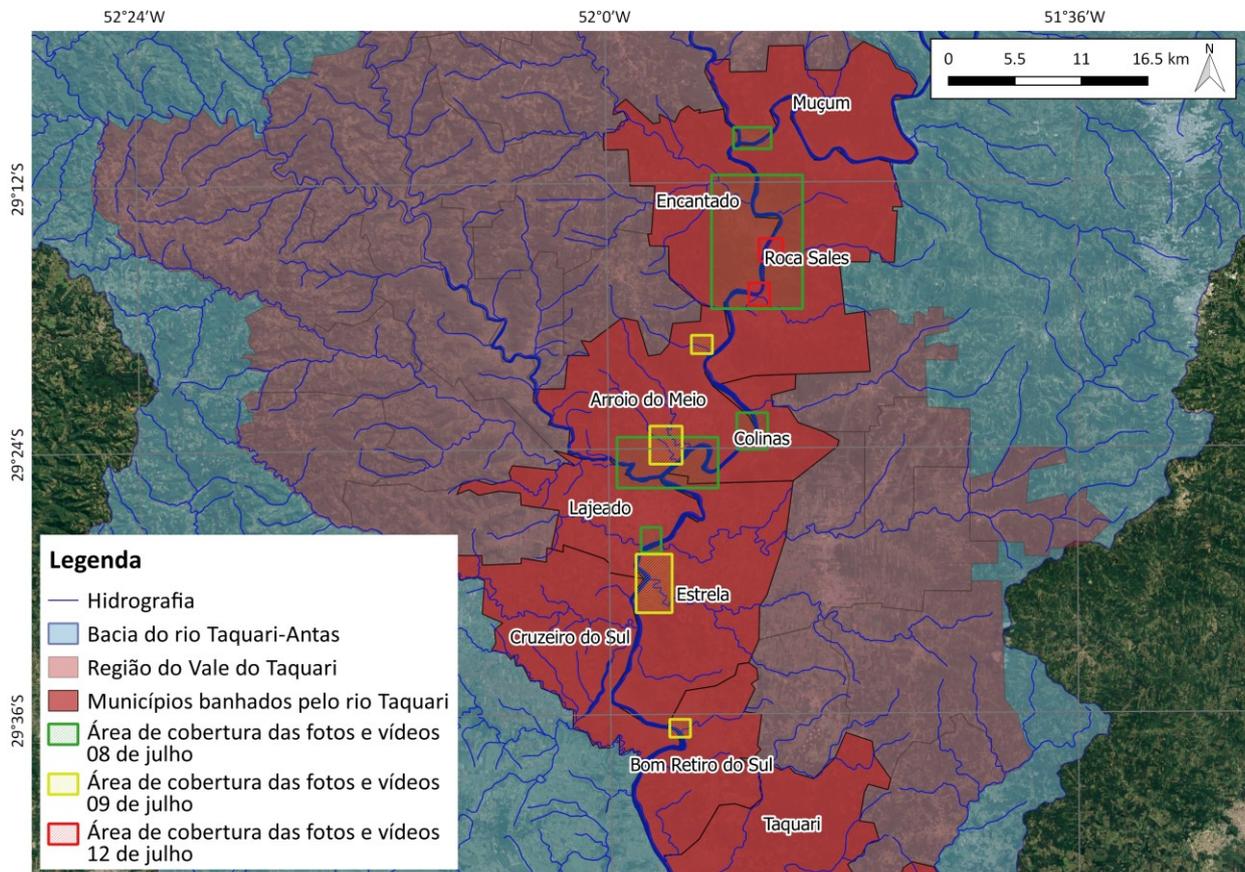


Figura 17. Área de cobertura da mancha de inundação pelas fotos e vídeos selecionados.

Quadro 6. Detalhamento das informações dos vídeos selecionados.

Município	Data	Hora	Fonte	Autor
Muçum	08 de julho	10:20; 11:10; 12:40	Youtube	JC2 Vídeo Produtora (2020)
Encantado	08 de julho	-	Youtube	Voe Trike com Leonardo Feldmann (2020a)
	12 de julho	15:25		Voe Trike com Leonardo Feldmann (2020b)
Roca Sales	08 de julho	-	Youtube	Voe Trike com Leonardo Feldmann (2020c, 2020d, 2020e, 2020f)
	12 de julho	15:30		Voe Trike com Leonardo Feldmann (2020g)
Arroio do Meio	08 de julho	11:45	Youtube	TAX Imagens Aéreas (2020)
	09 de julho	-		

Município	Data	Hora	Fonte	Autor
Colinas	08 de julho	-	Youtube	Colinas Online (2020)
Lajeado	08 de julho	-	Facebook	Prefeitura de Lajeado (2020)
Bom Retiro do Sul	09 de julho	-	Facebook	Prefeitura de Bom Retiro do Sul (2020)

Quadro 7. Detalhamento das informações das imagens selecionadas.

Município	Data	Quantidade de imagens	Fonte	Autor
Encantado	08 de julho	15	Facebook	Prefeitura de Encantado (2020)
Estrela	09 de julho	26	Facebook	Prefeitura de Estrela (2020)

A fim de contextualizar o leitor, da Figura 18 à Figura 25 são apresentadas imagens extraídas a partir dos vídeos selecionados, ou diretamente algumas fotos selecionadas, para cada um dos municípios onde foram encontrados registros.



Figura 18. Frame de fotos extraídas do vídeo de sobrevoo da extensão da inundação no município de Muçum, no dia 08 de julho de 2020.

(Fonte: adaptado de JC2 Vídeo Produtora, 2020)



Figura 19. Frame de fotos extraídas do vídeo de sobrevoo da extensão da inundação no município de Roca Sales, nos dias 08 e 12 de julho de 2020.

(Fonte: Voe Trike com Leonardo Feldmann, 2020c, 2020e)



Figura 20. Exemplos de imagens aéreas que mostram a extensão da inundação no município de Encantado, no dia 08 de julho de 2020.
(Fonte: Prefeitura de Encantado, 2020)



Figura 21. Frame de fotos extraídas do vídeo de sobrevoação da extensão da inundação no município de Arroio do Meio, nos dias 08 e 09 de julho de 2020.
(Fonte: adaptado de TAX Imagens Aéreas, 2020)



Figura 22. Frame de fotos extraídas do vídeo de sobrevoio da extensão da inundação no município de Colinas, no dia 08 de julho de 2020.
(Fonte: adaptado de Colinas Online, 2020)

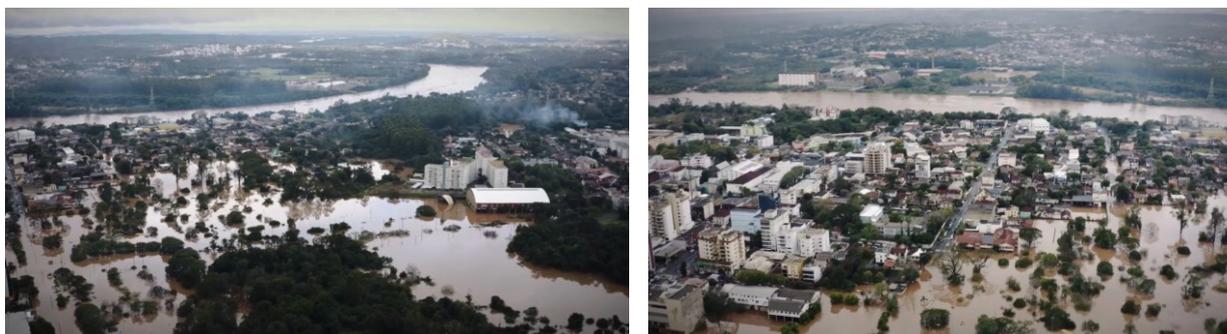


Figura 23. Frame de fotos extraídas do vídeo de sobrevoio da extensão da inundação no município de Lajeado, no dia 08 de julho de 2020.
(Fonte: Prefeitura de Lajeado, 2020)



Figura 24. Exemplos de imagens aéreas que mostram a extensão da inundação no município de Estrela, no dia 09 de julho de 2020.
(Fonte: Prefeitura de Estrela, 2020)



Figura 25. Frame de fotos extraídas do vídeo de sobrevoo da extensão da inundação no município de Bom Retiro do Sul, no dia 09 de julho de 2020.
(Fonte: Prefeitura de Bom Retiro do Sul, 2020)

6.2 CALIBRAÇÃO

6.2.1 Análise da precipitação acumulada

Por meio dos dados hidrológicos diários que foram obtidos a partir da medição de estações mantidas pela ANA, foi possível realizar uma análise da distribuição espacial da precipitação entre o período de 27 de junho de 2020 e 17 de julho de 2020. Neste período 63 estações pluviométricas apresentaram dados, as quais cobrem uma área de aproximadamente 75.749,8 km² (dentro e fora da bacia) não uniformemente distribuídas espacialmente. O valor máximo de precipitação registrado foi de 203 mm, em 08 de julho de 2020, na estação pluviométrica 2949001 – Praia Grande.

Na análise da precipitação acumulada nestas estações (dados apresentados no ANEXO B), foi possível observar a distribuição espacial da precipitação acumulada no período de 27 de junho a 03 de julho de 2020 (Figura 26 A), período de 04 de julho a 10 de julho de 2020 (Figura 26 B) e período de 11 de julho a 17 de julho de 2020 (Figura 26 C). O período de 04 a 10 de julho foi o que apresentou maior precipitação acumulada, estando a mesma entre 200 e 250 mm na maior parte da bacia, o que é justificado pelos eventos de precipitação intensa ocorridos nos dias 06 e 07 de julho. Os demais períodos apresentaram precipitação variando de 50 a 250 mm.

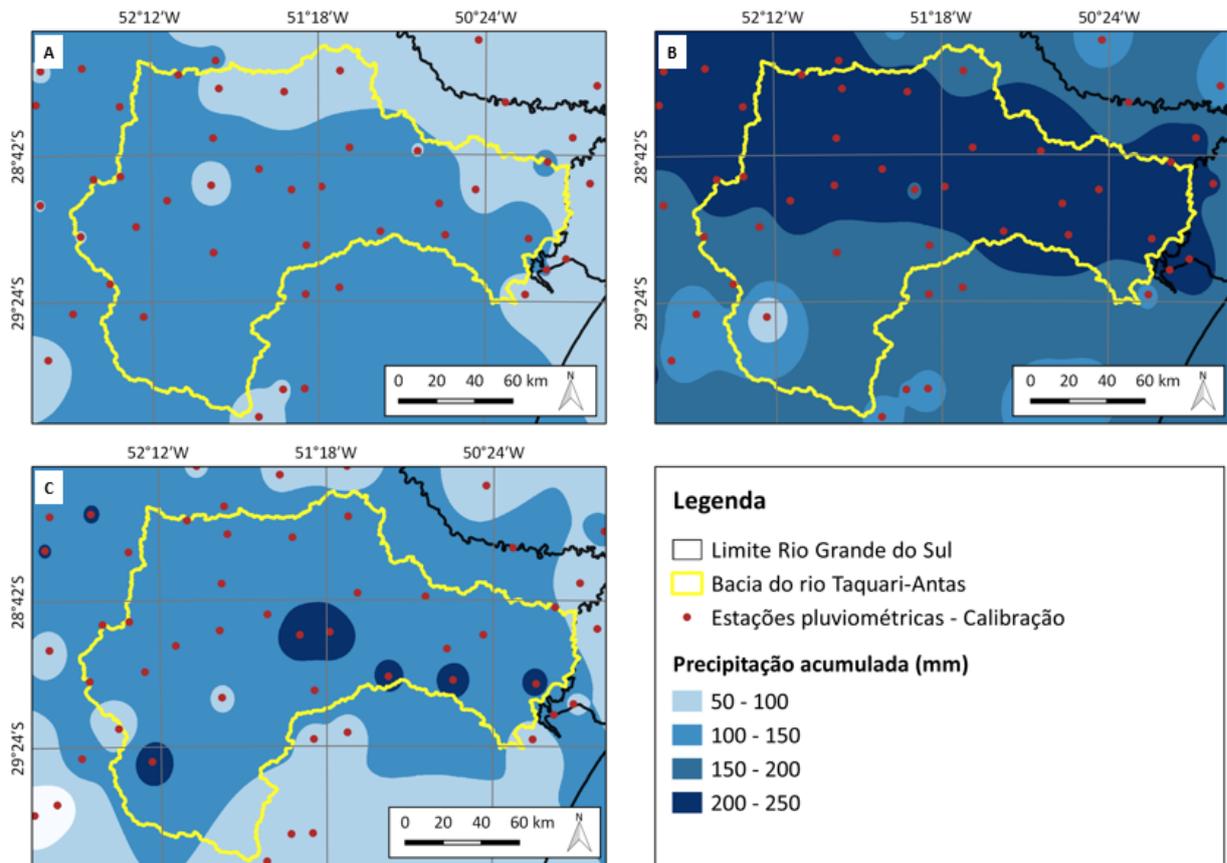


Figura 26. Distribuição das estações pluviométricas e precipitação acumulada. (A) Período de 27 de junho a 03 de julho de 2020; (B) Período de 04 de julho a 10 de julho de 2020; (C) Período de 11 de julho a 17 de julho de 2020.

6.2.2 Resultados da calibração

No processo de calibração do modelo utilizou-se os parâmetros de solo, clima, relações geomorfológicas e outras variáveis que já haviam sido desenvolvidos previamente para aplicações com o MGB regional. Porém, buscou-se variar o coeficiente de Manning utilizado pelo modelo a fim de se atingir um menor erro horizontal entre as manchas de inundação simuladas e os pontos demarcados no *Google Earth*.

A Tabela 3 e a Figura 27 apresentam os resultados obtidos para cada um dos eventos que possuíam dados não sistemáticos disponíveis para comparação com os resultados gerados pelo modelo. É possível observar que o menor erro horizontal médio (53 m) foi obtido no teste F, com um coeficiente de Manning $0,045 \text{ s/m}^{1/3}$, sendo esta considerada, portanto, a melhor calibração do modelo para o evento de julho de 2020. O teste C, com o coeficiente de Manning que era utilizado previamente pelo MGB regional ($0,030 \text{ s/m}^{1/3}$) apresentou erro horizontal médio de 68 m, indicando que este valor do parâmetro pode não ser o mais adequado para a bacia do rio Taquari-Antas usando a versão do modelo calibrada adotada neste trabalho, para este evento de inundação.

Tabela 3. Resultados dos testes para diferentes Mannings na calibração do modelo – Erro horizontal.

Teste	Manning ($s/m^{1/3}$)	Erro horizontal absoluto (m)			
		08 de julho	09 de julho	12 de julho	Média
A	0,020	114	221	34	123
B	0,025	67	114	45	75
C	0,030	57	77	70	68
D	0,035	55	55	72	61
E	0,040	62	30	70	54
F	0,045	64	24	71	53
G	0,050	70	28	74	57
H	0,060	76	23	83	60
I	0,070	72	26	100	66

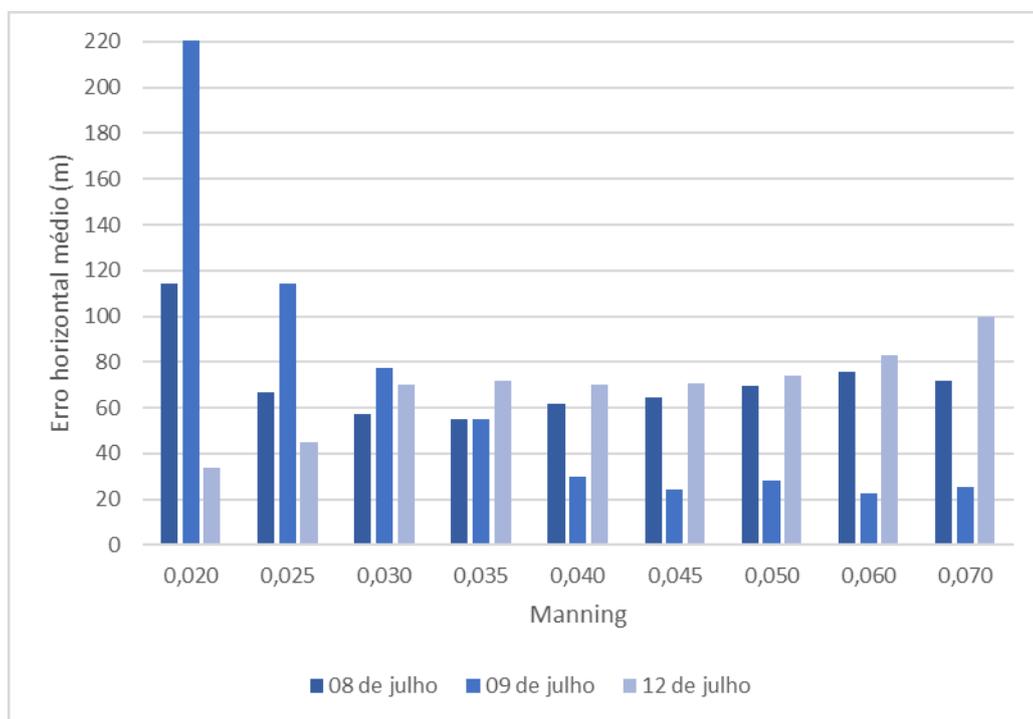


Figura 27. Erro horizontal médio, para os diferentes coeficientes de Manning, nos três eventos analisados.

Quanto menor o valor do coeficiente de Manning aplicado, a tendência é que o escoamento seja mais rápido devido ao menor atrito com o leito do rio, o que implica em menores níveis e, conseqüentemente, uma menor área alagada. Assim, observou-se que valores de coeficiente de Manning baixos apresentaram erros horizontais médios relativamente altos, assim como o contrário também é válido: coeficientes de Manning muito altos apresentaram elevados erros horizontais médios devido à, neste caso, as manchas de inundação simuladas terem alagado áreas que os pontos extraídos dos dados não sistemáticos não atingiram.

Conforme destacado anteriormente, o coeficiente de Manning que apresentou menor erro horizontal médio foi o de $0,045 s/m^{1/3}$. Isto ocorreu devido ao dia 09 de julho ter apresentado um erro horizontal substancialmente menor para este teste (erro horizontal de 24 metros) que nos

demais testes deste dia. Segundo o Quadro 5 apresentado no Item 5.2.4, os valores típicos de coeficiente de Manning em planícies de inundação variam de 0,025 (mínimo) à 0,160 (máximo). Logo, como no dia 09 de julho os níveis do rio Taquari extravasaram a calha principal, atingindo a planície de inundação que é composta por áreas urbanas, árvores, arbustos, dentre outros elementos que aumentam a rugosidade da área inundada, o coeficiente de Manning deve ser mais alto para conseguir representar adequadamente o evento. Assim, este fato justifica os melhores resultados obtidos com o coeficiente de Manning $0,045 \text{ s/m}^{1/3}$. Contudo, deve ser destacado que este é um evento de grande magnitude e que este valor nem sempre irá representar adequadamente os eventos hidrológicos na bacia.

A seguir, na Figura 28, Figura 29 e Figura 30, são apresentados os resultados das manchas de inundação diária para os dias 08, 09 e 12 de julho de 2020, respectivamente, juntamente com os pontos demarcados através dos dados não sistemáticos. É possível fazer uma análise visual detalhada dos resultados obtidos em determinados municípios para alguns dos testes com os diferentes coeficientes de Manning que foram realizados. São apresentadas as manchas geradas com os coeficientes de Manning mínimo e máximo testados, ou seja, $0,02 \text{ s/m}^{1/3}$ e $0,07 \text{ s/m}^{1/3}$, bem como as manchas geradas com dois coeficientes de Manning intermediários, de $0,03 \text{ s/m}^{1/3}$ e $0,045 \text{ s/m}^{1/3}$ (menor erro horizontal médio). O ANEXO C apresenta os resultados para os demais locais.

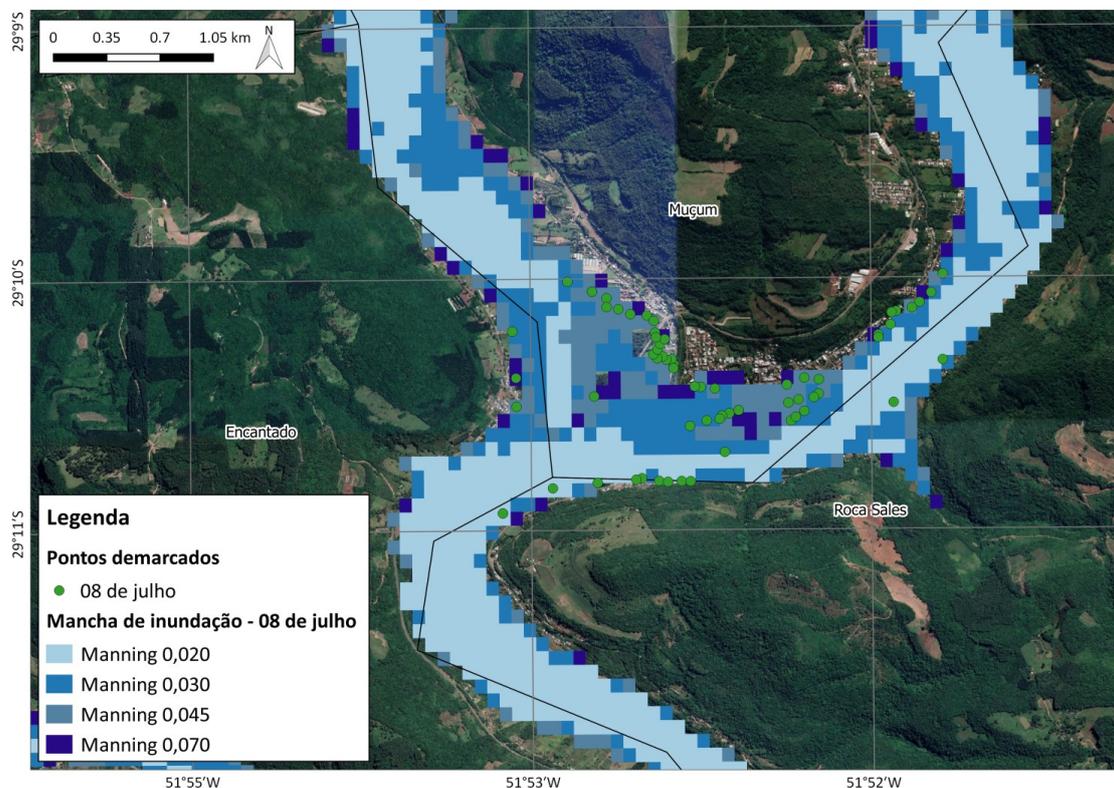


Figura 28. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 08 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Muçum e Roca Sales.

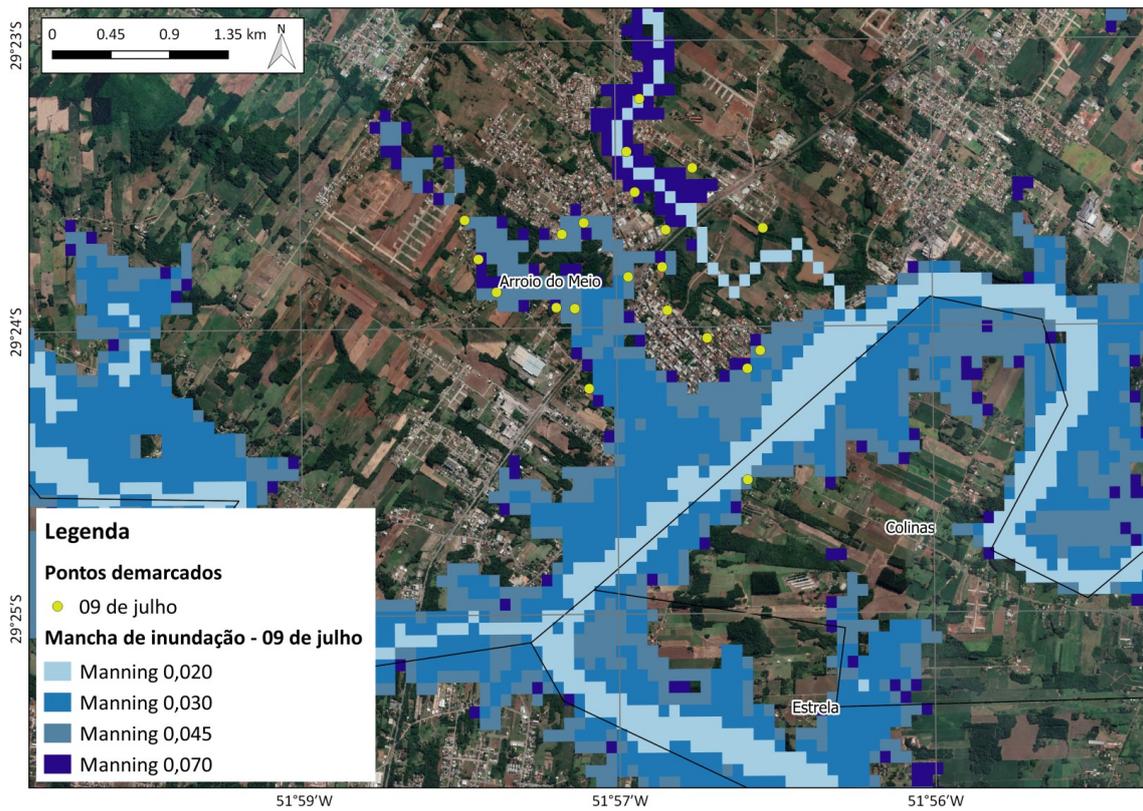


Figura 29. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 09 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Arroio do Meio e Colinas.

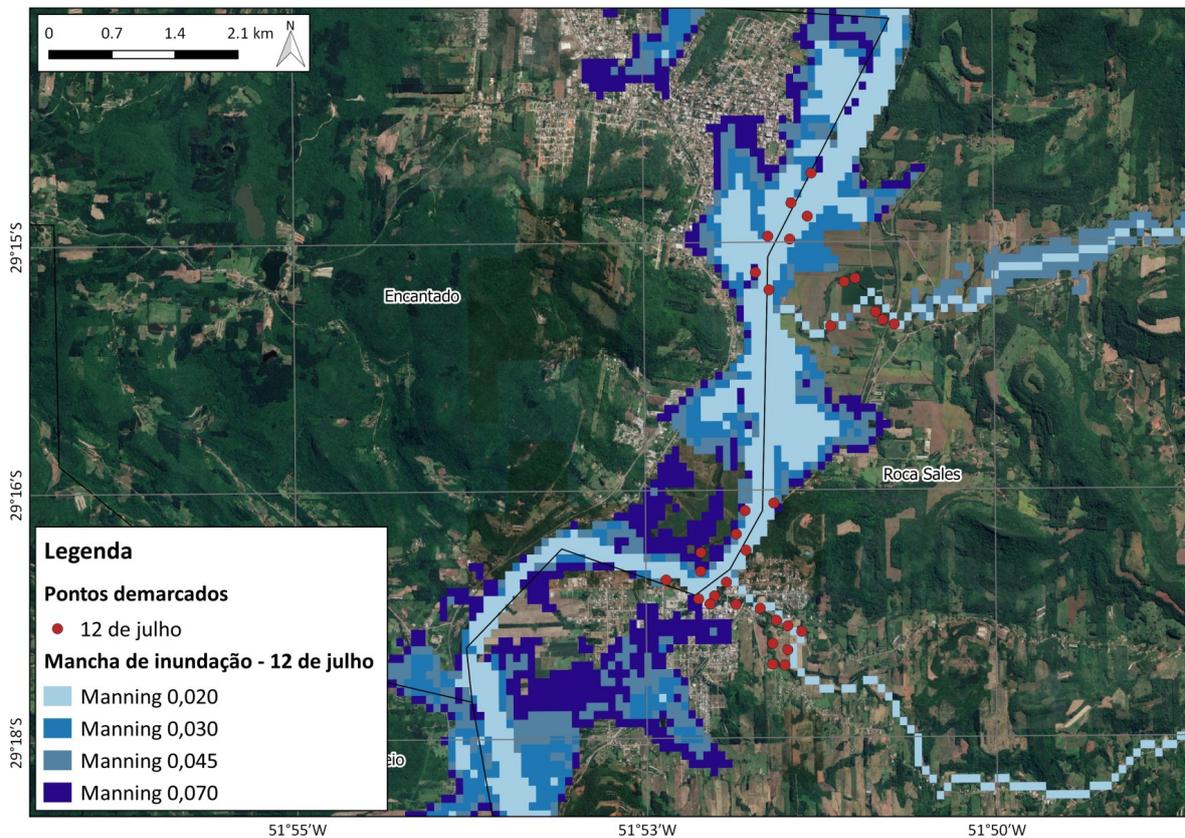


Figura 30. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 12 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Encantado e Roca Sales.

6.2.3 Mancha de inundação

Visto que o melhor resultado da calibração (i.e. menor erro horizontal médio entre as manchas simuladas e os pontos demarcados) foi obtido com o teste F – Coeficiente de Manning $0,045 \text{ s/m}^{1/3}$, a Figura 31 apresenta o resultado da mancha de inundação diária simulada, com este valor de Manning, para os dias 08, 09 e 12 de julho de 2020. É dado destaque para as áreas urbanas dos municípios do Vale do Taquari, que foram fortemente atingidas por estas inundações.

Na região mais a montante, nos Municípios de Muçum, Encantado, Roca Sales e Arroio do Meio, conforme é observado na Figura 32, a inundação apresentou maior área alagada no dia 08 de julho, enquanto que nos municípios localizados mais a jusante da bacia, conforme observado na Figura 33, a maior área alagada simulada ocorre no dia 12 de julho.

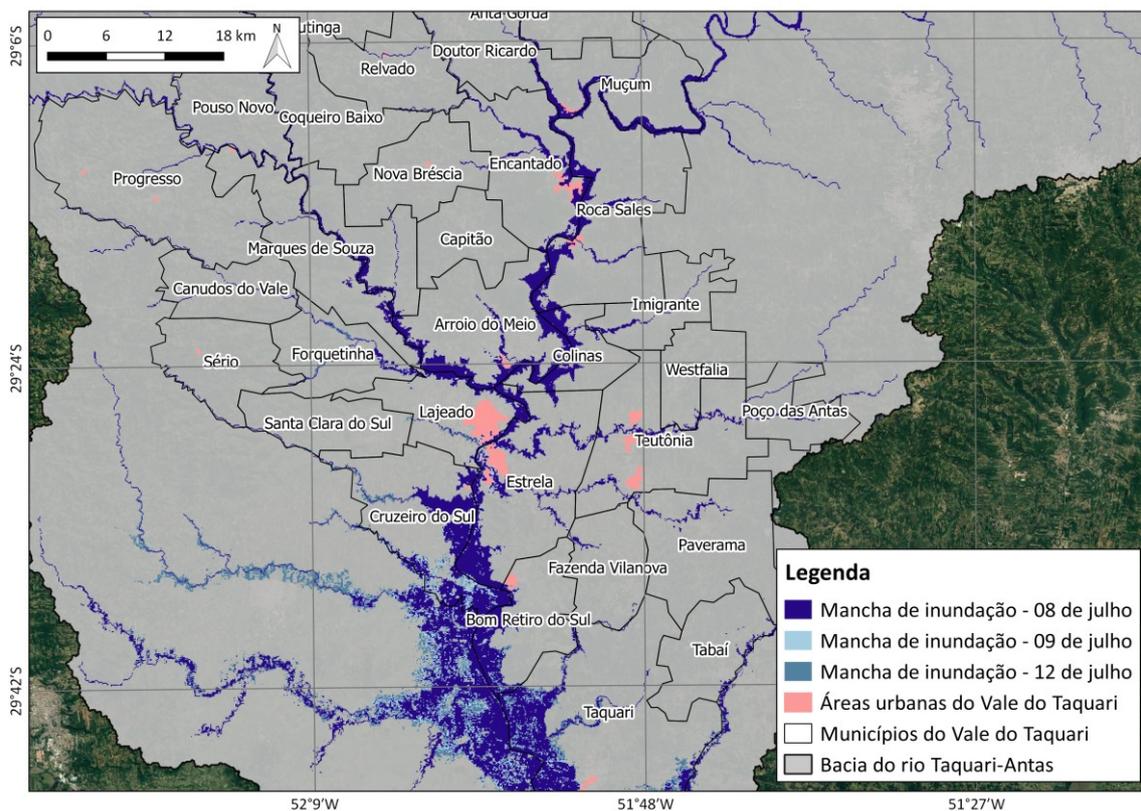


Figura 31. Manchas de inundação diárias, na região do Vale do Taquari, nos dias 08, 09 e 12 de julho.

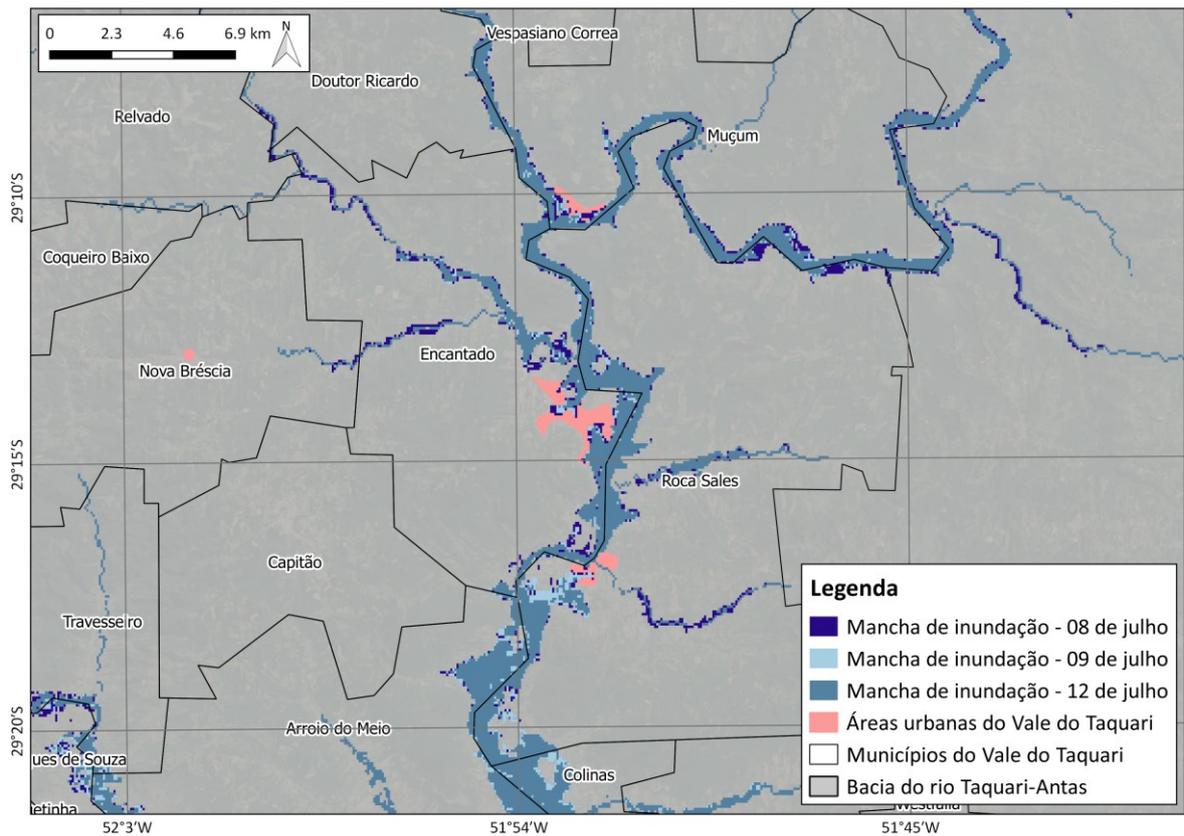


Figura 32. Manchas de inundação diárias, nos municípios mais a montante no rio Taquari, nos dias 08, 09 e 12 de julho.

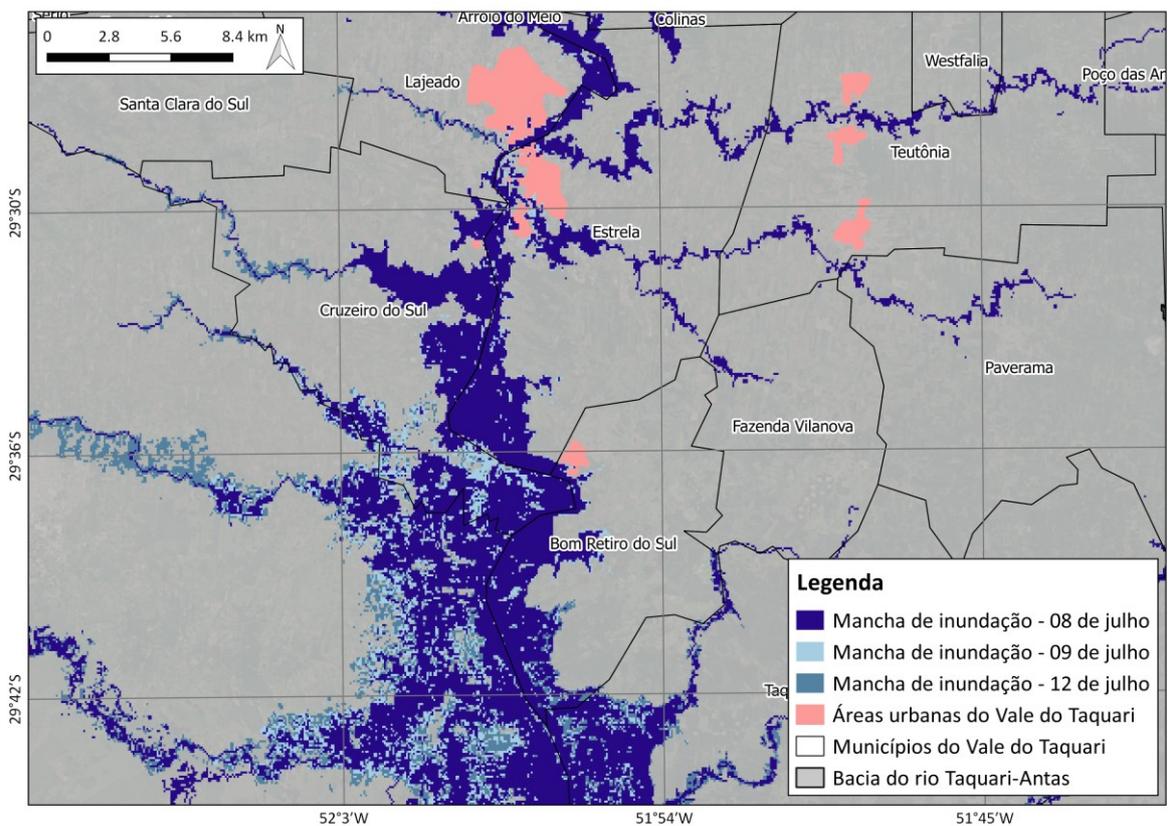


Figura 33. Manchas de inundação diárias, nos municípios mais a jusante no rio Taquari, nos dias 08, 09 e 12 de julho.

6.3 VALIDAÇÃO

Utilizando os parâmetros de avaliação do desempenho da simulação mencionados no item 5.2.3.2 – Métricas de Validação, foi possível avaliar se a calibração, realizada com base nos pontos demarcados com filmagens e imagens de um evento de cheia, é efetiva também para outros períodos de vazão. Neste caso, foi avaliado o período de 01 de setembro de 2000 até 01 de setembro de 2020.

Apesar da melhor calibração obtida ter sido com o coeficiente de Manning de $0,045 \text{ s/m}^{1/3}$, na etapa de validação também se analisou a resposta do modelo a este parâmetro, realizando os mesmos testes que na etapa de calibração, podendo assim verificar se a calibração realizada com os dados não sistemáticos foi efetiva.

A Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 5 apresentam os resultados dos testes para diferentes valores de Manning para os parâmetros E_{NS} , E_{NS-Log} e ΔV , respectivamente. A classificação do E_{NS} médio, ou seja, a média dos E_{NS} obtidos nas minibacias das quatro estações fluviométricas analisadas em cada um dos testes, apresentou valores que variam de 0,665, com um coeficiente de Manning de $0,05 \text{ s/m}^{1/3}$, à 0,779, com um coeficiente de Manning de $0,030 \text{ s/m}^{1/3}$, neste caso, sendo classificado como um modelo bom. Para o coeficiente de Manning de $0,045 \text{ s/m}^{1/3}$, o E_{NS} médio foi de 0,702, sendo o modelo, portanto, classificado como aceitável para a simulação de condições de cheias.

Tabela 4. Resultados dos testes para diferentes valores de Manning – Parâmetro E_{NS} .

Teste	Manning ($\text{s/m}^{1/3}$)	E _{NS} - Minibacias das estações fluviométricas				E _{NS} médio
		86580000	86510000	86720000	86895000	
A	0,020	0,706	0,690	0,711	0,771	0,720
B	0,025	0,683	0,779	0,785	0,829	0,769
C	0,030	0,658	0,817	0,813	0,827	0,779
D	0,035	0,632	0,820	0,812	0,793	0,764
E	0,040	0,605	0,803	0,795	0,742	0,736
F	0,045	0,578	0,777	0,769	0,683	0,702
G	0,050	0,552	0,745	0,739	0,625	0,665
H	0,060	0,504	0,676	0,671	0,517	0,592
I	0,070	0,461	0,607	0,604	0,427	0,525

O parâmetro E_{NS-Log} , que avalia, principalmente, se o modelo representa bem os baixos fluxos, apresentou valores variando de 0,494, para o coeficiente de Manning de $0,020 \text{ s/m}^{1/3}$, à 0,527, para os coeficientes de Manning de 0,040 e $0,045 \text{ s/m}^{1/3}$. Apesar da média dos valores ter apresentado valores relativamente baixos (distantes de 1, que seria o melhor resultado), a estação 86510000 - Muçum se mostrou com bons resultados de E_{NS-Log} . Entretanto, ressalta-se que como o

modelo foi calibrado para condições de eventos extremos de cheia é esperado que não se aproxime fielmente de dados observados em condições de estiagem.

Tabela 5. Resultados dos testes para diferentes valores de Manning – Parâmetro E_{NS-LOG} .

Teste	Manning ($s/m^{1/3}$)	E_{NS-Log} - Minibacias das estações fluviométricas				E_{NS-Log} médio
		86580000	86510000	86720000	86895000	
A	0,020	0,418	0,788	0,465	0,306	0,494
B	0,025	0,433	0,805	0,477	0,322	0,509
C	0,030	0,445	0,816	0,484	0,331	0,519
D	0,035	0,454	0,822	0,488	0,335	0,525
E	0,040	0,460	0,824	0,490	0,334	0,527
F	0,045	0,464	0,823	0,491	0,329	0,527
G	0,050	0,467	0,821	0,489	0,321	0,525
H	0,060	0,468	0,809	0,482	0,299	0,515
I	0,070	0,460	0,794	0,472	0,276	0,501

Quanto ao erro de volume, que representa a tendência média dos dados simulados em relação aos dados observados e avalia se o balanço hídrico do modelo está adequado, os valores médios praticamente não apresentaram variações para diferentes coeficientes de Manning, conforme pode ser observado na Tabela 6. Novamente, a estação 86510000 – Muçum se mostrou com os melhores resultados perante as demais estações fluviométricas.

Tabela 6. Resultados dos testes para diferentes valores de Manning – Parâmetro ΔV .

Teste	Manning ($s/m^{1/3}$)	ΔV - Minibacias das estações fluviométricas				ΔV médio
		86580000	86510000	86720000	86895000	
A	0,020	-30,378	-4,764	-19,832	-24,131	-19,776
B	0,025	-30,320	-4,931	-20,015	-24,032	-19,825
C	0,030	-30,176	-5,030	-20,109	-23,978	-19,823
D	0,035	-30,121	-5,084	-20,15	-23,955	-19,828
E	0,040	-30,163	-5,086	-20,154	-23,926	-19,832
F	0,045	-30,230	-5,048	-20,124	-23,911	-19,828
G	0,050	-30,310	-5,011	-20,096	-23,901	-19,830
H	0,060	-30,447	-4,939	-20,064	-23,876	-19,832
I	0,070	-30,531	-4,890	-20,055	-23,866	-19,836

Os hidrogramas referentes às estações fluviométricas 86580000 - Santa Lúcia, 86510000 – Muçum, 86720000 – Encantado e 86895000 – Porto Mariante, respectivamente, foram comparados com os hidrogramas resultantes de algumas das simulações com diferentes testes de coeficiente de Manning. São apresentados os hidrogramas simulados com os coeficientes de Manning mínimo e máximo testados, ou seja, $0,02 s/m^{1/3}$ e $0,07 s/m^{1/3}$, bem como os simulados

com dois coeficientes de Manning intermediários, de $0,03 \text{ s/m}^{1/3}$ e $0,045 \text{ s/m}^{1/3}$. Estas comparações, apresentando todo o período de validação simulado com destaque para o evento extremo de julho de 2020, são apresentadas na Figura 34, Figura 35, Figura 36 e Figura 37.

Embora o coeficiente de Nash não tenha tido grandes variações alterando o coeficiente de rugosidade do modelo, pode ser observado nos hidrogramas apresentados que a alteração do Manning impacta diretamente o tempo de chegada da onda de cheia. Nas estações de Muçum, Encantado e Porto Mariante, valores mais altos de coeficiente de Manning atrasaram o pico do hidrograma em até um dia. Assim, destaca-se que apesar dos diferentes coeficientes de rugosidade terem sido testados objetivando calibrar a mancha de inundação, eles podem não ser adequados para outras aplicações, como, por exemplo, no contexto de utilização do modelo para previsões de eventos de inundação.

Apesar de não se ter realizado, neste trabalho, uma validação dos níveis simulados pelo modelo com os observados nas estações fluviométricas, deve ser destacado que a alteração do coeficiente de rugosidade pode alterar a amplitude dos níveis simulados.

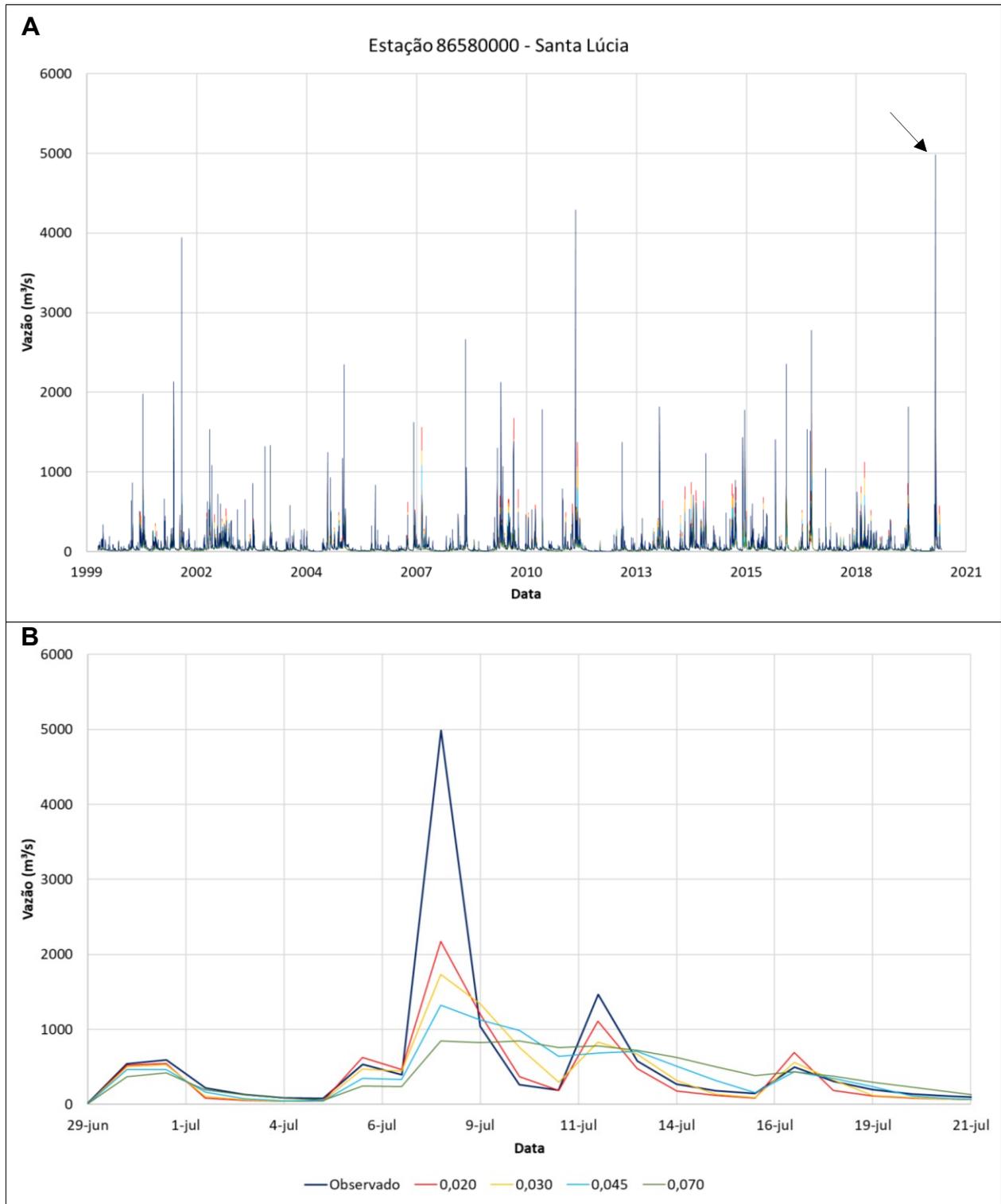


Figura 34. Hidrograma observado e simulado para diferentes valores de Manning na minibacia da estação 86580000 – Santa Lúcia. (A) Período simulado, (B) zoom no evento extremo de 2020.

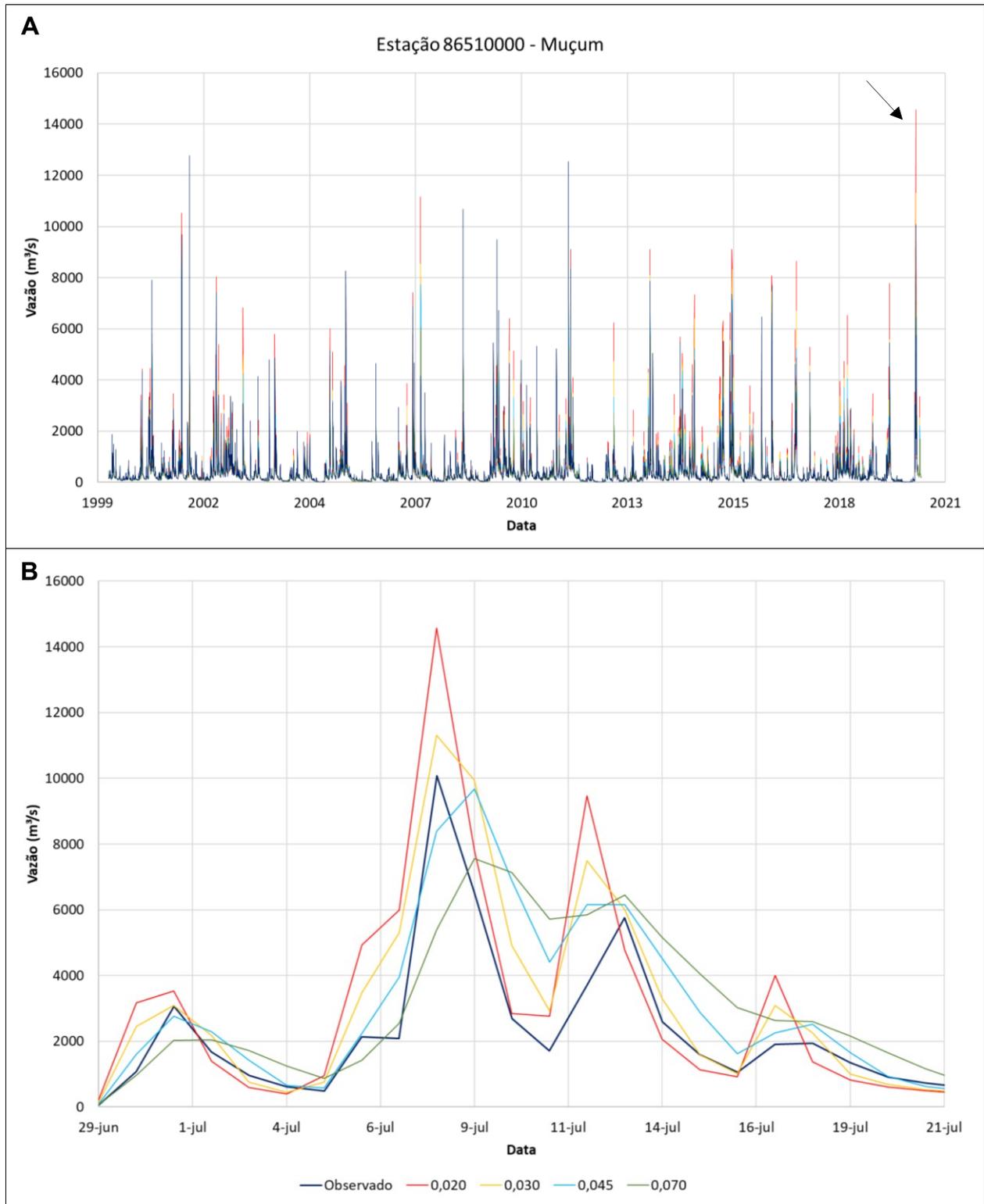


Figura 35. Hidrograma observado e simulado para diferentes valores de Manning na minibacia da estação 86510000 – Muçum. (A) Período simulado, (B) zoom no evento extremo de 2020.

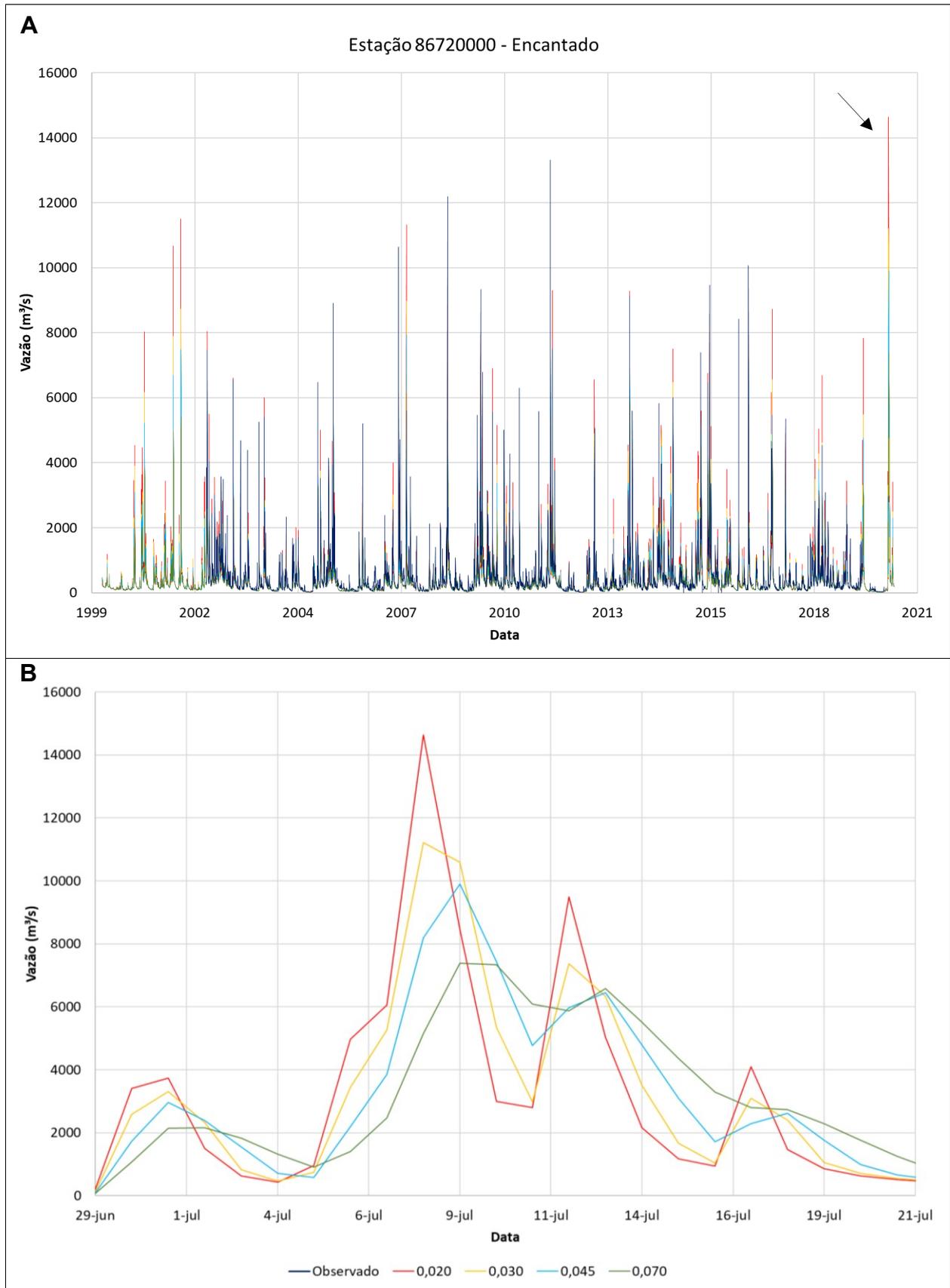


Figura 36. Hidrograma simulado para diferentes valores de Manning na minibacia da estação 86720000 – Encantado. (A) Período simulado, (B) zoom no evento extremo de 2020 - a estação não possui dados observados neste período.

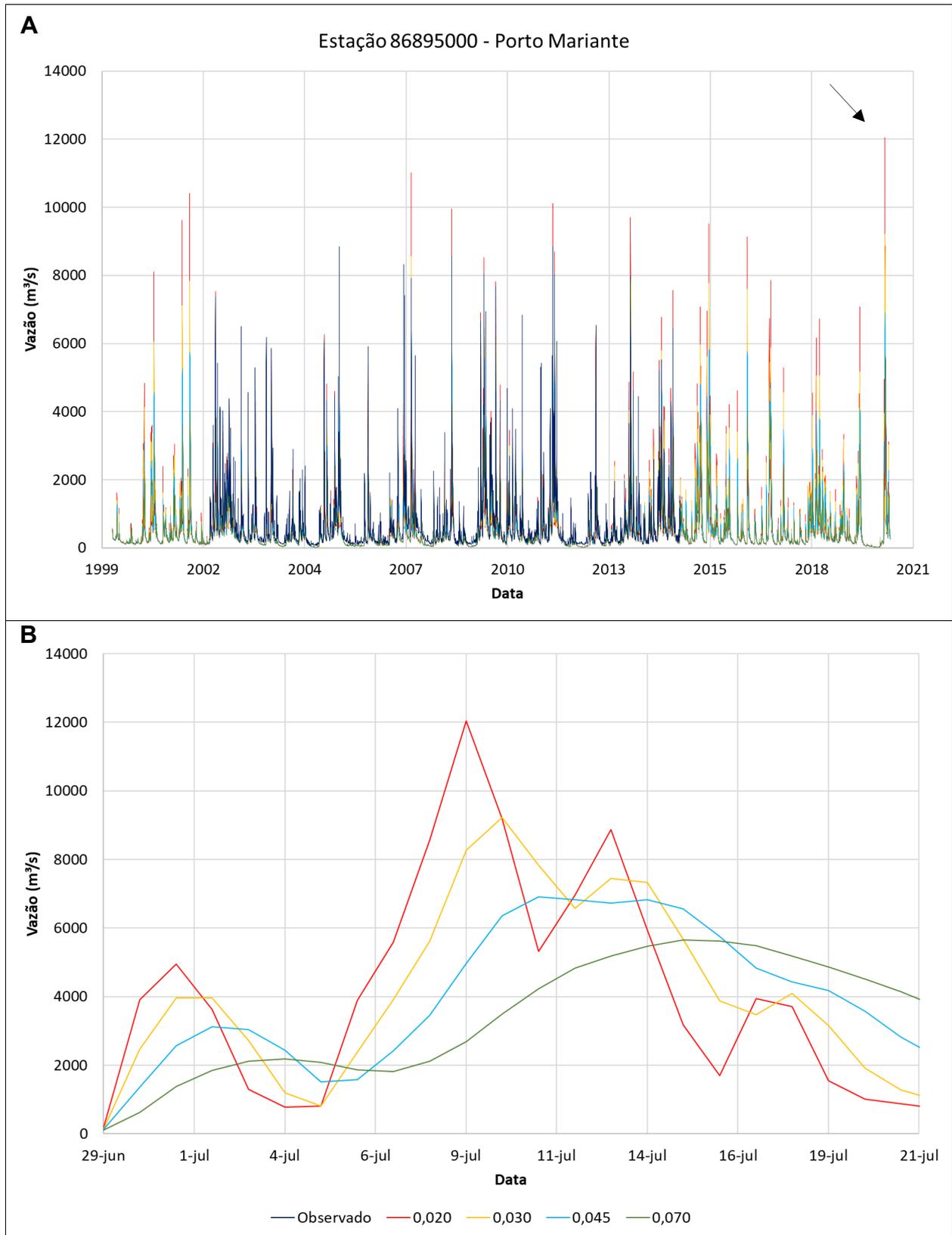


Figura 37. Hidrograma simulado para diferentes valores de Manning na minibacia da estação 86895000 – Porto Mariante. (A) Período simulado, (B) zoom no evento extremo de 2020 - a estação não possui dados observados neste período.

6.4 CALIBRAÇÃO *VERSUS* VALIDAÇÃO

Visando analisar as limitações dos dados não sistemáticos utilizados na calibração frente aos dados sistemáticos utilizados na validação do modelo, foram plotados gráficos com os resultados das métricas de calibração (erro horizontal) *versus* os resultados das métricas de validação (Nash, Nash-Log e ΔV).

A Figura 38 apresenta o gráfico do erro horizontal médio *versus* E_{NS} médio para diferentes valores de Manning testados. Observa-se que o coeficiente de Manning que apresentou menor erro horizontal médio na calibração ($0,045 \text{ s/m}^{1/3}$) não é o que apresentou maior E_{NS} médio na validação ($0,030 \text{ s/m}^{1/3}$). Isto ocorre pelo fato de que o modelo utilizado, ou seja, o MGB-RSH, teve seus parâmetros hidrológicos calibrados originalmente para o coeficiente de Manning de $0,030 \text{ s/m}^{1/3}$, logo, é esperado que este coeficiente apresente o melhor Nash. Contudo, deve ser ressaltado que utilizando o Manning de $0,045 \text{ s/m}^{1/3}$ são obtidos melhores resultados para as manchas de inundação sem degradar muito o valor de Nash, o que indica, portanto, que se os parâmetros hidrológicos fossem reajustados, provavelmente seriam obtidos bons resultados de manchas de inundação e também de Nash utilizando o coeficiente de $0,045$.

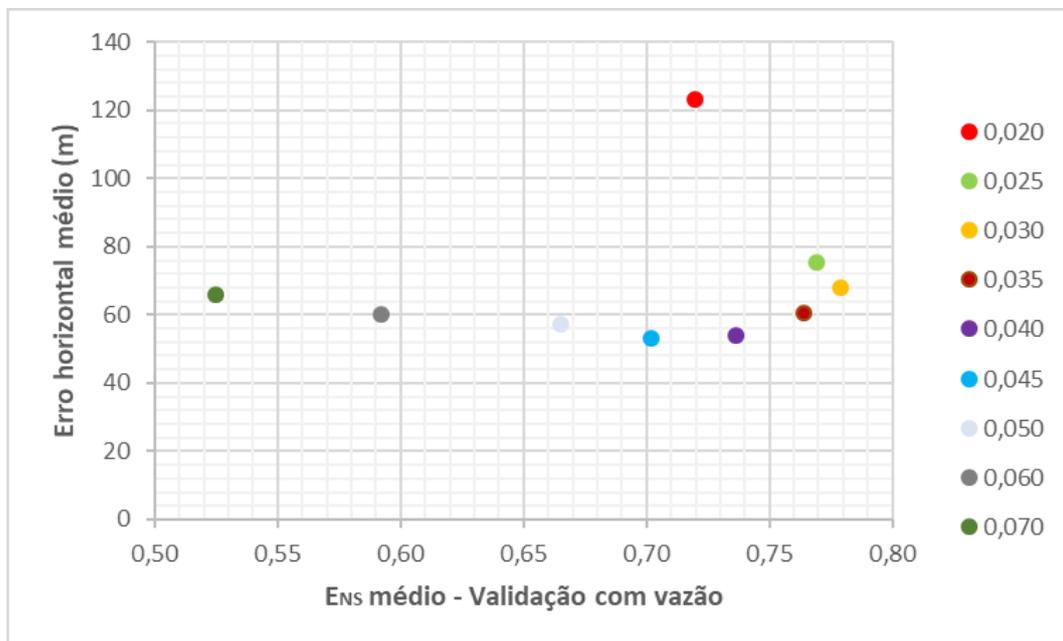


Figura 38. Erro horizontal médio (calibração) *versus* E_{NS} médio (validação) para diferentes valores de Manning.

Por outro lado, conforme apresentado na Figura 39, que mostra o erro horizontal médio *versus* E_{NS-Log} médio para diferentes valores de Manning testados, o coeficiente de Manning $0,045 \text{ s/m}^{1/3}$ além de apresentar o menor erro horizontal médio dentre os testes realizados apresenta também o

melhor E_{NS-Log} médio. Entretanto, novamente ressaltasse que este parâmetro não possui relação com eventos extremos de cheia, que é o foco do presente trabalho.

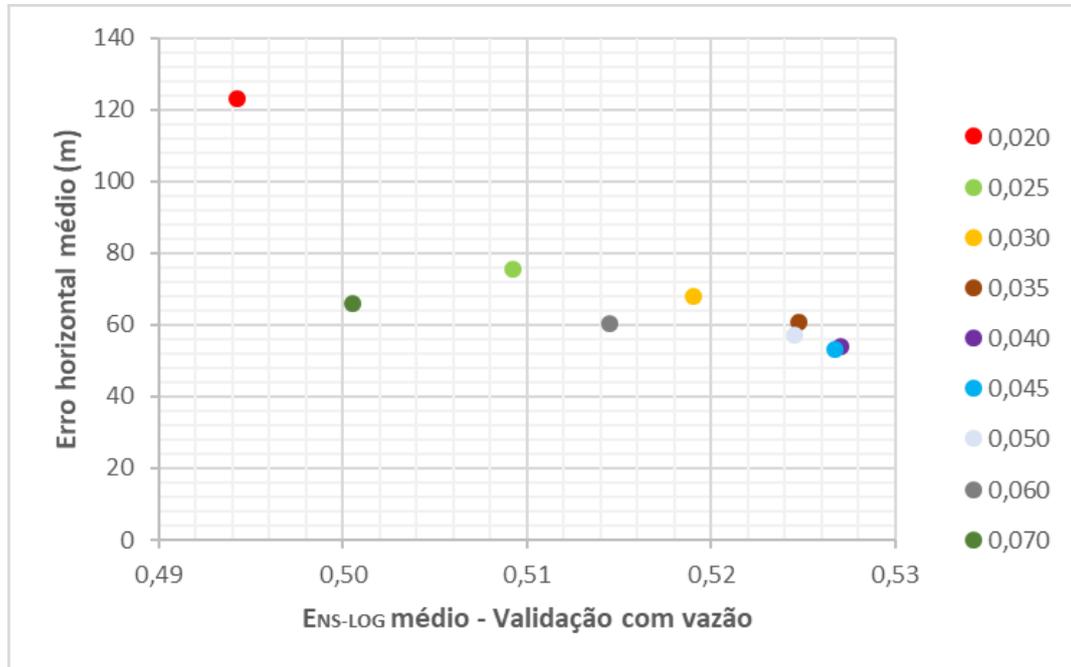


Figura 39. Erro horizontal médio (calibração) *versus* E_{NS-Log} médio (validação) para diferentes valores de Manning.

A Figura 39, por sua vez, apresenta o gráfico do erro horizontal médio *versus* ΔV médio para diferentes valores de Manning testados, mas não é possível identificar uma relação direta entre o menor erro horizontal e o melhor ΔV médio.

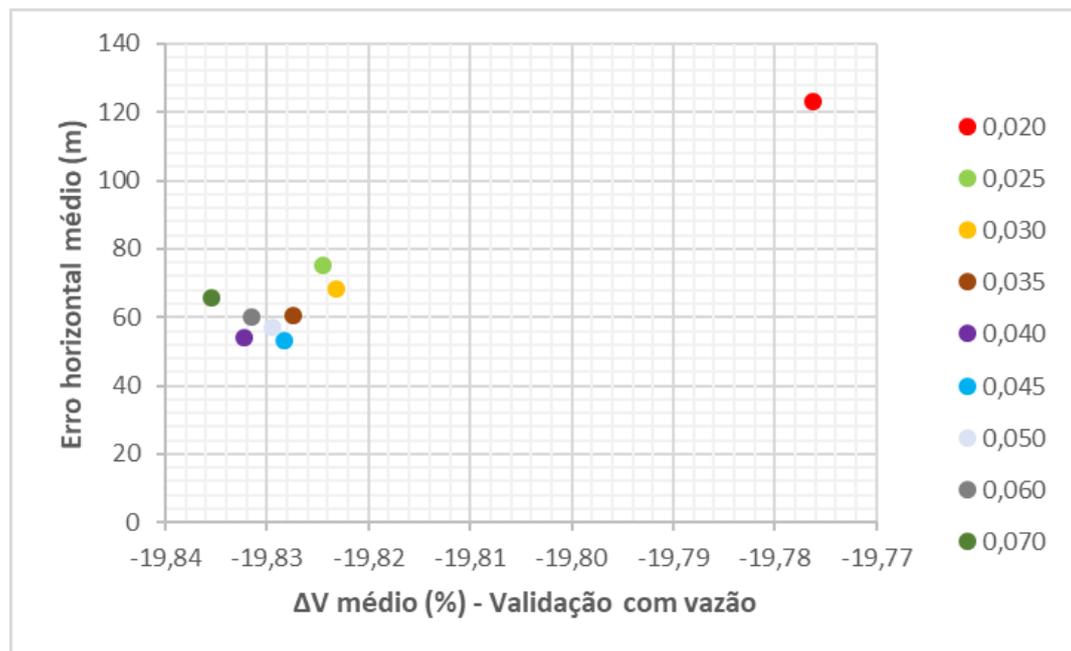


Figura 40. Erro horizontal médio (calibração) *versus* ΔV médio (validação) para diferentes valores de Manning.

6.5 DISCUSSÃO SOBRE AS INCERTEZAS ASSOCIADAS

Podem ser destacadas diversas incertezas relacionadas a este estudo, como a topobatimetria utilizada no MGB e discretização do modelo, calibração por enumeração realizada, bem como incertezas associadas aos dados sistemáticos e aos dados não sistemáticos utilizados na calibração e validação, respectivamente. A seguir são detalhadas estas incertezas.

6.5.1 Topobatimetria e discretização do modelo

Como o MDE do Bare-Earth SRTM (O'LOUGHLIN *et al.*, 2016) que é aplicado no MGB do Rio Grande do Sul Hidrológico possui uma resolução espacial de 90 metros, pode acontecer do mesmo apresentar elevações muito altas principalmente em regiões urbanas, o que interfere na capacidade do modelo em representar as manchas de inundação com precisão. Isto pode ser visualizado em algumas figuras apresentadas no ANEXO C, especialmente na Figura 46, que mostra as manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 09 de julho de 2020, nas cidades de Arroio do Meio e Colinas, onde é possível observar que na área urbana a mancha simulada apresenta elevado erro horizontal em relação aos pontos demarcados. Destaca-se que a acurácia vertical do MDE aplicado também colabora para estas limitações relacionadas à área inundada.

Outra incerteza que pode ser mencionada é em relação à escala de aplicação do modelo. Como trata-se de um modelo em escala regional, as minibacias do MGB-RSH foram discretizadas de maneira que os trechos de rio apresentassem 10 km. Conforme observado no trabalho de Alves *et al.* (2019), esse tamanho de trecho de rio pode influenciar na representação da mancha de inundação em um município ou causar dissipação numérica acentuada da onda de cheia, podendo causar incertezas nas análises em escala local, o que também é válido para o presente estudo.

Erros como esses poderiam ser corrigidos utilizando MDE com melhores resoluções espaciais e principalmente com uma melhor acurácia vertical. Entretanto, ressalta-se que o objetivo do trabalho não é representar com acurácia as manchas de inundação e sim analisar a aplicabilidade de dados não sistemáticos na calibração do modelo MGB. Logo, apesar de melhores resoluções espaciais representarem com maior acurácia as manchas de inundação e possivelmente diminuir os erros horizontais que foram estimados como métrica de calibração do modelo, o objetivo geral do trabalho não é impactado diretamente por estas incertezas.

6.5.2 Coeficiente de rugosidade de Manning

A calibração por enumeração realizada mostrou que a rugosidade do canal possui um papel importante nos erros do modelo. Assim como o modelo apresentou sensibilidade a diferentes coeficientes de Manning, tanto na representação das manchas de inundação como nos hidrogramas simulados, outros parâmetros hidráulicos que não foram avaliados neste trabalho podem ocasionar alterações nos resultados, tais como profundidade e largura do rio (relações geomorfológicas), declividade, dentre outros.

Apesar dos resultados do coeficiente de Nash não ter apresentado grandes variações alterando o coeficiente de rugosidade do modelo, através dos hidrogramas de vazões simulados foi possível observar que a alteração do Manning impacta diretamente o tempo de chegada da onda de cheia, e possivelmente impacta também a amplitude dos níveis simulados. Destaca-se que, na prática, o coeficiente de Manning pode variar bastante ao longo da rede de drenagem e que com informações detalhadas é possível fazer o ajuste destes parâmetros de forma local, fazendo a delimitação de uma zona que é impactada pela sua alteração.

Assim, pode-se inferir que nem sempre a utilização de um valor de Manning fixo para toda a bacia hidrográfica, como foi utilizado neste trabalho e é utilizado no modelo regional MGB-RSH, produz os melhores resultados. Alterando o valor fixo de Manning muitas vezes os resultados da mancha de inundação melhoram substancialmente em uma região da bacia, mas pioram em outra. Desta forma, uma análise utilizando valores de coeficiente de Manning por trecho, com base no uso do solo local e/ou em levantamentos de campo, poderia ajudar a melhorar os resultados obtidos com o modelo.

6.5.3 Dados não sistemáticos utilizados para calibração

Os dados da mancha de inundação provenientes dos vídeos e imagens selecionados, ou seja, de fontes de dados não sistemáticos, e que foram utilizados para a calibração do MGB, possuem algumas limitações associadas. Uma delas é relacionada com o momento em que estes vídeos e/ou imagens foram capturados. Como eles possuem um registro irregular e descontínuo, e muitas vezes a fonte deste dado não informa o horário em que foi obtido, eles podem corresponder ou não ao pico da inundação daquele dia. Assim, caso fosse desejado plicado um modelo com passo de tempo horário, os erros horizontais calculados como métrica de calibração para o modelo deveriam ser analisados levando-se em conta esta ressalva.

Entretanto, como o MGB produz resultados com um passo de tempo diário e não horário, os resultados das manchas de inundação do modelo são correspondentes à uma inundação diária. Logo, apesar da falta de horário de captura ser uma limitação dos dados, isso não influencia no presente estudo.

Ainda em relação aos dados não sistemáticos utilizados, destaca-se que existe também um erro humano associado ao processo de extração das informações. Como o procedimento de demarcação dos pontos no *Google Earth* foi realizado manualmente, podem ocorrer discrepâncias entre o ponto demarcado com o ponto de fato observado nos vídeos e/ou imagens, o que também acarreta incertezas para o estudo, mas visto que o tamanho do pixel do MDE utilizado pelo MGB é de 90 metros, o erro humano associado passa a ser pouco relevante no presente estudo. Contudo, ressaltasse que um processo automatizado de processamento dos vídeos e imagens poderia diminuir as incertezas associadas ao erro humano, mas, por outro lado, demandaria maior capacidade computacional.

6.5.4 Dados sistemáticos utilizados para validação

Tratando-se agora dos dados sistemáticos utilizados para validação do modelo, observou-se a existência de poucas estações fluviométricas com dados na área de interesse do estudo, a região do Vale do Taquari. Ainda, das quatro estações selecionadas para a validação do MGB, duas delas não possuíam dados disponíveis no HIDROWEB para o período do evento extremo avaliado, o que acaba dificultando a validação do modelo para este evento.

Outro aspecto a ser ressaltado é a consistência das curvas-chave das referidas estações fluviométricas, nas quais provavelmente ocorre extrapolação no ramo superior já que é extremamente difícil e perigoso medir vazões em um rio como o Taquari durante uma cheia. Isto é um problema frequente em curvas-chave que acaba limitando a confiabilidade dos dados observados nas estações em eventos de inundação e, conseqüentemente, ocorre um aumento nas incertezas do processo de validação do modelo.

6.6 BANCO DE DADOS PARA ESTUDOS FUTUROS

Como contribuição adicional foi disponibilizado um banco de dados, no repositório Zenodo, com os produtos gerados neste trabalho. Este banco de dados pode ser consultado através do link <https://doi.org/10.5281/zenodo.4730371> (GIORDANI; FAN; ALVES, 2021), e nele constam os seguintes produtos:

- Arquivos em formato *shapefile* (.shp) dos pontos mapeados através de dados não sistemáticos para os dias 08, 09 e 12 de julho de 2020;
- Arquivos em formato raster (.tif) das manchas simuladas pelo MGB com os coeficientes de Manning 0,045 (melhor calibração obtida) e 0,030 (melhor validação obtida), as quais apresentam a extensão e profundidades simuladas, também para os dias 08, 09 e 12 de julho de 2020;

Este banco de dados, de livre acesso à população e pesquisadores, poderá ser útil para diversos estudos hidrológicos a serem realizados na região do Vale do rio Taquari, principalmente estudos relacionados ao evento extremo de julho de 2020. Ainda, poderá auxiliar o poder público da região pois com as manchas geradas podem ser determinadas áreas de risco à população para eventos extremos de inundação, como o evento estudado neste trabalho.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal utilizar dados não sistemáticos para calibrar o modelo hidrológico MGB, tendo como estudo de caso a região do Vale do Taquari, localizada na bacia do rio Taquari-Antas, e a inundação ocorrida em julho de 2020 nesta região. Este objetivo proposto vai ao encontro do fato de que modelos de mapeamento e previsão de inundação carecem de dados sistemáticos para a calibração de condições extremas, o que dificulta que os resultados sejam validados adequadamente.

Em alguns casos de modelagens de eventos extremos máximos os dados não sistemáticos são utilizados no processo de validação do modelo, após o mesmo já ter sido calibrado com dados sistemáticos, servindo somente como complementar ao trabalho. Neste estudo foi aplicada uma metodologia inversa: calibrar o modelo utilizando dados não sistemáticos, tendo o objetivo de mostrar que estes podem contribuir como uma informação adicional aos dados sistemáticos quando se trata do contexto da ciência hidrológica. Além disso, não foram encontrados relatos de estudos que usaram os dados não sistemáticos do tipo testado aqui, ou seja, vídeos e imagens da inundação que foram processados para obter pontos da extensão da mancha, para calibração/validação de modelos em grandes bacias hidrográficas. Somente foram identificados estudos deste tipo em escalas locais.

A partir dos resultados obtidos constatou-se que, apesar de terem sido identificadas algumas incertezas inerentes à metodologia aplicada, a utilização dos dados não sistemáticos conferiu um valor adicional para a preparação do modelo, pois incluiu uma nova dimensão à avaliação, a área inundada obtida com os dados provenientes de ciência cidadã. Também se observou que a calibração do modelo somente com dados não sistemáticos se mostrou eficiente, portanto, pode-se esperar que uma calibração combinando os dados sistemáticos e os não sistemáticos pode ser valiosa em modelagens de eventos extremos como é o caso da inundação estudada.

Conclui-se que este estudo avança no sentido de difundir o uso de dados provenientes da ciência cidadã na área de hidrologia, podendo, inclusive, implementar a utilização destes dados não sistemáticos em aplicações mais rotineiras de modelagem de inundações, complementando os dados sistemáticos para atividades de calibração e validação. Deve ser enfatizado, entretanto, que a metodologia que foi utilizada nem sempre será aplicável a todos os problemas enfrentados por engenheiros visto que é preciso que existam dados não sistemáticos disponíveis na área de

interesse e, sobretudo, que a metodologia seja viável para a escala aplicada, já que a mesma requer um elevado processamento manual dos dados.

Destaca-se que como resultado do trabalho também foi gerado um banco de dados de livre acesso à população e pesquisadores com os resultados que foram obtidos do processamento dos dados não sistemáticos e com as manchas de inundação simuladas pelo MGB.

7.2 RECOMENDAÇÕES

Como estudos futuros a serem desenvolvidos a partir das contribuições trazidas por este trabalho, sugere-se:

- Aplicar um passo de tempo horário ao modelo, permitindo a simulação de eventos de inundação mais rápidos e sua respectiva validação horária com dados não sistemáticos;
- Avaliar a influência nos resultados das manchas de inundação pela utilização de diferentes MDEs, com melhores resoluções espaciais e verticais;
- Testar a calibração também para os parâmetros hidrológicos, não apenas para os parâmetros hidráulicos do modelo, e iniciar o processo de calibração a partir de um modelo com parâmetros “*default*”;
- Testar a calibração do coeficiente de Manning somente de forma local e não em toda bacia;
- Calibrar um modelo considerando um período de calibração que usa de forma combinada dados sistemáticos e não sistemáticos, integrando as informações e avaliando os benefícios proporcionados;
- Validar o modelo não somente com as vazões observadas, mas também com dados de cotas das estações fluviométricas e dados de satélite para verificação da extensão da mancha de inundação;
- Implementar uma forma automatizada de processamento dos dados não sistemáticos, evitando assim erros humanos que podem ser associados ao processo e diminuindo o tempo de processamento destas informações, podendo, desta forma, utilizar este tipo de dado em aplicações mais rotineiras;
- Propor um repositório digital colaborativo, onde a população possa inserir registros relacionados aos eventos de inundação:
 - a) Implementar orientações de como estes registros devem ser obtidos, solicitando informações como, por exemplo, a hora da captura do vídeo ou imagem, o local aproximado, dentre outras;

- b) Este repositório pode ser implementado tanto na bacia do rio Taquari-Antas, quanto em outras bacias no território nacional e internacional, o que pode contribuir significativamente para o estudo de eventos de inundação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFONSO, Leonardo; LOBBRECHT, Arnold; PRICE, Roland. Using Mobile Phones to Validate Models of Extreme Events. *In: 2010, Tianjin, China. 9th International Conference on Hydroinformatics*. Tianjin, China: IIC, 2010. p. 1399–1405.
- ALVES, Maria Eduarda Pereira *et al.* Flood mapping employing local, regional and global scale modeling methods for the Uruguay river. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [S. l.], v. 24, n. 0, p. e22, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2236117062697>. Acesso em: 8 mar. 2021.
- ALVES, Maria Eduarda Pereira; FAN, Fernando Mainardi. Impactos de relações geomorfológicas nas escalas local, regional e nacional na modelagem hidrológica e hidrodinâmica. *In: 2020, Campinas. XIV Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos*. Campinas: ABRH, 2020. p. 1–8.
- ALVES, Maria Eduarda Pereira; FAN, Fernando Mainardi; FLEISCHMANN, Ayan Santos. Simulação de rompimento de barragens em cascata com o Modelo MGB. *In: 2019, Fóz do Iguaçu. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Fóz do Iguaçu: ABRH, 2019. p. 1–10.
- ANA. **HIDROWEB**. [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 1 out. 2020.
- ARGOUD, Fernanda Jóver. **Potencial uso de plataformas online de compartilhamento de vídeos para a obtenção de dados hidrológicos**. 2019. - Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Hídrica), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre, 2019.
- ASSUMPÇÃO, Thaine H. *et al.* Citizen observations contributing to flood modelling: opportunities and challenges. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 22, n. 2, p. 1473–1489, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-22-1473-2018>
- BAKY, Md Abdullah Al; ISLAM, Muktarun; PAUL, Supria. Flood Hazard, Vulnerability and Risk Assessment for Different Land Use Classes Using a Flow Model. **Earth Systems and Environment**, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 225–244, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00141-w>
- BATES, Paul D.; HORRITT, Matthew S.; FEWTRELL, Timothy J. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 387, n. 1–2, p. 33–45, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.027>
- BOITEN, Wubbo. **Hydrometry: IHE Delft Lecture Note Series**. Boca Raton: CRC Press, 2008. *E-book*.
- BOMBASSARO, Magno; ROBAINA, Luis Eduardo de Souza. Contribuição Geográfica para o Estudo das Inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas, RS. **Revista Geografias**, Belo Horizonte, v. 06, n. 2, p. 69–86, 2010. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/geografias/article/view/13297>
- BOTH, Grasiela Cristina *et al.* Uso da modelagem matemática para a previsão de enchentes no Vale do Taquari-RS. *In: 2008, Serra Negra. VI Simpósio de Engenharia Ambiental*. Serra Negra: [s. n.], 2008. p. 1–7.
- BUARQUE, Diogo Costa; ROLIM DA PAZ, Adriano; COLLISCHONN, Walter. Extração automática de parâmetros físicos de bacias hidrográficas a partir do MNT para utilização de modelos hidrológicos. *In: 2008, II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste*. [S. l.: s. n.] p. 1–21.
- BUREK, Peter Andreas; VAN DER KNIJFF, Johan; DE ROO, Arie. **LISFLOOD - Distributed Water Balance and Flood Simulation Model - Revised User Manual**. [S. l.]: Publications Office of the European Union, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.2788/24719>

BUYTAERT, Wouter *et al.* Citizen science in hydrology and water resources: Opportunities for knowledge generation, ecosystem service management, and sustainable development. **Frontiers in Earth Science**, [S. l.], v. 2, n. 26, p. 1–21, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/feart.2014.00026>

CASTRO, Antônio Luiz Coimbra de. **Glossário de Defesa Civil estudos de riscos e medicina de desastres**. 2. ed. Brasília: Ministério do Planejamento e Orçamento. Secretaria Especial de Políticas Regionais. Departamento de Defesa Civil, 1998.

CEPED; UFSC. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012. Volume Brasil**. Florianópolis: 2. ed, 2013.

CHOW, Ven T.; MAIDMENT, David R.; MAYS, Larry W. **Applied hydrology**. Singapore: McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, 1988.

COBRADE. **Classificação e Codificação Brasileira de Desastres**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: http://www.defesacivil.pr.gov.br/sites/defesa-civil/arquivos_restritos/files/documento/2018-12/Cobrade_comsimbologia.pdf. Acesso em: 2 out. 2020.

COLINAS ONLINE. **COLINAS ONLINE - Enchente Rio Taquari - Colinas, RS - 08/07/2020**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=O22gM9kys6A>. Acesso em: 23 set. 2020.

COLLISCHONN, Walter. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. 2001. - Tese (Doutorado), Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre, 2001.

COLLISCHONN, Walter *et al.* The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, [S. l.], v. 52, n. 5, p. 878–895, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>

COLLISCHONN, Walter *et al.* **Manual de Referência Teórica do MGB**. [S. l.]: HGE, IPH, UFRGS, 2020 a.

COLLISCHONN, Walter *et al.* Análise da antecedência mínima necessária para previsões de inundações em Lajeado no rio Taquari (RS). In: 2020b, **II Encontro Nacional de Desastres**. : ABRH, 2020. p. 1–4.

COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos E. M. Simulação Hidrológica de grandes Bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 6, n. 1, p. 95–118, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v6n1.p95-118>

CPRM. **Manchas de inundação**. [S. l.], [S. d.]. Disponível em: https://www.cprm.gov.br/sace/index_manchas_inundacao.php. Acesso em: 12 out. 2020.

CRED. **Natural Disasters 2019**. Brussels: CRED, 2019. Disponível em: https://emdat.be/sites/default/files/adsr_2019.pdf

DEFESA CIVIL. **S2ID - Sistema Integrado de Informações sobre Desastres**. [S. l.], [S. d.]. Disponível em: <https://s2id.mi.gov.br/>. Acesso em: 5 out. 2020.

DELTARES. **Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Hydro-Morphodynamics**. Netherlands: Deltares Systems, 2020.

DI BALDASSARRE, Giuliano *et al.* Sociohydrology: Scientific Challenges in Addressing the Sustainable Development Goals. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 55, n. 8, p. 6327–6355, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2018WR023901>. Acesso em: 23 maio. 2021.

DRH/SEMA. **Plano de Bacia Taquari-Antas: Relatório Síntese etapa A.** Rio Grande do Sul: [s. n.], 2012.

ECKHARDT, Rafael Rodrigo. **Geração de modelo cartográfico aplicado ao mapeamento das áreas sujeitas às inundações urbanas na cidade de Lajeado / RS.** 2008. - Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), CEPSSRM, UFRGS, Porto Alegre, 2008.

ECKHARDT, Rafael Rodrigo *et al.* Previsão e Mapeamento da Área Urbana Inundável na Cidade de Lajeado - RS – Brasil. *In:* 2009, Buenos Aires. **VI International Conference on Engineering and Computer Education.** Buenos Aires: ICECE, 2009. p. 801–805.

ECKHARDT, Rafael Rodrigo *et al.* Impactos econômicos das inundações no Vale do Taquari. *In:* 2013, Bento Gonçalves. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.** Bento Gonçalves: ABRH, 2013. p. 1–8.

FAN, Fernando Mainardi *et al.* Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 19, n. 4, p. 137–147, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n4.p137-147>

FAN, Fernando Mainardi *et al.* Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. *In:* 2015, Brasília, DF. **XXI Brazilian Simposium of Water Reserouces.** Brasília, DF: ABRH, 2015. p. 1–8.

FAN, Fernando Mainardi; COLLISCHONN, Walter. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 243–254, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p243-254>

FARR, Tom G. *et al.* The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, [S. l.], v. 45, n. 2, p. RG2004, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>. Acesso em: 8 mar. 2021.

FENG, Quanlong; LIU, Jiantao; GONG, Jianhua. Urban flood mapping based on unmanned aerial vehicle remote sensing and random forest classifier-A case of yuyao, China. **Water**, [S. l.], v. 7, n. 4, p. 1437–1455, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w7041437>

FERRI, Genuíno Antônio. **A história da bacia hidrográfica Taquari-Antas.** Lajeado: [s. n.], 2012. *E-book.* Disponível em: <https://docs.google.com/file/d/0B3KR4bhqGGVkbVQ2REFRR2hkZGc/edit>. Acesso em: 21 jul. 2020.

FERRI, Michele *et al.* The Value of Citizen Science for Flood Risk Reduction: Cost-benefit Analysis of a Citizen Observatory in the Brenta-Bacchiglione Catchment. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, [S. l.], p. 1–27, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-2019-627>

FINCK, Juliano Santos. **Previsão em tempo atual de níveis fluviais com redes neurais artificiais : aplicação à bacia do Rio Taquari-Antas/RS.** 2020. - Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre, 2020.

FLEISCHMANN, Ayan *et al.* Modelling hydrologic and hydrodynamic processes in basins with large semi-arid wetlands. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 561, p. 943–959, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.041>

FOHRINGER, J. *et al.* Social media as an information source for rapid flood inundation mapping. **Hazards Earth Syst. Sci.**, [S. l.], v. 15, p. 2725–2738, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2725-2015>. Acesso em: 18 jul. 2020.

GARRAFIEL, Gabrielle Fernandes. **Mapeamento de inundações urbanas a partir de imagens de radar de abertura sintética do programa Sentinel-1**. 2018. - Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre, 2018.

GIACOMELLI, Lucas *et al.* Previsão de cheias e produção de avisos no estado do Rio Grande do Sul através da sala de situação SEMA/RS e modelo MGB. *In:* 2019, Foz do Iguaçu. **XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Foz do Iguaçu: ABRH, 2019. p. 1–10.

GIORDANI, Bruna Baggio; FAN, Fernando Mainardi; ALVES, Maria Eduarda Pereira. July 2020's flood database in the Taquari-Antas river basin / Banco de dados da inundação de julho de 2020 na bacia do rio Taquari-Antas. *[S. l.]*, v. 1, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4730371>. Acesso em: 1 maio. 2021.

GOERL, Roberto Fabris; MICHEL, Gean Paulo; KOBAYAMA, Masato. Mapeamento de áreas susceptíveis a inundação com o modelo HAND e análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais. **Revista Brasileira de Cartografia**, *[S. l.]*, v. 69, p. 61–69, 2017.

GSMA. **The Mobile Economy 2020**. London : *[s. n.]*, 2020. Disponível em: https://www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2020/03/GSMA_MobileEconomy2020_Global.pdf. Acesso em: 17 jan. 2021.

HAKLAY, Muki. Citizen science and volunteered geographic information: Overview and typology of participation. *In:* **Crowdsourcing Geographic Knowledge: Volunteered Geographic Information (VGI) in Theory and Practice**. *[S. l.]*: Springer Netherlands, 2013. v. 9789400745872p. 105–122. *E-book*. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-94-007-4587-2_7. Acesso em: 26 maio. 2021.

HGE. **O que é o MGB?**. *[s. l.]*, *[s. d.]*. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/mgb/o-que-e/>. Acesso em: 24 set. 2020.

HIRATA, E. *et al.* Flooding and inundation collaborative mapping – use of the Crowdmap/Ushahidi platform in the city of Sao Paulo, Brazil. **Journal of Flood Risk Management**, *[S. l.]*, v. 11, n. July 2018, p. 98–109, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jfr3.12181>

HORITA, Flávio E. A. *et al.* Development of a spatial decision support system for flood risk management in Brazil that combines volunteered geographic information with wireless sensor networks. **Computers and Geosciences**, *[S. l.]*, v. 80, p. 84–94, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.04.001>

JAFARZADEGAN, Keighobad; MERWADE, Venkatesh. A DEM-based approach for large-scale floodplain mapping in ungauged watersheds. **Journal of Hydrology**, *[S. l.]*, v. 550, p. 650–662, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.053>

JC2 VÍDEO PRODUTORA. **A enchente mas devastadora da história do município de Muçum e do Vale do Taquari - RS**. *[s. l.]*, 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=1j1wX-BPk4I>. Acesso em: 22 set. 2020.

JENSEN, John R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. 2. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

KIDD, Chris *et al.* So, how much of the Earth's surface is covered by rain gauges? **Bulletin of the American Meteorological Society**, *[S. l.]*, v. 98, n. 1, p. 69–78, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00283.1>. Acesso em: 21 mar. 2021.

KOBAYAMA, Masato *et al.* **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006.

KOMI, Kossi *et al.* Modelling of flood hazard extent in data sparse areas: a case study of the Oti River basin, West Africa. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, [S. l.], v. 10, p. 122–132, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.03.001>

KORNOWSKI, Luísa Weizenmann; FAN, Fernando Mainardi. Calibração e verificação do modelo hidrológico MGB-IPH para a bacia do rio Taquari-Antas. *In:* 2019, Foz do Iguaçu. **XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Foz do Iguaçu: [s. n.], 2019. p. 10.

KUMBIER, Kristian *et al.* Investigating compound flooding in an estuary using hydrodynamic modelling: a case study from the Shoalhaven River, Australia. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 18, p. 463–477, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-463-2018>

KUREK, Roberta Karinne Mocva. **Avaliação do tempo de retorno dos níveis das inundações no Vale do Taquari/RS**. 2012. - Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental), UNIVATES, Lajeado, 2012.

KUREK, Roberta Karinne Mocva. **Análise das inundações no Vale do Taquari/RS como subsídio à elaboração de um modelo de previsão**. 2016. - Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Centro de Tecnologia, UFSM, Santa Maria, 2016.

LANFRANCHI, Vitaveska *et al.* Citizens' Observatories for Situation Awareness in Flooding. *In:* 2014, Pennsylvania, USA. **11th International ISCRAM Conference**. Pennsylvania, USA: University Park, 2014. p. 145–154. Disponível em: http://edina.ac.uk/projects/COBWEB_summary.html

LE COZ, Jérôme *et al.* Crowdsourced data for flood hydrology: feedback from recent citizen science projects in Argentina, France and New Zealand. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 541, p. 766–777, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.036i>

MAGALHÃES, Ivo Augusto Lopes *et al.* Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas de risco de inundação em Guaçuí, ES: uma análise comparativa entre dois métodos. **Cadernos de Geociências**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 63–70, 2011.

MARINHO, Rogério Ribeiro *et al.* Aplicação de imagens SAR orbitais em desastres naturais: mapeamento das inundações de 2008 no Vale do Itajaí, SC. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 64, n. 3, p. 317–330, 2012.

MAZZOLENI, Maurizio *et al.* Can assimilation of crowdsourced data in hydrological modelling improve flood prediction? **Hydroly and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 21, p. 839–861, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-21-839-2017>

MOMO, Marcos Rodrigo *et al.* Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 21, n. 1, p. 200–208, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p200-208>

MORAES, Sofia Royer. **Mapeamento das áreas e edificações atingidas pelas inundações do rio Taquari na área urbana do município de Lajeado/RS**. 2015. - Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental), UNIVATES, Lajeado, 2015.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

NETO, Alfredo Ribeiro *et al.* Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 20, n. 2, p. 394–403, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n2.p394-403>

- NJUE, N. *et al.* Citizen science in hydrological monitoring and ecosystem services management: State of the art and future prospects. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 693, p. 1–13, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.337>
- NOBRE, A. D. *et al.* Height Above the Nearest Drainage - a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 404, n. 1–2, p. 13–29, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051>
- O’LOUGHLIN, F. E. *et al.* A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 182, p. 49–59, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.018>
- OLIVEIRA, Gabriel Araujo *et al.* Qualidade do Posicionamento em Aplicativos VGI Obtido por Sensores de Localização em Smartphones. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 71, n. 3, p. 806–831, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/rbcv71n3-49478>. Acesso em: 17 jan. 2021.
- PAIVA, Rodrigo C. D.; COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos E. M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 406, n. 3–4, p. 170–181, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.007>
- PAIXÃO, Maurício Andrades *et al.* Lições sobre o gerenciamento de desastres hidrológicos obtidas a partir da ocorrência em Rolante/RS. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 7, p. 251–267, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v7e02018251-267>
- PAZ, Adriano Rolim *et al.* Discretização de modelos hidrológicos de grande escala: grade regular x minibacias. In: 2011, Maceió. **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Maceió: [s. n.], 2011.
- PEDROLLO, Olavo Correa. Previsão de curto prazo de níveis com redes neurais artificiais para a cidade de Estrela (RS): resultados preliminares. In: (ABRH, Org.) 2017, Florianópolis. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Florianópolis: [s. n.], 2017. p. 1–8. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/173852>. Acesso em: 23 jan. 2021.
- PEKEL, Jean- François *et al.* High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. **Nature**, [S. l.], v. 540, p. 418–422, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- PONTES, Paulo Rógenes Monteiro *et al.* Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões / Hydrologic and hydraulic large-scale modeling with inertial flow routing. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 20, n. 4, p. 888–904, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n4.p888-904>
- PONTES, Paulo Rógenes Monteiro *et al.* MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling and Software**, [S. l.], v. 94, p. 1–20, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.029>
- PREFEITURA DE BOM RETIRO DO SUL. **Enchente julho de 2020**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.facebook.com/municipiodebomretirodosul/videos/enchente-julho-de-2020/199023448203413/>. Acesso em: 20 jan. 2021.
- PREFEITURA DE ENCANTADO. **Prefeitura de Encantado - Fotos | Facebook**. [s. l.], 2020. Disponível em: https://pt-br.facebook.com/pg/prefeituraencantado/photos/?ref=page_internal. Acesso em: 19 jan. 2021.
- PREFEITURA DE ESTRELA; SEHN, Frederico. **Enchente 2020**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.facebook.com/media/set/?vanity=PrefeituradeEstrela&set=a.3133441476736868>. Acesso em: 20 jan. 2021.

PREFEITURA DE LAJEADO. **Enchente Rio Taquari - Lajeado**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.facebook.com/PrefLajeado/videos/1217638665245766>. Acesso em: 22 set. 2020.

REIS, P. A.; SCHMIDT, M. A. R. HEC-RAS and GRASS Evaluation Models in Identifying Areas Vulnerable to Flooding in Urban Areas. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, [S. l.], v. 40, n. 1, p. 115–126, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.11137/2017_1_115_126

RIBEIRO, Ayane Aparecida da Silva *et al.* Floodplain reconstitution based on data collected via smartphones: a methodological approach to hydrological risk mapping. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 25, n. 41, p. 1–13, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190179>

ROLLASON, E. *et al.* The importance of volunteered geographic information for the validation of flood inundation models. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 562, p. 267–280, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.002>

SEE, Linda. A Review of Citizen Science and Crowdsourcing in Applications of Pluvial Flooding. **Frontiers in Earth Science**, [S. l.], v. 7, p. 44, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00044>. Acesso em: 23 maio. 2021.

SEIBERT, Jan *et al.* Virtual staff gauges for crowd-based stream level observations. **Frontiers in Earth Science**, [S. l.], v. 7, n. 70, p. 1–10, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00070>

SEMA. **Boletim Especial: Cheias e Inundações - Julho de 2020**. Porto Alegre: [s. n.], 2020.

SILVEIRA, Greice Vieira; GUASSELLI, Laurindo Antonio. Mapeamento das inundações a partir de NDWI no município de Itaqui, Rio Uruguai – Rs. **Revista Geociências**, São Paulo, v. 38, n. 2, p. 521–534, 2019.

SIQUEIRA, Vinicius A. *et al.* Toward continental hydrologic-hydrodynamic modeling in South America. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 22, n. 9, p. 4815–4842, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>

SIQUEIRA, Vinicius Alencar *et al.* Desenvolvimento de um sistema operacional de previsão de cheias na bacia do Taquari-Antas/RS. In: 2015, Brasília, DF. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Brasília, DF: ABRH, 2015. p. 1–8.

SIQUEIRA, Vinicius Alencar *et al.* IPH-Hydro Tools: Uma ferramenta open source para determinação de informações topológicas em bacias hidrográficas integrada a um ambiente SIG. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 21, n. 1, p. 274–287, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p274-287>

SIVAPALAN, M. *et al.* IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. **Hydrological Sciences Journal**, [S. l.], v. 48, n. 6, p. 857–880, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1623/hysj.48.6.857.51421>. Acesso em: 12 out. 2020.

SPECKHANN, Gustavo Andrei *et al.* Flood hazard mapping in Southern Brazil: a combination of flow frequency analysis and the HAND model. **Hydrological Sciences Journal**, [S. l.], v. 63, n. 1, p. 87–100, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1409896>

STARKEY, Eleanor *et al.* Demonstrating the value of community-based (‘citizen science’) observations for catchment modelling and characterisation. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 548, p. 801–817, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.019>

- SY, Bocar *et al.* **What role for citizen science in flood hazard mapping?**. [S. l.]: ResearchGate, 2017.
- TAX IMAGENS AÉREAS. **Cheia do Rio Taquari em Arroio do Meio - 08 07 2020**. [S. l.], 2020. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=C_weZy1mkOw. Acesso em: 22 set. 2020.
- TENG, J. *et al.* Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling and Software**, [S. l.], ano 90, 1 abr. 2017, p. 201–216. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>
- TOMINAGA, Keiko Lídia; SANTORO, Jair; AMARAL, Rosangela do. **Desastres Naturais: Conhecer para prevenir**. 1. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.
- TSCHIEDEL, Arthur da Fontoura *et al.* O uso de métodos não convencionais para delimitação de manchas de inundação oriundas de desastres. In: 2018, Porto Alegre. **I Encontro Nacional de Desastres**. Porto Alegre: ABRH, 2018. p. 1–8.
- TUCCI, Carlos E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS, 1998.
- TUCCI, Carlos E. M. Controle de Enchentes. In: TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS; ABRH, 2001. p. 943. *E-book*.
- TUCCI, Carlos E. M. Inundações e Drenagem Urbana. In: TUCCI, Carlos E. M.; BERTONI, Juan Carlos (org.). **Inundações urbanas na América do Sul**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2003 a. p. 150. *E-book*.
- TUCCI, Carlos E. M. Águas Urbanas. In: TUCCI, Carlos E. M.; BERTONI, Juan Carlos (org.). **Inundações urbanas na América do Sul**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2003 b. p. 150. *E-book*.
- TUCCI, Carlos E. M. Gestão de Águas Pluviais Urbanas. **Ministério das Cidades – Global Water Partnership - World Bank – Unesco**, [S. l.], p. 270, 2005.
- USACE. **HEC-HMS - Hydrologic Modeling System. Technical Reference Manual**. Davis, CA: US Army Corps of Engineers, 2010.
- USACE. **HEC-RAS – River Analysis System. User’s Manual**. Davis, CA: US Army Corps of Engineers, 2016.
- VANELLI, Franciele Maria *et al.* Constantes Initialization Condition for Flood Mapping With. In: 2017, Florianópolis. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Florianópolis: ABRH, 2017. p. 1–8.
- VANELLI, Franciele Maria *et al.* The 1974 Tubarão River flood, Brazil: reconstruction of the catastrophic flood. **Journal of Applied Water Engineering and Research**, [S. l.], p. 1–15, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23249676.2020.1787251>. Acesso em: 17 mar. 2021.
- VANELLI, Franciele Maria; FAN, Fernando Mainardi; KOBAYAMA, Masato. Panorama geral sobre dados hidrológicos com ênfase em eventos hidrológicos extremos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 1–24, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/reg.a.v17e24>
- VOE TRIKE COM LEONARDO FELDMANN. **Enchente rio taquari Encantado RS 8/07/2020**. [S. l.], 2020a. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=v02JNjDdRk4&t=51s>. Acesso em: 22 set. 2020.
- VOE TRIKE COM LEONARDO FELDMANN. **Enchente Rio taquari Encantado 12/07/20 15:25 da tarde**. [S. l.], 2020b. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ZVbiDmjes2g>. Acesso em: 22 set. 2020.

VOE TRIKE COM LEONARDO FELDMANN. **Enchente rio taquari Roca Sales 8/07/20**. [s. l.], 2020c. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=43hXHJ66ZrI&feature=youtu.be>. Acesso em: 22 set. 2020.

VOE TRIKE COM LEONARDO FELDMANN. **Enchente rio taquari Roca Sales 8/07/20**. [s. l.], 2020d. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=979-c9so6V4>. Acesso em: 22 set. 2020.

VOE TRIKE COM LEONARDO FELDMANN. **Enchente rio taquari Roca Sales 8/07/20**. [s. l.], 2020e. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=pUHhHQ07vIU>. Acesso em: 22 set. 2020.

VOE TRIKE COM LEONARDO FELDMANN. **Enchente taquari Roca Sales**. [s. l.], 2020f. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=-70ejQsX8Uo>. Acesso em: 4 mar. 2021.

VOE TRIKE COM LEONARDO FELDMANN. **Enchente Rio taquari Roca Sales dia 12/07/20 as 15:30**. [s. l.], 2020g. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=UbzS6FjLXbE>. Acesso em: 22 set. 2020.

WHITE, G. F. **Human Adjustments to Floods**. Chicago: Department of Geography, University of Chicago, 1945.

YOUTUBE. **YouTube for Press**. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/intl/en-GB/about/press/>. Acesso em: 21 jan. 2021.

ZANANDREA, Franciele *et al.* Delimitação da área potencialmente afetada pela cheia histórica de 1974 em Tubarão, SC. *In*: 2018, Porto Alegre. **I Encontro Nacional de Desastres**. Porto Alegre: ABRH, 2018. p. 1–8.

ZHEN GANG, Ji. **Hydrodynamics and water quality : modeling rives, lakes, and estuaries**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2008.

ANEXOS

ANEXO A. DESCRIÇÃO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS

Quadro 8. Estações pluviométricas selecionadas para calibração e validação do MGB.

Código	Nome da estação	Latitude	Longitude	Operador	Disponibilidade ¹	Uso no estudo
2751017	CLEMENTE ARGOLO	-28,005	-51,453	CPRM	95,57%	Calibração e validação
2849004	TAQUARUÇU	-28,958	-49,601	EPAGRI	53,95%	Validação
2849005	MELEIRO	-28,832	-49,637	EPAGRI	93,90%	Calibração e validação
2849006	FORQUILHINHA	-28,751	-49,473	EPAGRI	69,10%	Validação
2849009	BOM JARDIM DA SERRA	-28,333	-49,617	CPRM	97,29%	Calibração e validação
2849019	TIMBÉ DO SUL	-28,835	-49,838	EPAGRI	99,00%	Calibração e validação
2849023	DESPRAIADO	-28,368	-49,804	CPRM	97,10%	Calibração e validação
2849024	FOZ DO MANUEL ALVES	-28,854	-49,590	EPAGRI	98,33%	Calibração e validação
2849029	SERRINHA	-28,612	-49,551	EPAGRI	97,48%	Calibração e validação
2849035	SILVEIRA	-28,617	-49,933	CPRM	81,67%	Calibração e validação
2850002	CAPELA SÃO JOSÉ DOS AUSENTES	-28,733	-50,067	CEEE	84,29%	Calibração e validação
2850004	COXILHA RICA	-28,152	-50,441	CPRM	96,76%	Calibração e validação
2850006	INVERNADA VELHA	-28,449	-50,296	CPRM	95,67%	Calibração e validação
2850008	PASSO SOCORRO	-28,211	-50,759	ANA	28,95%	Validação
2850009	PASSO TAINHAS	-28,867	-50,454	CPRM	97,62%	Calibração e validação
2850016	CAZUZA FERREIRA	-28,933	-50,650	CPRM	81,86%	Calibração e validação
2850020	MONTE ALEGRE DOS CAMPOS	-28,683	-50,767	CPRM	81,43%	Calibração e validação
2850024	PASSO DO HONORATO	-28,394	-50,576	BAESA	31,10%	Validação
2851003	ANTÔNIO PRADO	-28,853	-51,284	CPRM	98,00%	Calibração e validação
2851005	CASCA I	-28,550	-51,967	CEEE	63,48%	Validação
2851010	FAZENDA ROSEIRA	-28,667	-51,133	CEEE	83,71%	Calibração e validação
2851020	PASSO DAS PEDRAS	-28,250	-51,850	CEEE	84,48%	Calibração e validação
2851021	PASSO DO PRATA	-28,868	-51,446	CPRM	97,48%	Calibração e validação

Código	Nome da estação	Latitude	Longitude	Operador	Disponibilidade¹	Uso no estudo
2851022	PASSO MIGLIAVACA	-28,620	-51,866	CPRM	97,24%	Calibração e validação
2851024	PRATA	-28,769	-51,620	CPRM	96,86%	Calibração e validação
2851028	TRINTA E CINCO	-28,383	-51,833	CEEE	84,10%	Calibração e validação
2851043	ESMERALDA	-28,059	-51,189	CPRM	97,43%	Calibração e validação
2851044	GUAPORÉ	-28,845	-51,878	CPRM	92,14%	Calibração e validação
2851050	CAPÃO DO CEDRO	-28,100	-51,550	CPRM	79,86%	Calibração e validação
2851051	MUITOS CAPÕES	-28,300	-51,183	CPRM	81,24%	Calibração e validação
2851052	NOSSA SENHORA DE FÁTIMA	-28,400	-51,483	CPRM	81,95%	Calibração e validação
2852004	AULER	-28,800	-52,367	CEEE	84,95%	Calibração e validação
2852006	CARAZINHO	-28,294	-52,788	CPRM	98,00%	Calibração e validação
2852007	COLÔNIA XADREZ	-28,188	-52,745	CPRM	95,67%	Calibração e validação
2852009	DEPOSITO	-28,933	-52,800	CEEE	84,86%	Calibração e validação
2852014	ILÓPOLIS	-28,917	-52,117	CEEE	84,90%	Calibração e validação
2852016	MARAU	-28,450	-52,200	CEEE	63,48%	Validação
2852024	PULADOR	-28,283	-52,567	CEEE	84,57%	Calibração e validação
2852031	VILA TRÊS PASSOS	-28,467	-52,367	CEEE	84,00%	Calibração e validação
2852046	TAPEJARA	-28,057	-51,996	CPRM	97,38%	Calibração e validação
2852050	NÃO-ME-TOQUE	-28,455	-52,816	CPRM	97,62%	Calibração e validação
2852052	CAMPO DO MEIO	-28,317	-52,050	CPRM	82,29%	Calibração e validação
2852053	SOLEDADE	-28,813	-52,511	CPRM	73,71%	Calibração e validação
2852054	SELBACH	-28,632	-52,936	CPRM	73,48%	Calibração e validação
2949001	PRAIA GRANDE	-29,196	-49,963	EPAGRI	99,76%	Calibração e validação
2949003	SOMBRIO	-29,117	-49,639	EPAGRI	97,00%	Calibração e validação
2950008	CAMISAS	-29,100	-50,167	CEEE	84,14%	Calibração e validação
2950016	GLORINHA	-29,883	-50,788	CPRM	96,38%	Calibração e validação
2950019	LAJEADO GRANDE	-29,083	-50,617	CEEE	84,95%	Calibração e validação
2950028	ROLANTE	-29,667	-50,567	CEEE	74,90%	Validação
2950031	SANTO ANTÔNIO	-29,817	-50,517	CEEE	63,48%	Validação
2950033	SECA	-29,067	-50,967	CEEE	84,95%	Calibração e validação

Código	Nome da estação	Latitude	Longitude	Operador	Disponibilidade¹	Uso no estudo
2950034	SERRA DO PINTO	-29,367	-50,183	CEEE	84,81%	Calibração e validação
2950038	TERRA DE AREIA	-29,572	-50,056	CPRM	92,81%	Validação
2950056	MÃE DOS HOMENS	-29,248	-50,069	EPAGRI	89,81%	Calibração e validação
2950059	AGROPECUÁRIA ANJU	-29,817	-50,743	CPRM	91,29%	Calibração e validação
2950060	SANTO ANTÔNIO DA PATRULHA	-29,818	-50,513	CPRM	89,81%	Calibração e validação
2950061	MORUNGAVA	-29,851	-50,910	ANA	39,67%	Validação
2950062	FAZENDA NOSSA SENHORA CONCEIÇÃO	-29,901	-50,626	CPRM	93,29%	Calibração e validação
2950063	VILA TAINHAS	-29,250	-50,300	CPRM	91,71%	Validação
2951010	ENCANTADO	-29,234	-51,854	CPRM	90,57%	Validação
2951017	JANSEN	-29,133	-51,367	CEEE	84,52%	Calibração e validação
2951022	NOVA PALMIRA	-29,335	-51,189	CPRM	95,86%	Calibração e validação
2951024	PORTO GARIBALDI	-29,817	-51,378	CPRM	95,71%	Calibração e validação
2951027	SÃO VENDELINO	-29,366	-51,371	CPRM	94,81%	Calibração e validação
2951028	SAPUCAIA DO SUL	-29,821	-51,495	CPRM	93,57%	Calibração e validação
2951067	CHARQUEADAS	-29,951	-51,628	CPRM	92,10%	Calibração e validação
2951070	MUÇUM	-29,166	-51,868	CPRM	96,29%	Calibração e validação
2952001	BARROS CASSAL	-29,085	-52,584	CPRM	94,95%	Calibração e validação
2952003	BOTUCARAI	-29,722	-52,894	CPRM	94,67%	Calibração e validação
2952034	CANDELÁRIA	-29,673	-52,769	CPRM	95,90%	Calibração e validação
2952035	HERVEIRAS	-29,454	-52,631	CPRM	73,81%	Calibração e validação
2952036	BOQUEIRÃO DO LEÃO	-29,313	-52,429	CPRM	72,48%	Calibração e validação
2952037	DEODORO	-29,471	-52,249	CPRM	70,29%	Calibração e validação
2952038	SÃO JOSÉ DO HERVAL	-29,041	-52,285	CPRM	72,14%	Calibração e validação

¹ Disponibilidade considerando o período de validação do modelo (2000 a 2020)

(Fonte: adaptado de ANA, [s. d.])

ANEXO B. PRECIPITAÇÃO ACUMULADA NAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS

Quadro 9. Precipitação observada acumulada nas estações pluviométricas utilizadas na calibração do MGB.

Código	Nome	Chuva observada acumulada (mm)		
		27/06 a 03/07	04/07 a 10/07	11/07 a 17/07
2751017	CLEMENTE ARGOLO	46,1	151,1	72,9
2849005	MELEIRO	48,5	190,5	63
2849009	BOM JARDIM DA SERRA	50,2	84,1	74
2849019	TIMBÉ DO SUL	51	203	91
2849023	DESPRAIADO	50,1	112,8	105,7
2849024	FOZ DO MANUEL ALVES	40	152	70
2849029	SERRINHA	47,7	120,5	50,5
2849035	SILVEIRA	65,9	208,5	86
2850002	CAPELA SÃO JOSÉ DOS AUSENTES	111,4	271,3	-
2850004	COXILHA RICA	53,7	97,9	61,2
2850006	INVERNADA VELHA	52,5	165,6	124
2850009	PASSO TAINHAS	86	209,6	148,4
2850016	CAZUZA FERREIRA	136,6	264,8	145,3
2850020	MONTE ALEGRE DOS CAMPOS	98,9	265,5	111,6
2851003	ANTÔNIO PRADO	136,8	215	206,1
2851010	FAZENDA ROSEIRA	111,6	280	115,6
2851020	PASSO DAS PEDRAS	101,6	223	128,4
2851021	PASSO DO PRATA	124,3	197,4	195,1
2851022	PASSO MIGLIAVACA	107,2	247,5	130,9
2851024	PRATA	115,8	217	139,5
2851028	TRINTA E CINCO	85	227	108
2851043	ESMERALDA	68,2	143,3	70,9
2851044	GUAPORÉ	69,6	202,4	136
2851050	CAPÃO DO CEDRO	99,4	134,1	89,4
2851051	MUITOS CAPÕES	77,2	182,1	115,5
2851052	NOSSA SENHORA DE FÁTIMA	52,3	236,9	141,5
2852004	AULER	146	224,5	127
2852006	CARAZINHO	91	228,5	112,6
2852007	COLÔNIA XADREZ	112,3	228,4	103
2852009	DEPOSITO	98,4	158,8	87,2
2852014	ILÓPOLIS	107,7	238,5	149
2852024	PULADOR	115,3	224,9	157
2852031	VILA TRÊS PASSOS	135,1	277,9	114,3
2852046	TAPEJARA	91,9	195,9	93,9
2852050	NÃO-ME-TOQUE	116,3	291,8	154,4
2852052	CAMPO DO MEIO	106,8	213,5	102,9
2852053	SOLEDADE	145,8	224,1	118,1
2852054	SELBACH	118,1	200,2	118,5
2949001	PRAIA GRANDE	87,3	230,9	95,1
2949003	SOMBRIO	56,3	157,5	90,2

Código	Nome	Chuva observada acumulada (mm)		
		27/06 a 03/07	04/07 a 10/07	11/07 a 17/07
2950008	CAMISAS	135,2	236,8	175
2950016	GLORINHA	116,4	117,5	74,1
2950019	LAJEADO GRANDE	108,2	215,3	171
2950033	SECA	140,8	234,5	165,6
2950034	SERRA DO PINTO	90,1	128,7	72,2
2950056	MÃE DOS HOMENS	100,2	220,2	112,1
2950059	AGROPECUÁRIA ANJU	132,7	135,7	72,6
2950060	SANTO ANTÔNIO DA PATRULHA	111,6	120,6	93,8
2950062	FAZENDA NOSSA SENHORA CONCEIÇÃO	129,8	141,7	53,8
2951017	JANSEN	202,8	199	124,8
2951022	NOVA PALMIRA	141,7	158,7	80,4
2951024	PORTO GARIBALDI	104,2	138	49,9
2951027	SÃO VENDELINO	156	168,5	89
2951028	SAPUCAIA DO SUL	97	148,8	65
2951067	CHARQUEADAS	83,7	139,7	53,6
2951070	MUÇUM	180,6	189,6	90,5
2952001	BARROS CASSAL	97,4	-	-
2952003	BOTUCARAI	84,7	227,9	18,6
2952034	CANDELÁRIA	86,7	111,9	22,5
2952035	HERVEIRAS	135,8	106	120,6
2952036	BOQUEIRÃO DO LEÃO	114,1	175,7	67
2952037	DEODORO	100	27,9	193,6
2952038	SÃO JOSÉ DO HERVAL	144,8	181,5	101,2

ANEXO C. MANCHAS DE INUNDAÇÃO

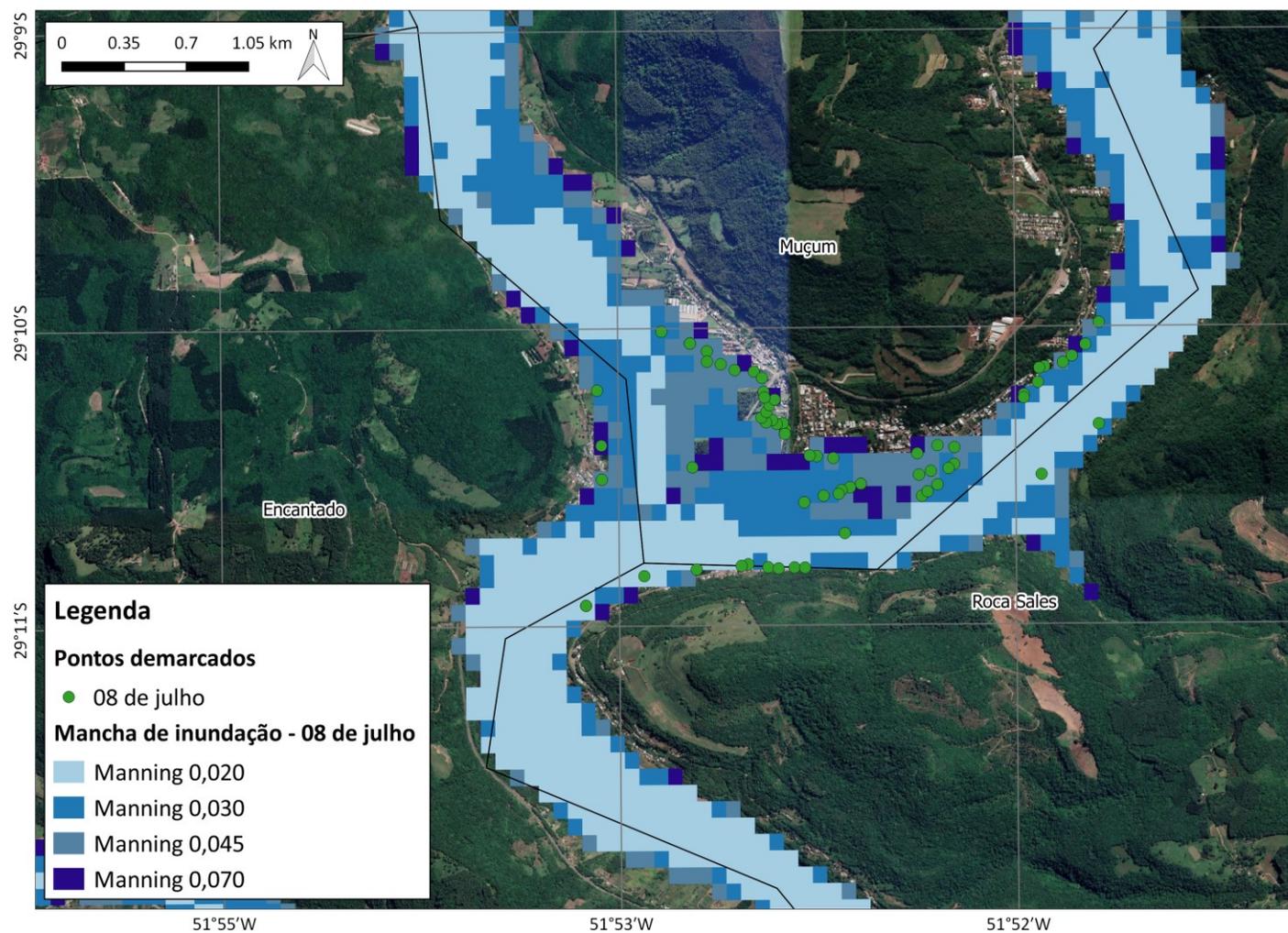


Figura 41. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 08 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Muçum e Roca Sales.

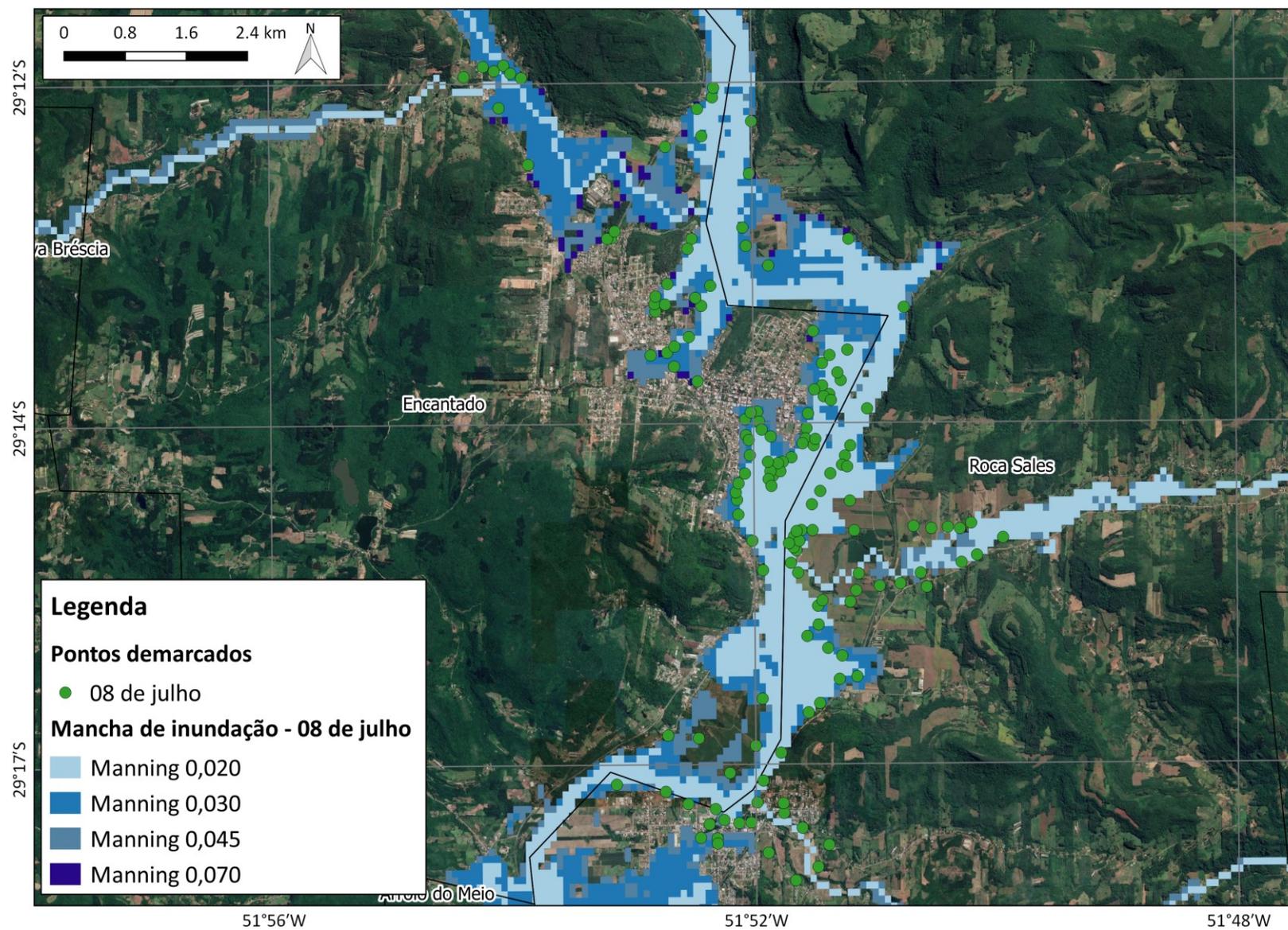


Figura 42. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 08 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Encantado e Roca Sales.

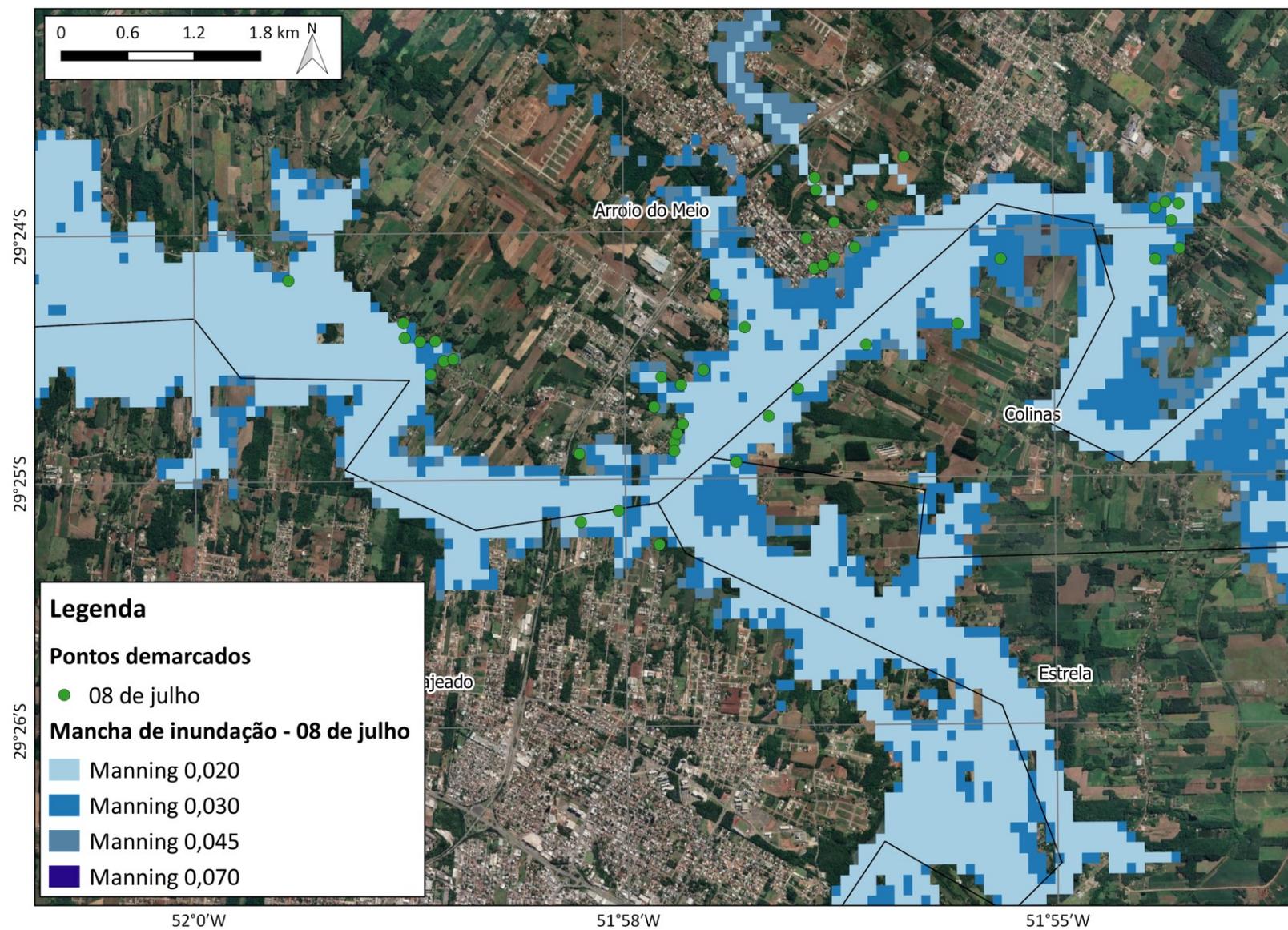


Figura 43. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 08 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Arroio do Meio e Colinas.

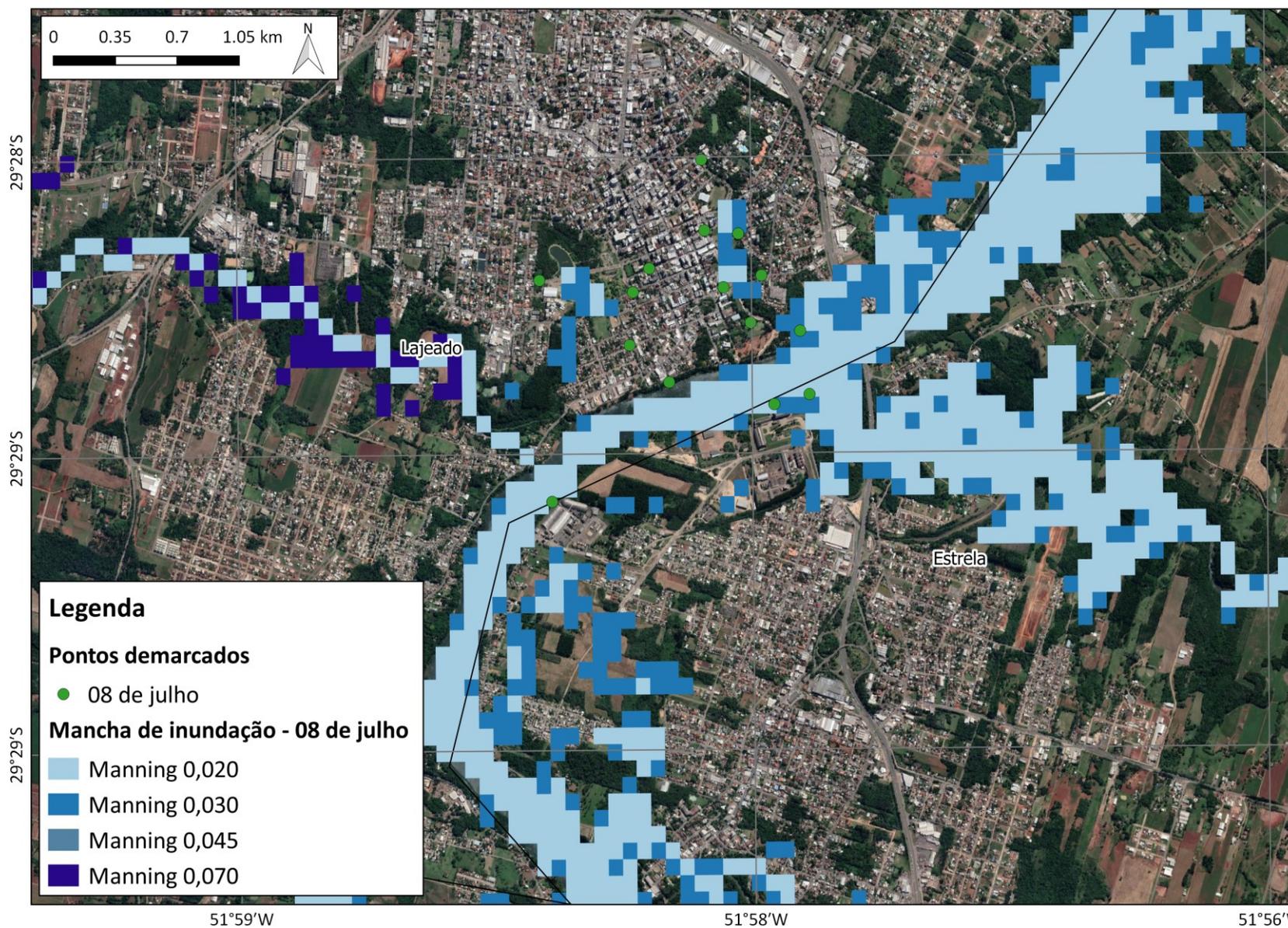


Figura 44. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 08 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Lajeado e Estrela.

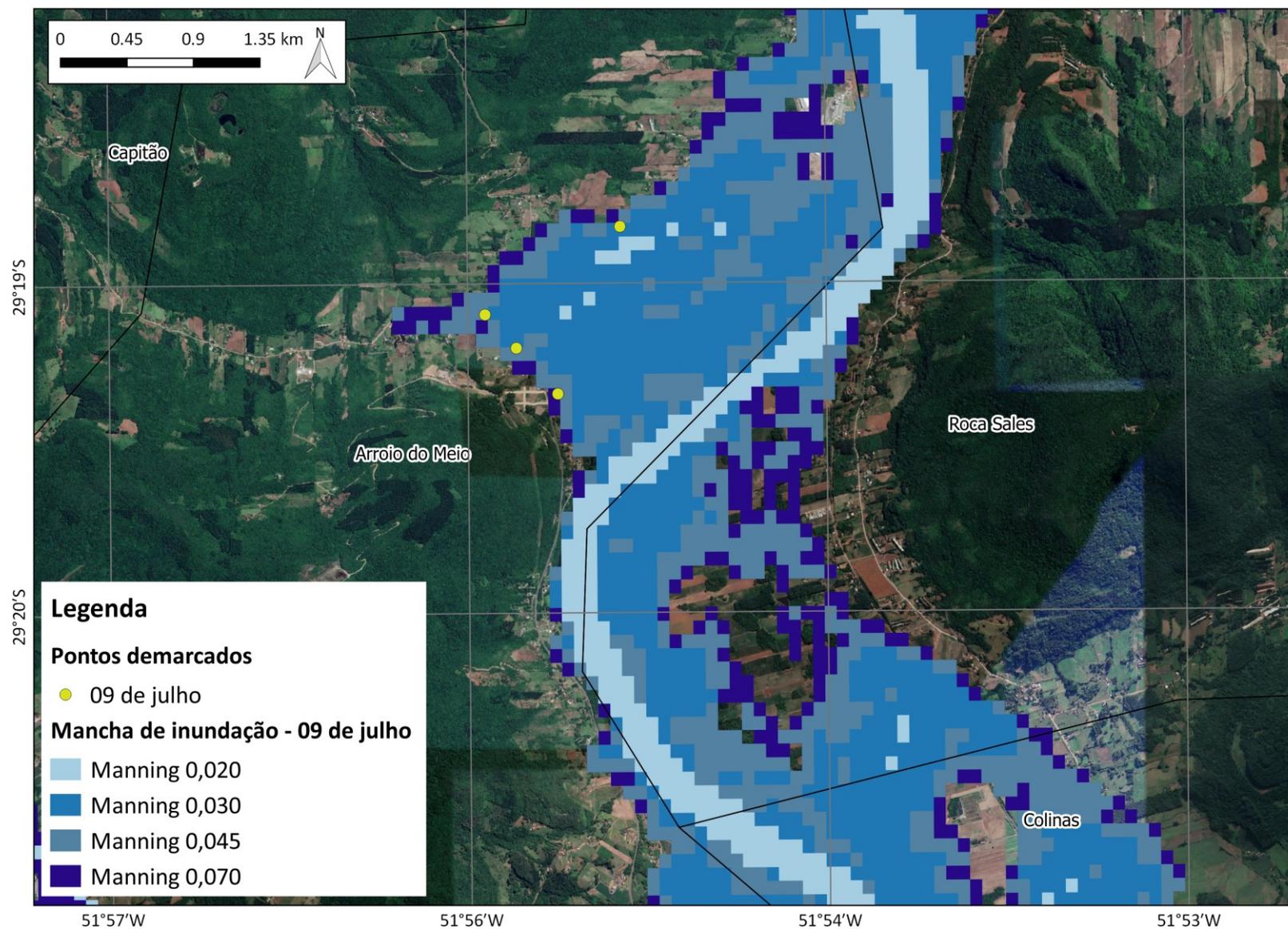


Figura 45. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 09 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Arroio do Meio e Roca Sales.

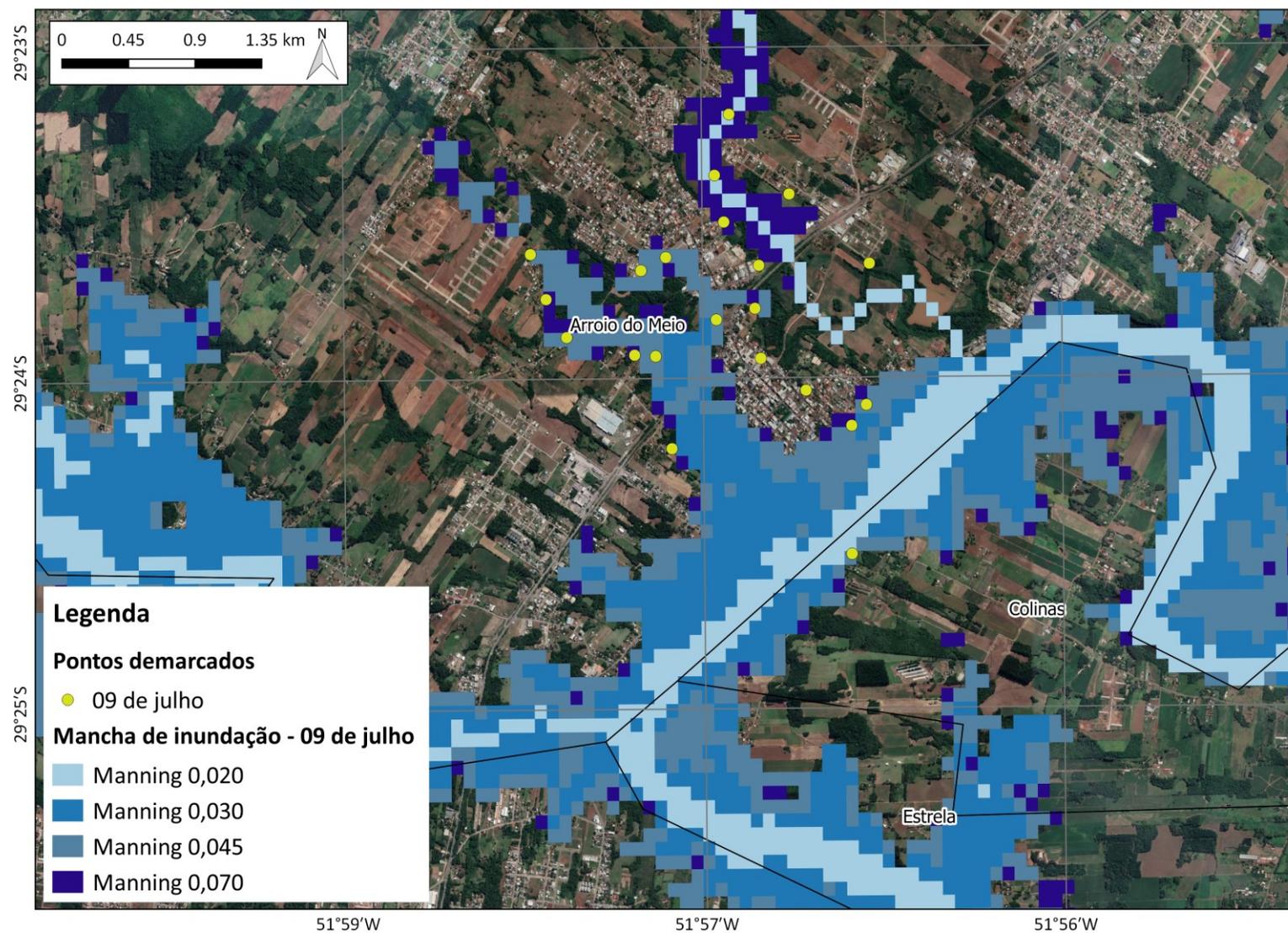


Figura 46. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 09 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Arroio do Meio e Colinas.

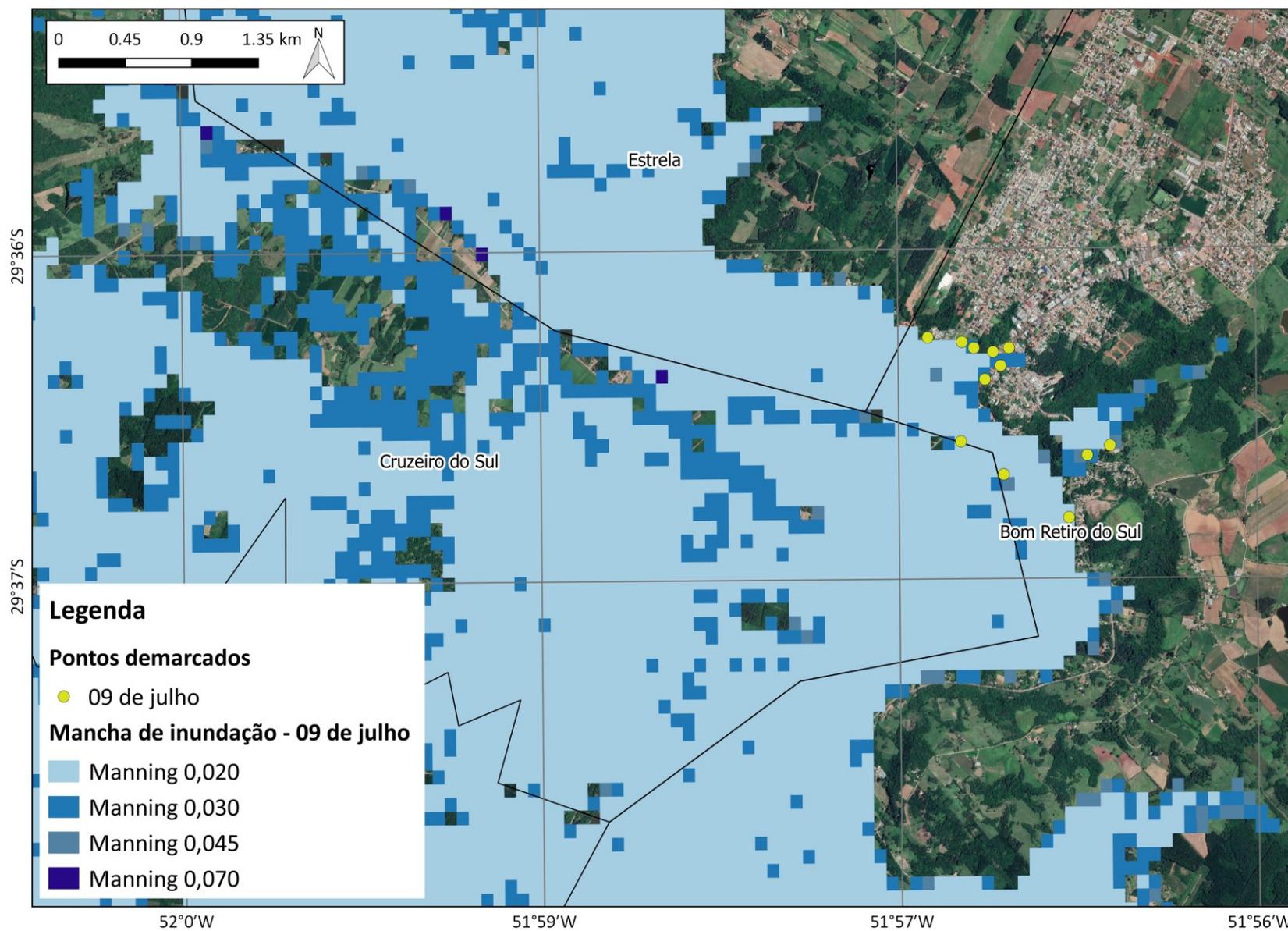


Figura 47. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 09 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Bom Retiro do Sul.

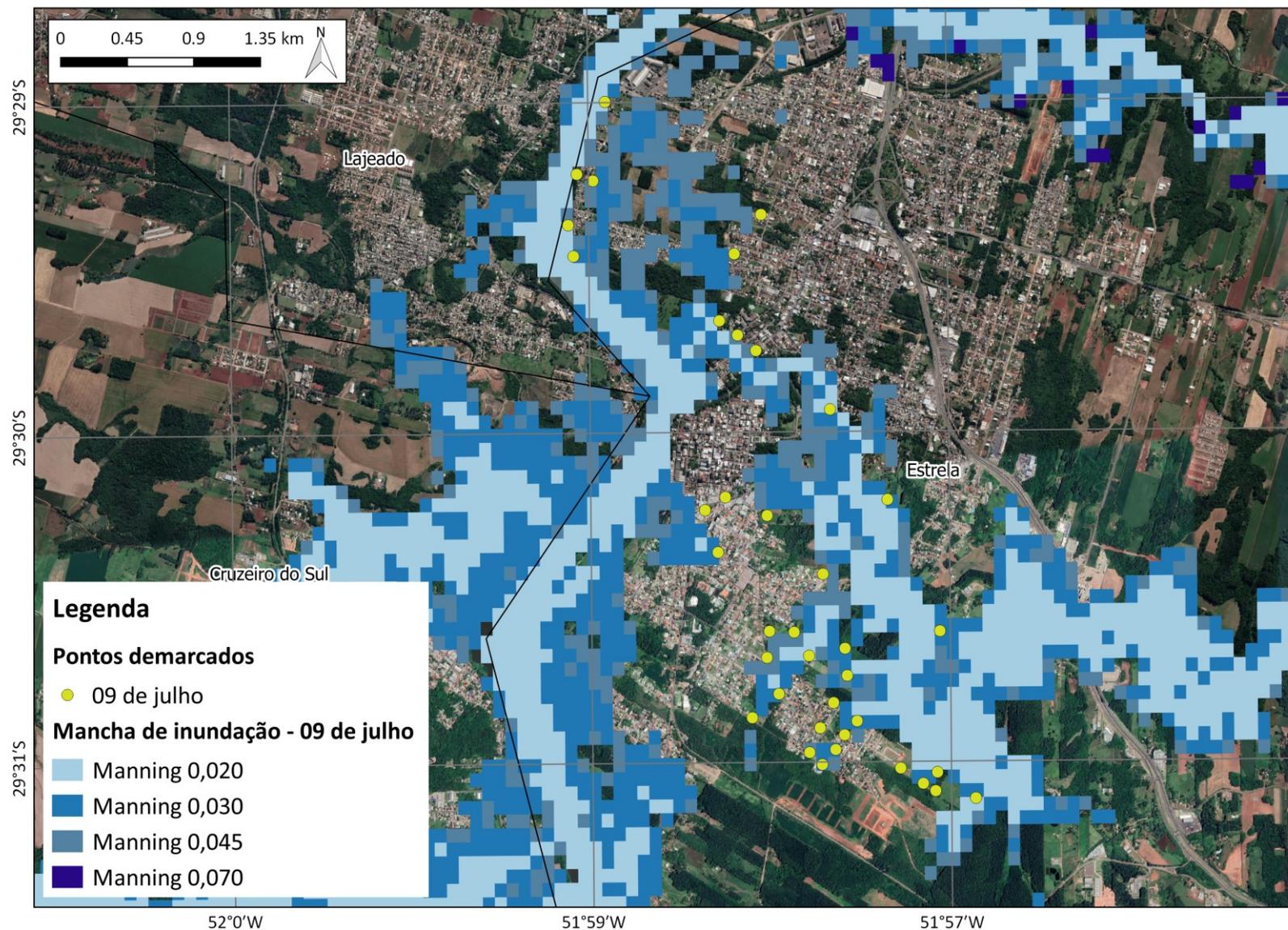


Figura 48. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 09 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Lajeado e Estrela.

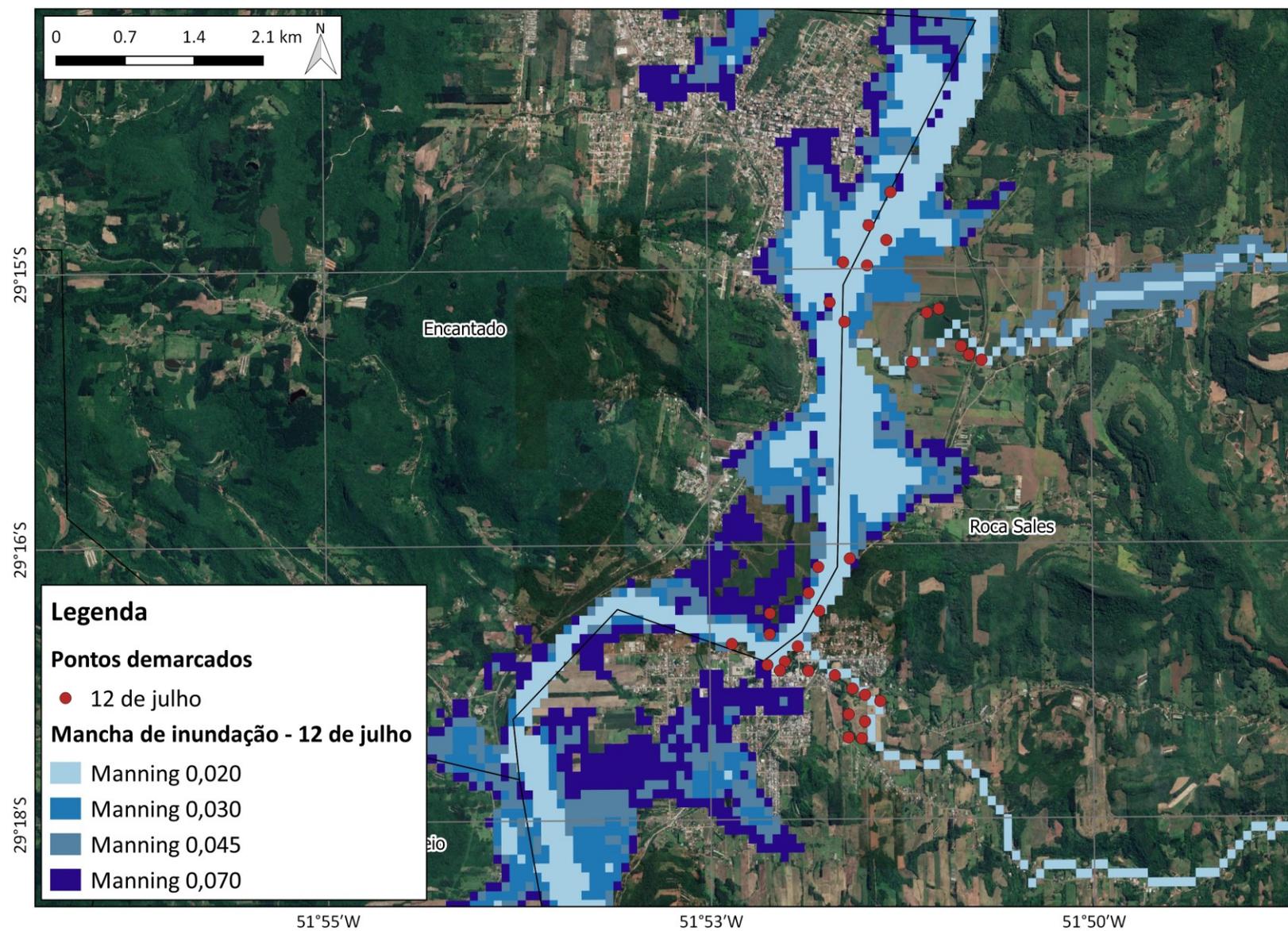


Figura 49. Manchas de inundação para diferentes valores de Manning, no dia 12 de julho de 2020, e comparação com os pontos demarcados na cidade de Encantado e Roca Sales.