

CALIBRAÇÃO DO HYMOD PARA BACIAS URBANAS: O CASO DA BACIA DO CÓRREGO DO MONJOLINHO, SÃO CARLOS, SP

Vinicius Moreira da Silva ¹; Marcos Roberto Benso ² & Anai Floriano Vasconcelos ³

RESUMO – O processo de urbanização e a consequente canalização de corpos hídricos acarreta no aumento de perigo de inundações. Tais fenômenos geram diversos prejuízos sociais, ambientais e econômicos, que tendem a aumentar devido às mudanças climáticas. Dito isso, cada vez mais modelos hidrológicos estão sendo incorporados a sistemas de modelagem que representam uma ampla gama de processos ambientais numa grande variedade de escalas de tempo e espaço. Essas tecnologias podem ser utilizadas para a previsão de eventos futuros, com base em dados reais que representam o comportamento de uma área, conforme os parâmetros e a calibragem do modelo. Entretanto, modelos com menos parâmetros tendem a requerer menor esforço computacional e menor tempo de processamento para cada modelagem, possuindo, potencial de aplicação para previsão em tempo real, sendo uma das estratégias possíveis para gerenciamento de riscos de inundações em áreas urbanas. O objetivo deste trabalho é apresentar a calibração do modelo hidrológico HYMOD para a bacia urbana do Córrego do Monjolinho em São Carlos, SP, e avaliar a sua acurácia e, consequentemente, potencial de aplicação na previsão de cheias nesta bacia. Para a calibração do modelo, foram utilizados quatro métodos de calibração baseados em algoritmos de otimização. Os resultados demonstram que a calibração da condição inicial do modelo ocasiona em melhores valores de NSE para as simulações, e hidrogramas que respondem aos picos de vazões com maior acurácia. Dessa maneira, a aplicação do HYMOD para previsão de cheias em bacias urbanas é uma ferramenta promissora para gerenciamento de riscos de inundações urbanas.

Palavras-chave: previsão de inundações urbanas, nowcasting, modelos hidrológicos.

ABSTRACT – The process of urbanization and the consequent channelization of rivers lead to increased flood hazards. These floods cause many social, environmental, and economic losses, which tend to intensify due to climate change. In this context, hydrological models are increasingly being integrated into systems that represent a wide range of environmental processes across diverse spatial and temporal scales. These technologies can be used to forecast future events based on empirical data reflecting an area's behavior, according to model parameters and calibration. However, models with fewer parameters tend to require less computational effort and shorter processing times, making them suitable for real-time forecasting, a key strategy for urban flood risk management. This study aims to present the calibration of the HYMOD hydrological model for the Monjolinho urban watershed in São Carlos, SP, evaluating its accuracy and potential for flood forecasting. Four optimization-based calibration methods were applied for the model calibration. The results demonstrate that calibrating the model's initial conditions improved the NSE values and produced hydrographs that capture peak flows more accurately. This way, the application of HYMOD for flood forecasting emerges as a promising tool for urban flood risk management.

Keywords: urban floods forecasting, nowcasting, hydrological models.

¹) Universidade Federal de São Carlos, msvinicius@estudante.ufscar.br

²) Universidade de São Paulo, marcosbenso@usp.br

³) Universidade Federal de São Carlos, anai.vasconcelos@ufscar.br

INTRODUÇÃO

A alteração da paisagem natural nos ambientes urbanos implica em severas mudanças no escoamento da água. A retirada da vegetação e a impermeabilização do solo ocasionam na redução do atrito da superfície com a água e na diminuição da quantidade de água que infiltra no solo. Dessa forma, o desenvolvimento da malha urbana faz com que o escoamento superficial seja maior e ocorra o aumento da frequência e magnitude das enchentes devido à impermeabilização, ocupação do solo e à construção da rede de condutos pluviais. O desenvolvimento urbano pode também produzir obstruções ao escoamento, como aterros, pontes e em condutos, drenagens inadequadas e assoreamento (Tucci, 2002).

Cada vez mais, modelos hidrológicos estão sendo incorporados a sistemas de modelagem que representam uma ampla gama de processos ambientais em uma grande variedade de escalas de tempo e espaço (Wagener et al., 2001). Essas tecnologias podem ser utilizadas para a previsão de eventos futuros, com base em dados reais que representam o comportamento da área de estudo selecionada, conforme os parâmetros e a calibragem do modelo. Diversos modelos utilizados para a previsão de cheias se encontram em uso por todo o mundo.

Modelos conceituais de precipitação-vazão (CRR) tornaram-se amplamente utilizados para previsão de inundações, à medida que a demanda por previsões oportunas e precisas aumentou. Tais modelos fornecem uma descrição aproximada e agregada dos processos dominantes que ocorrem na sub-bacia hidrográfica que contribuem para a resposta hidrológica geral do sistema (Boyle, Gupta e Sorooshian, 2001).

No entanto, apesar dos avanços recentes e modelagem de curto e curtíssimo prazo em áreas urbanas, há a necessidade de validar a aplicação de modelos que possuam poucos parâmetros e, mesmo assim, robusta performance. Estas características são de fundamental importância para a realidade brasileira na qual muitas bacias urbanas são pouco ou não monitoradas, visto que são caracterizadas principalmente por altas velocidades dos escoamentos e variações rápidas de níveis de água. Essa combinação dificulta o monitoramento de bacias urbanas, pois deve-se ter linígrafos e pluviógrafos que permitam a discretização de até 5 minutos (Germano, 1997). Os modelos com menos parâmetros também tendem a requerer menor esforço computacional e menor tempo de processamento para cada modelagem, possuindo, portanto, potencial de aplicação para previsão em tempo real, o que é uma das estratégias possíveis para gerenciamento de riscos de inundações em áreas urbanas.

Um dos modelos hidrológicos concentrados e que utiliza poucos parâmetros que pode ser investigado para utilização em áreas urbanas é o HYMOD. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho

é apresentar a calibração do modelo hidrológico HYMOD para a bacia urbana do Córrego do Monjolinho em São Carlos, SP, e avaliar a sua acurácia e, consequentemente, potencial de aplicação na previsão de cheias nesta bacia.

METODOLOGIA

Área de estudo

A área de estudo corresponde à bacia hidrográfica do Córrego do Monjolinho, a qual abrange uma área de 273,77 km², situada no município de São Carlos - SP, cujas nascentes localizam-se na região leste do município, desaguando no Rio Jacaré-Guaçu. A área urbanizada dessa bacia, a qual é o foco deste projeto, abrange uma área de 79,6 km² e sua localização é apresentada na Figura 1.

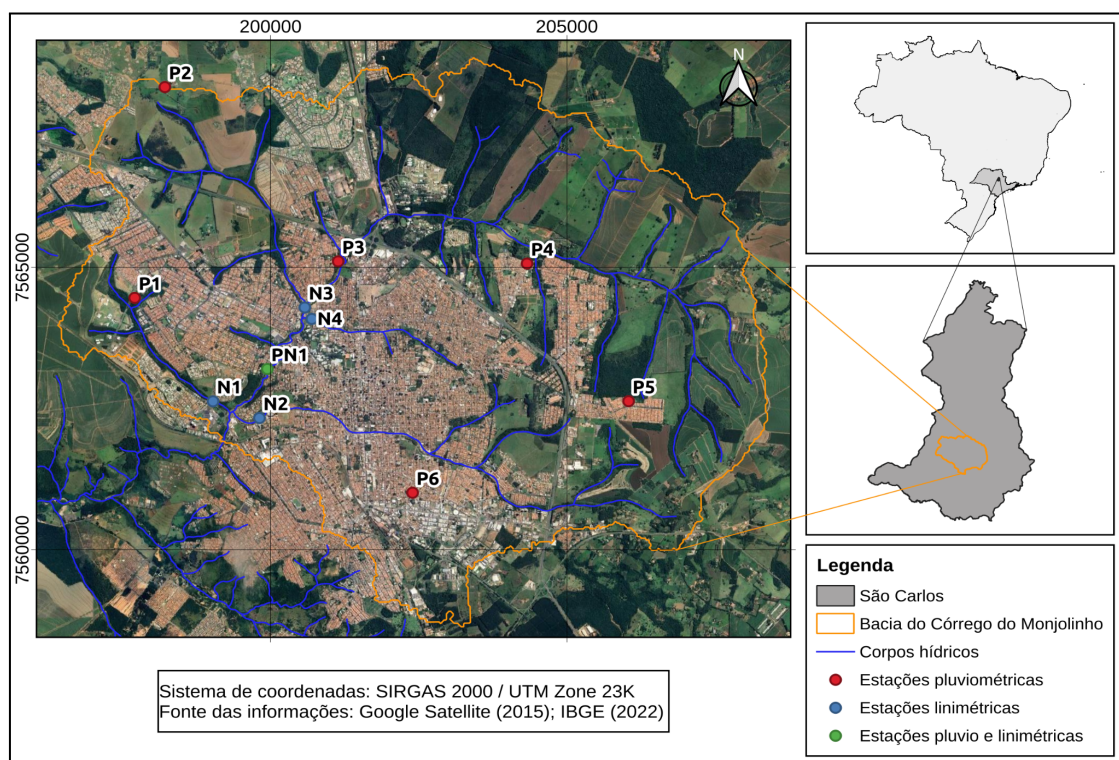


Figura 1 - Localização da porção urbanizada da bacia hidrográfica do Córrego do Monjolinho. Fonte: Autores

Coleta e processamento de dados

O HYMOD é um modelo hidrológico conceitual concentrado do tipo "excesso de precipitação" para sistemas de bacias hidrográficas, impulsionado por dados de séries temporais de alta resolução temporal (escala sub-horária) de precipitação (mm) e evapotranspiração potencial (mm) como entradas, e gerando estimativas de escoamento superficial como saída (Wagener et al., 2001; Gesualdo et al., 2019). O HYMOD utiliza cinco parâmetros no modelo: a capacidade máxima

de retenção de água do solo (C_{max}); a variável Beta (β), que regula a infiltração; a variável Alfa (α), que regula a partição do escoamento; o escoamento rápido (K_q); e o escoamento lento (K_s).

Os dados necessários para a modelagem hidrológica e suas respectivas fontes são apresentados na Tabela 1. Os dados das estações de precipitação e nível d'água foram coletados no âmbito do projeto “Avanços em Ferramentas de Nowcasting aplicadas a inundações urbanas (processo CNPq 446043/2023-0)” pelas estações apresentadas na Figura 1. Os dados foram processados para adequar a discretização temporal necessária e para calcular os parâmetros de entrada iniciais da bacia para o modelo, conforme detalhado no item 2.4.

Tabela 1 - Dados necessários para a modelagem hidrológica.

Tipo de dado	Fonte da informação
Dados pluviométricos	Projeto “Avanços em Ferramentas de Nowcasting aplicadas a inundações urbanas (processo CNPq 446043/2023-0)”
Dados fluviométricos	
Modelo Digital de Elevação	

Fonte: Autores.

Para a calibração e validação do HYMOD foram selecionados nove eventos de chuva com pelo menos 20 mm de precipitação em uma hora em alguma das estações de monitoramento, ocorridos de novembro de 2024 a junho de 2025. Os nove eventos foram selecionados visando futuras comparações com os resultados do projeto “Avanços em Ferramentas de Nowcasting aplicadas a inundações urbanas (processo CNPq 446043/2023-0)”, além de serem caracterizados como eventos de alta intensidade e, portanto, de interesse para o estudo de cheias em bacias urbanas. A caracterização destes eventos é apresentada na Tabela 2, onde são apresentados os valores médios de precipitação para a bacia em estudo, calculados pelo método *Inverse Distance Weighting* (IDW).

Tabela 2 - Caracterização dos eventos pluviométricos.

Eventos	Período	Total Precipitado (mm)	Total Precipitado nos 5 dias antecedentes (mm)
1	1/11 / - 4/11/24	36	-
2	25/11 - 29/11/24	19.8	8.8
3	10/12 - 14/12/24	22.8	2.3
4	17/12 - 22/12/24	85.3	18.5
5	26/12/24 - 4/1/25	113.5	88.5
6	19/1 - 23/1/25	13.6	16.0
7	28/1 - 1/2/25	15.4	3.4
8	15/2 - 21/2/25	85.3	7.7
9	21/4 - 26/4/25	55	12.2

Fonte: Autores

Método de calibração

Para a calibração do modelo hidrológico para a bacia de estudo, foram utilizados quatro métodos de calibração baseados em algoritmos de otimização envolvendo os nove eventos selecionados para a modelagem.

- I. Análise de sensibilidade envolvendo os cinco parâmetros do HYMOD, para estabelecer os valores iniciais dos parâmetros e os intervalos a serem utilizados na calibração. Os valores iniciais, para os quais a análise de sensibilidade resultou em melhores resultados do modelo, foram considerados uma calibração manual inicial. A análise foi feita para cada um dos nove eventos de chuva selecionados;
- II. Calibração por Algoritmos Genéticos (GA) com o pacote GA (Scrucca, 2013) para cada um dos eventos de chuva selecionados;
- III. Calibração pelo método de otimização com algoritmo de otimização por evolução diferencial do pacote *DEoptim* (Mullen et al., 2011) para cada um dos eventos de chuva selecionados;
- IV. Calibração pelo método de otimização quasi-newtoniana, que aproxima o algoritmo de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (L-BFGS-B) implementado pela função *optim* (Zhu et al., 1997), implementado para a série contínua das chuvas.

O problema de otimização utilizado está representado na equação 1.

$$\text{Min } J(\theta) = -NSE(\theta) \quad (1)$$

Em que $J(\theta)$ é uma função objetivo que deve ser minimizada sujeita às restrições de mínimo e máximo dos parâmetros θ do HYMOD. Os valores mínimos e máximos para cada parâmetro do HYMOD foram: c_{max} (50; 500), β (0.1; 2), α (0.01; 1), k_r (0.1; 20) e k_l (0.1; 50). O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) é calculado pela equação 2 e foi utilizado como métrica do desempenho do modelo para os diferentes eventos e calibrações.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_{sim,t} - Q_{obs,t})^2}{\sum_{t=1}^N (Q_{obs,t} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (2)$$

Em que $\bar{Q}_{obs}$ representa a média dos valores observados, $Q_{obs,t}$ o valor da observação no tempo t , e por fim, $Q_{sim,t}$ representa o valor simulado no tempo t .

Após calibração inicial, foram realizados ajustes na condição inicial de umidade do modelo, para adequar melhor os picos iniciais de vazão aos dados observados. Este ajuste foi realizado pelo parâmetro “W2” de entrada do modelo, que é considerado como zero em sua configuração inicial. Primeiramente, foram testados os valores para os quais se tem ou não respostas do parâmetro e, para isso, foi testado o intervalo de 0 a 120. Sendo assim, definimos o intervalo de “W2” que faria alguma diferença no modelo e, foi notado que a partir de 60 não há diferenças. Dessa forma o intervalo aplicável para usar no teste foi de 0 a 60. Após a etapa de definição do intervalo, aplicamos nele uma análise de sensibilidade para analisar qual valor do parâmetro resultaria no melhor valor de NSE para cada um dos nove eventos. Com isso, foram testados os valores de “W2” para cada evento utilizando a calibração selecionada e comparados com a mesma calibração, porém com os valores de “W2 = 0”.

RESULTADOS

A análise dos resultados da calibração com base nos hidrogramas e nos valores de NSE indicou que duas das calibrações se destacaram: o método por otimização com os dados de chuva por série contínua, e o método pela função “DEOptim” com os dados dos nove eventos separados. Porém, notou-se que enquanto o método de otimização com os dados dos eventos individuais era capaz de prever os picos iniciais de vazão, caso o evento apresentasse uma série de picos, o método superestimava os picos seguintes. Paralelamente, a calibração por otimização dos dados de série contínua de chuva apresentava dificuldades de prever os picos iniciais, mas demonstrava ser capaz de acertar os próximos picos. Isso ocorre devido a um possível aquecimento - ajuste das condições iniciais - do modelo hidrológico. Por ser um modelo muito simplificado, ele não precisa do tempo de aquecimento, mas responde a uma condição de contorno inicial relacionada a umidade armazenada na bacia, representada pelo parâmetro “W2”, embutido no modelo. Assim, percebe-se que a utilização de um parâmetro utilizado como condição de contorno poderia melhorar a calibração por otimização da série de dados contínuos para os primeiros picos de vazão e, por isso, foram testados os melhores valores de W2 para cada evento e verificados os seus resultados. A Tabela 3 apresenta os NSE das simulações para os nove eventos de precipitação considerando W2 = 0 (cenário 1) e o W2 ótimo para o evento, com base na análise de sensibilidade (cenário 2).

Tabela 3 - Caracterização dos eventos pluviométricos.

Evento	NSE sem ajuste do W2	NSE com ajuste do W2	W2 otimizado
1	0.489	0.656	10
2	0.223	0.742	18
3	-0.054	0.624	30
4	0.402	0.402	0
5	0.069	0.288	15
6	-0.344	0.572	23
7	0.664	0.677	4
8	-7.308	-4.42	27
9	0.611	0.637	4

Fonte: Autores.

Como efeito da calibração do W2, os valores de NSE do cenário 2 se demonstraram superiores aos do cenário 1. A mediana de NSE entre os eventos sem ajuste de W2 foi de 0.223, enquanto a mediana dos NSE das simulações com ajuste de W2 subiu para 0.624. Os hidrogramas com ajuste de W2 também apresentaram respostas mais próximas aos dados observados, como representado na Figura 2 e na Figura 3.

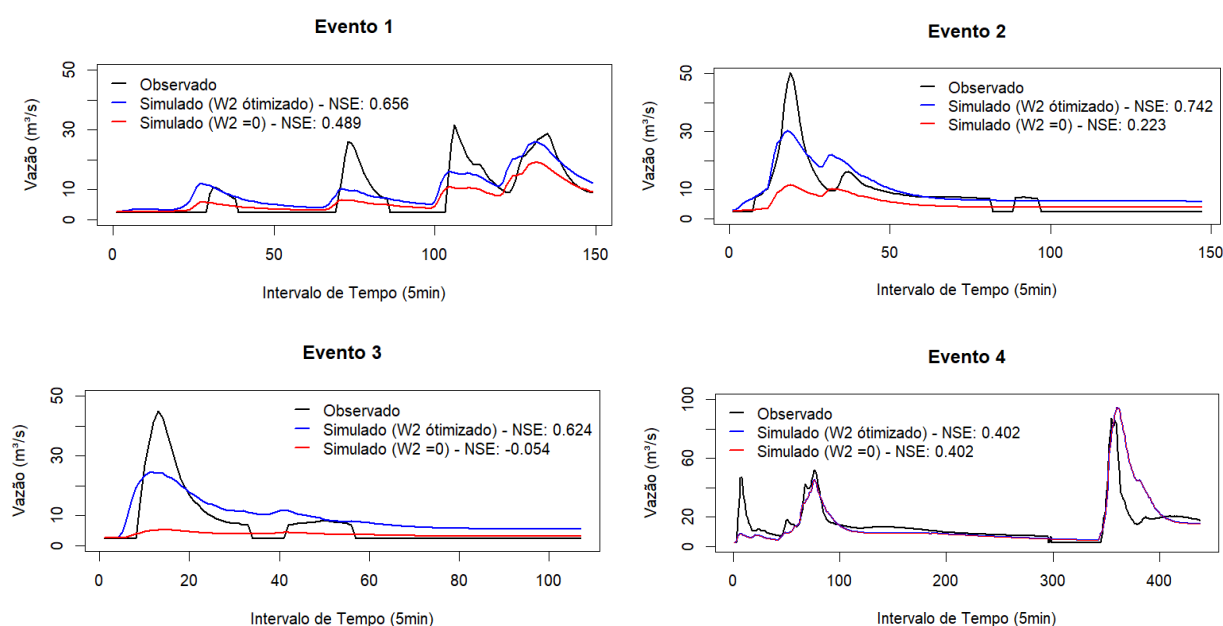


Figura 2 - Comparativo dos hidrogramas dos eventos 1 ao 4, obtidos pelo modelo calibrado com o melhor método de calibração e para dois cenários de condição inicial de umidade. Fonte: Autores

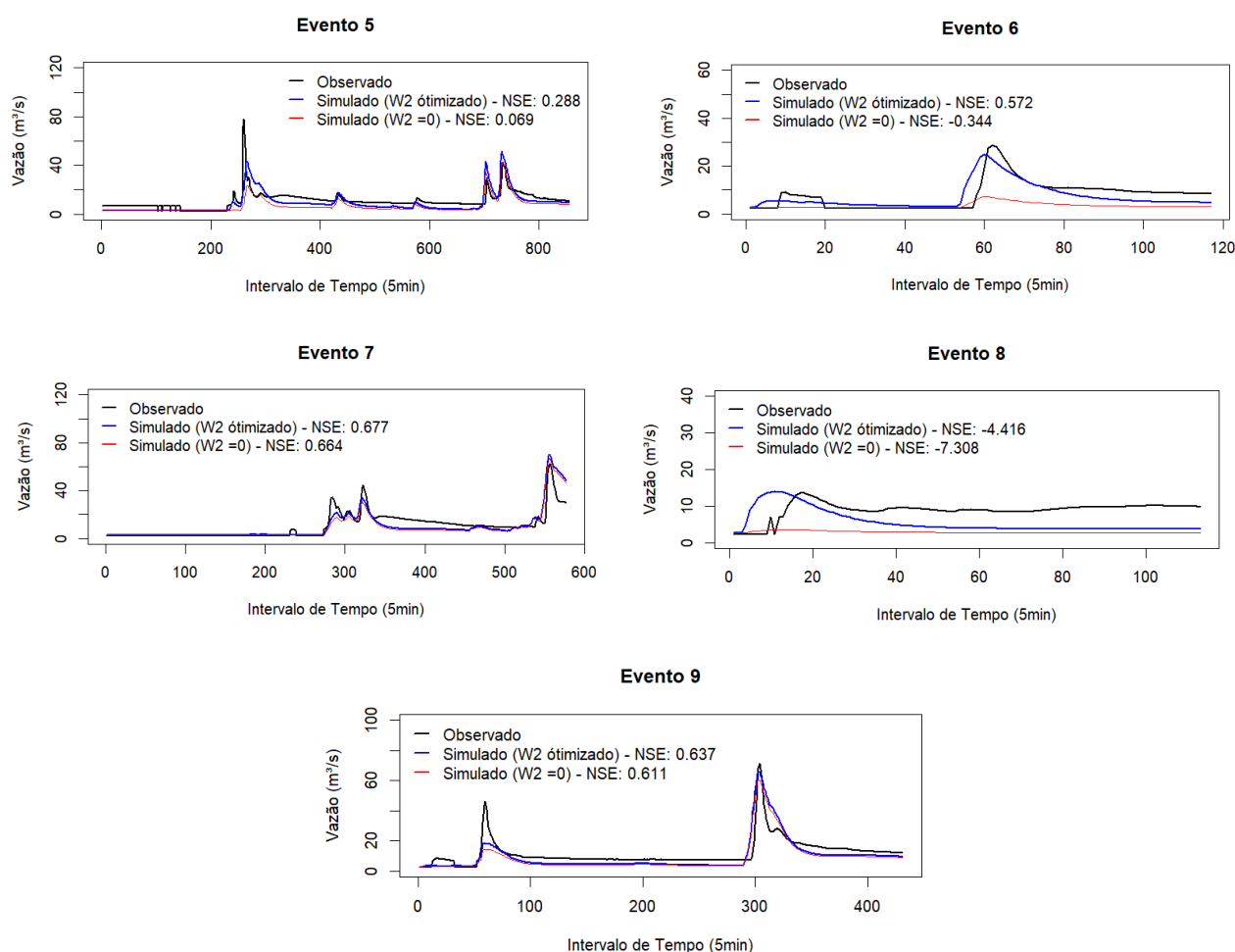


Figura 3 - Comparativo dos hidrogramas dos eventos 5 ao 9, obtidos pelo modelo calibrado com o melhor método de calibração e para dois cenários de condição inicial de umidade. Fonte: Autores

LIMITAÇÕES

O estudo realizado avaliou os métodos de calibração para os eventos selecionados para a modelagem hidrológica. Dessa forma, os valores encontrados para os parâmetros estão relacionados e limitados a essas precipitações. Sendo assim, etapas futuras devem validar as calibrações obtidas para outros eventos de precipitação, verificando a sua aplicabilidade para quaisquer eventos de precipitação intensa na bacia.

Ademais, por mais que as modelagens e calibrações apresentadas tenham obtido resultados positivos para o objetivo do projeto, notou-se que não há uma generalização sobre a eficácia do modelo através das análises para o Evento 8. É possível que tenha havido algum erro de medição das vazões para este evento, o que pode explicar os baixos valores para NSE obtidos.

CONCLUSÃO

A calibração do modelo hidrológico HYMOD, considerando a condição inicial do modelo, para a bacia hidrográfica do Córrego do Monjolinho, São Carlos/SP, apresentou resultados positivos, reforçando o potencial de aplicação de modelos hidrológicos com poucos parâmetros para previsão em tempo real, como ferramenta para o gerenciamento de riscos de inundações em áreas urbanas.

O aumento da mediana dos valores de NSE para as simulações utilizando o parâmetro W2 otimizado, em conjunto com as respostas aos picos de vazão próximas aos picos observados nos hidrogramas realizados, contribuem para confirmar a acurácia do modelo para a área de estudo, e validar sua aplicação para previsão de cheias na bacia. De maneira geral, os resultados obtidos até o momento atendem os objetivos e expectativas do projeto.

REFERÊNCIAS

- BOYLE, D. P; GUPTA, H. V; SOROOSHIAN, S. (2000). *“Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods”*. Water Resources Research, pp. 3663-3674.
- GERMANO, A. O. (1997). *“Estimativa de parâmetros hidrológicos em algumas bacias urbanas brasileiras”*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 146 p.
- GESUALDO, G et al. (2019). *“Assessing water security in the São Paulo metropolitan region under projected climate change”*. Hydrology and Earth System Sciences, pp. 4955-4968.
- MULLEN, K. M. et al. (2011). *“DEoptim: An R Package for Global Optimization by Differential Evolution”*. Journal of Statistical Software, pp. 1–26.
- SCRUCCA, L. (2013). *“GA: A Package for Genetic Algorithms in R”*. Journal of Statistical Software, pp. 1–37.
- TUCCI, C. E. M. (2002). *“Gerenciamento da Drenagem Urbana”*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, pp. 5-27.

WAGENER, T et al. (2001). “*A framework for development and application of hydrological models*”. Hydrology and Earth System Sciences, pp. 13-26.

ZHU, Ciyu et al. (1997). “*Algorithm 778: L-BFGS-B: Fortran subroutines for large-scale bound-constrained optimization*”. ACM Transactions on mathematical software (TOMS), pp. 550-560.

AGRADECIMENTOS - Este estudo contou com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio do projeto “Avanços em Ferramentas de Nowcasting aplicadas a inundações urbanas” (processo nº CNPq 446043/2023-0), bem como da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por meio de bolsa de iniciação científica (processo nº 2025/10666-3).