ESTIMATIVA DA VAZÃO MÁXIMA NO RIO TAQUARI-ANTAS DURANTE EVENTOS EXTREMOS DE CHEIA POR MEIO DE MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Matheus Sampaio Medeiros[1] ; Walter Collischonn [2]; Fernando Mainardi Fan[3], Rodrigo Paiva[4] Rafaela Cristina de Oliveira [5]; Gabriel Matte [6]; Francisco F. N. Marcuzzo[7]; Franco Turco Buffon[8]

Palavras-Chave – cheias extremas; incerteza de curva-chave; modelagem hidrodinâmica.

INTRODUÇÃO

Estudos sobre vazões máximas na América do Sul, no contexto das projeções climáticas, indicam um sinal positivo para o sul do Brasil, sugerindo a possibilidade de aumento na magnitude das cheias futuras (Brêda *et al.*, 2023). Em setembro de 2023, um evento pluviométrico extremo atingiu a bacia do rio Taquari-Antas, no estado do Rio Grande do Sul, afetando mais de 150 mil pessoas, causando prejuízos econômicos da ordem de bilhões de reais e resultando em mais de 40 vítimas fatais. Dois meses depois, em novembro do mesmo ano, a bacia foi novamente atingida por uma cheia de grande magnitude, provocando novas perdas humanas e materiais, inclusive em áreas que ainda estavam em processo de reconstrução após o evento de setembro (Moraes *et al.*, 2024). Menos de um ano depois, em maio de 2024, o Rio Grande do Sul voltou a ser impactado por um evento hidrológico extremo, desta vez associado a volumes de precipitação ainda mais elevados que os registrados nos eventos anteriores (Collischonn *et al.*, 2024). No rio Taquari o nível da água se elevou em mais de 20 metros em várias cidades, resultando em destruição de infraestrutura, impactos severos sobre a população ribeirinha e mais vítimas fatais (Collischonn *et al.*, 2025).

Nesse contexto, a estimativa da vazão máxima durante esses eventos se torna relevante para a compreensão da magnitude e para o planejamento de intervenções ou ações de adaptação. Entretanto, a medição direta de vazão em campo é um procedimento que pode ser desafiadora durante eventos de cheia extrema, pois envolve riscos operacionais significativos para as equipes de medição (Brusa & Clarke, 1999). Por essa razão, a vazão é geralmente estimada de forma indireta pela curva-chave (relação cota-vazão). Esta relação permite converter uma simples leitura de nível na régua linimétrica, obtida em uma seção fluvial, no valor de vazão correspondente. Contudo, durante eventos extremos, a extrapolação dessas curvas-chave é reconhecida como uma fonte de incerteza nas estimativas de vazão máximas (Clarke, 1999; Clarke *et al.*, 2000; Di Baldassare & Claps, P., 2011; Domeneghetti *et al.*, 2012; Vanelli *et al.*, 2018; Vieira *et al.*, 2022). O trabalho proposto por Lima *et al.* 2025 apresenta uma análise de estações especificas, em que a curva-chave foi extrapolada durante eventos de cheia recentes. Segundo os autores, durante as cheias de 2023 e 2024, a vazão extrapolada na curva-chave, em estações localizadas no rio Taquari, foi de até 2 vezes superior do que a maior vazão já registrada em medições de campo.

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo estimar as vazões máximas associadas aos picos de cheia em dois pontos do rio Taquari, utilizando modelagem hidrodinâmica como ferramenta complementar à curva-chave. A abordagem busca reproduzir os níveis observados durante eventos extremos e, a partir disso, avaliar as vazões estimadas na faixa extrapolada da relação nível-descarga líquida.

1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Porto Alegre (RS), matheus.sampaio@ufrgs.br
2) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Porto Alegre (RS), collischonn@iph.ufrgs.br
3) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Porto Alegre (RS), fernando.fan@ufrgs.br
4) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Porto Alegre (RS), rodrigo.paiva@ufrgs.br
5) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Porto Alegre (RS), rafaela.cristina@ufrgs.br
6) Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Porto Alegre (RS), gabriel.matterios@gmail.com
7) Serviço Geológico do Brasil (SGB), Porto Alegre (RS), francisco.marcuzzo@sgb.gov.br
8) Serviço Geológico do Brasil (SGB), Porto Alegre (RS), franco.buffon@sgb.gov.br

METODOLOGIA

Para representar o escoamento e simular o comportamento hidrodinâmico do trecho no rio Taquari, foi utilizado o modelo HEC-RAS (USACE, 2021). O modelo foi elaborado de modo a contemplar a região de estudo por meio de uma malha bidimensional, com espaçamento de 50 metros na calha principal e de 100 metros nas áreas adjacentes. As condições de contorno de montante foram definidas a partir das vazões observadas ou simuladas nos principais afluentes. A vazão defluente da UHE 14 de julho foi obtida junto ao banco de dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS. Para o rio Carreiro, as vazões foram estimadas a partir das informações disponíveis nas PCHs Cotiporã e Autódromo. Em Muçum, cerca de 94% da área de drenagem da bacia é controlada por essas estruturas. Em Encantado, cerca de 79% da contribuição é controlada pela UHE 14 de julho e pela PCH Cotiporã. Para estimar a contribuição do rio Guaporé, localizado a jusante de Muçum e a montante de Encantado, foram utilizados dados de estações fluviométricas, quando havia dados, e resultados de modelagem hidrológica obtidos pelo modelo MGB quando havia falha nas observações (Paiva *et al.*, 2025; Sampaio-Medeiros *et al.*, 2025). Essa mesma abordagem foi adotada para estimar a contribuição do rio Forqueta, cuja confluência com o rio Taquari está localizada pouco a montante dos municípios de Lajeado e Estrela. A condição de contorno de jusante foi definida a partir da curva-chave estimada e disponível no HidroWeb/ANA para a estação Porto Mariante. A adoção dessa condição de contorno em uma seção mais distante teve como objetivo reduzir a influência da condição imposta sobre os resultados simulados. Dessa forma, buscou-se minimizar possíveis efeitos artificiais da condição de contorno nos trechos de interesse. O modelo HEC-RAS foi utilizando então para simular as cheias de outubro de 2016; setembro de 2023; novembro de 2023; e maio de 2024. Adicionalmente foram realizadas duas simulações adicionais: uma com um hidrograma sintético com taxas de ascensão e recessão muito mais lentas do que os hidrogramas reais, e outra com o evento de 2016 modificado, em que a contribuição do rio Guaporé foi duplicada para avaliar a sensibilidade dos resultados no posto fluviométrico de Muçum, localizado a montante da confluência entre os rios Guaporé e Taquari.

RESULTADOS

Como resultados foram geradas as relações entre cota e vazão encontradas durante cada uma das cheias e os valores máximos de cotas e vazão em cada um dos eventos. A Figura 1 apresenta a relação cota-vazão na estação de Muçum, considerando as vazões medidas em campo (círculos amarelos), os pares cota-vazão simulados com o modelo hidrodinâmico nos eventos analisados e a relação obtida a partir de um hidrograma lento e sintético no formato de rampa (linha preta). Neste trabalho, as vazões medidas correspondem às medições realizadas diretamente em campanhas de campo nas estações fluviométricas com uso de medidor acústico doppler (ADCP) e foram obtidas da base de dados do Hidroweb. A maior medição de vazão em Muçum foi medida no dia 20 de outubro de 2016, durante a passagem de uma cheia. Esse evento foi simulado no modelo hidrodinâmico a fim de verificar se o modelo seria capaz de captar as variações de níveis e vazões medidas em campo. O evento simulado pelo modelo hidrodinâmico (círculos laranjas na Figura 1) correspondeu as cotas simuladas de modo que o modelo se mostrou confiável na estimativa de vazões máximas.

Buscando avaliar o efeito do rio Guaporé, na curva-chave de Muçum, as vazões desse afluente foram duplicadas durante o evento de 2016, gerando um cenário fictício (círculos azuis na Figura 1). A comparação com o cenário original de 2016 mostra que o aumento da contribuição do Guaporé altera o comportamento do rio Taquari no posto fluviométrico Muçum, causando um remanso e uma incremento dos níveis para a mesma vazão. Os resultados também mostram a presença de laços durante eventos maiores (setembro de 2023 círculos roxos, novembro de 2023 círculos verdes e maio de 2024 círculos cinzas). Para uma mesma cota, as vazões podem variar de acordo com o momento da onda de cheia, isto é, entre a subida e descida do hidrograma, conforme descrito no estudo de curva-chave em laço de Marcuzzo *et al*. (2019). Além disso, quanto mais rápida é a cheia, maior é o laço

observado. Esse comportamento reforça a limitação de representar eventos extremos apenas por um único tramo de curva-chave. Na estação de Encantado o comportamento observado é semelhante. Os resultados considerando o hidrograma hipotético, com ascensão e recessão mais lenta, são apresentados pela linha contínua preta. Observa-se que neste caso o efeito de laço é menos evidente na equação potencial que exprime a relação nível do rio e a sua descarga líquida.

A Tabela 1 apresenta os valores estimados pelo modelo HEC-RAS e os valores estimados pela extrapolação da curva-chave oficial da estação. Na tabela os resultados indicam um erro entre cotas observadas e simuladas menores que 1 metro, porém estimativas de vazões cerca de 23% a 27% superiores àquelas estimadas pela curva chave disponibilizada no Hidroweb.

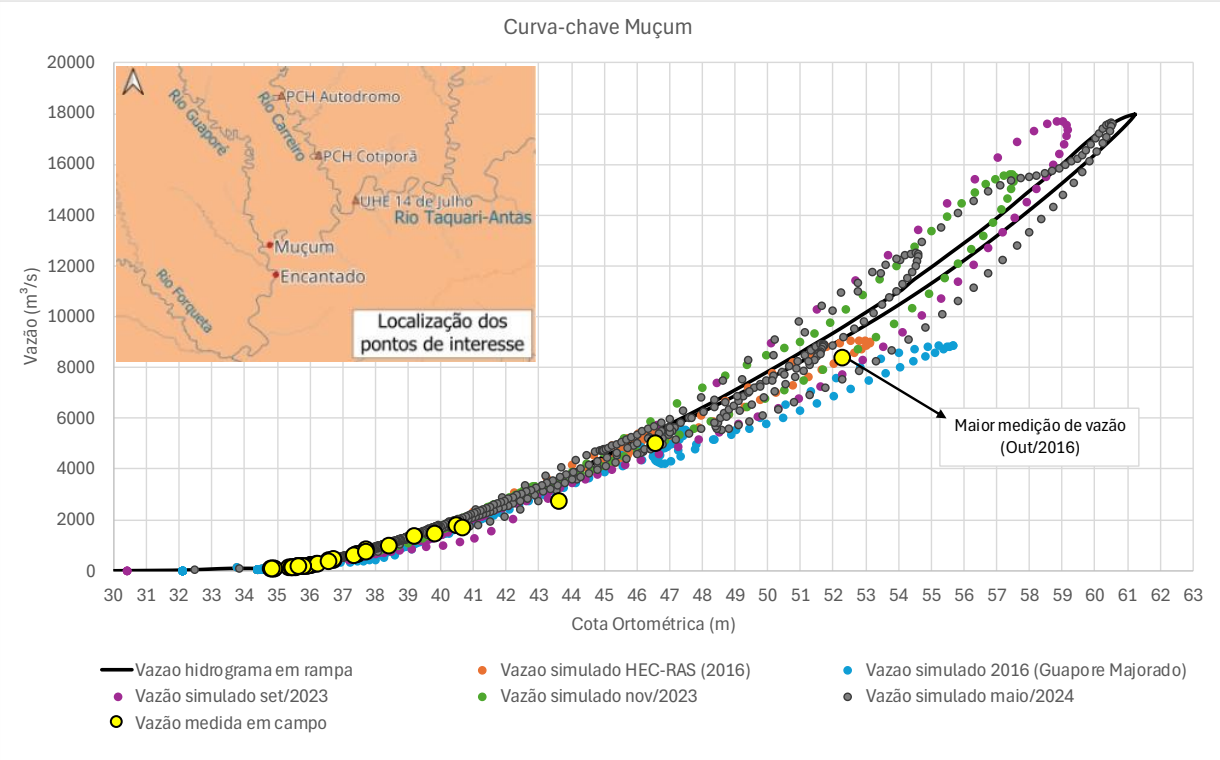


Figura 1. Resultados de simulações para a seção em Muçum – RS apresentando a relação cota – vazão para os diferentes cenários simulados. Em que a linha preta representa um hidrograma lento, em rampa; os pontos laranjas são a relação cota vazão do evento de 2016 cujo vazão foi medida em campanha de campo; os pontos azuis apresentam os resultados considerando o rio Guaporé majorado, para avaliar o efeito de remanso no ponto analisado. os pontos lilás, verde e cinza apresentam os resultados dos eventos extremos de novembro/2023, setembro/2023 e maio/2024; e os círculos amarelos apresentam as vazões e cotas medidas em campanhas de campo; Fonte: autoria própria.

Tabela 1. Resultados e comparações entre cotas e vazões observadas e simuladas durante os eventos extremos que ocorreram no rio Taquari registrados na estação fluviométrica de Muçum. As cotas máximas são apresentadas em relação a cotas ortométricas.

Evento	Cota max. observada (m)	Cota max. simulada (m)	Diferença entre cota simulada e observada (m)	Vazão max. simulada (m³/s)	Vazão max. curva-chave* (m³/s)
set/2023	60.10	59.18	-0.92	17697	15092
nov/2023	57.01	57.55	0.54	15613	12165
mai/2024	59.99	60.53	0.54	17626	14568

*Vazão estimada com a curva-chave disponível no Hidroweb e seus respectivos períodos de validade, aplicada sobre a cota máxima da marca de cheias ou quando disponível medido no equipamento telemétrico.

CONCLUSÕES

A metodologia proposta se mostrou adequada para estimar vazões máximas em eventos extremos e para avaliar a extrapolação de curvas-chave com base em modelagem hidrodinâmica de um trecho de rio. Os resultados indicam que os eventos de setembro e novembro de 2023 e maio de 2024 ocorreram em faixas de cota superiores àquelas normalmente cobertas por campanhas de

medição de vazão. Dessa forma, a estimativa da vazão máxima por curva-chave tradicional depende de extrapolação, o que pode introduzir incertezas relevantes. A modelagem hidrodinâmica pode ser uma ferramenta complementar para reduzir essas incertezas, pois permite estimar a vazão a partir da reprodução dos níveis observados e da representação física do escoamento. A abordagem proposta pode contribuir para estudos na compreensão de cheias, dimensionamento de obras hidráulicas e na avaliação de risco em regiões sujeitas a eventos hidrológicos extremos. A vazão máxima do rio Taquari em Muçum, avaliada com apoio do modelo hidrodinâmico, se mostrou de 17% a 28 % maior do que a vazão estimada a partir da curva-chave que consta atualmente no sistema Hidroweb.

REFERÊNCIAS

Brêda, J. P. L. F., Cauduro Dias de Paiva, R., Siqueira, V. A., & Collischonn, W. (2023). Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers. Journal of Hydrology, 619. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129284

Brusa, L. C., & Clarke, R. T. (1999). "Erros envolvidos na estimativa da vazão máxima utilizando curva-chave: caso de estudo: bacia do rio Ibicui, RS". RBRH. Porto Alegre, RS. Vol. 4, n. 3 (jul./set. 1999), p. 91-95.

Clarke, R. T. (1999). "Uncertainty in the estimation of mean annual flood due to rating-curve indefinition". Journal of Hydrology, 222(1-4), 185-190.

Collischonn, W., Brêda, J. P. L. F., Wongchuig, S., Ruhoff, A., Paiva, R. C. D. D., Fan, F. M., ... & Ramalho, N. (2024). Unprecedented April-May 2024 rainfall in South Brazil sets new record. *Rbrh*, *29*, e50.

Collischonn, W., Fan, F. M., Possantti, I., Dornelles, F., Paiva, R., Medeiros, M. S., ... & Piccilli, D. G. A. (2025). The exceptional hydrological disaster of April-May 2024 in southern Brazil. *RBRH*, *30*, e1.

Di Baldassarre, G., & Claps, P. (2011). "A hydraulic study on the applicability of flood rating curves". Hydrology Research, 42(1), 10-19.

Domeneghetti, A., Castellarin, A., & Brath, A. (2012). "Assessing rating-curve uncertainty and its effects on hydraulic model calibration". Hydrology and Earth System Sciences, 16(4), 1191-1202. MOSLEY, M. P., &

Lima, S. G., Paiva, R. C. D., Fan, F. M., Collischonn, W., Medeiros, M. S., Oliveira, R. C., Camargo, P. L. B., Fioreze, A. P., Souza, S. A., & Araujo, A. A. (2025). Curvas-chave e incerteza nas estimativas de vazões extremas durante as cheias de 2023 e 2024 no Rio Grande do Sul. In Anais do XXVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (XXVI SBRH). (ABRHidro).

Marcuzzo, F. F. N.; Maldonado, L. H.; Souza, S. A. de. Curva-chave sob efeito de histerese: traçado e ajuste de curva-chave média e em laço. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23., 2019, Foz do Iguaçu, PR. Anais[...] Foz do Iguaçu: ABRH, 2019. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/21532 Acesso em: 19 jun. 2026.

Moraes, S. R., Collischonn, W., Turco, F., Rafael, B., Eckhardt, R., & Alegre, P. (2024). Revisão e consolidação da série histórica dos níveis das cheias do rio Taquari em Lajeado de 1939 a 2023.

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].

Sampaio-Medeiros, M.; Fan, F. M.; Paiva, R. C. D. Emergency forecasts for water levels in the Guaíba River during the 2024 unprecedented flood in South Brazil. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), accepted for publication (in press), 2025.

Vanelli, F. M., Monteiro, L. R., & Fan, F. M. (2018). "Curva-chave obtida por simulação hidrodinâmica". In Congreso Latinoamericano de Hidráulica (28.: 2018: Buenos Aires). Trabajos completos. Ezeida: Instituto Nacional del Agua, 2018.

Vieira, L. M. D. S., Sampaio, J. C. L., Costa, V. A. F., & Eleutério, J. C. (2022). "Assessing the effects of rating curve uncertainty in flood frequency analysis". RBRH, 27, e11.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece as bolsas de financiamento da "Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior" (CAPES) e do projeto "Aprimoramento de Sistema de Alerta de Cheias para o Rio Grande do Sul", TED parceria entre o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH-UFRGS) e o Serviço Geológico do Brasil (SGB).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), através do Convênio CAPES/UNESP Nº. 951420/2023. Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua pelo apoio técnico científico aportado até o momento."