ANÁLISE DE INCERTEZA ASSOCIADA AO MÉTODO DE MAPEAMENTO EMPÍRICO DE QUANTIS

Mateus Seiji Saito [1] ; Jeferson Schreiner Junior [2]; Ana Harumi de Paula Soares [3] & Daniel Henrique Marco Detzel [4]

Palavras-Chave – Análise de frequência de cheias, Não-estacionariedade, Análise de incerteza.

INTRODUÇÃO

A definição de vazões de projeto é um grande desafio para a engenharia, devido às incertezas associadas a esse tipo de estimativa. De modo geral, os estudos voltados a esta finalidade podem ser enquadrados em dois cenários: aquele onde não há disponibilidade de dados de vazão observados, e aquele em que séries históricas estão disponíveis. O presente estudo participa do segundo cenário, com uma série de dados de tamanho amostral considerada suficiente para possibilitar estimativas por análises de frequência de cheias. Mesmo neste contexto, há diversas incertezas associadas; entre elas se destacam a escolha da distribuição estatística, do método de estimação de parâmetros e a condução de estimativas nos casos em que a série de dados apresenta tendências.

Para o último tipo de incerteza, Wosniack e Detzel (2026), em um estudo recente, propõem o método de Mapeamento Empírico de Quantis (MEQ) para a consideração de tendências de séries hidrológicas nas análises de frequência de cheias. Esse método propaga o padrão hidrológico mais atual da série de vazão para o período histórico anterior. As análises conduzidas pelos autores indicam que, entre as 152 séries abordadas, 70 apresentam tendência significativa. Para 8 usinas hidrelétricas verificou-se possível subestimação da vazão de projeto do vertedor, comparando o método de estimativa tradicional com o MEQ. Considerando a importância da aplicação das práticas mais recentes na estimativa de vazões de projeto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise de incerteza do método MEQ, por meio de abordagem baseada em estimativa paramétrica e *bootstrap* não-paramétrico.

METODOLOGIA

A área de estudo utilizada tem como exutório o ponto definido pela estação fluviométrica Turvo (código 81125000), localizada no rio Turvo, Estado do Paraná, com área de drenagem de 423 km². A série de vazões máximas anuais apresenta extensão da série de 78 anos (1946-2023), com média de 40,7 m³/s e coeficiente de variação de 43%. Por meio do teste *Mann-Kendall* verificou-se tendência de aumento significativa na série de dados (p-valor < 5%).

O processo de aplicação do MEQ se inicia pela identificação do ponto de quebra na série de dados, aqui conduzida pelo teste de Pettitt. A partir deste ponto, a série é dividida entre dois segmentos: o anterior ao ponto de quebra (série a ser corrigida), e o posterior (série com padrão hidrológico mais recente). Obtém-se as funções de probabilidades acumuladas empíricas para ambos os segmentos mencionados e, em seguida, procede-se à correção da série de dados anterior ao ponto de quebra com base na função acumulada do segmento mais recente. Ao final, ambas as séries são agregadas

1) PPGERHA/UFPR, Av. Cel. Francisco H. dos Santos nº 100, mateussaito@hotmail.com
2) UFPR. Av. Cel. Francisco H. dos Santos nº 100, jeferson.schreiner@hotmail.com
3) UFPR. Av. Cel. Francisco H. dos Santos nº 100, anaharumips@gmail.com
4) UFPR, Departamento de Hidráulica e Saneamento, detzel@ufpr.br

novamente e prossegue-se à condução usual da análise de frequência de cheias. Para uma descrição mais abrangente do método MEQ, recomenda-se a consulta a Wosniack e Detzel (2026).

A distribuição estatística escolhida para a condução do presente estudo foi a de Gumbel, com parâmetros estimados pelo método dos momentos-L (MML) (Naghettini, Pinto, 2007). Por meio de análises visuais da função de distribuição acumulada, diagrama quantil-quantil e teste de Kolmogorov-Smirnov (Massey, 1951), verificou-se que a distribuição Gumbel se ajusta de forma satisfatória (p-valor > 5%) a distribuição da amostra de dados.

Uma descrição do método de estimativa paramétrica de incerteza para a distribuição Gumbel, estimada por MML, pode ser encontrada em Naghettini e Pinto (2007). Essa estimativa é baseada no erro padrão da estimativa (S_T), expresso pela equação (1), em que N é o tamanho da amostra, α é o parâmetro de escala da distribuição e W é a derivada parcial da função de quantis da distribuição Gumbel.

$$S_T^2 = \frac{\alpha^2}{N} \cdot (1{,}1128 + 0{,}4574 \cdot W + 0{,}8046 \cdot W^2) \quad (1)$$

O método *bootstrap* não-paramétrico (Khan, Rahman, Karim, 2023) consiste na geração de n reamostragens da série de dados original, obtidas por sorteio com repetição. Em seguida, para cada reamostragem é ajustada a distribuição escolhida e são calculados os quantis de análise. A partir da amostra de quantis, baseada nas n reamostragens geradas, são calculados intervalos de confiança.

Os métodos descritos para quantificação de incerteza foram aplicados na série de dados original e transformada pelo MEQ. Foram geradas 10.000 reamostragens de dados para o *bootstrap*, e os intervalos de confianças foram calculados com significância de 5% para os dois métodos. Foram escolhidos os quantis com tempos de retorno (TR) entre 10 e 10000 anos. Para analisar a incerteza associada a cada TR foi utilizado uma medida de incerteza relativa (IR), calculado pela equação (2).

$$IR\ (\%) = \frac{Y''_{95} - Y'_5}{Y} \cdot 100 \quad (2)$$

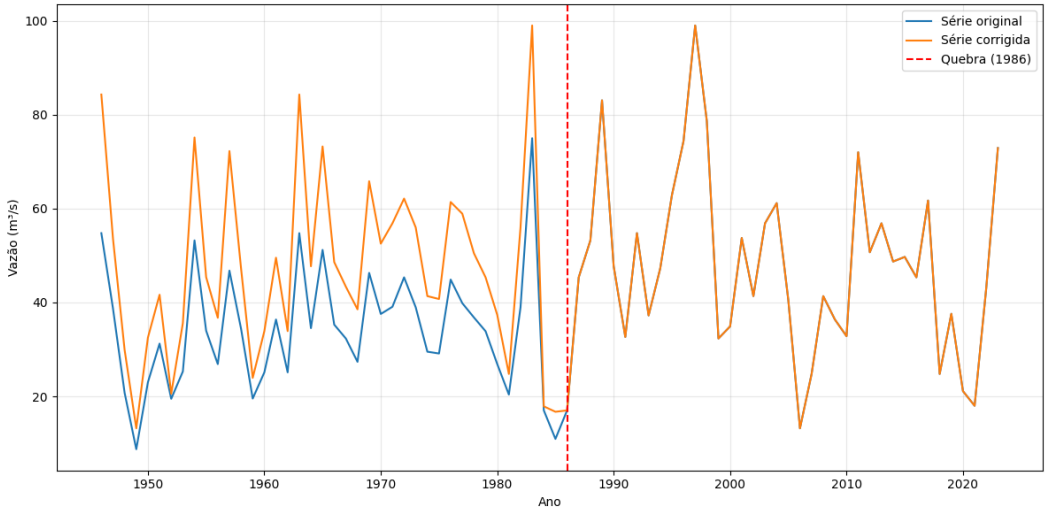
Onde Y'_{95} e Y'_5 representam os limites superior e inferior do intervalo de confiança, estimados pelos métodos de quantificação de incerteza, e Y representa o quantil estimado com base na série histórica.

RESULTADOS

Na Figura 1 está apresentado a série de dados original e corrigida pelo método MEQ. Nota-se que o ponto de quebra foi identificado no ano de 1986. A correção da série causou mudanças em algumas propriedades estatísticas da série, com aumento na média para 47,60 m³/s e uma discreta redução do coeficiente de variação para 40%.

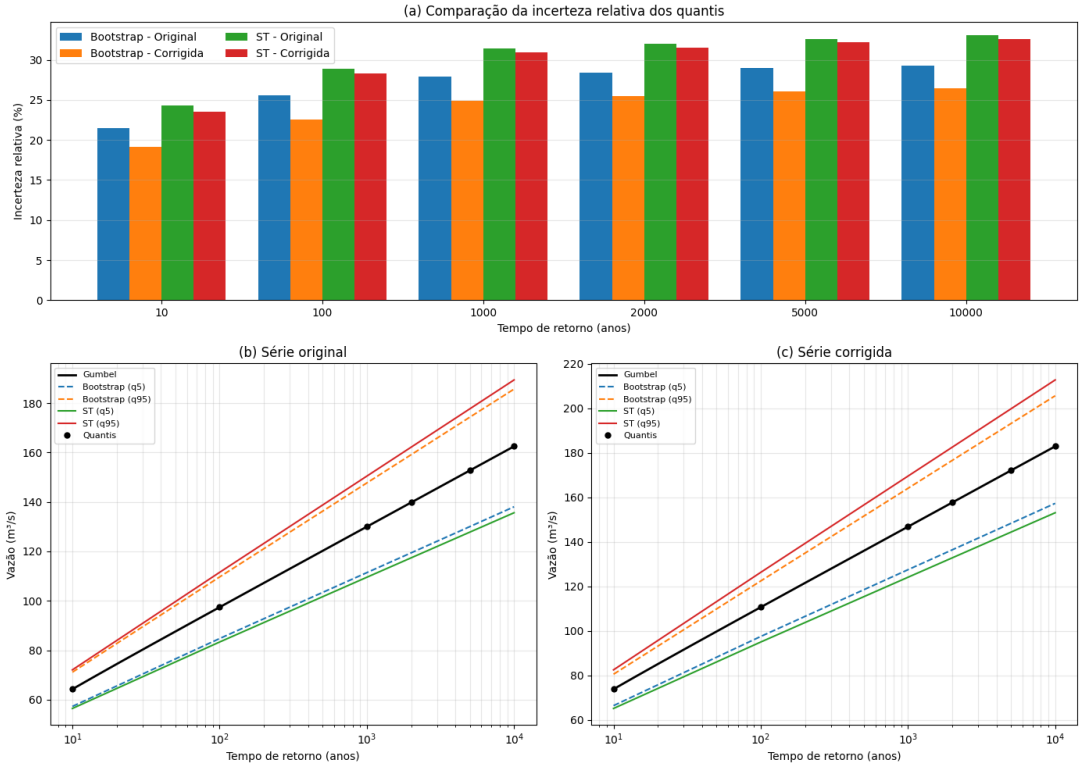
Os resultados para a estimativa de incerteza estão apresentados na Figura 2. Inicialmente, é possível verificar que o método baseado em estimativa paramétrica apresentou intervalos de confiança sistematicamente maiores que o método baseado em *bootstrap*. Essa diferença é de cerca de 23% para a série corrigida e de 13% para a série original. Entretando, os dois métodos apresentam variações consistentes entre si, com aumentos na incerteza relativa proporcionais conforme o aumento dos tempos de retorno.

Figura 1 – Série de dados original e corrigida pelo método MEQ e quebra identificada



Outro aspecto que pode ser observado é que houve uma redução na incerteza relativa da série corrigida, em relação a série original. No caso do método de estimativa paramétrica, essa redução é pouco expressiva e deve ter ocorrido pelo aumento dos valores de vazão nos quantis da série corrigida. Nas estimativas conduzidas por *bootstrap*, verifica-se também reduções pouco expressivas, girando em torno de 3%, na incerteza relativa dos quantis. Uma possível causa para essa redução pode estar associada a redução da variabilidade da série transformada, proporcionando uma gama menor de variações de reamostragens para a aplicação do método.

Figura 2 – a) Comparação entre incertezas relativas, b) estimativas de incerteza para a série original e c) estimativas de incerteza para a série corrigida



CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas durante a elaboração deste trabalho estão apresentadas nos tópicos adiante:

- A aplicação do método de Mapeamento Empírico de Quantis (MEQ) causou um aumento na média e uma redução discreta no coeficiente de variação.

- Os dois métodos de estimativa de incerteza, paramétrica baseada na distribuição Gumbel, estimada pelo método dos momentos-L, e por *bootstrap* não-paramétrico, apresentaram estimativas de incerteza coerentes entre si. Entretando as estimativas paramétricas resultaram em intervalos de confiança maiores, cerca de 23% para a série transformada e 13% para a série original.

- As incertezas relativas associadas aos quantis da série transformada pelo MEQ foram menores que os da série original. Essas reduções, no entanto, são pouco expressivas e podem ter sido causadas pelo aumento valores de quantis, no caso da estimativa paramétrica, e pela redução da variabilidade da série, para a estimativa por *bootstrap*.

- Por fim, mesmo pouco expressivos, os resultados indicam que a aplicação do MEQ reduziu a variabilidade da série de dados utilizada e apresentou redução nas incertezas associadas a estimativas de quantis. Com isso, recomenda-se a realização de testes em outras séries de dados, com variabilidades maiores para verificar o efeito da aplicação do MEQ. Para a estimativa de incerteza podem ser utilizados os métodos descritos neste estudo.

REFERÊNCIAS

KHAN, Z.; RAHMAN, A.; KARIM, F. (2023). "*An Assessment of Uncertainties in Flood Frequency Estimation Using Bootstrapping and Monte Carlo Simulation*". Hydrology, v.10, n.18. DOI: 10.3390/hydrology10010018.

MASSEY, F. J., Jr. (1951). "*The Kolmogorov–Smirnov test for goodness of fit*". Journal of the American Statistical Association, 46(253), pp. 68–78.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. (2007). *Hidrologia estatística*. CPRM, Brasília, 561 p.

WOSNIACK, L. M.; DETZEL, D. H. M. (2026). "*Assessing design floods for Brazilian hydropower plants spillways under nonstationarity conditions*". Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), v.31, e12.

AGRADECIMENTOS

O autor principal deste trabalho gostaria de agradecer a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos, auxiliando a elaboração desta pesquisa.