ANÁLISE DE TENDÊNCIA DAS VAZÕES MÁXIMAS AFLUENTES À UHE MONTE CLARO E SEUS IMPACTOS NAS VAZÕES DECAMILENARES

Mariana Torres Machado 1 [1] ; Franciele Zanandrea [1] ; Gean Paulo Michel [1]

Palavras-Chave – Análise de tendência, Não-estacionariedade, Vazões de projeto.

INTRODUÇÃO

Diante das mudanças climáticas, as projeções estimam uma intensificação na ocorrência de eventos extremos, quanto sua magnitude e frequência, incluindo alterações na distribuição e probabilidade do regime pluviométrico (IPCC, 2023), contemplando desde estiagens cada vez mais severas até eventos de máximos acumulados, com riscos de inundações e às estruturas hidráulicas (Silva et al, 2025). Esse cenário acende um alerta quanto à potencial perda de estacionariedade das séries hidrológicas, de modo que a estimativa do comportamento hidrológico futuro já não pode mais ser fundamentada exclusivamente na série observada (ANA, 2016). Muitos autores já apontam que representações atuais dos processos hidrológicos devem considerar a não estacionariedade (Milly et al. 2015; Vasiliades et al, 2014; Khazaei, 2025) manifestada através de tendências, quebras estruturais ou alterações na variância dos dados (Salles et al., 2018). Um desdobramento disso é a incerteza sobre as vazões de projeto a serem adotadas no dimensionamento de estruturas, tendo em vista que metodologias tradicionais se apoiam na premissa de estacionariedade (Fluixá-Sanmartín et al., 2018). Emerge-se, assim, uma preocupação grave quanto à segurança de estruturas e potencial risco de subdimensionamento frente ao regime hidrológico futuro. Assim, o presente trabalho tem como objetivo investigar a tendência nas vazões máximas observadas afluentes à Usina Hidrelétrica (UHE) Monte Claro e os impactos nas vazões decamilenares ao longo da série histórica.

METODOLOGIA

A área de estudo se refere à UHE Monte Claro, localizada na bacia do Rio Taquari-Antas (RS), que recebe uma bacia afluente de 12 mil km². As estações fluviométricas utilizadas são apresentadas na Figura 1 em conjunto à delimitação da bacia, sendo composta uma série histórica de 84 anos de vazões médias diárias disponíveis no HidroWeb (ANA). De agosto/1942 a outubro/2001 foi utilizada a estação Monte Claro (86460000) e, a partir desta data, a UHE Monte Claro Barramento (86448000) que compôs a série até dezembro de 2004. Esses postos tinham o período em comum de 1995 a 2001, no qual foi averiguada alta similaridade, sendo consideradas séries equivalentes (mais de 95% dos dias apresentaram diferenças percentuais iguais ou inferiores a 5%). Os dias 01 até 03 de abril de 1997 foram os únicos que apresentaram altas discrepâncias (superiores à 50%). Nessa ocasião, os dados da estação 86448000 foram interpretados como falhas, diante do incremento expressivo nas vazões na ausência de acumulados pluviométricos significativos — nenhuma das estações pluviométricas levantadas (Figura 1) apresentou acumulado superior a 5,6 mm nos três dias.

O dia 26 de dezembro de 2004 marcou a data em que a operação da usina começou a interferir no regime fluviométrico, quando o monitoramento da estação UHE Monte Claro Barramento passou a registrar a defluência diária. A partir desse ponto, a afluência foi obtida pelo Sistema de Acompanhamento dos Reservatórios (SAR), proveniente do balanço hídrico no reservatório, como detalhado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) na Nota Técnica 0144/2018. Assim, foi composta a série histórica de vazões diárias de 1942-2026, sendo desconsideradas as falhas nas seguintes datas: 4-11/novembro de 1948; 17/agosto à 07/setembro de 1954; 01/janeiro a 31/março de 1978; 30/outubro até 01/novembro de 2014 e dia 23 de dezembro de 2014.

1) Universidade Federal Fluminense

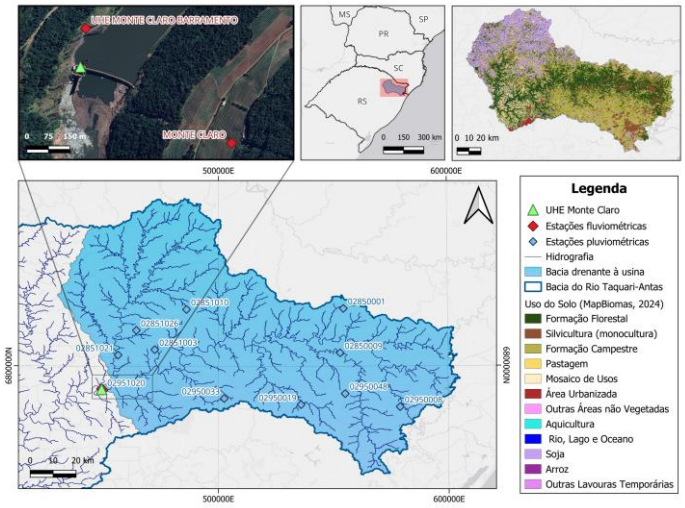


Figura 1. Bacia drenante à UHE Monte Claro. Fonte: autoria própria.

A partir dessa base, foi composta a série de vazões máximas anuais, desconsiderando os anos de 1942 e 2026 (incompletos) e 1978 (três meses de falha). A análise de tendência foi baseada no teste de Mann-Kendall (Kendall, 1955), utilizando-se o coeficiente de Theil-Sen's (Sen, 1968) para avaliação da magnitude, e as quebras estruturais foram identificadas pelo Teste de Pettitt (Pettitt, 1979). Os testes estatísticos foram executados em *Python*, a partir das bibliotecas de Hussain et al (2019; 2020).

A vazão de projeto decamilenar, critério de dimensionamento para empreendimentos hidrelétricos (ANA, 2016), foi calculada considerando diferentes recortes da série, com o objetivo de avaliar a influência da tendência e da quebra estrutural identificada sobre o critério de projeto em questão. Para a estimativa das vazões máximas associadas ao Tempo de Retorno (TR) foi utilizada a distribuição que melhor se ajustou à série observada, segundo os testes de Kolmogorov-Smirnov (KS) e Qui-quadrado. Foram avaliadas as distribuições de Gumbel, GEV, Log-Normal, Log-Pearson III, Gamma, Weibull e Exponencial, com base na biblioteca desenvolvida por Virtanen *et al.* (2020).

Por fim, buscando avaliar recomendações técnicas para adaptação dos critérios de projeto diante das mudanças climáticas, aplicou-se os fatores de majoração propostos por Paiva et al (2024), sendo recomendado a adoção do critério mais conservador entre: (i) aumento de 20% na vazão de projeto para TRs superiores a 10 anos; ou (ii) magnificação do TR em função da área de drenagem.

RESULTADOS

O teste de Mann-Kendall indicou evidência de crescimento na série, com significância estatística (p-valor de 0,0002), sendo que o coeficiente de Theil-Sen's apontou magnitude superior a 300m³/s por década. A Figura 2 apresenta o hidrograma das vazões máximas anuais, a média móvel de sete anos, em conjunto à reta de tendência estimada. Esse resultado é coerente com as estimativas de aumento das vazões máximas na região Sul do Brasil (Paiva et al., 2024).

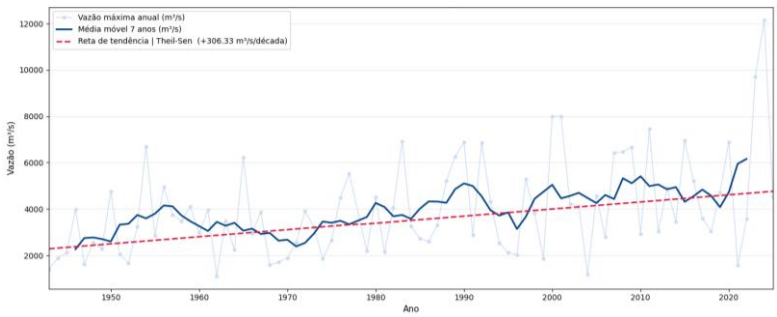


Figura 2. Hidrograma das vazões máximas anuais e tendência de crescimento. Fonte: autoria própria.

O teste de Pettitt identificou uma quebra estrutural em 1976 (p-valor de 0,0019), resultado similar ao encontrado por Detzel (2018) ao avaliar vazões médias afluentes a essa mesma usina. Com base nesse resultado, a análise sobre as vazões decamilenares considerou os seguintes intervalos: (i) divisão da série em relação ao ano de quebra em (1943-1976) e (1976-2025), para avaliar a influência da ruptura sobre as vazões de projeto; (ii) série de vazões máximas anuais completas (1943-2025), considerando que essa seria a utilizada hoje (2026) para o dimensionamento de uma estrutura; e (iii) (1943-2000), estimada como a série que embasou o dimensionamento da usina, que começou a operar em 2004.

Para a estimativa das vazões decamilenares utilizou-se as distribuições com melhores resultados nos testes de aderência, sendo elas Log-Normal e Log-Pearson III. A distribuição de Gumbel também foi incluída, visto que é amplamente utilizada para essa finalidade (Nobre *et al,* 2021). A Tabela 1 apresenta as vazões decamilenares, em conjunto às médias e desvios padrão de cada período.

Tabela 1 – Vazões decamilenares

Período	Média (m³/s)	Desvio padrão	Vazão decamilenar (m³/s)		
			Log-Normal	Log-Pearson III	Gumbel
(i) (1943-1976)	3.061,37	1.343,00	13.842,9	13.520,6	11.853,0
(i) (1976-2025)	4.651,87	2.252,36	25.868,2	20.094,4	19.550,4
(ii) (1943-2025)	3.994,32	2.089,25	23.329,1	22.881,0	17.007,0
(iii) (1943-2000)	3.497,98	1.655,47	17.501,2	18.593,5	14.027,2

Em todas as distribuições consideradas a vazão decamilenar apresentou variação significativa entre os períodos, alcançando maiores magnitudes nos recortes mais recentes, o que também é refletido nas médias calculadas. O critério de projeto para o período mais antigo (1943-1976) demonstra como estruturas dimensionadas na década de 70 podem estar subdimensionadas para o regime hidrológico atual, tendo em vista que os recortes mais recentes indicam vazões máximas de maior magnitude. Destaca-se ainda a proximidade das vazões decamilenares obtidas para a série de 1943-1976 em relação à vazão máxima registrada no evento extremo de 02 de maio de 2024 (12 mil m³/s).

Em relação ao período de 1943-2000, foi observado um aumento de 15-20% quando assume-se a série completa de 1943-2025, sendo essa diferença ainda mais significativa quando compara-se ao recorte a partir da quebra estrutural de 1976-2025, chegando a variações de até 30% nas distribuições de Log-Normal e Gumbel. Como reflexo disso, a vazão de projeto atual da UHE Monte Claro, de 17.076 m³/s (ONS, 2025), se mostra inferior em comparação às vazões decamilenares dos períodos mais recentes, refletindo o subdimensionado da usina em análise para o regime hidrológico atual. A distribuição de Log-Pearson III, diferente das demais, indica uma redução no período após a quebra em comparação à série completa, o que está associado ao coeficiente de assimetria negativo neste recorte, que impõe, segundo England et al. (2019), um limite superior para a extrapolação.

A Tabela 2 apresenta os resultados para os critérios de projeto a partir da admissão dos fatores de majoração propostos. Os fatores revisados aplicados para a década de 2000 (1943-2000) situam-se próximos às vazões previstas pelos métodos tradicionais para os recortes mais recentes. Da mesma forma, utilizando a série histórica completa e usando os fatores majorados, o resultado fica aproximadamente na mesma ordem de grandeza em relação aos fatores originais no recorte mais recente que contempla a quebra estrutural (1976-2025). Esses aspectos refletem o aumento prático do grau de segurança no dimensionamento, apontando boa aplicabilidade, neste caso, para adaptação às mudanças climáticas e à não estacionariedade já observada.

Tabela 2 – Vazões decamilenares majoradas

Período	Vazão decamilenar (m³/s)		
	Log-Normal	Log-Pearson III	Gumbel
(i) (1943-1976)	17.431,1	16.892,7	14.223,6
(i) (1976-2025)	33.676,9	24.123,5	23.460,5
(ii) (1943-2025)	30.639,4	29.858,1	20.420,9
(iii) (1943-2000)	22.408,6	24.295,6	16.832,6

CONCLUSÃO

O teste de Mann-Kendall indicou tendência significativa de crescimento das vazões máximas, com coeficiente de Theil-Sen's superior a 300 m³/s por década, evidenciando a influência da não estacionariedade na região; ademais, o teste de Pettitt identificou uma quebra estrutural em 1976, que influenciou significativamente nas vazões decamilenares. Os resultados evidenciaram o aumento das vazões de projeto nos períodos mais recentes, sendo esse incremento ainda mais expressivo quando considerada a série posterior à quebra estrutural identificada, sugerindo o possível subdimensionamento de estruturas projetadas com base em séries anteriores ao ponto de quebra.

Torna-se fundamental, portanto, a atualização periódica dos estudos hidrológicos e revisão dos critérios de projeto, incorporando recortes mais recentes e avaliando a aplicabilidade de técnicas de detecção de quebras estruturais para subsidiar o dimensionamento de obras hidráulicas com base em séries representativas das condições hidrológicas atuais.

REFERÊNCIAS

ANA. (2016). Diretrizes para a Elaboração de Projetos de Barragens. In: Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, Volume V. ANA, Brasília/DF, 156 p.
DETZEL, Daniel Henrique Marco et al. (2018). O comportamento (não) estacionário das vazões afluentes às UHEs do SIN. Anais do XI Congresso Brasileiro de Planejamento Energético (CBPE), Cuiabá, Brasil.
ENGLAND JR., John F. et al (2018). Guidelines for Determining Flood Flow Frequency—Bulletin 17C. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 4, Chapter B5. U.S. Geological Survey, USA.
FLUIXÁ-SANMARTÍN, J.; et al. (2018). "Climate Change Impacts on Dam Safety". Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 18, p. 2471–2488.
HUSSAIN SHOUROV, M. M. (2020). pyHomogeneity: a Python package for homogeneity tests (v1.1). Zenodo. doi:10.5281/zenodo.3785287.
HUSSAIN, M. M.; MAHMUD, I. (2019). pyMannKendall: a python package for non parametric Mann Kendall family of trend tests". Journal of Open Source Software, v.4, n.39, p.1556. doi:10.21105/joss.01556.
IPCC. (2023). Climate change widespread, rapid, and intensifying – IPCC. Sixth Assessment Report (AR6), Working Group I – The Physical Science Basis. IPCC, Geneva, Switzerland.
KENDALL, M. G. (1955). Rank Correlation Methods. Griffin, London, 196 p.
KHAZAEI, B. et al. (2025). "A Proposed Method to Estimate Climate Change Impacts on Dam Spillway Design". Journal of Flood Risk Management, v. 18, n. 2.
MILLY, P. C. D. (2015). "On Critiques of 'Stationarity Is Dead: Whither Water Management?'". Water Resources Research, v. 51.
NOBRE, Maria Rianne Pereira et al (2021). Estudo de vazões máximas de projeto usando uma distribuição de Gumbel. Research, Society and Development, v. 10, n. 12, e140101220098.
ONS (2025). Cadastro de Informações Operacionais Hidráulicas da Bacia do Rio Jacuí. Manual de Procedimentos da Operação, Módulo 5, Submódulo 5.11, Código CD-OR.AS.JAC, Revisão 27, Item 2.3. Vigência: 16/12/2025.
ONS. (2024). Metodologia de Reconstituição e Tratamento das Vazões Naturais. Nota Técnica ONS NT 0144/2018.
PAIVA, R.; et al (2024). Critérios hidrológicos para adaptação à mudança climática: Chuvas e cheias extremas na Região Sul do Brasil. Nota Técnica, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS.
PETTITT, A. N. (1979). "A Non-parametric Approach to the Change-point Problem". Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics), v.28, n.2, pp. 126–135.
SALLES, R.; et al (2019). "Nonstationary Time Series Transformation Methods: An Experimental Review". Knowledge-Based Systems, v. 164, p. 274–291.
SILVA, J. M. M.; DETZEL, D. H. M. (2025). "Impacto das Mudanças Climáticas nas Vazões do Alto Rio Iguaçu" in Anais do XXVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2025.
SEN, P. K. (1968). "Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau". Journal of the American Statistical Association, v.63, n.324, pp. 1379–1389.
VASILIADES, L.; et al (2015). "Nonstationary Frequency Analysis of Annual Maximum Rainfall Using Climate Covariates". Water Resources Management, v. 29, p. 339-358.
VIRTANEN, et al. P. (2020). "SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python". Nature Methods, v.17, n.3, pp. 261–272. doi:10.1038/s41592-019-0686-2.