SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS UTILIZANDO PROJEÇÕES DO CMIP6 E O MÉTODO DE MUSKINGUM-CUNGE OTIMIZADO VIA DEAP NA BACIA DO RIO BELÉM

Franz C. Gonçalves [1] ; Altair Rosa [2]; Maria C. Fava [3]; Marina B. Macedo[4] & Leonardo M. da C. Ribeiro [5]

RESUMO – Este artigo propõe uma abordagem inovadora de integração para simular cenários de inundação presentes e futuros na bacia do rio Belém - Curitiba, Paraná, Brasil) A metodologia combina o método de propagação hidrológica de Muskingum-Cunge (MC) com técnicas de otimização evolutiva (DEAP – *Distributed Evolutionary Algorithms in Python*) e projeções climáticas do CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*). Foram utilizados dados horários de precipitação do modelo ACCESS-CM2, considerando tanto o período atual (histórico) quanto cenários climáticos futuros baseados nas trajetórias de emissão SSP2-4.5 (2041–2060), SSP3-7.0 (2041–2060) e SSP5-8.5 (2081–2100). O modelo MC foi implementado em conjunto com o DEAP para otimizar automaticamente os parâmetros K e X, bem como o número de seções de vazão, garantindo uma representação mais precisa da propagação da onda de cheia sob diferentes condições climáticas. Os resultados indicam um aumento expressivo nos picos de vazão e a redução no tempo de pico, especialmente no cenário extremo SSP5-8.5. Essa dinâmica evidencia que a atual infraestrutura de drenagem urbana sofrerá severa sobrecarga, ampliando significativamente o mapeamento de áreas susceptíveis a inundações prolongadas ao longo da bacia.

Palavras-Chave – Mudanças climáticas, Muskingum-Cunge, DEAP

ABSTRACT– This paper proposes an innovative integration approach to simulate both present and future flood scenarios for the Belém River Basin - Curitiba, Paraná, Brazil. The methodology combines the Muskingum-Cunge (MC) hydrological routing method with evolutionary optimization techniques DEAP and climate projections from the CMIP6. Hourly precipitation data from the ACCESS-CM2 model were used, considering both the current (historical) period and future climate scenarios based on SSP2-4.5 (2041–2060), SSP3-7.0 (2041–2060) and SSP5-8.5 (2081–2100) emission pathways. The MC model was implemented with DEAP to automatically optimize the parameters K and X, as well as the number of flow sections, ensuring a more accurate representation of flood wave propagation under different climate conditions. The results indicate a significant increase in peak flows and a reduction in peak time, especially in the extreme SSP5-8.5 scenario. This dynamic shows that the current urban drainage infrastructure will suffer severe overload, significantly expanding the mapping of areas susceptible to prolonged flooding across the basin.

Keywords – Climate Change, Muskingum-Cunge, DEAP

1)Afiliação: Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, (34) 98426-7447, fcg120@hotmail.com
2)Afiliação: Pontifícia Universidade Católica do Paraná, (41) 99967-1218, altair.rosa@pucpr.br
3)Afiliação: Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, (16) 99750-9695, mcfava@ufscar
4)Afiliação: Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, (34) 99801-0110, marinamacedo@unifei.edu.br
5)Afiliação: Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, (71) 99124-2793, leo5991@hotmail.com

INTRODUÇÃO

Em ambientes urbanos, as inundações representam um dos principais desafios para a gestão territorial, especialmente em áreas densamente ocupadas e com limitações de infraestrutura de drenagem. A intensificação dos eventos extremos de precipitação associada às mudanças climáticas tem ampliado a frequência e a severidade das inundações em centros urbanos, reforçando a necessidade de metodologias mais robustas para simulação e previsão hidrológica (IPCC, 2021).

Entre os modelos aplicados à propagação de ondas de cheia, o método Muskingum–Cunge destaca-se pela simplicidade, estabilidade numérica e adequada representação dos processos de armazenamento e escoamento. Entretanto, a determinação dos parâmetros K e X permanece como um desafio, devido à forte dependência das características hidrológicas e geomorfológicas locais (TUCCI, 2005; CHOW et al., 1988). Nesse contexto, técnicas de otimização evolutiva, como a biblioteca DEAP, têm sido empregadas para aprimorar a precisão das simulações hidrológicas (FORTIN et al., 2012).

Paralelamente, projeções climáticas do CMIP6 fornecem bases importantes para análises de resiliência e comparação entre cenários históricos e futuros (EYRING et al., 2016). Assim, este estudo integra o método Muskingum–Cunge e algoritmos evolutivos via DEAP, utilizando dados horários de precipitação do ACCESS-CM2 (CMIP6) para simular eventos de inundação na bacia do rio Belém, em Curitiba (PR), avaliando possíveis alterações hidrológicas futuras associadas às mudanças climáticas.

REFERENCIAL TEÓRICO

As mudanças climáticas têm intensificado os eventos extremos de precipitação, promovendo alterações nos padrões hidrológicos das bacias hidrográficas e, consequentemente, ampliando a vulnerabilidade das áreas urbanas, sobretudo aquelas densamente ocupadas. O Sexto Relatório de Avaliação do IPCC indica que, em decorrência do aquecimento global, a temperatura média do planeta já apresentou elevação aproximada de 1,1°C (33,98°F), havendo fortes evidências de que regiões subtropicais da América do Sul experimentarão maior variabilidade das chuvas e aumento na frequência de eventos extremos de precipitação (IPCC, 2021).

Nesse contexto, surgem desafios significativos para o dimensionamento e a operação de sistemas de drenagem, que passam a demandar abordagens de modelagem cada vez mais capazes de integrar projeções climáticas e processos hidrológicos para obtenção de dados mais confiáveis. Dessa forma, o uso combinado de análises hidrodinâmicas e modelos climáticos torna-se essencial para gerar estimativas que representem o comportamento das bacias hidrográficas sob diferentes cenários. Tal necessidade torna-se particularmente relevante na bacia do rio Belém, localizada em Curitiba,

Brasil, uma região altamente urbanizada e intensamente impermeabilizada, que apresenta elevada suscetibilidade à ocorrência de inundações.

Projeções climáticas do CMIP6

O CMIP6 representa o estado da arte da modelagem climática global, reunindo experimentos padronizados destinados a avaliar a resposta do sistema climático sob diferentes cenários influenciados por forçantes naturais e antrópicas. Segundo Eyring et al. (2016), seus experimentos são organizados pela estrutura DECK (*Diagnostic, Evaluation and Characterization of Klima*) e pelos *Model Intercomparison Projects* (MIPs), garantindo consistência, confiabilidade e rastreabilidade dos dados.

O modelo ACCESS-CM2, utilizado neste estudo, apresenta representação robusta da dinâmica atmosférica e do ciclo hidrológico sobre a América do Sul, com desempenho satisfatório na simulação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), fenômeno essencial para eventos intensos de precipitação no Sul e Sudeste do Brasil. Além disso, o modelo reduz vieses sistemáticos observados em versões anteriores, principalmente na representação de chuvas convectivas (DIX et al., 2019).

Foram empregados os cenários SSP2-4.5, SSP3-7.0 e SSP5-8.5, pertencentes às *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs), que representam diferentes trajetórias de emissões de gases de efeito estufa, desde cenários intermediários até condições de forte dependência de combustíveis fósseis (O'NEILL et al., 2016). Para a bacia do rio Belém, utilizaram-se dados subdiários de precipitação, compatíveis com sua elevada urbanização e reduzido tempo de concentração.

Os dados foram extraídos de arquivos *NetCDF* disponibilizados pela *Earth System Grid Federation* (ESGF), recortados espacialmente pela máscara da bacia e processados para obtenção de médias ponderadas considerando a grade do ACCESS-CM2. Dessa forma, as projeções climáticas permitem representar de maneira consistente condições atmosféricas futuras, conforme recomendações de Eyring et al. (2016) e IPCC (2021).

Método de Muskingum-Cunge

O método Muskingum–Cunge consiste em uma formulação semidistribuída na qual a propagação de vazão aprimora o método tradicional de Muskingum ao incorporar propriedades hidráulicas do canal derivadas da equação da onda difusiva (CUNGE, 1969). A formulação resultante baseia-se no armazenamento ao longo do trecho do rio, expresso na equação 1 como uma função ponderada entre as vazões de entrada e de saída:

$$S = K[XI + (1 - X)O] \quad (1)$$

Onde S é o armazenamento no trecho do rio, K o tempo de propagação da onda, X o parâmetro de ponderação e por fim I e O que são as vazões de entrada e saída, respectivamente.

Esse método deriva sua estabilidade e seu comportamento físico a partir de uma analogia com a equação da onda difusiva:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c\frac{\partial Q}{\partial x} = D\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (2)$$

Onde c é a celeridade da onda e D a difusidade hidráulica.

Cunge (1969) propôs um ajuste para o parâmetro X, de modo que a difusividade numérica introduzida pelo esquema de discretização se torne equivalente à difusividade física da onda.

$$D = \frac{Q}{2S_0} \quad (3)$$

Sendo S_0 a declividade do canal

A celeridade da onda (c) é aproximada pela seguinte equação:

$$c = \frac{dQ}{dA} \approx \frac{5}{3}\frac{Q}{A} \quad (4)$$

Para canais operando sob condições próximas ao escoamento uniforme e com seção transversal aproximadamente retangular. O parâmetro K pode ser estimado por meio da seguinte equação:

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (5)$$

E o parâmetro X é obtido por meio da seguinte equação:

$$D = \frac{1}{2}\left[1 - \frac{c\Delta t}{2\Delta x}\right] \quad (6)$$

O método Muskingum–Cunge preserva o volume do escoamento, atenua os picos de vazão e representa adequadamente a propagação de ondas de cheia em rios de baixa declividade. A discretização do trecho fluvial em múltiplas seções aumenta a precisão numérica ao reduzir instabilidades e ajustar a atenuação da onda (CHOW et al., 1988). Associado à transformação chuva–vazão por métodos como SCS-CN ou Hidrograma Unitário (HU), o modelo possibilita a reconstrução de hidrogramas para eventos históricos e futuros, tornando-se relevante para análises hidrológicas em cenários de mudanças climáticas.

Algoritmos evolutivos e otimização utilizando a biblioteca DEAP

A biblioteca DEAP (*Distributed Evolutionary Algorithms in Python*) é amplamente utilizada na implementação de algoritmos genéticos (AGs), principalmente devido à sua modularidade, facilidade de utilização e capacidade nativa de paralelização, conforme descrito por Fortin et al. (2012). Essa estrutura torna a DEAP adequada para a calibração de modelos hidrológicos, como o

Muskingum–Cunge, que apresentam comportamento não linear e demandam métodos de busca capazes de explorar espaços de solução complexos.

Aplicado a este estudo, cada indivíduo da população representa um conjunto de parâmetros do modelo, definidos da seguinte forma:

$$\text{Individual} = [K, X, N_{sec}] \quad (7)$$

Onde K corresponde ao tempo de propagação, X representa o fator de ponderação e N_{sec} refere-se ao número de seções do canal. Esses parâmetros são limitados a intervalos que garantem consistência física, conforme recomendações hidráulicas clássicas (CHOW et al., 1988). A função objetivo empregada busca minimizar a diferença entre os picos de vazão e o erro acumulado do hidrograma, sendo expressa da seguinte forma:

$$f = \left|Q_{sim,peak} - Q_{obs,peak}\right| + \alpha \sum_t |Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t)| \quad (8)$$

Os algoritmos genéticos implementados na DEAP utilizam operadores clássicos, como seleção por torneio, cruzamento uniforme, mutação gaussiana e elitismo. Além disso, a função de avaliação paralelizada, apoiada pelo módulo *multiprocessing*, permite o processamento simultâneo de múltiplos indivíduos, reduzindo o tempo computacional, aspecto relevante para o ajuste de modelos hidráulicos em séries temporais extensas de precipitação.

Segundo Fortin et al. (2012), uma das principais vantagens da DEAP em estudos hidrológicos está na possibilidade de testar diferentes estratégias evolutivas, como algoritmos genéticos clássicos, estratégias evolutivas e CMA-ES, sem necessidade de reescrever o código-base. Essa flexibilidade amplia sua aplicação em análises hidrológicas com múltiplos cenários de entrada. Embora a integração entre DEAP e o método Muskingum–Cunge ainda seja pouco explorada, essa abordagem apresenta potencial para aprimorar a avaliação da propagação de ondas de cheia em condições climáticas atuais e futuras.

CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO RIO BELÉM

O rio Belém está localizado na região central de Curitiba, Brasil. Possui extensão aproximada de 21,02 km e uma bacia hidrográfica com área de 87,02 km², representando cerca de 20% do território municipal e atravessando 37 bairros antes de desaguar no rio Iguaçu (PAISAGENS DO BELÉM, 2016). Suas nascentes localizam-se no bairro Cachoeira, na porção norte da cidade, enquanto sua foz está situada entre os bairros Boqueirão e Uberaba, na região sul.

O intenso processo de urbanização na bacia, associado ao planejamento urbano insuficiente e à gestão inadequada dos recursos hídricos, contribuiu para a canalização do rio, remoção da vegetação ciliar, deposição de matéria orgânica e processos de sedimentação em diferentes trechos. A

combinação desses fatores antrópicos resultou em elevados níveis de degradação ambiental e poluição do curso d'água. A Figura 1 apresenta os bairros inseridos na bacia, os valores de altitude (m) e os valores de CN de toda a área de estudo.

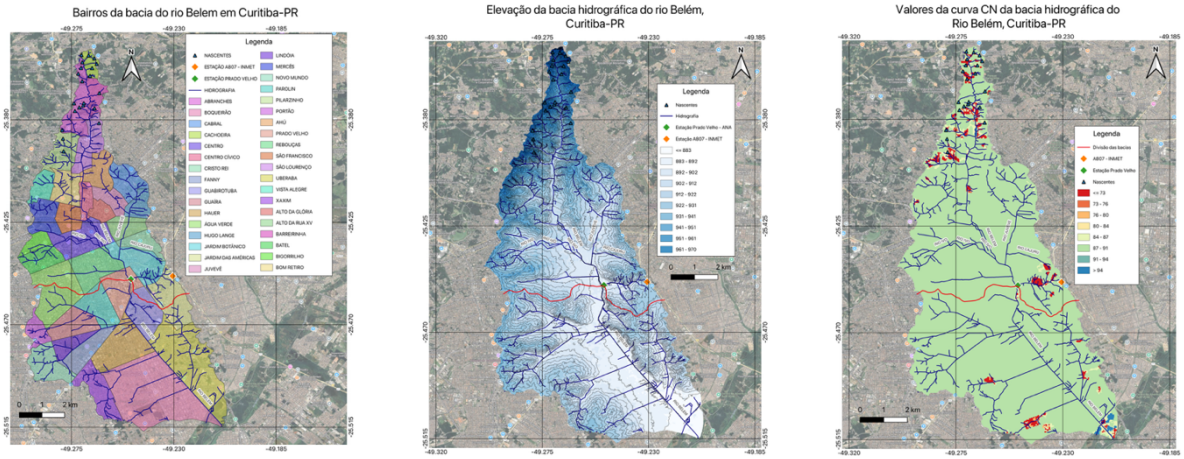


Figura 1 – Caracterização da bacia hidrográfica do rio Belém – limites e bairros, altitudes e valores de CN.

Para este estudo, foi analisada metade da bacia hidrográfica, uma vez que nesse trecho existe uma estação fluviométrica que será utilizada em avaliações futuras. A Figura 1 apresenta a divisão da bacia, enquanto a Tabela 1 apresenta os dados da área de estudo.

Tabela 1 – Dados da bacia estudada

Características da bacia do rio Belém estudada	
Comprimento do trecho de rio estudado (km)	12,77
Área da bacia estudada (km²)	43,26
Declividade do trecho (m/m)	0,000431
Coeficiente de rugosidade de Manning do trecho	0,06
Desnível do rio ao longo do trecho estudado (m)	55,00
CN	91
Tempo de concentração (min)	230,90

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Desagregação da precipitação e geração de hidrogramas para os cenários climáticos

As séries de precipitação derivadas dos cenários climáticos do CMIP6 são disponibilizadas em resolução mensal e, para aplicação no modelo Muskingum–Cunge, foram desagregadas para escala horária por meio do modelo estocástico Markov–Gamma, amplamente utilizado na geração de precipitações sintéticas (WILKS, 2011; SRIKANTHAN; PEGRAM, 2009). O procedimento, associado a séries históricas reais, permitiu preservar a variabilidade intramensal e as características estatísticas de eventos extremos, essenciais para a representação hidrológica em bacias urbanas.

Com os dados desagregados, aplicou-se o método SCS-CN para transformação chuva–vazão, considerando o tempo de concentração, o CN e as características físicas da bacia e do canal. Os resultados indicaram aumento progressivo da precipitação, compatível com projeções de intensificação de eventos extremos em regiões urbanizadas (IPCC, 2021; MARENGO et al., 2020). Foram considerados eventos do trimestre mais chuvoso regional (dezembro, janeiro e fevereiro), observando-se hidrogramas com maior amplitude, maiores picos de vazão e menor tempo até o pico, respostas típicas de bacias altamente urbanizadas (TUCCI, 2009). A Figura 2 ilustra os efeitos dos eventos extremos na região.

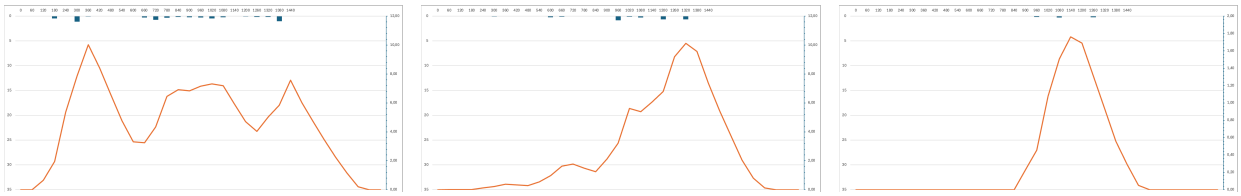


Figura 2 – Hidrogramas da bacia para os cenários SSP5-8.5, SSP3-7.0 e SSP2-4.5 (2081–2100).

Propagação de ondas de cheia utilizando o método Muskingum–Cunge com base em dados do CMIP6

O método Muskingum–Cunge integrado ao algoritmo genético (AG) apresentou sensibilidade às variações dos dados de entrada. No cenário SSP2-4.5, o AG convergiu para um número intermediário de seções, suficiente para representar hidrogramas com variabilidade moderada. Já no SSP5-8.5, foi necessária maior discretização devido à menor duração dos hidrogramas, exigindo maior resolução espacial para minimizar distorções numéricas (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988; PONCE, 1989).

Ao comparar os cenários, observou-se uma tendência de aumento dos picos de vazão. No SSP2-4.5, o aumento ocorreu de forma mais discreta, enquanto no SSP3-7.0 houve intensificação na frequência e magnitude dos eventos, com maior pico principal e surgimento de um pico secundário. No SSP5-8.5, registraram-se os maiores picos de vazão e menor tempo até o pico, indicando intensificação dos eventos extremos conforme o avanço dos cenários climáticos projetados (IPCC, 2021; SILLMANN et al., 2013). Esse comportamento sugere potencial aumento do risco de inundações em bacias urbanizadas com capacidade limitada de drenagem (TUCCI, 2009).

A análise revela que áreas com CN > 91 aceleram o escoamento superficial, sobrecarregando rapidamente a calha do rio Belém. A baixa declividade do canal (0,000431 m/m) agrava esse cenário ao criar gargalos hidráulicos e consequentemente, o terço médio e inferior da bacia torna-se extremamente susceptíveis a inundações severas e prolongadas, colocando a infraestrutura urbana em risco e exigindo medidas compensatórias urgentes (TABARI, H. 2020).

A Figura 3 apresenta os picos de vazão para cada cenário analisado e a quantidade de seções para cada cenário.

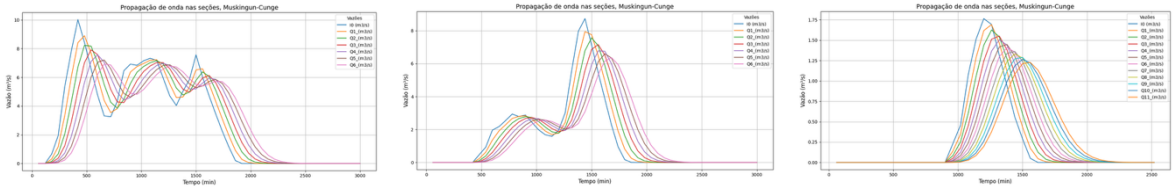


Figura 3 – Hidrogramas da bacia para os cenários SSP5-8.5, SSP3-7.0 e SSP2-4.5 (2081–2100) e suas seções.

Os resultados obtidos demonstraram que o método Muskingum–Cunge integrado ao algoritmo genético foi capaz de representar, com sensibilidade adequada, as alterações hidrológicas projetadas associadas aos eventos extremos. Os cenários mais severos demandaram maior discretização espacial, atendida satisfatoriamente pelo algoritmo de otimização. O aumento das vazões extremas indica potencial comprometimento da infraestrutura atual da bacia, evidenciando a necessidade de medidas de mitigação e adaptação no sistema de drenagem para reduzir riscos futuros de inundação. Além disso, a otimização do método Muskingum–Cunge via DEAP apresentou resultados satisfatórios, mantendo os parâmetros K e X dentro dos limites técnicos recomendados por Chow et al. (1988).

CONCLUSÃO

Os resultados indicam que a integração do método Muskingum–Cunge com o algoritmo genético constitui uma ferramenta eficiente para identificar alterações hidrológicas associadas a eventos extremos projetados em cenários climáticos futuros. A utilização do método de desagregação Markov–Gamma permitiu reproduzir adequadamente as séries de precipitação de cada cenário, desde que calibradas com dados históricos de chuva. Com a discretização ajustada pelo algoritmo genético e o aumento dos picos de vazão observados, verificou-se que a infraestrutura atual da bacia do rio Belém pode estar suscetível à sobrecarga. Dessa forma, o planejamento e o reforço do sistema de drenagem tornam-se fundamentais para mitigar futuros riscos de inundação na região.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pelo apoio institucional fundamental ao desenvolvimento deste trabalho.

Os autores agradecem o apoio dos seguintes projetos: CNPq 307637/2012-3 de Produtividade em Pesquisa e (5) CNPq/MCTI/FNDCT Nº 59/2022 – Benefícios da implementação de técnicas compensatórias para mitigar os problemas causados pelas mudanças climáticas, por meio da gestão

dos aspectos qualitativos e quantitativos da drenagem urbana no Município de Curitiba – Paraná – Brasil.

REFERÊNCIAS

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.

CUNGE, J.A. (1969). *"On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method)"*. Journal of Hydraulic Research, 7(2), pp. 205–230.

MORIASI, D.N. et al. (2007). *"Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations"*. Transactions of the ASABE, 50(3), pp. 885–900.

DAWSON, C.W.; WILBY, R.L. (2001). *"Hydrological modelling using artificial neural networks"*. Progress in Physical Geography, 25(1), pp. 80–108.

DE RAINVILLE, F.-M. et al. (2012). *"DEAP: A Python framework for evolutionary algorithms"* in Proceedings of the 14th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation. New York: ACM, pp. 85–92.

DEB, K. (2001). *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. Chichester: John Wiley & Sons.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V.K. (1992). *"Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall–runoff models"*. Water Resources Research, 28(4), pp. 1015–1031.

EYRING, V. et al. (2016). *"Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization"*. Geoscientific Model Development, 9, pp. 1937–1958.

FORTIN, F.A. et al. (2012). *"DEAP: Evolutionary Algorithms Made Easy"*. Journal of Machine Learning Research, 13, pp. 2171–2175.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Geneva: IPCC.

KUNDZEWICZ, Z. W. et al. (2020). "*Climate change and floods*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, v. 7, n. 6, p. e1460.

MARENGO, J.A.; ALVES, L.M.; CHOU, S.C.; MARENGO, M. (2020). *"Changes in extreme climate events in Brazil"*. Climate Research, 80, pp. 1–18.

MCCUEN, R.H. (2005). *Hydrologic Analysis and Design*. 3 ed. Michigan: Pearson Prentice Hall.

MITCHELL, M. (1996). *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge: The MIT Press.

MOTA, A.; KOBIYAMA, M. (2015). *"Reconsiderações sobre a fórmula de Kirpich para o cálculo de tempo de concentração"*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 20(1), pp. 55–59.

MOTA, M.S. (2018). *Modelagem hidrológica e hidrodinâmica: princípios e aplicações*. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos.

PAISAGENS DO RIO BELÉM. Disponível em: http://www.paisagensdoriobelem.com.br/. Acesso em: 10 nov. 2025.

PONCE, V.M. (1989). *Engineering Hydrology: Principles and Practices*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

PONCE, V.M.; LOHANI, A.K. (2019). *"Analytical verification of Muskingum–Cunge routing"*. Journal of Hydrology, 573, pp. 44–54.

SILLMANN, J.; KHARIN, V.V.; ZHANG, X.; ZWIERS, F.W.; BRONAUGH, D. (2013). *"Climate extremes indices in CMIP5"*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(4), pp. 1716–1733.

SNIRH – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/d1c36d85-a9d5-4f6a-85f7-71c2dc801a67. Acesso em: 05 nov. 2025.

SRIKANTHAN, R.; PEGRAM, G. (2009*). "A nested multisite daily rainfall stochastic generation model"*. Journal of Hydrology, 371, pp. 142–153.

TABARI, H. (2020). "*Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability"*. Scientific Reports, v. 10, n. 1, p. 13768.

TUCCI, C.E.M. (2005). *Modelos Hidrológicos*. 2 ed. Porto Alegre: Editora UFRGS.

TUCCI, C.E.M. (2009). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: UFRGS/ABRH.

TYAGI, G. et al. (2019). *"Applications of Genetic Algorithm in Water Resources Management and Optimization"*. SSRN Electronic Journal.

WILKS, D.S. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 3 ed. San Diego: Academic Press.

WORLDCLIM. *CMIP6 Climate Data*. Disponível em: https://www.worldclim.org/data/cmip6/cmip6_clim30s.html. Acesso em: 12 nov. 2025.