



# MÉTODOS ESTATÍSTICOS NA PREVISÃO DE CAUDAIS DE CHEIA. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Andreia GOMES<sup>1</sup>, Ana Margarida BENTO<sup>2</sup>, Maria Teresa VISEU<sup>3</sup>, Sandra MARTINS<sup>4</sup>

1. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro 1, 1959-007 Lisboa, Portugal, [a41777@alunos.isel.pt](mailto:a41777@alunos.isel.pt)

2. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, [abento@lnec.pt](mailto:abento@lnec.pt)  
3. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, [tviseu@lnec.pt](mailto:tviseu@lnec.pt)  
4. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro 1, 1959-007 Lisboa, Portugal, [smartins@isel.dec.pt](mailto:smartins@isel.dec.pt)

## RESUMO

A previsão do regime de caudais de cheia desempenha um papel importante na avaliação dos impactos de eventos hidrológicos extremos. A natureza estocástica e aleatória desses eventos induz à incessante procura de novas metodologias para as suas previsões. O objetivo do presente estudo consistiu na avaliação do desempenho de métodos estatísticos, nomeadamente o recentemente desenvolvido método modificado da média aritmética (MM modificado) e o método de melhor ajuste (MS), face à modelação hidrológica efetuada por recurso ao *software* HEC-HMS, na previsão de caudais cheias. A análise foi feita aos caudais de aproximação à ponte Duarte Pacheco, situada no rio Tâmega. Os caudais de cheia estimados pelo método MS mostraram diferenças relativas inferiores aos obtidos pelo modelo HEC-HMS, quando comparados com os resultados do método MM modificado. Por outro lado, os caudais estimados pelo método MM modificado apresentam uma melhor correlação com os gerados pelo HEC-HMS, o que reforça a viabilidade da sua adoção na previsão de caudais de cheia.

**Palavras-Chave:** análise estatística; caudais de cheia; HEC-HMS; MM modificado; MS.

## 1. INTRODUÇÃO

A recente intensificação de eventos de cheia, caracterizada por um aumento de frequência e magnitude, tem incrementado a consciência global sobre a vulnerabilidade das infraestruturas hidráulicas aos eventos hidrológicos. Em resultado da influência das alterações climáticas e do desenvolvimento socioeconómico local, a estimativa de caudais extremos continua a ser um aspecto de interesse crescente na investigação, bem como nas práticas de engenharia. De uma forma geral, são utilizados dois métodos principais na estimativa de valores fiáveis de caudais extremos que podem ocorrer num determinado local, nomeadamente, os métodos estatísticos e os métodos hidrológicos. Os primeiros consistem em ajustar funções de distribuição de probabilidade a séries de registos hidrológicos, enquanto que os segundos, permitem simular o processo de precipitação-escoamento em bacias hidrográficas, requerendo uma maior capacidade computacional.

## 2. ENQUADRAMENTO

A previsão de caudais por análise estatística é convencionalmente feita pela escolha da distribuição estatística que melhor se ajusta a uma dada série hidrológica (método de melhor ajuste - MS). Porém, nos últimos anos, têm sido realizados alguns estudos de investigação sobre a melhoria da aplicação de métodos estatísticos na previsão de caudais de cheia. No trabalho de Okoli et al (2018) foram propostos dois novos métodos: o método da média aritmética (MM) e o método da média ponderada (MA), que abordam a incerteza do modelo estatístico na seleção das funções de distribuição de probabilidade. Considerando um conjunto de distribuições estatísticas utilizadas em análises de séries de caudais, o método MM consiste na aplicação de uma média aritmética simples às estimativas de caudais obtidas por todas as distribuições candidatas, independentemente da qualidade do

ajuste das mesmas aos dados. O método MA atribui diferentes pesos às distribuições consideradas na estimativa, correspondendo os mais elevados às funções com melhor ajuste. A avaliação da qualidade do ajuste das distribuições probabilísticas é feita pelos testes analíticos de Kolmogorov-Smirnov, Qui-Quadrado e Anderson Darling, e pelo método gráfico Quantil-Quantil (Gráfico Q-Q).

Em Bento et. al (2020) é apresentada uma modificação ao método MM (designado por método MM modificado) que consistiu na aplicação da média aritmética simples às estimativas de caudais obtidas pelas distribuições que apresentam resultados satisfatórios aos testes analíticos e aos gráficos de avaliação da qualidade do ajustamento.

O presente estudo consiste, assim, numa análise de sensibilidade aos métodos estatísticos MS e MM modificado na previsão de caudais de cheia face à modelação hidrológica efetuada por recurso ao *software* HEC-HMS, desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers*. A análise foi efetuada considerando os caudais de aproximação à ponte Duarte Pacheco, localizada no rio Tâmega.

## 2.1. Caracterização Hidrográfica

O rio Tâmega é um afluente direito do rio Douro que nasce a norte de Monterrey, Verín (Espanha), e percorre cerca de 184,02 km com um declive médio de 17,44% até desaguar em Entre-os-Rios (Portugal). A uma distância de 3,8 km e 800 m a montante da foz encontram-se, respetivamente a albufeira do Torrão e a ponte Duarte Pacheco. A bacia hidrográfica (BH) do rio Tâmega é constituída principalmente por granitos e afins (68%), xistos (30%), ocorrendo igualmente quartzitos (1%) e possui uma área de aproximadamente 3310 km<sup>2</sup>, sendo 2637 km<sup>2</sup> pertencentes ao território nacional e apenas 673 km<sup>2</sup> ao território espanhol (SNIRH). O enquadramento geográfico da bacia do Tâmega, assim como o uso/ocupação do solo, estão representados na Fig. 1.

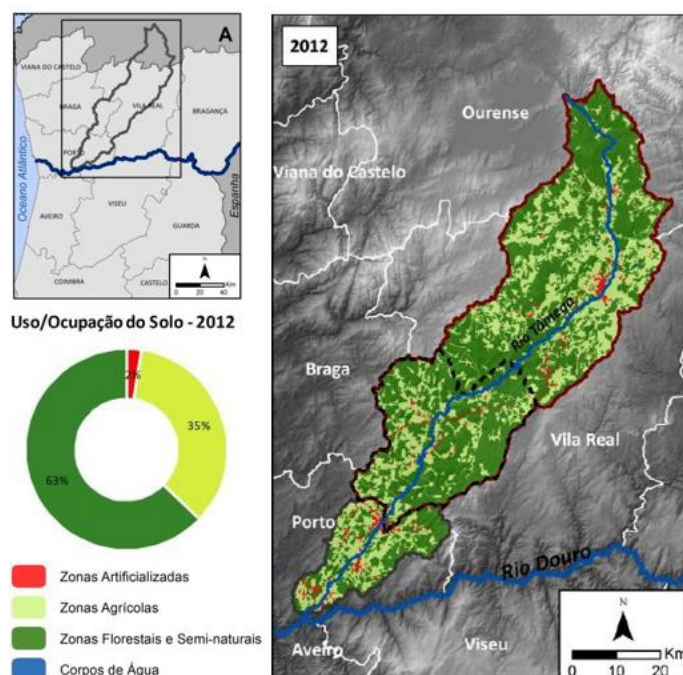


Fig. 1. Enquadramento geográfico e uso do solo da sub-bacia do Tâmega (adaptado de Martins, 2017).

O número de escoamento (CN) do *Soil Conservation Service* (SCS) da BH em estudo, foi calculado pela [Eq. 1], proposta por Chow et al. (1988), resultando no valor de 78,6.

$$CN = \frac{23CN_f}{10 + 0,23CN_f} \quad [\text{Eq. 1}]$$

O parâmetro  $CN_I$  corresponde à soma das médias ponderadas dos valores de  $CN$ , obtidos pela sobreposição das Cartas dos Solos de Portugal e de Ocupação do Solo, com as respetivas percentagens de ocupação do solo e o tipo de solo. A BH do Tâmega é constituída essencialmente por solos do tipo A e B.

O tempo de resposta ( $t_{lag}$ ) da bacia em estudo foi, por sua vez, determinado com base nas recomendações do SCS ( $t_{lag}=0.6t_c$ , sendo  $t_c$  o tempo de concentração da BH). O parâmetro  $t_c$  foi estimado através da equação do SCS, resultando num  $t_{lag}$  de 800,13 minutos.

### 2.1.1. Dados Meteorológicos e Hidrométricos

Os dados meteorológicos foram obtidos a partir da plataforma online da Agência Portuguesa do Ambiente, SNIRH, sendo o parâmetro de entrada do modelo hidrológico, a precipitação. A recolha dos dados foi feita na estação meteorológica de Entre-os-rios (07H/01UG). Os dados hidrométricos foram fornecidos pela entidade "Energias de Portugal (EDP)" e recolhidos na estação hidrométrica da albufeira do Torrão (07H/01A), que deu início ao seu funcionamento em 1988.

Devido a alguma indisponibilidade e/ou falta de qualidade de registos de precipitação horária no SNIRH, foram objecto de estudo, na presente investigação, as séries de precipitações máximas diárias para o período de 1988/1989 a 2008/2009, com a exceção dos seguintes anos hidrológicos: 2000/2001, 2001/2002, 2003/2004 e 2005/2006. Os caudais instantâneos máximos anuais para o período de 2008/2009 a 2018/2019 foram fornecidos pela EDP. Por forma a permitir a análise de sensibilidade, do presente estudo, bem como a obtenção de uma amostra de dimensão significativa para análise estatística, foi necessário proceder à extrapolação de caudais instantâneos máximos anuais para o período entre 1988/1989 e 2008/2009 pela técnica desenvolvida e validada em Bento et al. (2020), através dos caudais médios disponibilizados pelo SNIRH.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente estudo foram determinados os caudais de cheia correspondentes aos diferentes métodos (MS, MM modificado e HEC-HMS), como ilustrado na Fig. 2a. A informação para o uso do modelo HEC-HMS consistiu essencialmente nas características da bacia hidrográfica previamente determinadas e nos registos de precipitação diária. A modelação hidrológica baseia-se no hidrograma unitário do SCS. À série de caudais gerados pelo modelo HEC-HMS foram posteriormente associados períodos de retorno, resultando num intervalo entre 18 e 5845 anos, através da aplicação da função de probabilidade empírica de Weibull. A análise estatística efetuada aos caudais instantâneos máximos anuais para a mesma gama de períodos de retorno do modelo hidrológico, revelou que as distribuições com melhor qualidade de ajuste à série em causa foram a Log-Normal de 2 parâmetros (LN2), a Generalizada de Valores Extremos (GEV) e a Gama. A distribuição com melhor ajustamento foi a Gama, pelo que os caudais estimados pela mesma foram, no presente estudo, os estimados pelo método MS. Quanto ao método MM modificado, os caudais de cheia foram obtidos pela média aritmética dos valores estimados pelas distribuições LN2, GEV e Gama.

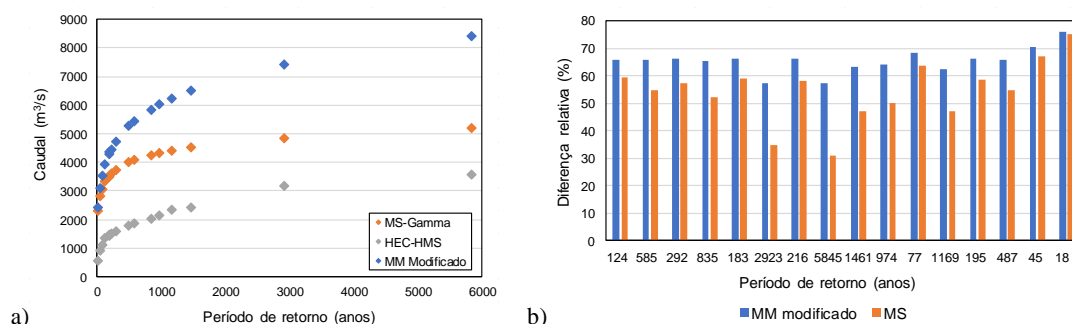


Fig. 2. Análise comparativa entre os caudais estimados pelos métodos MS, MM modificado e HEC-HMS: a) Caudal de cheia vs Período de retorno; b) Diferenças relativas, assumindo o HEC-HMS como referência.

Os valores dos caudais estimados pelo método MS variam de 2303,3 m³/s para 18 anos a 5190,0 m³/s para 5845 anos de período de retorno, enquanto que para o método MM modificado os caudais de cheia variaram entre 2418,2 m³/s e 8428,4 m³/s, respetivamente. Assumindo os caudais obtidos por recurso ao modelo HEC-HMS

como referência, variando entre 574,6 m<sup>3</sup>/s e 3582,0 m<sup>3</sup>/s, pode-se observar pela Fig. 2b que embora as diferenças relativas entre os modelos MS e HEC-HMS sejam de uma ordem de 11% inferior às obtidas entre os modelos MM modificado e HEC-HMS, nestas últimas os valores são mais constantes, apresentando um desvio relativamente a média das diferenças relativas de apenas 4%. Este facto e o apresentado na Fig. 3, mostram que os caudais estimados pelo método MM modificado apresentam uma maior correlação com os gerados pelo HEC-HMS, quando comparados com os obtidos pelo método MS, o que reforça a viabilidade na adopção do método MM modificado na previsão de caudais de cheia.

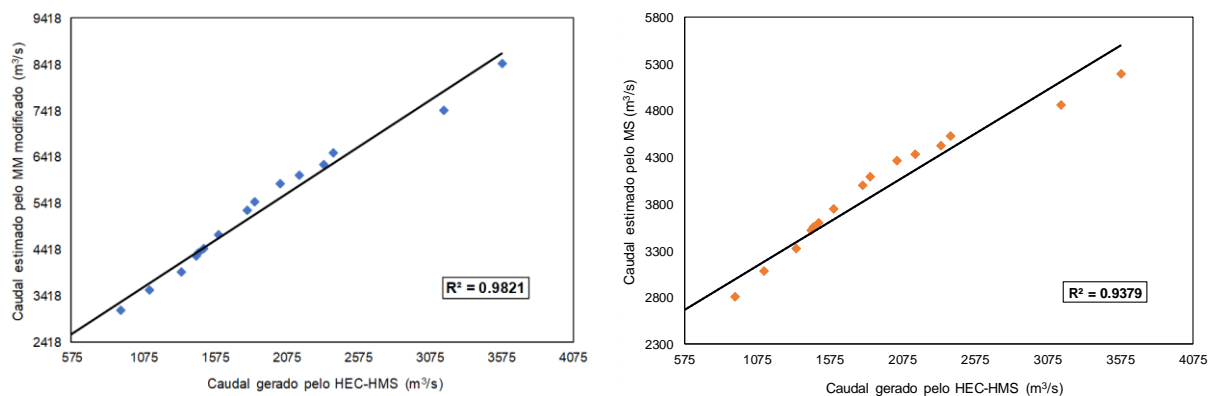


Fig. 3. Correlação linear entre os caudais estimados pelos métodos estatísticos e os gerados pelo HEC-HMS.

#### 4. CONCLUSÕES

O método MM modificado demonstrou uma melhor correlação com os valores de caudais de cheia obtidos pelo modelo HEC-HMS, apesar de uma maior sobrestimação destes quando comparados com os obtidos pelo método MS. A previsão dada pelo método MS resultou em caudais de ponta mais próximos dos gerados pelo HEC-HMS, com a exceção de caudais associados a períodos de retorno mais baixos. As diferenças na previsão dos caudais extremos entre as análises estatísticas, MS e MM modificado, e o modelo hidrológico adotado, HEC-HMS, poderiam ser reduzidas se as precipitações horárias substituíssem os dados de entrada considerados (precipitações diárias).

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos à entidade "Energias de Portugal (EDP)" pelo fornecimento de registos de dados hidrométricos. O segundo autor agradece à Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento através da bolsa de doutoramento PD/BD/127798/2016, no âmbito do Programa Doutoral INFRARISK.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bento, A., Gomes, A., Pêgo, J., Viseu, T. & Couto, L. (Under review). Improved assessment of maximum streamflow approaching a bridge over douro river. A case study.
- Martins, M. M. C. (2017). O risco de cheias na cidade de Amarante: cartografia de áreas inundáveis recorrendo à modelação hidráulica.
- Okoli, K., Breinl, K., Brandimarte, L., Botto, A., Volpi, E., & Di Baldassarre, G. (2018). Model averaging versus model selection: estimating design floods with uncertain river flow data. *Hydrological Sciences Journal*, 63(13-14), 1913-1926.

#### REFERÊNCIAS INTERNET

- Sistema Nacional de Informação dos Recursos Hídricos. Disponível em: < <https://snirh.apambiente.pt/>> Acesso em 12 de fevereiro de 2021.