AVALIAÇÃO DAS INCERTEZAS ASSOCIADAS À ESTIMATIVA DA PMP ESTATÍSTICA COM EMPREGO DE SÉRIES SINTÉTICAS

Vitor Matheus Passos Martins [1]; Thales Basílio da Circuncisão[2]

Palavras-Chave – Chuvas Extremas, Aleatoriedade, Precipitação.

INTRODUÇÃO

A Precipitação Máxima Provável (PMP) é definida pela Organização Meteorológica Mundial (WMO) como a maior altura de precipitação meteorologicamente possível para uma dada duração, sobre uma determinada área e em certa época do ano, desconsideradas tendências climáticas de longo prazo (WMO, 2009). Sua estimativa subsidia, quando aplicável, o dimensionamento de estruturas hidráulicas de reservação e extravasamento — notadamente vertedouros de barragens de alto risco associado — e é exigida por instrumentos normativos nacionais e internacionais, como a Resolução ANM nº 95/2022 e a NBR 13.028/2025, além de orientar o planejamento estratégico de longo prazo em setores público e privado.

A relevância da quantificação rigorosa da PMP é reforçada tanto pela variabilidade natural do clima quanto pelas alterações de longo termo associadas a forçantes antropogênicas, que vêm modificando os regimes de precipitação extrema em diversas regiões do planeta (Kunkel et al., 2013; IPCC, 2021). Nesse contexto, o NASEM (2024) recomenda que as metodologias contemporâneas de estimativa da PMP superem as abordagens estritamente determinísticas — consolidadas no Método Estatístico de Hershfield (1961a; 1961b; 1965) e no Método Hidrometeorológico sistematizado pela WMO (2009) — em favor de abordagens probabilísticas, capazes de incorporar a não estacionariedade climática e a propagação de incertezas oriundas de Modelos Climáticos Globais (GCMs) e Regionais (RCMs).

Assim, o presente estudo tem por objetivo discutir a necessidade de incorporação explícita de incertezas na estimativa da PMP estatística, apresentar as principais fontes de incerteza envolvidas — amostral, paramétrica, de modelo e climática — e explorar o potencial do emprego de séries sintéticas como ferramenta para sua quantificação no contexto da hidrologia de extremos brasileira.

DISCUSSÃO

A estimativa determinística da PMP pelo Método Estatístico se dá a partir da avaliação das séries máximas locais em estações de interesse, definição do valor esperado e variância desses máximos com a correção (estimativa desses valores sem o máximo da série), definição dos fatores de frequência locais (Ks), delimitação da envoltória regional dos fatores de frequência e a estimativa da PMP em si, a partir da Equação 1, proposta por Hershfield (1965) como o valor limite superior das precipitações extremas estimadas a partir do fator de frequência, como descreve a Equação 1.

$$X_{PMP} = \overline{X_n} + K_M \, . S_n \qquad (1)$$

em que:

1) Afiliação: Engenheiro Civil e Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG Campus Pampulha, vitorm601@gmail.com
2) Afiliação: Engenheiro Civil e Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG Campus Pampulha, thalesbc98@gmail.com

- X_{PMP} é a estimativa determinística da PMP;

- $\overline{X_n}$ equivale à média das precipitações máximas em uma estação, para determinada duração;

- K_M é o fator de frequência; e

- S_n equivale à estimativa do desvio padrão das precipitações máximas em uma estação, para determinada duração.

Ou seja, com o emprego do Método Estatístico é possível a estimativa determinística do valor da PMP em dado local. Contudo, é importante destacar que, embora o método de Hershfield seja apresentado como "estatístico", a estimativa resultante carece de um tempo de retorno formalmente associado. Koutsoyiannis (1999) demonstrou que o fator de frequência Km = 15 proposto por Hershfield (1961b) equivale, sob a hipótese de distribuição GEV, a quantis com tempos de retorno de 60.000 anos, o que evidencia o caráter empírico, e não probabilístico em sentido estrito, do método.

Tal constatação reforça a necessidade de tratamento explícito das incertezas, tanto aleatórias (associadas à variabilidade natural do processo) quanto epistêmicas (associadas ao desconhecimento do modelo, parâmetros e amostra) (Merz & Thieken, 2005; Micovic et al., 2015).

Vale ressaltar que o processo modelado (geração de chuvas intensas) é estocástico, ou seja, a variável em questão é aleatória, sujeita à variabilidade natural e dos processos meteorológicos que a regem. Assim sendo, o fato de tratá-la como um valor determinístico pode ocasionar em estimativas errôneas. Além disso, é de suma importância a avaliação da consistência e da série histórica das estações de monitoramento, sobretudo o comprimento de dados e o “n” amostral.

Com relação à variabilidade de natureza epistêmica, a definição do modelo utilizado deve ser realizado com parcimônia e julgamento do ponto de vista teórico. Cada ferramenta estatística, como os testes de hipóteses, critérios de informação, distribuições de probabilidade, etc. devem ser entendidas e, para além do resultado dos testes, é preponderante o correto emprego da teoria das probabilidades.

Assim sendo, percebe-se que o procedimento de estimativa da PMP a partir do método de Hershfield, apesar de bastante útil e de fácil aplicação, não tem a capacidade de incorporar, em uma estimativa determinística, a variabilidade relacionada à natureza do processo físico em modelagem. Assim sendo, ao se estimar valores de PMP, o processo mais coerente é tratá-la como uma variável aleatória, ou seja, relacionada a uma distribuição de probabilidades.

Martins & Pinto (2026) propõem uma abordagem probabilística para a estimativa pontual da PMP em uma região tropical do Norte do Brasil, com o objetivo de aprimorar a representação da variabilidade e das incertezas associadas a eventos extremos de precipitação. As séries de máximos anuais foram simuladas estocasticamente pelo Método de Monte Carlo, condicionadas a distribuições de valores extremos ajustadas a registros históricos de postos pluviométricos. A partir das séries sintéticas resultantes, foram derivados fatores de frequência empíricos, posteriormente empregados na estimativa probabilística da PMP. Isso evidencia que é possível se avaliar as incertezas e, com as séries sintéticas geradas, se avaliar a incerteza em torno do valor da PMP determinística.

CONCLUSÕES

Portanto, vale registrar que o emprego de estimativas de PMP sem a avaliação do nível de incertezas associado pode conduzir a dimensionamentos que subestimem as vazões afluentes, o que aumenta o risco associado, ou a dimensionamento que superestimem tais valores, o que leva a gastos desnecessários e obras menos sustentáveis. Para que isso seja evitado, as aplicações diretas em engenharia devem ser munidas e incensadas no processo físico a ser modelado, além dos conceitos estatísticos que baseiam a estimativa.

REFERÊNCIAS

HERSHFIELD, D. M. (1961a). *Technical Paper Nº. 40: Rainfall Frequency Atlas of the United States*, Department of Commerce. Washington, DC: Weather Bureau.

HERSHFIELD, D. M. (1961b). *Estimating the probable maximum precipitation. Journal of the Hydraulics Division*, 87(5), 99-106. https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000651.

HERSHFIELD, D. M. (1965). *Method for estimating probable maximum rainfall.* Journal - American Water Works Association, 57(8), 965-972. https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1965.tb01486.x.

IPCC (2021) — *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.

KOUTSOYIANNIS, D. (1999) — *A probabilistic view of Hershfield's method for estimating probable maximum precipitation*. Water Resources Research, v. 35, n. 4, p. 1313–1322.

KUNKEL, K. E. *et al.* (2013) — *Probable maximum precipitation and climate change*. Geophysical Research Letters, v. 40, p. 1402–1408.

MARTINS, V. M. P., & PINTO, E. J. A. (2026). *Derivation of frequency factors for Probable Maximum Precipitation (PMP) estimation through stochastic simulation of annual precipitation maxima in tropical convective regions.* Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 31, e22. https://doi.org/10.1590/2318-0331.312620250148.

MERZ, B.; THIEKEN, A. H. (2005) — *Separating natural and epistemic uncertainty in flood frequency analysis*. Journal of Hydrology, v. 309, p. 114–132.

MICOVIC, Z.; SCHAEFER, M. G.; TAYLOR, G. H. (2015) — *Uncertainty analysis for probable maximum precipitation estimates*. Journal of Hydrology, v. 521, p. 360–373.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING AND MEDICINE – NASEM. (2024). *Modernizing Probable Maximum Precipitation Estimation.* Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/27460.

SALAS, J. D.; GAVILÁN, G.; SALAS, F. R.; JULIEN, P. Y.; ABDULLAH, J. (2014) — *Uncertainty of the PMP and PMF*. In: *Handbook of Engineering Hydrology*, CRC Press.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – WMO. (2009). *Manual on estimation of probable maximum precipitation (PMP)* (3rd ed., No. 1045, 257 p.). Geneva: WMO.