

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS - IPH

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL - PPGRHSA

SOFIA ROYER MORAES

ANÁLISE HISTÓRICA DE INUNDAÇÕES DO RIO TAQUARI EM LAJEADO-RS COM APOIO DE CIÊNCIA CIDADÃ E REGISTROS NÃO SISTEMÁTICOS

PORTO ALEGRE

2026

SOFIA ROYER MORAES

ANÁLISE HISTÓRICA DE INUNDAÇÕES DO RIO TAQUARI EM LAJEADO-RS COM APOIO DE CIÊNCIA CIDADÃ E REGISTROS NÃO SISTEMÁTICOS

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

Orientador: Prof. Dr. Walter Collischonn.

PORTO ALEGRE

2026

CIP - Catalogação na Publicação

Royer Moraes, Sofia
ANÁLISE HISTÓRICA DE INUNDAÇÕES DO RIO TAQUARI EM LAJEADO-RS COM APOIO DE CIÊNCIA CIDADÃ E REGISTROS NÃO SISTEMÁTICOS / Sofia Royer Moraes. -- 2026.
138 f.
Orientador: Walter Collischonn.

Coorientador: Fernando Fan.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2026.

1. inundações extremas. 2. reconstrução histórica. 3. análise de frequência bayesiana. 4. modelagem hidrodinâmica. 5. ciência cidadã. I. Collischonn, Walter, orient. II. Fan, Fernando, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Sofia Royer Moraes

Análise histórica de inundações do rio Taquari em Lajeado - RS com apoio de ciência cidadã e registros não sistemáticos

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

Aprovado, com voto de louvor, em: Porto Alegre, 31 de agosto de 2026

Prof. Dr. Walter Collischonn – UFRGS
Orientador

Profa. Dra. Nilza Maria dos Reis Castro - PPG-IPH/UFRGS
Examinador

Prof. Dr. Guilherme Garcia de Oliveira - PPG-SRM/UFRGS
Examinador

Profa. Dra. Maria Clara Fava - UFSCAR
Examinador

Prof. Dra. Sandrine Teixido - UCLouvain - PhD EHESS-PSL
Examinador

Dedico este trabalho para a pequena Sôfi, cujo
sonho grande era cursar o magistério.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Walter Collischonn, meu orientador, pela confiança em uma ideia que começou com a cheia de 1941, evoluindo para 1873 e daí, um século e meio de dados hidrológicos para compor essa história, e por enxergar o fio condutor desta tese.

À banca examinadora, Profa. Dra. Nilza Castro, Prof. Dr. Guilherme de Oliveira, Profa. Dra. Maria Clara Fava (UFSCar) e Profa. Dra. Sandrine Teixido (UCLouvain), cuja leitura crítica tornou esta versão final melhor.

Ao CNPq, pelo fomento. Ao PPGRHSA/IPH/UFRGS, em especial ao HGE e ao GPDEM, pelo ambiente em que esta pesquisa cresceu. À Univates, pelo apoio institucional, e à minha rede de colegas e alunos, pelas parcerias e bons momentos. Ao Prof. Dr. Masato Kobiyama, pelas trocas e pelo incentivo. Aos amigos do Serviço Geológico do Brasil, Marcuzzo, Franco e Rubinho, por amarem tanto a BHTA. Ao Dieter Loose, pelos levantamentos topográficos.

Ao historiador José Alfredo Schierholt, que guardou por décadas o que os arquivos oficiais deixaram escapar e abriu seu acervo e sua casa a esta pesquisa. Ao Colégio Evangélico Alberto Torres, por preservar em um pilar mais de um século de história hidrológica de Lajeado e permitir acesso às informações.

Aos cientistas cidadãos de 2023 e 2024, que, em meio à cheia, fotografaram, mediram e enviaram os limites da água em suas ruas e casas. Aos meus alunos, que abraçaram e disseminaram o projeto.

Às amigas e aos amigos: Jandi, Carol, Vanessinha, Serginho, Sabrina, Camila, Daniel, Evandro, Dani, Gabi, Jana, Fernanda, Cris, Renata, Thaís, Marina, Jéssica, Maria Cristina, Leh, Luiz, Luiza, Lúcia, João, Maristela, Maria do Socorro, Fabi, Juju, Igor... Também à Maria Inês e ao Zeca, do Ruah — âncora e amizade.

À minha avó Cerenita, que dizia que uma nova realidade se constrói estudando; ela estava certa. Ao meu avô Aloysio, que me criou e partiu em outubro de 2025, quando esta jornada estava quase no fim. Ao Rafael Eckhardt, parceiro de vida e de trabalho, por segurar a casa, os prazos e a mim, além de me inspirar e me impulsionar. E ao Mathias, nosso filho, que cresceu junto com esta tese e já vai conosco olhar o rio e as enchentes.

Uma tese sobre memória regional só poderia ser, ela mesma, uma obra coletiva. A quem ficou de fora destas linhas, minha gratidão.

Um VIVA à memória, `à hidrometria e à Ciência Brasileira!

✦ ᚠ ✦ ᛗ ✦ ᛊ ✦

A memória é um dos pilares da resiliência climática!

RESUMO

As inundações constituem o desastre natural de maior recorrência na Bacia Hidrográfica Taquari-Antas. O biênio 2023–2024 impôs a Lajeado (RS) os maiores eventos de sua história documentada, superando a cheia de 1941, que orientou o planejamento urbano local e regional por mais de oito décadas, e expôs os limites das séries instrumentais curtas para caracterizar extremos hidrológicos em um clima em mudança. Esta tese demonstra o potencial da integração de marcas históricas, registros não sistemáticos e ciência cidadã para a análise de frequência e a retromodelagem hidrodinâmica de inundações, mediante a consolidação de uma série histórica de 153 anos (1873–2025) de níveis máximos anuais e limiares de percepção do rio Taquari em Lajeado. A série foi construída sobre três pilares: o monitoramento sistemático (1939–2025), consistido a partir da reconstituição dos zeros de régua dos três sistemas de medição que operaram no trecho; os registros não sistemáticos (1873–1938), recuperados de correspondências do período imperial, do acervo da Hemeroteca Digital Brasileira, de compilações de historiadores locais e das marcas físicas preservadas no Colégio Evangélico Alberto Torres, niveladas por GNSS RTK e estação total; e a ciência cidadã, mobilizada via WhatsApp durante os eventos extremos de 2023 e 2024. A recuperação documental reposicionou a cheia de outubro de 1873 (29,11 m), superior à de 1941 e até então ausente das séries oficiais, como o terceiro maior evento dos 153 anos. A análise de frequência bayesiana (RMC-BestFit), com a distribuição Log-Pearson Tipo III ajustada à série combinada mediante limiar de percepção de 27,00 m para o período não sistemático e quantis reportados pela distribuição preditiva a posteriori, indicou tempo de retorno de aproximadamente 656 anos para a inundação de maio de 2024 (33,67 m), cujo limite inferior do intervalo de credibilidade de 90%, de 187 anos, é adotado como referência para a gestão de riscos e o planejamento urbano e de infraestrutura. A incorporação dos registros históricos reduziu de 13% a aproximadamente 34% a amplitude dos intervalos de credibilidade, com ganho crescente para os tempos de retorno mais elevados, e moderou a sensibilidade das cotas raras à excepcionalidade recente, com diferença de até 2,08 m na cota de 1.000 anos em relação à série instrumental isolada. A série sistemática não rejeitou a hipótese de estacionariedade, mas a concentração dos dois maiores eventos ao final do período constitui sinal cuja interpretação depende, precisamente, da extensão do registro disponível. A modelagem hidrodinâmica bidimensional (HEC-RAS), validada com levantamentos técnicos e dados de ciência cidadã em cinco eventos contemporâneos, retromodelou as cheias de 1873 e 1941, reproduzindo as cotas reconstituídas com diferenças verticais de 0,14 m e 0,23 m e gerando as respectivas manchas de inundação máxima. Os resultados demonstram que registros não sistemáticos e ciência cidadã não são recursos auxiliares, mas pilares epistemológicos autônomos da hidrologia de extremos, capazes de sustentar a caracterização probabilística das inundações e o planejamento urbano em cidades com monitoramento fragmentado, e que séries longas constituem a linha de base necessária para que extremos como o de 2024 sejam lidos como parte do regime hidrológico da bacia, e não como surpresa estatística, e para que mudanças futuras nesse regime possam ser distinguidas da variabilidade natural.

Palavras-chave: inundações extremas; reconstrução histórica; análise de frequência bayesiana; modelagem hidrodinâmica; ciência cidadã.

ABSTRACT

Floods are the most recurrent natural disaster in the Taquari-Antas River Basin. The 2023–2024 biennium imposed on Lajeado (RS), Brazil, the largest events of its documented history, surpassing the 1941 flood, which had guided local and regional urban planning for more than eight decades, and exposed the limits of short instrumental series for characterizing hydrological extremes in a changing climate. This thesis demonstrates the potential of integrating historical flood marks, non-systematic records, and citizen science for flood frequency analysis and hydrodynamic retro-modeling, through the consolidation of a 153-year historical series (1873–2025) of annual maximum water levels of the Taquari River in Lajeado. The series was built on three pillars: systematic monitoring (1939–2025), made consistent through the reconstitution of the gauge-zero datums of the three measuring systems that operated in the river reach; non-systematic records (1873–1938), recovered from imperial-period correspondence, the Brazilian Digital Newspaper Archive (Hemeroteca Digital Brasileira), compilations by local historians, and the physical flood marks preserved at the Colégio Evangélico Alberto Torres, leveled by GNSS RTK and total station surveys; and citizen science, mobilized via WhatsApp during the extreme events of 2023 and 2024. The documentary recovery repositioned the October 1873 flood (29.11 m), higher than the 1941 event and until then absent from official records, as the third largest event of the 153-year series. Bayesian flood frequency analysis (RMC-BestFit), with the Log-Pearson Type III distribution fitted to the combined series using a perception threshold of 27.00 m for the non-systematic period and quantiles reported from the posterior predictive distribution, indicated a return period of approximately 656 years for the May 2024 flood (33.67 m), whose lower bound of the 90% credibility interval, 187 years, is adopted as the reference value for risk management and for urban and infrastructure planning. The incorporation of historical records reduced the width of the credibility intervals by 13% to approximately 34%, with increasing gains for higher return periods, and moderated the sensitivity of rare water levels to the recent exceptional events, with differences of up to 2.08 m in the 1,000-year level relative to the instrumental series alone. The systematic series did not reject the stationarity hypothesis, but the concentration of the two largest events at the end of the record is a signal that only a long series allows to be interpreted. Two-dimensional hydrodynamic modeling (HEC-RAS), validated with technical surveys and citizen science data from five contemporary events, retro-modeled the 1873 and 1941 floods, reproducing the reconstituted water levels with vertical differences of 0.14 m and 0.23 m and generating the corresponding maximum flood extent maps. The results demonstrate that non-systematic records and citizen science are not auxiliary resources but autonomous epistemological pillars of extreme-event hydrology, capable of supporting the probabilistic characterization of floods and urban planning in cities with fragmented monitoring, and that long series provide the baseline needed for extremes such as the 2024 flood to be interpreted as part of the basin's hydrological regime, rather than as unprecedented events, and for future changes in that regime to be distinguished from natural variability.

Keywords: extreme floods; historical reconstruction; Bayesian flood frequency analysis; hydrodynamic modeling; citizen science.

SUMÁRIO

RESUMO **8**
ABSTRACT **9**
SUMÁRIO **10**
LISTA DE FIGURAS **11**
LISTA DE TABELAS **13**
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO **15**
1.1 OBJETIVO 17
1.2 JUSTIFICATIVA 17
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA **18**
2.1 EVENTOS NATURAIS EXTREMOS 18
2.2 DESASTRES NATURAIS 19
2.2.1 Desastres Naturais Hidrológicos *19*
2.2.2 Desastres Naturais na Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas *21*
2.3. DADOS SISTEMÁTICOS, NÃO SISTEMÁTICOS E CIÊNCIA CIDADÃ 23
2.3.1 Dados Sistemáticos e Dados Não Sistemáticos *24*
2.3.2 Ciência Cidadã *27*
2.4 ANÁLISE DE FREQUÊNCIA E INTEGRAÇÃO DE DADOS NÃO SISTEMÁTICOS 33
2.5 RETROMODELAGEM E RECONSTRUÇÃO DE EVENTOS EXTREMOS DE INUNDAÇÕES 37
2.5.1 Modelagem Hidrológica e Hidráulica *37*
2.5.2 Conceituação e Aplicações da Retromodelagem *38*
2.5.3 Ferramentas e Métodos para Retromodelagem *40*
2.5.4 Estudos de Caso de Retromodelagem em Extremos Hidrológicos *43*
2.5.5 Limitações da Retromodelagem e Perspectivas Futuras *46*
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA **48**
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 49
3.2 DADOS HIDROLÓGICOS SISTEMÁTICOS 52
3.3 DADOS HIDROLÓGICOS NÃO SISTEMÁTICOS 60
3.4 CONSOLIDAÇÃO E COMBINAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA DE INUNDAÇÕES DE LAJEADO 64
3.5 ANÁLISE DE FREQUÊNCIA E INTEGRAÇÃO DE DADOS NÃO SISTEMÁTICOS 67
3.5.1 Software RMC-BestFit *68*
3.5.2 Procedimentos de análise *68*
3.5.3 Comparação de cenários com e sem dados históricos *70*
3.6 MARCAS DE LIMITES DE INUNDAÇÃO E CIÊNCIA CIDADÃ 70
3.6.1 Levantamento técnico de marcas de inundação em campo (2007–2024) *70*
3.6.2 Campanhas de ciência cidadã (2023–2024) *71*
3.7 MODELAGEM HIDRODINÂMICA 73
3.7.1 O modelo HEC-RAS *73*
3.7.2 Dados topográficos *74*
3.7.3 Dados batimétricos *75*
3.7.4 Domínio da simulação *75*
3.7.5 Condições de contorno *76*
3.7.6 Calibração e validação do modelo hidrodinâmico *77*
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS **79**
4.1 DADOS NÃO SISTEMÁTICOS 79
4.1.1 Registros Documentais Identificados na Hemeroteca Digital Brasileira *80*

4.1.2 Resultados de marcas de cheia no CEAT ... *82*
4.2 CHEIA HISTÓRICA DE 1873 ... 90
4.3 CONSOLIDAÇÃO DA SÉRIE DE DADOS SISTEMÁTICOS ... 93
4.4 SÉRIE COMPLETA DE MÁXIMOS ANUAIS COM MARCAS HISTÓRICAS ... 102
4.5 ANÁLISE DE FREQUÊNCIA DE COTAS MÁXIMAS ... 105
4.5.1 Estatísticas descritivas das séries históricas ... *105*
4.5.2 Análise de estacionariedade ... *106*
4.5.3 Ajuste da distribuição de probabilidade ... *107*
4.5.4 Comparação de cenários com e sem dados históricos ... *108*
4.5.5 Tempos de retorno estimados para inundações extremas ... *109*
4.6 MARCAS DE LIMITES DE ÁREA INUNDADA ... 111
4.6.1 Cheias de 2007 a 2020 ... *111*
4.6.2 Cheias de 2023 e 2024 ... *112*
4.7 MODELAGEM HIDRODINÂMICA E RETROMODELAGEM DE CHEIAS DO RIO TAQUARI EM LAJEADO ... 113
4.7.1 Modelagem hidrodinâmica e validação de cheias contemporâneas (2007–2024) ... *113*
4.7.2 Retromodelagem das cheias de 1873 e 1941 ... *118*
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES ... 122
REFERÊNCIAS ... 126

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação conceitual de cheia (ou enchente), inundação e alagamento (adaptado de Carvalho; Macedo; Ogura, 2007). ... 20

Figura 2 - Bacia Hidrográfica do rio Taquari-Antas (Oliveira *et al*., 2018). ... 21

Figura 3 - Categorização dos dados sistemáticos e dados não sistemáticos na hidrologia, considerando as principais as fontes de dados e principais formas de evidências (Vanelli; Fan; Kobiyama, 2020). ... 24

Figura 4 - Processos em uma bacia hidrográfica a serem representados e simulados em um modelo hidrológico, hidráulico ou combinado (Muhlenhoff *et al*., 2016). ... 38

Figura 5 - Diagrama de categorização das inundações em pequenas e extremas (Merz *et al*., 2021). ... 39

Figura 6 - Diagrama esquemático mostrando a combinação de registros de enchentes e inundações obtidos por aferição instrumental, por documentação histórica e por paleoinundações (Brázdil *et al*., 2006). ... 41

Figura 7 - Seção transversal mostrando vários níveis de inundações históricas e os diferentes limiares de percepção (Benito *et al*., 2015) ... 41

Figura 8 - Esquema ilustrando a percepção da mudança do nível das inundações ao longo do tempo com a progressiva ocupação humana em direção ao rio (Benito *et al*., 2015). ... 42

Figura 9 - Fluxograma simplificado da estrutura da retromodelagem de inundações extremas observadas no passado (Moraes *et al*., 2023). ... 43

Figura 10 - Diagrama esquemático da combinação de dados sobre inundações na Bacia Hidrográfica do Alto Reno. (Wetter *et al*., 2011) ... 45

Figura 11 - Fluxograma metodológico ... 48

Figura 12 - Área de estudo: Lajeado/RS ... 50

Figura 13 - Localização dos postos fluviométricos de medição do nível da água do rio Taquari entre Lajeado e Estrela (adaptado de Moraes *et al*., 2024). ... 53

Figura 14 - *Peaks Over Threshold* - Van Campenhout *et al*. (2020). 54

Figura 15 - Série histórica sistemática dos níveis médios diários medidos no posto fluviométrico 86870000, localizado no rio Taquari, na cidade de Lajeado, evidenciando os efeitos de uma provável mudança do zero (nível de referência) da régua em 1961 e novamente em meados de 1978, com o início da operação da Barragem Eclusa de Bom Retiro do Sul (Moraes *et al.*, 2024). 55

Figura 16 - Representação esquemática da mudança da posição vertical do sistema de réguas do posto fluviométrico Lajeado (86870000) (Moraes *et al*., 2024). 56

Figura 17 - Série histórica sistemática dos níveis médios diários observados nas réguas linimétricas do Porto Fluvial de Estrela no período de 1980 a 2015 (Moraes *et al*., 2024). 57

Figura 18 - Cota arbitrária de 17,000 metros marcada sobre o cais do Porto Fluvial de Estrela (marco RN1) para apoiar as medições das réguas utilizadas no monitoramento do nível do rio Taquari (Moraes *et al*., 2024). 58

Figura 19 - Registro fotográfico da Plataforma de Coleta de Dados (PCD) (pré-cheias de 2023 e 2024) por telemetria automática do posto fluviométrico 86879300, quando ainda estava localizada no Porto Fluvial de Estrela (Figura 19 – A) e Figura 19 – B, – Localização das réguas em Lajeado. 59

Figura 20 - Detalhe do pilar de um dos prédios do CEAT com a fixação de placas metálicas indicando os níveis máximos das inundações históricas do rio Taquari na cidade de Lajeado (A) e o cenário da inundação de 09 de julho de 2020 no referido pilar do CEAT (B). A marca histórica de inundação mais antiga é de 1912. 62

Figura 21 - Vista completa do pilar e da viga do prédio do CEAT onde estão as marcas das principais inundações históricas registradas em Lajeado, com uma seta para indicar a localização da marca da cheia de 1941 na viga acima do pilar. 63

Figura 22 - Fotografia da fachada frontal e lateral da Escola Estadual Fernandes Vieira - EEFV, localizada no Centro de Lajeado, durante a cheia de 05 de maio de 1941, que permite constatar que a inundação de 1941 cobriu o 1 vidro dos 5 vidros da janela basculante do primeiro andar. 64

Figura 23 - Representação esquemática da medida das cotas do nível da água de um rio. 65

Figura 24 - Detalhe da discretização do modelo HEC-RAS 2D 76

Figura 25 – Hidrogramas sintéticos triangulares de entrada do modelo: 10 dias de ascensão e 10 de recessão, com partição de 90% (Taquari) e 10% (Forqueta), adaptação sobre a configuração de calibração de Parma (2025). Fonte: elaboração própria. 77

Figura 26 - Página 13 do Relatório Provincial de 07/03/1874: registro de "socorros à inundação" referente ao evento extraordinário de outubro de 1873 (Fonte: Relatórios dos Presidentes das Províncias Brasileiras - RS, 1874, Hemeroteca Digital Brasileira). 81

Figura 27 - Página 15 do Relatório Provincial de 07/03/1874: destaque específico para o município de Taquary (Fonte: Relatórios dos Presidentes das Províncias Brasileiras - RS, 1874, Hemeroteca Digital Brasileira). 81

Figura 28 - Artigo 18 do documento de 1848 sobre demarcação de colônias: (Fonte: Relatórios dos Presidentes das Províncias Brasileiras - RS, 1848, Hemeroteca Digital Brasileira). 82

Figura 29 - Vista lateral do pilar do prédio do CEAT (Seta 1) onde estão fixadas as placas das marcas das inundações históricas, visto a partir da rua Carlos Von Koseritz, destacando a mancha de umidade resultante da inundação de 5 de setembro de 2023 (Seta 3), localizada 51 cm (7 tijolos) acima do limite superior da viga branca, que representa o local em que está marcado nível máximo da inundação de 05 de maio de 1941 (Seta 2). 85

Figura 30 - Vista da parede externa, toda molhada após a inundação de 02 de maio de 2024, localizada acima da viga e no alinhamento do pilar do prédio do CEAT onde estão fixadas as placas das marcas das inundações históricas (Seta 1). Na imagem é possível visualizar o local em que está marcado nível máximo da inundação de 05 de maio de 1941 (Seta 2), no limite superior da viga branca, a placa da inundação de 05 de setembro de 2023 (Seta 3) e a placa da inundação de 19 de novembro de 2023 (Seta 4). *É importante destacar que as placas metálicas das inundações de setembro e de novembro de 2023 foram fixadas dois tijolos (~11 cm) acima do nível máximo dessas inundações.* 86

Figura 31 - Vista da marca de umidade na parede externa do mesmo prédio onde estão marcadas as inundações históricas no pilar do CEAT, localizada na lateral da escada que conduz para o segundo andar, sinalizando o nível máximo da inundação de 02 de maio de 2024 (Seta 5), que atingiu as salas de aula do terceiro andar. Foram atingidos 66 tijolos da referida parede, representando uma altura de 4,81 metros a partir do limite superior da viga branca (Seta 2) e 4,30 metros acima do nível da inundação de 05 de setembro de 2023 (Seta 3). 87

Figura 32 - Gráfico gerado pelo SACE-SGB mostrando as cotas das inundações de 02 de maio e de 13 de maio 2024 na estação fluviométrica 86879300 (Marcuzzo *et al*., 2025). 88

Figura 33 - Antiga casa da família Sudbrack, onde funcionava uma agência de transporte fluvial, demolida após ser invadida e incendiada, onde a inundação histórica de 10/1873 atingiu os fundamentos e foi até os olheiros abaixo do assoalho da edificação (Schierholt, 2024). 90

Figura 34 - O nível máximo da inundação de 07 de outubro de 1873 atingiu o limite inferior da viga de madeira do assoalho da antiga mansão da família Sudbrack. 91

Figura 35 - Prédio mais antigo preservado de Lajeado, incorporado ao supermercado da Rede Super. As aberturas foram lacradas, mas o prédio ainda tem a fachada original. 91

Figura 36 - Representação aproximada do nível máximo da inundação de 07 de outubro de 1873 na antiga casa demolida da família Sudbrack e na edificação vizinha, ainda preservada na atualidade e pertencente ao supermercado da Rede Super. 92

Figura 37 - Série histórica dos níveis ortométricos das enchentes e inundações de Lajeado registrados pelo monitoramento sistemático, sinalizando as 5 maiores inundações de 1939 até 2025. 100

Figura 38 e Figura 39 - Ocorrência e distribuição sazonal dos níveis das enchentes e inundações do rio Taquari agrupados durante o período de monitoramento sistemático em Lajeado. 101

Figura 40 - Agrupamento e distribuição dos níveis máximos anuais das enchentes e inundações do rio Taquari em Lajeado por década, considerando somente o período do monitoramento sistemático. 101

Figura 41 – Curva de frequência de cotas máximas anuais do rio Taquari em Lajeado (RS). Distribuição LP3 ajustada por estimação bayesiana MCMC (RMC-BestFit) à série sistemática (1939–2025). Linha tracejada: distribuição preditiva a posteriori (*Posterior Predictive*), estimativa de referência; linha contínua: moda a posteriori (*Posterior Mode*); área sombreada: intervalo de credibilidade de 90%. Fonte: elaboração própria. 107

Figura 42 - Estrutura de dados da análise de frequência no *software* RMC-BestFit: máximos anuais como observações exatas e áreas sombreadas indicando as faixas abaixo dos limiares de percepção (27,00 m para 1873–1938 e 13,00 m para 1939–2025). O limiar do período sistemático, inferior ao mínimo observado na série (13,95 m), não implica censura efetiva. Fonte: elaboração própria, a partir do *software* RMC-BestFit (Smith e Doughty, 2020). 108

Figura 43 – Modelagem da cheia de 2007 114

Figura 44 - Modelagem da cheia de 2015 115

Figura 45 - Modelagem da cheia de 2020 115

Figura 46 - Modelagem da cheia de 2023 116

Figura 47 - Modelagem da cheia de 2024 116

Figura 48 - Mancha de inundação retromodelada - 1873 120

Figura 49 – Mancha de inundação retromodelada - 1941 120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valor de K para a distribuição Log-Pearson Tipo III (Tucci, 2020). 36

Tabela 2 - Fonte de dados, resolução temporal, informações do nível / vazão e extensão dos registros dos dados sistemáticos (instrumentais) e não sistemáticos (evidências documentais e paleoinundações). 40

Tabela 3 - Valores de ajuste adotados nos zeros das réguas linimétricas e PCD automática para converter as cotas arbitrárias (R) medidas nos postos fluviométricos do monitoramento sistemático no trecho do rio Taquari entre as cidades de Lajeado e Estrela, para níveis ortométricos (H) 66

Tabela 4 - Eventos de inundação do rio Taquari com nível máximo reconstruído no período não sistemático (1873–1938) 79

Tabela 5 - Eventos de inundação do rio Taquari documentados no período não sistemático sem nível máximo reconstruído (1824–1938). 79

Tabela 6 - Lista das inundações históricas marcadas com placas metálicas no pilar do prédio do CEAT, a data de ocorrência e a altitude ortométrica (m) aferida *in loco*, organizadas em ordem decrescente de magnitude. 83

Tabela 7 - Comparação entre a altitude ortométrica aferida nas marcas históricas fixadas no CEAT e a altitude ortométrica ajustada dos níveis máximos das inundações do rio Taquari obtidos pelo monitoramento sistemático. 88

Tabela 8 - Série histórica sistemática consolidada dos níveis originais medidos, dos valores de ajuste, das altitudes ortométricas e do nível oficial das enchentes e inundações registradas na cidade de Lajeado, organizada do período atual (2025) até o passado (1939) 93

Tabela 9 - Série de máximos anuais do rio Taquari em Lajeado (1873–2025). Nível oficial (cota ortométrica + 0,55 m). 102

Tabela 10 - *Ranking* das 30 maiores inundações do rio Taquari que ocorreram na cidade de Lajeado, combinando dados sistemáticos e não sistemáticos, organizadas em ordem decrescente. 103

Tabela 11 - Estatísticas descritivas das séries de cotas máximas anuais do rio Taquari em Lajeado para a série sistemática (1939–2025) e série combinada (1873–2025) 105

Tabela 12 - Resultados da análise de estacionariedade pelo Coeficiente de Spearman para as séries de níveis máximos anuais do rio Taquari em Lajeado. 106

Tabela 13 - Cotas estimadas (m) para diferentes tempos de retorno. Distribuição LP3 bayesiana – série sistemática (1939–2025) e combinada com censura (1873–2025): Rio Taquari em Lajeado (RS). 108

Tabela 14 – Posicionamento de eventos históricos selecionados na curva de frequência. Tempos de retorno estimados pela moda a posteriori (CDF analítica) e pela preditiva a posteriori (interpolação log-linear). LP3 bayesiana – série combinada com censura (1873–2025). 110

Tabela 15 - Levantamentos técnicos de marcas de limite de inundação em Lajeado (RS), 2007–2020: níveis, altitudes ortométricas, número de pontos e utilização em estudos prévios 111

Tabela 16 – Cheias de 2023 e 2024 em Lajeado (RS): pontos de ciência cidadã. 112

Tabela 17 - Verificação espacial do modelo hidrodinâmico: distância horizontal entre os pontos de controle e a borda das manchas de inundação simuladas em Lajeado (RS), 2007–2024. 117

Tabela 18 - Cheias históricas retromodeladas no rio Taquari em Lajeado (RS). 121

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

As inundações situam-se entre os fenômenos naturais que mais se entrelaçaram com a história das sociedades humanas, sendo simultaneamente fonte de fertilidade e mobilidade nos vales fluviais onde se estabeleceram as primeiras civilizações, e fator persistente de risco. A esta condição estrutural soma-se, no presente, uma assimetria epistemológica relevante: estimativas de risco e sistemas de alerta operam majoritariamente sobre séries instrumentais cujo horizonte raramente ultrapassa algumas décadas, ao passo que a recorrência de eventos extremos pode envolver intervalos seculares. Quando um evento extrapola o registro instrumental, costuma ser classificado como sem precedentes, qualificação descritivamente acurada no recorte disponível, mas que omite o fato de que precedentes frequentemente existem, registrados em fontes documentais, marcas físicas preservadas pelas comunidades, correspondências oficiais e relatos jornalísticos. Estender o horizonte temporal além do registro instrumental moderno é, nesse sentido, condição necessária para que sociedades, gestores e pesquisadores deixem de ser repetidamente surpreendidos por eventos cuja magnitude já encontrava paralelo em séculos anteriores (Kelder *et al.*, 2025).

A relevância dessa discussão é amplificada pela escala contemporânea do problema. O balanço global do ano de 2024, consolidado pelo *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* – CRED em abril de 2025, registrou 393 desastres associados a perigos naturais, com 16.753 mortes, 167,2 milhões de pessoas afetadas e US$ 241,95 bilhões em prejuízos econômicos (CRED, 2025). O balanço subsequente, referente ao ano de 2025, confirmou a persistência do problema em patamar elevado, com 358 desastres relacionados a perigos naturais, 16.607 mortes, 110,2 milhões de pessoas afetadas e US$ 169,68 bilhões em perdas econômicas, mantendo as inundações entre as tipologias dominantes de registros de eventos extremos (CRED, 2026). Na América do Sul, a sequência de desastres hidrológicos que culminou nas catastróficas inundações e movimentos de massa de abril e maio de 2024 no Rio Grande do Sul (com mais de 180 vítimas fatais, 2,3 milhões de pessoas atingidas e a evidência inequívoca de superação dos registros instrumentais até então disponíveis) reposicionou o problema brasileiro de gestão de riscos hidrológicos no centro da agenda internacional (Collischonn *et al.*, 2025a; Laipelt *et al.*, 2026).

A literatura recente oferece exemplos do desencontro entre percepção contemporânea e profundidade temporal do registro. Em julho de 2021, o Vale do Ahr, na Renânia-Palatinado - Alemanha, foi atingido por uma cheia que causou mais de 130 mortes. Embora inicialmente percebida como evento sem precedentes, sobretudo porque os registros instrumentais do rio iniciam apenas em 1947, a reconstituição da vazão de pico em diversas seções do canal, conduzida a partir de marcas de cheia e de levantamento topográfico em campo, revelou que uma cheia similar havia ocorrido em julho de 1804, e que ao menos cinco eventos catastróficos foram documentados ao longo dos últimos quatro séculos (Roggenkamp; Herget, 2014, 2024), demonstrando que a avaliação da cheia de 2021 como evento único e novo *não se sustenta* quando a janela temporal é estendida. No Brasil, um paralelo nacional encontra-se em Blumenau (SC), onde a cheia do rio Itajaí-Açu de 23 de setembro de 1880 atingiu 17,10 m acima do nível normal, cota nunca superada nos quase 150 anos subsequentes, inclusive durante as cheias de 1983 e 1984. O conhecimento dessa magnitude foi reconstituído a partir de relatos jornalísticos, livros memorialísticos e marcas físicas (Deeke, 1995 [1917]; Frank; Pinheiro, 2003).

A ciência cidadã possui também uma dimensão historiográfica que vem ganhando destaque. Um exemplo é o projeto *Rainfall Rescue*, conduzido pela Universidade de Reading e pelo *National Centre for Atmospheric Science*, que mobilizou mais de 16.000 voluntários para transcrever 5,28 milhões de observações mensais de precipitação manuscritas em registros do *UK National Meteorological Archive*, cobrindo o período de 1677 a 1960 (Hawkins *et al*., 2023a). Iniciativas correlatas digitalizaram mais de 2,3 milhões de observações de relatórios meteorológicos diários do *Met Office* entre 1861 e 1910 (Craig; Hawkins, 2020, 2024). Esse esforço de resgate documental tem implicação direta na quantificação de risco: a tempestade de fevereiro de 1903, antes invisível às análises contemporâneas, foi reclassificada entre os quatro eventos de ventos mais intensos já registrados na Inglaterra e no País de Gales (Hawkins *et al*., 2023b). A dupla função da ciência cidadã, como instrumento de resgate de dados pretéritos e ferramenta de documentação georreferenciada de eventos contemporâneos, é particularmente positiva em contextos como o brasileiro, onde séries instrumentais sistemáticas raramente antecedem a década de 1940.

Esses elementos convergem com a Bacia Hidrográfica Taquari-Antas (BHTA), no Rio Grande do Sul. A cheia de maio de 1941 estabeleceu-se, ao longo de oito décadas, como referência urbanística e hidrológica para a cidade de Lajeado, visto ser a maior inundação conhecida. A sequência de eventos extremos iniciada em setembro de 2023, com novo pico em novembro de 2023 e culminando na inundação histórica de maio de 2024, com nível de 33,67 m em cota oficial, superou em mais de quatro metros a referência de 1941 (Collischonn *et al.*, 2025a). A pesquisa documental conduzida no âmbito desta tese revelou que a cheia de outubro de 1873 atingiu Lajeado com magnitude superior à de 1941, posicionando-se hoje como o terceiro maior evento da série consolidada, atrás apenas de maio de 2024 e setembro de 2023. Registros ainda mais antigos atestam a profundidade temporal das fontes hidrologicamente relevantes para o RS: os relatos de Auguste de Saint-Hilaire (viagem ao estado em 1820–1821) e de Arsène Isabelle (1830–1834) descrevem episódios de cheias generalizadas em suas passagens pelo RS (Saint-Hilaire, 1974 [1887]; Isabelle, 2006 [1835]), evidenciando que documentos de interesse hidrológico antecedem em mais de um século a instalação das primeiras estações fluviométricas oficiais.

Nesse sentido, a presente Tese articula três linhas de evidência: registros documentais não sistemáticos, marcas históricas preservadas pela comunidade local e contribuições contemporâneas de ciência cidadã, em uma metodologia integrada de retromodelagem hidrodinâmica para o trecho urbano do rio Taquari em Lajeado. A integração permite consolidar uma série histórica de 153 anos de cotas validadas (1873–2025), uma das mais extensas já construídas para análise de frequência de inundações no Brasil, e validar simulações bidimensionais com os eventos de 1873, 1941, 2023 e 2024. Para a presente tese, a retromodelagem é reservada aos eventos pretéritos, isto é, 1873, sem registro instrumental, e 1941, que dispõe de dado instrumental, mas cujo nível é também sustentado por registros e marcas históricas preservadas pela comunidade local, de forma a complementar com as abordagens de ciência cidadã dos eventos contemporâneos (2023 e 2024), que cumprem as funções de calibração e validação do modelo e de geração de registros não sistemáticos para a posteridade. Dessa forma, a ciência cidadã não é tratada como recurso auxiliar a um modelo já calibrado, mas como pilar epistemológico autônomo, ao lado dos dados sistemáticos e dos registros históricos.

1.1 Objetivo

Demonstrar o potencial da integração de marcas históricas, registros não sistemáticos e ciência cidadã para análise de frequência e retromodelagem hidrodinâmica de inundações, mediante consolidação de série histórica de 153 anos (1873-2025) do rio Taquari em Lajeado (RS).

1.2 Justificativa

Esta tese teve como ponto de partida a retromodelagem da inundação histórica de maio de 1941 do rio Taquari em Lajeado, evento que, por mais de oito décadas, serviu como principal referência para o planejamento territorial e a gestão de riscos na região. A coleta sistemática de registros documentais, marcas físicas e fotografias históricas, contudo, revelou outras cheias relevantes e demonstrou que a inundação de outubro de 1873 superou a de 1941. Esta constatação, por si só, reposicionou a cheia de 1941, considerada sem precedentes, como uma cheia igualada ou superada duas vezes em um período de menos de 100 anos, sugerindo que cheias desta ordem de grandeza poderiam ser mais frequentes do que se passou a acreditar após um período de, aproximadamente, 80 anos. As inundações catastróficas de setembro de 2023 e maio de 2024, ocorridas depois de iniciada a pesquisa, não só confirmaram que cheias como a de 1941 não são tão extraordinárias como se passou a acreditar, como superaram todos os registros disponíveis, corroborando a hipótese inicial da pesquisa, mas exigindo, também, uma readequação da proposta original desta tese (sobretudo quanto à amplitude das informações e à diversidade das formas de coleta de dados), evidenciando o papel da ciência cidadã como fonte de registros precursores e complementares ao monitoramento instrumental.

Os eventos de 2023 e 2024 criaram uma oportunidade singular: a coleta de dados georreferenciados durante e imediatamente após as inundações, por meio de iniciativas estruturadas de ciência cidadã. Quando os sistemas automáticos de monitoramento da Bacia Hidrográfica do rio Taquari-Antas (BHTA) falharam, parcial ou totalmente (em especial durante a cheia de maio de 2024), a colaboração de moradores, servidores públicos e voluntários foi decisiva para o registro georreferenciado das marcas de inundação e para o fortalecimento da memória coletiva, pilar na construção de uma cultura de prevenção. Essa articulação sustenta a retromodelagem hidrodinâmica desenvolvida na tese, que integra, em uma única cadeia de validação, registros documentais, marcas físicas e cotas validadas desde 1873, monitoramento instrumental sistemático (1939–2025) e dados georreferenciados obtidos em campo (2007, 2015 e 2020) e por ciência cidadã (2023–2024), conferindo acurácia às simulações.

A relevância desta pesquisa reside na demonstração de que a integração entre dados sistemáticos, documentais e participativos amplia a capacidade de análise e de gestão dos riscos de inundação, com métodos transferíveis a outras bacias hidrográficas. Esse escopo alinha-se a marcos regulatórios e compromissos internacionais que reconhecem o uso de registros de longa duração como condição para uma gestão hidrológica robusta. A Diretiva 2007/60/CE da União Europeia determina, em seu Artigo 4.º, parágrafo 2, que a avaliação preliminar dos riscos de inundação se baseie em informações disponíveis, como registros e estudos sobre a evolução de longo prazo, em especial os impactos das mudanças climáticas sobre a ocorrência de inundações (União Europeia, 2007); o Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres (2015–2030) tem como Prioridade 1, a compreensão do risco com base em informações sobre desastres passados e no conhecimento comunitário (UNDRR, 2015), o que reforça a importância da integração entre memória histórica, ciência aplicada e resiliência local.

CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica sobre a temática da tese de doutorado, abordando conceitos e definições relacionados aos eventos naturais extremos, desastres hidrológicos, combinação de dados sistemáticos e não sistemáticos, ciência cidadã, probabilidade de ocorrência, reconstrução de inundações e retromodelagem de desastres hidrológicos.

2.1 Eventos Naturais Extremos

Os eventos naturais extremos constituem fenômenos cuja magnitude transcende os limites estatísticos mais frequentes, definindo-se pela conjugação entre baixa probabilidade de ocorrência e elevado potencial destrutivo. Distribuem-se em categorias geológicas (terremotos, erupções vulcânicas e tsunamis), meteorológicas (ciclones, tempestades, ondas de calor e secas) e hidrológicas (inundações, enxurradas e deslizamentos), com franca predominância, no território brasileiro, dos fenômenos vinculados à dinâmica atmosférica (Monteiro, 1991). Por integrarem o funcionamento do sistema terrestre, tais eventos não são passíveis de eliminação e admitem, quando muito, previsão parcial: condição que reposiciona o problema da gestão de riscos, do controle do fenômeno físico para a redução da exposição e da vulnerabilidade dos sistemas a ele submetidos.

Um evento natural extremo só se converte em desastre quando encontra, em seu caminho, áreas antropizadas. Em uma área desabitada, uma grande cheia não passa de um fenômeno natural; é a ocupação humana das margens, as casas, as ruas, as pontes e as redes de infraestrutura erguidas na planície de inundação, que transforma a água em tragédia (Kobiyama *et al.*, 2006). O dano não decorre, portanto, da magnitude física isolada do evento, mas da convergência entre sua perigosidade, a exposição das pessoas e dos bens em seu alcance e a vulnerabilidade do sistema atingido (UNISDR, 2015). É por isso que o limiar a partir do qual uma inundação se torna desastrosa diz menos respeito ao rio do que ao território: onde a ocupação avançou sobre as cotas baixas e a infraestrutura não foi dimensionada para o evento, mesmo cheias de magnitude moderada produzem destruição desproporcional (Merz *et al.*, 2021).

No Brasil, as enchentes, as inundações e os deslizamentos despontam como os eventos naturais extremos mais recorrentes e de maiores prejuízos econômicos e humanos, padrão que decorre tanto das condições climáticas quanto da ocupação histórica de áreas suscetíveis. Sua compreensão exige abordagem multidisciplinar, capaz de tratá-los como fenômenos socioambientais complexos, articulando geociências, climatologia, hidrologia e ciências sociais, e não como ocorrências físicas isoladas (Sornette, 2009).

A esse quadro soma-se a aceleração climática contemporânea. O ano de 2024 foi o mais quente já registrado, com a temperatura média global superando em mais de 1,5 °C os níveis pré-industriais (Copernicus, 2024; 2025), e o aquecimento progressivo da superfície terrestre associa-se diretamente ao aumento da frequência e da magnitude dos eventos extremos de origem meteorológica e hidrológica (Seneviratne *et al.*, 2021). Ainda que parcela da variabilidade observada decorra de oscilações naturais do sistema climático (Trenberth *et al.*, 2015), há convergência na literatura de que a intensificação recente dos extremos, exemplificada pelos eventos do Rio Grande do Sul em 2023 e 2024, vem reescrevendo, em ritmo acelerado, a linha de base climática sobre a qual se assentam as estimativas de risco.

Esse cenário amplia o valor do conhecimento histórico. Comprometida a premissa de estacionariedade e projetada a superação recorrente do registro instrumental recente, a reconstrução do passado hidrológico deixa de ser exercício retrospectivo e converte-se em condição para a adaptação: é a profundidade temporal da série que permite dimensionar magnitudes plausíveis e construir resiliência diante de extremos sem precedentes na janela instrumental (Kelder *et al.*, 2025). Compreender a ocorrência dos eventos naturais extremos e a evolução histórica das inundações da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas constitui, assim, requisito para que sociedades e gestores deixem de ser sistematicamente surpreendidos, premissa que orienta o tratamento dos desastres hidrológicos, das fontes de dados e da retromodelagem nas seções subsequentes.

2.2 Desastres Naturais

O conceito de desastre articula a ocorrência de um evento adverso, natural ou tecnológico, aos seus efeitos sobre populações, infraestruturas e ecossistemas. A Política Nacional de Proteção e Defesa Civil define desastre como o resultado de evento adverso, de origem natural ou induzido pela ação humana, sobre ecossistemas e populações vulneráveis, causando danos humanos, materiais ou ambientais e prejuízos econômicos e sociais (BRASIL, 2012). Os desastres naturais, especificamente, são aqueles provocados por fenômenos e desequilíbrios da natureza, de origem externa e independentes da ação humana (Castro, 2009): quantificam-se em termos de intensidade, função da interação entre a magnitude do evento adverso e a vulnerabilidade do sistema receptor, ao passo que o evento adverso, em si, mede-se por magnitude. Compreender como um fenômeno natural se converte em desastre é, assim, condição para a formulação de estratégias eficazes de redução de risco.

As inundações representam a categoria de desastre natural que mais afeta pessoas no mundo, com uma média anual de 74,60 milhões de pessoas atingidas no período de 2003-2022, correspondendo a 42,50% do total de afetados por desastres naturais (EM-DAT, 2024). Esses números são subestimados, pois desastres naturais que ocorrem em escala local e regional, que ficam abaixo dos limiares do EM-DAT, não entram nas estatísticas dos maiores desastres documentados pelo EM-DAT / CRED e UNISDR.

2.2.1 Desastres Naturais Hidrológicos

Os desastres naturais hidrológicos são causados pela dinâmica da água superficial e subterrânea, ocorrendo devido à falta ou ao excesso de água em determinada região. No Brasil, os desastres naturais hidrológicos[1] são categorizados pela Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE) em inundações, enxurradas e alagamentos (Paixão *et al.,* 2018; Kobiyama *et al.,* 2006).

1. Inundações: *Submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas. O transbordamento ocorre de modo gradual, geralmente ocasionado por chuvas prolongadas em áreas de planície*.
2. Enxurradas: *Escoamento superficial de alta velocidade e energia, provocado por chuvas intensas e concentradas, normalmente em pequenas bacias de relevo acidentado. Caracterizadas pela elevação súbita das vazões de determinada drenagem e transbordamento brusco da calha fluvial. Apresenta grande poder destrutivo.*

[1] A classificação internacional adotada pelo CRED e UNISDR ainda inclui os movimentos de massa úmida nos desastres naturais hidrológicos.

3. Alagamentos: *Extrapolação da capacidade de escoamento de sistemas de drenagem urbana e consequente acúmulo de água em ruas, calçadas ou outras infraestruturas urbanas, em decorrência de precipitações intensas.*

As categorias acima correspondem à classificação oficial adotada para fins de registro e gestão de desastres. Cabe distinguir, contudo, os planos conceituais que essa classificação não explicita. Cheia e enchente designam o processo hidrológico de elevação e posterior recessão do nível de um curso d'água, sendo empregadas como sinônimas nesta tese, em conformidade com o uso corrente no Vale do Taquari, onde "enchente" nomeia a cheia do rio. A inundação, por sua vez, não constitui fenômeno distinto, mas a condição que se instala quando a cheia excede a capacidade da calha e atinge as áreas marginais; toda inundação é, portanto, consequência de uma cheia, ainda que nem toda cheia produza inundação (**Figura 1**). O alagamento, diferentemente, decorre da insuficiência da drenagem urbana e pode ocorrer independentemente do nível do rio.

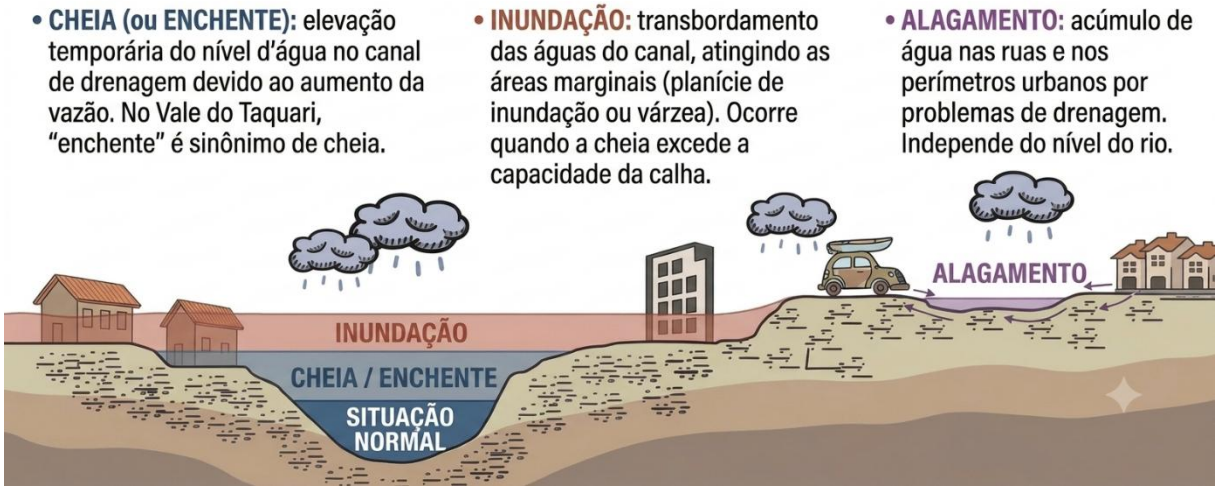


Figura 1 - Representação conceitual de cheia (ou enchente), inundação e alagamento (adaptado de Carvalho; Macedo; Ogura, 2007).

A magnitude e a frequência das inundações dependem da intensidade e distribuição das precipitações, da taxa de infiltração, do grau de saturação do solo e das características morfométricas da bacia de drenagem (Tominaga; Santoro; Amaral, 2009; Oliveira, 2010; Tucci, 2020). Nos períodos chuvosos, os rios saem do seu leito menor (calha) e ocupam o leito maior (planície de inundação), em média a cada dois anos, em um processo natural que leva às inundações (Tucci; Porto; Barros, 1995). Como isso ocorre de forma irregular ao longo do tempo, a população tende a ocupar o leito maior, ficando sujeita ao impacto das enxurradas e das inundações, de ocorrência mais rara (Tucci; Bertoni, 2003).

Na abrangência mundial, as inundações figuram entre os desastres naturais mais frequentes e custosos. A consulta ao EM-DAT, em dezembro de 2024, registra a ocorrência de 5.405 desastres por inundações graduais e bruscas no período de 1980 a 2024, com 279.445 mortes, 1.266.966 feridos e mais de 3,7 bilhões de pessoas afetadas, além de perdas econômicas médias anuais superiores a US$ 21 bilhões (EM-DAT, 2024). O relatório do custo humano dos desastres naturais publicado pelo CRED/UNDRR (2020), comparando os períodos de 2000-2019 e 1980-1999, indicou aumento de 134% nas ocorrências de inundações, que representaram 44% do total de desastres naturais registrados no período mais recente, com 1,65 bilhão de pessoas afetadas e US$ 651 bilhões em perdas econômicas.

No Brasil, mais de 80% dos desastres naturais estão associados a instabilidades atmosféricas severas, responsáveis pelo desencadeamento de inundações, enxurradas, vendavais e deslizamentos (Kobiyama *et al.,* 2006). Do total de 31.909 desastres naturais registrados entre 1991 e 2010, as inundações e enxurradas corresponderam a 33%, resultando em 1.567 óbitos, 309.529 feridos, 1.812 desaparecidos e 3,5 milhões de pessoas impactadas (CEPED, 2012). As inundações catastróficas recorrentes concentram-se ao longo da costa sudeste e sul, alinhando-se com as regiões mais populosas do país, onde há maior número de cidades localizadas às margens de rios (CRED, 2024).

2.2.2 Desastres Naturais na Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas

A Bacia Hidrográfica Taquari-Antas (BHTA) (**Figura 2**), localizada na Região Hidrográfica do Guaíba, possui área de drenagem de 26.430 km², correspondendo a 9% do território do Rio Grande do Sul, e é constituída por 119 municípios, com população estimada de 1.383.442 habitantes (SEMA/RS, 2024). O rio Taquari-Antas pode ser subdividido em dois grandes trechos: na porção a montante, sob a denominação de rio das Antas, está predominantemente encaixado em vale montanhoso, com percurso marcado por forte controle estrutural e litológico; na porção a jusante, sob a denominação de rio Taquari, o vale é formado por depósitos colúvio-aluvionares, com extensas planícies e terraços fluviais (Oliveira *et al.*, 2018). A BHTA apresenta variações significativas das vazões decorrentes de chuvas intensas distribuídas sobre as áreas mais altas da bacia, concentrando grandes volumes de água que se propagam rapidamente até o vale do rio Taquari (Ferri, 1991; Ferreira; Both, 2001; Bombassaro; Robaina, 2010).

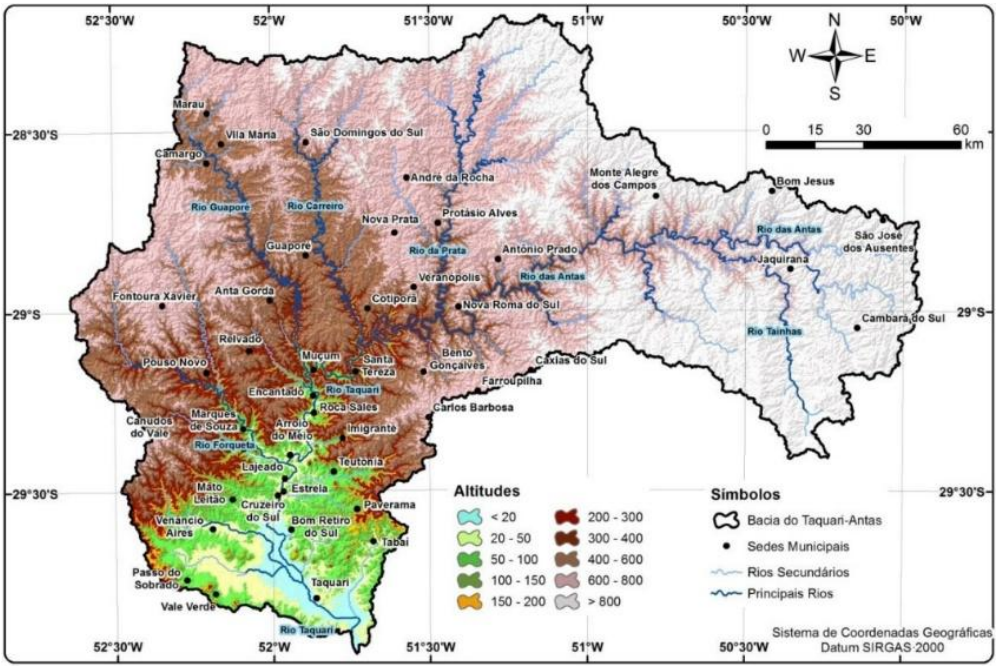


Figura 2 - Bacia Hidrográfica do rio Taquari-Antas (Oliveira *et al*., 2018).

A BHTA apresenta uma amplitude altimétrica de aproximadamente 1.000 metros e declividades superiores a 15%, em praticamente 90% da bacia hidrográfica. Esses fatores, associados com o solo pouco desenvolvido e as condições estáveis do uso e cobertura do solo, favorecem o escoamento superficial e a ocorrência de enchentes e eventos recorrentes de inundações, com mais registros no inverno, primavera e durante os períodos de *El Niño*

(Bombassaro; Robaina, 2010; Moraes *et al*., 2013). Na porção do rio das Antas, e nos principais afluentes, como o Prata, Carreiro, Guaporé e Forqueta predominam as enxurradas, com aumento de nível na ordem de metros por hora, em virtude da menor dimensão destas sub-bacias e a consequente redução no tempo de concentração. No vale do rio Taquari predominam as inundações graduais, com aumento do nível do rio, em geral, na ordem de decímetros por hora, em virtude da grande área de drenagem (Ferri; Togni, 2012).

As inundações na porção baixa do Vale do Taquari são decorrência de fatores naturais da BHTA, não sendo geradas por ações antrópicas (Ferreira; Both, 2001). No entanto, a ocupação intensiva das áreas ribeirinhas, iniciada com a colonização europeia em meados do século XIX, ampliou significativamente a exposição ao risco. O extravasamento das águas do rio Taquari ocorre na região geopolítica do Vale do Taquari, onde se concentram os maiores prejuízos socioeconômicos em razão da ocupação urbana e da infraestrutura instalada às margens do rio (Ferri, 1991). Em inundações de magnitude muito grande, o nível do rio pode aumentar até 17 metros acima do nível de referência, como registrado em maio de 1941, setembro de 2023 e novembro de 2023. Na inundação extraordinária de maio de 2024, a elevação do nível superou 20 metros em diversas seções transversais, na maior catástrofe hidrológica documentada no Rio Grande do Sul (Collischonn *et al.*, 2025).

Na região do Vale do Taquari, há registros fluviométricos desde 1939, compondo 87 anos de monitoramento sistemático, até 2025. A consolidação da série histórica entre Lajeado e Estrela evidencia 194 eventos de cheias que superaram o nível de alerta hidrológico. Os anos de 1983, 1984 e 2023 apresentaram a maior frequência, com 7 eventos por ano. Em apenas 13 anos (14,9% do período) não foram registrados níveis de alerta (Moraes *et al.*, 2024). A consolidação da série histórica, incorporando dados sistemáticos e não sistemáticos com ajuste de todos os níveis para altitude ortométrica verdadeira, demonstrou que 5 das 10 maiores cheias ocorreram após o ano 2000, indicando que as duas últimas décadas foram particularmente desafiadoras. Um período anterior com alta frequência de grandes cheias ocorreu nas décadas de 1940 e 1950, enquanto a década de 1970 não apresenta nenhuma cheia entre as 30 maiores (Moraes *et al.*, 2024). A inundação de maio de 2024, superou em mais do que 4 metros as máximas registradas, como maio de 1941 e setembro de 2023.

O biênio de 2023 e 2024 foi marcado por eventos extremos de magnitude sem precedentes no Vale do Taquari. No evento de setembro de 2023, foram registradas 45 mortes na região, 4 desaparecidos, mais de 1.000 feridos e 35 mil desabrigados, com 790 mil pessoas afetadas em todo o RS (Moraes *et al.*, 2024). Em maio de 2024, o saldo no Vale do Taquari foi de 46 mortos e 19 desaparecidos, com operações de resgate em larga escala envolvendo embarcações e helicópteros. Os municípios mais afetados foram Arroio do Meio, Lajeado, Estrela, Cruzeiro do Sul e Venâncio Aires (Collischonn *et al.*, 2025). Em situações de precipitações com duração mínima de 2 dias consecutivos, bem distribuídas sobre a BHTA e com média superior a 80 mm/dia, já se configura cenário propício para que o nível do rio supere a cota de alerta hidrológico (Ferreira *et al.*, 2007).

A Lei Federal nº 12.608/2012, que instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, estabelece que as medidas não-estruturais devem ser consideradas prioritariamente sobre as medidas estruturais (Brasil, 2007; 2012). Para a BHTA, onde o nível da água durante inundações extraordinárias pode superar 20 metros de variação vertical e as vazões ultrapassam 20.000 m³/s, intervenções estruturais como desassoreamento, implantação de barragens e

retificações tendem a gerar resultados positivos somente no curto prazo e para inundações de pequena e média magnitude, sem efeitos significativos sobre eventos extremos como os de 2023 e 2024. Adicionalmente, obras estruturais podem estimular um falso sentimento de segurança, incentivando a reocupação de áreas de risco (Moraes *et al.*, 2023). Nesse contexto, a priorização de medidas não-estruturais (monitoramento, previsão, preparação, ordenamento territorial, desocupação de áreas destruídas e sistemas de alerta) apresenta maior efetividade e melhor relação custo-benefício. As medidas estruturais devem ser tratadas como estratégias subsidiárias (Carvalho, 2015).

O conhecimento histórico do comportamento hidrológico das bacias, aliando dados de monitoramento, registros históricos, participação social e modelagem computacional, constitui base fundamental para o planejamento territorial e a gestão de riscos de inundações, sendo imprescindível o estudo de eventos pretéritos para analisar tendências de eventos raros (Blöschl *et al.,* 2015).

2.2.2.1 Inundações em Lajeado

A convivência de Lajeado com as inundações do rio Taquari é tão antiga quanto a própria ocupação urbana. Registros documentais descrevem cheias de grande magnitude desde o século XIX, com destaque para o evento de outubro de 1873, retratado na imprensa e na correspondência oficial da Província como calamidade de grandes proporções (Ferri; Togni, 2012). Ao longo do século XX, as inundações de 1912, 1928, 1940, 1941 e 1956 marcaram a memória urbana, e a cheia de maio de 1941, a maior do período instrumental até então, converteu-se em referência hidrológica e urbanística da cidade, orientando decisões de ocupação e de construção por mais de oito décadas (Moraes *et al*., 2024).

Essa história de convivência produziu uma cultura local de registro que singulariza Lajeado no cenário brasileiro. Placas metálicas fixadas em um pilar do Colégio Evangélico Alberto Torres (CEAT) documentam os níveis máximos das principais inundações desde 1912, prática mantida pela comunidade escolar por mais de um século, enquanto jornais regionais, fotografias e as compilações de historiadores locais preservaram a memória dos eventos anteriores ao monitoramento sistemático, iniciado em 1939 (Moraes *et al*., 2024). Essa densidade de registros não sistemáticos, rara em cidades de médio porte, torna o município um caso singular para a hidrologia histórica.

O ciclo recente de desastres hidrológicos reposicionou essa história. As inundações de setembro e novembro de 2023 e, sobretudo, a de maio de 2024 superaram sucessivamente os patamares conhecidos. A sequência evidenciou, ao mesmo tempo, a insuficiência do recorte instrumental para caracterizar os extremos da bacia e o valor dos registros preservados pela comunidade, temas que estruturam a seção seguinte e a metodologia desta tese.

2.3. Dados Sistemáticos, Não Sistemáticos e Ciência Cidadã

A compreensão aprofundada dos desastres hidrológicos, e das inundações recorrentes na Bacia Hidrográfica Taquari-Antas em particular, depende da qualidade e da extensão temporal das bases de dados hidrometeorológicos disponíveis. A caracterização de eventos extremos frequentemente exige informações que ultrapassam as séries instrumentais contínuas, recorrendo a evidências históricas, geológicas, sedimentares e documentais e, mais recentemente, a dados produzidos por ciência cidadã.

A combinação dessas diferentes fontes amplia o alcance espacial e temporal do conhecimento hidrológico por meio da observação participativa e comunitária. Tal integração não apenas fortalece a reconstrução e a retromodelagem de eventos pretéritos, como se verá nos próximos capítulos, mas também reduz as incertezas associadas às lacunas observacionais, sobretudo em regiões onde os registros instrumentais são recentes ou incompletos.

2.3.1 Dados Sistemáticos e Dados Não Sistemáticos

Os dados hidrometeorológicos constituem a base fundamental para a compreensão dos processos hidrológicos e para a gestão de riscos de desastres em bacias hidrográficas. A coleta, o armazenamento e a disponibilização desses dados envolvem diferentes tipos de registros, metodologias de aquisição e aplicações específicas que variam conforme a finalidade do monitoramento e as características institucionais dos programas de coleta. Tradicionalmente, os dados hidrometeorológicos são classificados em sistemáticos e não sistemáticos, cada qual com características distintas quanto à padronização de protocolos, continuidade temporal, cobertura espacial e qualidade das informações.

Os dados sistemáticos provêm de redes oficiais de monitoramento operadas por agências governamentais e caracterizam-se pela coleta quantitativa, regular e padronizada, em locais fixos e intervalos de tempo pré-definidos, com o auxílio de equipamentos e estações de medição. Os dados não sistemáticos, por sua vez, englobam registros históricos, marcas de inundação, relatos de testemunhas e evidências identificadas no próprio ambiente – observações humanas pontuais, sem regularidade temporal ou espacial, que, embora menos estruturadas, preservam informações valiosas sobre eventos extremos passados e sobre processos hidrológicos em áreas não monitoradas. A distinção entre dados sistemáticos e não sistemáticos no escopo da hidrologia foi consolidada por diversos pesquisadores (Stedinger; Cohn, 1986; Francés *et al.*, 1994; Benito *et al.*, 2004; Brázdil *et al.*, 2006; Vanelli; Fan; Kobiyama, 2020) (**Figura 3**).

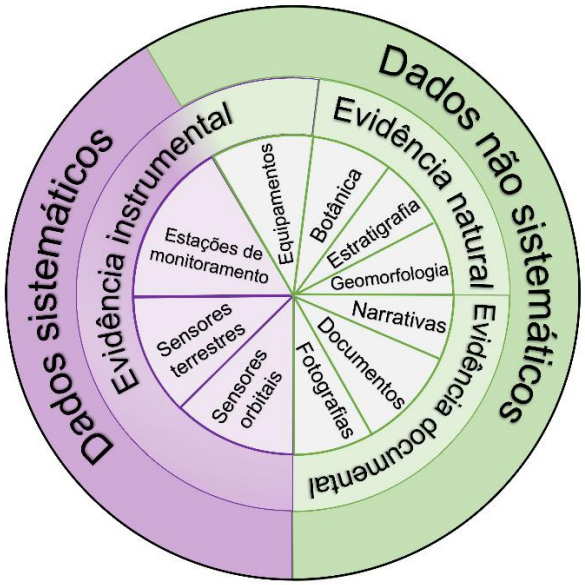


Figura 3 - Categorização dos dados sistemáticos e dados não sistemáticos na hidrologia, considerando as principais as fontes de dados e principais formas de evidências (Vanelli; Fan; Kobiyama, 2020).

Os medidores fluviais fornecem informações hidrológicas essenciais, mas a extensão dos registros é, muitas vezes, limitada. Além disso, séries hidrológicas apresentam, com alguma frequência, lacunas e falhas nos registros, com dados fragmentados e/ou incompletos. Os registros instrumentais só podem ser estendidos para o futuro, quando novos dados forem obtidos, mas não para o passado (Brázdil; Kundzewicz, 2006). No Brasil, as séries hidrológicas são mais recentes, sendo comum que os registros sistemáticos passem a ser observados e registrados após um evento extremo resultar em desastre natural (Catanho *et al.,* 2020). Com poucas séries de dados observados durante períodos longos, inúmeras regiões desconhecem seu passado hidrológico e até duvidam da ocorrência de extremos hidrológicos no passado. Somados, esses fatores normalmente criam uma falsa sensação de segurança habitacional, favorecendo a expansão e a consolidação de áreas urbanas em áreas suscetíveis à ocorrência de fenômenos naturais, resultando em áreas de vulnerabilidade social e de risco de desastres (Vanelli *et al.,* 2020; Silva Júnior; Chaves, 2021; Lopes, 2021).

De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, s.d.; 2007), a rede hidrometeorológica brasileira começou a ser implantada no início do século XX, de modo que o Brasil apresenta séries hidrológicas com dados sistemáticos que compreendem um período máximo próximo a 100 anos. Com séries temporais curtas ou que apresentam períodos sem informações ou com falhas nas observações, há limitações em termos de temporalidade e espacialidade nos dados hidrológicos (Vanelli, 2019).

A memória social relacionada com desastres naturais hidrológicos é, em geral, de curto prazo (Di Baldassarre *et al.*, 2013; Ridolfi *et al.*, 2021). Após a ocorrência de um evento extremo de inundação, com danos sobre as infraestruturas públicas e privadas, prejuízos materiais e econômicos e perda de vidas, aumenta a preferência social por áreas distantes dos rios. No entanto, passadas algumas décadas novos assentamentos humanos se reestabelecem em áreas cada vez mais próximas dos rios e consequentemente em sujeitas às inundações (Fanta *et al*., 2019). Este cenário reforça a importância de realizar estudos com períodos mais longos, além de buscar a difusão desses conhecimentos para a sociedade de forma a criar memórias coletivas capazes de atravessar gerações.

Na comparação com a literatura internacional, onde há farta produção acadêmica sobre inundações extremas e desastres naturais, de forma relativa, há poucos estudos no Brasil. Eventos extremos e desastrosos, mesmo quando ocorreram no passado remoto, devem ser cuidadosamente estudados (Brazdil; Kundzewicz, 2006). Para ampliar a compreensão da dinâmica dos extremos hidrológicos, considerando períodos mais longos, torna-se oportuna a reconstrução de eventos históricos, a partir da combinação de dados observados por monitoramento sistemático e dados registrados de forma não-sistemática, a partir de evidências naturais e evidências documentais, que representam elementos da memória social, como reportagens, registros fotográficos, documentos históricos, marcas em infraestruturas.

A possibilidade de ampliar os registros fluviais através da aquisição de informações sobre eventos pré-instrumentais é muito bem-vinda, sustentando a importância da hidrologia histórica e da paleohidrologia, que visam fornecer conhecimento de eventos hidrológicos fora dos registros instrumentais. A informação hidrológica histórica, normalmente, é limitada em termos de localização, perto de assentamentos humanos. Porém, nem todos os grandes

acontecimentos hidrológicos podem ter sido mencionados na informação histórica, sendo que a sua inclusão depende da percepção humana da época. Os extremos hidrológicos que levaram a grandes perturbações e danos têm maior probabilidade de serem lembrados. Por sua vez, a paleoinformação, encapsulada em dados geofísicos, também está disponível em áreas desabitadas. A combinação de informações instrumentais, históricas e paleohidrológicas, embora constitua tarefa metodologicamente complexa, é reconhecida como estratégia fundamental para a redução de incertezas na caracterização de extremos hidrológicos (Brázdil; Kundzewicz, 2006; Merz; Blöschl, 2008a, 2008b).

O uso combinado de dados observados de forma contínua, com evidências instrumentais (dados sistemáticos) e o uso de evidências naturais, como registros de alterações geomorfológicas, sedimentares e geológicas e de evidências dendrocronológicas da vegetação, além de evidências documentais, como fotografias e marcas em paredes e infraestruturas (dados não sistemáticos), apesar dos desafios mencionados, possibilitam reconstruir cenários de inundações extremas e consolidar séries hidrológicas de frequência de inundações mais longas e com mais informações, auxiliando no entendimento da ocorrência e dos impactos das inundações pretéritas em uma bacia hidrográfica, aspectos que representam uma importante medida não-estrutural na gestão do risco de desastres naturais hidrológicos (Baker, 2000; Vanelli, Fan e Kobiyama, 2020; Moraes *et al.,* 2023).

Na BHTA, os dados sistemáticos provêm das estações pluviométricas e fluviométricas operadas pela ANA/SGB e, historicamente, pela ANEEL/DNAEE e pelo setor elétrico, que monitoram chuva, vazão e níveis do rio Taquari-Antas desde meados da década de 1940; em Lajeado e Estrela, a série de níveis remonta a 1939, sucessivamente assumida pela estação fluviométrica, pelo Porto Fluvial de Estrela e pela telemetria automática atual, operacionalizado oficialmente pelo SGB (Serviço Geológico do Brasil), detalhado no Capítulo 3. Os dados não sistemáticos, por sua vez, encontram-se dispersos em fotografias, jornais, livros regionais e marcações históricas preservadas (Moraes *et al.*, 2024).

No município de Lajeado em especial, há uma riqueza documental significativa de dados não sistemáticos, refletindo ocupação histórica consolidada desde meados do século XIX. Três categorias principais de registros foram identificadas e sistematizadas nesta pesquisa, correspondendo a três tipos de observadores ao longo do tempo. Os registros documentais históricos constituem a primeira categoria, caracterizada por observações de indivíduos que, sem intenção científica, documentaram eventos hidrológicos excepcionais em jornais, atas municipais e correspondências oficiais. As menções mais antigas remontam ao início do século XIX, quando os relatos dos viajantes naturalistas já descreviam cheias generalizadas na região (Saint-Hilaire, 1974 [1887]; Isabelle, 2006 [1835]). Tais registros, embora reunidos e apresentados nesta pesquisa como evidência da profundidade histórica das inundações na BHTA, são de natureza qualitativa e não permitem a reconstituição do nível máximo atingido. Por essa razão, a série de máximos anuais consolidada nesta tese inicia em outubro de 1873, primeiro evento para o qual a documentação disponível, associada às marcas físicas posteriormente aferidas por levantamento topográfico, viabilizou a reconstrução da cota máxima da inundação.

A segunda categoria corresponde às marcas físicas preservadas em edificações (1912-2024), representando observadores que, reconhecendo a importância histórica das inundações, deliberadamente preservaram evidências tangíveis dos níveis máximos atingidos. Na Europa, onde marcas dessa natureza sustentam a análise de cheias históricas há séculos, avaliações sistemáticas demonstram que sua confiabilidade depende da integridade posicional, da continuidade de custódia e da possibilidade de confronto com fontes independentes, critérios que condicionam o aproveitamento quantitativo desses registros (Bösmeier *et al.*, 2022). Edificações históricas de Lajeado mantêm marcas das principais inundações, destacando-se o Colégio Evangélico Alberto Torres - CEAT, onde as marcas das inundações são registradas desde 1912. Levantamentos topográficos realizados com equipamentos de alta precisão (GNSS RTK e Estação Total) permitiram georreferenciar estas marcas com precisão centimétrica, estabelecendo níveis ortométricos confiáveis para validação cruzada. A consistência entre oito marcas históricas e registros instrumentais correspondentes para eventos comuns ao período sistemático (pós-1939) foi verificado e consistido no estudo de Moraes *et al*. (2024), demonstrando confiabilidade dos registros preservados ao longo de décadas.

A terceira categoria engloba fotodocumentação e registros visuais, provenientes de acervos públicos e privados. Fotografias históricas de inundações permitiram identificação de extensão aproximada mediante comparação com feições urbanas permanentes e análise evolutiva através de décadas. Particularmente valiosas são as fotografias da inundação de 1941, amplamente documentada por representar o evento mais significativo registrado até 2023, constituindo referência cultural consolidada na memória coletiva regional. A integração sistemática dessas três fontes de dados não sistemáticos com a série instrumental contínua (1939-2025) viabilizou a consolidação de série histórica de 153 anos (1873-2025) para Lajeado, conforme metodologia detalhada no Capítulo 3 e resultados apresentados no Capítulo 4. Esta abordagem exemplifica como diferentes gerações de observadores, através de distintas formas de registro, contribuíram cumulativamente para a compreensão hidrológica regional.

Em um contexto de necessidade de ampliação da rede de monitoramento hidrológico e de complementação dos dados oficiais, a ciência cidadã emerge como abordagem promissora para o preenchimento de lacunas espaciais e temporais, especialmente em regiões com monitoramento insuficiente como muitas bacias hidrográficas brasileiras, incluindo a Bacia Hidrográfica Taquari-Antas, de certa forma inspirada nas diferentes gerações de observadores descritas acima, que, mesmo sem saber, também exerceram um papel de cientistas cidadãos.

2.3.2 Ciência Cidadã

2.3.2.1 Fundamentos conceituais e evolução histórica

Define-se ciência cidadã como a participação ativa de não especialistas na produção de conhecimento científico, mediante coleta, análise ou interpretação de dados (Bonney *et al.*, 2009). No campo da hidrologia e dos recursos hídricos, o termo designa especificamente o engajamento estruturado de cidadãos na observação e na documentação de variáveis hidrológicas, processos fluviais e fenômenos extremos como inundações (Buytaert *et al.*, 2014).

A participação pública em observações científicas remonta ao século XIX, quando redes de observadores meteorológicos voluntários foram estabelecidas em diversos países. Nos

Estados Unidos, o *Smithsonian Institution* organizou uma rede com mais de 150 observadores, responsáveis pelo registro de temperatura, pressão e precipitação, e cuja base instrumental viabilizou a criação do *National Weather Service* em 1870 (Fleming, 1990). Na ornitologia, o *Christmas Bird Count*, iniciado em 1900 pelo ornitólogo Frank Chapman, produziu mais de 125 anos de dados contínuos amplamente utilizados em estudos de mudanças climáticas e dinâmicas ecológicas, e configura o projeto de monitoramento participativo mais longevo ainda em operação (Link; Sauer, 2007).

A formalização acadêmica do termo *ciência cidadã* ocorreu em meados da década de 1990, em duas vertentes conceituais distintas e contemporâneas. A primeira refere-se à ciência desenvolvida por grupos de cidadãos preocupados com questões ambientais locais, com ênfase na democratização do conhecimento (Irwin, 1995); a segunda focaliza projetos nos quais os cidadãos coletam dados para pesquisadores, com ênfase na contribuição científica gerada (Bonney *et al.*, 2009). Essas perspectivas correspondem a um espectro de participação que vai dos modelos contributivos, nos quais os cidadãos atuam essencialmente como coletores de dados, aos colaborativos, em que participam também do refinamento do desenho da pesquisa, e aos co-criados, em que se envolvem em múltiplas etapas do processo científico, da formulação das perguntas à interpretação dos resultados (Shirk *et al.*, 2012).

A revolução digital das décadas de 1990 e 2000, caracterizada pela expansão da internet, pelo desenvolvimento de GPS de alta precisão e pela disseminação de *smartphones*, alterou substancialmente o panorama da ciência cidadã. O período é descrito na literatura como um novo alvorecer, no qual barreiras logísticas à participação em massa foram dissolvidas pelas tecnologias digitais (Silvertown, 2009). O conceito de *Volunteered Geographic Information* (VGI), definido como dados geográficos fornecidos voluntariamente por indivíduos, formalizou a noção de cidadãos como sensores móveis do ambiente (Goodchild, 2007). A distinção entre ciência cidadã e VGI reside no grau de intencionalidade: o VGI admite contribuições passivas ou incidentais, ao passo que a ciência cidadã pressupõe participação ativa e estruturada.

A intensificação do interesse pela ciência cidadã na hidrologia, observada a partir da década de 2010, decorre da convergência de três fatores: a redução das redes de monitoramento por contingenciamento orçamentário (Mishra; Coulibaly, 2009), o reconhecimento da extensão das áreas não monitoradas e a demanda por dados em múltiplas escalas para a calibração de modelos hidrológicos (Buytaert *et al.*, 2014). O *framework* transdisciplinar CANDHY (*Citizens AND HYdrology*) sintetiza esse movimento ao postular que a ciência cidadã hidrológica eficaz exige a integração entre hidrologia, ciências da computação e ciências sociais, com cidadãos compreendidos não como instrumentos passivos, mas como agentes dotados de capacidade interpretativa e de conhecimento tácito sobre processos locais (Nardi *et al.*, 2022).

No contexto brasileiro, a Lei 9.433/1997 institui princípios de gestão descentralizada e participativa dos recursos hídricos por meio dos Comitês de Bacia Hidrográfica, configurando ambiente institucional favorável à ciência cidadã. Nos países do Sul Global, a participação frequentemente se origina da necessidade de proteção contra desastres e assume dimensão de justiça ambiental que extrapola objetivos puramente científicos (Walker *et al.*, 2016). Essa observação tem aderência direta à presente tese: as três gerações de observadores apresentadas

em §2.3.1, historiadores e autoridades provinciais que documentaram a inundação de outubro de 1873, o Colégio Evangélico Alberto Torres (CEAT), que demarcou e preservou marcas físicas desde 1912, e os voluntários que enviaram localizações via WhatsApp em 2023 e 2024, exemplificam, em escala local, o *continuum* entre proteção comunitária e produção de conhecimento hidrológico, e fornecem o substrato empírico sobre o qual a abordagem metodológica desta pesquisa se constrói.

2.3.2.2 Aplicações da Ciência Cidadã

As aplicações da ciência cidadã na hidrologia distribuem-se entre duas funções complementares. Uma delas é o resgate retrospectivo de observações preservadas em suporte físico e a outra, a documentação de eventos contemporâneos, esta última subdividida entre o monitoramento contínuo de variáveis e o mapeamento de eventos extremos. No contexto de desastres, a abordagem viabiliza a captura de informações em escalas espaciais e temporais inviáveis ao monitoramento convencional sob critérios de custo e logística (Paul *et al.*, 2018), e revisão sistemática sobre sua integração à modelagem de inundações conclui que o valor dessas observações reside não apenas na densidade espacial, mas também na capacidade de capturar processos em escalas temporais que as redes convencionais não abrangem (Assumpção *et al.*, 2018).

A primeira função, de caráter retrospectivo, volta-se ao resgate de observações pretéritas preservadas apenas em suporte físico, que de outro modo permaneceriam inacessíveis à análise científica. O projeto *Rainfall Rescue* mobilizou mais de 16.000 voluntários na transcrição de 5,28 milhões de observações mensais de precipitação registradas no Reino Unido e na Irlanda entre 1677 e 1960 (Hawkins *et al.*, 2023a), enquanto a digitalização dos *Met Office Daily Weather Reports* recuperou cerca de 2,3 milhões de observações diárias dos períodos de 1861 a 1875 e de 1900 a 1910 (Craig; Hawkins, 2020, 2024). O valor desse resgate para a quantificação de risco é direto: a reanálise da tempestade de fevereiro de 1903, viabilizada pela assimilação dos dados recuperados, reclassificou o evento entre os quatro mais severos a atingir a Inglaterra e o País de Gales desde o início dos registros (Hawkins *et al.*, 2023b).

Configura-se assim uma dupla função da ciência cidadã, simultaneamente instrumento de resgate de dados pretéritos e ferramenta de documentação de eventos contemporâneos, distinção de aderência direta a esta pesquisa. A recuperação da inundação de outubro de 1873 apoiou-se de forma decisiva na documentação reunida pelo historiador José Alfredo Schierholt, sem a qual a reconstrução do nível máximo não teria sido possível, e foi complementada pelos periódicos e correspondências oficiais acessíveis na Hemeroteca Digital Brasileira, que caracterizam o evento como catastrófico e fornecem indícios de seu limiar de magnitude. Esse esforço é análogo, em propósito e em método, ao dos voluntários britânicos que resgataram registros do mesmo período histórico, pois em ambos os casos observadores não especialistas, separados por mais de um século, tornaram mensuráveis eventos que a rede instrumental jamais alcançou. A coleta georreferenciada de 2023 e 2024 ocupa o polo oposto desse *continuum*, o da documentação em tempo real.

A segunda função, de documentação contemporânea, manifesta-se primeiro no monitoramento contínuo de variáveis hidrológicas. Plataformas baseadas em aplicativos móveis e em protocolos gamificados de validação cruzada, como o CrowdWater, alcançaram

concordância da ordem de 70% com os registros originais e desempenho comparável ao de estações convencionais na calibração de modelos hidrológicos (Seibert *et al.*, 2019; Strobl *et al.*, 2019; Etter *et al.*, 2020). Experiências na África Subsaariana e na Europa confirmam que, em contextos de monitoramento esparso, observações cidadãs de nível podem substituir ou complementar estações hidrométricas e integrar sistemas operacionais de alerta, com ganhos expressivos em antecedência e na redução do dano esperado (Weeser *et al.*, 2018, 2019; Balbo; Galimberti, 2016; Ferri *et al.*, 2020).

A documentação de eventos extremos, segunda vertente do braço contemporâneo da abordagem da ciência cidadã, é a que mais se aproxima do objeto desta tese. Iniciativas de mapeamento em larga escala demonstram o potencial da mobilização comunitária para a validação de modelos operacionais: a campanha *Catch the King* reuniu 722 voluntários na coleta de 59.718 marcas georreferenciadas de extensão de inundação em um único evento, viabilizando a validação de modelo hidrodinâmico de previsão em escala de rua (Loftis *et al.*, 2019), apoiada nos protocolos padronizados de identificação e levantamento de marcas de cheia sistematizados pelo *United States Geological Survey* – USGS (Koenig *et al.*, 2016). Essas duas referências inspiraram diretamente a abordagem aqui adotada: o levantamento técnico de marcas iniciado em Lajeado em 2007 foi escalonado para participação comunitária a partir de setembro de 2023, quando a magnitude territorial dos eventos da BHTA inviabilizou a coleta feita de forma individualizada.

As mídias sociais consolidaram-se como fonte complementar para o mapeamento rápido de áreas inundadas. A integração de publicações georreferenciadas com sensoriamento remoto e topografia, por modelos bayesianos, e a extração de profundidades a partir de fotografias, inclusive das que contêm pessoas como referência de escala, ampliaram o acervo de dados quantitativos disponíveis durante e após os eventos (Rosser *et al.*, 2017; Fohringer *et al.*, 2015; Feng *et al.*, 2020; Mengistie *et al.*, 2024). Em São Paulo, dados de redes sociais empregados como variável proxy de precipitação elevaram a acurácia de um modelo chuva-vazão de 39% para 71% frente ao uso isolado de dados convencionais (Restrepo-Estrada *et al.*, 2018), e a validação de modelagem hidrodinâmica urbana com dados cidadãos de extensão foi demonstrada em Xangai (Yu *et al.*, 2016). Particularmente próxima desta tese, a reconstituição de eventos pretéritos de inundação em Yeumbeul Norte, área urbana da periferia de Dakar, no Senegal, desprovida de registros oficiais, recuperou a extensão e a profundidade de cheias passadas a partir da memória dos moradores, combinando relatos narrativos e a estimativa de níveis por referências corporais das testemunhas, abordagem especialmente adequada a regiões de séries instrumentais curtas (Sy *et al.*, 2020).

No Brasil, o campo encontra-se em consolidação institucional, marcada pela criação da Rede Brasileira de Ciência Cidadã em 2021 e do Instituto Nacional de Ciência Cidadã em 2023 (SBPC, 2025). Modelos de alerta hidrológico de base participativa integraram níveis reportados por cidadãos a dados convencionais, com ganho mensurável na previsão de enchentes mesmo sob as incertezas da coleta voluntária (Fava *et al.*, 2019), e a modelagem socio-hidrológica que combina registros documentais e engajamento comunitário, aplicada à bacia do Gregório, em São Carlos, evidenciou o valor dos dados não sistemáticos e da participação social na compreensão do risco em perspectiva temporal ampliada (Sarmento Buarque *et al.*, 2020; Souza *et al.*, 2024).

Os trabalhos mais próximos do caso da BHTA situam-se na bacia do Alto Paranapanema. Modelos digitais de elevação gerados por drones de baixo custo superaram produtos satelitais de acesso livre na representação de feições relevantes para inundações e foram validados contra entrevistas com moradores e marcas preservadas em postes de energia, georreferenciadas com GNSS RTK (Bassanelli *et al.*, 2026); na mesma bacia, a integração de ciência cidadã com modelagem hidrodinâmica em HEC-RAS para a reconstituição de eventos pretéritos alcançou índice Kappa de 0,7 e Nash-Sutcliffe de até 0,79, com a memória dos moradores subsidiando a análise de frequência de vazões de pico (Santos *et al.*, 2026). Ambos compartilham três premissas com esta pesquisa: a escassez de séries instrumentais contínuas, o uso de marcas físicas preservadas pela comunidade como referência altimétrica e a validação cruzada com depoimentos de moradores.

Na Bacia Hidrográfica Taquari-Antas, as inundações de setembro de 2023 e maio de 2024 motivaram a implementação de iniciativa de ciência cidadã baseada no compartilhamento de localização georreferenciada via WhatsApp nos pontos de máximo alcance horizontal da inundação. Em setembro de 2023, 190 participantes enviaram 626 localizações distribuídas por 14 municípios, às quais se somaram 196 localizações em maio de 2024. Esses dados cumpriram duplo propósito metodológico, a calibração do modelo hidrodinâmico HEC-RAS e a validação quantitativa das manchas de inundação simuladas (Moraes *et al.*, 2025; Parma, 2025). As manchas validadas com os dados de 2023 foram disponibilizadas publicamente e utilizadas operacionalmente durante o evento de maio de 2024 como referência de áreas suscetíveis, orientando o pré-posicionamento de recursos e as rotas de evacuação, e a metodologia foi posteriormente adaptada para outras bacias do Rio Grande do Sul, com participação de outras universidades, o que evidencia sua replicabilidade (Moraes *et al.*, 2025).

2.3.2.3 Qualidade dos dados, validação e desafios

A qualidade dos dados oriundos da ciência cidadã constitui aspecto crítico para o desempenho de aplicações operacionais, particularmente quando esses dados subsidiam decisões críticas de resposta a desastres. Os principais desafios envolvem a precisão e a acurácia das medições, afetadas pela variabilidade em equipamentos e técnicas, vieses do observador relacionados à experiência e à motivação, e cobertura espacial e temporal não uniforme (Kosmala *et al.*, 2016).

Protocolos de garantia de qualidade bem-sucedidos articulam quatro elementos: treinamento contextualizado, com instruções fornecidas imediatamente antes da coleta; *feedback* contínuo aos participantes acerca do uso de seus dados; validação cruzada por meio da comparação de observações de múltiplos voluntários sobre o mesmo objeto; e *benchmarking* que confronta subconjuntos das contribuições com medições de referência (Freitag *et al.*, 2016). Métodos estatísticos de correção compreendem modelos de efeitos mistos, que modelam a variação entre observadores; filtragem espacial, que identifica *outliers* inconsistentes com a vizinhança; e abordagens bayesianas, que incorporam conhecimento prévio sobre processos hidrológicos (Wiggins *et al.*, 2011).

Trabalhos recentes que combinam relatos comunitários com marcas físicas preservadas e topografia de alta resolução demonstram que a redundância espacial dos relatos (múltiplas entrevistas convergindo para o mesmo padrão de inundação) constitui mecanismo eficaz de

mitigação da incerteza individual de memória, sobretudo quando submetida a validação cruzada com evidência física e controles topográficos (Bassanelli *et al.*, 2026). O protocolo aplicado na BHTA incorpora esse princípio: a coleta por WhatsApp foi distribuída espacialmente entre múltiplos voluntários por município, e cada ponto recebido foi posteriormente confrontado tanto com as marcas físicas do CEAT quanto com os pontos GPS de campanhas técnicas anteriores (capítulo 3.6).

Análises de sustentabilidade indicam que os fatores críticos para a retenção da participação incluem a percepção de que as contribuições são valorizadas, oportunidades de aprendizado, senso de comunidade e conexão com a questão ambiental (Domroese; Johnson, 2017). As questões éticas relevantes envolvem a privacidade dos dados quando localizações de residências são georreferenciadas, a propriedade intelectual sobre os dados coletados e a equidade na participação, com risco de exclusão de grupos marginalizados sem acesso digital (Haklay, 2013).

2.3.2.4 Contribuições para gestão de riscos e memória social

A ciência cidadã oferece benefícios que transcendem a coleta de dados, da ampliação da cobertura espacial e da obtenção de dados em escalas temporais apropriadas aos processos de interesse até a alfabetização científica, o empoderamento comunitário e o fortalecimento da governança participativa, ganhos que assumem relevância particular no contexto de desastres (Paul *et al.*, 2018; Bonney *et al.*, 2009). Na BHTA, a participação de dezenas de voluntários, muitos diretamente afetados pelas inundações, aproximou universidade, comunidades e veículos de comunicação, em consonância com os princípios de gestão participativa da Política Nacional de Recursos Hídricos (Moraes *et al.*, 2025).

A contribuição para a memória coletiva configura benefício crítico e frequentemente negligenciado. A percepção de risco tende a decair no intervalo de uma a duas décadas após um evento, favorecendo a reocupação de áreas atingidas e a renovação cíclica da vulnerabilidade (Di Baldassarre *et al.*, 2013; Sarmento Buarque *et al.*, 2020; Souza *et al.*, 2024). A marcação física permanente de níveis máximos e a documentação georreferenciada, associadas aos dados de ciência cidadã, produzem registros tangíveis que informam gerações futuras e operam como antídoto à erosão dessa memória. A possibilidade de comparar quantitativamente os eventos de 2023 e 2024 aos registros recuperados desde 1873 ilustra esse valor para a análise de frequência e, potencialmente, para a delimitação de áreas suscetíveis, com implicações diretas para o planejamento territorial.

Esses elementos sustentam a posição adotada nesta tese, a de que a ciência cidadã constitui pilar epistemológico autônomo, e não recurso acessório a um modelo previamente calibrado. A demonstração mais nítida dessa autonomia ocorreu em maio de 2024, quando a destruição de estações fluviométricas durante a cheia interrompeu o monitoramento sistemático justamente no evento de maior magnitude já documentado, e a recuperação dos níveis máximos passou a depender de levantamentos topográficos pós-evento e da observação cidadã. Nessas circunstâncias, a observação cidadã deixa de complementar a rede instrumental e a substitui, fornecendo o dado primário sem o qual a reconstrução do evento seria inviável. Os dados assim obtidos articulam-se aos registros sistemáticos e não sistemáticos na reconstrução histórica de inundações e na retromodelagem hidrodinâmica, objeto da seção 2.5.

2.4 Análise de Frequência e integração de dados não sistemáticos

Grande parte dos princípios da hidrologia é inferida a partir de séries históricas, isto é, de conhecimentos que resultam da observação sistemática no decorrer do tempo. Dados hidrológicos como precipitações e vazões de enchentes constituem eventos de natureza histórica, porque cada um deles representa um evento que não pode ser repetido sob o controle de um experimentador. Diferentemente dos dados experimentais, que podem ser verificados por meio da repetição do experimento, os dados hidrológicos não podem ser confirmados por reprodução do fenômeno, tornando-se necessária a observação continuada para sua completa análise, comparação e verificação (Garcez, 1967). Os processos hidrológicos são aleatórios, contínuos e estocásticos, e seu tratamento pressupõe a quantificação de variáveis que se desenvolvem no tempo e no espaço (Lanna, 2020).

A distinção entre frequência e probabilidade é fundamental: frequência refere-se a eventos observados, enquanto probabilidade refere-se a eventos futuros não conhecidos. A passagem de frequências observadas para probabilidades de ocorrência futura requer representatividade da amostra, tanto em extensão temporal quanto em qualidade dos dados. Caso não ocorram modificações substanciais no processo natural de formação das vazões, aceita-se que as frequências de ocorrência do passado descrevem as probabilidades de ocorrência no futuro (Lanna, 2020). As séries amostrais podem ser anuais, utilizando a vazão máxima de cada ano, ou parciais (*peak over threshold*), selecionando todos os valores acima de limiar definido. O ajuste de distribuições de probabilidades baseia-se em três premissas: independência dos valores amostrais, estacionariedade do processo natural e representatividade da amostra (Tucci, 2020).

A estacionariedade de uma série temporal hidrológica constitui premissa importante para a análise de frequência, o cálculo dos tempos de retorno e o dimensionamento de obras hidráulicas. Uma série é considerada estacionária quando suas propriedades estatísticas (média, variância e autocovariância) não mudam ao longo do tempo. A identificação de mudanças sistemáticas e persistentes pode manifestar-se como tendências lineares monotônicas, tendências não lineares caracterizadas por mudanças graduais ou abruptas, ou alterações na amplitude das flutuações (Salas *et al.*, 1980; Yue *et al.*, 2002).

A premissa de estacionariedade tem sido objeto de debate na literatura hidrológica contemporânea. A provocação de que a estacionariedade estaria "morta" como premissa para a gestão de recursos hídricos (Milly *et al.*, 2008) motivou investigações sobre a real natureza das tendências observadas em séries de cheias. Análises em escala continental na Europa demonstraram que aumentos aparentes na frequência de cheias podem refletir maior exposição e ocupação de áreas vulneráveis, e não necessariamente mudanças nos processos hidrológicos (Blöschl *et al.*, 2015). De forma complementar, a agregação temporal de eventos em *clusters* (períodos com concentração de cheias seguidos de períodos de quiescência) pode ser erroneamente interpretada como tendência monotônica quando na verdade reflete variabilidade natural de longo prazo (Machado *et al.*, 2015). Esses estudos reforçam a importância de séries longas, e da incorporação de dados não sistemáticos, para distinguir variabilidade natural de tendências reais, aspecto diretamente relevante para a interpretação da série de 153 anos consolidada para o rio Taquari em Lajeado (Seção 4.5).

O Coeficiente de Spearman (ρs) destaca-se como um método não-paramétrico para detecção de tendências monotônicas em séries hidrológicas, sendo utilizado para analisar a estacionariedade, validar a aplicabilidade da análise de frequência e prognósticos probabilísticos em previsões (Spearman, 1904; Yue *et al*., 2002). As **Equações 1** (coeficiente de Spearman), **2** (média do coeficiente), **3** (variância do coeficiente) e **4** (estatística t de ***student***) descrevem as equações fundamentais do Teste de Estacionariedade:

$$\boldsymbol{\rho s} = 1 - 6\sum(Ryi - Rxi)^2 / n(n^2 - 1) \quad (\mathbf{1})$$

$$\boldsymbol{E(\rho s)} = 0 \quad (\mathbf{2})$$

$$\boldsymbol{Var(\rho s)} = 1/(n-1) \quad (\mathbf{3})$$

$$\mathbf{t} = [\rho s\sqrt{(n-2)}] / [\sqrt{(1-\rho s^2)}] \quad (\mathbf{4})$$

ρs *= coeficiente de correlação de Spearman (rho)*

Rxi *= posto do elemento xi na série em ordem natural*

Ryi *= posto do valor xi na série ordenada de forma crescente*

n *= número de elementos da amostra*

t *= estatística t de Student calculado*

E(ρs) *= esperança (média) do coeficiente de Spearman*

Var(ρs) *= variância do coeficiente de Spearman*

O teste fundamenta-se na hipótese nula (H_0) de ausência de tendência monotônica na série, condição associada à estacionariedade, contra a hipótese alternativa (H_1) de presença de tendência, indicativa de não estacionariedade. O critério de decisão compara o |t calculado| ao valor crítico da distribuição t de Student, com (n − 2) graus de liberdade, ao nível de significância α = 0,05. Quando |t calculado| ≤ t crítico, não se rejeita H_0, e a série é considerada estacionária quanto à tendência, validando os métodos probabilísticos convencionais; quando |t calculado| > t crítico, rejeita-se H_0 em favor de H_1, e a não estacionariedade passa a exigir tratamento estatístico específico. O sinal de ρs indica a direção da tendência, positivo para crescente e negativo para decrescente (Salas *et al.,* 1980; Yue *et al*., 2002).

Considerando que as enchentes e inundações são fenômenos hidrológicos naturais imprevisíveis quanto a sua ocorrência, o estudo probabilístico e de previsão das cheias através da análise de frequência é importante para quem planeja o uso das várzeas sujeitas às inundações. Para isto, é importante saber a periodicidade mínima e máxima de ocorrência das cheias. O Período de Retorno ou Intervalo de Recorrência (*Ir*) é o inverso da probabilidade de determinado evento hidrológico ser igualado ou excedido em um ano qualquer e pode ser calculado pela **Equação 5** (Tucci, 2020):

$$Ir = \frac{1}{P} \quad (\mathbf{5})$$

Ir = Intervalo de Recorrência;

P = Probabilidade de Ocorrência.

A frequência relativa de ocorrência das cotas máximas, estimador empírico da probabilidade, é dada pela razão entre o número de ocorrências e o tamanho da série (**Equação 6**) (Tucci, 2020). Na presente tese, contudo, as probabilidades não derivam apenas dessa frequência empírica: resultam do ajuste de distribuições teóricas à série consolidada de máximos anuais, com parâmetros estimados por inferência bayesiana, conforme detalhado na Seção 3.5.

$$F = fi/n \quad (6)$$

F = Frequência relativa;

fi = Número de vezes que determinada cota de inundação ou vazão máxima ocorreu;

n = Número de anos da série histórica.

As distribuições de probabilidade mais empregadas na hidrologia de extremos incluem a Log-Normal, a Gumbel e a Log-Pearson Tipo III (LP3) (Tucci, 2002; 2020). A análise de enchentes em 300 estações fluviométricas nos Estados Unidos, comparando diferentes métodos de ajuste, identificou a Log-Normal e a Log-Pearson III como as únicas distribuições sem resultados tendenciosos, com a LP3 apresentando o desempenho mais consistente (Beard, 1974). Pela consistência demonstrada e pela recomendação oficial do Bulletin 17C (England *et al.*, 2019), a LP3 é detalhada a seguir.

Distribuição Log-Pearson III: segundo Tucci (2020), a distribuição Log-Pearson III possui três parâmetros: média, desvio padrão e coeficiente de assimetria dos logaritmos das vazões (**Equações 07 a 12**). A estimativa desses parâmetros é obtida por:

$$\overline{X} = \frac{\sum \log Q_i}{N} \quad (7)$$

$$s^{-1} = \sqrt{\frac{\sum (\log(Q_i - \overline{X})^2}{N-1}} \quad (8)$$

$$G = \frac{N \sum (\log\ Q_i - \overline{X})^3}{(N-1)(N-2)\, s^3} \quad (9)$$

A estimativa da vazão para um tempo de retomo T é obtida pela equação a seguir, onde K(T,G) é obtido com base na **Tabela 1** (TUCCI, 2020).

$$\log Q_T = \overline{X} + K\,(T, G)\, s \quad (10)$$

Para valores de G entre -1 e 1, o valor de K pode ser estimado pela formulação a seguir, onde K_n é o coeficiente para G = 0 da **Tabela 1** (TUCCI, 2020):

$$K = \frac{2}{G}\left\{\left[\left(K_n - \frac{G}{6}\right)\frac{G}{6} + 1\right]^3 - 1\right\} \quad (11)$$

A equação de posição de plotagem recomendada para a distribuição **Log-Pearson III** é a seguinte:

$$P = \frac{i - 0{,}40}{N + 0{,}10} \quad (12)$$

i = é a posição das vazões (ordem decrescente)

N = tamanho da amostra.

Tabela 1 - Valor de K para a distribuição Log-Pearson Tipo III (Tucci, 2020).

G	PROBABILIDADES					
	0,50	**0,20**	**0,10**	**0,04**	**0,02**	**0,01**
3,0	-0,396	0,420	1,180	2,278	3,152	4,051
2,6	-0,368	0,499	1,238	2,267	3,071	3,889
2,2	-0,330	0,574	1,284	2,240	2,970	3,705
1,8	-0,282	0,643	1,318	2,193	2,848	3,499
1,4	-0,225	0,705	1,337	2,128	2,706	3,271
1,0	-0,164	0,758	1,340	2,043	2,542	3,022
0,6	-0,099	0,800	1,328	1,939	2,359	2,755
0,2	-0,333	0,830	1,301	1,818	2,159	2,472
0,0	0,0	0,842	1,282	1,751	2,054	2,326
-0,2	0,033	0,850	1,258	1,680	1,945	2,178
-0,6	0,099	0,857	1,200	1,528	1,720	1,880
-1,0	0,164	0,852	1,128	1,366	1,492	1,588
-1,4	0,225	0,832	1,041	1,198	1,270	1,318
-1,8	0,282	0,799	0,945	1,035	1,069	1,087
-2,2	0,330	0,752	0,844	0,888	0,900	0,905
-2,6	0,368	0,696	0,747	0,764	0,768	0,769
-3,0	0,396	0,636	0,660	0,666	0,666	0,667

Embora a formulação por fator de frequência constitua a referência conceitual da LP3, a estimação dos parâmetros adotada nesta tese é bayesiana, por Markov Chain Monte Carlo, abordagem que dispensa o cálculo direto do fator K e quantifica explicitamente a incerteza paramétrica (Reis; Stedinger, 2005), conforme a Seção 3.5.

A incerteza das estimativas para um dado período de retorno é quantificada por intervalos que delimitam a faixa dentro da qual o quantil (cota estimada) se mantém, a um dado nível. Na abordagem clássica, esses intervalos são de confiança; na abordagem bayesiana adotada nesta tese, são intervalos de credibilidade, derivados da distribuição preditiva posterior, que incorpora a incerteza dos parâmetros estimados (Reis; Stedinger, 2005).

A combinação de dados sistemáticos e não sistemáticos para fins probabilísticos é abordagem crítica de redução de incerteza, por ampliar a base amostral temporal (Merz; Blöschl, 2008a, 2008b). O Teorema de Bayes fornece a base para integrar informação prévia, derivada de registros históricos e paleohidrológicos, às observações instrumentais recentes, atualizando as distribuições de probabilidade por inferência bayesiana (Stedinger; Cohn, 1986). Essa abordagem incorpora simultaneamente múltiplas fontes, séries sistemáticas, registros históricos e informação regional, e quantifica de forma explícita as incertezas associadas a cada tipo de dado, inclusive erros de medição e imprecisões documentais (Viglione *et al.*, 2013).

Demonstrou-se matematicamente que a inclusão de informação sobre eventos extremos passados, ainda que apenas como limites inferiores associados a um limiar de percepção, reduz a variância dos estimadores de quantis extremos (Stedinger; Cohn, 1986). Além de ajustar os

parâmetros das distribuições, essa abordagem permite estimar diretamente os intervalos de credibilidade dos quantis de projeto (Viglione *et al*., 2013). Para distribuições GEV de dois parâmetros, a comparação entre variâncias assintóticas e simulações de Monte Carlo mostrou que o ganho estatístico depende de três fatores: a razão entre os períodos histórico e sistemático (r = M/N), o período de retorno do quantil de interesse (T) e o período de retorno do limiar de percepção (H) (Francés *et al.*, 1994).

A combinação formal de dados sistemáticos e não sistemáticos na análise de frequência consolidou-se a partir da proposta de expandir a informação para além da amostra local, nas dimensões temporal, espacial e causal, e de integrá-la por raciocínio hidrológico (Merz; Blöschl, 2008a, 2008b); a implementação bayesiana dessa proposta demonstrou redução significativa da incerteza nos quantis extremos (Viglione *et al.*, 2013). Avanços recentes na incorporação de evidências documentais passaram a tratar explicitamente as incertezas dos dados não sistemáticos, mostrando que mesmo informações imprecisas ou de natureza linguística reduzem os intervalos de credibilidade dos quantis, desde que as incertezas dos limiares de percepção e dos períodos históricos sejam adequadamente quantificadas (Kjeldsen *et al*., 2014; Salinas *et al*., 2016; Parkes; Demeritt, 2016; Lucas *et al*., 2024).

Na bacia do Alto Paranapanema, a integração de marcas históricas de inundação e ciência cidadã à modelagem hidrodinâmica bidimensional permitiu recuperar eventos extremos do período pré-instrumental, e a inclusão desses eventos alterou de forma expressiva as curvas de frequência e as vazões de projeto, evidenciando que análises baseadas apenas em séries sistemáticas curtas subestimam a variabilidade natural do processo (Santos *et al.,* 2026). Para o rio Taquari em Lajeado, a incorporação dos registros não sistemáticos de 1873 a 1938 à série instrumental de 1939 a 2025 amplia a extensão temporal da análise de 87 para 153 anos e a amostra de máximos anuais de 87 para 91 eventos. A quantificação do ganho associado a essa integração é apresentada nos Resultados (Seções 4.5.4 e 4.5.5), mediante comparação explícita entre a análise conduzida apenas com dados sistemáticos e a que incorpora os registros históricos, com os intervalos de credibilidade obtidos da distribuição preditiva posterior. Essa comparação permite demonstrar empiricamente o valor informacional dos registros não sistemáticos para a estimativa de cotas extremas extremos e para a gestão de riscos hidrológicos.

2.5 Retromodelagem e Reconstrução de Eventos Extremos de Inundações

2.5.1 Modelagem Hidrológica e Hidráulica

A modelagem hidrológica simula o ciclo da água em uma bacia (precipitação, interceptação, infiltração, evapotranspiração e escoamento) para compreender e prever o comportamento das vazões, podendo ser definida como a representação matemática do fluxo de água e de seus constituintes sobre a superfície terrestre (Maidment, 1993; Rennó; Soares, 2003). A modelagem hidráulica, por sua vez, representa o movimento da água em rios e canais a partir da geometria, da rugosidade, da declividade e da interação com infraestruturas, com base nas equações de Saint-Venant derivadas das equações de Navier-Stokes (Tucci, 2005). As duas abordagens correspondem às duas fases dos processos de modelagem de bacias: a geração e separação dos escoamentos (fase chuva-vazão) e a propagação das vazões pelos canais (fase hidráulica), e ambas são centrais para a representação de eventos extremos de inundações e enxurradas (Muhlenhoff *et al.*, 2016; Monte *et al.*, 2016) (**Figura 4**).

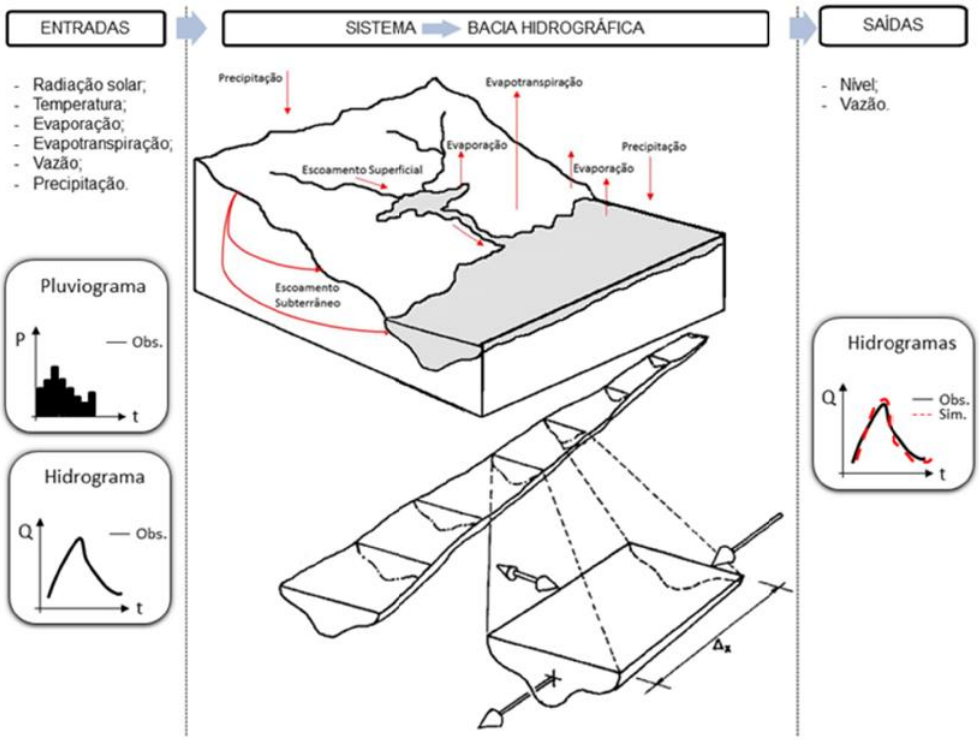


Figura 4 - Processos em uma bacia hidrográfica a serem representados e simulados em um modelo hidrológico, hidráulico ou combinado (Muhlenhoff *et al*., 2016).

Os modelos hidráulicos distinguem-se pela dimensionalidade com que representam o escoamento. A modelagem unidimensional (1D) assume fluxo predominantemente longitudinal, eficiente em canais lineares mas incapaz de reproduzir a difusão lateral da onda de cheia (Hunter *et al.*, 2007); a modelagem bidimensional (2D) representa o terreno como superfície contínua e captura a interação lateral entre o canal principal e a planície de inundação, sendo a mais adequada para áreas urbanas e planícies extensas (Bates *et al.*, 2005; Cook, 2008); e a modelagem tridimensional (3D) resolve as equações completas de Navier-Stokes, reservada a reservatórios, estuários e estruturas complexas (Pinos; Timbe, 2019). Entre as ferramentas computacionais consolidadas para simulação preditiva e retroativa de cheias destacam-se o HEC-RAS (USACE, 2025), amplamente empregado na simulação de águas rasas e profundas em rios e áreas inundáveis; o MGB-IPH, modelo hidrológico distribuído para grandes bacias (Collischonn *et al.*, 2007; Paiva; Collischonn; Buarque, 2013); e o MIKE FLOOD (DHI, 2025). A escolha pela modelagem bidimensional no HEC-RAS, adotada na presente tese, decorre justamente da necessidade de representar a interação entre o canal do rio Taquari e suas planícies urbanas na área de estudo.

2.5.2 Conceituação e Aplicações da Retromodelagem

A fronteira entre inundações desastrosas e não desastrosas não é nítida e depende do contexto de exposição: um evento de período de retorno de 200 anos não seria desastroso nos Países Baixos, protegidos para 1.250 anos, ao passo que um evento de 20 anos pode ser catastrófico em cidades sem proteção (Merz *et al.*, 2021) (**Figura 5**). Mais relevante para a reconstrução de eventos pretéritos é o reconhecimento de que inundações extraordinárias são, com frequência, causadas por processos físicos distintos daqueles que governam as cheias

comuns, de modo que a simples extrapolação estatística a partir de eventos rotineiros pode subestimar tanto a magnitude quanto os mecanismos dos eventos raros (Merz *et al.*, 2021).

A retromodelagem de extremos busca reconstruir eventos passados combinando dados históricos e técnicas computacionais de simulação, reproduzindo as condições hidrológicas e hidráulicas de períodos pretéritos (Li *et al.*, 2019; Catanho *et al.*, 2020). A distinção em relação à modelagem preditiva é temporal: enquanto esta antecipa condições futuras a partir de cenários atuais, a retromodelagem emprega informações históricas para recriar eventos passados, com o objetivo de calibrar e validar modelos e elucidar os mecanismos envolvidos (Remo; Pinter, 2007; Remo *et al.*, 2009; Vanelli, 2019). Em termos operacionais, pode ser definida como o uso de métodos computacionais e modelos modernos, combinados aos dados hidrológicos disponíveis da condição passada, para estimar variáveis desconhecidas a partir dos processos-chave que causam ou previnem desastres hidrológicos (Possa *et al.*, 2022).

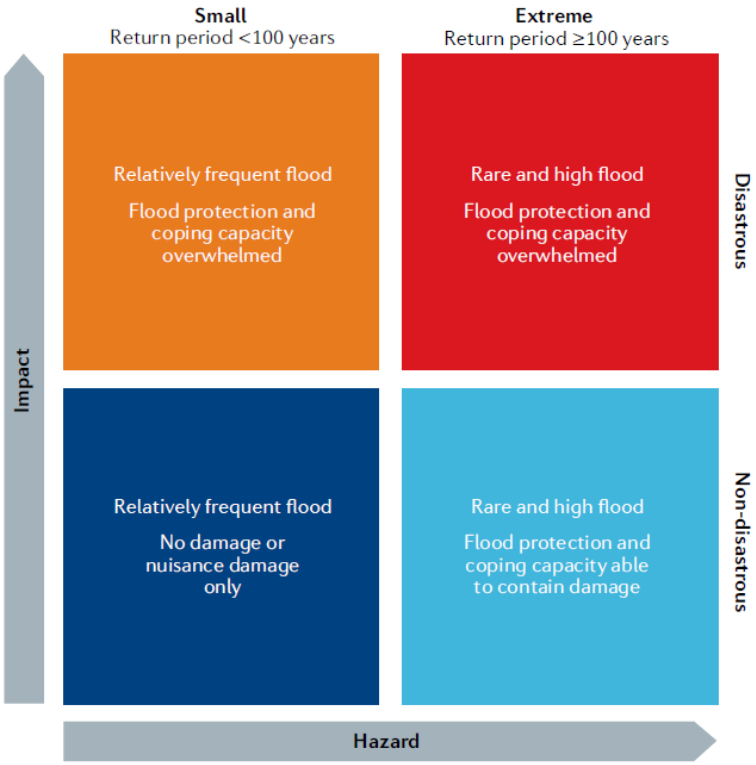


Figura 5 - Diagrama de categorização das inundações em pequenas e extremas (Merz *et al.*, 2021).

As aplicações abrangem desde o suporte ao planejamento territorial e à formulação de políticas de gestão de riscos até a incorporação das lições do passado em planos de contingência e diretrizes de uso e ocupação do solo (Brázdil; Kundzewicz, 2006; Wetter *et al.*, 2011). Sua principal contribuição metodológica, contudo, reside na ampliação da base amostral para a análise de frequência: a combinação de informações instrumentais, históricas e paleohidrológicas permite obter estimativas mais precisas dos quantis de cheia e reduzir a incerteza associada aos eventos raros (Merz; Blöschl, 2008a, 2008b; Viglione *et al.*, 2013). Modelos calibrados de forma retroativa tendem ainda a apresentar maior robustez quando aplicados a condições futuras, o que articula diretamente a retromodelagem à análise de frequência discutida na sessão 2.4.

2.5.3 Ferramentas e Métodos para Retromodelagem

A retromodelagem, como método de reconstrução de inundações, pode ser hidrológica ou hidrodinâmica e depende fundamentalmente da combinação de três tipos de dados (Ruiz-Bellet *et al.*, 2015; Bachri *et al.*, 2021) (**Tabela 2**). Os dados instrumentais, oriundos de estações hidrometeorológicas, oferecem alta resolução temporal porém extensão histórica limitada; os dados históricos (registros documentais, marcas de inundação preservadas em edificações e relatos de testemunhas) estendem a análise para períodos mais longos e permitem capturar cheias de magnitude significativa não registradas pela rede instrumental (Wetter *et al.*, 2011); e os dados paleohidrológicos, obtidos por análises sedimentológicas e dendrocronológicas, ampliam a janela analítica à escala geológica (Benito *et al.*, 2004; 2015; 2021). A esses se somam, desde a segunda metade do século XX, bases digitais georreferenciadas e produtos de sensoriamento remoto (imagens de satélite, fotografias aéreas históricas e levantamentos por drone), que favorecem a espacialização fidedigna das manchas de inundação (Kumar *et al.*, 2023).

Tabela 2 - Fonte de dados, resolução temporal, informações do nível / vazão e extensão dos registros dos dados sistemáticos (instrumentais) e não sistemáticos (evidências documentais e paleoinundações).

Flood data source	Resolution	Flood stage/discharge	Record length
Instrumental hydrology: Annual maximum/partial duration series from gauged records	Daily	Flood water level known / eventually problems with large flow water levels	decades
Historical hydrology: Documentary archives, recorded marks, observed water level, newspapers	Annual-daily	Flow level known or not; censored data with stage above perception level	centuries
Palaeoflood hydrology: Slackwater flood deposits, silt lines, boulder berms, erosion lines, scars and damage on trees	Annual-decades or unknown	Minimum water stage known; censored data with stage above geomorphic level	millennia

Fonte: Benito *et al*. (2015), adaptado de Benito e O'Connor (2013).

Aos dados instrumentais incorporados na entrada dos processos de modelagem somam-se, desde a metade final do século XX, informações espaciais digitais georreferenciadas como mapas e bases digitais, além de produtos de sensoriamento remoto, incluindo imagens de satélite, fotografias aéreas históricas e imagens de drones. A integração dessas fontes permite reconstruir a evolução da paisagem com foco na retromodelagem e favorece a espacialização fidedigna das manchas de inundação, na forma de mapas de inundação que representam a extensão e a profundidade dos eventos (Kumar *et al.*, 2023).

A terminologia de classificação dos eventos evoluiu para refletir o reconhecimento de que a natureza do registro é mais determinante que a escala temporal do evento. A classificação original em eventos pré-históricos, históricos e modernos (Baker, 1987) foi reformulada nos termos *paleoinundação*, *inundação histórica* e *inundação instrumental*, que se referem não ao tempo do evento, mas à forma de obtenção do registro: por evidências físicas, por observação humana ou por medição direta (Brázdil *et al.*, 2006) (**Figura 6**). No contexto brasileiro, a tipologia de *evidência instrumental*, *evidência documental* e *evidência natural* complementa essa classificação ao explicitar a origem da fonte (Vanelli *et al.*, 2020). Na presente tese adota-se a fusão das duas terminologias: dados sobre paleoinundações são obtidos por evidências

naturais, enquanto dados sobre inundações históricas provêm de uma diversidade de evidências documentais.

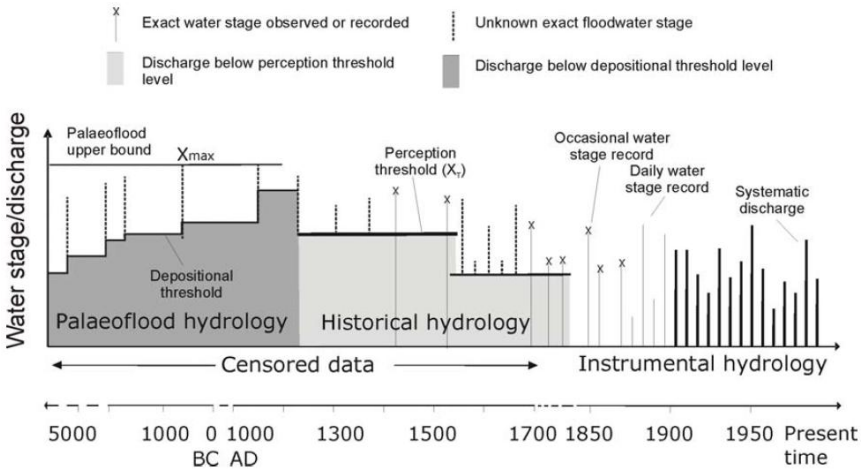


Figura 6 - Diagrama esquemático mostrando a combinação de registros de enchentes e inundações obtidos por aferição instrumental, por documentação histórica e por paleoinundações (Brázdil *et al*., 2006).

Um conceito central para a interpretação correta de séries históricas é o limiar de percepção (*perception threshold*): apenas inundações com pico acima de determinado nível deixam registro permanente (Benito *et al.*, 2004) (**Figura 7**). Nos registros documentais, esse limiar não é fixo: ele decresce à medida que a ocupação humana avança em direção ao rio, pois mais famílias passam a residir em cotas baixas e infraestruturas como pontes, estradas e portos são construídas em níveis inferiores, de modo que cheias antes imperceptíveis passam a deixar marca (Brázdil *et al.*, 2006; Benito *et al.*, 2015). A consequência é que o número de inundações documentadas cresce ao longo do tempo, mesmo quando o processo natural de geração das cheias permanece inalterado (**Figura 8**). Reconhecer esse comportamento é essencial para evitar interpretar o crescimento aparente da frequência como mudança real do processo hidrológico.

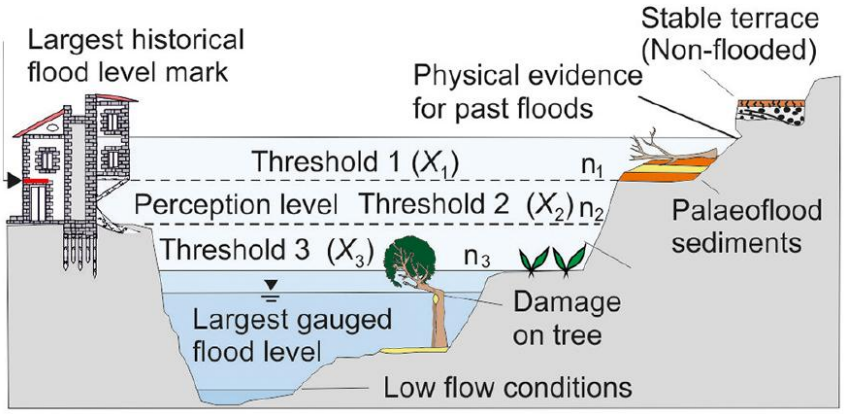


Figura 7 - Seção transversal mostrando vários níveis de inundações históricas e os diferentes limiares de percepção[2] (Benito *et al*., 2015)

[2] Seção transversal mostrando vários níveis de inundações, desde paleoinundações no nível mais alto (*provenientes de registros estratigráficos das cheias, uma vez que a sedimentação de cada camada de inundação produz um incremento vertical na elevação do limiar de deposição, representados por*

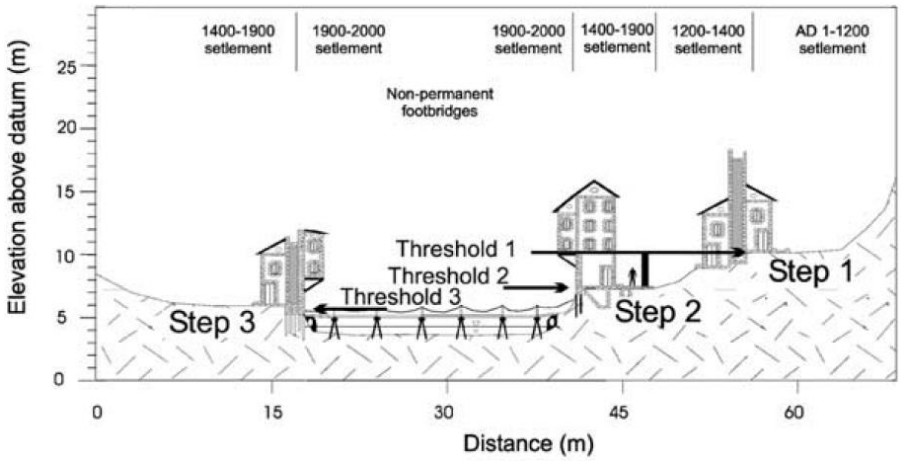


Figura 8 - Esquema ilustrando a percepção da mudança do nível das inundações ao longo do tempo com a progressiva ocupação humana em direção ao rio (Benito *et al*., 2015).

A informação documental sobre o nível máximo de cheia organiza-se em três tipologias de precisão decrescente (Brázdil *et al.*, 2006). A primeira reúne marcas registradas em edificações, muros, pontes e rochas, que fornecem o nível exato do pico e constituem a fonte mais confiável para calibração; a segunda compreende registros que descrevem a inundação de áreas e infraestruturas sem indicar a profundidade, úteis como limite inferior do nível atingido; a terceira abrange informações sobre áreas comprovadamente não inundadas, que estabelecem o limite superior. A combinação das três permite delimitar intervalos de credibilidade para os níveis reconstruídos.

A conversão dos níveis máximos em vazão configura um problema inverso: a vazão de pico é obtida iterativamente, alimentando o modelo hidráulico com valores provisórios até que os níveis simulados correspondam aos observados nas marcas históricas (Francés, 2004; Brázdil *et al.*, 2006). Entre os dados necessários – declividade, rugosidade (coeficiente de Manning *n*), geometria da seção e condições de contorno –, a geometria da seção é a mais incerta para eventos pretéritos, pois o leito pode ter sofrido alterações ao longo do tempo; por isso recomenda-se ancorar a calibração em trechos de leito rochoso, onde as características hidráulicas se mantêm estáveis (Thorndycraft *et al.*, 2006). A representação do canal composto (combinação do canal principal com as planícies adjacentes) exige atenção aos processos de troca de momento e às camadas de cisalhamento entre os dois domínios, o que justifica a adoção de modelos bidimensionais em áreas urbanas (Bates *et al.*, 2005), como na presente tese.

A medição instrumental direta das maiores cheias é frequentemente inviável: a alta velocidade e turbulência do fluxo impõem risco a pessoal e equipamentos, e as estações podem ser inundadas, danificadas ou destruídas, de modo que os dados das maiores inundações dentro dos registros sistemáticos são, muitas vezes, estimativas indiretas pós-evento (Benito *et al.*, 2004). O colapso da rede fluviométrica durante o evento de maio de 2024 na BHTA, discutido na Seção 2.3.2, tornou a obtenção dos níveis máximos dependente de levantamentos

evidências físicas de sedimentos e danos na vegetação) e eventos de inundações baseadas em documentação histórica, capazes de causar danos ou perturbações socioeconómicas. Para a hidrologia histórica, são registradas apenas inundações que excedam um nível de cheia relacionado a um limiar de percepção (X*i*) durante um período de n*i* anos (n1 > n2 > n3) (Benito *et al*., 2015).

topográficos pós-evento e de ciência cidadã, situação metodologicamente análoga à reconstrução dos eventos do século XIX, ainda que com instrumentos contemporâneos. O paralelo evidencia que a fronteira entre dados sistemáticos e não sistemáticos é menos nítida do que a literatura sugere, pois, em eventos extremos, mesmo a rede instrumental moderna falha e a recuperação dos picos passa a depender de fontes complementares.

O processo de retromodelagem desenvolve-se em três etapas, como na modelagem hidrodinâmica (Moraes *et al.*, 2023) (**Figura 9**): definição dos dados de entrada (geometria do canal, modelo digital do terreno, seções topobatimétricas, estruturas hidráulicas e condições de contorno); calibração (ajuste da declividade, do coeficiente de Manning e dos pontos de controle do nível máximo, com vazão conhecida ou ajustada por iteração); e simulação hidrodinâmica (execução, validação e geração das manchas de inundação). Um dos diferenciais para a retromodelagem é a aplicação dos modelos calibrados com fenômenos conhecidos e aplicados a cheias históricas reconstruídas. A calibração, ajuste dos parâmetros para reproduzir os dados observados com o melhor desempenho possível, não é trivial e é a principal responsável pelo sucesso da aplicação prática dos modelos (Paiva *et al.*, 2013; Jahandideh-Tehrani *et al.*, 2020). A validação subsequente compara os resultados com registros independentes, permitindo localizar falhas e aferir a confiabilidade dos produtos por três vias reconhecidas: comparação entre observado e simulado, comparação entre modelos distintos e avaliação por especialistas (Molinari *et al.*, 2019). Apoiadas na combinação de dados sistemáticos e não sistemáticos, essas etapas elevam substancialmente a qualidade dos resultados em regiões complexas e com poucos dados, base sobre a qual se apresentam, a seguir, os estudos de caso que ilustram diferentes escolhas metodológicas na retromodelagem de extremos.

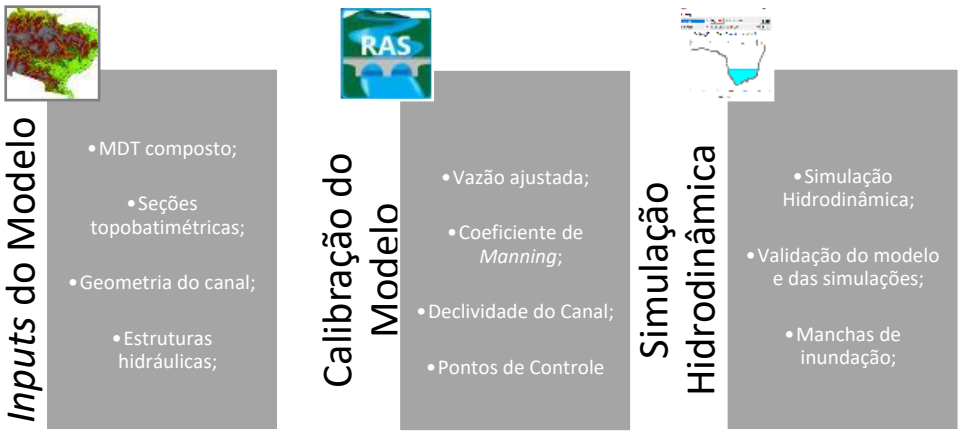


Figura 9 - Fluxograma simplificado da estrutura da retromodelagem de inundações extremas observadas no passado (Moraes *et al*., 2023).

2.5.4 Estudos de Caso de Retromodelagem em Extremos Hidrológicos

A combinação de dados sistemáticos e não sistemáticos é a principal via para ampliar as séries históricas, qualificar a análise de frequência de extremos e viabilizar a reconstrução de eventos catastróficos. A literatura internacional converge em quatro contribuições recorrentes: a incorporação de inundações raras à análise probabilística; a reconstrução dos eventos extremos mais significativos; a estruturação, calibração e validação da retromodelagem

hidrológica, hidráulica ou combinada e; a geração de manchas simuladas que representam a propagação no canal e nas planícies. Os casos a seguir foram selecionados por dialogarem com as escolhas metodológicas desta tese.

A integração de registros instrumentais, documentais e paleohidrológicos para a reconstrução de séries multisseculares constitui linha consolidada de pesquisa na Europa, tendo sido inaugurada metodologicamente pelo programa SPHERE, que estabeleceu diretrizes pioneiras em bacias da Espanha e da França (Benito; Thorndycraft, 2004; Benito *et al.*, 2004). Essa abordagem multiproxy demonstrou que as magnitudes das inundações contemporâneas frequentemente não podem ser consideradas excepcionais no contexto do último milênio (Brázdil *et al.*, 2006; Benito *et al.*, 2015), e permitiu identificar, em doze rios da Europa Central e oito do Mediterrâneo, quatro períodos de maior frequência de cheias (1540–1600, 1640–1700, 1730–1790 e 1790–1840) correlacionados com anomalias da Pequena Era Glacial (Glaser *et al.*, 2010). O exemplo mais paradigmático é a reconstrução das maiores cheias do Alto Reno, em Basileia, ao longo de 740 anos (1268–2008): a combinação de medições instrumentais contínuas desde 1808, de marcas preservadas no *Schönbeinhaus* cobrindo 1641–1882, de crônicas históricas desde o final da Idade Média e de uma seção transversal do leito desenhada em 1819 sustentou a quantificação das vazões em modelo hidráulico calibrado iterativamente, produzindo uma série de seis eventos catastróficos e quarenta e três severos (Wetter *et al.*, 2011). A calibração apoiou-se inclusive em informações qualitativas dos relatos (como descrições de que "a ponte parecia flutuar sobre o rio"), cruzadas com perfis topográficos para reconstruir as cotas, num procedimento de cruzamento entre marcas físicas e narrativas documentais diretamente análogo ao material disponível para a cheia de 1873 em Lajeado.

A reconstrução iterativa que acopla modelagem hidrológica e hidráulica para recriar simultaneamente precipitação e vazão a partir de marcas de cheia consolidou-se na Península Ibérica, sobretudo para bacias sem monitoramento contínuo (Ruiz-Bellet *et al.*, 2015). A tempestade extrema de 1874 em Santa Tecla (Catalunha), reconstruída no HEC-RAS acoplado ao HEC-HMS com o método *Curve Number*, evidenciou a forte sensibilidade das estimativas de pico às condições iniciais (umidade antecedente do solo e rugosidade) e foi posteriormente revisitada sob abordagem multidisciplinar de quatro dimensões (histórica, hidráulica, hidrológica e meteorológica), incorporando dados do *20th Century Reanalysis* para identificar os processos atmosféricos desencadeadores (Balasch *et al.*, 2010; Ruiz-Bellet *et al.*, 2015). A consolidação de bases de dados históricas estruturadas, como a Prediflood na Catalunha (mais de 1.100 eventos desde 1035), constitui infraestrutura fundamental para a retromodelagem em escala regional (Barriendos *et al.*, 2014), enquanto aplicações do método *step-backwater* – como a reconstrução da cheia de 1617 no rio Llobregat, que indicou vazão de pico de 4.680 m³/s, mais que o dobro do maior registro instrumental (Thorndycraft *et al.*, 2006) – e a avaliação de alterações hidráulicas em sistemas antropizados, como no rio Mississippi (Remo; Pinter, 2007; Remo *et al.*, 2009), ilustram a diversidade de contextos da abordagem. Em escala milenar, a retromodelagem hidráulica chega à reconstrução de paleoinundações por depósitos de água parada, como no rio Hanjiang, na China, com vazões estimadas superiores a 50.000 m³/s para eventos datados entre 9.500 e 1.700 a.C. (Guo *et al.*, 2015).

A retromodelagem hidrodinâmica bidimensional aplicada a bacias urbanas com longa documentação histórica configura a referência metodológica internacional mais direta para a

presente tese. Na bacia do rio Duero, na Espanha, a integração de dados históricos (1250–1871), pré-instrumentais (1872–1919) e sistemáticos (1920–2018) permitiu identificar 69 inundações no período histórico e reproduzir, em modelagem 2D no *software* Iber, a extensão e a profundidade da mancha de inundação na cidade de Zamora a partir das marcas documentadas (Benito *et al.*, 2021) (**Figura 10**). Desse estudo, dois achados são especialmente relevantes para a BHTA: a maior cheia, de 1860, atingiu 3.450 m³/s, e 82% dos eventos extremos associaram-se a rios atmosféricos transportando umidade subtropical, mecanismo análogo ao transporte atmosférico de umidade em escala continental observado no evento de maio de 2024. De forma complementar, a reconstrução numérica da cheia de 1876 no rio Guadiana, em Badajoz, acoplando HEC-HMS e modelagem 2D no Iber+, exemplifica a avaliação da interação entre infraestruturas históricas e o escoamento, em particular o efeito da Ponte de Palmas sobre os níveis a montante antes de seu colapso (González-Cao *et al.*, 2021). Em conjunto, os dois trabalhos ibéricos demonstram a maturidade da retromodelagem 2D urbana e fornecem o arcabouço metodológico de referência para a abordagem adotada nesta tese.

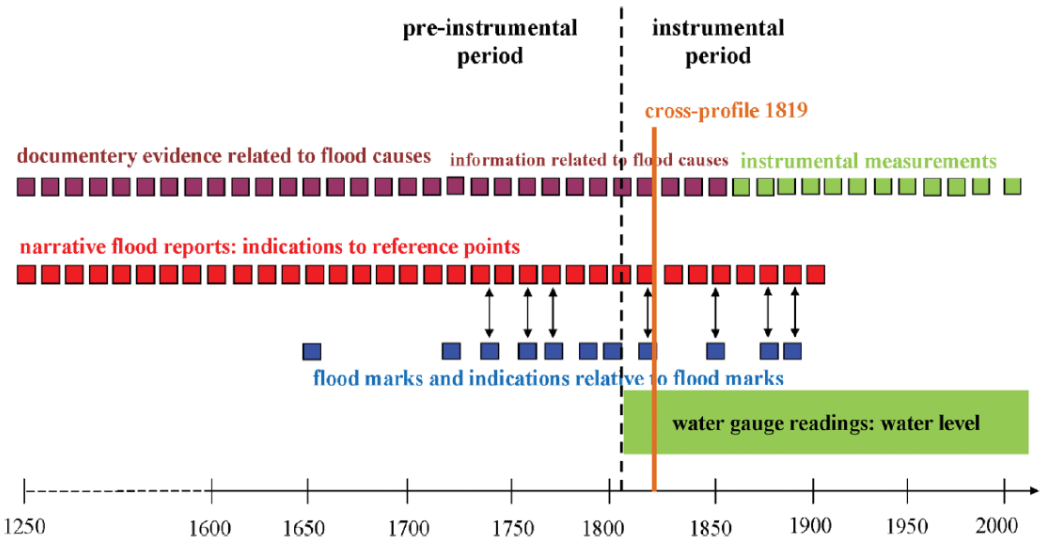


Figura 10 - Diagrama esquemático da combinação de dados sobre inundações na Bacia Hidrográfica do Alto Reno.[3] (Wetter *et al*., 2011)

No Brasil, a reconstrução e a retromodelagem de extremos encontram-se em estágio intermediário de desenvolvimento, com avanços progressivos nas últimas duas décadas. A dendrocronologia de *Cedrela odorata* na Amazônia e no Nordeste indicou que variações hidrológicas extremas do século XIX foram comparáveis às contemporâneas, sugerindo que anomalias recentes podem situar-se dentro da variabilidade natural de longo prazo (Granato-Souza; Stahle, 2023). A análise de frequência das maiores cheias do rio São Francisco, por inferência bayesiana acoplada à retromodelagem hidráulica no HEC-RAS, incorporou cinco eventos extremos do período 1712–1926 à série sistemática, ampliando a base amostral para 291 anos (Lima, 2005). Reconstruções de eventos contemporâneos por acoplamento chuva-

[3] Dados coletados no período pré-instrumental (a partir de 1268), baseado em evidências documentais relacionadas às causas das inundações, como medições instrumentais de temperatura e precipitação (roxo), relatórios narrativos com indicação de pontos de referência inundados (vermelho) e marcas físicas de inundações (azul), além de medições da vazão máxima e/ou do nível de inundações extremas com instrumentos hidrológicos de monitoramento, no período de 1808 em diante (Wetter *et al*., 2011), contemplando um período total de análise de 740 anos.

vazão e hidráulica foram demonstradas para os rios Una e Mundaú, em Pernambuco e Alagoas (Ribeiro Neto *et al.*, 2015; Monte *et al.*, 2016).

Particularmente próxima à abordagem desta tese é a retromodelagem da inundação histórica de 1974 no rio Tubarão (SC), conduzida com o MGB-IPH e integrando dados históricos e memórias da população na calibração, com taxa de acerto de 90% na extensão da mancha simulada (Vanelli *et al.*, 2020). No Rio Grande do Sul, a simulação da enchente de 1941 em Porto Alegre demonstrou a contribuição do vento de quadrante sul para a elevação do nível de cheia, efeito posteriormente confirmado em maio de 2024 (Possa *et al.*, 2022; Collischonn *et al.*, 2025); a retromodelagem do evento de 2017 na bacia do rio Rolante combinou HEC-HMS e modelagem 2D utilizando pluviômetros não oficiais de agricultores locais como dado de entrada (Guirro; Michel, 2023); e a retromodelagem hidráulica no HEC-RAS da inundação de 09 de julho de 2020 em Lajeado constitui o antecedente direto da presente tese (Moraes *et al.*, 2023).

A convergência entre ciência cidadã, dados históricos e retromodelagem hidrodinâmica configura linha de pesquisa em consolidação no Brasil, na qual esta tese se insere. A modelagem socio-hidrológica que integra registros documentais e engajamento comunitário evidenciou como a participação social amplia a compreensão dos riscos em perspectiva temporal alargada (Sarmento Buarque *et al.*, 2020), enquanto a integração de ciência cidadã com modelagem 2D no HEC-RAS para reconstituição de eventos pretéritos na bacia do Alto Paranapanema alcançou índice Kappa de 0,7 e coeficiente Nash-Sutcliffe entre 0,79 e 0,91, com os eventos recuperados alterando substancialmente as curvas de frequência (Santos *et al.*, 2026).

Na BHTA, o modelo bidimensional calibrado utilizado nesta tese (Parma, 2025) e a campanha de ciência cidadã que coletou 626 localizações georreferenciadas em 14 municípios em setembro de 2023, com 200 pontos adicionais em maio de 2024 (Moraes *et al.*, 2025), sustentam uma cadeia de validação temporal, do presente para o passado, na qual a calibração com dados contemporâneos confere robustez crescente à retromodelagem dos eventos pretéritos de 1941 e 1873. A modelagem do evento de maio de 2024 no sistema Jacuí–Taquari–Guaíba (Laipelt *et al.*, 2026) complementa esse esforço como referência regional para análises hidrodinâmicas de eventos contemporâneos no Rio Grande do Sul.

2.5.5 Limitações da Retromodelagem e Perspectivas Futuras

As limitações da retromodelagem associam-se à complexidade dos processos físicos, à qualidade dos dados disponíveis e às incertezas das simulações. A representação simplificada da dinâmica fluvial pode gerar imprecisões em bacias topograficamente complexas, e a escassez de séries históricas de precipitação, de informações topobatimétricas detalhadas e de coeficientes de rugosidade calibrados constitui a principal restrição à validação dos modelos (Molinari *et al.*, 2019; Kumar *et al.*, 2023). Como os modelos são aproximações da realidade, a qualidade da entrada determina a qualidade do resultado (Kobiyama; Manfroi, 1999).

Distingue-se, ainda, a previsão de variáveis hidrológicas da representação fidedigna dos processos: a primeira pode ser obtida sem compreensão do mecanismo subjacente, como demonstram as aplicações recentes de aprendizado de máquina (Nearing *et al.*, 2021); a reconstrução de eventos extremos para fins de gestão de riscos, contudo, exige modelos que

reproduzam fielmente os mecanismos físicos da geração e propagação das cheias (Beven, 2019). Soma-se a isso a cautela de que as condições do passado podem não refletir as transformações em curso sob mudanças climáticas, o que demanda monitoramento contínuo das variáveis meteorológicas (Vanelli *et al.*, 2020; Fischer, 2024).

A retromodelagem deve, portanto, ser entendida como ferramenta complementar, a ser utilizada em conjunto com outras abordagens e sem substituir o monitoramento sistemático (Teegavarapu; Nayak, 2017). A incorporação de dados históricos e/ou paleohidrológicos amplia a base para calibração e validação e permite avaliar a frequência e a magnitude das inundações em período estendido, enquanto a crescente disponibilidade de sensores remotos e de plataformas de monitoramento em tempo real abre oportunidade para superar limitações em regiões pouco monitoradas (Kumar *et al.*, 2023). Essas considerações fundamentam as escolhas metodológicas adotadas no presente trabalho, apresentadas a seguir.

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

A concepção metodológica geral da pesquisa está sintetizada no fluxograma apresentado na **Figura 11**. O fluxograma ilustra a sequência lógica das etapas metodológicas, organizadas em três categorias: entradas de dados (primeira linha), processos desenvolvidos (segunda linha) e produtos (terceira linha). A estrutura metodológica articula quatro componentes principais: (i) consolidação da série histórica quantitativa de 153 anos (1873–2025); (ii) análise de frequência de cotas máximas anuais da série histórica combinada; (iii) mapeamento de áreas inundadas com apoio de ciência cidadã; e (iv) modelagem hidrodinâmica de eventos contemporâneos e retromodelagem de inundações passadas do rio Taquari em Lajeado.

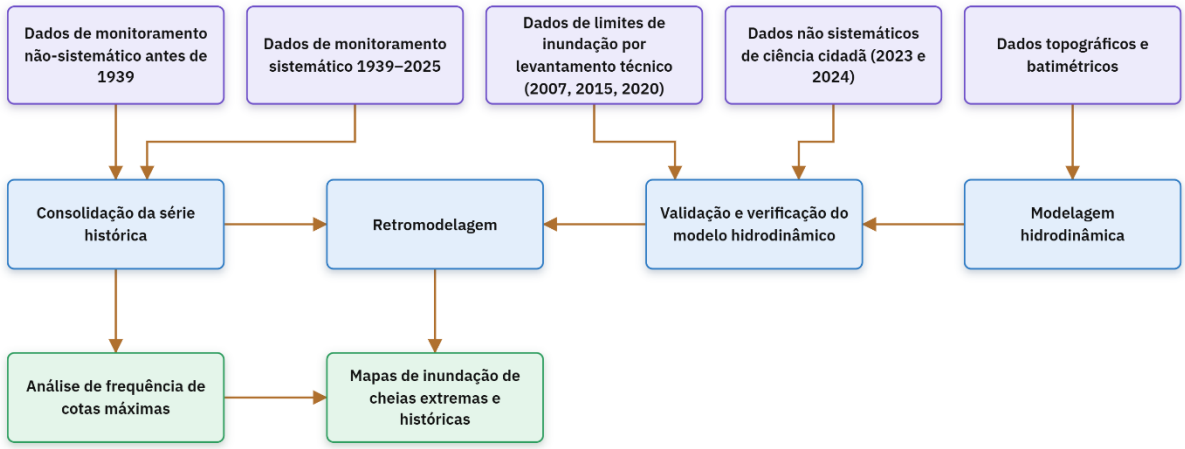


Figura 11 - Fluxograma metodológico

A primeira etapa metodológica consistiu na consolidação da série histórica de inundações de Lajeado, integrando diferentes categorias temporais de dados de entrada. Os dados de monitoramento sistemático (1939–2025) foram obtidos junto à Rede Hidrometeorológica Nacional, gerida pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), por meio do portal HidroWeb, e junto aos registros do Porto Fluvial de Estrela. Os dados não sistemáticos, anteriores a 1939, foram levantados a partir dos registros de historiadores locais, das marcas físicas preservadas em edificações, de fotografias históricas, de publicações e do acervo da Hemeroteca Digital Brasileira; a partir de 1873, essas fontes permitiram a reconstrução quantitativa dos níveis d'água mediante levantamentos topográficos. Cabe destacar aqui, a transdisciplinaridade observada naqueles que fizeram registros no decorrer do tempo, demonstrando a importância dos diferentes profissionais e comunidade para gerar este conhecimento histórico.

Os dados de ciência cidadã (2023–2024) foram coletados pelos voluntários participantes com uso do GPS de seus telefones celulares e transmitidos através do aplicativo WhatsApp durante os eventos extremos em Lajeado, resultando em pontos georreferenciados de marcas de inundação (Moraes *et al.*, 2025). Além dos dados de nível, os limites máximos da área inundada foram levantados em campo com rastreadores GPS em três cheias contemporâneas anteriores (2007, 2015 e 2020), constituindo dados de referência independentes para a verificação espacial do modelo hidrodinâmico. O conjunto de limites de área inundada abrange, assim, cinco cheias contemporâneas de diferentes magnitudes, obtidas por levantamento

técnico e por ciência cidadã. Essa integração de fontes permitiu consolidar uma série histórica quantitativa de 153 anos (1873–2025) de níveis máximos anuais para Lajeado.

A série histórica consolidada gerada na primeira etapa foi insumo para as duas esmetodológicos subsequentes. O primeiro consistiu na análise de frequência de cotas máximas anuais, considerando a série de dados instrumentais (1939–2025) integrada aos dados não sistemáticos (1873–1938). O segundo envolveu a simulação hidrodinâmica bidimensional no *software* HEC-RAS, estruturada em duas frentes: a modelagem dos eventos contemporâneos, destinada à validação do modelo com dados de monitoramento, levantamentos técnicos de limite de inundação e ciência cidadã, abrangendo cinco cheias de diferentes magnitudes; e a retromodelagem dos eventos pré-instrumentais de 1873 e 1941. O modelo hidrodinâmico foi construído a partir de dados topográficos e batimétricos disponíveis e calibrado por Parma (2025) para o mesmo domínio de estudo; à presente tese coube a validação do modelo, com base nos limites de inundação de cinco cheias contemporâneas, e sua aplicação à retromodelagem, conforme detalhado na seção 3.7.

Como principais produtos da integração de dados sistemáticos e não sistemáticos, são apresentados nos resultados a análise de frequência de cotas máximas e os mapas de inundação de cheias extremas históricas e recentes. Entre os eventos simulados estão as inundações de outubro de 1873, maio de 1941, setembro de 2023 e maio de 2024, quatro das cinco maiores inundações registradas em Lajeado desde o início dos registros. Diversos *softwares* foram utilizados como ferramentas auxiliares na preparação das bases de informações e na geração dos produtos: ArcGIS para processamento de dados espaciais, AutoCAD para edição de geometrias, Google Earth Pro para interpretação de imagens e Global Mapper para conversão de dados topográficos, garantindo a interoperabilidade das informações na modelagem no HEC-RAS e na elaboração dos mapas. A análise de frequência da série histórica foi conduzida no RMC-BestFit.

3.1 Caracterização da área de estudo

O município de Lajeado situa-se na região central do Rio Grande do Sul, no Vale do Taquari, entre as latitudes 29°24′ e 29°30′ S e as longitudes 51°55′ e 52°08′ W, a 117 km de Porto Alegre. Ocupa posição intermediária entre a borda do Planalto Meridional e a Depressão Central Gaúcha, e essa posição resume a arquitetura da bacia que o atravessa: a montante, o rio das Antas corre encaixado nos basaltos da Formação Serra Geral, sob forte controle estrutural; a jusante, já como rio Taquari, o curso se desenvolve sobre depósitos colúvio-aluvionares, com planícies e terraços fluviais (Oliveira *et al.*, 2018). Das nascentes, acima de 1.000 m de altitude, à foz no rio Jacuí, a cerca de 5 m, o rio principal percorre 530 km — 390 km como rio das Antas e 140 km como rio Taquari — e sua declividade média decresce de 4,8 m/km no planalto, acima de 700 m, para 1,6 m/km nas encostas e 0,2 m/km na baixada, abaixo de 200 m: trecho que se inicia na foz do rio Guaporé e no qual se assenta Lajeado, sobre relevo plano a suavemente ondulado (FEPAM, 2001). A rede de drenagem densa, as declividades elevadas das porções alta e média e os solos pouco profundos e de baixa permeabilidade explicam o escoamento rápido e as variações bruscas de vazão que caracterizam a bacia (Siqueira *et al.*, 2015). O clima é subtropical úmido, Cfa abaixo de 600 m e Cfb no planalto, com chuva distribuída ao longo do ano e sem estação seca (FEPAM, 2001); a precipitação média anual

varia de cerca de 1.430 mm no trecho inferior, que inclui Lajeado, a cerca de 1.950 mm nas cabeceiras a noroeste (SGB, 2024). No limite norte, com Arroio do Meio, o Taquari recebe o rio Forqueta (**Figura 12**).

As inundações no trecho de estudo dependem, portanto, da chuva sobre a bacia a montante, e não da chuva local: dois dias consecutivos com média superior a 80 mm/dia, bem distribuídos sobre a bacia, bastam para que o rio supere a cota de alerta (Ferreira *et al.*, 2007). A inundação de julho de 2020 (27,39 m) foi precedida por 210 mm em 72 h e 337 mm em dez dias (Moraes *et al.*, 2023); no evento extremo 2024, os acumulados de quinze dias sobre a bacia do Guaíba foram superiores a 800 mm, com registros de máximos diários acima de 300 mm em 2024 (Collischonn *et al.*, 2024a; 2024b). As águas que passam por Lajeado — e que, nesses eventos, invadem a cidade — seguem para sudoeste até o rio Jacuí, formam o Guaíba em Porto Alegre e atravessam a Lagoa dos Patos até alcançar o oceano Atlântico em Rio Grande, um percurso de cerca de 460 km (Brasil, [s.d.]; SEPLAG/RS, 2026). É sobre esse rio que passa, na direção sudeste-noroeste, a BR-386, rodovia que liga a região metropolitana de Porto Alegre ao noroeste do Estado e constitui um dos principais eixos de escoamento da produção agropecuária e industrial do interior do RS; e é o rio Forqueta que a RS-130 cruza ao conectar Lajeado aos municípios de montante do Vale do Taquari. Lajeado representa a dimensão espacial local desta tese: é o recorte no qual foram reconstruídas as cotas das inundações históricas, verificado o modelo hidrodinâmico e aplicada a retromodelagem dos eventos extremos, confrontando os resultados das simulações com a documentação histórica e o monitoramento instrumental.

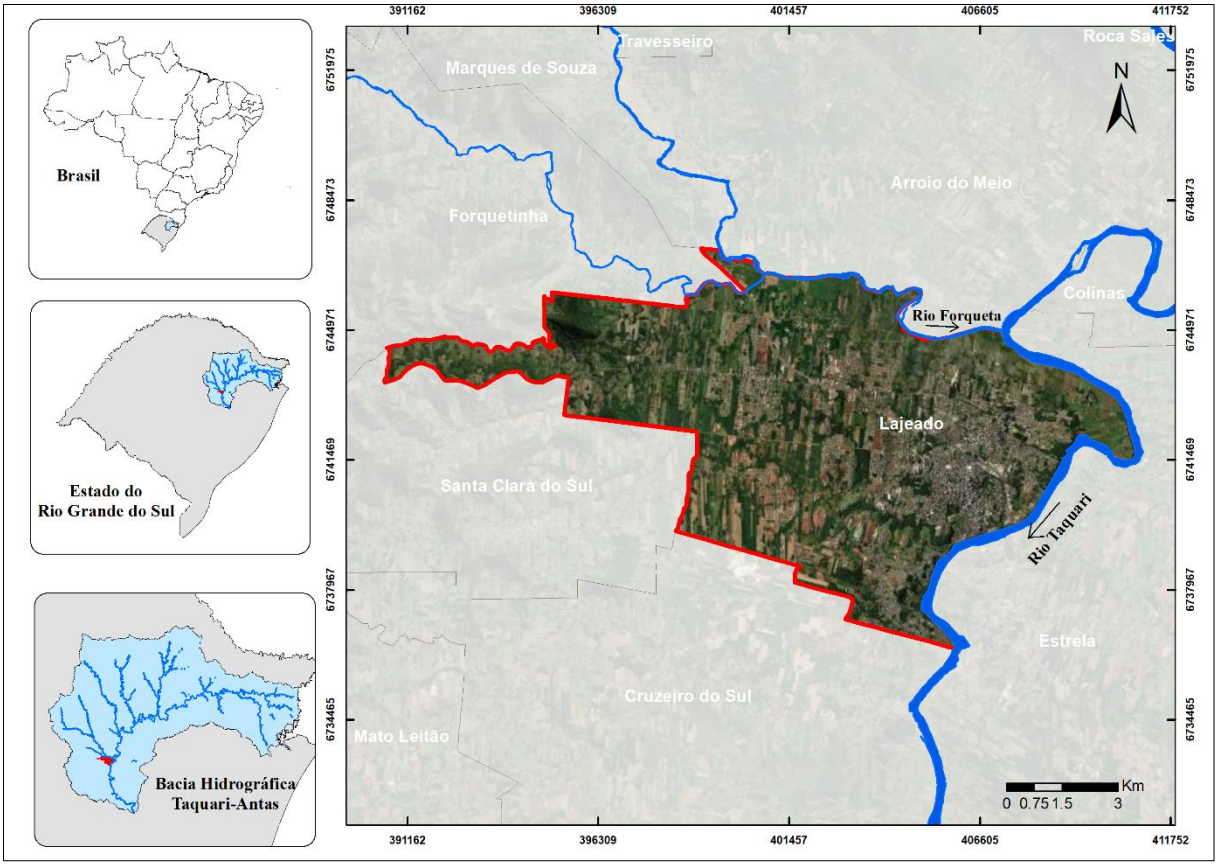


Figura 12 A- Área de estudo: Lajeado/RS

A ocupação do território e a colonização sistemática do que viria a ser o município de Lajeado tiveram início no decorrer da década de 1850, quando grandes empreendedores adquiriram terras baratas por meio da Lei de Terras, realizaram medições e demarcações e venderam os lotes, sobretudo a compradores na Europa e a imigrantes que já estavam no Brasil. Os colonos europeus que se dispusessem a vir para as novas colônias recebiam auxílio no pagamento das passagens e um valor por pessoa para as despesas iniciais. Em 1855, chegaram as primeiras 13 famílias de imigrantes germânicos, desembarcadas no atual bairro Carneiros, número que aumentou para 28 famílias em 1859 (188 habitantes). Em 1858, a população que vivia nas proximidades do rio Taquari sentiu o impacto de uma enchente de grande magnitude, o que a levou a adentrar progressivamente as matas, dando origem a novas picadas (Schierholt, 2024). O desenvolvimento de Lajeado partiu do atual bairro Carneiros, seguindo para os atuais bairros Centro/Praia e Conventos. A **Figura 12 B** ilustra a cronologia histórica de colonização de Lajeado associado a ocorrência de inundações.



Figura 12 B – Cronologia de ocupação do território de Lajeado. Fonte: da autora com uso de IA.

O centro histórico de Lajeado desenvolveu-se entre o engenho de serrar madeira, moer grãos e fabricar óleos e azeite (construções iniciadas em 1862, atual Parque do Engenho) e o porto com seu sistema de trole para carga e descarga das embarcações, às margens do rio Taquari, no atual bairro Praia. Em 1875, instalou-se em Lajeado uma companhia de navegação,

denominada mais tarde Companhia de Navegação Arnt, a maior empresa gaúcha de transporte fluvial daquele período (Menezes, 2016), cujas edificações, décadas depois, viriam a abrigar as réguas do primeiro posto fluviométrico da cidade (seção 3.2.1). O rápido crescimento da colônia favoreceu a instalação dos primeiros armazéns, lojas de comércio, restaurantes, hotéis, estaleiros, oficinas de barcos e bares, transformando a rua do porto em um centro comercial. Nas décadas seguintes, o desenvolvimento urbano intensificou-se ao redor do centro administrativo e nas adjacências da capela Santo Inácio, inaugurada em 1878. A emancipação de Lajeado, desmembrado do município de Estrela, ocorreu logo depois, em 1891 (PML, 2024).

Lajeado prosperou e se transformou na cidade que é na atualidade. De acordo com o Censo Demográfico, a cidade é polo do Vale do Taquari, com população de 93.646 habitantes, dos quais 99,71% residem na área urbana (IBGE, 2022). A população distribui-se em uma área territorial de 90,801 km², o que confere densidade média de 1.026,47 hab./km², a 9ª mais elevada do RS e a 106ª entre os municípios do Brasil. O município registrou expressivo crescimento populacional de 31,07% entre 2010 e 2022, comportamento similar ao observado nas regiões da Serra Gaúcha e do Litoral, as que mais atraem pessoas no Estado; a estimativa populacional de 2024 indica 96.651 habitantes (IBGE, 2024). A cidade segue como polo regional mesmo diante da elevada suscetibilidade à ocorrência de inundações, convivência que remonta à origem da colônia e que explica a densidade de registros históricos, marcas físicas e memória documental sobre as cheias do rio Taquari, matéria-prima dos dados não sistemáticos explorados nesta tese.

3.2 Dados hidrológicos sistemáticos

Embora o monitoramento sistemático nas cidades de Lajeado e Estrela seja capaz de prover uma série temporal longa para os padrões brasileiros, há dificuldades e limitações na análise estatística, porque as medições não foram realizadas sempre no mesmo local, e as mudanças dos locais e dos métodos de medição não foram adequadamente documentados ou sua documentação não está mais disponível (Moraes *et al*., 2024). Nas referidas cidades, as medições sistemáticas do nível da água do rio Taquari, incluindo os níveis máximos das enchentes e das inundações, são realizadas desde 28 de setembro de 1939, a partir do antigo posto fluviométrico 86870000, do monitoramento do Porto Fluvial de Estrela e do atual posto fluviométrico 86879300 (**Figura 13**), com presença de marcas físicas de inundações históricas em paredes e pilares, como no Colégio Evangélico Alberto Torres (CEAT), na Associação Rural de Lajeado (ARLA), entre outros locais.

Os postos fluviométricos e os locais de monitoramento sistemático do rio Taquari nas cidades de Lajeado e de Estrela utilizaram diferentes níveis de referência durante o tempo de operação, motivado pela movimentação das réguas linimétricas, pelo aumento da profundidade do rio Taquari a partir da operação da Barragem Eclusa de Bom Retiro do Sul e a própria construção e operação do Porto Fluvial de Estrela. Embora não haja uma série histórica de vazões observadas, o município de Lajeado possui uma série histórica de inundações, documentada com informações aferidas de forma sistemática, contemplando a data de ocorrência do evento e o nível máximo atingido em cada inundação (Moraes *et al*., 2024).

A partir de 1978, houve a instalação do Porto Fluvial de Estrela e instalação de uma régua linimétrica no cais do referido porto para a aferição dos níveis do rio Taquari. Como

sistemática da operação do porto, o nível do rio Taquari era aferido e registrado com intervalo temporal de 6 em 6 horas e, em momentos de inundações, a aferição dos níveis era realizada de hora em hora e os dados registrados em cadernos. A partir de 2015, o nível do rio Taquari é monitorado pela ANA/SGB.

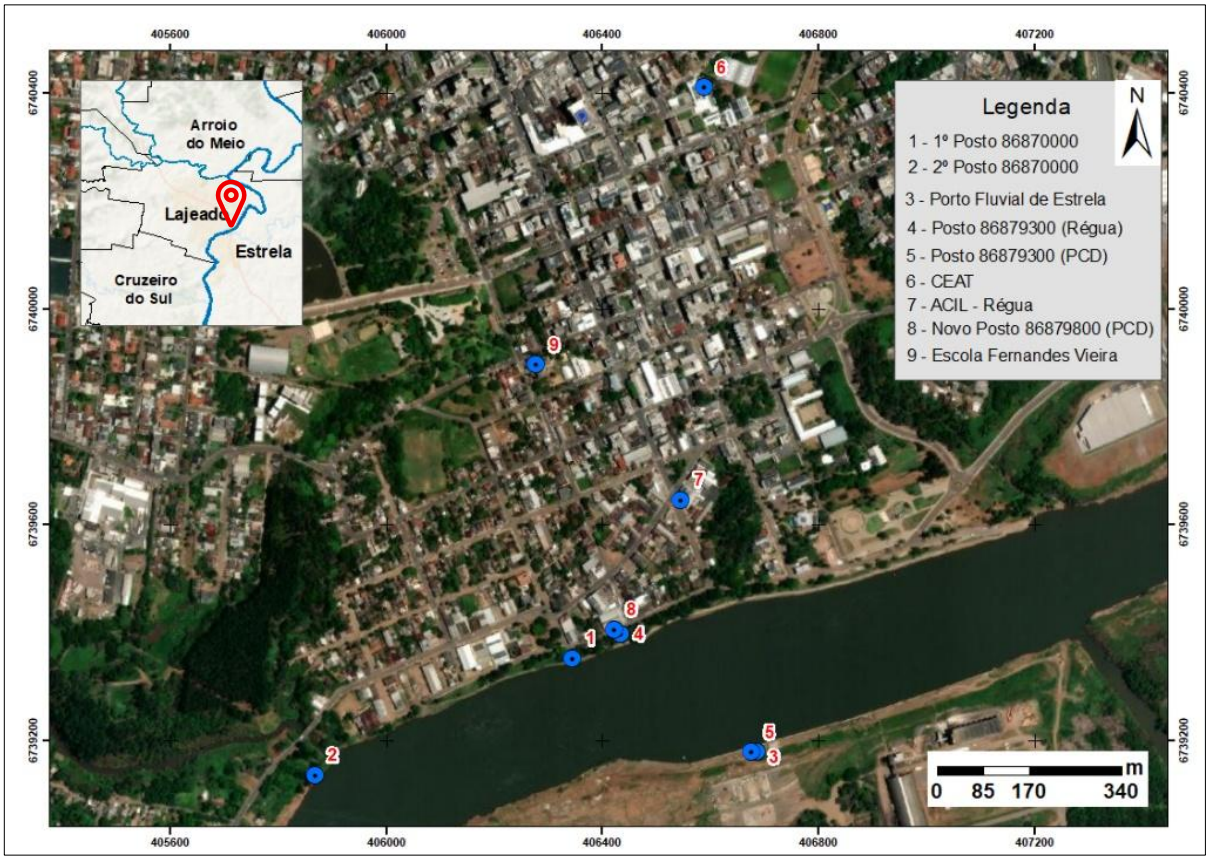


Figura 13 - Localização dos postos fluviométricos de medição do nível da água do rio Taquari entre Lajeado e Estrela (adaptado de Moraes *et al*., 2024).

O nível de referência normal do rio Taquari em Lajeado, mantido pela operação da barragem de Bom Retiro do Sul, corresponde à leitura de 13,00 m na escala das réguas do Porto Fluvial de Estrela (12,45 m em altitude ortométrica, conforme detalhado na seção 3.2.2). É a essa escala que se referem as cotas operacionais do Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE), que direciona as ações da resposta da Defesa Civil, são utilizadas as cotas de Atenção, Alerta e de Inundação para as cidades de Lajeado e Estrela, relacionadas com o nível de referência normal do rio Taquari em 13 m: **Cota de Atenção >= 15,00 m; Cota de Alerta >= 17,00 m; Cota de Inundação >= 19,00 m.**

A nota técnica publicada por Moraes *et al*. (2024) revisa e consolida a série histórica sistemática dos níveis das cheias e das inundações do rio Taquari em Lajeado, no período de 1939 a 2023, indicando os fatores de ajuste necessários para utilizar o nível de referência do rio Taquari e o nível máximo das enchentes e das inundações ajustadas em nível ou altitude ortométrica. Na presente tese de doutorado são utilizados os mesmos fatores de ajuste na combinação e ampliação da série histórica de inundações de Lajeado, com a adição de dados históricos, documentais e marcas físicas (dados não sistemáticos), na análise de frequência, na reconstrução e nos resultados da retromodelagem das inundações extremas.

Cabe destacar, que foi organizada a série histórica dos níveis máximos anuais de enchentes e inundações e a série histórica dos níveis de inundações independentes acima de certo limiar (*peak over threshold*) (**Figura 14**), que corresponde a 17,00 m para Lajeado e Estrela. Os chamados *Peaks Over Threshold* - POT consistem no princípio de seleção de eventos independentes de inundações, em função do intervalo de tempo entre eventos considerados e o limiar do nível ou da vazão.

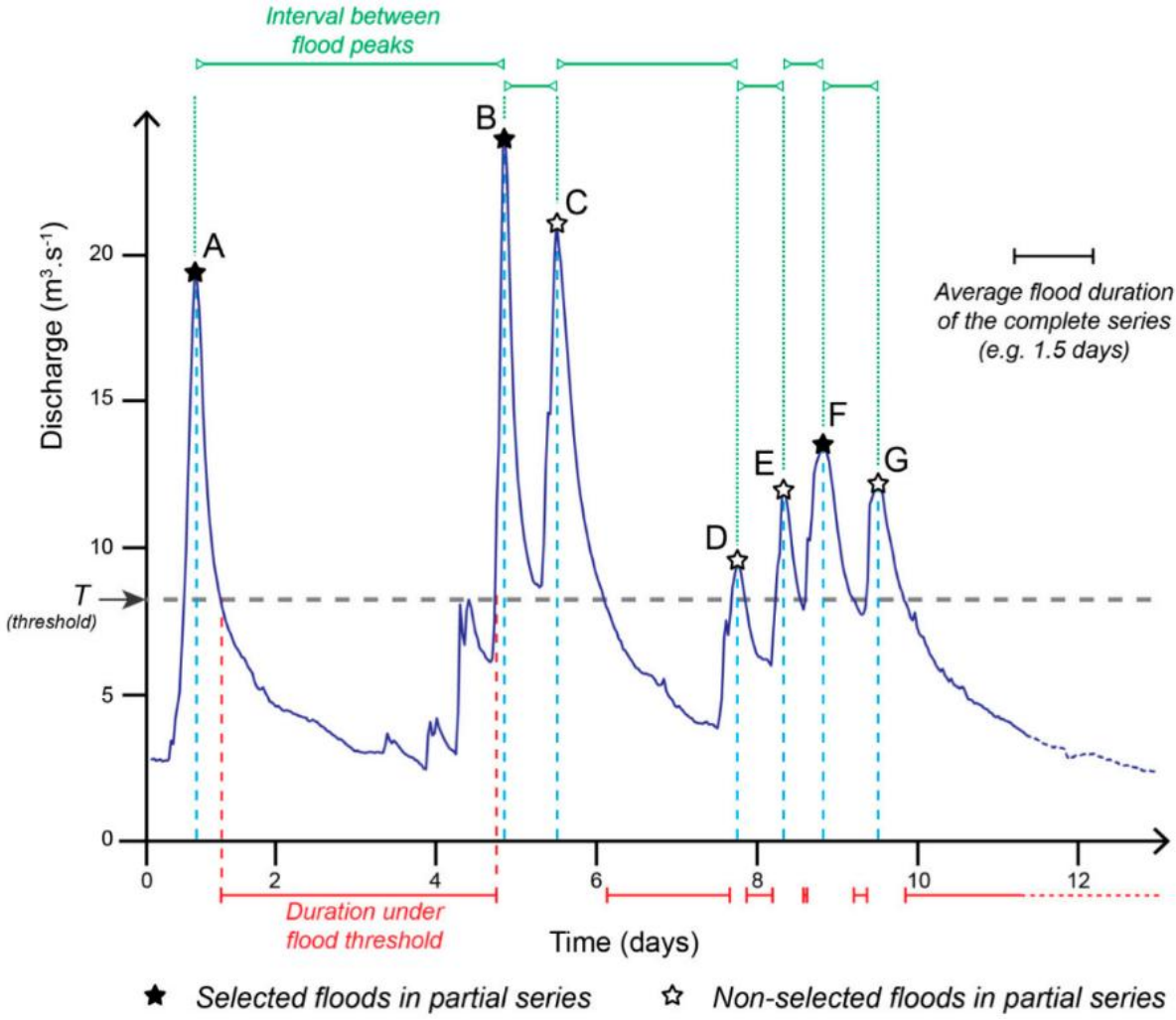


Figura 14 - *Peaks Over Threshold* - Van Campenhout *et al*. (2020).

3.2.1 Série de dados do posto fluviométrico Lajeado (86870000)

Entre os anos de 1939 e 1986 foi operado o posto fluviométrico 86870000 no rio Taquari, na cidade de Lajeado, mantido inicialmente pelo antigo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) e posteriormente pela Companhia de Pesquisa dos Recursos Minerais (CPRM), atual Serviço Geológico do Brasil (SGB). A série de dados dos níveis médios diários medidos nesse posto fluviométrico está disponível na base de dados Hidroweb da ANA e está apresentada, graficamente, na **Figura 15** revelando que a série temporal dos níveis do rio Taquari apresenta três períodos, com comportamento distinto.

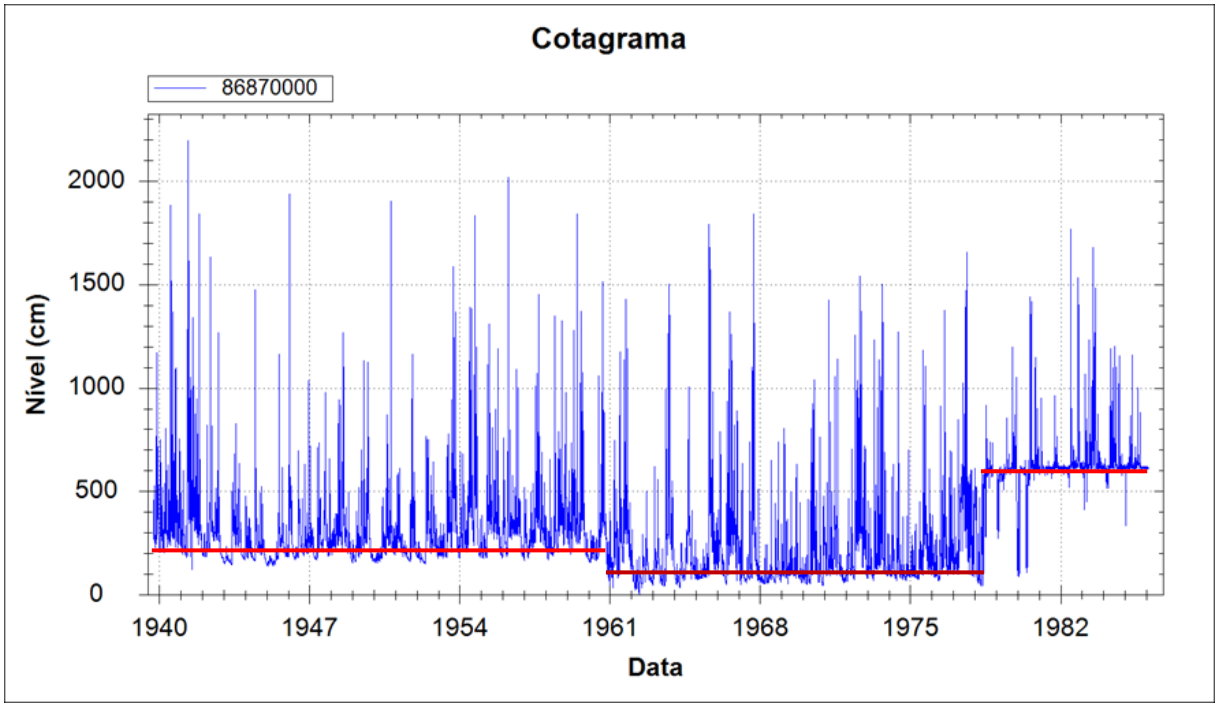


Figura 15 - Série histórica sistemática dos níveis médios diários medidos no posto fluviométrico 86870000, localizado no rio Taquari, na cidade de Lajeado, evidenciando os efeitos de uma provável mudança do zero (nível de referência) da régua em 1961 e novamente em meados de 1978, com o início da operação da Barragem Eclusa de Bom Retiro do Sul (Moraes *et al.*, 2024).

No primeiro período da série histórica hidrológica, que se estende de 1939 até o final de 1960, os níveis mínimos do rio Taquari ficam entre 100 e 200 cm, enquanto os níveis máximos frequentemente superaram 1.500 cm (15 m), chegando a superar os 20 metros em 2 oportunidades (inundações de 05 de maio 1941 e de 06 de abril de 1956). No segundo período, que se estende de 1961 até meados de 1978, os níveis do rio Taquari variaram, aproximadamente, entre 70 cm nas mínimas e mais de 1.500 cm nas máximas. Entretanto, parece haver uma redução da frequência dos valores acima de 1.500 cm em relação ao período anterior. No terceiro período, que inicia em meados de 1978 e se estende até o final da série, em 1986, os níveis mínimos do rio Taquari raramente são inferiores a 600 cm (6 m) e os níveis máximos são semelhantes ao período imediatamente anterior.

A existência desses três períodos distintos na série temporal dos níveis médios diários do rio Taquari, nos dados do posto fluviométrico 86870000, pode ser explicada por dois fatores: 1) o reposicionamento das réguas linimétricas no início da década de 1960 e; 2) o início da operação de controle dos níveis do rio Taquari, em 1978, na Barragem de Bom Retiro do Sul, que foi inaugurada em 29 de outubro de 1976. O reposicionamento das réguas de medição do antigo posto fluviométrico 86870000 está documentado, porém sem todas as informações relevantes. De acordo com as fichas cadastrais do antigo DNAEE, no período de 1939 ao final de 1960, as réguas linimétricas do posto 86870000 estavam localizadas junto a uma casa pertencente à Companhia de Navegação Arnt, hoje já demolida, e situada, aproximadamente, onde é a esquina atual das ruas Silva Jardim e Osvaldo Aranha (ponto 1 da **Figura 13**), na cidade de Lajeado. No período posterior, as réguas foram instaladas cerca de 400 metros a jusante, em um local próximo à foz do Arroio Saraquá, no lado oposto ao número 401 da Avenida Beira Rio (ponto 2 da **Figura 13**).

A observação da mudança do comportamento do hidrograma da **Figura 15**, entre o final de 1960 e o início de 1961, sugere que, no processo de reposicionamento das réguas, também parece ter havido uma mudança do referencial (zero da régua). Infelizmente, essa mudança do zero da régua não está descrita nas fichas disponíveis do referido posto fluviométrico. Em 1993, o engenheiro Bruno Seibert de Rezende elaborou um relatório de consultoria para a prefeitura de Lajeado, com uma análise das cotas máximas das cheias do rio Taquari na cidade de Lajeado (Rezende, 1993). Nesse relatório, não há menção explícita ao posicionamento das réguas do referido posto fluviométrico. Entretanto, é apresentada uma tabela com os níveis máximos, expressos como altitudes ortométricas, ou seja, corrigidas pela altitude do zero da régua. Comparando essa tabela com os dados dos níveis máximos do posto fluviométrico 86870000, é possível deduzir que o engenheiro Rezende considerou a altitude de 5,60 metros como zero da régua no período de 1939 a 1960, e a altitude de 6,60 metros no período de 1961 a 1976. As informações contidas no relatório de Rezende (1993) coincidem com o comportamento da série de níveis do rio Taquari (**Figura 15**). Com base no hidrograma e no relatório de Rezende é possível considerar que o conjunto de réguas do posto fluviométrico 86870000 foi deslocado entre 1960 e 1961 e teve uma alteração do zero da régua. Com o novo posicionamento, o zero da régua subiu de 5,60 m para 6,60 m, motivo pelo qual os níveis medidos a partir de 1961 apresentam valores inferiores aos níveis medidos entre 1939 e 1960 (**Figura 15**). Um esquema da mudança vertical das réguas, considerando válidas as informações apresentadas por Rezende (1993), é apresentado na **Figura 16**.

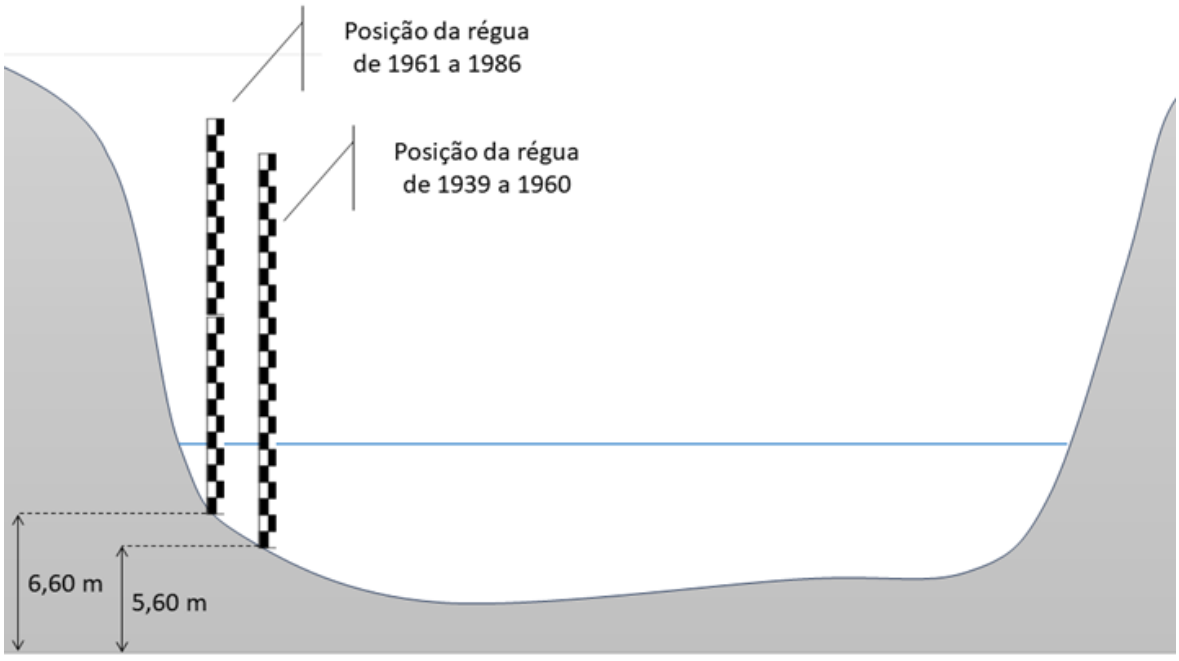


Figura 16 - Representação esquemática da mudança da posição vertical do sistema de réguas do posto fluviométrico Lajeado (86870000) (Moraes *et al*., 2024).

Não há documentação adicional, além do relatório de Rezende (1993), sobre a altitude ortométrica do zero das réguas do posto fluviométrico 86870000, tanto na sua posição original, mantida entre 1939 e 1960, como na posição modificada, mantida entre 1961 e 1986. Os dados desse posto fluviométrico foram mantidos pelo DNAEE, que foi extinto em 1996, com a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). É provável que a informação sobre a

altitude ortométrica do zero das réguas da estação fluviométrica 86870000, consultada pelo engenheiro Bruno Rezende, antes de 1993, quando o DNAEE ainda não havia sido extinto, tenha sido extraviada no processo de transferência do acervo de dados para a ANEEL e, depois, para a ANA. É possível supor que o engenheiro Rezende tenha tido acesso aos dados originais do DNAEE na elaboração do seu relatório de 1993, que lhe permitiu estimar em 5,60 m e em 6,60 m a altitude ortométrica do zero da régua do posto fluviométrico 86870000, respectivamente, nos períodos de 1939 a 1960 e 1961 a 1986 (Moraes *et al*., 2024).

Esta suposição está apoiada, também, na elevada correlação entre as marcas históricas do registro não sistemático e as cotas medidas no posto fluviométrico no período de 1961 a 1986, conforme descrito adiante no texto.

3.2.2 Série de dados do Porto Fluvial de Estrela

A série histórica dos níveis do rio Taquari registrada no Porto Fluvial de Estrela, disponibilizada pela Administração das Hidrovias do Sul (AHSUL), apresenta dados sistemáticos medidos de janeiro de 1977 até dezembro de 2015. O referido porto foi inaugurado em 10 de novembro de 1977 e o monitoramento dos níveis foi realizado em um conjunto de réguas linimétricas localizadas na margem oposta ao centro de Lajeado. No período de 01 de janeiro de 1977 até 11 de agosto de 1980 o monitoramento no porto foi realizado com 1 medição por dia. De 12 de agosto de 1980 até dezembro de 2015 (**Figura 17)**, o monitoramento foi ampliado para 4 observações diárias, realizadas às 00:00; 06:00; 12:00 e 18:00. Todos os dados do nível do rio Taquari e dos níveis das inundações foram documentados em cadernos de registros em papel e, posteriormente, transcritos para planilhas em arquivos digitais.

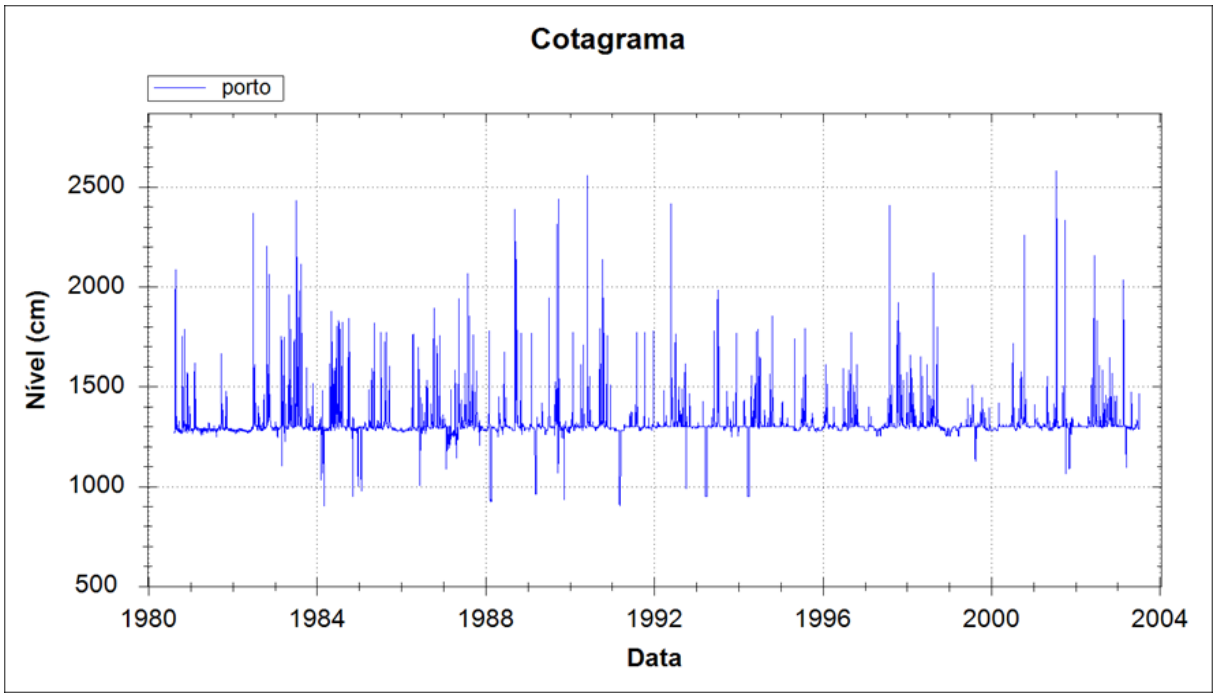


Figura 17 - Série histórica sistemática dos níveis médios diários observados nas réguas linimétricas do Porto Fluvial de Estrela no período de 1980 a 2015 (Moraes *et al*., 2024).

É possível observar na **Figura 17**, que os valores máximos registrados no Porto Fluvial de Estrela superaram 2.000 cm (20,00 m), com frequência. Os valores mínimos se encontram próximos a 1.300 cm (13,00 m), que é, de forma aproximada, o nível da água do rio Taquari

mantido pela operação da Barragem Eclusa de Bom Retiro do Sul, para permitir a navegação até o Porto Fluvial de Estrela. Em algumas ocasiões, quando as comportas da barragem eclusa são abertas, o nível da água no porto cai a cotas inferiores a 1.000,00 cm (10,00 m).

As réguas linimétricas de medição do nível do rio Taquari localizadas no Porto de Estrela estavam vinculadas a uma referência de nível (RN) arbitrária demarcada sobre o cais, em um ponto aproximadamente 4 metros acima do nível da água mantido, normalmente, pela operação da barragem de Bom Retiro do Sul. A essa referência de nível, identificada como RN1, foi atribuída a cota arbitrária de 17,00 m (**Figura 18)**. Com base nessa cota arbitrária de 17,00 metros sobre o cais, o nível de referência da água do rio Taquari para a operação portuária estava em 13,00 metros.



Figura 18 - Cota arbitrária de 17,000 metros marcada sobre o cais do Porto Fluvial de Estrela (marco RN1) para apoiar as medições das réguas utilizadas no monitoramento do nível do rio Taquari (Moraes *et al*., 2024).

As medições realizadas pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB) na implantação do posto fluviométrico 86879300, atualmente em operação, indicaram que o marco RN1 sobre o cais do Porto Fluvial de Estrela apresenta altitude ortométrica de 16,454 m (SGB, 2015), uma diferença de - 0,546 m em relação à cota de 17 m. Isto significa que, para ajustar todos os níveis das cheias registradas no porto de Estrela, de cotas arbitrárias para altitudes ortométricas, o zero da régua do porto deveria ser deslocado 0,55 m para baixo ou descontar 0,55 m de todos os níveis marcados. As medições realizadas pelo SGB (SGB, 2015) foram verificadas, posteriormente, em um estudo realizado por Agrosig e FEENG (2016), o qual encontrou uma diferença de -0,559 m em relação à cota de 17 m, ou seja, uma diferença de apenas 1,30 cm em relação ao estudo anterior, indicando boa consistência entre os dois levantamentos.

Considerando como correta a medição da SGB (2015), conclui-se que o zero da régua do porto de Estrela estava e ainda está 0,55 m acima da posição altimétrica ortométrica. Isto significa que uma cheia do rio Taquari que atingiu a cota máxima de 25,00 metros nas réguas do Porto Fluvial de Estrela atingiu a altitude ortométrica de 24,45 m nesse mesmo local. Da mesma forma, o nível de 13,00 metros medido na régua do porto de Estrela, que era o nível de referência normal no rio Taquari no local mantido pela operação da barragem de Bom Retiro do Sul, corresponde à altitude ortométrica de 12,45 metros. É necessário descontar 55 cm de todos os níveis do rio Taquari registrados no Porto Fluvial de Estrela, no período de 1977 até 2015, para obter os níveis máximos das cheias em altitude ortométrica (MORAES *et al*., 2024). No entanto, é importante considerar este ajuste em termos técnicos. Do ponto de vista de entendimento e significância regional em relação a cotas de alerta de inundação, essa diferença não tem impactos, sendo inclusive importante ser mantida, uma vez que municípios de jusante a Lajeado e Estrela tem como base a referência de cotas e em grande parte, cidadãos e sociedade

civil, tomam suas decisões de contingência com base nessa informação. Por essa razão, adota-se nesta tese essa referência regional consolidada, doravante denominada cota oficial, como referência primária para a apresentação dos níveis de cheia ao longo do texto e dos resultados, reservando-se a altitude ortométrica (H = cota oficial − 0,55 m) aos contextos em que a referência física é indispensável, como o levantamento das marcas, consolidação da série histórica e a definição do terreno do modelo hidrodinâmico.

3.2.3 Série de dados do posto fluviométrico Estrela (86879300)

No ano de 2013, quando o Serviço Geológico do Brasil (SGB) iniciou os estudos para implantação do sistema de monitoramento e alerta hidrológico na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas (SACE), foi implantada uma plataforma de coleta de dados (PCD), com um sensor de pressão para registro dos níveis do rio Taquari no porto de Estrela (**Figura 19A**), com o código 86879300, denominado Estrela, de responsabilidade da ANA e operado pelo SGB. Na instalação dos equipamentos, foi adotada o mesmo referencial de nível (RN) utilizado como base pelas réguas linimétricas anteriormente operadas pela equipe do porto (**Figura 18**). Isto significa que a altitude ortométrica do zero da régua do posto fluviométrico 86879300 também está deslocada em -55 cm. A instalação da estação fluviométrica 86879300 com o mesmo referencial de nível do Porto Fluvial de Estrela foi uma alternativa para manter a coerência e a convergência com a série histórica dos níveis registrados no e pelo Porto Fluvial de Estrela desde 1977, sendo possível aplicar o mesmo fator de correção de 1977 até 2025.

Após quase 2 anos com problemas nos sensores da PCD devido à operação portuária de atracação das embarcações, foi realizada uma intervenção estrutural no porto no ano de 2015, que permitiu o início dos registros telemétricos dos níveis do rio Taquari do atual posto fluviométrico 86879300. Desse modo, com registro de 1 valor de nível a cada hora, a PCD permaneceu em operação até o início de 2021, quando foi substituída por um equipamento mais moderno que registra dados de 15 em 15 minutos. Nesse mesmo ano (2021), o SGB iniciou a operação convencional do posto fluviométrico 86879300, com a implantação das réguas linimétricas na margem de Lajeado (**Figura 19B**) e observador hidrológico para efetuação de dois registros diários (às 7h e 17h), bem como da realização de medições regulares da vazão e da qualidade da água no local.



Figura 19 - Registro fotográfico da Plataforma de Coleta de Dados (PCD) (pré-cheias de 2023 e 2024) por telemetria automática do posto fluviométrico 86879300, quando ainda estava localizada no Porto Fluvial de Estrela (Figura 19 – A) e Figura 19 – B, – Localização das réguas em Lajeado.

Na atualidade, o posto fluviométrico 86879300 continua em funcionamento no trecho do rio Taquari entre as cidades de Lajeado e Estrela. O posto conta com um sensor automático com telemetria, localizado da margem de Lajeado desde junho de 2024. No período de 2015 até maio de 2024, a PCD estava localizada no Porto Fluvial de Estrela (Ponto 5 da **Figura 13**), na margem esquerda do rio Taquari. A PCD foi reposicionada para a margem de Lajeado (Ponto 8 da **Figura 13**), em junho de 2024 após toda a estrutura física e lógica da estação telemétrica ter sido completamente destruída pelas inundações de setembro de 2023 e novamente em maio de 2024. O Ponto 4 da **Figura 13** indica a nova localização do sensor automático do posto fluviométrico 86879300, na margem direita do rio Taquari, na região do centro histórico de Lajeado, em um local próximo à esquina das ruas Osvaldo Aranha e João Abbott (fundos da Indústria de Vinagres Prinz), onde também está localizado o conjunto de réguas linimétricas da estação 86879300, na lateral da escadaria que desce até o rio Taquari. Desde o início da operação, em 2015, o atual posto fluviométrico 86879300 já registrou 4 grandes eventos de inundações (09/07/2020; 05/09/2023; 19/11/2023 e 02/05/2024).

3.3 Dados hidrológicos não sistemáticos

De acordo com o contexto apresentado acima, dados não sistemáticos, como as marcas físicas, fotográficas, documentais ou verbais de inundações históricas, têm potencial para complementar as informações que podem ser obtidas a partir do monitoramento sistemático. Contudo, a consistência dos dados históricos também deve ser analisada com cuidado, porque esses dados podem ter sido registrados com erros. Na nota técnica publicada por Moraes *et al*. (2024), os níveis das inundações, advindos de observações sistemáticas nos postos fluviométricos que operaram no passado e que operam na atualidade no trecho do rio Taquari entre Lajeado e Estrela, foram comparados entre si e comparadas somente com marcas físicas das inundações. Durante a formação desta tese, a pesquisa por dados não sistemáticos sobre inundações no Vale do Taquari foi ampliada, de forma a encontrar registros desde meados do século XIX até 1939, quando inicia o monitoramento sistemático.

Os dados não sistemáticos de inundações de Lajeado foram obtidos a partir de marcas de inundações em pilares e paredes, registros fotográficos, informação documental publicada e disponível na Hemeroteca Digital Brasileira (BNDIGITAL, s.d.) e dados de historiadores, como José Alfredo Schierholt, um dos historiadores mais representativos nos municípios de Lajeado e Estrela. A busca por evidências documentais no acervo da Hemeroteca Digital Brasileira, teve foco na extração de registros primários que permitissem preencher lacunas do período pré-instrumental. A metodologia de busca estruturou-se na seleção cronológica de periódicos do Rio Grande do Sul e na análise de correspondências oficiais e Cartas Imperiais, utilizando descritores específicos como 'enchentes', 'inundações', 'cheias' e a grafia antiga 'Rio Taquary'. Este levantamento não visou apenas a catalogação cronológica, mas a análise de conteúdo de relatos que descreviam a dinâmica fluvial em um período de consolidação dos núcleos urbanos de Lajeado e Estrela.

Neste contexto, a magnitude dos eventos hidrológicos poderia ser aferida por meio de indicadores indiretos (*proxies*) de severidade socioeconômica. Observou-se uma correlação direta entre a gravidade da inundação e a densidade dos registros sobre a mobilização do Estado e da sociedade civil: em eventos de maior magnitude, as fontes revelam um incremento

substantivo no volume de suprimentos enviados e no detalhamento do auxílio humanitário destinado aos atingidos. A narrativa da época, frequentemente carregada de descrições sobre o 'estado de miserebilidade' e o ‘rastro de destruição deixado pelas águas’, se mostrou atuar como um qualificador da magnitude do fenômeno. Assim, embora a precisão métrica seja um desafio para o século XIX, a escala da resposta governamental à época e o impacto social documentado permitem hierarquizar a severidade das cheias históricas, validando a percepção desses eventos como extremos hidrológicos dentro da análise de inundações do Rio Taquari, sendo útil neste trabalho para fortalecer os registros históricos documentados localmente.

Ao longo de anos de pesquisas documentais em atas, nas secretarias e nos acervos históricos dos municípios do Vale do Taquari, localizados às margens do rio Taquari, Schierholt (2024, não publicado) organizou um conjunto de registros de inundações de grande magnitude que ocorreram de 1824 até 1938, com alguns eventos tendo dados completos (dia, mês, ano, nível máximo da inundação, locais atingidos, principais consequências e ações de ajuda destinadas às famílias) e outros eventos de inundações somente com dados parciais, como a data de ocorrência. Os dados não sistemáticos foram combinados com os dados do monitoramento sistemático, a partir de inundações possíveis de reconstruir o nível da cheia com as informações encontradas, o que ampliou a análise da série histórica de enchentes e inundações em Lajeado de 1873 até 2025.

Moraes *et al*. (2024) apresenta que os registros não sistemáticos mais frequentes de inundações são fotográficos e registros em jornais. Porém, também é comum encontrar relatos de moradores cujos antepassados optaram por construir suas residências e edificações considerando a maior inundação conhecida, seja para a construção sobre pilares livres ou a base para o segundo andar, como níveis de segurança. Mais recentemente, com a expansão dos telefones celulares com capacidade de obter fotografias e vídeos, e com a difusão das imagens nas redes sociais, cada vez mais registros não sistemáticos têm ficado disponíveis para apoiar a análise de eventos extremos (Giordani *et al*., 2021). Também há locais em que se tornou hábito registrar marcas dos extremos hidrológicos em rochas da margem ou em estruturas, como pontes e prédios, tanto de cheias como de secas (Pedersini, 2022).

Dentre os registros históricos não sistemáticos de inundações, no trecho do rio Taquari entre Lajeado e Estrela, destacam-se as marcas físicas materializadas no Colégio Evangélico Alberto Torres (CEAT), localizado no centro de Lajeado. O prédio do CEAT, em que estão as marcas das inundações, está localizado a uma distância de pouco menos de 1 km do rio Taquari, em linha reta. A inundação do local ocorre porque as águas do rio Taquari inundam o vale do arroio do Engenho, que é um pequeno afluente canalizado. Nesse local, há um conjunto de placas metálicas fixadas no pilar central de um dos prédios, onde estão marcados os níveis máximos das inundações desde 1912 (**Figura 20**). As marcas existentes no pilar indicam o ano, e, às vezes, o mês de ocorrência da inundação, já que não é incomum a ocorrência de dois ou mais picos de cheia independentes e importantes no rio Taquari ao longo do mesmo ano.

É importante destacar que o prédio onde estão as marcas no CEAT foi construído na década de 1960, com base na cota máxima da inundação de maio de 1941, e, portanto, as marcas de cheia anteriores foram marcadas em outro local, possivelmente tendo sido transportadas para o local atual através de um procedimento de nivelamento. A mesma “régua” (altura da cheia de

1941) foi usada como limiar para a construção dos blocos 2 e 3 e o Centro Comunitário, a exceção do Ginásio, pelos custos dobrados de execução da obra. Infelizmente, não foi encontrada uma documentação sobre o local das marcações originais nem sobre o procedimento de transporte das marcas para o local atual.



Figura 20 - Detalhe do pilar de um dos prédios do CEAT com a fixação de placas metálicas indicando os níveis máximos das inundações históricas do rio Taquari na cidade de Lajeado (**A**) e o cenário da inundação de 09 de julho de 2020 no referido pilar do CEAT (**B**). A marca histórica de inundação mais antiga é de 1912.

Até setembro do ano de 2023, a marca mais alta de inundação registrada no prédio do CEAT estava localizada na viga, acima do referido pilar, referente à inundação extrema de 05 de maio de 1941, considerada por muitas décadas, como a maior cheia da história da cidade de Lajeado. A posição dessa marca está destacada na fotografia da **Figura 21**.



Figura 21 - Vista completa do pilar e da viga do prédio do CEAT onde estão as marcas das principais inundações históricas registradas em Lajeado, com uma seta para indicar a localização da marca da cheia de 1941 na viga acima do pilar.

Outra categoria importante de dados não sistemáticos de inundações são registros fotográficos históricos, especialmente aquelas fotografias registradas em edificações ou infraestruturas que ainda existem, com registro visível do nível máximo da água, ou de marcas de sujeira e cisco da inundação, que logo desaparecem após a recessão dos rios e após ocorrer a limpeza e/ou a pintura das edificações. Como exemplo, é possível apresentar a fotografia do acervo pessoal do historiador José Alfredo Schierholt, da Escola Estadual Fernandes Vieira (EEFV), atingida pela inundação de 05 de maio de 1941 (**Figura 22**).



Figura 22 - Fotografia da fachada frontal e lateral da Escola Estadual Fernandes Vieira - EEFV, localizada no Centro de Lajeado, durante a cheia de 05 de maio de 1941, que permite constatar que a inundação de 1941 cobriu o 1 vidro dos 5 vidros da janela basculante do primeiro andar.

Os eventos extremos de setembro de 2023 e maio de 2024 permitiram validação direta das marcas históricas no CEAT e na EEFV, possibilitando comparação e aferição entre os níveis dessas inundações recentes com as marcas das cheias históricas. Sempre que possível, como etapa de avaliação da consistência e fidelidade dos dados não sistemáticos, foram realizadas medições topográficas em campo, com utilização de GPS, GNSS RTK e Estação Total, para aferir a localização georreferenciada e a altitude ortométrica dos níveis das inundações pretéritas, conforme documentação das fontes de dados não sistemáticos e conforme detalhado na seção 3.4.

A etapa final dos procedimentos metodológicos relacionados com a consolidação e a combinação dos dados hidrológicos sistemáticos e não sistemáticos, envolveu descrever os fatores de ajuste e as medições realizadas para gerar a série histórica ampliada de enchentes e inundações de Lajeado, cidade alvo da reconstrução e retromodelagem de eventos hidrológicos extremos e catastróficos.

3.4 Consolidação e Combinação da Série Histórica de Inundações de Lajeado

Para lidar de forma adequada com o problema e os desafios das inundações, um requisito importante é manter um histórico longo e representativo dos eventos ocorridos no passado. Numa situação ideal, em uma cidade sujeita a inundações ribeirinhas, esses registros seriam obtidos em um posto fluviométrico com medições sistemáticas obtidas no local em um longo período. Longas séries de dados advindas de medições sistemáticas, em um mesmo ponto de um rio, permitem a realização de análises estatísticas que, por sua vez, tornam possível uma avaliação de riscos associados com as inundações (Tucci, 2020). Entretanto, esse tipo de conjunto de dados nem sempre está disponível, especialmente no Brasil, como consequência da descontinuidade das iniciativas de monitoramento, da extinção ou substituição dos órgãos públicos responsáveis pelas medições hidrometeorológicas e pelas alterações naturais do próprio sistema fluvial.

Entre as cidades de Lajeado e Estrela, conforme detalhado nos capítulos anteriores, o monitoramento sistemático do rio Taquari foi iniciado em 1939 e vem sendo realizado em postos fluviométricos do antigo DNAEE (86870000 - 1939 até 1986), da AHSUL, que foi a

administradora do Porto Fluvial de Estrela (1977 até 2015) e do SGB / ANA (86879300 – 2015 até a atualidade). Ao considerar que as informações sobre os níveis das enchentes e das inundações foram registradas de forma sistemática nas cidades de Lajeado e Estrela desde 1939, em diferentes locais, com diferentes níveis de referência para os valores dos zeros das réguas, com diferentes tecnologias e frequências de coleta, uma etapa importante para avaliar a confiabilidade das diferentes informações sobre os níveis máximos das cheias e das inundações é a análise de consistência entre as diferentes fontes (Moraes *et al*., 2024).

As cotas medidas nos postos fluviométricos referem-se à elevação do nível da água acima de um nível de referência arbitrário, que representa o zero da régua. Diferentes postos fluviométricos podem ter níveis de referência arbitrários diferentes. Para comparar a série de medições realizadas nos diferentes postos fluviométricos que já operaram no trecho de interesse do rio Taquari entre si e com as marcas físicas de cheias históricas, é necessário obter os valores equivalentes de altitude ortométrica dos níveis da água, conforme o esquema da **Figura 23**. Para isso é aplicada a **Equação 13**:

$$H = Z + R \qquad (13)$$

R é a cota arbitrária medida no posto fluviométrico;
Z é o ajuste da diferença de nível do zero da régua;
H é altitude ortométrica do nível da água.

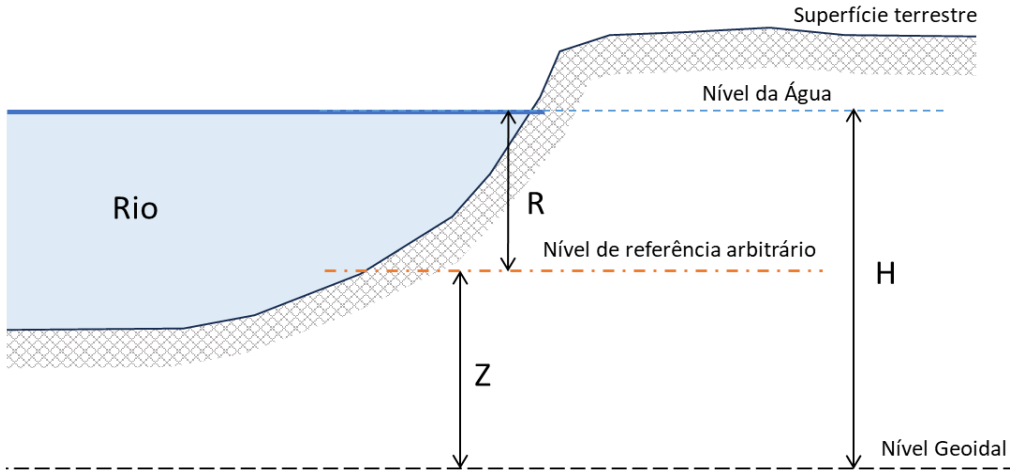


Figura 23 - Representação esquemática da medida das cotas do nível da água de um rio.[4]

A altitude ortométrica é a distância vertical entre um ponto na superfície terrestre e o geoide. O geoide é um modelo físico da superfície equipotencial do campo da gravidade terrestre e pode ser entendido como uma superfície de equilíbrio de massas de água. Em outras palavras, o geoide pode ser entendido como o nível médio que o oceano em repouso teria no local em que está sendo feita uma medição, mesmo que a medição seja realizada em áreas continentais, distantes do oceano. Trabalhar com uma série histórica de enchentes e inundações utilizando níveis ortométricos tem como principal vantagem, permitir a combinação dos dados advindos de postos fluviométricos diferentes, inclusive a combinação com dados não sistemáticos, compatibilizar essas informações com os levantamentos topográficos e com os

[4] **R**: Cota medida na régua ou PCD de um posto fluviométrico em relação a um referencial de nível arbitrário; **Z**: diferença de nível do zero da régua para altitude ortométrica; **H**: Altitude ortométrica do nível da água. (Moraes *et al*., 2024).

planos diretores de desenvolvimento urbano. A exigência é conhecer os valores para ajustar os zeros das réguas linimétricas e das PCD automáticas dos postos fluviométricos e ajustar todos os dados registrados de cotas arbitrárias para níveis ortométricos.

Conforme descrito na seção 3.3, os dados não sistemáticos foram obtidos a partir de marcas físicas, registros fotográficos, documentação histórica da Hemeroteca Digital Brasileira e registros organizados pelo historiador José Alfredo Schierholt. A aferição da altitude ortométrica das marcas históricas no CEAT e na EEFV foi realizada *in loco*, combinando GNSS RTK e Estação Total, vinculados aos marcos da Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM) de Lajeado e aos Referenciais de Nível (RN) do IBGE. Os levantamentos em campo foram realizados nos dias 20 e 27 de abril de 2023, em 07 de setembro de 2023, 24 de novembro de 2023 e 05 de maio de 2024, imediatamente após a inundação.

Com base nos dados dos 3 diferentes sistemas de monitoramento que já operaram no trecho do rio Taquari na cidade de Lajeado e com o apoio das marcas históricas registradas no prédio do CEAT, das fotografias históricas do prédio do EEFV e outros dados não sistemáticos, foi possível organizar a série histórica dos níveis máximos anuais de enchentes e inundações e a série histórica dos níveis de inundações independentes acima de certo limiar (*peak over threshold*). Os três sistemas de monitoramento e períodos de cada um foram:

1. Posto fluviométrico 86870000 => 1939 a 1980
2. Porto Fluvial de Estrela => 1981 a 2015
3. Posto fluviométrico 86879300 => 2016 a 2025

As duas séries temporais (máximos anuais e *peak over threshold*) foram consistidas, de tal forma que as medições de enchentes e inundações, realizadas em diferentes locais e períodos, pudessem ser comparadas entre si. Todos os valores das cotas máximas arbitrárias medidas nas réguas linimétricas dos postos fluviométricos (termo R) foram transformados para níveis ortométricos (termo H), utilizando a Equação 13 e os valores de ajuste do zero das réguas (termo Z), conforme discutido nos itens anteriores e resumido na **Tabela 3**.

Tabela 3 - Valores de ajuste adotados nos zeros das réguas linimétricas e PCD automática para converter as cotas arbitrárias (R) medidas nos postos fluviométricos do monitoramento sistemático no trecho do rio Taquari entre as cidades de Lajeado e Estrela, para níveis ortométricos (H)

Ponto de monitoramento sistemático	Período de medição	Valores de ajuste do zero das réguas linimétricas (m)	Fonte da informação dos valores de ajuste do zero da régua
Antigo posto 86870000 posição 1	1939 a 1960	+5,60	Rezende (1993)
Antigo posto 86870000 posição 2	1961 a 1986	+6,60	Rezende (1993)
Porto Fluvial de Estrela	1980 a 2015	-0,55	SGB (2015)
Atual Posto fluviométrico 86879300	2015 - Atual	-0,55	SGB (2015)

A análise e definição dos valores de ajuste dos zeros das réguas linimétricas dos postos fluviométricos utilizados é fundamental para que seja possível consolidar, combinar e organizar as séries históricas de enchentes e inundações de Lajeado (máximos anuais e *peak over*

threshold), a serem apresentadas no capítulo dos Resultados e Discussões. As séries históricas foram organizadas a partir da análise e combinação de dados não sistemáticos (1873 - 1938) e dados do monitoramento sistemático (1939 - 2025).

A análise de consistência realizada também é importante para compreender as diferenças de nível entre as cotas das inundações registradas nas estações fluviométricas com as marcas e fotografias históricas das cheias na cidade de Lajeado, favorecendo a compreensão social entre a leitura das cotas no linígrafo automático ou nas réguas físicas com os locais e o nível altimétrico atingido na cidade. A série histórica consolidada e combinada de inundações de Lajeado, considerando os dados não sistemáticos com validação de cotas (1873 – 1938) e monitoramento sistemático (1939 - 2025), foi utilizada na etapa da análise de frequências, envolvendo o cálculo da probabilidade de ocorrência e a estimativa do tempo de retorno dos diferentes níveis de inundações, a atualização do ranking das maiores inundações de Lajeado, com a data de ocorrência e o nível observado, além da geração das cartas de inundações.

3.5 Análise de Frequência e Integração de Dados Não Sistemáticos

A caracterização probabilística das inundações pela análise de frequência pressupõe a estacionariedade da série, conforme discutido na seção 2.4. Essa condição foi verificada mediante o teste não paramétrico do Coeficiente de Spearman (ρs), aplicado nesta tese à série sistemática de máximos anuais (1939–2025), série anual completa e contínua do conjunto de dados. Os registros não sistemáticos (1873–1938), documentam apenas os maiores eventos do período e não configuram série anual completa, condição que inviabiliza a aplicação formal de testes de tendência, sem, contudo, impedir sua combinação com a série sistemática na análise de frequência.

O procedimento de cálculo consistiu na atribuição de postos aos pares (ano, nível máximo anual), no cômputo das diferenças entre postos e na aplicação das Equações 1 a 4, apresentadas na seção 2.4, para obtenção do coeficiente ρs e da estatística t associada. A significância foi avaliada pela comparação com o valor crítico da distribuição t de Student bilateral, com $n - 2$ graus de liberdade, ao nível de significância $\alpha = 0,05$ (Yue; Pilon; Cavadias, 2002).

A integração dos dados sistemáticos e não sistemáticos seguiu a metodologia de incorporação de informações históricas em estudos de frequência de cheias, que exige tratamento estatístico específico em razão da natureza censurada (período não sistemático com dados desconhecidos) desses dados (Stedinger e Cohn, 1986; Cohn e Stedinger, 1987; Francés *et al.*, 1994). O conceito central dessa abordagem é o limiar de percepção (*perception threshold*): o nível a partir do qual uma cheia era suficientemente notável para ser documentada, seja por atingir estruturas perenes, seja por motivar registro administrativo ou jornalístico (England *et al.*, 2019). Assume-se que todos os eventos que excederam o limiar foram registrados e que, nos anos sem registro, o máximo anual permaneceu abaixo dele. Esses anos ingressam na análise como dados censurados, conhecidos apenas por sua posição relativa ao limiar, e não por seu valor exato. Para a série do rio Taquari em Lajeado adotou-se limiar de percepção de 27,00 m no período não sistemático (1873–1938): as quatro cheias que o excederam (1873, 1912, 1919 e 1928) tiveram suas magnitudes reconstituídas por meio de

marcas físicas e registros documentais, conforme descrito na seção 3.3, e ingressaram na análise como valores exatos, enquanto os 62 anos restantes do período contribuem com a informação de que o máximo anual não excedeu o limiar de percepção adotado.

3.5.1 *Software* RMC-BestFit

A análise de frequência foi realizada utilizando o *software* RMC-BestFit, desenvolvido colaborativamente pelo U*.S. Army Corps of Engineers Risk Management Center* (USACE-RMC) e pelo E*ngineer Research and Development Center Coastal and Hydraulics Laboratory* (ERDC-CHL). O RMC-BestFit é um *software* de estimação bayesiana projetado especificamente para análises de frequência de cheias que integram múltiplas fontes de informação hidrológica (Smith e Doughty, 2020).

O *software* emprega uma abordagem bayesiana baseada em Markov Chain Monte Carlo (MCMC) para estimação dos parâmetros das distribuições de probabilidade, conforme metodologia desenvolvida por Reis e Stedinger (2005). Esta abordagem permite incorporar de forma robusta diferentes tipos de informação, incluindo: (i) registros sistemáticos de vazões ou níveis; (ii) dados históricos e paleohidrológicos; (iii) informações regionais; e (iv) conhecimento especializado.

Uma das principais vantagens do RMC-BestFit reside na sua capacidade de processar dados de diferentes naturezas em uma mesma função de verossimilhança. O *software* admite três tipos de dados: dados sistemáticos, tratados como observações exatas; dados intervalares, cuja magnitude é conhecida apenas dentro de uma faixa de valores; e limiares de percepção, que representam períodos em que se sabe apenas que os máximos anuais permaneceram abaixo de determinado valor (Smith e Doughty, 2020). O tratamento estatístico desses dados censurados segue a formulação por máxima verossimilhança consolidada para a incorporação de informação histórica (Stedinger e Cohn, 1986) e sua extensão bayesiana (Reis e Stedinger, 2005). Essa flexibilidade é essencial para o tratamento adequado de séries que combinam dados instrumentais com registros históricos de diferentes origens e níveis de incerteza.

3.5.2 Procedimentos de análise

A análise organizou-se segundo os três componentes funcionais do RMC-BestFit: entrada de dados, ajuste de distribuição e estimação bayesiana (Smith e Doughty, 2020). No componente de entrada, os máximos anuais foram organizados segundo a natureza da informação disponível, e não segundo a ordem cronológica. Os 87 anos do período sistemático (1939–2025) ingressaram com as cotas medidas. Do período histórico (1873–1938), quatro anos ingressaram igualmente com cota conhecida, correspondentes às cheias de 1873, 1912, 1919 e 1928, únicas que superaram o limiar de percepção de 27,00 m; os 62 anos restantes ingressaram não como lacuna, mas como a informação de que o máximo anual permaneceu abaixo desse limiar. A série submetida à análise compreende, portanto, 153 anos, dos quais 91 com magnitude conhecida e 62 com magnitude desconhecida, porém limitada superiormente, distinção que organiza todo o procedimento descrito a seguir.

No componente de ajuste, adotou-se a distribuição Log-Pearson Tipo III (LP3), apresentada na seção 2.4 e recomendada para análise de frequência de cheias pelo Bulletin 17C

(England *et al.*, 2019). A distribuição aplica uma transformação logarítmica aos dados e ajusta a eles uma Pearson Tipo III, ficando descrita por três parâmetros: a média (μ) e o desvio-padrão (σ) dos logaritmos das cotas e o coeficiente de assimetria (γ). O ajuste preliminar por máxima verossimilhança nessa etapa não constitui o resultado final: fornece os valores iniciais a partir dos quais a estimação bayesiana é conduzida.

O componente de estimação bayesiana trata esses três parâmetros como variáveis aleatórias, e não como constantes a serem determinadas. Em lugar de um único valor por parâmetro, a análise produz uma distribuição de valores plausíveis, construída pela combinação de duas fontes de informação: a distribuição a priori, que expressa o conhecimento anterior à observação dos dados, e a função de verossimilhança, que mede a compatibilidade entre cada conjunto de parâmetros e as observações. O produto das duas define a distribuição a posteriori, que reúne toda a informação disponível sobre os parâmetros (Reis e Stedinger, 2005). Adotaram-se as prioris não informativas padrões do RMC-BestFit, uniformes sobre intervalos amplos (μ e σ em $[0, 4]$; γ em $[-2, 2]$), cujos limites situam-se muito além da região onde se concentra a massa da distribuição a posteriori, de modo que a inferência é governada essencialmente pela informação contida nos dados.

A adoção do arcabouço bayesiano nesta tese não decorre de refinamento estatístico, mas de uma exigência imposta pela natureza da série. A função de verossimilhança admite formulação em duas parcelas: para os 91 anos de cota conhecida, avalia a densidade de probabilidade na magnitude registrada; para os 62 anos censurados, avalia a probabilidade de o máximo anual não ter excedido o limiar de percepção (Stedinger e Cohn, 1986). Um mesmo cálculo acomoda, assim, duas afirmações de naturezas distintas, a de que a cheia de 1873 atingiu determinada cota e a de que, nos demais anos do período histórico, nenhuma cheia alcançou 27,00 m. É essa propriedade que permite converter a ausência de registro em informação estatística, em vez de descartá-la como lacuna, e é ela que fundamenta a incorporação dos registros não sistemáticos anunciada no objetivo desta tese.

A distribuição a posteriori raramente admite solução analítica, uma vez que o denominador do teorema de Bayes não possui forma fechada na maior parte dos problemas práticos, o que exige métodos numéricos de amostragem. Os métodos de Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCMC) constroem sequências de conjuntos de parâmetros que, após a convergência, equivalem a amostras da própria distribuição a posteriori, de modo que quantis, intervalos de credibilidade e demais estatísticas passam a ser calculados diretamente sobre o conjunto amostrado. O RMC-BestFit implementa um amostrador populacional adaptativo da família *Differential Evolution Markov Chain* (DE-MCz), no qual múltiplas cadeias evoluem em paralelo e as propostas de novos parâmetros derivam das diferenças entre estados já visitados pelas próprias cadeias, estratégia que ajusta automaticamente a escala e a direção da busca à forma da distribuição e acelera a convergência frente aos algoritmos clássicos de Metropolis-Hastings (Ter Braak e Vrugt, 2008; Smith e Skahill, 2019). As posições de plotagem, calculadas automaticamente pelo software, seguem a formulação de Hirsch e Stedinger (1987), capaz de acomodar dados históricos censurados.

Da amostragem resultam milhares de conjuntos de parâmetros e, portanto, milhares de curvas de frequência compatíveis com os dados, o que impõe uma decisão quanto à forma de

sintetizá-las. A moda a posteriori corresponde ao conjunto de máxima densidade, ou seja, à curva de melhor ajuste condicionada a um único vetor de parâmetros. A distribuição preditiva a posteriori integra os quantis sobre toda a distribuição dos parâmetros e incorpora explicitamente a incerteza paramétrica, o que a torna mais adequada a eventos de elevado tempo de retorno, sobretudo em séries que combinam dados sistemáticos e históricos censurados (Reis e Stedinger, 2005; Smith e Doughty, 2020). Os quantis e tempos de retorno reportados no Capítulo 4 adotam, por essa razão, a distribuição preditiva a posteriori, com intervalos de credibilidade de 90% delimitados pelos percentis 5% e 95% da distribuição a posteriori de cada quantil, obtida das amostras MCMC. A moda a posteriori é apresentada apenas em caráter comparativo, para evidenciar o efeito da incerteza paramétrica sobre as estimativas.

3.5.3 Comparação de cenários com e sem dados históricos

Para quantificar o ganho estatístico proporcionado pela incorporação dos registros históricos, foram desenvolvidas duas análises paralelas: o Cenário A, com análise de frequência utilizando exclusivamente a série instrumental de 87 anos (1939–2025), e o Cenário B, integrando a série instrumental aos registros não sistemáticos, totalizando 153 anos de informação (1873–2025).

A comparação entre os cenários permite avaliar a redução da incerteza nos quantis estimados, expressa pela diminuição da amplitude dos intervalos de credibilidade, e a estabilidade das estimativas para eventos de elevado tempo de retorno (Stedinger e Cohn, 1986). Estudos anteriores demonstram que a incorporação de informação histórica pode adicionar o equivalente a 10 a 30 anos de registro sistemático a partir de 50 anos de observação histórica (Stedinger e Cohn, 1986; Cohn e Stedinger, 1987). A magnitude desse ganho depende do número de eventos históricos documentados, da magnitude do limiar de percepção e da incerteza associada às estimativas das cheias históricas.

3.6 Marcas de limites de inundação e Ciência Cidadã

O mapeamento de marcas de inundação do rio Taquari em Lajeado foi conduzido compreendendo diferentes níveis de alcance das cheias em duas fases metodológicas distintas: (i) levantamentos técnicos de campo com receptor GPS de navegação, realizados durante eventos de cheia no município de estudo; e (ii) a ampliação para uma abordagem de ciência cidadã a partir de setembro de 2023, quando a magnitude e a extensão territorial dos eventos demandaram o engajamento da comunidade para obtenção de cobertura espacial adequada.

3.6.1 Levantamento técnico de marcas de inundação em campo (2007–2024)

O mapeamento de marcas de limites de inundação do rio Taquari em Lajeado foi iniciado em 2007, a partir de levantamentos de campo realizados durante e imediatamente após os eventos de cheia. O procedimento consiste em percorrer o limite horizontal da área inundada, preferencialmente no momento do pico da cheia ou nas primeiras horas após a recessão, quando as marcas de nível máximo permanecem preservadas na paisagem. O limite horizontal corresponde à interseção entre a superfície da água no momento do nível máximo e o terreno natural ou antropizado, representando o indicador espacial direto da extensão do pico da inundação naquele ponto.

Com relação aos equipamentos utilizados e procedimentos de coleta, os pontos de limite horizontal foram coletados com receptor GPS de navegação Garmin GPSmap 60CSx, equipamento portátil com precisão posicional nominal de 3 a 5 metros em condições normais de recepção de sinal. O operador percorre o perímetro da área inundada, posicionando-se sobre a marca visível do nível máximo e registrando as coordenadas geográficas (latitude/longitude, WGS84). Após descarregar os pontos do receptor, os mesmos são convertidos para o sistema de projeção UTM (Zona 22S, SIRGAS 2000), importados para ambiente SIG (ArcGIS) e sobrepostos ao Modelo Digital de Terreno (MDT) e às manchas de inundação geradas pela modelagem hidrodinâmica. A altitude ortométrica de cada ponto foi obtida por extração do valor correspondente no MDT, considerando que, no perímetro horizontal da inundação, a elevação do terreno natural representa o nível máximo da superfície da água naquele local durante o pico do evento.

Os levantamentos de marcas de inundação utilizados foram obtidos a partir de três eventos de referência ao longo do período pré-2023, cujos dados cumpriram dupla função na presente pesquisa e em estudos prévios: serviram tanto como dados de validação (comparação entre mancha simulada e limite observado) quanto como dados de apoio à calibração do modelo hidrodinâmico realizada por Parma (2025), orientando o ajuste dos coeficientes de rugosidade e das condições de contorno.

A inundação de 24 de setembro de 2007 (cota oficial de 26,25 m) teve suas marcas de limite levantadas em Lajeado e os dados foram utilizados na calibração e validação do modelo cartográfico de mapeamento de áreas inundáveis desenvolvido por Eckhardt (2008), que constituiu uma das primeiras aplicações de mapeamento espacial de inundações para o município. A inundação de 10 de outubro de 2015 (cota oficial de 24,51 m) teve seus dados de campo utilizados na validação do mapeamento de áreas suscetíveis a inundações desenvolvido por Moraes (2015), trabalho que gerou a base cartográfica de referência posteriormente empregada em estudos de planejamento urbano. A inundação de 09 de julho de 2020 (cota oficial de 27,39 m, H = 26,84 m), classificada como evento extremo e a maior do período pré-2023 em Lajeado, teve seus dados de campo utilizados na calibração e validação da modelagem hidrodinâmica do evento, desenvolvido no HEC-RAS (Moraes *et al.,* 2023).

Essa base permitiu acompanhar o desempenho do modelo hidrodinâmico em diferentes cenários de inundação, além de subsidiar o refinamento progressivo dos parâmetros de calibração empregados por Parma (2025). A experiência acumulada nas campanhas de coletas foi determinante para a estruturação da campanha de ciência cidadã descrita na seção seguinte, pois o conhecimento sobre os padrões de deposição de marcas, as dificuldades de identificação em campo e os critérios de qualidade foram transferidos para as instruções fornecidas aos voluntários.

3.6.2 Campanhas de ciência cidadã (2023–2024)

A partir de setembro de 2023, o mapeamento de marcas de inundação foi ampliado para uma abordagem de ciência cidadã, motivado pela convergência de fatores operacionais e científicos. As inundações de 05 de setembro de 2023 e 02 de maio de 2024 apresentaram uma magnitude de impacto muito superior às inundações anteriormente mapeadas, não somente em

Lajeado, mas na totalidade dos municípios do Vale do Taquari que fazem fronteira com o Rio Taquari, tornando inviável a cobertura integral do perímetro de inundação por uma equipe técnica reduzida. Somou-se a esse fator o colapso generalizado dos sistemas automáticos de monitoramento durante os eventos extremos, que interrompeu a transmissão de dados telemétricos quando a informação era mais necessária, e a demanda imediata por dados espaciais para produção de mapas de apoio à resposta ao desastre (Moraes *et al.,* 2025). Esse cenário evidenciou a necessidade de abordagens complementares e resilientes para geração de dados, em consonância com as experiências internacionais que demonstram o valor das observações cidadãs em contextos de falha dos sistemas formais de monitoramento (Assumpção *et al.,* 2018; Paul *et al.,* 2018).

A iniciativa envolveu o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) e a Universidade do Vale do Taquari (UNIVATES), mobilizando pesquisadores, estudantes de graduação e pós-graduação e a comunidade local em uma ação colaborativa de coleta de dados georreferenciados (Moraes *et al.,* 2025). O protocolo metodológico foi concebido priorizando simplicidade operacional e acessibilidade tecnológica. A plataforma adotada foi o aplicativo WhatsApp, cuja escolha se fundamentou em dois critérios: (i) a ampla penetração do aplicativo entre a população brasileira, dispensando instalação de *software*s adicionais e; (ii) a funcionalidade nativa de compartilhamento de localização georreferenciada, com precisão compatível com os objetivos de mapeamento. O procedimento de coleta foi estruturado em quatro etapas:

(1) Divulgação e instrução: foi produzido um vídeo de instrução, com duração aproximada de 1 minuto, explicando o conceito de limite horizontal de inundação e o procedimento de coleta. A instrução-chave orientava o voluntário a se deslocar, em segurança, até o local onde observasse a marca visível do pico da inundação horizontal (linha de detritos, lama, cisco ou mancha de umidade) e compartilhar sua localização naquele ponto exato. A divulgação foi realizada por meio de redes sociais, veículos de comunicação local (rádios e portais de notícias regionais), redes de contatos das universidades parceiras, da Defesa Civil municipal e da Prefeitura de Lajeado. O vídeo pode ser acessado através deste link: https://youtube.com/shorts/VUiU72drx-Y?feature=share

(2) Coleta pelo voluntário: o cidadão era instruído a: (a) deslocar-se até o limite horizontal visível da marca do nível máximo da inundação e; (b) abrir o aplicativo WhatsApp e selecionar a função de compartilhamento de localização para o número de celular do IPH/UFRGS designado para recepção dos dados; A instrução enfatizava que o voluntário deveria se posicionar sobre o perímetro da marca, e não em ponto interior à área inundada, pois o objetivo era registrar o limite horizontal e não um ponto aleatório da área atingida.

(3) Recepção e organização: os dados recebidos foram organizados de forma manual em planilhas contendo coordenadas geográficas (latitude e longitude).

(4) Processamento: Para o recorte espacial do município de Lajeado, foram eliminados de pontos duplicados e removidos pontos localizados em áreas comprovadamente não relacionadas aos limites horizontais das inundações.

Os dados de ciência cidadã subsidiaram a validação quantitativa, desenvolvida nesta tese, das manchas simuladas, por comparação direta entre as posições observadas e os limites gerados pelo modelo. Adicionalmente, as manchas geradas a partir da campanha de setembro de 2023 foram disponibilizadas publicamente e compartilhadas com entidades como a Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Infraestrutura do Rio Grande do Sul (SEMA/RS), a Defesa Civil e o Corpo de Bombeiros. Durante os eventos de maio de 2024, o mapa da cheia de 2023 foi utilizado operacionalmente como referência de áreas suscetíveis, orientando o pré-posicionamento de recursos, a busca por desaparecidos, a definição de rotas de evacuação e a localização de abrigos.

A metodologia foi adaptada para outras bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul durante maio de 2024, com participação de múltiplas universidades, demonstrando replicabilidade e escalabilidade da abordagem. A experiência dialoga com frameworks internacionais que defendem a integração transdisciplinar entre cidadãos e hidrologia, como o CANDHY (Nardi *et al.*, 2022), e com aplicações pioneiras de observações cidadãs na modelagem de inundações (Weeser *et al.*, 2019; Strobl *et al.*, 2019), evidenciando que abordagens de baixo custo e tecnologicamente acessíveis podem viabilizar a produção contínua de dados hidrológicos espacialmente distribuídos mesmo nos contextos em que os sistemas formais de monitoramento colapsam.

3.7 Modelagem hidrodinâmica

A modelagem das inundações históricas e extremas do rio Taquari em Lajeado foi realizada por meio de simulação hidrodinâmica bidimensional (2D) em regime não permanente, utilizando o software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), versão 6.6, desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers (USACE). A modelagem 2D foi adotada em função da necessidade de representar adequadamente os padrões de escoamento em planície de inundação, incluindo a propagação lateral do fluxo sobre áreas urbanas e a interação entre o canal principal e as áreas marginais.

A simulação foi executada para eventos de inundação de diferentes magnitudes e períodos históricos: 02 de maio de 2024 (33,67 m), 05 de setembro de 2023 (29,53 m), 07 de outubro de 1873 (29,11 m) e 05 de maio de 1941 (28,87 m), além de inundações com menor magnitude e com dados de campo – sendo elas: 24 de setembro de 2007 (26,25 m), 10 de outubro de 2015 (24,51 m) e 09 de julho de 2020 (27,39 m). Os eventos contemporâneos (2023 e 2024) serviram à validação do modelo com base em dados de monitoramento sistemático e de ciência cidadã; os dois eventos pré-instrumentais foram simulados em modo de retromodelagem propriamente dita, com validação por marcas físicas preservadas em edificações centenárias do município e reconstruídas neste trabalho.

3.7.1 O modelo HEC-RAS

O HEC-RAS é um sistema de modelagem hidráulica de uso livre e distribuição gratuita, desenvolvido e mantido pelo Hydrologic Engineering Center do U.S. Army Corps of Engineers, amplamente empregado em estudos de engenharia fluvial, gestão de recursos hídricos e análise

de risco de inundações. O modelo foi originalmente desenvolvido e calibrado na versão 6.4.1 (Parma, 2025) e executado nesta tese na versão 6.6, sem alteração de geometria, malha ou parâmetros, condição que preserva a validade da calibração. A escolha pela versão mais recente decorre de sua robustez bidimensional consolidada e da disponibilidade gratuita (USACE, 2024;2025). O módulo bidimensional resolve as equações de águas rasas (Shallow Water Equations - SWE), derivadas das equações de Navier-Stokes pela integração na vertical sob hipóteses de distribuição hidrostática de pressões, fluido incompressível, declividade pequena do fundo, acelerações verticais desprezíveis e nível d'água horizontal na seção transversal. A formulação compreende a equação de continuidade e as equações de quantidade de movimento nas direções x e y, na forma das equações de Saint-Venant bidimensionais, com a declividade da linha de energia expressa pela equação de Manning em função da vazão, da área molhada, do raio hidráulico e do coeficiente de rugosidade (USACE, 2024; 2025).

O solver adotado nas simulações foi o SWE-ELM (Shallow Water Equations – Eulerian-Lagrangian Method), recomendado para domínios extensos com planícies de inundação amplas e geometria irregular, configuração que descreve o trecho Arroio do Meio–Mariante. A discretização da equação da continuidade emprega aproximações de volumes finitos sobre malha não estruturada de células poligonais; a equação de momentum combina termos discretizados pelo método semi-implícito de Crank-Nicolson, ponderando contribuições dos passos de tempo n e n+1, com tratamento lagrangiano da advecção. A estabilidade numérica do esquema é controlada pela condição de Courant (Courant; Friedrichs; Lewy, 1967), mantida obrigatoriamente menor do que a unidade ao longo de todo o domínio, e o algoritmo de molhamento e secagem permite que células passem dinamicamente da condição seca para molhada, requisito essencial para representar o avanço e a recessão da frente de inundação sobre a planície (USACE, 2024; Parma, 2025).

3.7.2 Dados topográficos

A representação altimétrica do terreno constitui dado de entrada fundamental para a modelagem hidrodinâmica, determinando diretamente a extensão das áreas inundadas e a distribuição das profundidades simuladas. O modelo digital de terreno (MDT) utilizado na retromodelagem foi composto pela integração de múltiplas bases topográficas com diferentes resoluções e origens, adotando-se uma hierarquia de prioridade na qual os dados de maior resolução e confiabilidade sobrescrevem os de menor qualidade nas áreas de sobreposição (Parma, 2025).

A hierarquia adotada, da maior para a menor prioridade, foi a seguinte: (i) batimetria do rio Taquari levantada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) em 2024, com geometria real do leito no trecho navegável; (ii) MDT de Lajeado da Prefeitura Municipal, gerado por aerofotogrametria executada pela empresa Base Aerofotogrametria e Projetos entre 2012 e 2014, com curvas de nível de 1 m, escala 1:2.000 (Moraes, 2015); (iii) seções topobatimétricas dos rios Taquari e Forqueta; (iv) MDE de Estrela disponibilizado pelo SGB, de 2014, com resolução de 2,5 m; e (v) ANADEM (IPH/UFRGS e ANA), modelo digital de terreno com remoção de viés vegetativo derivado do Copernicus GLO-30, com resolução de 30 m, utilizado nas áreas externas à cobertura dos modelos de maior resolução. A adoção do

ANADEM nas áreas externas à cobertura dos modelos de maior resolução encontra respaldo em avaliações comparativas recentes de modelos digitais de elevação globais de acesso livre aplicados à modelagem de inundações no HEC-RAS em bacias brasileiras (Salgado *et al.*, 2026).

3.7.3 Dados batimétricos

A representação da geometria do canal principal do rio Taquari constitui componente essencial para a simulação da propagação do fluxo. Duas fontes de dados batimétricos foram integradas ao modelo: a primeira fonte compreende as seções transversais levantadas pelo DNIT no rio Taquari, que fornecem informações detalhadas sobre a geometria do leito no trecho navegável, realizados em 2023 e 2024, para os trechos entre Lajeado e Bom Retiro do Sul, empregada também na nota técnica de Collischonn *et al.* (2025b) sobre modificações do leito do Taquari. A segunda fonte compreende as seções topobatimétricas dos rios Taquari e Forqueta levantadas em 2025 pela empresa Hydrodata Engenharia, entre Arroio do Meio e Mariante, complementando a cobertura do DNIT em trechos sem dados batimétricos atualizados, especialmente no rio Forqueta, afluente cuja confluência com o Taquari delimita o extremo de montante do domínio.

3.7.4 Domínio da simulação

O domínio computacional foi definido para abranger o trecho do rio Taquari entre Arroio do Meio, próximo à confluência com o rio Forqueta no extremo de montante, e o distrito de Mariante em Venâncio Aires, no extremo de jusante, totalizando aproximadamente 38,47 km ao longo do canal principal e contemplando parcial ou integralmente os municípios de Arroio do Meio, Lajeado, Estrela, Bom Retiro do Sul e Venâncio Aires. A delimitação responde à dupla exigência de incluir todas as áreas urbanas potencialmente afetadas pelas cheias do trecho final do Taquari e de posicionar as condições de contorno em seções suficientemente afastadas da área de interesse, o município de Lajeado, para minimizar efeitos de contorno sobre os resultados.

A discretização espacial foi realizada por malha não estruturada com resolução variável, configurada pela combinação de regiões de refinamento e Break Lines no RAS Mapper. Adotou-se célula quadrada de 100 m de lado para o domínio geral, sobre as planícies de inundação afastadas dos canais; refinamento intermediário para 50 m em regiões de refinamento posicionadas em zonas com gradientes hidráulicos mais elevados ou onde simulações preliminares apresentaram instabilidade; e refinamento adicional para 20 m em Break Lines acompanhando os canais principais do rio Taquari, do rio Forqueta e do Arroio Forquetinha, garantindo representação fina da geometria das calhas e da transição canal-planície. A **Figura 24** observa-se a transição entre os três níveis de resolução — malha regular nas encostas, adensamento progressivo na planície e alinhamento das células ao eixo dos canais pelas *Break Lines* —, com o refinamento concentrado na faixa de maior gradiente topográfico entre a calha e a planície de inundação.

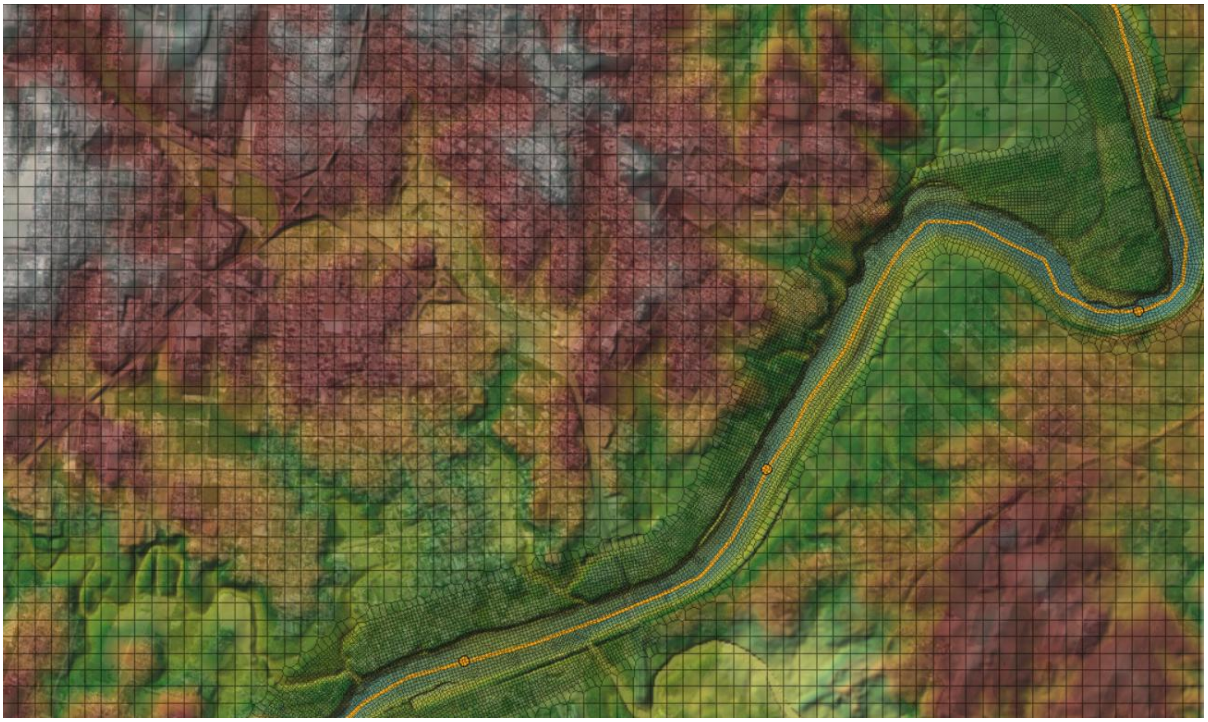


Figura 24 - Detalhe da discretização do modelo HEC-RAS 2D

3.7.5 Condições de contorno

As condições de contorno regem o comportamento hidráulico nos limites do domínio computacional. Foram impostas três: duas a montante, representadas por hidrogramas de vazão prescritos sobre o rio Taquari (em Arroio do Meio) e o rio Forqueta (cerca de 2 km a montante da confluência com o Taquari); e uma a jusante, do tipo profundidade normal (*Normal Depth*), aplicada à seção de Mariante (Venâncio Aires) com cálculo de nível d'água único ao longo da linha de contorno, mantendo-se a configuração do modelo calibrado (Parma, 2025). O posicionamento do contorno de jusante em seção afastada da área de interesse minimiza a influência dessa condição sobre os resultados em Lajeado, conforme verificado na etapa de validação.

Os hidrogramas de montante foram construídos como ondas sintéticas triangulares simétricas, com vinte dias de duração total, com dez dias de ascensão gradual até o pico de vazão e dez dias de recessão gradual. A vazão foi de 90% no rio Taquari e 10% no rio Forqueta, conforme proporção das áreas de drenagem contribuintes na confluência. Embora este hidrograma não seja típico do que efetivamente ocorre na região, a janela temporal mais longa do hidrograma sintético permite extração estável de manchas associadas a cotas intermediárias da régua, viabilizando a geração consistente de produtos cartográficos de retromodelagem para níveis específicos **(Figura 25)**.

Como condição inicial, atribuiu-se cota uniforme de 13 m a todo o domínio bidimensional, valor correspondente à cota de alerta da estação telemétrica Porto Mariante, um metro abaixo de sua cota de inundação. Essa configuração assegura equilíbrio hidrostático inicial e facilita a estabilização numérica durante o intervalo de aquecimento, enquanto os hidrogramas de entrada ainda apresentam vazões baixas.

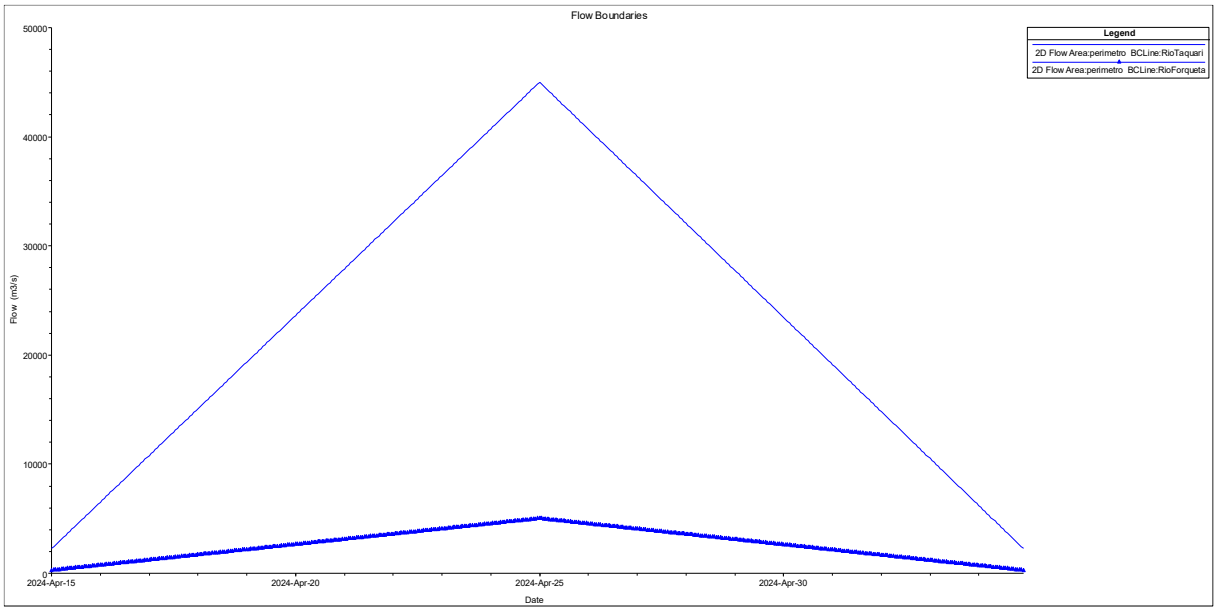


Figura 25 – Hidrogramas sintéticos triangulares de entrada do modelo: 10 dias de ascensão e 10 de recessão, com partição de 90% (Taquari) e 10% (Forqueta), adaptação sobre a configuração de calibração de Parma (2025). Fonte: elaboração própria.

3.7.6 Calibração e validação do modelo hidrodinâmico

A calibração do modelo hidrodinâmico aplicado à presente tese foi previamente realizada por Parma (2025), em trabalho de conclusão de curso desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS sob coorientação da autora da presente tese, especificamente para o trecho do rio Taquari entre Arroio do Meio e Mariante. Os parâmetros calibrados, coeficientes de rugosidade de Manning n = 0,040 para o canal principal e n = 0,200 para as planícies de inundação, malha computacional de 100, 50 e 20 m, número de Courant entre 0,5 e 1,0 e configurações do solver SWE-ELM, foram ajustados iterativamente até a convergência das manchas simuladas com 381 pontos de validação levantados em campo nas cheias de 2007, 2015, 2020, 2023 e 2024 (Eckhardt, 2008; Moraes, 2015; Moraes *et al.*, 2023; Moraes *et al.*, 2025; Marcuzzo *et al.*, 2024), alcançando diferença horizontal média de 9,2 m e mediana de 7,6 m em relação aos limites observados (Parma, 2025).

Os valores de rugosidade adotados estão consolidados na literatura de hidráulica fluvial. O coeficiente n = 0,040 é representativo de canais naturais de médio porte com leito de cascalho e curvatura moderada, faixa documentada por Barnes Jr. (1967) a partir de medições em rios norte-americanos. O coeficiente n = 0,200 situa-se no limite superior da faixa documentada por Arcement Jr. e Schneider (1989) para planícies de inundação com ocupação urbana e vegetação heterogênea, valor que incorpora a resistência composta gerada por edificações, arruamentos, cercas e detritos mobilizados durante eventos extremos, fenômeno consistentemente observado nos registros fotográficos das inundações de setembro de 2023 e maio de 2024 em Lajeado.

As cotas máximas reconstruídas para os eventos, 29,11 m em outubro de 1873 e 28,87 m em maio de 1941, situam-se dentro da amplitude de calibração do modelo, que abrange pontos de campo das cheias de 2007 a 2024, com cotas máximas entre 24,51 m a 33,67 m. A maior cheia modelada nesta tese, ocorrida em maio de 2024, excede as cotas dos eventos históricos e posiciona 1873 e 1941 em região central da amplitude calibrada. A transferibilidade

de parâmetros calibrados em eventos de maior frequência para a simulação de eventos de maior magnitude no mesmo domínio físico encontra fundamentação metodológica e empírica em Coutinho (2015), que demonstrou em Colatina/ES, no rio Doce, com base em sete seções de réguas linimétricas e mapeamento sistemático das manchas observadas, que parâmetros calibrados em evento de menor magnitude reproduziram com boa precisão evento de maior magnitude no mesmo trecho.

A validação do modelo nesta tese foi conduzida em duas frentes complementares: (i) a comparação entre as manchas simuladas e os pontos georreferenciados de campo e ciência cidadã coletados nas cheias de setembro de 2007, 2015, 2020, setembro de 2023 e maio de 2024; e (ii) o confronto entre as cotas simuladas e as marcas físicas preservadas no Colégio Evangélico Alberto Torres, incluindo a reconstrução do nível de outubro de 1873.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir envolvem consolidação da série histórica de inundações do rio Taquari em Lajeado, combinando dados não sistemáticos e sistemáticos. A apresentação segue uma lógica progressiva: parte de registros documentais e das marcas físicas históricas aferidas no CEAT, passa pela reconstrução da cheia de 1873, avança para a consolidação da série histórica, análise de frequência e, por fim, a modelagem e retromodelagem hidrodinâmica dos eventos extremos recente e históricos.

4.1 Dados não sistemáticos

Os resultados da análise histórica de inundações, anterior ao período sistemático, encontraram registros documentais relacionados à ocorrência de inundações no Rio Taquari datados desde meados do início do século XIX até 1938. Durante esse período de mais de um século, foram documentados 28 eventos relevantes de inundações, por meio de registros históricos organizados pelo historiador José Alfredo Schierholt, documentação da Hemeroteca Digital Brasileira e marcas físicas preservadas no CEAT (**Tabelas 4 e 5**). Para 4 desses eventos hidrológicos foi possível definir a data de ocorrência e reconstruir o nível máximo ortométrico das inundações. Para as outras 24 inundações, não foi possível recuperar informações do nível máximo, com informações parciais sobre ano, mês e/ou dia de ocorrência e informações gerais sobre as consequências e formas de auxílio aos atingidos.

Essa assimetria entre eventos com nível recuperável e eventos apenas mencionados não constitui falha do registro, mas propriedade estrutural das fontes documentais históricas, cuja densidade informacional acompanha a magnitude e o impacto dos eventos (Brázdil *et al.*, 2006). É essa mesma propriedade que fundamenta o conceito de limiar de percepção adotado na análise de frequência: eventos documentados sem cota recuperável informam que cheias notáveis ocorreram, enquanto os anos sem registro informam que os máximos permaneceram abaixo do nível que motivava documentação.

Tabela 4 - Eventos de inundação do rio Taquari com nível máximo reconstruído no período não sistemático (1873–1938)

Data	Fonte do registro	Altitude ortométrica H (m) das fontes de registro	Cota oficial (m)
07/10/1873	Hemeroteca Digital Brasileira / Schierholt	28,56 / 28,47	29,11
11/08/1912	CEAT / Schierholt	27,18 / 27,28	27,73
22/11/1919	CEAT / Schierholt	26,63 / 26,60	27,18
09/09/1928	CEAT / Schierholt	26,85 / 26,87	27,40

Fonte: elaborado pela autora com base em Schierholt (2024, não publicado), acervo do Colégio Evangélico Alberto Torres (CEAT) e Hemeroteca Digital Brasileira.

Nota 1: Cota oficial = altitude ortométrica (H) + 0,55 m; valores apresentados na ordem das fontes indicadas.

Tabela 5 - Eventos de inundação do rio Taquari documentados no período não sistemático sem nível máximo reconstruído (1824–1938).

Ano	Data conhecida	Fonte do registro
1824	Maio	Schierholt (2024, não publicado)
1833	Setembro	Schierholt (2024, não publicado); Isabelle (2006 [1835])

Ano	Data conhecida	Fonte do registro
1842	–	Schierholt (2024, não publicado)
1847	Setembro	Schierholt (2024, não publicado)
1848	Julho	Schierholt (2024, não publicado)
1850	–	Schierholt (2024, não publicado)
1853	Setembro	Schierholt (2024, não publicado)
1853	Outubro	Schierholt (2024, não publicado)
1858	–	Schierholt (2024, não publicado)
1872	–	Schierholt (2024, não publicado)
1893	–	Schierholt (2024, não publicado)
1897	Junho	Schierholt (2024, não publicado)
1899	07/12/1899	Schierholt (2024, não publicado)
1902	–	Schierholt (2024, não publicado)
1905	Agosto	Schierholt (2024, não publicado)
1906	–	Schierholt (2024, não publicado)
1911	–	Schierholt (2024, não publicado)
1914	08/09/1914	Schierholt (2024, não publicado)
1917	–	Schierholt (2024, não publicado)
1926	Setembro	Schierholt (2024, não publicado)
1926	Outubro	Schierholt (2024, não publicado)
1927	–	Schierholt (2024, não publicado)
1929	–	Schierholt (2024, não publicado)
1936	08/10/1936	Schierholt (2024, não publicado)

Fonte: elaborado pela autora com base em Schierholt (2024, não publicado).

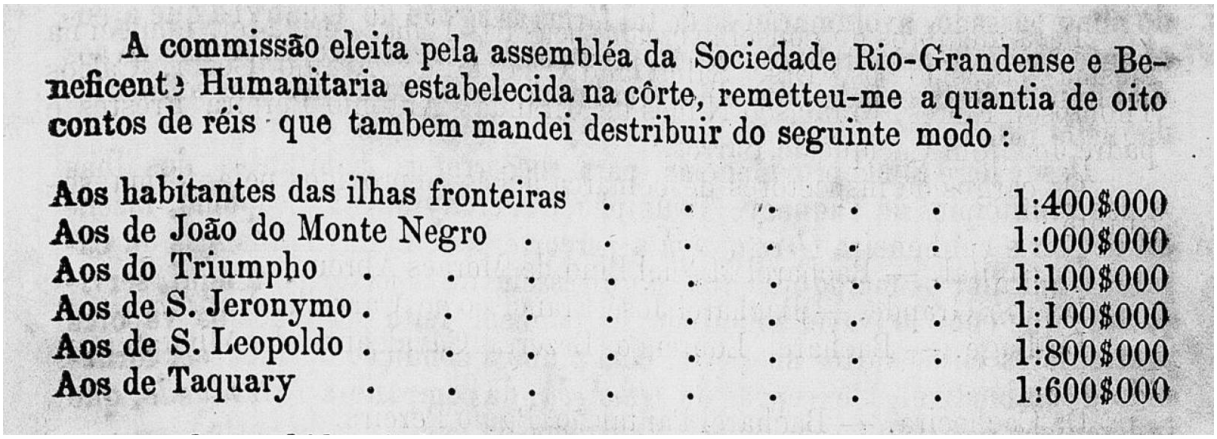
Nota 1: O evento de maio de 1824 corresponde à primeira enchente registrada nas antigas fazendas da região, no período do povoamento (Schierholt, 2024).
Nota 2: As inundações sucessivas de setembro e outubro de 1853 constam de ata da Câmara de Taquari de 20/10/1853, que registra o socorro a 44 famílias que perderam suas lavouras, com fundamento no art. 179, § 31, da Constituição do Império, e a distribuição de 80 alqueires de feijão, 60 de milho e 88 de farinha (Schierholt, 2024). O registro administrativo do socorro ilustra o mecanismo de documentação que caracteriza o limiar de percepção da época.
Nota 3: De acordo com a descrição de Schierholt, as cheias de 1858 acabaram com a colonização de Mariante e das áreas próximas ao rio Taquari em Estrela e Lajeado, motivando o surgimento de colônias afastadas das margens, como Glória, Teutônia, Conventos e Forquetinha (Schierholt, 2024).
Nota 4: Entre os eventos com nível reconstruído (Tabela 4), a enchente de 21 e 22/11/1919 causou 24 mortes e a destruição total de 55 casas em Lajeado (Schierholt, 2024).
Nota 5: Relatos de viajantes naturalistas fornecem contexto qualitativo anterior e contemporâneo ao período tabulado: Saint-Hilaire descreveu o Taquari como "muito volumoso" na confluência com o Jacuí em maio de 1821 (Saint-Hilaire, 2002), e Isabelle documentou cheia extraordinária de abrangência "provincial" em 1833, com inundações registradas no Jacuí, no Guaíba e no rio Pardo (Isabelle, 2006 [1835]), convergindo, de forma independente, com o evento de 1833 listado por Schierholt (2024, não publicado).

4.1.1 Registros Documentais Identificados na Hemeroteca Digital Brasileira

Do conjunto de 28 eventos documentados no período não sistemático, apenas o registro da cheia de 1873 foi identificado nos Relatórios de Presidentes das Províncias Brasileiras do

período imperial (1830-1889), disponibilizados pela Hemeroteca Digital Brasileira (BNDIGITAL, s.d.). Esse registro constitui evidência oficial da ocorrência de eventos hidrológicos significativos, com documentação da resposta governamental em escala provincial da época. Cabe ressaltar que foram encontrados outros registros de inundações, mas focados na área de estudo desta tese, apenas a cheia de 1873, demonstrando níveis de limiares de percepção para a ocorrência de registros oficiais da época.

Notavelmente, do conjunto de registros identificados, o evento de outubro de 1873 apresenta a documentação mais detalhada e abrangente, com evidências da magnitude excepcional do fenômeno. O *Relatório de 07 de março de 1874* do Presidente da Província do Rio Grande do Sul dedica as páginas 13 e 15 aos "socorros à inundação", referindo-se à cheia extraordinária de outubro de 1873. O documento registra a distribuição de donativos e auxílios para uma região de grande extensão do Rio Grande do Sul, indicando mobilização governamental em escala estadual (**Figura 26**).

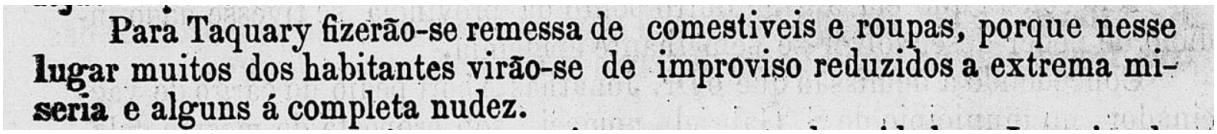


A commissão eleita pela assembléa da Sociedade Rio-Grandense e Beneficente Humanitaria estabelecida na côrte, remetteu-me a quantia de oito contos de réis que tambem mandei destribuir do seguinte modo:

Aos habitantes das ilhas fronteiras	1:400$000
Aos de João do Monte Negro	1:000$000
Aos do Triumpho	1:100$000
Aos de S. Jeronymo	1:100$000
Aos de S. Leopoldo	1:800$000
Aos de Taquary	1:600$000

Figura 26 - Página 13 do Relatório Provincial de 07/03/1874: registro de "socorros à inundação" referente ao evento extraordinário de outubro de 1873 (Fonte: Relatórios dos Presidentes das Províncias Brasileiras - RS, 1874, Hemeroteca Digital Brasileira).

Para o município de Taquari, que na época abrangia boa parte do território posteriormente desmembrado em municípios do Vale do Taquari, o relatório apresenta destaque específico quanto às ações de auxílio e à extensão dos impactos. A amplitude geográfica da resposta governamental documentada oficialmente corrobora a magnitude excepcional atribuída ao evento de 1873, **Figura 27**.

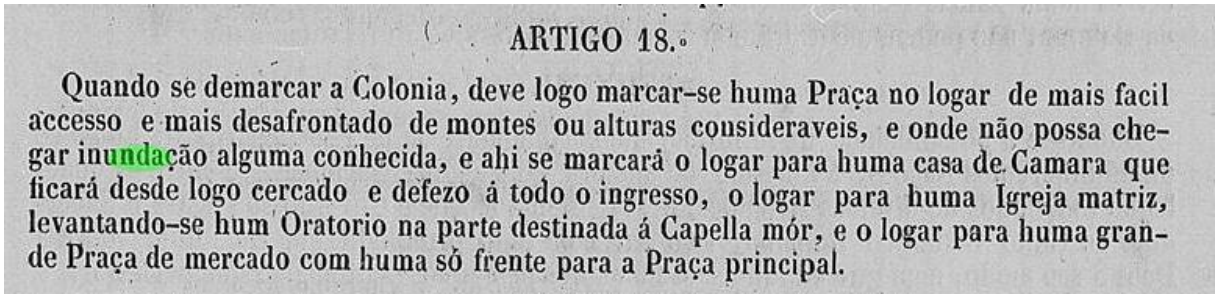


Para Taquary fizerão-se remessa de comestiveis e roupas, porque nesse lugar muitos dos habitantes virão-se de improviso reduzidos a extrema miseria e alguns á completa nudez.

Figura 27 - Página 15 do Relatório Provincial de 07/03/1874: destaque específico para o município de Taquary (Fonte: Relatórios dos Presidentes das Províncias Brasileiras - RS, 1874, Hemeroteca Digital Brasileira).

A pesquisa nos Relatórios Provinciais também identificou evidências da incorporação do conhecimento sobre inundações no planejamento territorial do século XIX. O Regulamento para Colônias Militares e Agrícolas, estabelecido pela Lei Provincial n.º 225 de 20 de maio de 1848, determina em seu Artigo 18, as condições ideais para o início e estabelecimento das colônias determinando-as como espaços "onde não possa chegar inundação alguma conhecida" (**Figura 28**). Esse dispositivo legal demonstra que eventos hidrológicos extremos já constituíam

critério oficial e orçamentariamente respaldado para o ordenamento territorial das colônias no período imperial, anterior ao início do monitoramento sistemático. A referência explícita a "inundações conhecidas" neste dispositivo legal, em 1848, corrobora com os registos de ocorrência dos eventos anteriormente documentados, reforçando a historicidade das inundações no Vale do Taquari desde o início do processo de colonização europeia na região. Cabe ressaltar que estes capítulos tratam do que há de registros de ocorrências de cheias, em geral, encontradas com o processo de colonização. A ocorrência de inundações dado a dinâmica da BHTA é anterior a colonização e certamente de conhecimento dos povos originários.



ARTIGO 18.º

Quando se demarcar a Colonia, deve logo marcar-se huma Praça no logar de mais facil accesso e mais desafrontado de montes ou alturas consideraveis, e onde não possa chegar inundação alguma conhecida, e ahi se marcará o logar para huma casa de Camara que ficará desde logo cercado e defezo á todo o ingresso, o logar para huma Igreja matriz, levantando-se hum Oratorio na parte destinada á Capella mór, e o logar para huma grande Praça de mercado com huma só frente para a Praça principal.

Figura 28 - Artigo 18 do documento de 1848 sobre demarcação de colônias: (Fonte: Relatórios dos Presidentes das Províncias Brasileiras - RS, 1848, Hemeroteca Digital Brasileira).

A convergência entre os registros documentais da Hemeroteca Digital e as demais fontes de dados não sistemáticos utilizadas nesta tese (fotografias históricas, relatos de historiadores locais e registros da Ata da Câmara de Taquari) demonstra a complementaridade entre diferentes metodologias de recuperação de informações históricas. O evento de 1873, classificado como "cheia extraordinária" nos registros oficiais provinciais e identificado como um dos maiores eventos de inundações exemplifica a consistência entre fontes documentais independentes para validação de eventos extremos históricos e limiares de percepção históricos.

4.1.2 Resultados de marcas de cheia no CEAT

A reconstrução de eventos extremos e catastróficos de inundações no Vale do Taquari (VT), tendo por referência a cidade de Lajeado, envolveu a recuperação de informações documentais, registros fotográficos, marcas físicas e medições topográficas *in loco* da altitude ortométrica (H) dos níveis máximos alcançados pelas enchentes mais representativas desde o ano de 1912 no CEAT. A recuperação e reconstrução não sistemática de informações sobre eventos hidrológicos extremos são uma alternativa interessante para ampliar as séries históricas, considerando períodos em que ocorreram enchentes e inundações importantes, mas sem a devida sistematização na documentação.

Conforme descrito no capítulo da metodologia, uma das estratégias utilizadas para a reconstrução não sistemática dos níveis das inundações históricas de Lajeado envolveu a aferição topográfica das marcas das inundações em um dos prédios do CEAT, em que há um conjunto de placas de metal fixadas em um pilar (ponto 6 da **Figura 13**), com prolongamento na parede externa do prédio. A **Tabela 6** apresenta a lista das marcas das inundações registradas no CEAT e a altitude ortométrica (H) correspondente aferida em campo, combinando levantamento topográfico com GNSS RTK e Estação Total, referenciada aos marcos da RRCM de Lajeado, que por sua vez estão referenciadas aos Referenciais de Nível (RN) do Banco de Dados Geodésicos (BDG) do IBGE. A utilização quantitativa de marcas físicas pressupõe a

verificação de sua confiabilidade, condição estabelecida na literatura de marcas de cheia, que recomenda avaliar a integridade posicional, a continuidade de custódia e a possibilidade de confronto com fontes independentes (Bösmeier *et al.*, 2022). No caso do CEAT, essas condições são atendidas pela preservação institucional contínua desde 1912, pelo vínculo geodésico do nivelamento à rede oficial e pelo cruzamento com os registros documentais independentes. Os levantamentos foram realizados nos dias 20 e 27 de abril, 07 de setembro e 24 de novembro de 2023, complementados em 05 de maio de 2024, ainda durante a recessão da inundação catastrófica de 02 de maio de 2024.

Tabela 6 - Lista das inundações históricas marcadas com placas metálicas no pilar do prédio do CEAT, a data de ocorrência e a altitude ortométrica (m) aferida *in loco*, organizadas em ordem decrescente de magnitude.

Identificação da marca da inundação no CEAT	Data de Ocorrência da Inundação	Altitude Ortométrica aferida no CEAT (m)
02/05/2024	02/05/2024	33,30
05/09/2023	05/09/2023	29,00
19/11/2023	19/11/2023	28,49
1941	05/05/1941	28,49
1940	18/07/1940	27,32
13/05/2024	13/05/2024	27,20
1912	01/09/1912	27,18
1956	06/04/1956	27,03
07/2020	09/07/2020	26,90
1928 - Posição 2	09/09/1928	26,90
1928 - Posição 1	09/09/1928	26,85
1919	22/11/1919	26,63
10/2001	02/10/2001	26,32
07/2011	21/07/2011	26,21
2008	27/10/2008	26,00
1990	01/06/1990	25,92
07/2001	21/07/2001	25,72
09/2007	24/09/2007	25,67
1965	21/08/1965	25,32
1989	25/09/1989	25,23
09/1987*	21/09/1967*	24,91
09/1989	13/09/1989	24,57
1982	29/06/1982	24,16
08/2011	10/08/2011	24,01
09/2009	13/09/2009	23,91
07/2007	11/07/2007	23,85

* A placa fixada no CEAT indica a data de 09/1987, ano em que ocorreram 3 cheias de magnitude pequena. O nível dessa placa é da inundação de 21/09/1967, combinando com os dados do posto fluviométrico 86870000.

Moraes *et al*. (2024) contextualiza que pode haver incertezas associadas com os níveis máximos das inundações medidos a partir das marcas históricas no CEAT. Isso ocorre, principalmente, porque não é possível ter certeza que as marcas foram colocadas na posição correta, especialmente no caso das marcas das inundações anteriores ao ano de 1970 (ano final da construção do prédio onde estão as marcas), já que essas marcas foram colocadas em cotas transportadas por algum tipo de nivelamento, a partir do seu local original. A confiabilidade na

posição correta das marcas das inundações mais recentes tende a ser maior. Outro aspecto importante mencionado pelos autores é que as marcas das inundações existentes no CEAT não deveriam ser comparadas diretamente com observações de cotas máximas ou marcas históricas em outros pontos ao longo do rio Taquari, por conta da declividade da linha da água, que pode ser da ordem de 30 a 40 cm de altura por km de distância durante as cheias nesse trecho.

Apesar das incertezas potenciais mencionadas por Moraes *et al*. (2024), as marcas históricas dos níveis máximos das inundações disponíveis no CEAT, desde o ano de 1912, são muito relevantes pois permitem checar a coerência dos níveis das inundações registradas pelo levantamento sistemático e por permitirem estender a série histórica dos níveis das inundações para períodos longos do passado, anteriores ao monitoramento sistemático. Considerando o período de 1912 até 2022, há a fixação de 22 placas metálicas no pilar de referência do prédio do CEAT, localizado na lateral da Rua Carlos Von Koseritz, sinalizando que o local utilizado pelo colégio para marcar as principais inundações foi atingido por, pelo menos, 22 inundações de grande magnitude em 110 anos, representando um histórico de 1 inundação de grande magnitude a cada 5 anos. A placa metálica posicionada na posição mais alta está identificada como 1941, correspondendo à inundação histórica de 05 de maio de 1941, cujo nível máximo foi utilizado para definir a altura e posicionamento da viga do segundo andar dos prédios do colégio, sobre a qual estão localizadas as salas de aula do CEAT. Até o final de 2022, nenhuma inundação havia superado a referida viga, sem atingir as salas de aula localizadas logo acima. Essa sequência de eventos independentes acima do limiar de percepção do local constitui, na prática, uma série de duração parcial (*peak over threshold*) de origem não sistemática, materializando, em registro físico, o conceito apresentado na seção 3.2.

Os anos de 2023 e 2024 foram marcados por diversas enchentes na BHTA, que resultaram em 4 inundações com magnitude extrema no trecho médio e inferior da bacia hidrográfica, atingindo novamente o prédio do CEAT onde estão fixadas as marcas referentes às inundações históricas, permitindo a comparação e aferição direta entre o nível da água dessas 4 inundações com as marcas das cheias históricas. Em 2023, a primeira inundação ocorreu entre os dias 4 e 6 de setembro, com pico em Lajeado no dia 5 (terça-feira), superando o nível da viga e atingindo as salas de aulas do segundo andar do CEAT pela primeira vez na história. A segunda inundação teve seu pico no dia 19 de novembro de 2023 (domingo) em Lajeado e foi um pouco menor do que a de setembro, superando um pouco o limite superior da viga, com nível equivalente com a inundação histórica de 05 de maio de 1941. Em 2024, entre o final de abril e início de maio, decorrente de chuvas excepcionais no RS, ocorreu o evento hidrológico e desastre natural mais extraordinário e catastrófico da BHTA, que causou inundações, enxurradas e movimentos de massa generalizados, com pico no dia 02 de maio de 2024 (quinta-feira) em Lajeado. Esse evento superou em mais de 4 metros a inundação de 05 de setembro de 2023 e de quase 5 metros o nível da viga do segundo andar do CEAT. Nos dias seguintes, houve a recessão completa do rio Taquari e as chuvas retornam com amplitude e intensidade na BHTA, resultando em mais uma inundação importante e de grande magnitude, com pico no dia 13 de maio de 2024, ficando cerca de 1 metro abaixo da viga do segundo andar do CEAT.

A inundação de 5 de setembro de 2023 atingiu um nível de 51 cm acima da marca da cheia de 05 de maio de 1941, representada pelo limite superior da viga do prédio do CEAT (**Figura 29**). A diferença foi medida de forma manual, com uma trena milimetrada, na própria

estrutura do prédio, no dia 06 de setembro, imediatamente após a redução do nível da água no local e antes da remoção dos resíduos e da lama por parte da equipe de limpeza. A direção do CEAT fixou uma nova placa metálica na parede externa do prédio, no alinhamento do prolongamento do pilar, para documentar o nível máximo da inundação de 05 de setembro.

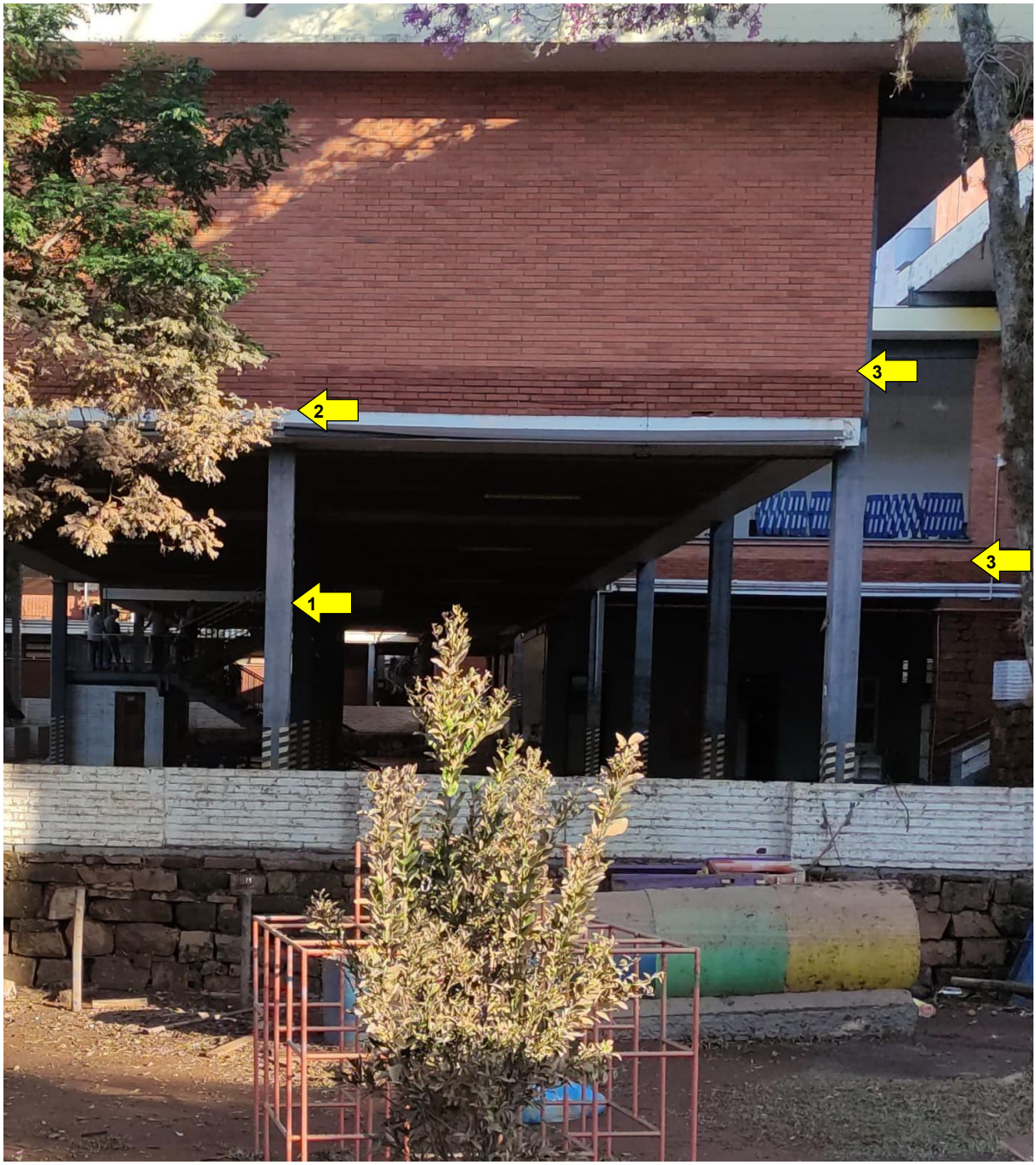


Figura 29 - Vista lateral do pilar do prédio do CEAT (Seta 1) onde estão fixadas as placas das marcas das inundações históricas, visto a partir da rua Carlos Von Koseritz, destacando a mancha de umidade resultante da inundação de 5 de setembro de 2023 (Seta 3), localizada 51 cm (7 tijolos) acima do limite superior da viga branca, que representa o local em que está marcado nível máximo da inundação de 05 de maio de 1941 (Seta 2).

Conforme Moraes *et al*. (2024), a inundação de 19 de novembro de 2023 cobriu completamente a viga do prédio sobre a coluna onde estão as marcas históricas das inundações. Com base na observação direta e a aferição dos níveis das duas inundações de 2023 no prédio

do CEAT com as marcas históricas das cheias, conclui-se que a inundação de 19 de novembro de 2023 igualou o nível da grande cheia de 1941, e que **a inundação de 5 de setembro de 2023 superou a cheia de 1941 em 51 cm na cidade de Lajeado**. A diferença de 51 cm entre as inundações de 5 de setembro de 2023 e 19 de novembro de 2023 também foi observada, medida e registrada em mais locais da cidade de Lajeado, como por exemplo, na Rua Júlio May, nº 242, na parede lateral localizada abaixo do acesso da Prefeitura Municipal de Lajeado.

A inundação catastrófica de 02 de maio de 2024 alcançou um nível máximo em Lajeado e demais cidades do Vale do Taquari muito acima de todas as demais inundações observadas e projetadas. A referida inundação cobriu toda a parede acima do pilar do prédio do CEAT onde estão as marcas históricas das inundações (**Figura 30**). A partir disso, a aferição direta da diferença de nível da inundação de 02 de maio de 2024 com a inundação de 5 de setembro de 2023 e com a grande cheia de 05 de maio de 1941 foi realizada na parede do mesmo prédio, localizada na lateral da escada que conduz ao andar superior do prédio (**Figura 31**).

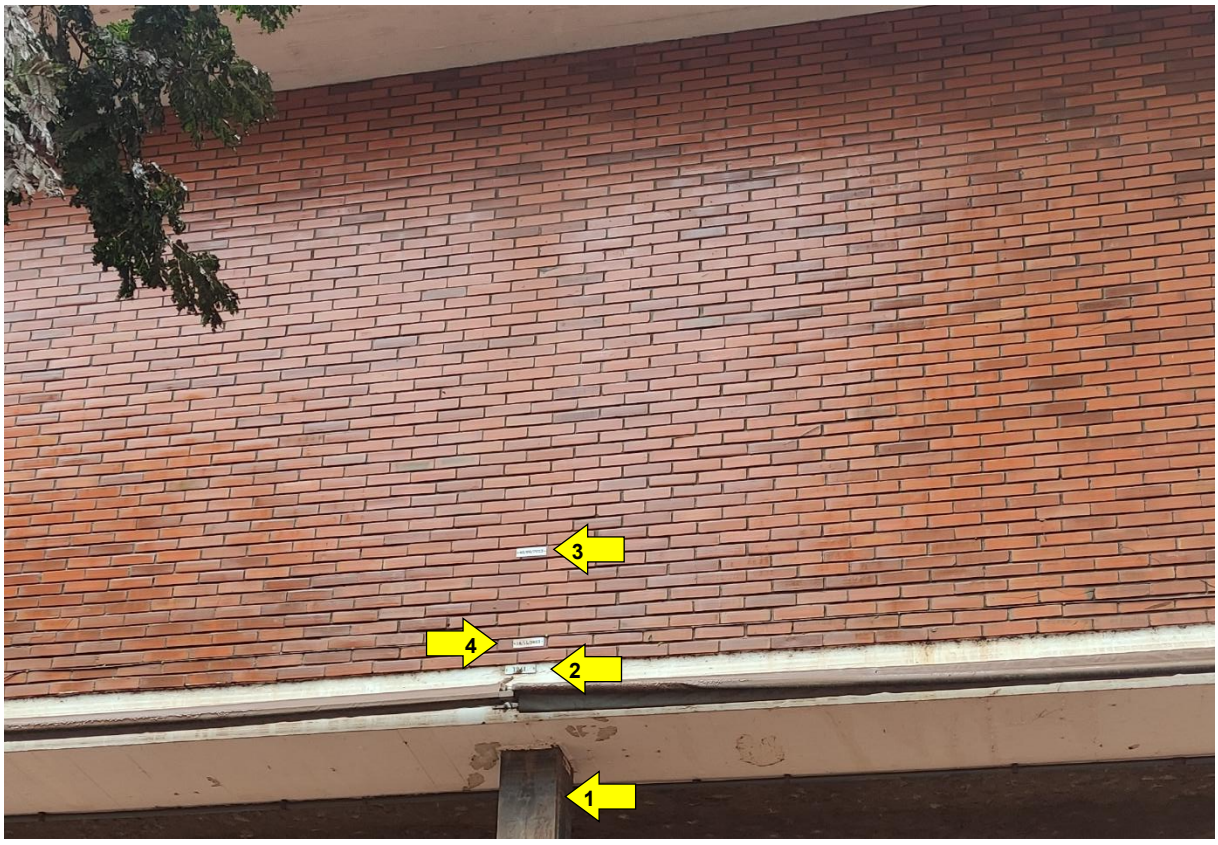


Figura 30 - Vista da parede externa, toda molhada após a inundação de 02 de maio de 2024, localizada acima da viga e no alinhamento do pilar do prédio do CEAT onde estão fixadas as placas das marcas das inundações históricas (Seta 1). Na imagem é possível visualizar o local em que está marcado nível máximo da inundação de 05 de maio de 1941 (Seta 2), no limite superior da viga branca, a placa da inundação de 05 de setembro de 2023 (Seta 3) e a placa da inundação de 19 de novembro de 2023 (Seta 4). *É importante destacar que as placas metálicas das inundações de setembro e de novembro de 2023 foram fixadas dois tijolos (~11 cm) acima do nível máximo dessas inundações.*



Figura 31 - Vista da marca de umidade na parede externa do mesmo prédio onde estão marcadas as inundações históricas no pilar do CEAT, localizada na lateral da escada que conduz para o segundo andar, sinalizando o nível máximo da inundação de 02 de maio de 2024 (Seta 5), que atingiu as salas de aula do terceiro andar. Foram atingidos 66 tijolos da referida parede, representando uma altura de 4,81 metros a partir do limite superior da viga branca (Seta 2) e 4,30 metros acima do nível da inundação de 05 de setembro de 2023 (Seta 3).

As medidas oficiais dos níveis das inundações de 2023 e 2024 pelo monitoramento sistemático do SGB, na estação fluviométrica 86879300 da Rede Hidrometeorológica Nacional, indicaram nível (h) de 29,53 metros para a inundação de 05 de setembro de 2023; 28,94 metros para a inundação de 19 de novembro de 2023; 33,67 metros para a inundação de 02 de maio de 2024 (**Figura 32**) e de 27,75 metros para a inundação de 13 de maio de 2024. Os valores do nível máximo dessas inundações não foram medidos em tempo real, mas ajustados pelo SGB após a recessão dos eventos de inundações, pois toda a infraestrutura física e lógica da referida estação fluviométrica foi atingida e destruída durante as inundações.

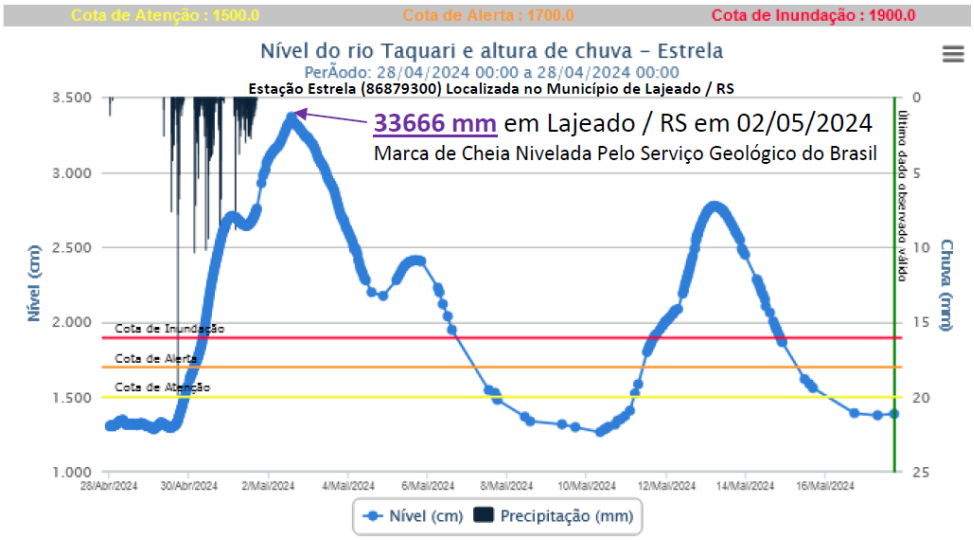


Figura 32 - Gráfico gerado pelo SACE-SGB mostrando as cotas das inundações de 02 de maio e de 13 de maio 2024 na estação fluviométrica 86879300 (Marcuzzo *et al*., 2025).

A partir das informações oficiais do SGB no posto fluviométrico 86879300, a inundação de 05/09/2023 foi 0,59 m maior que a inundação de 19/11/2023 e a inundação catastrófica de 02/05/2024 foi 4,14 m maior que a inundação de 05/09/2023. Marcuzzo *et al*. (2025) apontaram que a inundação de 02/05/2024 superou em 4,12 m a inundação de 05/09/2023 e em 4,61 m a inundação de 19/10/2023. De acordo com as medidas ortométricas (H) aferidas no CEAT, evidenciadas nas **Figuras 29** até **31**, a inundação de 05/09/2023 foi 0,51 m maior que a cheia de 19/11/2023 e a inundação catastrófica de 02/05/2024 foi 4,30 m acima da inundação de 05/09/2023.

A **Tabela 7** apresenta a comparação entre a altitude ortométrica aferida (H) das marcas históricas localizadas no CEAT e a altitude ortométrica (H) dos níveis máximos ajustados das inundações do rio Taquari em Lajeado.

Tabela 7 - Comparação entre a altitude ortométrica aferida nas marcas históricas fixadas no CEAT e a altitude ortométrica ajustada dos níveis máximos das inundações do rio Taquari obtidos pelo monitoramento sistemático.

Inscrição na marca do CEAT	Data do pico da inundação	Fonte do Registro comparativo	Valor de Ajuste	Altitude Ortométrica Ajustada (H) (m)	Altitude Ortométrica Aferida (H) na marca do CEAT (m)	Diferença (Estação - CEAT) (m)
02/05/2024	02/05/2024	86879300	-0,55	33,12	33,30	**-0,18**
05/09/2023	05/09/2023	86879300	-0,55	28,98	29,00	**-0,02**

Inscrição na marca do CEAT	Data do pico da inundação	Fonte do Registro comparativo	Valor de Ajuste	Altitude Ortométrica Ajustada (H) (m)	Altitude Ortométrica Aferida (H) na marca do CEAT (m)	Diferença (Estação - CEAT) (m)
11/2023	19/11/2023	86879300	-0,55	28,39	28,49	**-0,10**
1941	05/05/1941	86870000	+5,60	28,32	28,49	**-0,17**
1956	05/04/1956	86870000	+5,60	27,26	27,03	**0,23**
07/2020	09/07/2020	86879300	-0,55	26,84	26,90	**-0,06**
10/2001	02/10/2001	Porto Estrela	-0,55	26,35	26,32	**0,03**
07/2011	21/07/2011	Porto Estrela	-0,55	26,30	26,21	**0,09**
2008	27/10/2008	Porto Estrela	-0,55	26,10	26,00	**0,10**
1990	01/06/1990	Porto Estrela	-0,55	25,90	25,92	**-0,02**
07/2001	21/07/2001	Porto Estrela	-0,55	25,65	25,72	**-0,07**
09/2007	24/09/2007	Porto Estrela	-0,55	25,70	25,67	**0,03**
1965	21/08/1965	86870000	+6,60	25,30	25,32	**-0,02**
1989	25/09/1989	Porto Estrela	-0,55	25,30	25,23	**0,07**
09/1987*	21/09/1967	86870000	+6,60	25,00	24,91	0,09
1940**	17/07/1940	86870000	+5,60	24,80	27,32	**-2,52**
09/1989	13/09/1989	Porto Estrela	-0,55	24,65	24,57	**0,08**
1982	29/06/1982	Porto Estrela	-0,55	24,25	24,16	**0,09**
08/2011	10/08/2011	Porto Estrela	-0,55	24,05	24,01	**0,04**
09/2009	13/09/2009	Porto Estrela	-0,55	23,95	23,91	**0,04**
07/2007	11/07/2007	Porto Estrela	-0,55	23,90	23,85	**0,05**
Média	-	-	-	-	-	**0,10**

* A marca com a inscrição 09/1987 provavelmente refere-se à inundação ocorrida em 21 de setembro de 1967, tendo havido erro de grafia na fixação da placa no CEAT.

** A marca indicando o nível máximo da cheia de 1940 no CEAT foi colocada em uma altura equivocada, ou a marca com a inscrição 1940 refere-se a alguma outra inundação histórica ou houve um erro na grafia da marca. Uma análise regional, usando os dados das cotas máximas observadas no posto fluviométrico Bom Retiro do Sul como apoio, confirma que a cheia de 1956 foi superior à cheia de 1940, e não o contrário, como as marcas históricas do CEAT sugerem (Rezende, 1993).

Conforme a **Tabela 7**, excluindo a medição da altitude da marca da inundação de 1940, que provavelmente foi fixada em posição equivocada, **a diferença média entre as altitudes ortométricas (H) aferidas nas marcas históricas fixadas no CEAT e as altitudes ortométricas ajustadas dos níveis máximos das inundações do rio Taquari, obtidas pelo monitoramento sistemático** (Posto Fluviométrico 86870000 (28/09/1939 até 31/12/1986), Porto Fluvial de Estrela (12/08/1980 até 31/12/2015) e atual Estação Fluviométrica 86879300 (29/07/2015 até atual), **foi de 10 cm**. Considerando que as medidas foram obtidas de forma independente e em locais diferentes, essa diferença média representa uma similaridade e

qualidade excelente dos níveis máximos das enchentes e inundações pelo monitoramento sistemático, dos valores de ajuste aplicados nos dados sistemáticos para transformar os níveis das inundações em altitudes ortométricas (H) e das aferições topográficas das altitudes ortométricas (H) realizadas em campo nas marcas não sistemáticas no prédio do CEAT.

4.2 Cheia histórica de 1873

A inundação de 07 de outubro de 1873 não está marcada no prédio do CEAT, mas conta com informações históricas, fotográficas e documentais locais que abordam características e que permitem a reconstrução do nível altimétrico (H) do pico dessa grande inundação. De acordo com o livro **A história da bacia Taquari-Antas** (Ferri; Togni, 2012) e do historiador José Alfredo Schierholt (2024), a referida inundação atingiu o nível máximo de 28,47 metros. De acordo com depoimentos do autor, a família Sudbrack possuía uma casa, localizada na rua General Osório nº 16, esquina com a rua Osvaldo Aranha, onde tinham uma agência de transporte fluvial. Segundo Schierholt, que morou 10 anos em frente à referida casa, "*as águas da grande enchente de outubro de 1873 invadiram os fundamentos e foram até os olheiros abaixo do assoalho"* (**Figura 33)**.



Figura 33 - Antiga casa da família Sudbrack, onde funcionava uma agência de transporte fluvial, demolida após ser invadida e incendiada, onde a inundação histórica de 10/1873 atingiu os fundamentos e foi até os olheiros abaixo do assoalho da edificação (Schierholt, 2024).

No livro que Schierholt está organizando, e gentilmente disponibilizou para esta pesquisa, o autor relata que "*os alicerces desse solar foram erguidos antes da enchente de 7 de outubro de 1873, que cobriu em mais de um metro a parte mais alta da avenida* (rua Osvaldo Aranha)*, razão pela qual o assoalho da centenária mansão foi levantado acima do nível das águas da enchente e introduzidas aberturas elípticas nas paredes do pavimento térreo, conhecidas por olhos-de-boi*". A **Figura 34** apresenta a edificação histórica, onde é possível visualizar o pavimento térreo com os olheiros abaixo do assoalho, a escada de acesso ao segundo andar, as vigas de madeira do estilo enxaimel e disposição das portas e janelas. Na

fotografia histórica é possível visualizar que a mansão era vizinha de outra edificação, que é o prédio mais antigo preservado de Lajeado até agora, incorporado ao supermercado da Rede Super (**Figura 35**).

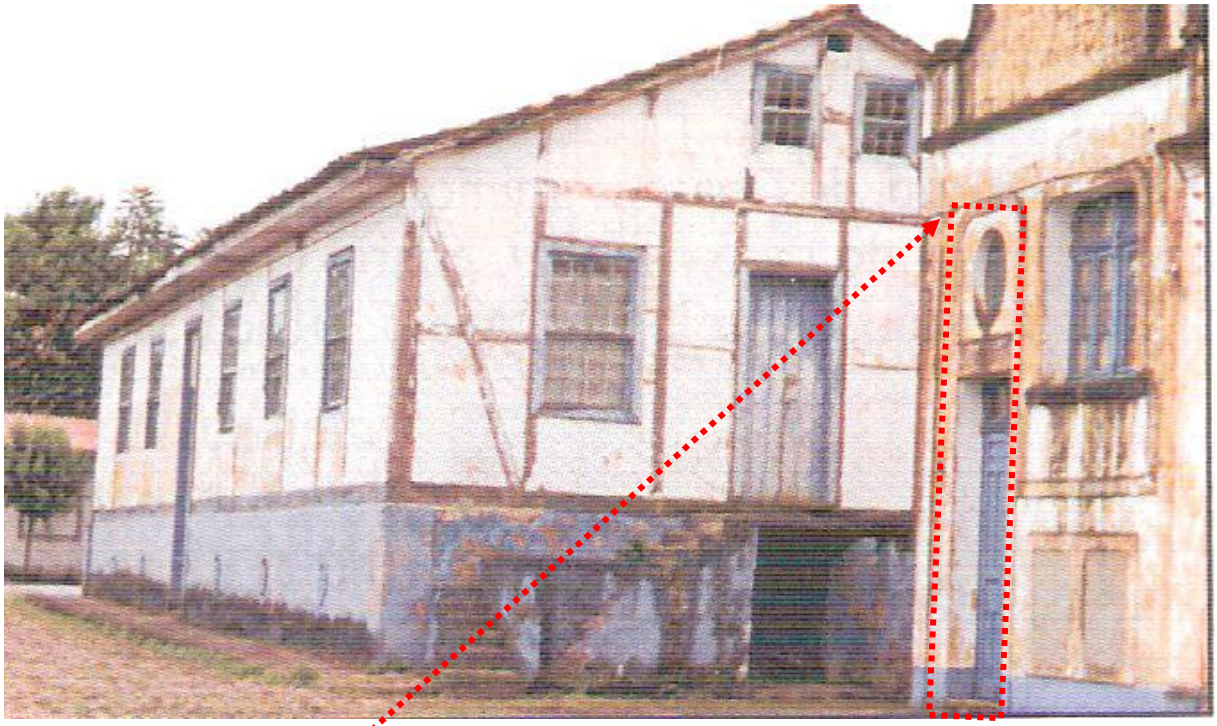


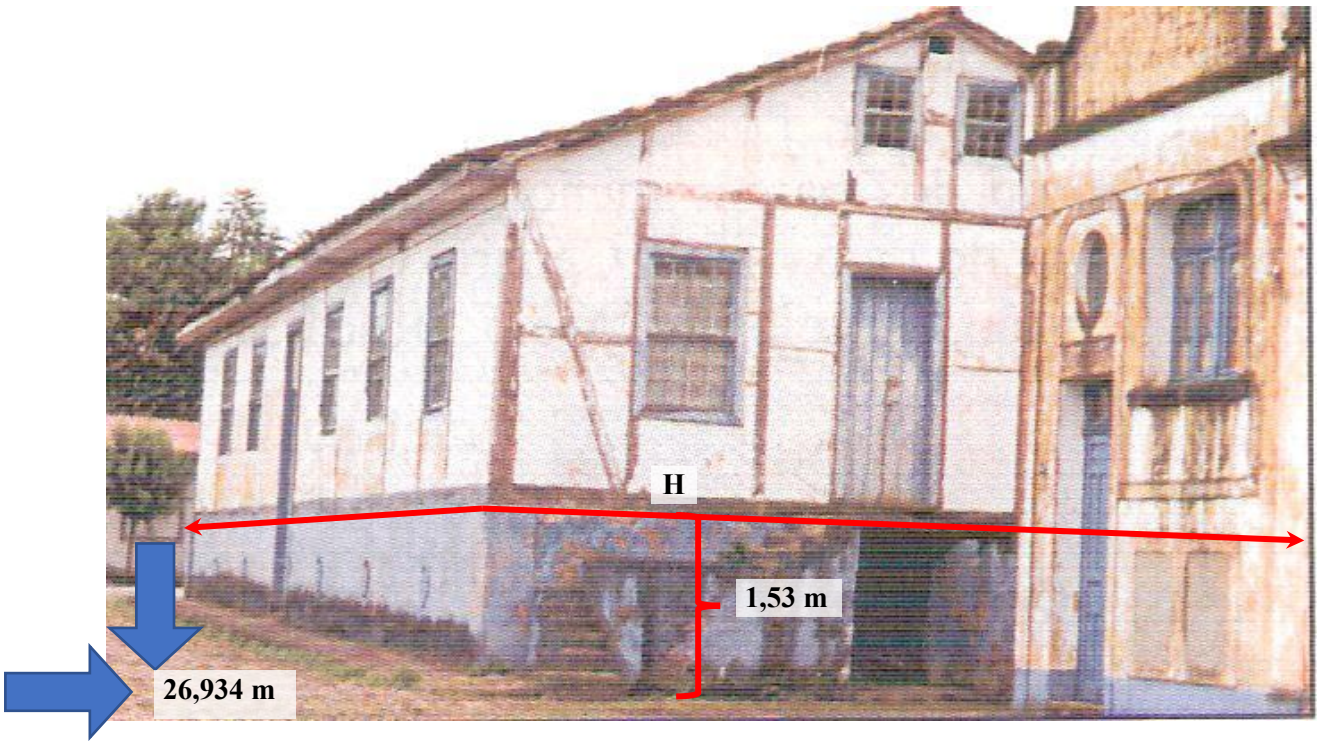
Figura 34 - O nível máximo da inundação de 07 de outubro de 1873 atingiu o limite inferior da viga de madeira do assoalho da antiga mansão da família Sudbrack.



Figura 35 - Prédio mais antigo preservado de Lajeado, incorporado ao supermercado da Rede Super. As aberturas foram lacradas, mas o prédio ainda tem a fachada original.

Após analisar os dados históricos, fotográficos, documentais e receber o depoimento do historiador José Alfredo Schierholt, que morou 10 anos em frente à antiga casa da família Sudbrack, entendeu-se que as informações eram consistentes e fidedignas para proceder ao levantamento topográfico e a reconstrução da altitude ortométrica (H) do nível máximo da inundação de 07 de outubro de 1873, tendo como referência a localização, o relato histórico e a fotografia da antiga casa já demolida da família Sudbrack. Foi realizado o levantamento de campo em abril de 2023 do ponto mais alto da rua Osvaldo Aranha, medindo 26,934 metros +

altura do meio fio (0,10 metros) + estimativa da altura dos 9 degraus da escada para a época (0,17 metros x 9 degraus => 1,53 metros), totalizando uma estimativa de 28,564 metros de altitude ortométrica (H) para a inundação de 1873 no local (**Figura 36**).



H = 26,934 m + 0,10 m (meio fio) + (9 degraus da escada x 0,17 m) = 28,564 m

Figura 36 - Representação aproximada do nível máximo da inundação de 07 de outubro de 1873 na antiga casa demolida da família Sudbrack e na edificação vizinha, ainda preservada na atualidade e pertencente ao supermercado da Rede Super.

A reconstrução e aferição topográfica do nível máximo da inundação de 07 de outubro de 1873 indica que essa inundação atingiu a altitude ortométrica (H) de 28,56 m, equivalente a 29,11 m na cota da régua do posto fluviométrico atual, valor muito próximo dos 28,47 m informado no livro de Ferri e Togni (2012), com diferença de apenas 9 cm. Com base nestes resultados, a inundação de 1873 foi 24 cm maior que a inundação de 05 de maio de 1941, que permaneceu, por mais de 8 décadas, como a maior inundação documentada na cidade de Lajeado. A cheia de outubro de 1873 foi superada em 42 cm pela inundação de 05 de setembro de 2023 e em 4,56 m pela inundação catastrófica de 02 de maio de 2024. Os resultados da etapa de reconstrução dos níveis das inundações do rio Taquari, combinando informações do monitoramento sistemático com dados não sistemáticos, permitiram consolidar e ampliar a série histórica de inundações em Lajeado para 153 anos (1873–2025). Nesta etapa, erros e diferenças documentados nos níveis das inundações foram medidos e ajustados na série histórica.

Os resultados da reconstrução dos níveis das inundações reforçam a compreensão que as enchentes e inundações têm causa natural na BHTA, ocorrendo com frequência e com grande magnitude, com desafios permanentes para as cidades que se estabeleceram às margens do rio Taquari e que dependiam deste para prosperar, condição de convivência que foi posta em prova novamente desde 2020. Os extremos hidrológicos de 2023, ainda mais intensos e destrutivos em 2024, talvez já foram observados pelos povos originários que viveram na BHTA. E

certamente, ao considerar o tempo na escala geológica da BHTA, houve diversas outras enchentes, inundações e enxurradas ainda maiores, mais violentas e que modificaram a paisagem da região, cujas evidências talvez possam ser encontradas como registros de *paleofloods* mais distantes dos rios e/ou em níveis altimétricos maiores.

O caso da cheia histórica de 1873 reproduz, em escala local, o padrão identificado no vale do Ahr, onde a curta janela instrumental apagou da memória de gestão eventos de magnitude comparável ou superior aos contemporâneos, recuperados apenas por reconstituição baseada em marcas e documentos (Roggenkamp e Herget, 2014). A reconstituição de 1873 cumpre função análoga para Lajeado: incorpora ao registro um evento situado fora do alcance da série instrumental, iniciada 66 anos depois, e acessível somente por fontes não sistemáticas.

4.3 Consolidação da série de dados Sistemáticos

A série histórica sistemática de enchentes e inundações do rio Taquari em Lajeado compreende 87 anos de dados (1939–2025), e é apresentada na **Tabela 8.**

Tabela 8 - Série histórica sistemática consolidada dos níveis originais medidos, dos valores de ajuste, das altitudes ortométricas e do nível oficial das enchentes e inundações registradas na cidade de Lajeado, organizada do período atual (2025) até o passado (1939)

Ano	Data da Cheia	Nível da cota (h) da cheia registrada (m)	Fonte do Registro	Valor de ajuste (m)	Altitude ortométrica (H) da Cheia (m)	Nível Oficial (m)
2025	30/06/2025	21.84	86879300	-0,55	21.29	21.84
	19/06/2025	22.65	86879300	-0,55	22.1	22.65
2024	6/17/2024	24.19	86879300	-0.55	23.64	24.19
	5/13/2024	27.75	86879300	-0.55	27.2	27.75
	5/2/2024	**33.67**	**86879300**	**-0.55**	**33.12**	**33.67**
2023	11/19/2023	28.94	86879300	-0.55	28.39	28.94
	10/18/2023	20.28	86879300	-0.55	19.73	20.28
	10/13/2023	19.91	86879300	-0.55	19.36	19.91
	10/8/2023	21.52	86879300	-0.55	20.97	21.52
	9/5/2023	**29.53**	**86879300**	**-0.55**	**28.98**	**29.53**
	7/13/2023	22.2	86879300	-0.55	21.65	22.2
	6/17/2023	18.21	86879300	-0.55	17.66	18.21
2022	6/23/2022	19.12	86879300	-0.55	18.57	19.12
	6/7/2022	19.54	86879300	-0.55	18.99	19.54
	5/30/2022	19.67	86879300	-0.55	19.12	19.67
	5/4/2022	**20.57**	**86879300**	**-0.55**	**20.02**	**20.57**
2021	**6/28/2021**	**15.99**	**86879300**	**-0.55**	**15.44**	**15.99**
2020	7/13/2020	22.13	86879300	-0.55	21.58	22.13
	7/9/2020*	**27.39**	**86879300**	**-0.55**	**26.84**	**27.39**
	7/1/2020	17.56	86879300	-0.55	17.01	17.56
2019	**11/5/2019**	**22.34**	**86879300**	**-0.55**	**21.79**	**22.34**
2018	**04/10/2018**	**18.51**	**86879300**	**-0.55**	**17.96**	**18.51**
2017	10/14/2017	19.7	86879300	-0.55	19.15	19.7
	6/9/2017	**23.92**	**86879300**	**-0.55**	**23.37**	**23.92**
	5/28/2017	21.03	86879300	-0.55	20.48	21.03

Ano	Data da Cheia	Nível da cota (h) da cheia registrada (m)	Fonte do Registro	Valor de ajuste (m)	Altitude ortométrica (H) da Cheia (m)	Nível Oficial (m)
2016	**10/20/2016**	**24.93**	**86879300**	**-0.55**	**24.38**	**24.93**
	7/15/2016	22.34	86879300	-0.55	21.79	22.34
2015	10/23/2015	17.72	Porto Estrela	-0.55	17.17	17.72
	10/10/2015	**24.51**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**23.96**	**24.51**
	9/21/2015	22.1	Porto Estrela	-0.55	21.55	22.1
	7/15/2015	21.35	Porto Estrela	-0.55	20.8	21.35
2014	**10/20/2014**	**20.49**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**19.94**	**20.49**
	29/06/2014	18.61	Porto Estrela	-0.55	18.06	18.61
	06/06/2014	19.89	Porto Estrela	-0.55	19.34	19.89
2013	9/22/2013	18.96	Porto Estrela	-0.55	18.41	18.96
	8/25/2013	**23.85**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**23.3**	**23.85**
2012	**9/20/2012**	**21.1**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**20.55**	**21.1**
2011	8/10/2011	24.6	Porto Estrela	-0.55	24.05	24.6
	7/22/2011	**26.85**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**26.3**	**26.85**
	3/27/2011	19.5	Porto Estrela	-0.55	18.95	19.5
2010	9/23/2010	21.5	Porto Estrela	-0.55	20.95	21.5
	4/27/2010	18.2	Porto Estrela	-0.55	17.65	18.2
	1/5/2010	**23.95**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**23.4**	**23.95**
2009	9/29/2009	21.65	Porto Estrela	-0.55	21.1	21.65
	9/13/2009	**24.5**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**23.95**	**24.5**
	8/10/2009	21.5	Porto Estrela	-0.55	20.95	21.5
2008	**10/27/2008**	**26.65**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**26.1**	**26.65**
2007	**9/24/2007**	**26.25**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**25.7**	**26.25**
	7/24/2007	18.4	Porto Estrela	-0.55	17.85	18.4
	7/11/2007	24.45	Porto Estrela	-0.55	23.9	24.45

Ano	Data da Cheia	Nível da cota (h) da cheia registrada (m)	Fonte do Registro	Valor de ajuste (m)	Altitude ortométrica (H) da Cheia (m)	Nível Oficial (m)
2006	**7/27/2006**	**19.78**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**19.23**	**19.78**
2005	**10/18/2005**	**22.8**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**22.25**	**22.8**
	5/19/2005	20.75	Porto Estrela	-0.55	20.2	20.75
2004	**7/16/2004**	**15.15**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**14.6**	**15.15**
2003	12/16/2003	20.3	Porto Estrela	-0.55	19.75	20.3
	10/27/2003	20.74	Porto Estrela	-0.55	20.19	20.74
	7/9/2003	19.65	Porto Estrela	-0.55	19.1	19.65
	2/21/2003	**21.7**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**21.15**	**21.7**
2002	7/27/2002	17.7	Porto Estrela	-0.55	17.15	17.7
	7/3/2002	19	Porto Estrela	-0.55	18.45	19
	6/13/2002	**22.15**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**21.6**	**22.15**
2001	**10/2/2001**	**26.9**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**26.35**	**26.9**
	7/21/2001	26.2	Porto Estrela	-0.55	25.65	26.2
2000	**10/14/2000**	**23.4**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**22.85**	**23.4**
	7/12/2000	18.5	Porto Estrela	-0.55	17.95	18.5
1999	**7/21/1999**	**15.35**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**14.8**	**15.35**
1998	9/19/1998	18.35	Porto Estrela	-0.55	17.8	18.35
	8/16/1998	**21.55**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**21**	**21.55**
1997	11/1/1997	18.8	Porto Estrela	-0.55	18.25	18.8
	10/16/1997	19.7	Porto Estrela	-0.55	19.15	19.7
	10/6/1997	17.85	Porto Estrela	-0.55	17.3	17.85
	8/4/1997	**25.6**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**25.05**	**25.6**
1996	**9/1/1996**	**16.6**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**16.05**	**16.6**
1995	**7/21/1995**	**15.9**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**15.35**	**15.9**

Ano	Data da Cheia	Nível da cota (h) da cheia registrada (m)	Fonte do Registro	Valor de ajuste (m)	Altitude ortométrica (H) da Cheia (m)	Nível Oficial (m)
1994	**7/3/1994**	**18**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**17.45**	**18**
	7/12/1993	18.98	Porto Estrela	-0.55	18.43	18.98
1993	**7/6/1993**	**21.15**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**20.6**	**21.15**
	6/5/1993	18.6	Porto Estrela	-0.55	18.05	18.6
	7/6/1992	18.85	Porto Estrela	-0.55	18.3	18.85
1992	**5/29/1992**	**25.35**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**24.8**	**25.35**
1991	**12/27/1991**	**18.9**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**18.35**	**18.9**
	10/13/1990	22.1	Porto Estrela	-0.55	21.55	22.1
	9/23/1990	18.65	Porto Estrela	-0.55	18.1	18.65
1990	**6/1/1990**	**26.45**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**25.9**	**26.45**
	4/29/1990	18.03	Porto Estrela	-0.55	17.48	18.03
	9/25/1989	**25.85**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**25.3**	**25.85**
1989	9/13/1989	25.2	Porto Estrela	-0.55	24.65	25.2
	7/6/1989	20.65	Porto Estrela	-0.55	20.1	20.65
	9/25/1988	22.35	Porto Estrela	-0.55	21.8	22.35
1988	**9/14/1988**	**24.2**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**23.65**	**24.2**
	6/10/1988	18.25	Porto Estrela	-0.55	17.7	18.25
	8/15/1987	19.65	Porto Estrela	-0.55	19.1	19.65
1987	**7/30/1987**	**21.35**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**20.8**	**21.35**
	5/15/1987	19.65	Porto Estrela	-0.55	19.1	19.65
	11/29/1986	18.5	Porto Estrela	-0.55	17.95	18.5
	11/6/1986	18.65	Porto Estrela	-0.55	18.1	18.65
1986	**10/11/1986**	**19.6**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**19.05**	**19.6**
	5/31/1986	17.3	Porto Estrela	-0.55	16.75	17.3

Ano	Data da Cheia	Nível da cota (h) da cheia registrada (m)	Fonte do Registro	Valor de ajuste (m)	Altitude ortométrica (H) da Cheia (m)	Nível Oficial (m)
1985	8/13/1985	17.72	Porto Estrela	-0.55	17.17	17.72
	5/10/1985	**18.95**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**18.4**	**18.95**
1984	10/7/1984	18.9	Porto Estrela	-0.55	18.35	18.9
	9/26/1984	17.55	Porto Estrela	-0.55	17	17.55
	8/7/1984	18.98	Porto Estrela	-0.55	18.43	18.98
	09/07/1984	**20.45**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**19.9**	**20.45**
	6/19/1984	18.8	Porto Estrela	-0.55	18.25	18.8
	5/8/1984	19.85	Porto Estrela	-0.55	19.3	19.85
	4/24/1984	17.4	Porto Estrela	-0.55	16.85	17.4
1983	8/18/1983	22.84	Porto Estrela	-0.55	22.29	22.84
	8/2/1983	20.26	Porto Estrela	-0.55	19.71	20.26
	7/7/1983	**24.7**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**24.15**	**24.7**
	6/24/1983	17.95	Porto Estrela	-0.55	17.4	17.95
	6/14/1983	18.1	Porto Estrela	-0.55	17.55	18.1
	5/3/1983	20.4	Porto Estrela	-0.55	19.85	20.4
	3/1/1983	18.4	Porto Estrela	-0.55	17.85	18.4
1982	11/12/1982	21.2	Porto Estrela	-0.55	20.65	21.2
	10/24/1982	22.7	Porto Estrela	-0.55	22.15	22.7
	6/29/1982	**24.8**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**24.25**	**24.8**
1981	**9/25/1981**	**16.9**	**Porto Estrela**	**-0.55**	**16.35**	**16.9**
1980	11/10/1980	18.7	Porto Estrela	-0.55	18.15	18.7
	10/22/1980	18.5	Porto Estrela	-0.55	17.95	18.5
	8/23/1980	21.7	Porto Estrela	-0.55	21.15	21.7
	7/30/1980	**15.3**	**878670000**	**6.6**	**21.9***	**22.45**
1979	12/15/1979	10.6	878670000	6.6	17.2	**17.75**

Ano	Data da Cheia	Nível da cota (h) da cheia registrada (m)	Fonte do Registro	Valor de ajuste (m)	Altitude ortométrica (H) da Cheia (m)	Nível Oficial (m)
	10/7/1979	**12.2**	**878670000**	**6.6**	**18.8**	**19.35**
1978	**7/22/1978**	**10.3**	**878670000**	**6.6**	**16.9**	**17.45**
1977	**8/18/1977**	**16.7**	**878670000**	**6.6**	**23.3**	**23.85**
	8/2/1977	13.9	878670000	6.6	20.5	**21.05**
	6/20/1977	10.96	878670000	6.6	17.56	**18.11**
1976	**8/9/1976**	**15.2**	**878670000**	**6.6**	**21.8**	**22.35**
1975	9/11/1975	11.28	878670000	6.6	17.88	**18.43**
	8/11/1975	**12.6**	**878670000**	**6.6**	**19.2**	**19.75**
1974	**6/10/1974**	**13.8**	**878670000**	**6.6**	**20.4**	**20.95**
1973	**9/19/1973**	**15**	**878670000**	**6.6**	**21.6**	**22.15**
	8/14/1973	11.3	878670000	6.6	17.9	**18.45**
	7/23/1973	11.7	878670000	6.6	18.3	**18.85**
	5/3/1973	12.8	878670000	6.6	19.4	**19.95**
1972	9/20/1972	14	878670000	6.6	20.6	**21.15**
	8/28/1972	**16.2**	**878670000**	**6.6**	**22.8**	**23.35**
	7/20/1972	11	878670000	6.6	17.6	**18.15**
	6/9/1972	12.7	878670000	6.6	19.3	**19.85**
1971	8/14/1971	12	878670000	6.6	18.6	**19.15**
	6/30/1971	10.7	878670000	6.6	17.3	**17.85**
	3/16/1971	**15.5**	**878670000**	**6.6**	**22.1**	**22.65**
1970	**7/8/1970**	**10.5**	**878670000**	**6.6**	**17.1**	**17.65**
1969	**2/19/1969**	**8.1**	**878670000**	**6.6**	**14.7**	**15.25**
1968	**11/7/1968**	**7.8**	**878670000**	**6.6**	**14.4**	**14.95**
1967	**9/20/1967**	**18.4**	**878670000**	**6.6**	**25**	**25.55**
	9/5/1967	10.8	878670000	6.6	17.4	**17.95**
	8/25/1967	11.3	878670000	6.6	17.9	**18.45**
1966	9/14/1966	11.3	878670000	6.6	17.9	**18.45**
	9/2/1966	13.4	878670000	6.6	20	**20.55**
	8/5/1966	**14.8**	**878670000**	**6.6**	**21.4**	**21.95**
	7/16/1966	12.2	878670000	6.6	18.8	**19.35**
1965	10/25/1965	10.8	878670000	6.6	17.4	**17.95**
	9/11/1965	14.15	878670000	6.6	20.75	**21.3**
	9/6/1965	16	878670000	6.6	22.6	**23.15**
	8/21/1965	**18.7**	**878670000**	**6.6**	**25.3**	**25.85**
1964	**9/2/1964**	**11**	**878670000**	**6.6**	**17.6**	**18.15**
1963	**10/11/1963**	**15.5**	**878670000**	**6.6**	**22.1**	**22.65**
	9/27/1963	12.7	878670000	6.6	19.3	**19.85**
1962	**9/20/1962**	**6.8**	**878670000**	**6.6**	**13.4**	**13.95**
1961	10/26/1961	12.1	878670000	6.6	18.7	**19.25**
	9/30/1961	**15.6**	**878670000**	**6.6**	**22.2**	**22.75**
	9/7/1961	11.35	878670000	6.6	17.95	**18.5**
	6/21/1961	12.45	878670000	6.6	19.05	**19.6**
1960	**9/1/1960**	**15.5**	**878670000**	**5.6**	**21.1**	**21.65**

Ano	Data da Cheia	Nível da cota (h) da cheia registrada (m)	Fonte do Registro	Valor de ajuste (m)	Altitude ortométrica (H) da Cheia (m)	Nível Oficial (m)
	8/29/1959	13.82	878670000	5.6	19.42	**19.97**
1959	**6/23/1959**	**19.43**	**878670000**	**5.6**	**25.03**	**25.58**
	4/27/1959	13.65	878670000	5.6	19.25	**19.8**
1958	10/6/1958	13.5	878670000	5.6	19.1	**19.65**
	6/13/1958	**14.6**	**878670000**	**5.6**	**20.2**	**20.75**
1957	**9/9/1957**	**15.65**	**878670000**	**5.6**	**21.25**	**21.8**
	8/18/1957	11.41	878670000	5.6	17.01	**17.56**
1956	8/23/1956	11.63	878670000	5.6	17.23	**17.78**
	05/04/1956	**21.66**	**878670000**	**5.6**	**27.26**	**27.81**
	10/13/1955	12.24	878670000	5.6	17.84	**18.39**
1955	**5/19/1955**	**13.11**	**878670000**	**5.6**	**18.71**	**19.26**
	4/21/1955	11.74	878670000	5.6	17.34	**17.89**
	10/18/1954	12.24	878670000	5.6	17.84	**18.39**
	9/22/1954	**20.15**	**878670000**	**5.6**	**25.75**	**26.3**
1954	7/22/1954	13.8	878670000	5.6	19.4	**19.95**
	7/1/1954	15.02	878670000	5.6	20.62	**21.17**
	6/11/1954	11.66	878670000	5.6	17.26	**17.81**
	10/26/1953	14.12	878670000	5.6	19.72	**20.27**
1953	10/2/1953	12.42	878670000	5.6	18.02	**18.57**
	9/16/1953	**15.91**	**878670000**	**5.6**	**21.51**	**22.06**
1952	**6/10/1952**	**8.15**	**878670000**	**5.6**	**13.75**	**14.3**
1951	**10/19/1951**	**11.86**	**878670000**	**5.6**	**17.46**	**18.01**
1950	**10/17/1950**	**19.13**	**878670000**	**5.6**	**24.73**	**25.28**
1949	9/21/1949	11.79	878670000	5.6	17.39	**17.94**
	7/17/1949	**12.1**	**878670000**	**5.6**	**17.7**	**18.25**
1948	**8/2/1948**	**13.4**	**878670000**	**5.6**	**19**	**19.55**
1947	**9/30/1947**	**9.9**	**878670000**	**5.6**	**15.5**	**16.05**
1946	12/14/1946	11.72	878670000	5.6	17.32	**17.87**
	1/26/1946	**20.2**	**878670000**	**5.6**	**25.8**	**26.35**
1945	**7/31/1945**	**12**	**878670000**	**5.6**	**17.6**	**18.15**
1944	**6/25/1944**	**15.46**	**878670000**	**5.6**	**21.06**	**21.61**
1943	**8/3/1943**	**8.46**	**878670000**	**5.6**	**14.06**	**14.61**
1942	10/18/1942	13.1	878670000	5.6	18.7	**19.25**
	19/05/1942	**16.7**	**878670000**	**5.6**	**22.3**	**22.85**
	11/17/1941	18.73	878670000	5.6	24.33	**24.88**
1941	7/28/1941	13.42	878670000	5.6	19.02	**19.57**
	5/15/1941	16.12	878670000	5.6	21.72	**22.27**
	5/5/1941	**22.72**	**878670000**	**5.6**	**28.32**	**28.87**
1940	8/24/1940	15.02	878670000	5.6	20.62	**21.17**
	7/17/1940	**19.2**	**878670000**	**5.6**	**24.8**	**25.35**
1939	**11/27/1939**	**12.6**	**878670000**	**5.6**	**18.2**	**18.75**

- Posto Fluviométrico 86879300 => Atual desde 29/07/2015;

- Porto Fluvial de Estrela => 31/12/2015 até 12/08/1980;

- Posto Fluviométrico 86870000 => 31/12/1986 até 28/09/1939;

- **Em negrito** => estão apresentados os maiores valores de cheia ou de inundação do ano;
- Altitude Ortométrica (H) do nível de referência normal do rio Taquari em Lajeado => 12,45 metros;
- Os valores de ajuste para ajustar as cotas arbitrárias (h) dos níveis máximos das enchentes e inundações para altitudes ortométricas (H) foram de +5,60 metros no período entre 1939 e 1960 e de +6,60 metros no período entre 1961 e 1986, em observação ao relatório técnico de Rezende (1993), e de -0,55 metros no período de 1980 e 2024, em observação às medições e relatórios do SGB (2015), convalidados por novas medições realizadas posteriormente por Agrosig e FEENG (2016).

* Dado deverá ser revisto.

O período de 1939 até 2025 compreende uma série histórica com 87 anos de dados sistemáticos de enchentes, inundações e enxurradas no rio Taquari, tendo por referência a cidade de Lajeado. Em 75 anos desse período, ocorreram 195 eventos de cheias que atingiram ou superaram a cota oficial de 17,00 m, correspondente ao nível de alerta hidrológico na categorização atual do SGB, dos quais 131 alcançaram ou ultrapassaram a cota de inundação de 19,00 m. Esse quantitativo representa, em média, 2,60 eventos por ano nos anos com registro acima do alerta. Somente em 12 anos (1943, 1947, 1952, 1962, 1968, 1969, 1981, 1995, 1996, 1999, 2004 e 2021) não foram registrados níveis de alerta hidrológico, o que corresponde a 13,8% do período em análise. Incorporados os quatro eventos históricos reconstituídos (1873, 1912, 1919 e 1928), todos acima da cota de inundação, a série completa de 153 anos reúne 211 registros, dos quais 135 iguais ou superiores a 19,00 m. Nos anos de 1983 e 1984 houve um total de 14 cheias em Lajeado, sendo o biênio com mais eventos de cheias no rio Taquari.

Nos anos de 2022 e 2023 ocorreram 11 eventos de cheias, resultando em 10 inundações, sendo que 2 figuram entre as 5 maiores e mais impactantes inundações que ocorreram em Lajeado desde 1873. A **Figura 37** apresenta a representação gráfica da série histórica dos níveis ortométricos das enchentes e inundações de Lajeado, considerando todos os eventos registrados pelo monitoramento sistemático, sinalizando as 5 maiores inundações de 1939 até 2025.

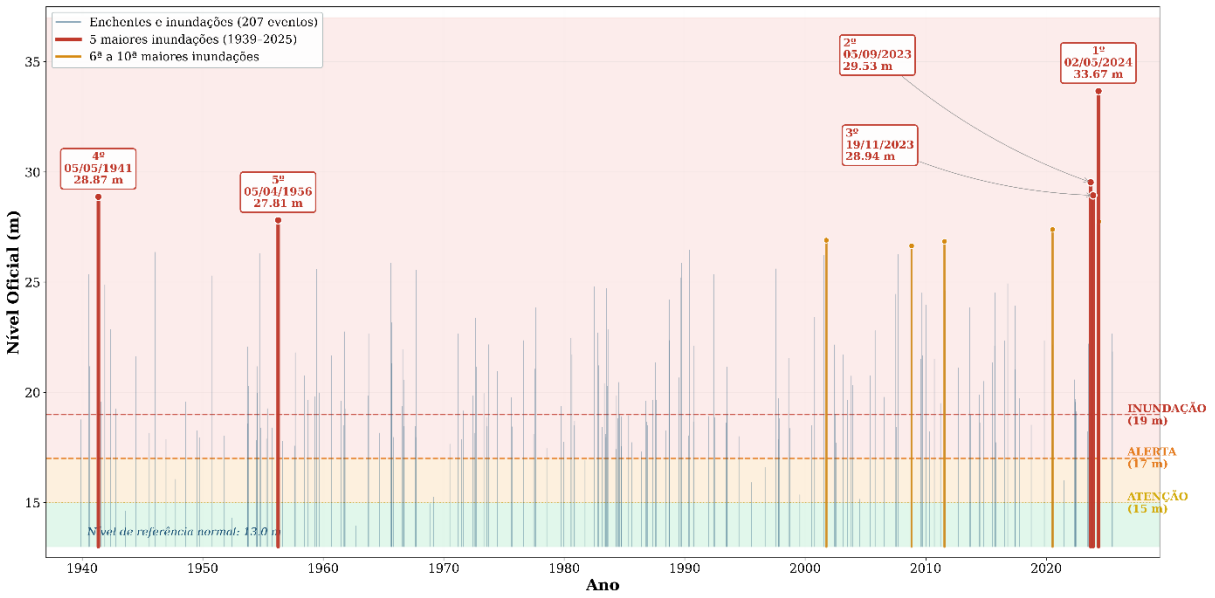


Figura 37 - Série histórica dos níveis ortométricos das enchentes e inundações de Lajeado registrados pelo monitoramento sistemático, sinalizando as 5 maiores inundações de 1939 até 2025.

Considerando somente o período da série histórica de enchentes e inundações de Lajeado com monitoramento sistemático dos níveis do rio Taquari (1939 - 2025), é possível

observar que, excluindo a inundação catastrófica de 02 de maio de 2024, todos os demais níveis não ultrapassaram o nível ortométrico de 30 metros. Também é possível concluir que 3 das cinco maiores inundações do período de monitoramento sistemático ocorreram nos últimos anos, ou seja, entre 2023 e 2024. As **Figuras 38** e **39** apresentam as ocorrências e a distribuição dos níveis das enchentes e inundações do rio Taquari em Lajeado, agrupadas de forma sazonal, no período de monitoramento sistemático.

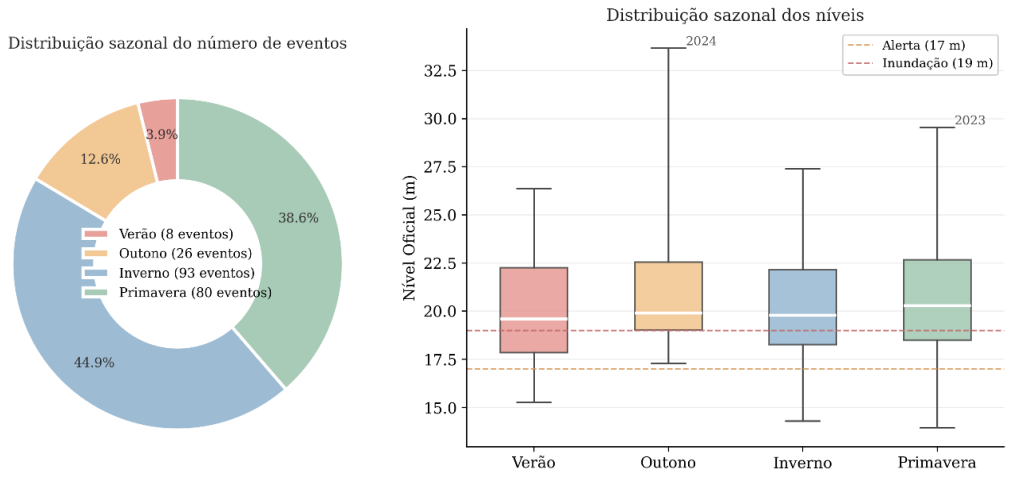


Figura 38 e Figura 39 - Ocorrência e distribuição sazonal dos níveis das enchentes e inundações do rio Taquari agrupados durante o período de monitoramento sistemático em Lajeado.

Ao analisar a série histórica de enchentes e inundações do rio Taquari, considerando somente o período de monitoramento sistemático (1939 - 2025), é possível perceber que cerca de metade dos eventos de inundação da série ocorreu no inverno, seguido da primavera, nos meses de junho, julho, agosto e setembro, além do mês de outubro, o que se justifica pelas características do clima, com evapotranspiração do solo menor nos meses de inverno, o que tende a aumentar a saturação inicial do solo, e com maior atuação de chuvas frontais, com duração e escala espacial críticas na bacia. Por sua vez, nesse período em análise, quatro das sete maiores inundações de Lajeado ocorreram no início do outono, nos meses de maio (02/05/2024, 05/05/1941 e 13/05/2024) e abril (05/04/1956), que são meses que apresentam menor frequência de inundações quando comparado com os meses do inverno.

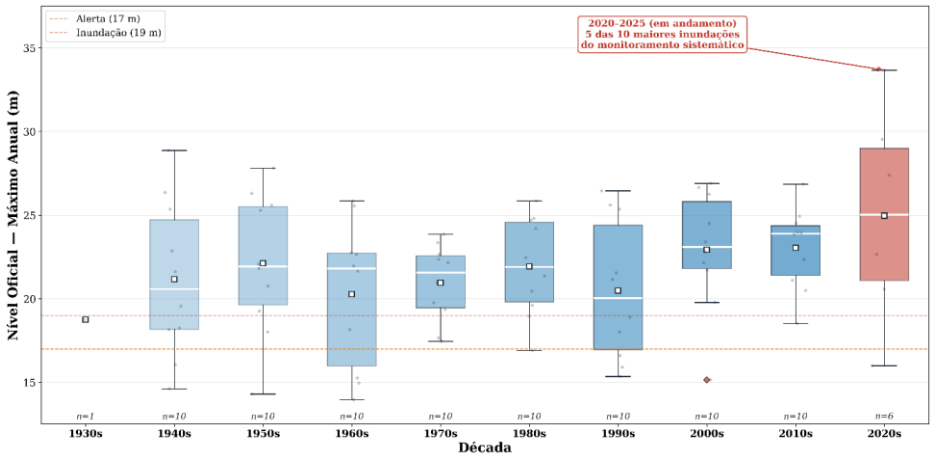


Figura 40 - Agrupamento e distribuição dos níveis máximos anuais das enchentes e inundações do rio Taquari em Lajeado por década, considerando somente o período do monitoramento sistemático.

A **Figura 40** apresenta o agrupamento e a distribuição dos níveis máximos anuais das enchentes e inundações do rio Taquari em Lajeado por década, evidenciando que a década ainda não finalizada de 2020 apresenta os níveis médios e máximos com a maior magnitude considerando todo o período de monitoramento sistemático, demonstrando coerência com os efeitos das mudanças climáticas projetadas para a região, que apontam o aumento da frequência e intensidade de eventos extremos para a região Sul do Brasil.

Em sua natureza, essa reconstituição de referenciais equipara-se aos esforços internacionais de resgate de dados hidrometeorológicos históricos, nos quais o restabelecimento da comparabilidade entre registros de épocas e sistemas de medição distintos é condição prévia de qualquer análise de longo prazo (Craig; Hawkins, 2024; Hawkins *et al.*, 2023a).

4.4 Série completa de máximos anuais com marcas históricas

A combinação dos 4 eventos não sistemáticos – a partir de 1873 com níveis reconstruídos e os 87 anos de dados sistemáticos (1939–2025) resultou em uma série consolidada de **máximos anuais** apresentada na **Tabela 9,** abrangendo 153 anos de história hidrológica do rio Taquari em Lajeado.

A série resultante materializa, para o rio Taquari, os dois movimentos que definem a hidrologia de frequência de cheias moderna: a expansão temporal da informação, pela incorporação de evidências anteriores ao período instrumental, e a combinação de evidências de naturezas distintas em uma mesma base inferencial (Merz; Blöschl, 2008a, 2008b).

Tabela 9 - Série de máximos anuais do rio Taquari em Lajeado (1873–2025). Nível oficial (cota ortométrica + 0,55 m).

Ano	Data	Cota (m)	Ano	Data	Cota (m)	Ano	Data	Cota (m)
1873*	07/10/1873	29,11	1966	05/08/1966	21,95	1997	04/08/1997	25,60
1912*	11/08/1912	27,73	1967	20/09/1967	25,55	1998	16/08/1998	21,55
1919*	22/11/1919	27,18	1968	07/11/1968	14,95	1999	21/07/1999	15,35
1928*	09/09/1928	27,40	1969	19/02/1969	15,25	2000	14/10/2000	23,40
1939	27/11/1939	18,75	1970	08/07/1970	17,65	2001	02/10/2001	26,90
1940	18/07/1940	25,35	1971	16/03/1971	22,65	2002	13/06/2002	22,15
1941	05/05/1941	28,87	1972	28/08/1972	23,35	2003	21/02/2003	21,70
1942	19/05/1942	22,85	1973	19/09/1973	22,15	2004	16/07/2004	15,15
1943	03/08/1943	14,61	1974	10/06/1974	20,95	2005	18/10/2005	22,80
1944	25/06/1944	21,61	1975	11/08/1975	19,75	2006	27/07/2006	19,78
1945	31/07/1945	18,15	1976	09/08/1976	22,35	2007	24/09/2007	26,25
1946	26/01/1946	26,35	1977	18/08/1977	23,85	2008	27/10/2008	26,65
1947	30/09/1947	16,05	1978	22/07/1978	17,45	2009	13/09/2009	24,50
1948	02/08/1948	19,55	1979	07/10/1979	19,35	2010	05/01/2010	23,95
1949	17/07/1949	18,25	1980	30/07/1980	22,45	2011	22/07/2011	26,85
1950	17/10/1950	25,28	1981	25/09/1981	16,90	2012	20/09/2012	21,10
1951	19/10/1951	18,01	1982	29/06/1982	24,80	2013	25/08/2013	23,85
1952	10/06/1952	14,30	1983	07/07/1983	24,70	2014	20/10/2014	20,49

Ano	Data	Cota (m)	Ano	Data	Cota (m)	Ano	Data	Cota (m)
1953	16/09/1953	22,06	1984	09/07/1984	20,45	2015	10/10/2015	24,51
1954	22/09/1954	26,30	1985	10/05/1985	18,95	2016	20/10/2016	24,93
1955	19/05/1955	19,26	1986	11/10/1986	19,60	2017	09/06/2017	23,92
1956	05/04/1956	27,81	1987	30/07/1987	21,35	2018	04/10/2018	18,51
1957	09/09/1957	21,80	1988	14/09/1988	24,20	2019	05/11/2019	22,34
1958	13/06/1958	20,75	1989	25/09/1989	25,85	2020	09/07/2020	27,39
1959	23/06/1959	25,58	1990	01/06/1990	26,45	2021	28/06/2021	15,99
1960	01/09/1960	21,65	1991	27/12/1991	18,90	2022	04/05/2022	20,57
1961	30/09/1961	22,75	1992	29/05/1992	25,35	2023	05/09/2023	29,53
1962	20/09/1962	13,95	1993	06/07/1993	21,15	2024	02/05/2024	33,67
1963	11/10/1963	22,65	1994	03/07/1994	18,00	2025	19/06/2025	22,65
1964	02/09/1964	18,15	1995	21/07/1995	15,90			
1965	21/08/1965	25,85	1996	01/09/1996	16,60			

** Registros do período não sistemático (1873–1938), reconstituídos conforme a seção 4.2. Fonte: elaboração própria.*

Ao ampliar o período de análise combinando os dados sistemáticos (1939–2025) com os dados não sistemáticos de inundações (1873–1938), das 10 maiores inundações documentadas em Lajeado, 4 ocorreram no outono, reforçando o padrão identificado na série sistemática de que os eventos de maior magnitude tendem a se concentrar nessa estação. As inundações de 07 de outubro de 1873, 09 de janeiro de 1912, 09 de setembro de 1928 e 22 de novembro de 1919 integram o ranking das 30 maiores inundações do rio Taquari em Lajeado (**Tabela 10**), ocupando, respectivamente, a 3ª, 8ª, 9ª e 11ª posição.

Tabela 10 [5]- *Ranking* das 30 maiores inundações do rio Taquari que ocorreram na cidade de Lajeado, combinando dados sistemáticos e não sistemáticos, organizadas em ordem decrescente.

Ranking	Data da Inundação	Nível da Cota (h) (m)	Fonte do Registro	Valor de Ajuste (m)	Altitude Ortométrica (H) (m)	Nível Oficial (m)
1	02/05/2024	33.67	86879300	-0.55	33.12	33.67
2	05/09/2023	29.53	86879300	-0.55	28.98	29.53
3	07/10/1873	-	Schierholt/Hemeroteca digital	-	28.56	29.11
4	19/11/2023	28.94	86879300	-0.55	28.39	28.94
5	05/05/1941	22.72	86870000	+5.60	28.32	28.87
6	05/04/1956	21.66	86870000	+5.60	27.26	27.81
7	13/05/2024	27.75	86879300	-0.55	27.2	27.75
8	09/01/1912	-	CEAT	-	27.18	27.73
9	09/09/1928	-	CEAT	-	26.85	27.4
10	09/07/2020	27.39	86879300	-0.55	26.84	27.39
11	22/11/1919	-	CEAT	-	26.63	27.18

[5] Eventos sombreados na tabela são provenientes de dados não sistemáticos/reconstrução documental.

Ranking	Data da Inundação	Nível da Cota (h) (m)	Fonte do Registro	Valor de Ajuste (m)	Altitude Ortométrica (H) (m)	Nível Oficial (m)
12	02/10/2001	26.9	Porto Estrela	-0.55	26.35	26.9
13	22/07/2011	26.85	Porto Estrela	-0.55	26.3	26.85
14	27/10/2008	26.65	Porto Estrela	-0.55	26.1	26.65
15	01/06/1990	26.45	Porto Estrela	-0.55	25.9	26.45
16	26/01/1946	20.2	86870000	+5.60	25.8	26.35
17	22/09/1954	20.15	86870000	+5.60	25.75	26.3
18	24/09/2007	26.25	Porto Estrela	-0.55	25.7	26.25
19	21/07/2001	26.2	Porto Estrela	-0.55	25.65	26.2
20	25/09/1989	25.85	Porto Estrela	-0.55	25.3	25.85
21	21/08/1965	18.7	86870000	+6.60	25.3	25.85
22	04/08/1997	25.6	Porto Estrela	-0.55	25.05	25.6
23	23/06/1959	19.43	86870000	+5.60	25.03	25.58
24	20/09/1967	18.4	86870000	+6.60	25	25.55
25	29/05/1992	25.35	Porto Estrela	-0.55	24.8	25.35
26	17/07/1940	19.2	86870000	+5.60	24.8	25.35
27	17/10/1950	19.13	86870000	+5.60	24.73	25.28
28	13/09/1989	25.2	Porto Estrela	-0.55	24.65	25.2
29	20/10/2016	24.93	86879300	-0.55	24.38	24.93
30	17/11/1941	18.73	86870000	+5.60	24.33	24.88

Ao considerar as 30 maiores inundações documentadas em Lajeado no período de 1873 a 2024, é possível observar que o Nível Oficial médio dessas 30 maiores inundações foi de 26,89 metros. Das 30 maiores inundações do rio Taquari em Lajeado, 26 eventos foram documentados por registros sistemáticos e 4 eventos históricos foram reconstruídos a partir de marcas físicas, documentação histórica, fotografias históricas ou relatos de historiadores, com aferição do nível máximo dessas inundações (1873, 1912, 1919 e 1928) utilizando recursos modernos de topografia e geoprocessamento, conforme descrito no capítulo da metodologia.

De acordo com as pesquisas documentadas pelo historiador José Alfredo Schierholt (2024), a inundação de 21 e 22 de novembro de 1919 matou 24 pessoas e destruiu 55 casas em sua totalidade. Constitui-se em uma cheia histórica em algumas regiões, inclusive fora da BHTA, como no município de Sinimbu (GAZ, 2021), onde aquela cheia era retratada como a maior cheia até então registrada no rio Pardinho, antes do evento de 30 de abril de 2024. De volta para a BHTA, na sub-bacia do rio Forqueta, nos municípios de Arroio do Meio, Travesseiro e Marques de Souza, a cheia de 1919 também é destacada como uma grande cheia pelo historiador Paulo Alécio Weizenmann (2023) e pelo Grupo a Hora (2024). Esses relatos demonstram a influência do rio Forqueta na dinâmica fluvial do rio Taquari, após a sua confluência no rio Taquari.

Em relação a cota do rio Taquari adotado em Lajeado, a inundação de maio de 2024 que alcançou a cota máxima de 33,67 m, ou seja, teve uma elevação vertical de 20,67 metros, superando em 4,14 metros a 2ª maior inundação da série histórica, ocorrida em 05 de setembro de 2023. No ranking das 30 maiores inundações do rio Taquari em Lajeado, as duas maiores foram registradas em 2024 e 2023. Na categorização das 30 maiores inundações, importante destacar que 5 anos apresentaram mais de um evento no ranking (2024, 2023, 2001, 1989 e 1941), compondo anos que registraram condições hidrológicas extraordinárias e desafios significativos para as cidades, o setor agropecuário e as infraestruturas.

4.5 Análise de frequência de cotas máximas

A análise de frequência de cotas máximas anuais constitui etapa fundamental para a caracterização probabilística das inundações do rio Taquari em Lajeado, permitindo estimar a probabilidade de ocorrência e os tempos de retorno associados a diferentes magnitudes de eventos. Para isso, foram consideradas as séries de cotas máximas anuais organizadas conforme descrito no Capítulo 3: a série sistemática (1939–2025), proveniente do monitoramento fluviométrico instrumental, e a série combinada, que integra os dados sistemáticos aos registros históricos não sistemáticos reconstruídos (1873–1938), totalizando 153 anos de informação hidrológica somado aos dados censurados.

4.5.1 Estatísticas descritivas das séries históricas

A **Tabela 11** apresenta os principais parâmetros estatísticos calculados para a série sistemática (1939–2025, N = 87 anos) e para a série combinada (1873–2025, N = 91 observações), permitindo avaliar o efeito da incorporação dos registros históricos na caracterização estatística.

Tabela 11 - Estatísticas descritivas das séries de cotas máximas anuais do rio Taquari em Lajeado para a série sistemática (1939–2025) e série combinada (1873–2025).

Estatística	Série Sistemática (1939–2025) N = 87 anos	Série Combinada (1873–2025) N = 91 obs.	Unidade	Variação entre as séries (Δ)
Média	21,81	22,07	m	+0,26
Mediana	22,06	22,15	m	+0,09
Desvio padrão	3,95	4,06	m	+0,11
Coeficiente de variação	18,1	18,4	%	+0,3
Coeficiente de assimetria	0,061	0,010	–	−0,051
Mínimo	13,95	13,95	m	0,00
Máximo	33,67	33,67	m	0,00
Amplitude total	19,72	19,72	m	0,00

Fonte: elaboração própria

A série sistemática apresentou uma média de 21,81 m, mediana de 22,06 m, desvio padrão de 3,95 m e coeficiente de assimetria de 0,061, com amplitude total de 19,72 m entre o mínimo de 13,95 m (setembro de 1962) e o máximo de 33,67 m (02 de maio de 2024), a maior inundação registrada instrumentalmente no rio Taquari em Lajeado. A incorporação dos quatro eventos históricos reconstruídos (1873, 1912, 1919 e 1928), todos com cotas superiores a 27,00 m, produziu alterações modestas e direcionalmente coerentes: elevação de 0,26 m na média e

de 0,09 m na mediana, acréscimo de 0,11 m no desvio padrão e redução do coeficiente de assimetria de 0,061 para 0,010, reflexo do preenchimento da região superior da distribuição empírica pelos quatro eventos, situados entre o corpo dos dados e o máximo registrado, o que aproxima a distribuição da simetria. Essa estabilidade dos parâmetros entre as duas séries indica que os registros históricos se integram à série instrumental sem introduzir distorções estatísticas, corroborando a qualidade do processo de reconstrução dos níveis das inundações.

4.5.2 Análise de estacionariedade

A verificação da premissa de estacionariedade, condição para a aplicação da análise de frequência convencional, foi realizada mediante o teste de correlação de Spearman aplicado à série sistemática de cotas máximas anuais (1939–2025). O teste restringe-se à série instrumental nesta análise, entendendo que os registros históricos, por constituírem dados censurados recuperados de fontes não sistemáticas, não atendem aos requisitos amostrais dos testes de tendência (Stedinger; Cohn, 1986). Os resultados estão apresentados na **Tabela 12.**

Tabela 12 - Resultados da análise de estacionariedade pelo Coeficiente de Spearman para as séries de níveis máximos anuais do rio Taquari em Lajeado.

Série Analisada	N	ρs	t calculado	t crítico (α=0,05)	p-valor	Conclusão
Sistemática (1939–2025)	87	0,1880	1,7649	±1,9883	0,0812	Estacionária
H_0 não rejeitada (α = 0,05). A análise de frequência probabilística é estatisticamente válida.						

Para a série sistemática, o coeficiente de Spearman resultou em ρs = 0,188, com estatística t calculada de 1,765, inferior ao valor crítico bilateral de 1,988 (p = 0,081). A hipótese nula de ausência de tendência monotônica não foi rejeitada ao nível de significância de 5%, e a série atende, nesse critério, à premissa requerida pela análise de frequência convencional. O resultado, contudo, deve ser lido com o p-valor à vista: ao nível de 10%, a mesma hipótese seria rejeitada, e o coeficiente positivo reflete a concentração dos dois maiores eventos da série, setembro de 2023 (29,53 m) e maio de 2024 (33,67 m), ao final do período. Um teste de tendência monotônica é, além disso, cego a formas de não estacionariedade que não se expressam como tendência, mudança de variância, de distribuição ou de frequência de extremos (Salas *et al.*, 1980; Yue *et al.*, 2002) e, como demonstrou Klemeš (1974), o agrupamento temporal de eventos extremos é estatisticamente indistinguível, dentro de uma série curta, de uma mudança na média do processo. A série encontra-se, portanto, no limiar da significância estatística, em momento em que evidências independentes indicam intensificação das chuvas extremas no Rio Grande do Sul influenciadas pelas mudanças climáticas (Collischonn *et al.*, 2024a).

A opção pela análise de frequência estacionária, adotada nesta tese por sua consolidação normativa e pela comparabilidade com os estudos anteriores na bacia, não expressa a convicção de que o regime seja estável; expressa que a série disponível ainda não permite distinguir, com rigor estatístico, uma mudança de regime de um agrupamento natural de cheias (Machado *et al.*, 2015; Klemeš, 1974). Essa distinção é precisamente o que uma série longa torna possível, e é nesse sentido que as estimativas da seção seguinte devem ser interpretadas: como a melhor

caracterização do regime observado, provisória por natureza, e não como descrição de um regime futuro que a evidência disponível sugere estar em transformação, advertência que Klemeš (2000a; 2000b) formulou para toda extrapolação de caudas hidrológicas a partir de registros curtos.

4.5.3 Ajuste da distribuição de probabilidade

Os parâmetros da distribuição Log-Pearson Tipo III (LP3) foram estimados por inferência bayesiana, mediante o algoritmo Markov Chain Monte Carlo (MCMC) implementado no software RMC-BestFit (Smith e Doughty, 2020), seguindo a formulação de Reis e Stedinger (2005). As análises foram conduzidas para duas séries: a sistemática (1939–2025, N = 87 anos) e a combinada (1873–2025, N = 91 observações), esta última incorporando os quatro eventos históricos reconstruídos como valores exatos e a estrutura de censura do período 1873–1938 descrita na metodologia.

Na série sistemática, cujas observações são todas razoavelmente acuradas, a aderência do ajuste por máxima verossimilhança às posições de plotagem resultou em RMSE de 0,49 m, obtido na etapa de ajuste de distribuições (*Distribution Fitting Analysis*) do RMC-BestFit. Para a série combinada, a qualidade do ajuste é avaliada no âmbito da própria estimação bayesiana, uma vez que a estrutura de censura do período histórico não é representada na etapa de ajuste por máxima verossimilhança. A curva de frequência da análise bayesiana da série sistemática, com o intervalo de credibilidade de 90% e as posições de plotagem, é apresentada na **Figura 41**, na qual se observa a divergência entre as estimativas da moda e da preditiva a posteriori na região de baixas probabilidades de excedência; os resultados da série combinada são apresentados nas **Tabelas 13 e 14**.

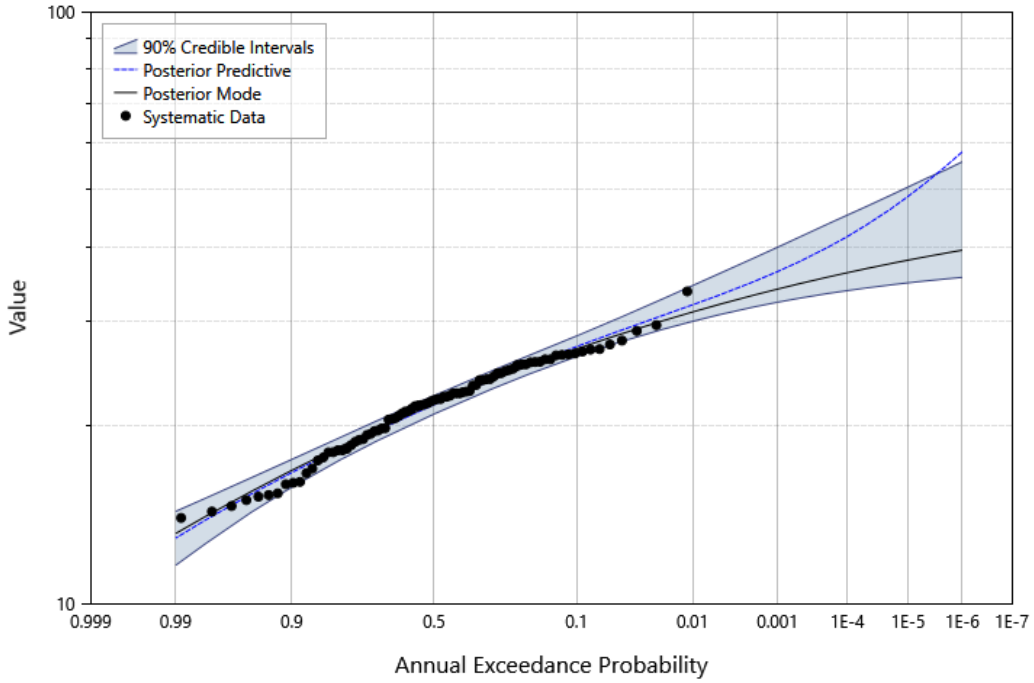


Figura 41 – Curva de frequência de cotas máximas anuais do rio Taquari em Lajeado (RS). Distribuição LP3 ajustada por estimação bayesiana MCMC (RMC-BestFit) à série sistemática (1939–2025). Linha tracejada: distribuição preditiva a posteriori (*Posterior Predictive*), estimativa de referência; linha contínua: moda a posteriori (*Posterior Mode*); área sombreada: intervalo de credibilidade de 90%. Fonte: elaboração própria.

4.5.4 Comparação de cenários com e sem dados históricos

A comparação entre o Cenário A (série sistemática, 1939–2025) e o Cenário B (série combinada, 1873–2025) foi realizada com base nos quantis (cotas estimadas) da distribuição preditiva a posteriori, estimativa central adotada por integrar a incerteza paramétrica caracterizada pela amostragem MCMC (Smith; Doughty, 2020), e nas amplitudes dos intervalos de credibilidade de 90%. A **Figura 42** apresenta os níveis e limiares utilizados. A **Tabela 13** apresenta as cotas estimadas para os principais tempos de retorno em ambos os cenários.

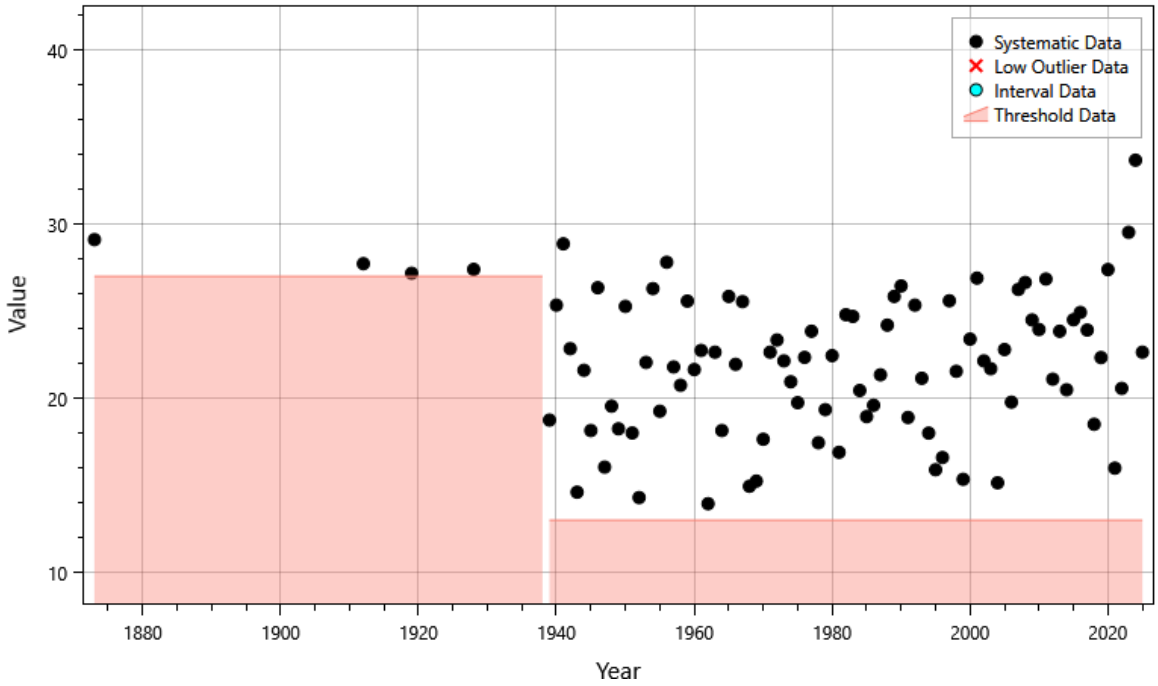


Figura 42 - Estrutura de dados da análise de frequência no *software* RMC-BestFit: máximos anuais como observações exatas e áreas sombreadas indicando as faixas abaixo dos limiares de percepção (27,00 m para 1873–1938 e 13,00 m para 1939–2025). O limiar do período sistemático, inferior ao mínimo observado na série (13,95 m), não implica censura efetiva. Fonte: elaboração própria, a partir do *software* RMC-BestFit (Smith e Doughty, 2020).

Tabela 13 - Cotas estimadas (m) para diferentes tempos de retorno. Distribuição LP3 bayesiana – série sistemática (1939–2025) e combinada com censura (1873–2025): Rio Taquari em Lajeado (RS).

T (anos)	AEP*	Sistemática – *Preditiva a posteriori* (m)	Sistemática – IC 90% (m)	Combinada – *Preditiva a posteriori* (m)	Combinada – IC 90% (m)
2	0,500	21,68	20,90 – 22,45	21,55	20,86 – 22,20
5	0,200	25,25	24,36 – 26,18	24,91	24,19 – 25,60
10	0,100	27,17	26,13 – 28,31	26,68	25,89 – 27,47
20	0,050	28,77	27,55 – 30,25	28,14	27,24 – 29,09
50	0,020	30,65	29,04 – 32,68	29,78	28,66 – 31,07
100	0,010	31,96	29,97 – 34,44	30,89	29,55 – 32,46
500	0,002	34,98	31,70 – 38,33	33,27	31,17 – 35,52
1000	0,001	36,36	32,28 – 39,97	34,28	31,73 – 36,76

Fonte: elaboração própria com base nos resultados tabulados do RMC-BestFit (Smith; Doughty, 2020). Posterior Predictive: estimativa central que integra a incerteza paramétrica caracterizada pela amostragem MCMC. IC 90%:

intervalo de credibilidade delimitado pelos percentis de 5% e 95% da distribuição a posteriori dos quantis, obtida dos conjuntos de parâmetros amostrados.
* - Probabilidade anual de excedência.

A incorporação dos registros históricos com a estrutura de censura produziu dois efeitos estatísticos complementares. O primeiro foi a redução das cotas estimadas em toda a faixa analisada, de 0,13 m (T = 2 anos) a 2,08 m (T = 1.000 anos): a informação de que, em 62 dos 66 anos do período 1873–1938, os máximos anuais não excederam o limiar de percepção indica que o período histórico concentrou menos excedências de grande magnitude que o período instrumental recente, moderando as estimativas obtidas apenas com a janela que contém os extremos de 2023 e 2024, efeito análogo ao documentado no rio Kamp, na Áustria, onde a influência de um evento excepcional isolado sobre as cotas estimadas foi drasticamente atenuada pela incorporação de informação adicional à amostra local (Viglione *et al.*, 2013). O segundo efeito foi a redução da amplitude dos intervalos de credibilidade de 90%, de 13% (T = 2 anos) a aproximadamente 34% (T ≥ 1000 anos), resultado coerente com a demonstração de que a incorporação de informações históricas reduz a variância dos estimadores de níveis extremos, com ganho crescente conforme o comprimento do período histórico (Stedinger; Cohn, 1986) e convergente com as evidências de que dados históricos incorporados em estrutura bayesiana estreitam substancialmente a incerteza do quantil de referência centenária (Parkes e Demeritt, 2016). Para tempos de retorno de até 50 anos, as diferenças de cotas entre os cenários não excederam 0,9 m, indicando que a série instrumental de 87 anos caracteriza adequadamente os eventos de menor raridade, enquanto o ganho informacional dos registros históricos se manifesta, sobretudo, na precisão das estimativas de maior raridade.

A robustez dos resultados à escolha do limiar de percepção foi verificada repetindo-se a estimação bayesiana com limiares de 26 e 28 m para o período 1873–1938. As cotas estimadas da distribuição preditiva a posteriori variaram menos de 0,2 m em toda a faixa de tempos de retorno, e o tempo de retorno estimado para o evento de maio de 2024 variou menos de 3% entre as configurações, indicando que as conclusões independem da principal decisão subjetiva da modelagem. O valor de 27 m foi adotado por situar-se imediatamente abaixo do menor evento com nível reconstruído no período (27,18 m, em 1919). As cotas estimadas da **Tabela 13** constituem a referência desta tese para o planejamento e a gestão de riscos hidrológicos em Lajeado e fundamentam o posicionamento dos eventos extremos na curva de frequência, apresentado na seção seguinte.

4.5.5 Tempos de retorno estimados para inundações extremas

Os tempos de retorno dos eventos históricos selecionados foram estimados por dois procedimentos, reportados lado a lado na **Tabela 14**. O primeiro aplica a função de distribuição acumulada analítica da LP3 aos parâmetros da moda a posteriori ($\mu = 1{,}3284$; $\sigma = 0{,}0788$; $\gamma = -0{,}4911$), fornecendo estimativa pontual condicionada a esse único vetor. O segundo recorre à distribuição preditiva a posteriori, obtida por interpolação log-linear na tabela de quantis exportada do RMC-BestFit, e integra simultaneamente a incerteza paramétrica da estimação e a variabilidade natural do processo hidrológico (Reis; Stedinger, 2005; Smith; Doughty, 2020). Conforme estabelecido na seção 3.5.2, a distribuição preditiva constitui a referência adotada nesta tese, cabendo à moda a posteriori papel comparativo, destinado a evidenciar o efeito da incerteza paramétrica sobre as estimativas. Os intervalos de credibilidade de 90% foram

delimitados pelos percentis de 5% e 95% da distribuição a posteriori de cada quantil, construída a partir dos conjuntos de parâmetros amostrados via MCMC, por não haver formulação analítica para esses limites.

Tabela 14 – Posicionamento de eventos históricos selecionados na curva de frequência. Tempos de retorno estimados pela moda a posteriori (CDF analítica) e pela preditiva a posteriori (interpolação log-linear). LP3 bayesiana – série combinada com censura (1873–2025).

Evento	Data	Nível oficial (m)	TR – Moda a posteriori (anos)	TR – Preditiva a posteriori (anos)	IC 90% (5%–95%, anos)	Contexto na série histórica
Inundação 1873	07/10/1873	29,11	≈ 41	≈ 34	20 – 71	3º maior evento da série consolidada (153 anos)
Inundação 1941	05/05/1941	28,87	≈ 36	≈ 30	18 – 59	5º maior evento – maior cheia do período sistemático até setembro de 2023
Inundação 2023	05/09/2023	29,53	≈ 54	≈ 44	24 – 98	2º maior evento instrumental – 2º no ranking geral
Inundação 2024	02/05/2024	33,67	≈ 2.119	≈ 656	187 – 30.983	Maior evento dos 153 anos – supera em 4,14 m o 2º lugar (2023)

Fonte: elaboração própria, adaptado do software RMC-BestFit.

O desastre hidrológico de 02 de maio de 2024 (33,67 m) representa o evento de maior magnitude dos 153 anos de registros. Pela CDF analítica com os parâmetros da moda a posteriori, o tempo de retorno estimado é de ≈ 2.119 anos; pela distribuição preditiva a posteriori, de ≈ 656 anos, com intervalo de credibilidade de 90% de 187 a 30.983 anos. A diferença entre as estimativas é esperada: enquanto a moda a posteriori fixa os parâmetros no pico da distribuição a posteriori, a preditiva integra sobre o conjunto de amostras MCMC, e a contribuição dos vetores de parâmetros com caudas mais pesadas tende a reduzir o tempo de retorno estimado para eventos de elevada raridade. A distribuição preditiva constitui, portanto, a estimativa central mais conservadora e é a adotada nesta tese. **Para fins de gestão de riscos, planejamento urbano e de infraestrutura, contudo, recomenda-se a adoção do limite inferior do intervalo de credibilidade de 90% como valor de referência, o que, para a cheia de maio de 2024, corresponde a um tempo de retorno de 187 anos.** A amplitude expressiva do intervalo de credibilidade reflete a incerteza inerente à extrapolação para cotas extremas e reforça a necessidade de comunicar não apenas a estimativa central, mas também sua incerteza associada.

Os eventos de 1873 (29,11 m), 1941 (28,87 m) e 2023 (29,53 m) apresentam tempos de retorno moderados (entre 30 e 54 anos, conforme o método) em função da extensão da série combinada de 153 anos, que redistribui as probabilidades ao longo de todo o período. A coexistência, no mesmo biênio, de eventos com tempos de retorno de ≈ 44 anos (setembro de 2023) e ≈ 656 anos (maio de 2024) pela distribuição preditiva a posteriori ilustra a variabilidade hidrológica extrema da bacia do rio Taquari e reforça a importância da série histórica longa para a caracterização probabilística das inundações em Lajeado. O ganho estatístico proporcionado pela incorporação dos registros não sistemáticos cresce com o tempo de retorno, conforme demonstrado na seção 4.5.4 (redução de 13% a aproximadamente 34% na amplitude dos intervalos de credibilidade de 90% entre T = 2 e T = 1.000 anos), contribuindo para estimativas mais precisas justamente dos níveis de inundação mais raros. Ainda assim, para

eventos da raridade de maio de 2024, a incerteza permanece elevada, reflexo da extrapolação para cotas estimadas além do registro observado (Stedinger; Cohn, 1986).

A comparação de cenários mostra que a incorporação dos registros históricos reduziu a amplitude dos intervalos de credibilidade em toda a faixa analisada e conferiu estabilidade às cotas estimadas de maior raridade, cuja sensibilidade à janela de observação fica evidenciada pela diferença de até 2,08 m entre os cenários em T = 1.000 anos. Para uma série instrumental cujos dois maiores eventos se concentram em um único biênio, os 66 anos de informação pré-instrumental funcionam como contrapeso temporal, ancorando a cauda superior da distribuição em um período de observação mais longo e moderando estimativas condicionadas à excepcionalidade recente. A análise e incorporação de dados históricos, não apenas complementam a análise de frequência por simples acréscimo de dados, mas por qualificação estrutural da inferência.

4.6 Marcas de limites de área inundada

4.6.1 Cheias de 2007 a 2020

Entre 2007 e 2020, foram realizados três levantamentos técnicos de marcas de limite horizontal da área inundada em Lajeado, cobrindo eventos com diferentes níveis máximos (entre 24,51 m e 27,39 m). Os dados de cada campanha foram utilizados em estudos de mapeamento e retromodelagem desenvolvidos em trabalhos anteriores, conforme indicado na **Tabela 15.**

Tabela 15 - Levantamentos técnicos de marcas de limite de inundação em Lajeado (RS), 2007–2020: níveis, altitudes ortométricas, número de pontos e utilização em estudos prévios.

Data do pico	Nível oficial h (m)	Altitude ortométrica H (m)	Nº de pontos (Lajeado)	Utilização em estudos prévios
24/09/2007	26,25	25,70	26	Validação de mapeamento de áreas inundáveis (ECKHARDT, 2008)
10/10/2015	24,51	23,96	104	Mapeamento de áreas suscetíveis a inundações (MORAES, 2015)
09/07/2020	27,39	26,84	126	Retromodelagem hidrodinâmica no HEC-RAS (MORAES *et al.,* 2023)

Fonte: elaboração própria. Nível oficial h: posto fluviométrico 86870000; MORAES *et al.,* 2024.

A continuidade dos levantamentos consolidou um protocolo de campo: critérios para identificação visual do limite horizontal da inundação e processamento em ambiente SIG. Os dados resultantes subsidiaram, além da calibração e validação de mapeamentos e modelos hidrodinâmicos (seção 4.7), a elaboração de mapas preliminares de alerta de inundação para Lajeado (PARMA, 2025). Esta experiência tornou-se, ainda, a base sobre a qual as campanhas de ciência cidadã de 2023 e 2024 foram estruturadas (MORAES *et al.*, 2025).

Esse protocolo foi simplificado e adaptado para coleta por voluntários não especializados, configurando o que Bonney *et al.* (2009) classificam como *ciência cidadã contributiva* – modelo em que especialistas concebem e controlam o protocolo enquanto a comunidade executa a coleta de dados. A transição não foi planejada *a priori*, mas imposta pela

magnitude dos eventos de 2023 e 2024, que tornaram operacionalmente inviável a cobertura integral do perímetro de inundação por equipe técnica reduzida, e pelo colapso dos sistemas automáticos de monitoramento nos momentos de maior necessidade de dados (MORAES *et al.,* 2025).

4.6.2 Cheias de 2023 e 2024

Em setembro de 2023 e maio de 2024, o mapeamento de limites de inundação foi realizado por meio de campanhas de ciência cidadã coordenadas pelo IPH/UFRGS e pela Univates, utilizando o aplicativo WhatsApp como plataforma de coleta georreferenciada (MORAES *et al*., 2025). A escolha concretiza a convergência entre ciência cidadã e canais de comunicação de uso massivo, apontada na literatura como caminho para viabilizar o monitoramento participativo de inundações onde a rede instrumental é esparsa ou vulnerável (Restrepo-Estrada *et al.*, 2018; Seibert *et al.*, 2019). Os níveis máximos oficiais de ambos os eventos foram ajustados pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB) após a recessão das cheias, uma vez que a infraestrutura física e lógica da estação fluviométrica 86879300 foi destruída durante os eventos (Marcuzzo *et al*., 2024). A **Tabela 16** apresenta os dois eventos, com os respectivos níveis oficiais (SGB) e o número de pontos obtidos com CC no recorte de Lajeado.

Tabela 16 – Cheias de 2023 e 2024 em Lajeado (RS): pontos de ciência cidadã.

Data do pico	Nível oficial (m)	Nº pontos CC recebidos (escala regional - BHTA)	Nº pontos CC em Lajeado/RS
05/09/2023	29,53	626	21
02/05/2024	33,67	196	23

Fonte: elaboração própria.

Em escala regional, as duas campanhas mobilizaram 190 voluntários e produziram 822 localizações georreferenciadas distribuídas por 14 municípios da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas, entre Santa Tereza e Taquari (MORAES *et al*., 2025). Em Lajeado, dos 23 pontos recebidos, apenas 11 pontos distintos representavam o limite horizontal máximo da inundação e foram utilizados na validação do modelo hidrodinâmico; os demais correspondiam a registros duplicados ou a registros de lâmina vertical d'água, dado de natureza distinta, não utilizado para delimitação de manchas de inundação nesta etapa. Aplicado o mesmo controle de qualidade ao conjunto de setembro de 2023, dos 24 pontos recebidos no recorte, 21 foram utilizados na validação. O modelo hidrodinâmico foi, portanto, confrontado com 21 pontos de ciência cidadã para o evento de setembro de 2023 e 11 para o de maio de 2024, conforme sintetizado na Tabela 16.

A redução de 626 contribuições em setembro de 2023 para 196 em maio de 2024 na BHTA se justifica pelo colapso generalizado da infraestrutura de energia elétrica e telecomunicações nas áreas mais atingidas, além de envolvimento da equipe em outras demandas de resposta imediata à região afetada, o que dificultou a divulgação e a participação dos voluntários nas horas seguintes ao pico, circunstância que evidencia simultaneamente o valor e os limites operacionais da CC em cenários de desastre extremo, conforme apontado por Assumpção *et al.* (2018) e Paul *et al*. (2018).

Por outro lado, a campanha de ciência cidadã de maio de 2024 ultrapassou os limites geográficos da BHTA e os limites interinstitucionais, com o envolvimento de um conjunto de universidades no engajamento e divulgação da coleta de dados. Além da Univates e IPH/UFRGS, envolveram-se também a UNISC (Universidade de Santa Cruz do Sul), UNISINOS (Universidade do Vale do Rio dos Sinos), Universidade FEEVALE, UFF – Universidade Federal Fluminense, Universidade Dom Bosco de Porto Alegre e UCS (Universidade de Caxias do Sul) (MORAES *et al.*, 2025).

4.7 Modelagem hidrodinâmica e retromodelagem de cheias do rio Taquari em Lajeado

A simulação das inundações do rio Taquari em Lajeado foi conduzida em regime não permanente bidimensional (2D) no HEC-RAS 6.6 (USACE, 2024), abrangendo sete eventos de referência distribuídos entre duas operações complementares. A modelagem hidrodinâmica foi aplicada a cinco cheias contemporâneas com dados observados de limite horizontal: setembro de 2007 (26,25 m), outubro de 2015 (24,51 m), julho de 2020 (27,39 m), setembro de 2023 (29,53 m) e maio de 2024 (33,67 m). A retromodelagem foi aplicada às duas cheias históricas cujos níveis máximos foram reconstituídos a partir de marcas físicas preservadas, documentação histórica e ajuste de referencial: 05 de maio de 1941 (28,87 m) e 07 de outubro de 1873 (29,11 m). O domínio de simulação compreende um trecho de 38,47 km do rio Taquari, desde a confluência com o rio Forqueta, em Arroio do Meio, até a ponte da RSC-287 em Vila Mariante, município de Venâncio Aires, abrangendo cinco municípios: Arroio do Meio, Lajeado, Estrela, Bom Retiro do Sul e Venâncio Aires. A configuração completa da malha computacional, condições de contorno e parâmetros numéricos encontra-se descrita na seção 3.7.

4.7.1 Modelagem hidrodinâmica e validação de cheias contemporâneas (2007–2024)

A validação do modelo apoia-se em pontos georreferenciados de limite horizontal da inundação levantados em cinco eventos, coletados em primeira mão pela autora, por colaboradores diretos ou por instituições parceiras. Os pontos da cheia de setembro de 2007 foram levantados *in loco* com receptores GPS por Eckhardt (2008), já os da cheia de outubro de 2015 foram levantados pela autora no contexto da sua monografia (Moraes, 2015). Os pontos da cheia de julho de 2020 foram coletados em campo pela autora e publicados em Moraes *et al.* (2023). Os pontos da cheia de setembro de 2023 foram obtidos por ciência cidadã via WhatsApp georreferenciado, em protocolo estruturado conduzido pela autora durante e após o evento (Moraes *et al.*, 2025). Os pontos da cheia de maio de 2024 provêm de levantamento técnico realizado pelo Serviço Geológico do Brasil (Marcuzzo *et al.*, 2024), complementados por dados de ciência cidadã coletados em paralelo e incorporados em Moraes *et al.* (2025).

A natureza híbrida do conjunto (levantamentos técnicos com GPS nos três primeiros eventos, participação cidadã estruturada em 2023 e 2024 e levantamento institucional do SGB em maio de 2024) permite avaliar a aderência do modelo a protocolos distintos de obtenção do dado de controle, em regime de magnitude que vai de cheias moderadas a eventos historicamente excepcionais, operacionalizando, no plano da validação, o princípio de combinação de evidências heterogêneas (Merz e Blöschl, 2008b). A verificação espacial foi conduzida para os seis conjuntos de pontos de controle disponíveis (cinco eventos, com duas

fontes independentes em maio de 2024), pela comparação entre as manchas de inundação máxima simuladas e os limites horizontais observados em campo.

A métrica adotada foi a distância horizontal entre cada ponto de controle e a borda mais próxima da mancha simulada, medida em ambiente SIG, da qual derivam o RMSE, a mediana e o erro máximo por evento. A escolha da métrica mantém consistência com o procedimento de validação aplicado na calibração original do modelo (Parma, 2025) e é adequada ao escopo dos produtos desta tese, restrito à extensão e à profundidade máxima de inundação. Os registros com coordenadas duplicadas foram removidos previamente ao cálculo, conforme o controle de qualidade descrito na seção 3.6.2. As **Figuras 43 a 47** apresentam a sobreposição entre os pontos de controle e as manchas simuladas para cada evento, e a **Tabela 17** sintetiza os resultados.

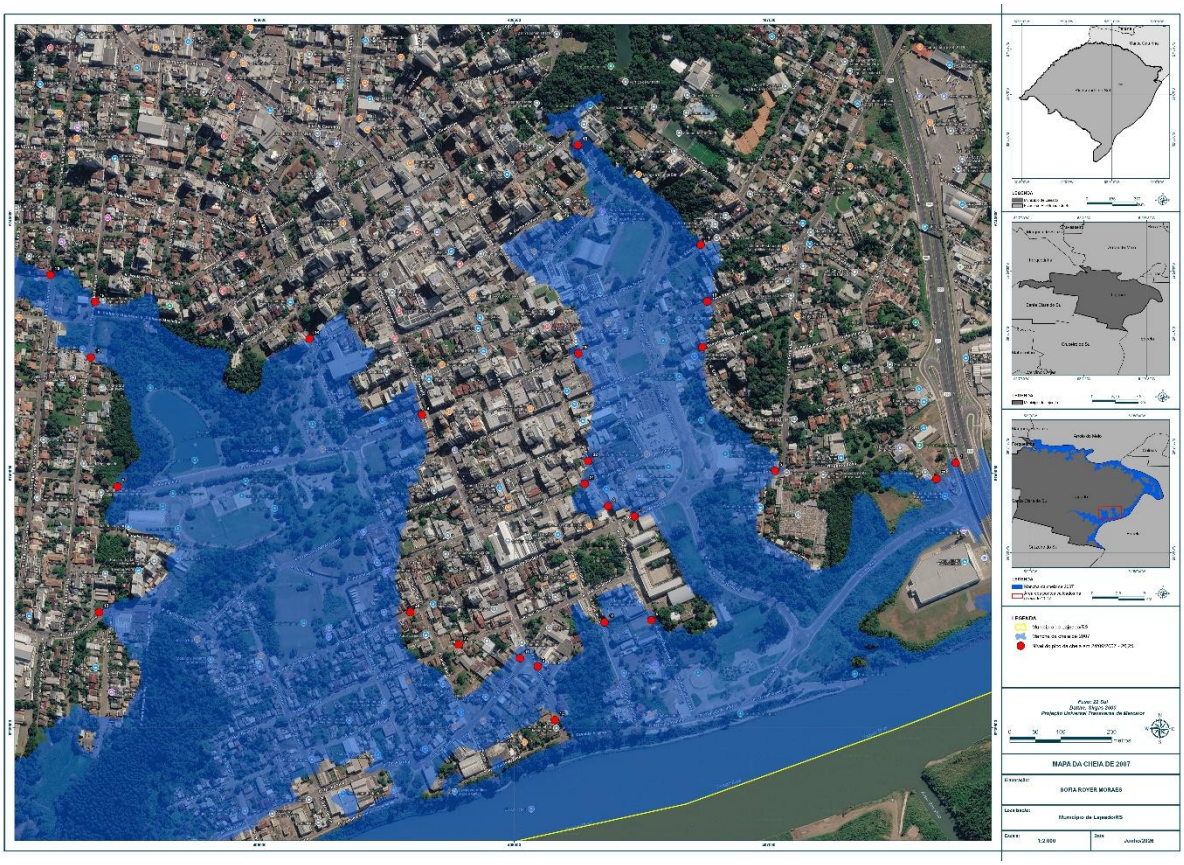


Figura 43 – Modelagem da cheia de 2007

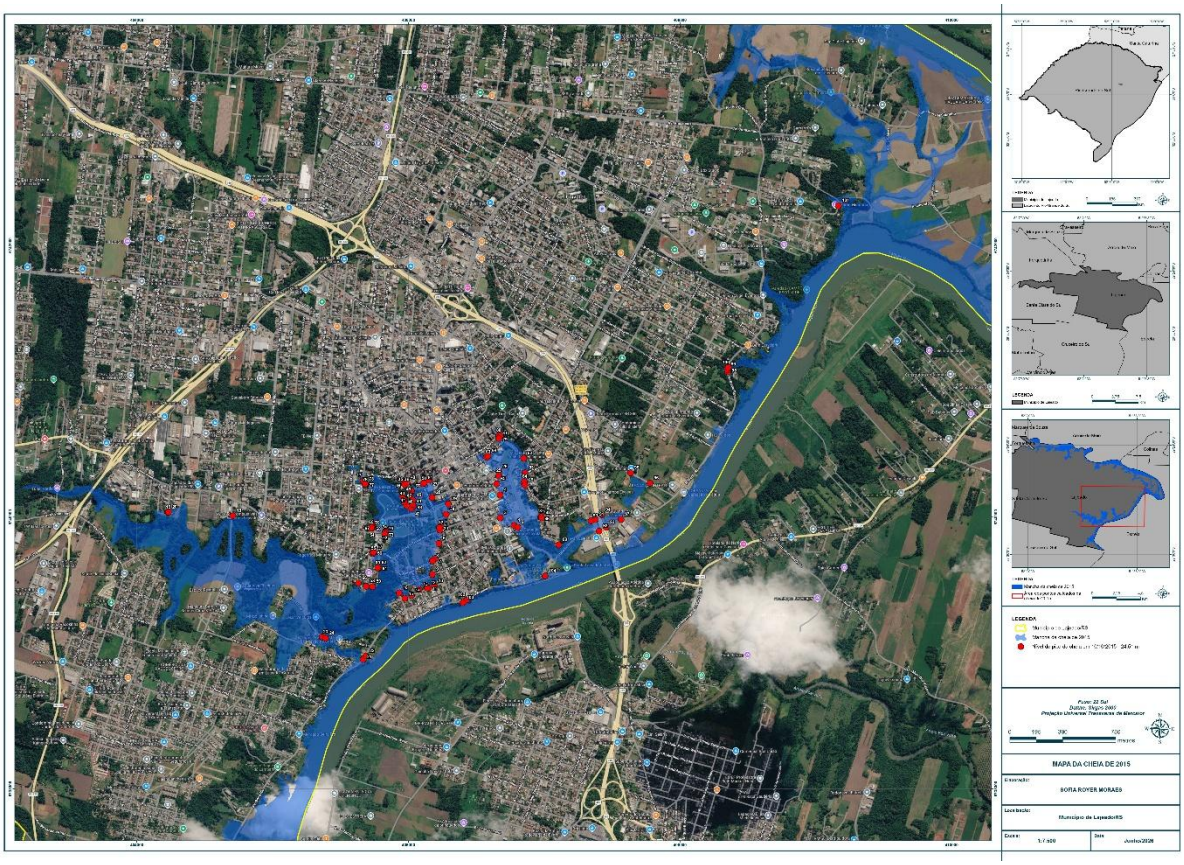


Figura 44 - Modelagem da cheia de 2015

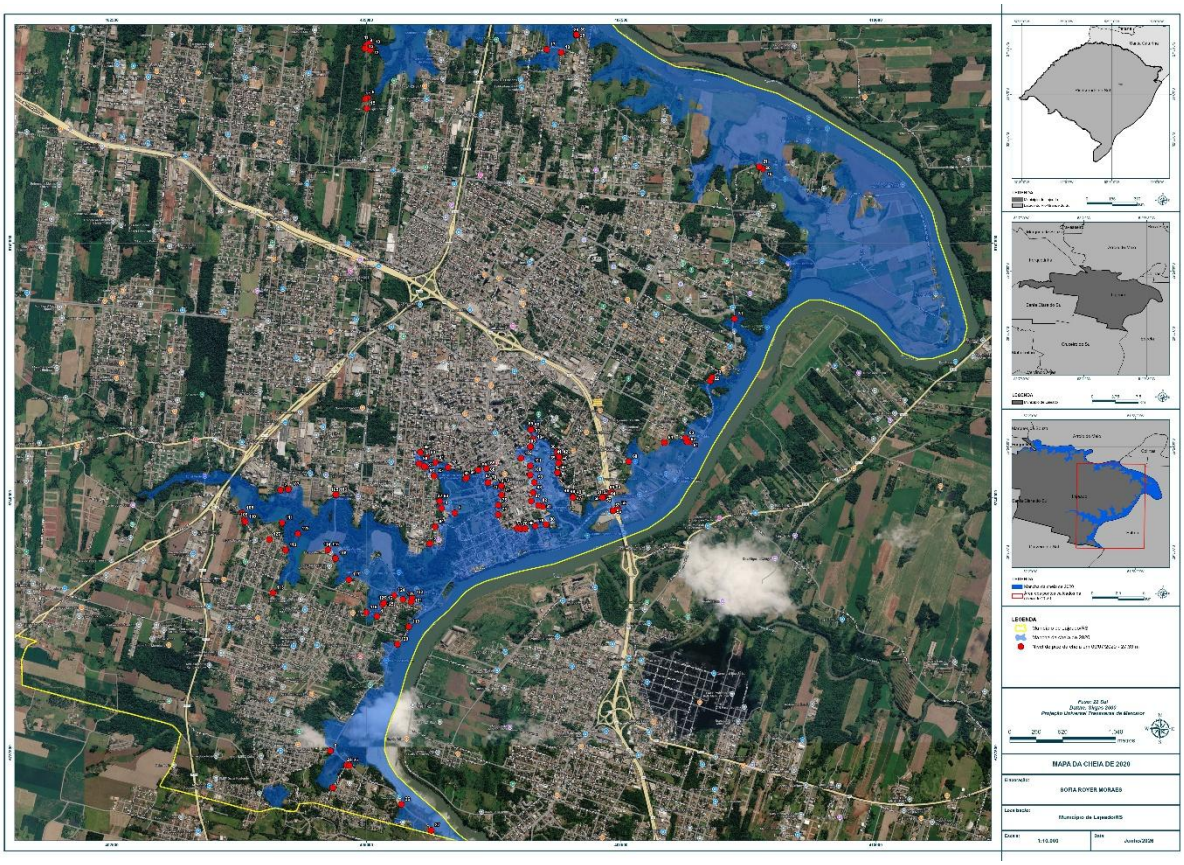


Figura 45 - Modelagem da cheia de 2020

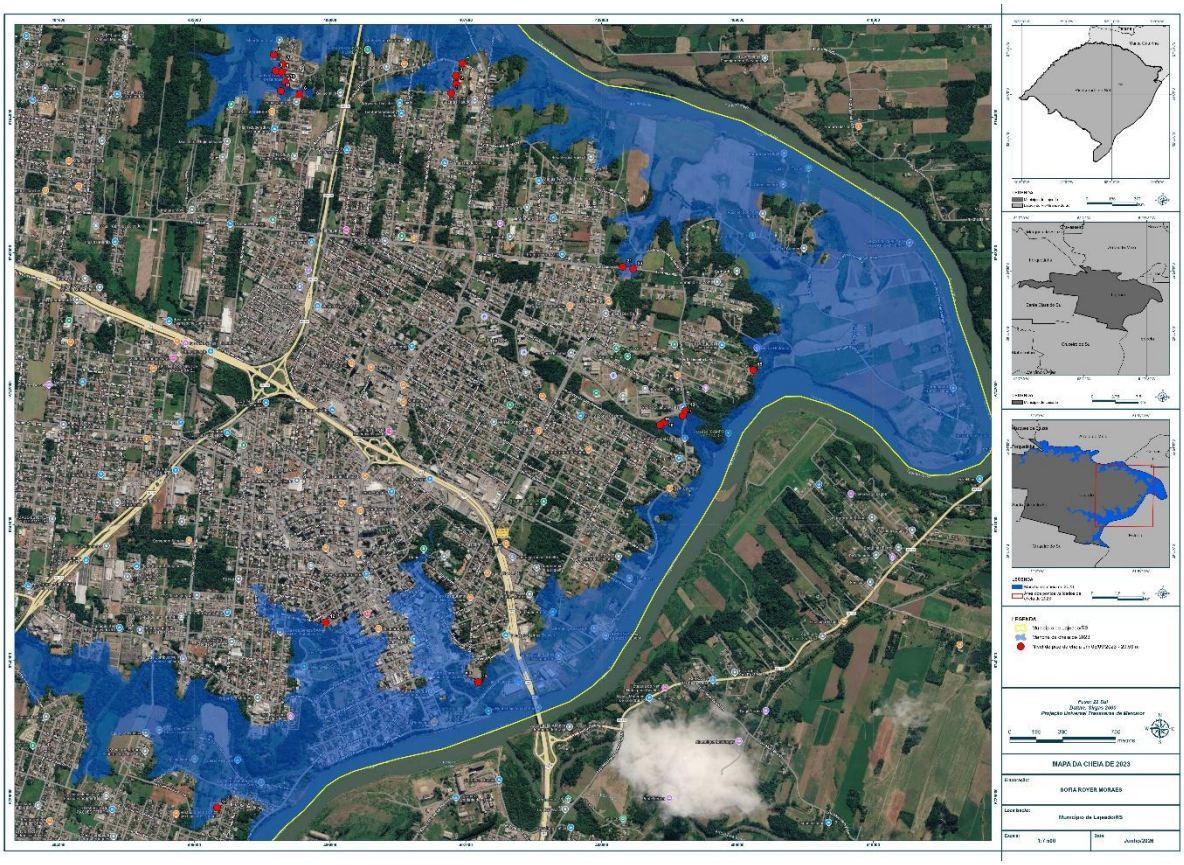


Figura 46 - Modelagem da cheia de 2023

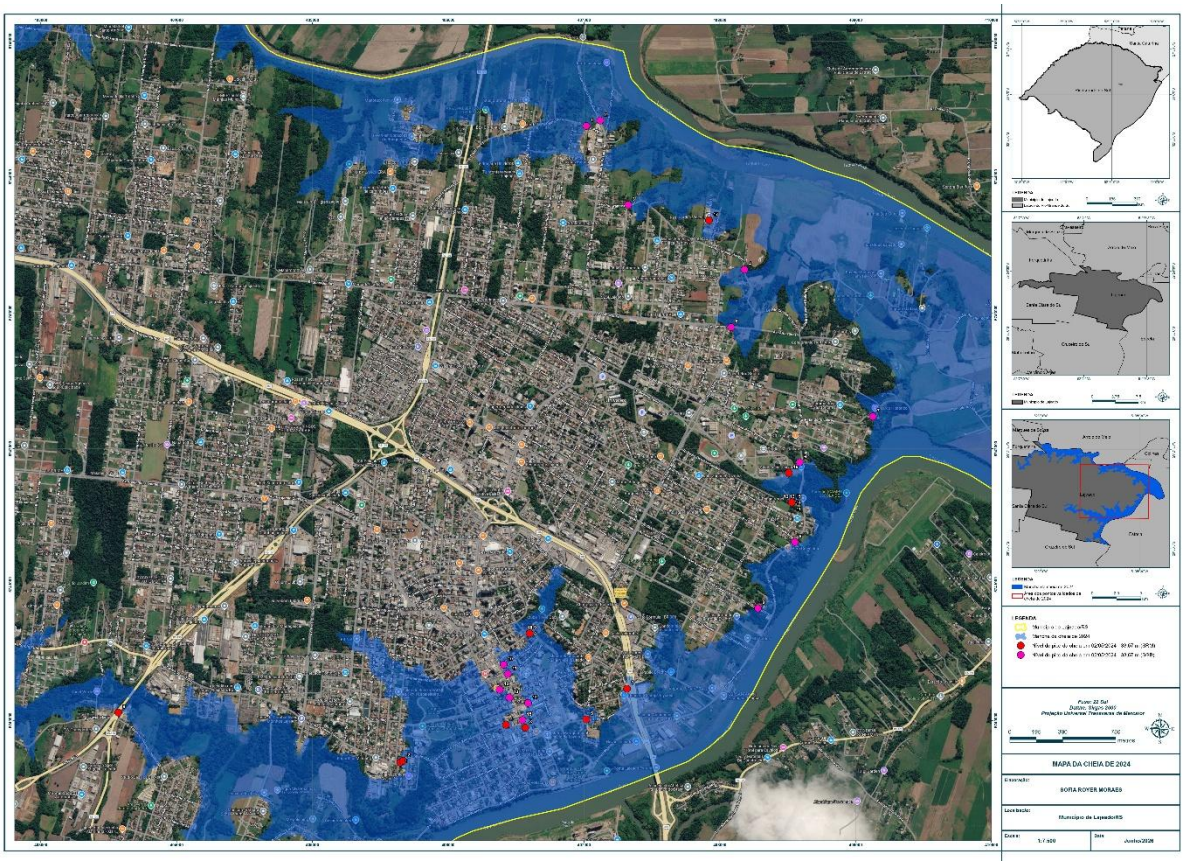


Figura 47 - Modelagem da cheia de 2024

Tabela 17 - Verificação espacial planimétrica* do modelo hidrodinâmico: distância horizontal entre os pontos de controle e a borda das manchas de inundação simuladas em Lajeado (RS), 2007–2024.

Evento	Data do pico	Cota máxima h (m)	Fonte dos pontos de controle	Nº de pontos (Lajeado)	RMSE (m)	Mediana (m)	Erro máximo (m)
Cheia set/2007	24/09/2007	26,25	Levantamento técnico GPS	26	15,46	7,24	63,91
Cheia out/2015	10/10/2015	24,51	Levantamento técnico GPS	104	15,47	9,21	50,59
Cheia jul/2020	09/07/2020	27,39	Levantamento técnico GPS	126	19,57	7,01	88,16
Cheia set/2023	05/09/2023	29,53	Ciência cidadã	21	18,20	9,94	48,39
Cheia mai/2024	02/05/2024	33,67	Levantamento técnico (SGB)	15	9,33	5,07	16,84
Cheia mai/2024	02/05/2024	33,67	Ciência cidadã	11	26,28	20,57	42,41

Fonte: elaboração própria. Cota máxima h: posto fluviométrico 86870000. RMSE: raiz do erro quadrático médio das distâncias horizontais, medidas em ambiente SIG entre cada ponto de controle e a borda mais próxima da mancha de inundação máxima simulada. GPS: receptor Garmin GPSmap 60CSx. SGB: Serviço Geológico do Brasil. Ciência cidadã: pontos de limite horizontal georreferenciados via WhatsApp (MORAES et al., 2025), após filtragem e controle de qualidade (seção 3.6.2), incluindo a remoção de registros com coordenadas duplicadas no evento de 2024.

** A verificação foi conduzida no plano horizontal em função da natureza dos dados de controle disponíveis: os pontos registram a posição da borda da inundação, obtida por receptor GPS de navegação, por compartilhamento de localização via aplicativo e por levantamento institucional, e informam a extensão atingida pela inundação, não a cota da superfície d'água. A distância horizontal é, portanto, a métrica compatível com esse conjunto de dados e com o produto verificado, a mancha de inundação máxima. A verificação vertical, apoiada em marcas de cheia niveladas, e a verificação planimétrica por imagens de satélite não foram realizadas nesta tese e constituem etapas complementares de avaliação do modelo.*

Para os três eventos com levantamento técnico por GPS de navegação, o RMSE variou de 15,46 m (2007) a 19,57 m (2020), com medianas entre 7,01 m e 9,21 m. Esses valores situam-se na ordem da célula das *break lines* que acompanham os canais (20 m) e muito abaixo da célula do domínio geral sobre as planícies de inundação (100 m), indicando que o modelo reproduz o limite horizontal da inundação com precisão compatível com a própria discretização espacial adotada. Os resultados são, ainda, consistentes com a validação independente conduzida sobre o mesmo modelo, que obteve diferença média de 9,2 m e mediana de 7,6 m em 381 pontos distribuídos pelos cinco municípios do trecho (Parma, 2025), o que reforça a estabilidade dos parâmetros calibrados e a legitimidade de sua transferência para a retromodelagem dos eventos históricos.

A diferença sistemática entre o RMSE e a mediana, observada nos seis conjuntos, revela distribuição de erros assimétrica: a maioria dos pontos apresenta desvios da ordem da mediana, enquanto poucos pontos isolados elevam a métrica quadrática. Esse comportamento é esperado em planícies de inundação de baixa declividade, nas quais pequenas diferenças verticais entre a cota simulada e a cota real se projetam horizontalmente em dezenas de metros, amplificando

o erro aparente sem que isso represente falha estrutural do modelo (Horritt; Bates, 2002; Molinari *et al.*, 2019). O maior desvio individual do conjunto (88,16 m, na cheia de 2020) localiza-se na porção de montante do domínio, próxima à condição de contorno, região onde os efeitos de borda são esperados e deliberadamente afastados da área de interesse pelo desenho do domínio computacional (seção 3.7.4).

O evento de maio de 2024 permitiu uma comparação direta entre fontes de dados de natureza distinta sobre a mesma mancha simulada: o levantamento técnico pós-evento do Serviço Geológico do Brasil resultou em RMSE de 9,33 m e mediana de 5,07 m, enquanto os pontos de ciência cidadã, após a remoção dos registros duplicados, apresentaram RMSE de 26,28 m e mediana de 20,57 m. A diferença reflete a incerteza posicional inerente ao georreferenciamento de relatos voluntários, fenômeno documentado na literatura de dados geográficos colaborativos aplicados a inundações (Rosser *et al.*, 2017). Ainda assim, o erro associado aos dados de ciência cidadã permaneceu na ordem de metade da célula de refinamento da malha (50 m), patamar suficiente para a função de verificação de extensão de inundação que esses dados cumprem nesta tese, em convergência com evidências de que dados colaborativos sustentam a validação de modelos hidrodinâmicos urbanos com desempenho aceitável frente a levantamentos convencionais (Yu *et al.*, 2016; Loftis *et al.*, 2019). O resultado quantifica, portanto, o custo de precisão da ciência cidadã e, simultaneamente, demonstra que esse custo não compromete sua utilidade metodológica, sobretudo no contexto de maio de 2024, quando o colapso da infraestrutura instrumental tornou esses relatos a única fonte de dados disponível em parte do trecho.

As simulações reproduziram adequadamente os limites de inundação observados nos cinco eventos, com boa correspondência espacial entre as manchas simuladas e a distribuição dos pontos de controle. A literatura recente confirma que dados de ciência cidadã e marcas físicas preservadas, quando submetidos a protocolo estruturado de coleta e filtragem, fornecem aderência espacial suficiente para validar modelos hidrodinâmicos bidimensionais de inundação fluvial, inclusive em eventos de magnitude extrema (Assumpção *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2026).

A contribuição cidadã, registre-se, não se restringe à validação a posteriori. Os pontos coletados em setembro de 2023 foram operacionalmente utilizados durante a cheia de maio de 2024 como referência preliminar de áreas suscetíveis, orientando pré-posicionamento de recursos e rotas de evacuação na fase aguda do desastre (Moraes *et al.*, 2025). Essa hibridação entre validação científica e utilidade operacional imediata exemplifica o duplo retorno da ciência cidadã em recursos hídricos: produção de conhecimento e fortalecimento da capacidade local de resposta.

4.7.2 Retromodelagem das cheias de 1873 e 1941

A retromodelagem aqui apresentada constitui a operação de estender um arcabouço numérico previamente validado para reconstituir cheias ocorridas antes da observação sistemática contínua na bacia, com apoio em informação não sistemática – marcas físicas preservadas no CEAT e registros documentais regionais, bem como oficiais, identificados na Hemeroteca Digital Brasileira (seções 4.1 e 4.2). A distinção em relação à modelagem

hidrodinâmica apresentada na seção anterior é deliberada: modelar eventos contemporâneos com dados observados de campo é exercício de aderência empírica direta; retromodelar é extrapolar, sob fundamentação física e/ou temporal, para fora do domínio onde a observação esteve presente.

A defensibilidade do procedimento é ancorada sobre três fundamentos articulados em consonância com a cadeia metodológica consolidada para o uso quantitativo de informação histórica em estudos de cheias (Benito *et al.*, 2015). O primeiro é a contenção das cotas reconstituídas: os picos de 1873 (29,11 m) e 1941 (28,87 m) situam-se inteiramente dentro da amplitude coberta pela validação com os cinco eventos contemporâneos, entre 24,51 m (cheia de outubro de 2015) e 33,67 m (cheia de maio de 2024). O segundo é o ancoramento na literatura recente de retromodelagem de cheias históricas com modelos hidrodinâmicos bidimensionais: a integração de marcas físicas, ciência cidadã e HEC-RAS na reconstituição de eventos pretéritos na bacia do Alto Paranapanema, com calibração em cheias contemporâneas e aplicação aos eventos históricos sob os mesmos parâmetros (Santos et al., 2026); a reconstrução numérica da cheia catastrófica do Guadiana de dezembro de 1876 a partir da estimativa da precipitação histórica e simulação acoplada (González-Cao *et al*., 2021); e a reconstituição de cinco eventos do rio Ahr (1804–1920) a partir de marcas físicas preservadas e fotografias datadas, com verificação em eventos modernos medidos (Roggenkamp; Herget, 2014). O terceiro fundamento é a validação: os pontos de campo que sustentam a aderência do modelo nos cinco eventos contemporâneos e as cotas reconstruídas foram coletados pela autora desta tese e por parceiros ao longo de uma década de pesquisa no trecho (Moraes, 2015; Moraes *et al.*, 2023, 2025), o que confere rastreabilidade direta entre o dado observado, o ajuste do modelo e a operação de retromodelagem.

Reconhece-se que modificações antrópicas no leito do rio Taquari ao longo do século XX como a instalação de obras hidráulicas como pontes, o aprofundamento da calha, a construção da Barragem-Eclusa de Bom Retiro do Sul e alterações morfológicas documentadas no trecho navegável (Collischonn *et al.*, 2025b) introduzem incerteza adicional na transposição dos parâmetros para condições pré-1941. Espera-se, contudo, que em eventos da magnitude aqui simulada, nos quais a extensão da inundação é controlada predominantemente pela topografia do vale e pelo escoamento na planície, a influência relativa dessas modificações da calha sobre a mancha simulada seja reduzida, permanecendo a transposição dos coeficientes de rugosidade para as condições de ocupação pré-1941 como a principal fonte de incerteza da retromodelagem. As **Figuras 48** e **49** apresentam as manchas de inundação máxima retromodeladas dos eventos de 1873 e 1941, e a **Tabela 18** sintetiza as cotas reconstituídas.

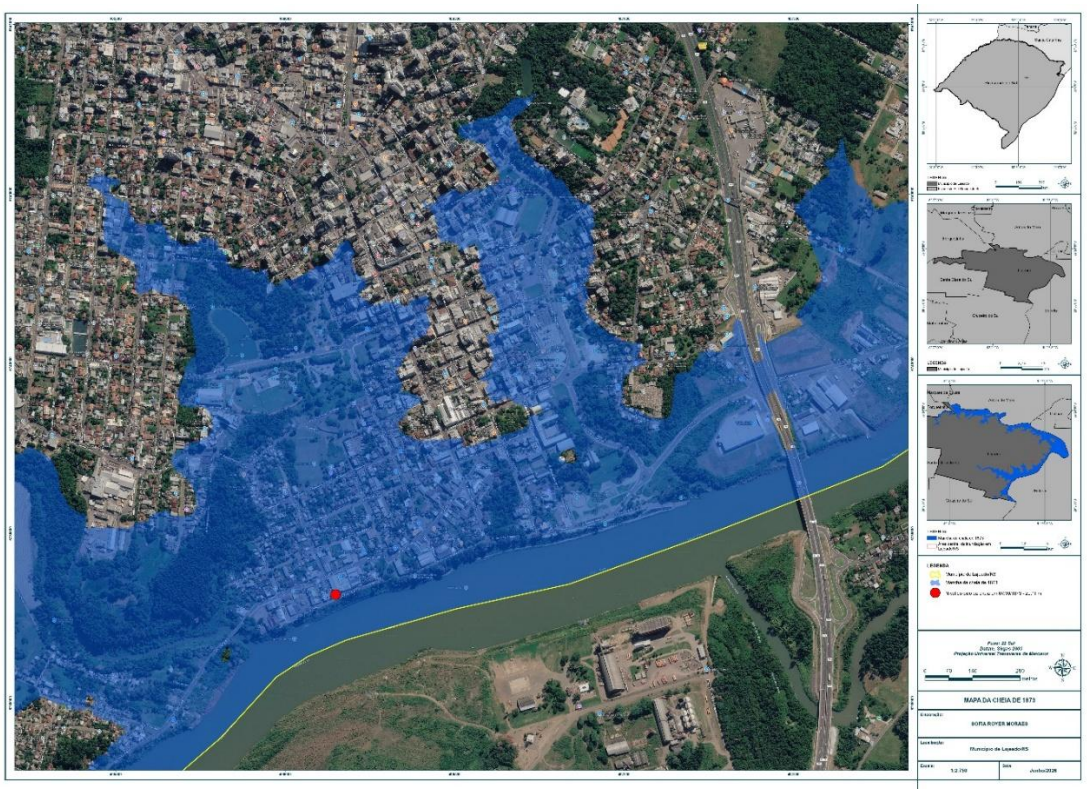


Figura 48 - Mancha de inundação retromodelada - 1873

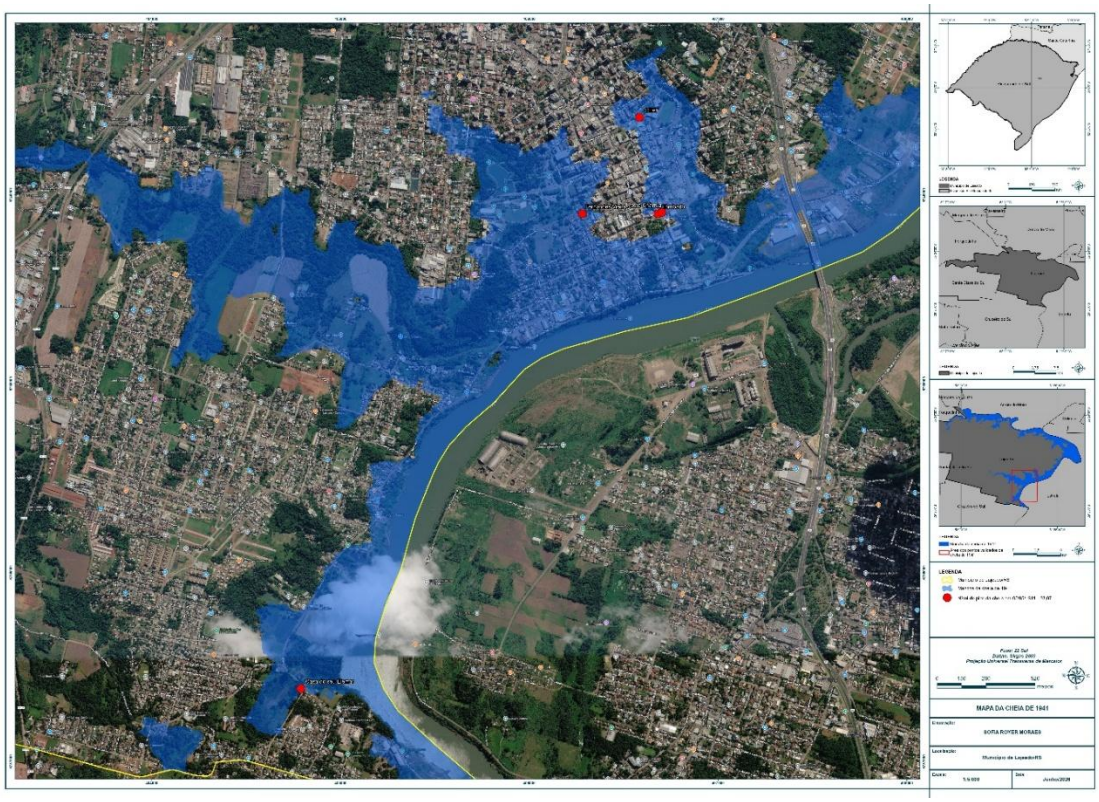


Figura 49 – Mancha de inundação retromodelada - 1941

Tabela 18 - Cheias históricas retromodeladas no rio Taquari em Lajeado (RS).

Evento	Data do pico	Nível h (m)	Diferença vertical* (entre o modelo e a cota reconstruída - m)
Cheia de outubro de 1873 (dado – Schierholt)	07/10/1873	29,11	0,14
Cheia de maio de 1941 (dado - CEAT)	05/05/1941	28,87	0,23

Fonte: elaboração própria. Diferença vertical: valor absoluto da diferença entre a cota da superfície d'água simulada na posição de referência e a cota reconstituída do evento.

** Diferentemente da verificação planimétrica dos eventos contemporâneos (Tabela 17), a comparação para 1873 e 1941 é vertical porque o dado de controle disponível para esses eventos é a cota da superfície d'água, reconstituída a partir das marcas físicas preservadas no CEAT e niveladas por GNSS RTK e estação total, com vínculo à rede de referência oficial (Tabela 6), e não a extensão da inundação.*

As diferenças verticais de 0,14 m (1873) e 0,23 m (1941) entre as superfícies d'água simuladas e as cotas reconstituídas situam-se na ordem de grandeza das incertezas envolvidas na própria reconstituição dos níveis históricos, que combinam a aferição das marcas físicas por GNSS RTK e estação total, o ajuste de referencial entre sistemas de medição e a resolução vertical do modelo digital de terreno. A concordância decimétrica obtida para eventos históricos corrobora a transferibilidade dos parâmetros calibrados em cheias contemporâneas para a simulação de eventos pré-instrumentais de magnitude comparável, fundamento metodológico adotado nesta tese (seção 3.7.6), e confere às manchas das Figuras 47 e 48 a condição de produtos cartográficos verificados, e não meramente ilustrativos.

O aporte conceitual desta seção é menos a magnitude individual de cada mancha reconstituída do que a demonstração de que um esforço metodológico distribuído ao longo de 153 anos – séries instrumentais sistemáticas iniciadas em 1939, marcas físicas preservadas no CEAT, correspondência imperial sobre a cheia de 1873, fotografias da inundação de 1941, levantamentos técnicos GPS realizados desde 2007 e dados de ciência cidadã das cheias de 2023 e 2024 – convergiu produtivamente em mapas de inundação espacialmente explícitos para eventos cujo monitoramento sistemático sequer existia. A retromodelagem, sob esta luz, deixa de ser exercício isolado de modelagem hidráulica para configurar o ponto onde se materializa a integração entre dado sistemático, dado não sistemático e ciência cidadã que constitui o argumento central desta tese. Avanços subsequentes – refinamento batimétrico do trecho, acoplamento com simulação chuva-vazão para reconstituição independente dos hidrogramas históricos e ampliação da validação cidadã a outros municípios da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas – encontram-se hoje viabilizados, precisamente, pela base aqui consolidada. Pode-se dizer, por fim, que diferentes gerações de cientistas cidadãos, desde aqueles que registraram em livros, ofícios, fotografias, memórias e até os do contemporâneo *WhatsApp* contribuíram para a construção da memória e consolidação da presente tese de doutorado.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Esta tese teve como objetivo demonstrar o potencial da integração de marcas históricas, registros não sistemáticos e ciência cidadã para a análise de frequência e a retromodelagem hidrodinâmica de inundações, mediante a consolidação de uma série histórica de 153 anos (1873–2025) do rio Taquari em Lajeado (RS). Os resultados apresentados no Capítulo 4 confirmam esse potencial: a série consolidada sustentou uma análise de frequência bayesiana com incerteza reduzida, viabilizou a retromodelagem de eventos ocorridos décadas antes do primeiro registro instrumental e revelou a ocorrência de inundações extremas no período pré-instrumental.

A consolidação da série de 153 anos exigiu tratamento específico para cada uma das três fontes de dados. Do lado sistemático, a reconstituição da altitude ortométrica do zero da régua dos três sistemas de medição que operaram no trecho entre Lajeado e Estrela (posto 86870000, Porto Fluvial de Estrela e posto 86879300) eliminou inconsistências históricas que distorciam a comparação entre eventos, incluindo a atribuição equivocada da cota de 29,92 m à cheia de 1941. Do lado não sistemático, correspondências do período imperial do acervo da Hemeroteca Digital Brasileira, as compilações de historiadores locais e as marcas físicas preservadas no Colégio Evangélico Alberto Torres desde 1912, niveladas por GNSS RTK e estação total, permitiram reconstruir quantitativamente os níveis de inundações do século XIX. O produto dessa integração é um *ranking* consistente, referenciado à cota oficial, no qual as cinco maiores inundações documentadas são as de maio de 2024 (33,67 m), setembro de 2023 (29,53 m), outubro de 1873 (29,11 m), novembro de 2023 (28,94 m) e maio de 1941 (28,87 m).

A posição da inundação de 1873 nesse *ranking* sintetiza a contribuição dos registros não sistemáticos. Recuperado de fontes documentais do período imperial e ancorado topograficamente por levantamento de campo, o evento de 1873 superou a cheia de 1941, referência do planejamento urbano de Lajeado por mais de oito décadas. A cidade planejou sua expansão com base em um evento que não era o seu máximo histórico tampouco um evento raro. Essa constatação, impossível a partir apenas do registro instrumental, reforça a necessidade de que os instrumentos urbanísticos municipais incorporem a profundidade temporal completa do conhecimento hidrológico disponível (Xavier *et al.*, 2025).

A verificação de estacionariedade pelo teste de Spearman, aplicada à série sistemática (1939–2025) por constituir a única série anual completa e contínua do conjunto, não rejeitou a hipótese de ausência de tendência monotônica ao nível de 5%, validando formalmente a aplicação dos métodos probabilísticos convencionais. O resultado, porém, é limítrofe: a mesma hipótese seria rejeitada a 10%, e o coeficiente positivo reflete a concentração dos dois maiores eventos da série no biênio 2023–2024, em convergência com a evidência independente de intensificação das chuvas extremas no Rio Grande do Sul (Collischonn *et al*., 2024a). A tese assume a estacionariedade como hipótese de trabalho, não como conclusão: a série disponível ainda não permite separar, com rigor estatístico, uma mudança de regime de um agrupamento natural de cheias (Machado *et al*., 2015; Klemeš, 1974), e é justamente essa separação que a série de 153 anos habilita à medida que novos anos se acumulem — o único remédio que Klemeš (2000a; 2000b) reconhecia para a incerteza das caudas. Nessa leitura, a adoção do limite inferior do intervalo de credibilidade como referência de gestão ganha um segundo fundamento:

se a tendência sugerida pelos dados se confirmar, os tempos de retorno aqui estimados sob estacionariedade constituirão limite superior, e não estimativa central, do risco futuro.

A análise de frequência bayesiana conduzida no RMC-BestFit, com a distribuição Log-Pearson Tipo III ajustada à série combinada mediante limiar de percepção de 27,00 m para o período não sistemático, quantificou o ganho estatístico da série estendida em dois efeitos complementares: a incorporação dos registros históricos reduziu de 13% a aproximadamente 34% a amplitude dos intervalos de credibilidade de 90%, com ganho crescente justamente nos tempos de retorno mais relevantes para o dimensionamento de infraestrutura e para a gestão de risco, e moderou em até 2,08 m as cotas de maior raridade estimadas apenas com a janela instrumental, cuja cauda superior é condicionada pelos extremos de 2023–2024. As cotas estimadas e os tempos de retorno adotados como referência correspondem à distribuição preditiva a posteriori, que incorpora explicitamente a incerteza paramétrica da estimação. Sob esse critério, a inundação de maio de 2024 apresenta tempo de retorno de aproximadamente 656 anos, com intervalo de credibilidade de 90% de 187 a 30.983 anos, enquanto a de setembro de 2023 apresenta tempo de retorno da ordem de 44 anos. Para fins de gestão de riscos, planejamento urbano e de infraestrutura, adota-se o limite inferior desse intervalo, 187 anos, como valor de referência para o evento de 2024, decisão que privilegia a segurança diante da incerteza inerente à extrapolação. A coexistência desses dois eventos em um mesmo biênio ilustra a variabilidade hidrológica extrema da bacia e a insuficiência de séries curtas para caracterizá-la; a amplitude do intervalo de credibilidade do evento de 2024, por sua vez, lembra que a comunicação da incerteza é tão importante quanto a da estimativa central.

A retromodelagem hidrodinâmica bidimensional demonstrou que eventos pré-instrumentais podem ser espacializados quando a cadeia de validação é construída de forma progressiva. O modelo HEC-RAS calibrado por Parma (2025) para o domínio Arroio do Meio–Mariante foi validado nesta tese com levantamentos técnicos e dados de ciência cidadã de cinco eventos contemporâneos e, na sequência, aplicado à retromodelagem das inundações de 1941 (28,87 m) e 1873 (29,11 m), cujas cotas se situam dentro da amplitude validada, dispensando extrapolação e amparando-se na transferibilidade de parâmetros entre eventos de diferentes magnitudes demonstrada empiricamente em domínio análogo (Coutinho, 2015). As diferenças verticais de 0,14 m (1873) e 0,23 m (1941) entre as superfícies simuladas e as cotas reconstituídas conferem verificação quantitativa à operação. As manchas de inundação materializam pela primeira vez a extensão espacial do evento de 1873 sobre a mancha urbana atual de Lajeado, convertendo um registro documental do século XIX em instrumento de leitura contemporânea do território.

A ciência cidadã revelou-se pilar epistemológico autônomo, e não recurso auxiliar. Durante os eventos de 2023 e 2024, de impactos de grande magnitude em escala regional, os limites de inundação foram demarcados pela população, por meio de campanhas estruturadas via WhatsApp, e posteriormente serviram de base para a validação do modelo hidrodinâmico; em maio de 2024, quando o colapso da infraestrutura instrumental interrompeu o monitoramento convencional, esses relatos tornaram-se a única fonte de dados disponível em parte do trecho. Trata-se da demonstração empírica de que, nos eventos que mais importam, quando o monitoramento convencional pode falhar, a redundância oferecida pela observação distribuída deixa de ser conveniência para se tornar condição de continuidade do registro

hidrológico. Essa leitura ressignifica também o passado: os correspondentes que documentaram a cheia de 1873, os registradores que gravaram as marcas no pilar do CEAT a partir de 1912 e os historiadores que compilaram décadas de eventos atuaram como proto-cientistas cidadãos, distintos dos voluntários de 2023–2024 apenas na tecnologia de registro, não na função hidrológica que cumpriram. A série de 153 anos aqui consolidada é, em essência, uma obra coletiva de observação que atravessa três séculos.

Cabe precisar o alcance da autonomia aqui atribuída à ciência cidadã. No espectro de participação apresentado na seção 2.3 (Shirk *et al.*, 2012), as campanhas de 2023–2024 configuram ciência cidadã contributiva: a formulação das perguntas, o desenho do protocolo e a validação permaneceram com a equipe de pesquisa, enquanto os voluntários realizaram a aquisição dos dados, atuando ao mesmo tempo como sensores distribuídos e como intérpretes do fenômeno em seu território, nos termos do framework CANDHY (Nardi *et al.*, 2022). O caráter de pilar autônomo decorre, portanto, do valor epistêmico dos dados gerados — insubstituíveis quando a rede instrumental falhou e validados por confronto com marcas físicas e controles topográficos — e não do grau de participação alcançado. Dois fatores explicam a qualidade dessa contribuição: a memória hidrológica das comunidades ribeirinhas, que reconhecem os limites de inundação por vivência acumulada, e a cultura local de registro de cheias, expressa nas marcas em edificações e na documentação histórica que esta tese recuperou. Esses mesmos fatores indicam potencial para modelos colaborativos e co-criados, em que a comunidade participe também da definição de limiares de alerta e da interpretação dos resultados, o que se coloca como desdobramento futuro.

Os resultados devem ser lidos à luz de suas limitações. As modificações do leito do rio Taquari documentadas após os eventos de 2023–2024 (Collischonn *et al.*, 2025b) recomendam cautela na aplicação prospectiva do modelo calibrado; as marcas históricas anteriores a 1970 no CEAT foram transpostas de sua posição original, com incerteza de nivelamento não totalmente quantificável; a declividade da linha d'água limita a validade espacial das cotas ao trecho entre o centro de Lajeado e o porto de Estrela; e a amplitude dos intervalos de credibilidade para cotas estimadas de maior raridade lembra que a extrapolação estatística permanece incerta mesmo com 153 anos de dados.

Como desdobramentos futuros, quatro frentes se destacam. A primeira é a extensão da série para além de 1873, que constitui desdobramento natural desta tese e encontra fundamento no conceito de limiar de percepção (Brázdil *et al.*, 2006; Benito *et al.*, 2004). Os 24 eventos documentados entre 1824 e 1938 sem nível reconstruído (**Tabela 5**), somados aos relatos de viajantes que descreveram cheias extraordinárias na província, como a de 1833, registrada de forma independente por Isabelle (1835 [2006]) e por Schierholt (2024, não publicado), demonstram que inundações significativas ocorreram e deixaram traço documental, ainda que sem cota recuperável. A ausência de níveis não é aleatória: apenas eventos de magnitude suficiente para atingir estruturas perenes ou motivar registro administrativo superaram o limiar de percepção da época, o que caracteriza os demais como dados censurados. Ferramentas bayesianas como o RMC-BestFit admitem a incorporação de dados históricos definidos por limiar, de modo que os eventos de 1824–1872 poderiam ingressar na análise de frequência como informação censurada, sabendo-se que ocorreram cheias relevantes sem que se conheça sua cota exata, reduzindo adicionalmente a incerteza dos quantis de baixa frequência. Na

mesma direção, a segunda frente é a investigação de registros de paleocheias na bacia do rio Taquari-Antas, a exemplo de depósitos sedimentares preservados em posições protegidas do vale, que permitiria estender a caracterização dos extremos para além do período documental, estratégia consolidada na integração de dados sistemáticos, históricos e paleohidrológicos (Benito *et al.*, 2004). Séries assim alongadas são particularmente valiosas no contexto de variabilidade hidroclimática acentuada evidenciado pelo biênio 2023–2024, pois permitem distinguir o agrupamento temporal natural de eventos extremos de eventuais tendências seculares (Machado *et al.*, 2015), qualificando as estimativas de tempos de retorno que fundamentam o planejamento em cenários de mudanças climáticas.

A terceira frente é a consolidação da campanha de ciência cidadã como programa permanente, integrado aos sistemas de alerta, com protocolos de validação em tempo quase real. A quarta é a replicação do arcabouço metodológico (reconstituição de referenciais, integração de fontes censuradas e retromodelagem validada por ciência cidadã) em outras cidades brasileiras com monitoramento fragmentado, condição que é regra, e não exceção, no registro hidrológico nacional.

Ao fim, a principal contribuição desta tese talvez seja de natureza conceitual: o que se apresentava como fragilidade (séries interrompidas, réguas deslocadas, registros dispersos em documentos centenários e marcas em um pilar de escola) converteu-se, pela integração metodológica, na mais longa série quantitativa de inundações do rio Taquari e em uma das mais extensas do Brasil. A história hidrológica de Lajeado não estava perdida; estava distribuída entre arquivos, paredes e memórias, à espera de um método que a reunisse. Demonstrar esse método, e o potencial que ele destrava para a análise de frequência, a reconstrução de cotas e a retromodelagem, foi o que esta tese se propôs e alcançou. A série consolidada deixa, ainda, uma lição que transcende o método: em um rio que registrou quatro cheias acima de 27 m antes do início do monitoramento sistemático, e cuja maior inundação do século XIX superava a referência que orientou o planejamento por oito décadas, os extremos do biênio 2023–2024 deixam de ser anomalias inexplicáveis para se tornarem expressão de uma variabilidade que somente o registro longo torna visível. A surpresa diante de eventos extremos é, em larga medida, produto do comprimento da janela de observação (Kelder *et al.*, 2025), e reduzi-la exige exatamente o que gerações distintas de cientistas cidadãos, dos correspondentes do Império aos voluntários do *WhatsApp*, construíram para Lajeado: uma memória hidrológica mais longa do que a memória de qualquer geração isolada.

Por fim, a disponibilização pública dessa memória hidrológica dialoga com dois compromissos da Agenda 2030: a redução do número de pessoas afetadas por desastres relacionados à água e o fortalecimento da resiliência urbana, previstos no Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11, e o reforço da capacidade de adaptação a riscos climáticos, objeto do Objetivo 13 (ONU, 2015). Nessa direção, os dados gerados nesta pesquisa encontram-se disponíveis para acesso em plataforma aberta, podendo ser acessada pelo link a seguir: https://sites.google.com/view/memoriahidrologicadoriotaquari/in%C3%ADcio

REFERÊNCIAS

AGROSIG; FEENG. **Relatório técnico final topobatimétrico no trecho do Rio Taquari compreendido entre a cidade de Encantado-RS e a barragem de Bom Retiro do Sul-RS**: Levantamento, consolidação e processamento de dados para determinação das seções.: 1. Porto Alegre: [s. n.], 2016.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Grupo Técnico de Assessoramento para Estudos Hidrológicos e de Segurança de Infraestruturas de Reservação e de Proteção das Cheias no Estado do Rio Grande do Sul. **Curvas IDF - Rio Grande do Sul**. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: https://idf-rs-ufpb3f417c4037d6.opendata.arcgis.com/. Acesso em: 7 nov. 2025.

ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). **Evolução da rede hidrometeorológica nacional.** Brasília: Superintendência de Administração da Rede Hidrometeorológica, v.1, n.1., 2007.

ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). **Hidroweb**. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/mapa>. Acesso em 06 jul. 2025.

ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). **Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil**. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília: ANA, 2024, 96 p. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/ 31604c98-5bbe-4dc9-845d-998815607b33/attachments/Mudancas_Climaticas_25012024.pdf. Acesso em: nov. 2024.

ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). **Rede Hidrometeorológica Nacional.** Brasília: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), s.d. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/f85dbf06-a869-414c-afc5-bb01869e9156. Acesso em: jan. 2025.

ARCEMENT JR., G. J.; SCHNEIDER, V. R. **Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains**. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey, 1989. 38 p. (Water-Supply Paper, 2339). Disponível em: https://doi.org/10.3133/wsp2339.

ASSUMPÇÃO, T. H.; POPESCU, I.; JONOSKI, A.; SOLOMATINE, D. P. Citizen observations contributing to flood modelling: opportunities and challenges. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 22, p. 1473-1489, 2018. https://doi.org/10.5194/hess-22-1473-2018

BACHRI, S.; ALDIANTO, Y. E.; SUMARMI, S. UTOMO, K. S. B.; FATHONI, M. N. **Flood modelling of Badeng River using HEC-RAS in Singojuruh sub district, BanYuwangi regency, East Java, Indonesia**. *Jurnal Geografi*, vol. 13, n. 1, 2021, p. 76-87.

BAKER, V. R. **Paleoflood hydrology and extraordinary flood events**. *Journal of Hydrology*, vol. 96, n. 1-4, 1987, p. 79-99.

BAKER, V. R. **Paleoflood hydrology and the estimation of extreme floods**. *In* WOHL, E. E. (Ed.) **Inland flood hazards**: Human, riparian, and aquatic communities. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, p. 359 - 377.

BALASCH, J. C.; RUIZ-BELLET, J. L.; TUSET, J.; OLIVA, J. M. **Reconstruction of the 1874 Santa Tecla's rainstorm in Western Catalonia (NE Spain) from flood marks and historical accounts**. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 10, 2010, p. 2317-2325.

BALBO, A.; GALIMBERTI, G. Citizen hydrology in River Contracts for water management and people engagement at basin scale. In: COWM2016 - International Conference on Citizen Observatories for Water Management, 2016, Venice. Venice: COWM, 2016, p. 1-2.

BARNES JR., H. H. **Roughness characteristics of natural channels**. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey, 1967. 213 p. (Water-Supply Paper, 1849). Disponível em: https://doi.org/10.3133/wsp1849.

BARRIENDOS, M.; RUIZ-BELLET, J. L.; TUSET, J.; MAZÓN, J.; BALASCH, J. C.; PINO, D.; AYALA, J. L. **The "Prediflood" database of historical floods in Catalonia (NE Iberian Peninsula) AD1035–2013, and its potential applications in flood analysis.** *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 18, 2014, p. 4807 - 4823.

BASSANELLI, H. R.; FAVA, M. C.; TOMASELLA, J.; SANTOS, J. C.; VASCONCELOS, A. F.; CILTO, G. G.; GALVÃO, P. R.; BENSO, M. R.; PEREIRA, C. E. Combining low-cost drone surveys and citizen science to identify flood-prone areas. *Frontiers in Water*, v. 8, 1748523, 2026. DOI: 10.3389/frwa.2026.1748523.

BATES, P. D.; HORRITT, M. S.; HUNTER, N. M.; MASON, D.; COBBY, D. **Numerical modelling of floodplain flow**. *In*. BATES, P. D.; LANE, S. N.; FERGUSON, R. I. (Eds.) **Computational Fluid Dynamics: Applications in Environmental Hydraulics**, John Wiley & Sons, Ltd. 2005, p. 271 - 297.

BEARD, L. R. **Flood Frequency Techniques**. Austin: Center of Resources University of Texas, Austin, 1974.

BENITO, G.; BRÁZDIL, R.; HERGET, J.; MACHADO, M. J. **Quantitative historical hydrology in Europe**. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19, 2015, p. 3517-3539, 2015.

BENITO, G.; CASTILLO, O.; BALLESTEROS-CÁNOVAS, J. A.; MACHADO, M.; BARRIENDOS, M. **Enhanced flood hazard assessment beyond decadal climate cycles based on centennial historical data (Duero basin, Spain)**. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 25, 2021, p. 6107-6132.

BENITO, G.; LANG, M.; BARRIENDOS, M.; LLASAT, M. C.; FRANCÉS, F.; OUARDA, T.; THORNDYCRAFT, V. R.; ENZEL, Y.; BARDOSSY, A.; COEUR, D.; BOBÉE, B. **Use of systematic, palaeoflood and historical data for improvement of flood risk estimation**. **Review of scientific methods**. *Natural Hazards*, vol. 31, 2004, p. 623-643.

BEVEN, K.: **How to make advances in hydrological modelling**. *Hydrology Research*., vol. 50, 2019, p. 1481-1494.

BLÖSCHL, G.; GAÁL, L.; HALL, J.; KISS, A.; KOMMA, J.; NESTER, T.; PARAJKA, J.; PERDIGÃO, R.A.P.; PLAVCOVÁ, L.; ROGGER, M.; SALINAS, J.L.; VIGLIONE, A. **Increasing river floods: fiction or reality**? *WIREs Water*, vol. 2, 2015, p. 329-344.

BNDIGITAL. **Hemeroteca Digital**. Biblioteca Nacional Digital, Fundação Biblioteca Nacional. Disponível em: https://bndigital.bn.gov.br/hemeroteca-digital/. Acesso em: nov. 2024.

BOMBASSARO M.; ROBAINA L. E. S. **Contribuição Geográfica para o Estudo das Inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas, RS**. Revista Geografias, Belo Horizonte, v. 06, n. 2, 2010, p. 69-86.

BONNEY, R.; COOPER, C. B.; DICKINSON, J.; KELLING, S.; PHILLIPS, T.; ROSENBERG, K. V.; SHIRK, J. Citizen science: a developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy. *BioScience*, v. 59, n. 11, p. 977-984, 2009. https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.9

BÖSMEIER, A. S.; HIMMELSBACH, I.; SEEGER, S. **Reliability of flood marks and practical relevance for flood hazard assessment in southwestern Germany**. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 22, n. 9, 2022, p. 2963-2979.

BOTH, G. C.; HAETINGER, C.; FERREIRA, E. R.; DIEDRICH, V. L.; FAY DE AZAMBUJA, J. L. **Uso da modelagem matemática para a previsão de enchentes no Vale do Taquari–RS**. Anais do Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental [CD-ROM], 2001.

BRASIL. **Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012**. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC). Brasília: Diário Oficial da União, 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm. Acesso em: dez. 2024

BRASIL. Ministério da Integração Nacional (MIN). **Instrução Normativa nº. 01, de 24 de agosto de 2012.** Brasília: Diário Oficial da União, 2012, p. 169-170.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional (MIN). **Instrução Normativa nº. 02, de 20 de dezembro de 2016.** Brasília: Diário Oficial da União, 2016, p. 245.

BRASIL. Ministério de Portos e Aeroportos. **Bacia do Sul**. Brasília: MPor, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/portos-e-aeroportos/pt-br/assuntos/conteudo/portos-e-transporte-aquaviario/bacia-do-sul. Acesso em: 9 set. 2026.

BRASIL. **Política Nacional de Defesa Civil.** Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2007, 82 p. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/pndc.pdf. Acesso em: jan. 2025.

BRÁZDIL, R., & KUNDZEWICZ, ZW (2006). Hidrologia histórica - Editorial. *Jornal de Ciências Hidrológicas*, *51* (5), 733–738. https://doi.org/10.1623/hysj.51.5.733

BRÁZDIL, R.; KUNDZEWICZ, Z. W.; BENITO, G. Historical hydrology for studying flood risk in Europe. *Hydrological Sciences Journal*, v. 51, n. 5, p. 739-764, 2006. https://doi.org/10.1623/hysj.51.5.739

BUYTAERT, W.; ZULKAFLI, Z.; GRAINGER, S.; ACOSTA, L.; ALEMIE, T. C.; BASTIAENSEN, J.; DE BIÈVRE, B.; BHUSAL, J.; CLARK, J.; DEWULF, A.; FOGGIN, M.; HANNAH, D. M.; HERGARTEN, C.; ISAEVA, A.; KARPOUZOGLOU, T.; PANDEYA, B.; PAUDEL, D.; SHARMA,

K.; STEENHUIS, T.; TILAHUN, S.; VAN HECKEN, G.; ZHUMANOVA, M. Citizen science in hydrology and water resources: opportunities for knowledge generation, ecosystem service management, and sustainable development. *Frontiers in Earth Science*, v. 2, 2014. https://doi.org/10.3389/feart.2014.00026

CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A. T. (Org.). **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 2007, 176 p. Disponível em: https://www.capacidades.gov.br/wp-content/uploads/2024/02/Mapeamento-de-riscos-em-encostas-e-margens-de-rios.pdf. Acesso em: dez. 2024.

CARVALHO, D. W. de. **Os serviços ecossistêmicos como medidas estruturais para prevenção dos desastres**. *Revista de Informação Legislativa*, Ano 52, Número 206, abr./jun. 2015, p. 53-65. Disponível em: https://www12.senado.leg.br/ril/edicoes/52/206/ril_v52_n206_ p53.pdf. Acesso em: jan. 2025.

CASTRO, A. L. C. **Glossário de Defesa Civil**: Estudos de Riscos e Medicina de Desastres. 5 Ed. Brasília: Secretaria Nacional de Defesa Civil (SEDEC), 2009. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/glossario.pdf. Acesso em dez. 2024.

CATANHO, P. A. G.; SILVA, E. M.; GOMES, D.T.; ALVES, J. M. B. **Alterações Climáticas, Incremento dos Desastres e Necessidades Preventivas**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, n. 3, 2020, p. 517 - 528. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbmet/a/gZwYdjVkzrrgTcvcZbZrR8J/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: dez. 2024.

CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS (CRED). **2024 Disasters in Numbers**. Brussels: CRED, 2025. Disponível em: https://files.emdat.be/reports/2024_EMDAT_report.pdf. Acesso em: 8 jun. 2026.

CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS (CRED). **2025 Disasters in Numbers: Earth, Wind & Fire**. Brussels: CRED, 2026. Disponível em: https://files.emdat.be/reports/2025_EMDAT_report.pdf. Acesso em: 8 jun. 2026.

CEPED - Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010**: volume Brasil. Florianópolis: CEPED/UFSC; 2012

CEPED-RS / UFRGS. **Desenvolvimento e apoio à implantação de uma estratégia integrada de prevenção de riscos associados a regimes hidrológicos na Bacia do Taquari-Antas**: Relatório Final das Atividades do Projeto. Porto Alegre: UFRGS, 2017. Disponível em: http://hdl.handle.net/10183/275914. Acesso em: dez. 2024.

CHOW, V. T. **Open Channel Hydraulics**. Tokyo: McGraw Hill, 1959. 680 p.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L.W. **Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill Inc., 1988.

COHN, T. A.; STEDINGER, J. R. Use of historical information in a maximum-likelihood framework. Journal of Hydrology, v. 96, n. 1-4, p. 215-223, 1987. DOI: 10.1016/0022-1694(87)90154-5.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. **The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling**. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, n. 5, 2007, p. 878-895.

COLLISCHONN, W.; BRÊDA, J. P. L. F.; WONGCHUIG, S.; RUHOFF, A.; PAIVA, R. C. D.; FAN, F. M.; MACHADO FILHO, R. C. C.; RAMALHO, N. **Unprecedented April-May 2024 rainfall in South Brazil sets new record**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. *29*, 2024a, e50.

COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; FLEISCHMANN, A. S.; MORAES, S. R.; GIACOMELLI, L. V. Z.; SIQUEIRA, V. A. **Análise da antecedência mínima necessária para previsões de inundações em Lajeado no Rio Taquari, RS**. Encontro Nacional de Desastres (2 END). Porto Alegre: ABRHidro, 2021.

COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; SAMPAIO, M.; BUFFON, F.; MORAES, S. R. **Modificações do leito do rio Taquari e seu impacto sobre as inundações**. Nota Técnica. Porto Alegre: IPH-UFRGS, SGB, UNIVATES, 2025, 26 p. Disponível em: https://www.ufrgs.br/iph/nota-tecnica-modificacoes-do-leito-do-rio-taquari-e-seu-impacto-sobre-as-inundacoes/. Acesso em: 6 jul. 2025.

COLLISCHONN, W.; RUHOFF, A.; CABELEIRA FILHO, R.; PAIVA, R.; FAN, F.; POSSA, T.; PICKBRENNER, K. **Chuva da cheia de 2024 foi mais volumosa e intensa que a da cheia de 1941 na bacia hidrográfica do Guaíba**. Nota técnica. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Serviço Geológico do Brasil, 2024b, 8p.

COOK, A. C. **Comparison of one-dimensional HEC-RAS with two-dimensional FESWMS model in flood inundation mapping**. Dissertação (Master of Science in Civil Engineering) – Faculty of Purdue

University, West Lafayette, Indiana, 2008, 99 p. Disponível em: https://web.ics.purdue.edu/~vmerwade/reports/2008_02.pdf. Acesso em: fev. 2025.

COPERNICUS. **2023 is the hottest year on record, with global temperatures close to the 1.5°C limit**. *Copernicus Climate Change Service*, 2024. Disponível em: https://climate.copernicus.eu/copernicus-2023-hottest-year-record. Acesso em dez. 2024.

COPERNICUS. **2024 is the first year to exceed 1.5°C above pre-industrial level**. *Copernicus Climate Change Service*, 2025. Disponível em: https://climate.copernicus.eu/copernicus-2024-first-year-exceed-15degc-above-pre-industrial-level. Acesso em: 30 set. 2025.

COURANT, R.; FRIEDRICHS, K.; LEWY, H. On the partial difference equations of mathematical physics. IBM Journal of Research and Development, v. 11, n. 2, p. 215-234, 1967.

COUTINHO, M. M. (2015). *Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em Colatina, ES*. Dissertação de Mestrado. UFMG. https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/CPRM_183f6d888100a3869cd03f5582364a7a .

CRAIG, P. M.; HAWKINS, E. Digitizing observations from the 1861–1875 Met Office Daily Weather Reports using citizen scientist volunteers. *Geoscience Data Journal*, v. 11, n. 2, p. 608-622, 2024. DOI: 10.1002/gdj3.236.

CRAIG, P. M.; HAWKINS, E. Digitizing observations from the Met Office Daily Weather Reports for 1900–1910 using citizen scientist volunteers. *Geoscience Data Journal*, v. 7, n. 2, p. 116-134, 2020. DOI: 10.1002/gdj3.93.

CRED - b. **Hydrological disasters in South America**. Innue nº. 75 (July 2024), 2024, 2 p. Disponível em: https://www.preventionweb.net/quick/87590. Acesso em: dez. 2024.

CRED / UNDRR. **The human cost of disasters**: an overview of the last 20 years (2000-2019). UNDRR, 2020, 17 p. Disponível em: https://www.cred.be/sites/default/files/CRED-Disaster-Report-Human-Cost2000-2019.pdf. Acesso em: dez. 2024.

CRED/*EM-DAT: The Emergency Events Database* - ***Data That Save Lives.*** Brussels, Belgium: UCLouvain, 2024. Disponível em: www.emdat.be. Acesso em: julho de 2025.

DEEKE, J. O município de Blumenau e a história do seu desenvolvimento. Blumenau: Nova Letra, 1995 [1917].

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Dados de batimetria, trecho Estrela – Bom Retiro do Sul. Março de 2024.

DHI. **Mike Flood modelling**. Hørsholm, Denmark. Disponível em: https://support.dhigroup.com/download/MIKE-latest/. Acesso em: jan. 2025.

DI BALDASSARRE, G.; VIGLIONE, A.; CARR, G.; KUIL, L.; SALINAS, J. L.; BLÖSCHL, G. Socio-hydrology: conceptualising human-flood interactions. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 17, n. 8, p. 3295-3303, 2013. https://doi.org/10.5194/hess-17-3295-2013

DOMROESE, M. C.; JOHNSON, E. A. Why watch bees? Motivations of citizen science volunteers in the Great Pollinator Project. *Biological Conservation*, v. 208, p. 40-47, 2017. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.08.020

DSG. **Norma da especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais vetoriais da defesa da força terrestre**. Brasília: Departamento de Ciência e Tecnologia, Diretoria de Serviço Geográfico, 2016, 85 p. Disponível em: https://docs.ufpr.br/~deni_ern/CD2020/A1/ET_ADGV_2a_Edicao_2016_Textual_Anexo_A_Assinado.pdf. Acesso em: mai. 2025.

ECKHARDT, R. R. **Geração de Modelo Cartográfico Aplicado ao Mapeamento das Áreas Sujeitas às Inundações Urbanas na Cidade de Lajeado / RS**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2008.

ECKHARDT, R. R.; SALDANHA, D. L.; ROCHA, R. S. **Modelo cartográfico aplicado ao mapeamento das áreas urbanas sujeitas às inundações na cidade de Lajeado / RS**. *Revista Brasileira de Cartografia*, vol.60, n. 03, 2008, p. 253 - 262.

EM-DAT (*Emergency Events Database*). **Data That Save Lives.** Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 2025, 3 p. Disponível em: www.emdat.be. Acesso em: jul. 2025.

EM-DAT (*Emergency Events Database*). **2023 Disasters in Numbers**: A Significant Year of Disaster Impact (Executive Summary). Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), 2024, 8 p.

Disponível em; https://www.preventionweb.net/media/95285/download? startDownload=20241123. Acesso em: dez. 2024.

ENGLAND JR., J. F.; COHN, T. A.; FABER, B. A. *et al.* **Guidelines for Determining Flood Flow Frequency — Bulletin 17C.** Reston: U.S. Geological Survey, Techniques and Methods, Book 4, Chapter B5, 148 p., 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3133/tm4B5.

ETTER, S.; STROBL, B.; SEIBERT, J.; VAN MEERVELD, H. J. I. Value of crowd-based water level class observations for hydrological model calibration. *Water Resources Research*, v. 56, n. 2, 2020. https://doi.org/10.1029/2019WR025619

FANTA, V.; ŠÁLEK, M.; SKLENICKA, P. **How long do floods throughout the millennium remain in the collective memory?** *Nature Communications*, vol. 10, n. 1, 2019, p. 1-9.

FAVA M.C., ABE N., RESTREPO-ESTRADA C., KIMURA B.Y.L., MENDIONDO E.M.. Flood modelling using synthesised citizen science urban streamflow observations. *J Flood Risk Management*. 2019; 12 (Suppl. 2): e12498. **https://doi.org/10.1111/jfr3.12498**

FENG, Y.; BRENNER, C.; SESTER, M. Flood severity mapping from volunteered geographic information by interpreting water level from images containing people: a case study of Hurricane Harvey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 169, p. 301-319, 2020. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.09.011

FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler. **Diagnóstico ambiental da bacia do Taquari-Antas, RS**: diretrizes regionais para o licenciamento ambiental das hidrelétricas – trecho médio e superior. Porto Alegre: FEPAM, 2001. 69 p. Disponível em: https://fepam.rs.gov.br/upload/arquivos/202305/30153834-taquari-antas-diretrizes-rel-final-2001.pdf. Acesso em: 9 set. 2026.

FERREIRA, E. R.; BOTH, G. C. **Estudo das enchentes no Vale do Taquari: causas e propostas de controle**. *In*: MEEP, 4. Lajeado. Anais... Lajeado: UNIVATES, 2001. p. 171.

FERREIRA, E. R.; ECKHARDT, R. E.; HAETINGUER, C.; BOTH, G. C.; FAVA E SILVA, J.; DIEDRICH, V. L.; AZAMBUJA, J. L. F. **Sistema de Previsão e Alerta de Enchentes do Vale do Taquari - RS - Brasil**. *In*: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais e Tecnológicos (SIBRADEN), 2, 2007, Santos. Anais... São Paulo: ABGE, 2007. Artigos, p. 85. CD-ROM.

FERRI, G. **História do Rio Taquari-Antas**. 1ª Ed. Encantado: Grafen, 1991.

FERRI, G.; TOGNI, A. C. **A história da bacia Taquari-Antas**. Lajeado: Ed. da Univates, 2012. 375 p.

FERRI, M.; WEHN, U.; SEE, L.; MONEGO, M.; FRITZ, S. 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*, v. 24, n. 12, p. 5781-5798, 2020. https://doi.org/10.5194/hess-24-5781-2020

FISCHER, S. **Incorporating historical flood events in type-based statistics**. *Journal of Hydrology*, vol. 636, 2024, p. 131289.

FLEMING, J. R. *Meteorology in America, 1800-1870*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1990. 264 p.

FOHRINGER, J.; DRANSCH, D.; KREIBICH, H.; SCHRÖTER, K. Social media as an information source for rapid flood inundation mapping. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 15, p. 2725-2738, 2015. https://doi.org/10.5194/nhess-15-2725-2015

FRANCÉS, F. **Flood frequency analysis using systematic and non-systematic information**. *In*: BENITO, G.; THORNDYCRAFT, V. R. *Systematic, Palaeoflood and Historical Data for the Improvement of Flood Risk Estimation. Methodological Guidelines*. Madrid: Centro de Ciencias Medioambientales, 2004, p. 55-70.

FRANCÉS, F.; SALAS, J. D.; BOES, D. C. Flood frequency analysis with systematic and historical or paleoflood data based on the two-parameter general extreme value models. **Water Resources Research**, v. 30, n. 6, p. 1653–1664, 1994. Disponível em: https://doi.org/10.1029/94WR00154.

FRANCÉS, F.; SALAS, J. D.; BOES, D. C. **Flood frequency analysis with systematic, historical and paleoflood data based on the general extreme value models**. *Water Resources Research*, vol. *30*, 1994, p. 1653-1664.

FRANK, B.; PINHEIRO, A. (org.). Enchentes na Bacia do Rio Itajaí: 20 anos de experiências. Blumenau: Edifurb, 2003.

FREITAG, A.; MEYER, R.; WHITEMAN, L. Strategies employed by citizen science programs to increase the credibility of their data. *Citizen Science: Theory and Practice*, v. 1, n. 1, p. 2, 2016. https://doi.org/10.5334/cstp.6

GARCEZ, L. N. **Hidrologia**. São Paulo: Edgar Blücher, 1967. 249 p.

GAZ**. Há 102 anos grande enchente atingia Sinimbú causando mortes e muitos prejuízos**. 22 nov. 2021. Disponível em: https://www.gaz.com.br/ha-102-anos-grande-enchente-atingia-sinimbu-causando-mortes-e-muitos-prejuizos/. Acesso em: jul. 2025.

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**. Monografia (Graduação em Engenharia Hídrica), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2021.

GLASER, R.; RIEMANN, D.; SCHÖNBEIN, J. *et al*. **The variability of European floods since AD 1500**. *Climatic Change,* vol. 101, 2010, p. 235 - 256.

GONZÁLEZ-CAO, J.; FERNÁNDEZ-NÓVOA, D.; GARCÍA-FEAL, O.; FIGUEIRA, J. R.; VAQUERO, J. M.; TRIGO, R. M.; GÓMEZ-GESTEIRA, M. **Numerical reconstruction of historical extreme floods: the Guadiana event of 1876.** *Journal of Hydrology*, v. 599, 2021, 126292.

GOODCHILD, M. F. Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, v. 69, p. 211-221, 2007. https://doi.org/10.1007/s10708-007-9111-y

GRANATO-SOUZA, D.; STAHLE, D. W. **Drought and Flood Extremes on the Amazon River and in Northeast Brazil, 1790–1900**. *Journal of Climate*, vol. 36, n. 20, 2023, p. 7213-7229.

GRUPO A HORA. Memórias de uma enchente quase esquecida. [Reportagem de Bibiana Faleiro e Raica Franz Weiss]. Lajeado, 15 jun. 2024. Disponível em: https://grupoahora.net.br/conteudos/2024/06/15/memorias-de-uma-enchente-quase-esquecida/. Acesso em: julho de 2024.

GUIRRO, M.; MICHEL, G. P. **Hydrological and hydrodynamic reconstruction of a flood event in a poorly monitored basin: a case study in the Rolante River, Brazil**. *Natural Hazards*, v. 117, n. 1, 2023, p. 723-743

GUO, Y.; HUANG, C. C.; PANG, J.; ZHA, X.; ZHOU, Y.; WANG, L. ZHANG, Y.; HU, G. **Investigating extreme flood response to Holocene palaeoclimate in the Chinese monsoonal zone: A palaeoflood case study from the Hanjiang River**. *Geomorphology*, vol. 238, 2015, p. 187 - 197.

HAKLAY, M. Citizen science and volunteered geographic information: overview and typology of participation. In: SUI, D.; ELWOOD, S.; GOODCHILD, M. (Eds.). *Crowdsourcing geographic knowledge: volunteered geographic information (VGI) in theory and practice*. Dordrecht: Springer, 2013. p. 105-122. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4587-2_7

HAWKINS, E. et al. Rescuing historical weather observations improves quantification of severe windstorm risks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 23, n. 4, p. 1465-1482, 2023b. DOI: 10.5194/nhess-23-1465-2023.

HAWKINS, E.; BURT, S.; McCARTHY, M.; MURPHY, C.; ROSS, C.; BALDOCK, M.; BRAZIER, J.; HERSEE, G.; HUNTLEY, J.; MEATS, R.; O'GRADY, J.; SCRIMGEOUR, I.; SILK, T. Millions of historical monthly rainfall observations taken in the UK and Ireland rescued by citizen scientists. *Geoscience Data Journal*, v. 10, n. 2, p. 246-261, 2023a. DOI: 10.1002/gdj3.157.

HIRSCH, R. M.; STEDINGER, J. R. Plotting positions for historical floods and their precision. **Water Resources Research**, v. 23, n. 4, p. 715–727, 1987. Disponível em: https://doi.org/10.1029/WR023i004p00715.

HORRITT, M. S.; BATES, P. D. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. Journal of Hydrology, v. 268, n. 1-4, p. 87-99, 2002. DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00121-X.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments.** Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

HUNTER, N. M.; BATES, P. D.; HORRITT, M. S.; WILSON, M. D. **Simple Spatially-Distributed Models for Predicting Flood Inundation**: **A Review**. *Geomorphology*, vol. 90, n. 3-4, 2007, p. 208 - 225.

HYDRODATA ENGENHARIA. Dados de batimetria, trecho Arroio do Meio – Mariante, rios Forqueta e Taquari. 2025

IPT; CPRM. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações 1:25.000 - nota técnica explicativa** (Coordenação de Omar Yazbek Bitar). Brasília: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), 2014. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/16588. Acesso em: mai. 2025.

IRWIN, A. *Citizen Science: a study of people, expertise and sustainable development*. London: Routledge, 1995. 216 p.

ISABELLE, A. Viagem ao Rio da Prata e ao Rio Grande do Sul. Tradução e nota sobre o autor de Teodemiro Tostes; introdução de Augusto Meyer. Brasília: Senado Federal, Conselho Editorial, 2006. (Edições do Senado Federal, v. 61).

JAHANDIDEH-TEHRANI, M.; HELFER, F.; ZHANG, H.; JENKINS, G.; YU, Y. **Hydrodynamic modelling of a flood-prone tidal river using the 1D model MIKE HYDRO River**: Calibration and sensitivity analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 192, n. 97, 2020.

KELDER, T.; HEINRICH, D.; KLOK, L.; THOMPSON, V.; GOULART, H. M. D.; HAWKINS, E.; SLATER, L. J.; SUAREZ-GUTIERREZ, L.; WILBY, R. L.; COUGHLAN DE PEREZ, E.; STEPHENS, E. M.; BURT, S.; VAN DEN HURK, B.; DE VRIES, H.; VAN DER WIEL, K.; SCHIPPER, E. L. F.; CARMONA BAÉZ, A.; VAN BUEREN, E.; FISCHER, E. M. **How to stop being surprised by unprecedented weather.** *Nature Communications*, v. 16, 2382, 2025. DOI: 10.1038/s41467-025-57450-0.

KLEMEŠ, V. **The Hurst phenomenon: a puzzle?** Water Resources Research, v. 10, n. 4, p. 675–688, 1974. DOI: 10.1029/WR010i004p00675.

KLEMEŠ, V. **Tall tales about tails of hydrological distributions. I.** Journal of Hydrologic Engineering, v. 5, n. 3, p. 227–231, 2000a. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:3(227).

KLEMEŠ, V. **Tall tales about tails of hydrological distributions. II.** Journal of Hydrologic Engineering, v. 5, n. 3, p. 232–239, 2000b. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:3(232).

KJELDSEN, T. R.; MACDONALD, N.; LANG, M.; MEDIERO, L.; ALBUQUERQUE, T.; BOGDANOWICZ, E.; BRÁZDIL, R.; CASTELLARIN, A.; DAVID, V.; FLEIG, A.; GÜL, G.; KRIAUCIUNIENE, J.; KOHNOVÁ, S.; MERZ, B.; NICHOLSON, O.; ROALD, L.; SALINAS, J. L.; SARAUSKIENE, D.; ŠRAJ, M.; STRUPCZEWSKI, W.; SZOLGAY, J.; TOUMAZIS, A.; VANNEUVILLE, W.; VEIJALAINEN, N.; WILSON, D. **Documentary evidence of past floods in Europe and their utility in flood frequency estimation.** Journal of Hydrology, v. 517, p. 963-973, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.038

KOBIYAMA, M.; MANFROI, O. J. **Importância da modelagem e monitoramento em bacias hidrográficas**. Curso de Extensão: Manejo de bacias hidrográficas sob a perspectiva florestal. Curitiba: Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná (UFPR), 1999. p. 111-118.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G.; RUDORFF, F. **Prevenção de desastres naturais**: Conceitos básicos. Curitiba: Organic Trading, 2006, 109 p. Disponível em: https://www.ceped.ufsc.br/wp-content/ uploads/2014/07/Livro_Prevencao_de_Desastres_Naturais.pdf. Acesso em: dez. 2024.

KOENIG, T. A.; BRUCE, J. L.; O'CONNOR, J. E.; McGEE, B. D.; HOLMES, R. R.; HOLLINS, R.; FORBES, B. T.; KOHN, M. S.; SCHELLEKENS, M.; MARTIN, Z. W.; PEPPLER, M. C. Identifying and preserving high-water mark data. *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*, Book 3, Chapter A24, 47 p., 2016. https://doi.org/10.3133/tm3A24

KOSMALA, M.; WIGGINS, A.; SWANSON, A.; SIMMONS, B. Assessing data quality in citizen science. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 14, n. 10, p. 551-560, 2016. https://doi.org/10.1002/fee.1436

KUMAR, V.; SHARMA, K. V.; CALOIERO, T.; MEHTA, D. J.; SINGH, K. **Comprehensive Overview of Flood Modeling Approaches**: A Review of Recent Advances. *Hydrology*, vol. 10, 2023, p. 141.

LAIPELT, L. *et al*. **Mechanisms and scenarios of the unprecedent flooding event in South Brazil 2024**. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 30, 2026, p. 573–590. DOI: 10.5194/hess-30-573-2026.

LAIPELT, L.; COMINI DE ANDRADE, B.; COLLISCHONN, W.; DE AMORIM TEIXEIRA, A.; PAIVA, R. C. D. d; RUHOFF, A. **ANADEM: A Digital Terrain Model for South America**. *Remote Sensing*, vol. 16, 2024, 2321.

LANNA, A. E. **Elementos de Estatística e Probabilidades**. In. TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia**: ciência e aplicação. 4 ed. 9ª reimp. Porto Alegre: Editora UFRGS/ABRH, 2020, 943 p.

LI, Y.; HUANG, C.; NGO, H. H.; PANG, J.; ZHA, X.; LIU, T.; GUO, W. **In situ reconstruction of long-term extreme flooding magnitudes and frequencies based on geological archives**. *Science of the Total Environment*, v. 670, 2019, p. 8-17.

LIMA, F. A. **Análise bayesiana de frequência de vazões máximas anuais com informações históricas**: aplicação à bacia do rio São Francisco em São Francisco. Mestrado (Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2005, 167 p. Disponível em: http://hdl.handle.net/1843/REPA-6MUQ2N. Acesso em: abr. 2024.

LOFTIS, J. D.; MITCHELL, M.; SCHATT, D.; FORREST, D. R.; WANG, H. V.; MAYFIELD, D.; STILES, W. A. Validating an operational flood forecast model using citizen science in Hampton Roads, VA, USA. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 7, n. 8, 242, 2019. DOI: 10.3390/jmse7080242.

LOPES, A. R. S. **Memórias Coletivas, Traumas Individuais**: as memórias dos desastres socioambientais no sul de Santa Catarina (1974-2004). *História Questões & Debates*, vol. 69, n. 1, 2021, p. 302-320. https://doi.org/10.5380/his.v69i1.63948

Lucas, M., Lang, M., Renard, B., and Le Coz, J.: **A comprehensive uncertainty framework for historical flood frequency analysis: a 500-year-long case study**, Hydrol. Earth Syst. Sci., 28, 5031–5047, https://doi.org/10.5194/hess-28-5031-2024, 2024

MACHADO, M. J.; BOTERO, B. A.; LÓPEZ, J.; FRANCÉS, F.; DÍEZ-HERRERO, A.; BENITO, G**. Flood frequency analysis of historical flood data under stationary and non-stationary modelling.** *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 19, p. 2561-2576, 2015. DOI: 10.5194/hess-19-2561-2015

MAIDMENT, D. R.; **GIS and hydrologic modelling (**Cap. 14). *In*: GOODCHILD, M. F.; PARKS, B. O.; STEYAERT, L.T. (Eds). *Environmental modeling with GIS*. New York, Oxford University Press, 1993, p. 147-167.

MARCUZZO, F. F. N.; KENUP, R. E.; ZANETTI, H. P.; BENVENUTTI, L.; DE OLIVEIRA, M. P.; WILSON, E. da S.; ACOSTA, C. C.; BAO, R. **Nota técnica: aferição direta e avalição indireta do nível máximo de rios em estações fluviométricas e marcas de inundação no Rio Grande do Sul na grande cheia de maio de 2024 (**10 Versão). Porto Alegre: Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial, Serviço Geológico do Brasil, 2025 (Revisada e Atualizada em 23/07/2025). Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/24939.12. Acesso em: jul. 2025.

MENEZES, Andressa Da Silveira. **História e memória: Comunidade Católica São José dos Conventos/RS (de 1855 aos dias atuais)**. 2016. Monografia (Graduação em História) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 11 jul. 2016. Disponível em: http://hdl.handle.net/10737/1367.

MENGISTIE, E.; VAN MEERVELD, H. J. I.; FISCHER, B. M. C.; DE JONG, S. M.; VAN DER VLAG, M.; GIRONS LOPEZ, M.; VAN WESTEN, C.; STOTER, J.; STREEFKERK, I.; PEERENBOOM, P.; VERSTEGEN, J. A.; STERK, G. Can web-sourced photographs provide information on floods? *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 28, p. 4463-4489, 2024. https://doi.org/10.5194/hess-28-4463-2024

MERZ R.; TARASOVA, L. BASSO, S. **The flood cooking book: ingredients and regional flavors of floods across Germany**. *Environmental Research Letters*, vol. 15, 2020, 114024.

MERZ, B.; BLÖSCHL, G.; VOROGUSHYN, S.; DOTTORI, F.; AERTS, J. C. J. H.; BATES, P.; BERTOLA, M.; KEMTER, M.; KREIBICH, H.; LALL, U.; MACDONALD, E. **Causes, impacts and patterns of disastrous river floods**. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 2, n. 9, 2021, p. 592-609.

MERZ, R.; BLÖSCHL, G. **Flood frequency hydrology: 1. Temporal, spatial, and causal expansion of information**. *Water Resources Research*, vol. 44, 2008a, W08432, 17 p.

MERZ, R.; BLÖSCHL, G. **Flood frequency hydrology: 2. Combining data evidence**. *Water Resources Research*, vol. 44, 2008b, W08433, 16 p.

MILLY, P. C. D.; BETANCOURT, J.; FALKENMARK, M.; HIRSCH, R. M.; KUNDZEWICZ, Z. W.; LETTENMAIER, D. P.; STOUFFER, R. J. **Stationarity is dead: whither water management?** *Science*, v. 319, n. 5863, p. 573-574, 2008. DOI: 10.1126/science.1151915.

MISHRA, A. K.; COULIBALY, P. Developments in hydrometric network design: a review. *Reviews of Geophysics*, v. 47, n. 2, 2009. https://doi.org/10.1029/2007RG000243

MOLINARI, D.; DE BRUIJN, K. M.; CASTILLO-RODRÍGUEZ, J. T.; ARONICA, G. T.; BOUWER, L. M. **Validation of flood risk models**: Current practice and possible improvements. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 33, 2019, p. 441-448.

MONTE, B. E. O.; GOLDENFUM, J. A.; VALÉRIO, E. D. L. S. **Análise de frequência de máximos de chuva na bacia hidrográfica do Taquari-Antas**. Anais XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília, 2015a.

MONTEIRO, C. A. F. **Clima e Excepcionalismo**. Conjecturas sobre o Desempenho da Atmosfera como Fenômeno Geográfico. Florianópolis: UFSC, 1991. 233p.

MONTOR-MONTREAL. **Plano diretor – Programa de Desenvolvimento Integrado da Região Taquari-Antas**. Porto Alegre: Secretaria de Desenvolvimento Regional e Obras Públicas, 1972.

MORAES, S. R. **Mapeamento das áreas e edificações atingidas pelas inundações do Rio Taquari na área urbana do município de Lajeado/RS**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade do Vale do Taquari (Univates), Lajeado, 2015. Disponível em: http://hdl.handle.net/10737/997. Acesso em: 24 nov. 2023.

MORAES, S. R.; BOTH, G. C.; KUREK, R. K. M.; ECKHARDT, R. R.; HAETINGER, C. **Relação do fenômeno ENOS com a ocorrência de inundações no município de Lajeado/RS**. In: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves: ABRH, 2013, 8 p.

MORAES, S. R.; COLLISCHONN, W.; ECKHARDT, R. R.; MONTE, B. E. O. **Retromodelagem do evento extremo de inundação do rio Taquari no HEC-RAS, ocorrido em 09 de julho de 2020, no município de Lajeado / RS**. Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, n. 42, 2023, p. 104-132.

MORAES, S. R.; COLLISCHONN, W.; WENDT, L. G.; LAIPELT, L.; ECKHARDT, R. R.; FAN, F. M.; PAIVA, R.; KOBIYAMA, M. **Ciência cidadã em desastres hidrológicos: iniciativa aplicada às enxurradas e inundações de setembro de 2023 e maio de 2024 na Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas/RS.** Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, n. 45, p. 94-122, 2025.

MORAES, Sofia Royer; COLLISCHONN, Walter; BUFFON, Franco Turco; ECKHARDT, Rafael Rodrigo. **Revisão e consolidação da série histórica dos níveis das cheias do rio Taquari em Lajeado de 1939 a 2023**. Porto Alegre: Serviço Geológico do Brasil, 2024. 50 f. (Relatório Técnico). Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/24834.

MUHLENHOFF, A. P. **Análise comparativa de esquemas de discretização 1D e 1D/2D para avaliação de curvas de inundação em rio com escassez de dados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2016, 179 p. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/ handle/1884/46176. Acesso em: fev. 2025.

NARDI, F.; CUDENNEC, C.; ABRATE, T.; ALLOUCH, C.; ANNIS, A.; ASSUMPÇÃO, T.; AUBERT, A. H.; BÉROD, D.; BRACCINI, A. M.; BUYTAERT, W.; DASGUPTA, A.; HANNAH, D. M.; MAZZOLENI, M.; POLO, M. J.; SÆBØ, Ø.; SEIBERT, J.; TAURO, F.; TEICHERT, F.; TEUTONICO, R.; UHLENBROOK, S.; WAHRMANN V. C.; GRIMALDI, S.. Citizens AND HYdrology (CANDHY): conceptualizing a transdisciplinary framework for citizen science addressing hydrological challenges. *Hydrological Sciences Journal*, v. 67, n. 16, p. 2534-2551, 2022. https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1849707

NEARING, G. S.; KRATZERT, F.; SAMPSON, A. K.; PELISSIER, C. S.; KLOTZ, D.; FRAME, J. M.; PRIETO, C.; GUPTA, H. V. **What role does hydrological science play in the age of machine learning?** *Water Resources Research*, vol. 57, n. 3, 2021, e2020WR028091.

OLIVEIRA, G. G. **Modelos para Previsão, Espacialização e Análise das áreas Inundáveis na Bacia Hidrográfica do Rio Caí, RS**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2010.

OLIVEIRA, G. G.; ECKHARDT, R. R.; HAETINGER, C.; ALVES, A. **Caracterização espacial das áreas suscetíveis a inundações e enxurradas na bacia hidrográfica do rio taquari-Antas**., *Geociências*, v. 37, n. 4, 2018, p. 849 -863.

ONU (Organização das Nações Unidas). Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf. Acesso em: 25 jul. 2026.

PAIVA, R. C. D., FAN, F.M. COLLISCHONN, W., MEDEIROS, M, S., OLIVEIRA, R.C., LIMA, S.G., CAMARGO, P., MEDEIROS, P.M. 2025. **Caracterização e modelagem das cheias de 2023 e 2024 no Rio Grande do Sul em escala regional**. Relatório Técnico. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. https://lume.ufrgs.br/handle/10183/293580.

PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.; TUCCI, C. E. M. **Hydrological and sediment transport modeling of the Amazon Basin**. *In*: DA SILVA, R. C. V.; TUCCI, C. E. M.; SCOTT, C. A. (Org.). **Water and Climate Modeling in Large Basins 2**. Porto Alegre: ABRH, 1 ed., v. 2, 2013, p. 119.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C. **Validation of a full hydrodynamic model for large-scale hydrologic modelling in the Amazon**. *Hydrological Processes*, v. 27, n. 3, 2013, p. 333–346.

PAIXÃO, M. A.; KOBIYAMA, M.; ZAMBRANO, F. C.; MICHEL, G. P.; FAN, F. M. **Lições sobre o gerenciamento de desastres hidrológicos obtidas a partir da ocorrência em Rolante/RS**. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental* (RG&SA), Florianópolis, v. 7, n. especial, 2018, p. 251 – 267. Disponível em: https://www.ufrgs.br/gpden/wordpress/wp-content/uploads/ 2014/10/Paix%C3%A3o-et-al-2018-RGSA-Unisul-Rolante.pdf. Acesso em: dez. 2024.

PARKES, B.; DEMERITT, D. **Defining the hundred-year flood: a Bayesian approach for using historic data to reduce uncertainty in flood frequency estimates.** Journal of Hydrology, v. 540, p. 1189-1208, 2016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169416304553

PARMA, L. H. **Mapas de alerta de inundação para Lajeado: uma versão preliminar**. 2025. TCC (Engenharia Civil) – IPH/UFRGS, Porto Alegre. Orientador: Walter Collischonn. Coorientadora: Sofia Royer Moraes. Disponível em: http://hdl.handle.net/10183/294851.

PAUL, J. D.; BUYTAERT, W.; ALLEN, S.; BALLESTEROS-CÁNOVAS, J. A.; BHUSAL, J.; CIESLIK, K.; CLARK, J.; DUGAR, S.; HANNAH, D. M.; STOFFEL, M.; VON TENGG-KOBLIGK, L.; WAGNON, P.; WATSON, C. S.; ZAMAN, A.; KHADKA, A.; SHERPA, A. P.; TSHERING, D.; BAILLIE, J. Citizen science for hydrological risk reduction and resilience building. *WIREs Water*, v. 5, n. 1, e1262, 2018. https://doi.org/10.1002/wat2.1262

PEDERSINI, H. **Estiagem revela marcas em pedras feitas em 1943**. Lajeado: Jornal A Hora, 2022. Disponível em: https://grupoahora.net.br/conteudos/2022/01/13/estiagem-revela-marcas-em-pedras-feitasem-1943. Acesso em: set. 2023.

PINOS, J.; TIMBE, L. **Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins**. *Water Science and Engineering*, vol. 12, n. 1, 2019, p. 11-18.

POSSA, T. M.; COLLARES, G. L.; BOEIRA, L. S.; JARDIM, P. F.; FAN, F. M.; TERRA, V. S. S. **Fully coupled hydrological–hydrodynamic modeling of a basin–river–lake transboundary system in Southern South America**. *Journal of Hydroinformatics*, vol. 24, n. 1, 2022a, p. 93 - 112.

POSSA, T. M.; COLLISCHONN, W.; JARDIM, P. F.; FAN, F. M. **Hydrological-hydrodynamic simulation and analysis of the possible influence of the wind in the extraordinary flood of 1941 in Porto Alegre**. RBRH, Porto Alegre, v. 27, e29, 2022b, 23 p.

REIS, D. S.; STEDINGER, J. R. Bayesian MCMC flood frequency analysis with historical information. **Journal of Hydrology**, v. 313, n. 1–2, p. 97–116, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.028.

REMO, J. W. F.; PINTER, N. **Retro-modeling the Middle Mississippi River**, *Journal of Hydrology*, vol. 337, n. 3-4, 2007, p. 421-435.

REMO, J. W. F.; PINTER, N.; HEINE, R. A. **The use of retro- and scenario-modeling to assess effects of 100+ years river of engineering and land-cover change on Middle and Lower Mississippi River flood stages.** *Journal of Hydrology,* vol. 376, n. 3-4, 2009, p. 403-416.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Conceitos Básicos de Modelagem Hidrológica** (Cap. 2). *In* **Introdução à Modelagem Dinâmica Espacial**. São José dos Campos: INPE, 2003, 33 p. Disponível em: https://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap2_modelos_ hidrologicos.pdf. Acesso em. jan. 2025.

RESTREPO-ESTRADA, C.; ANDRADE, S. C.; ABE, N.; FAVA, M. C.; MENDIONDO, E. M.; ALBUQUERQUE, J. P. Geo-social media as a proxy for hydrometeorological data for streamflow estimation and to improve flood monitoring. Computers & Geosciences, v. 111, p. 148-158, 2018. DOI: 10.1016/j.cageo.2017.10.010.

REZENDE, B. S. **Análise hidrológica sobre as ocorrências de inundações na área urbana da cidade de Lajeado, RS**. Relatório de Consultoria para a Prefeitura de Lajeado, 1993.

REZENDE, B.; TUCCI, C. E. M. **Análise das Inundações em Estrela**: relatório técnico. Estrela: Prefeitura Municipal de Estrela, 1979, 30 p.

RIBEIRO NETO, A.; CIRILO, J. A.; DANTAS, C. E. O.; SILVA, E. R. **Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)*, v. 20, n. 2, 2015, p. 394 - 403.

RIDOLFI, E.; MONDINO, E.; DI BALDASSARRE, G. Hydrological risk: modeling flood memory and human proximity to rivers. *Hydrology Research*, v. 52, n. 1, p. 241-252, 2021. https://doi.org/10.2166/nh.2020.195

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**: hidrovias, portos e aeroportos. Porto Alegre: SEPLAG, 2026. Disponível em: https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/hidrovias-portos-e-aeroportos. Acesso em: 9 set. 2026.

ROGGENKAMP, T.; HERGET, J. Flood reconstruction – The unexpected rather frequent event at River Ahr in July 2021. Global and Planetary Change, v. 240, 104541, 2024. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2024.104541.

ROGGENKAMP, T.; HERGET, J. Reconstructing peak discharges of historic floods of the river Ahr, Germany. Erdkunde, v. 68, n. 1, p. 49-59, 2014. DOI: 10.3112/erdkunde.2014.01.05.

ROSSER, J. F.; LEIBOVICI, D. G.; JACKSON, M. J. Rapid flood inundation mapping using social media, remote sensing and topographic data. *Natural Hazards*, v. 87, p. 103-120, 2017. https://doi.org/10.1007/s11069-017-2755-0

RUIZ-BELLET, J. L.; BALASCH, J. C.; TUSET, J.; BARRIENDOS, M.; MAZON, J.; PINO, D. **Historical, hydraulic, hydrological and meteorological reconstruction of 1874 Santa Tecla flash floods in Catalonia (NE Iberian Peninsula)**. *Journal of Hydrology*, vol. 524, 2015, p. 279-295.

RUIZ-BELLET, J. L.; BALASCH, J. C.; TUSET, J.; BARRIENDOS, M.; MAZÓN, J.; PINO, D. **Historical, hydraulic, hydrological and meteorological reconstruction of 1874 Santa Tecla flood in Western Catalonia (NE Spain)**. *Journal of Hydrology*, v. 524, 2015, p. 279–295.

SAINT-HILAIRE, A. de. Viagem ao Rio Grande do Sul (1820-1821). Tradução de Leonam de Azeredo Penna. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1939. (Biblioteca Pedagógica Brasileira, Série 5, Brasiliana, v. 167).

SALAS, J. D.; DELLEUR, J. W.; YEVJEVICH, V.; LANE, W. L. **Applied Modeling of Hydrologic Time Series**. *Water Resources Publications*, Littleton, Colorado, 1980, 498 p.

SALGADO, S. R. T.; CARVALHO, E. M. S.; VISEU, M. T.; OLIVEIRA, O. F. Comparative analysis of global DEMs for dam-break flood modeling and inundation mapping. *Water Resources Management*, v. 40, art. 98, 2026. DOI: 10.1007/s11269-025-04427-9.

SALINAS, J. L.; KISS, A.; VIGLIONE, A.; VIERTL, R.; BLÖSCHL, G. **A fuzzy Bayesian approach to flood frequency estimation with imprecise historical information.** Water Resources Research, v. 52, n. 9, p. 6730-6750, 2016. DOI: https://doi.org/10.1002/2016WR019177. Disponível em: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016WR019177

SANTOS, J. C.; TOMASELLA, J.; FAVA, M. C.; VASCONCELOS, A. F.; RODRIGUES BASSANELLI, H.; PEREIRA, C. E.; GALVÃO, P. R.; GONÇALVES CILTO, G. Reconstituting past floods and assessing scenarios by integrating hydraulic modelling and citizen science: a study case in the Upper Paranapanema River Basin. Hydrological Sciences Journal, v. 71, n. 5, p. 817-831, 2026. DOI: 10.1080/02626667.2026.2617596.

SARMENTO BUARQUE, A. C., BHATTACHARYA-MIS, N., FAVA, M. C., SOUZA, F. A. A. DE, & MENDIONDO, E. M. (2020). Using historical source data to understand urban flood risk: a socio-hydrological modelling application at Gregório Creek, Brazil. Hydrological Sciences Journal, 65(7), 1075–1083. https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1740705

SBPC. Ciência cidadã: conceitos e práticas. Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, 11 mar. 2025. Disponível em: https://portal.sbpcnet.org.br/noticias/ciencia-cidada-conceitos-e-praticas/

SCHIERHOLT, J. A. **Informações históricas, depoimentos e fotografias: Dicionário de Lajeado–** Livro ainda não publicado. Lajeado, 2024.

SCHIERHOLT, J. A. **Lajeado I: povoamento, colonização, história política**. Lajeado:Edição do Autor, 1992.

SEIBERT, J.; STROBL, B.; ETTER, S.; HUMMER, P.; VAN MEERVELD, H. J. Virtual staff gauges for crowd-based stream level observations. Frontiers in Earth Science, v. 7, 70, 2019. DOI: 10.3389/feart.2019.00070.

SEMA/RS - Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. **G040 - Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas.** Disponível em: https://www.sema.rs.gov.br/g040-bh-taquari-antas. Acesso em: nov. 2024.

SENEVIRATNE, S. I. *et al.,* **Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate**. In: MASSON-DELMOTTE, V. et al. (eds.). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. p. 1513-1766. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-11/. Acesso em: 30 set. 2025.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Atlas Pluviométrico e Estudos de Chuvas Intensas**. Brasília: SGB, [s.d.]. Disponível em: https://www.sgb.gov.br/publicacoes-atlas-pluviometrico-e-estudos-de-chuvas-intensas. Acesso em: 7 nov. 2025.

SGB - Serviço Geológico do Brasil. **Monografia do Marco: 86879300 - Estrela**. Porto Alegre, 2015.

SGB (Serviço Geológico do Brasil). **Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE): Bacia Hidrográfica Taquari-Antas**, 2024. Disponível em: http://sace.cprm.gov.br/taquari/. Acesso em jan. 2025.

SHIRK, J. L.; BALLARD, H. L.; WILDERMAN, C. C.; PHILLIPS, T.; WIGGINS, A.; JORDAN, R.; MCCALLIE, E.; MINARCHEK, M.; LEWENSTEIN, B. V.; KRASNY, M. E.; BONNEY, R. Public participation in scientific research: a framework for deliberate design. *Ecology and Society*, v. 17, n. 2, article 29, 2012. http://dx.doi.org/10.5751/ES-04705-170229

SILVA JÚNIOR, F. P.; CHAVES, S. V. V. **Desastres naturais no Brasil: um estudo acerca dos extremos climáticos nas cidades brasileiras**. *Revista da Academia de Ciências do Piauí,* vol. 2, n. 2, 2021, p. 47-62.

SILVERTOWN, J. A new dawn for citizen science. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 24, n. 9, p. 467-471, 2009. https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.03.017

SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A. S.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. D**esenvolvimento de um sistema operacional de previsão de cheias na bacia do Taquari-Antas/RS.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015, Brasília. **Anais** [...]. Porto Alegre: ABRHidro, 2015.

SMITH, C. H.; DOUGHTY, M. **RMC-BestFit: Bayesian estimation and fitting *software***. Versão 1.0. Lakewood: U.S. Army Corps of Engineers, Risk Management Center, 2020.

SMITH, C. H.; SKAHILL, B. E. Estimating design floods with a specified annual exceedance probability using Bayesian analysis. In: ANCOLD CONFERENCE, 2019. **Proceedings** [...]. Australian National Committee on Large Dams, 2019.

SMITH, H.; DOUGHTY, M. **RMC-BestFit Quick Start Guide.** RMC-TR-2020-03. Lakewood, CO: U.S. Army Corps of Engineers, Risk Management Center, 2020. Disponível em: https://www.rmc.usace.army.mil/*Software*/RMC-BestFit/. Acesso em: 02 abr. 2025.

SORNETTE, D. **Dragon Kings, Black Swans and the Prediction of Crises.** *International Journal of Terraspace Science and Engineering*, 2 (1), 2009, p. 1-18. Disponível em: https://arxiv.org/abs/0907.4290. Acesso em: nov. 2024.

SOUZA, F. A. A.; BHATTACHARYA-MIS, N.; BUARQUE, A. C. S.; SOUSA, B. J. O.; FIALHO, H. C. P.; ABREU, F. G.; FAVA, M. C.; RESTREPO-ESTRADA, C.; OLIVEIRA, P. T. S.; MENDIONDO, E. M. Evolution of social engagement in flood risk assessment: new approaches and emerging concerns using case studies from Brazil. In: LAMOND, J.; PROVERBS, D.; BHATTACHARYA-MIS, N. (Ed.). Research Handbook on Flood Risk Management. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2024. cap. 5, p. 52-69. DOI: 10.4337/9781839102981.00011.

SPEARMAN, C. **The proof and measurement of association between two things**. *The American Journal of Psychology*, vol. 15, n. 1, 1904, p. 72-101. Disponível em: https://doi.org/10.2307/1412159.

STEDINGER, J. R.; COHN, T. A. **Flood frequency analysis with historical and paleoflood information.** *Water Resources Research*, v. 22, n. 5, p. 785-793, 1986. https://doi.org/10.1029/WR022i005p00785

STROBL, B.; ETTER, S.; VAN MEERVELD, I.; SEIBERT, J. The CrowdWater game: a playful way to improve the accuracy of *crowdsourced* water level class data. *PLoS ONE*, v. 14, n. 9, e0222579, 2019. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222579

SY, B.; FRISCHKNECHT, C.; DAO, H.; CONSUEGRA, D.; GIULIANI, G. Reconstituting past flood events: the contribution of citizen science. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 24, p. 61-74, 2020. https://doi.org/10.5194/hess-24-61-2020

TEEGAVARAPU, R. S.V.; NAYAK, A. **Evaluation of long-term trends in extreme precipitation**: Implications of in-filled historical data use for analysis. *Journal of Hydrology*, vol. 550, 2017, p. 616-634.

TER BRAAK, C. J. F.; VRUGT, J. A. Differential Evolution Markov Chain with snooker updater and fewer chains. **Statistics and Computing**, v. 18, n. 4, p. 435–446, 2008. DOI: 10.1007/s11222-008-9104-9.

THORNDYCRAFT, V. R.; BARRIENDOS, M.; BENITO, G.; RICO, M.; CASAS, A. **The catastrophic floods of AD 1617 in Catalonia (northeast Spain) and their climatic context**. *Hydrological Sciences Journal.* vol. 51, n. 5, 2006, p. 899 - 912.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. do (Orgs). **Desastres naturais**: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T.; SHEPHERD, T. G. **Attribution of climate extreme events**. *Nature Climate Change*, vol. 5, n. 8, 2015, p. 725-730.

TRIGO, R. M.; RAMOS, C.; PEREIRA, S. S.; RAMOS, A. M., Zêzere, J. L.; LIBERATO, M. L. R. **The deadliest storm of the 20th century striking Portugal: Flood impacts and atmospheric circulation**. *Journal of Hydrology*, vol. 541, 2016, p. 597 - 610.

TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia**: ciência e aplicação. 4 ed. 9ª reimp. Porto Alegre: Editora UFRGS/ABRH, 2020, 943 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2 ed. Porto Alegre: UFRGS / ABRH, 2005, 680 p.

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de Vazões**. 1 ed. 1ª reimpressão: 2017, Porto Alegre: UFRGS / ABRH (Coleção ABRH), 2002, 256 p.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (Org.) **Inundações Urbanas da América do Sul**. Porto Alegre: ABRH, 2003, 471 p.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH, 1995, 428 p.

UNDRR/UNISDR. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. Geneva: United Nations, 2015

UNIÃO EUROPEIA. **Directiva 2007/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho**. de 23 de outubro de 2007. Dispõe sobre avaliação e gestão dos riscos de inundações. Jornal Oficial da União Europeia. Disponível em: http://data.europa.eu/eli/dir/2007/60/oj. Acesso em: fev. 2025

UNISDR (*United Nations Office for Disaster Risk Reduction*). **Proposed Updated Terminology on Disaster Risk Reduction: A Technical Review**. New York: UNISDR, 2015. 31 p.

UNISDR. **Living with Risk**: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives, Geneva: UN Publications, 2004, 429 p. Disponível em: https://www.undrr.org/publication/living-risk-global-review-disaster-reduction-initiatives. Acesso em: dez. 2024.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual, Version 6.6. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, September 2024.

USACE (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS). **HEC-RAS User's Manual**. Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System (HEC-RAS, Version 6.7 Beta), Davis-CA, US, 2025. Disponível em: https://www.hec.usace.army.mil/. Acesso em jan. 2025.

USACE (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS). **Modeler Application Guidance for Steady vs Unsteady, and 1D vs 2D vs 3D Hydraulic Modeling**. Hydrologic Engineering Center´s – River Analysis System. Davis-CA, US, 2020. Disponível em: https://www.hec.usace.army.mil/

confluence/rasdocs/hgt/latest/reference-documents?preview=/290456384/290456391/TD-41.pdf. Acesso em: mai. 2025

VAN CAMPENHOUT, J.; HOUBRECHTS, G.; PEETERS, A. PETIT, F. **Return Period of Characteristic Discharges From the Comparison Between Partial Duration and Annual Series, Application to the Walloon Rivers (Belgium).** *Water*, vol. 12, n. 792, 2020, p. 1-33.

VANELLI, F. M. **Reconstrução hidrológica e hidrodinâmica do evento de 1974 em tubarão, SC**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2019, 153 p. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/194861. Acesso em: jan. 2025.

VANELLI, F. M.; FAN, F. M.; KOBIYAMA, M. **Panorama geral sobre dados hidrológicos com ênfase em eventos extremos**. *Revista de Gestão de Água da América Latina (REGA)*. vol. 17, n. 1, 2020, p. 24.

VANELLI, F. M.; KOBIYAMA, M. **How can socio-hydrology contribute to natural disaster risk reduction?** *Hydrological Sciences Journal*, vol. 66, n. 12, 2021, p. 1758 - 1766

VANELLI, F. M.; MONTEIRO, L. R.; FAN, F. M.; GOLDENFUM, J. A. **The 1974 Tubarão River flood, Brazil: reconstruction of the catastrophic flood**. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, vol. *8*, n. 3, 2020, p. 231 - 245.

VIGLIONE, A.; MERZ, R.; SALINAS, J. L.; BLÖSCHL, G. **Flood frequency hydrology: 3. A Bayesian analysis**. Water Resources Research, vol. 49, 2013, p. 675-692.

VÖRÖSMARTY C. J.; LELYS, B. G.; WOLLHEIM, W. M.; PELLERIN, B.; BJERKLIE, D.; CARDOSO, M.; D'ALMEIDA, C.; GREEN, P.; COLON, L. **Extreme rainfall, vulnerability and risk**: a continental-scale assessment for South America. *Phil. Trans. R. Soc. A.* Vol. 371, 2013.

WALKER, D.; FORSYTHE, N.; PARKIN, G.; GOWING, J. Filling the observational void: scientific value and quantitative validation of hydrometeorological data from a community-based monitoring programme. *Journal of Hydrology*, v. 538, p. 713-725, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.062

WEESER, B., STENFERT KROESE, J., JACOBS, S. R., NJUE, N., KEMBOI, Z., RAN, A., RUFINO, M. C., & BREUER, L. (2018). Citizen science pioneers in Kenya—A *crowdsourced* approach for hydrological monitoring. *Science of the Total Environment*, **631-632**, 1590–1599. DOI: **https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.13**

WEESER, B.; JACOBS, S.; KRAFT, P.; RUFINO, M. C.; BREUER, L. Rainfall-runoff modeling using *crowdsourced* water level data. *Water Resources Research*, v. 55, n. 12, p. 10856-10871, 2019. https://doi.org/10.1029/2019WR025248

WEIZENMANN, P. A. Forqueta, nosso paraíso. Santa Clara do Sul: Centergraf, 2023. 430 p.

WETTER, O.; PFISTER, C.; WEINGARTNER, R.; LUTERBACHER, J.; REIST, T.; TRÖSCH, J. **The largest floods in the High Rhine basin since 1268 assessed from documentary and instrumental evidence**. *Hydrological Sciences Journal*, vol. *56, n.* 5, 2011, p. 733-758.

WIGGINS, A.; NEWMAN, G.; STEVENSON, R. D.; CROWSTON, K. Mechanisms for data quality and validation in citizen science. In: IEEE SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON E-SCIENCE WORKSHOPS, 2011, Stockholm. *Proceedings...* Stockholm: IEEE, 2011. p. 14-19. https://doi.org/10.1109/eScienceW.2011.27

XAVIER, Renata Lucon; ALMEIDA, Natasha Nême Gonçalves de; STANGANINI, Fábio Noel; MENEZES, Denise Balestrero; GONÇALVES, Luciana Márcia. **Análise de instrumentos urbanísticos aplicados à gestão de risco de inundações: o caso do município de Lajeado (RS).** Metodologias e Aprendizado, v. 8, p. 460-481, 2025. DOI: https://doi.org/10.21166/metapre.v8i.6673.

YU, D.; YIN, J.; LIU, M. Validating city-scale surface water flood modelling using crowd-sourced data. *Environmental Research Letters*, v. 11, 124011, 2016. DOI: 10.1088/1748-9326/11/12/124011.

YUE, S. *et al.* The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. **Hydrological Processes**, v. 16, n. 9, p. 1807–1829, 2002. Disponível em: https://doi.org/10.1002/hyp.1095.

YUE, S.; PILON, P.; CAVADIAS, G. **Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series**. *Journal of Hydrology*, vol. 259, n. 1-4, 2002, p. 254 - 271.

✦ ⨘ ✦ ϟ ✦ ᛈ ✦