

DESEMPENHO DE MODELOS HIDROLÓGICOS DE ÁREAS URBANAS SOB DIFERENTES NÍVEIS DE DETALHAMENTO ESPACIAL

*Marina Fagundes e Souza ¹; Karoline Kelly Rodrigues ²; Maria Clara Fava ³; Anai Floriano
Vasconcelos ⁴ & Vandoir Bourscheidt ⁵*

RESUMO – Modelos hidrológicos são ferramentas importantes para o gerenciamento de risco de inundações urbanas. Entretanto, um de seus desafios é definir o nível de discretização espacial adequado para o modelo. Estudos mostram que inserir mais informações geográficas impacta positivamente modelos não calibrados. Já em modelos calibrados, o impacto do uso de dados de alta resolução é incerto, variando entre efeitos desprezíveis a impacto significativo na performance do modelo. Neste contexto, este trabalho tem por objetivo avaliar as respostas de dois modelos hidrológicos semi-distribuídos calibrados com diferentes níveis de detalhamento espacial para a bacia do Rio Monjolinho, em São Carlos, SP. Os resultados indicam que, de modo geral, o modelo mais detalhado apresentou melhor desempenho na representação dos picos de vazão. No entanto, o comportamento dos hidrogramas foi bem representado por ambos os modelos, o que indica que, provavelmente, com ajustes nas vazões de base, as quais apresentaram diferenças significativas entre os modelos, os desempenhos de ambos possam melhorar e/ou se equiparar. Observou-se também a importância da qualidade dos dados observados e da manutenção do funcionamento adequado das calhas da rede de macrodrenagem urbana para que os modelos possam ser adequadamente desenvolvidos e calibrados e, consequentemente, representem melhor a realidade.

Palavras-Chave – Discretização espacial de modelos, Modelagem hidrológica, Bacias urbanas

ABSTRACT – Hydrological models are important tools for urban flood risk management. However, one of their challenges is defining the appropriate level of spatial discretization for the model. Studies show that incorporating more geographic information has a positive impact on uncalibrated models. For calibrated models, the impact of using high-resolution data is uncertain, ranging from negligible effects to a significant impact on model performance. In this context, this study aims to evaluate the responses of two calibrated semi-distributed hydrological models with different levels of spatial discretization for the Monjolinho River basin in São Carlos, SP. The results indicate that, overall, the more detailed model performed better in representing peak flow rates. However, the behavior of the hydrographs was well represented by both models, suggesting that with adjustments to base flows—which showed significant differences between the models—the performance of both could likely improve and/or become comparable. The importance of observed data quality and the proper maintenance of urban macro-drainage network channels was also noted, so that models can be properly developed and calibrated and, consequently, better represent the reality.

Keywords – Models spatial discretization, Hydrological modeling, Urban catchments

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

²) Universidade Federal de São Carlos, kkrodrigues@estudante.ufscar.br

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

⁴) Universidade Federal de São Carlos, anai.vasconcelos@ufscar.br

⁵) Universidade Federal de São Carlos, vandoir@ufscar.br

INTRODUÇÃO

Modelos hidrodinâmicos são ferramentas importantes para o gerenciamento de risco de inundações urbanas, pois possibilitam representar matematicamente a propagação de níveis d'água e vazões ao longo do sistema fluvial (Demeritt *et al.*, 2010). A evolução da tecnologia nas últimas décadas permitiu a criação de modelos mais precisos e complexos, que permitem simulações e análises de cenários. Consequentemente, esses modelos subsidiam a emissão de alertas antecipados e disponibilizam informações mais corretas e precisas para o Poder Público basear sua tomada de decisão (Al-Sabhan *et al.*, 2003; Ghanghas *et al.*, 2022; Demeritt *et al.*, 2010).

Existem diversas categorizações de modelos, dentre elas, a que divide modelos em concentrados, distribuídos e semi-distribuídos. Modelos concentrados consideram bacias hidrográficas como unidades únicas de características uniformes, geralmente representadas pela média ou mediana dos parâmetros. Eles assumem um número reduzido de elementos conceituais, ou seja, necessitam de um conjunto reduzido de dados de entrada e de menor esforço para calibração e validação. Modelos distribuídos e semi-distribuídos, por outro lado, representam a variabilidade espacial das características de bacias hidrográficas, de processos hidrológicos, de dados de entrada e de condições de contorno. Modelos distribuídos dividem a bacia hidrográfica em uma grade de células quadradas ou retangulares, enquanto modelos semi-distribuídos a dividem em sub-bacias ou unidades de menor dimensão, dentro das quais se assume uniformidade espacial de suas características. Logo, modelos distribuídos e semi-distribuídos necessitam de quantidade de dados e parâmetros maiores do que modelos concentrados (Santos, 2018). Tradicionalmente, modelos para gerenciamento de risco de inundações urbanas são, em sua maioria, semi-distribuídos. O *Storm Water Management Model (SWMM)* foi lançado em 1971 e é um dos *softwares* de modelagem semi-distribuída mais utilizados (Pina *et al.*, 2016; William, 1996; Bragg, Poudel, Vasconcelos, 2025).

Um dos grandes desafios do pesquisador que deseja desenvolver uma modelagem distribuída ou semi-distribuída é justamente definir o nível de discretização do modelo. Não há consenso sobre o tema, pois os resultados das mais diversas pesquisas sobre o tema são conflitantes (Khakbaz *et al.*, 2012; Okiria *et al.*, 2022). Estudos mostram que, em geral, inserir mais informações geográficas impacta positivamente modelos não calibrados, que podem apresentar desempenho suficiente quando comparado a modelos calibrados. Já em modelos calibrados, o impacto do uso de dados de alta resolução é incerto, variando entre efeitos desprezíveis a impacto significativo na performance do modelo (Niazi *et al.*, 2017).

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo avaliar as respostas de dois modelos hidrológicos semi-distribuídos com diferentes níveis de detalhamento espacial para a bacia do Rio Monjolinho, em São Carlos, SP.

METODOLOGIA

O *SWMM* é um *software* de código aberto desenvolvido e mantido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (*EPA*). O programa possibilita a simulação dinâmica hidráulico-hidrológica e de qualidade da água (William, 1996; *EPA*, 2026). O modelo desenvolvido no *SWMM* pode apresentar diferentes níveis de detalhamento, a depender do tamanho das sub-bacias, da disponibilidade de dados - principalmente dados de macrodrenagem e microdrenagem - e do objetivo dos pesquisadores. Este trabalho compara os resultados obtidos pelos modelos desenvolvidos por Fava (2019) e por Souza (2026) para a bacia do Rio Monjolinho em sua porção urbana, com exutório na Rotatória do Cristo, em São Carlos, SP. A localização da área de estudo e dos pontos de monitoramento hidrometeorológico utilizados para obtenção dos eventos usados na comparação é apresentada na Figura 1.

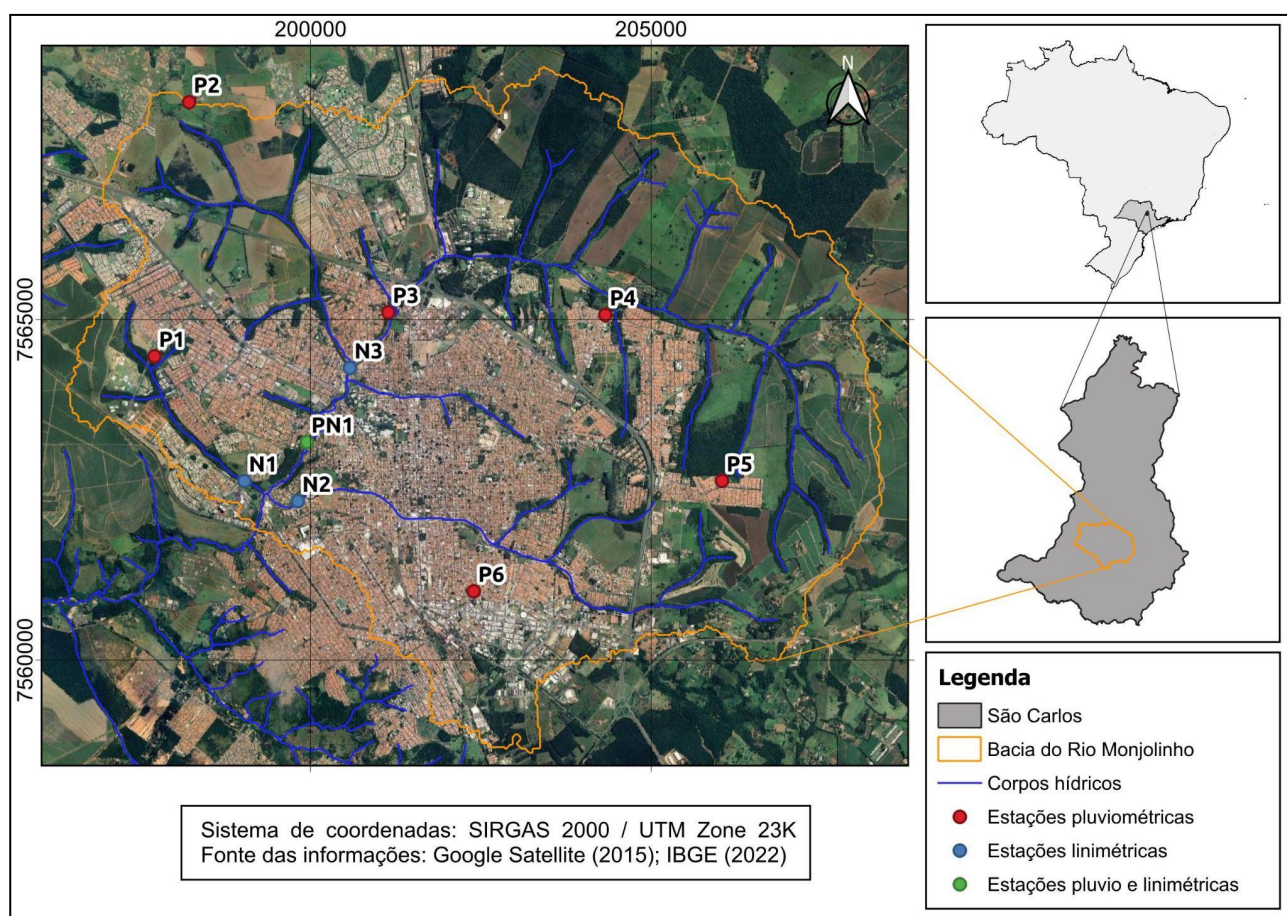


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo e da rede de monitoramento hidrometeorológico

O modelo de Fava (2019) foi dividido em 15 sub-bacias, conforme apresentado na Figura 2 e, portanto, foi considerado o modelo menos detalhado dentre os analisados neste trabalho. Ele foi calibrado com dados de novembro de 2013 a abril de 2014 oriundos de quatro estações pluviométricas e quatro de nível d'água inseridas na bacia. Foi utilizado um calibrador automático multipontos desenvolvido pela própria autora. Os parâmetros calibrados foram os que se demonstraram mais influentes nas vazões de pico em uma análise de sensibilidade do modelo.

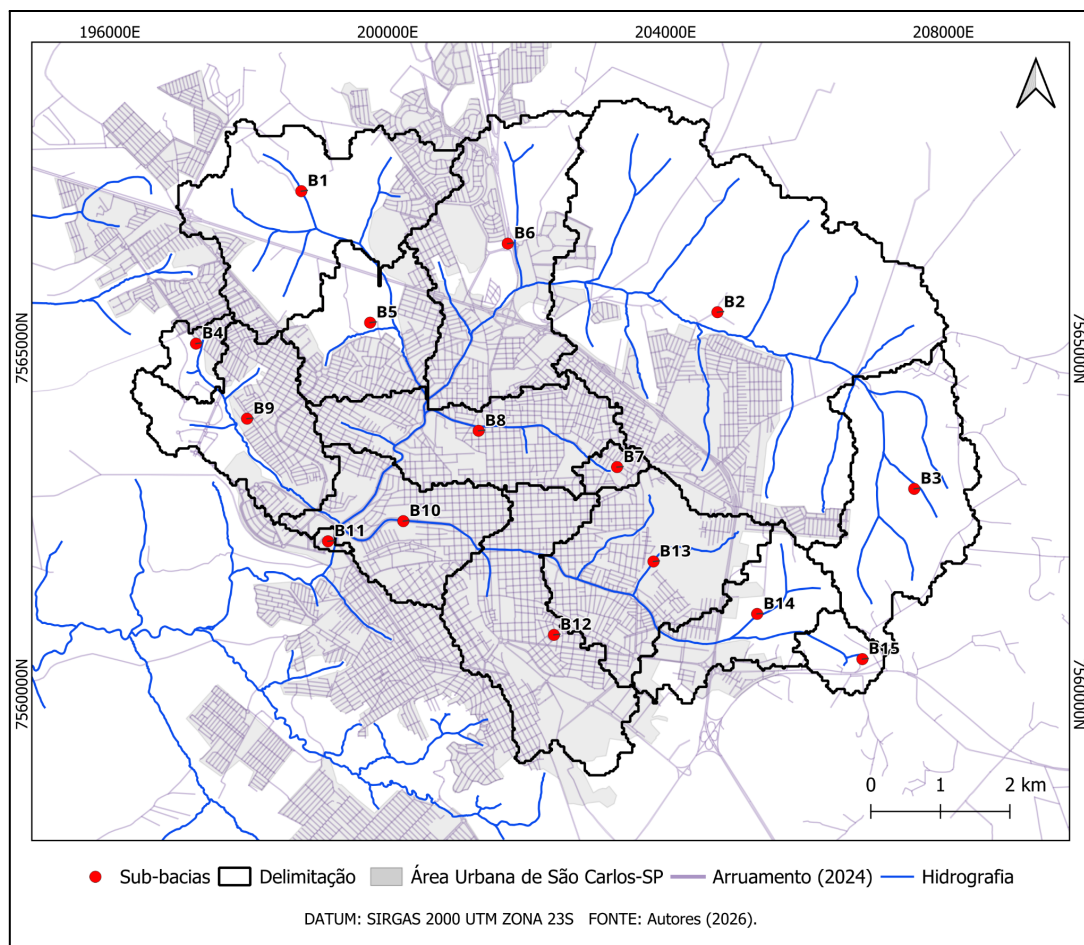


Figura 2 - Mapa base do modelo menos detalhado (Fava, 2019), para a bacia do Monjolinho, em São Carlos, SP, Brasil

O modelo de Souza (2026) foi desenvolvido no software Personal Computer SWMM (PCSWMM), que utiliza o SWMM como base. O modelo apresenta 49 sub-bacias e 151 trechos de hidrografia. Para a sua elaboração, foram utilizadas 119 seções transversais distintas e, portanto, é o modelo mais detalhado avaliado neste trabalho. Por falta de informações, foram descartados os dados de microdrenagem para a elaboração do modelo. Foi realizada uma análise de sensibilidade para definição dos parâmetros a serem calibrados com base nos trabalhos de Yazdi et al. (2019) e Mehri et al. (2024). Foi utilizado o calibrador automático de Fava (2019) e, posteriormente, ajustes manuais foram realizados para melhor aderência do modelo aos dados observados. O período de

dados utilizado para calibração foi de novembro de 2024 a junho de 2025. Os dados foram obtidos pela rede de monitoramento apresentada na Figura 1 e são os mesmos utilizados para comparação dos desempenhos dos modelos neste trabalho. A Figura 3 representa a base do modelo de Souza (2026).

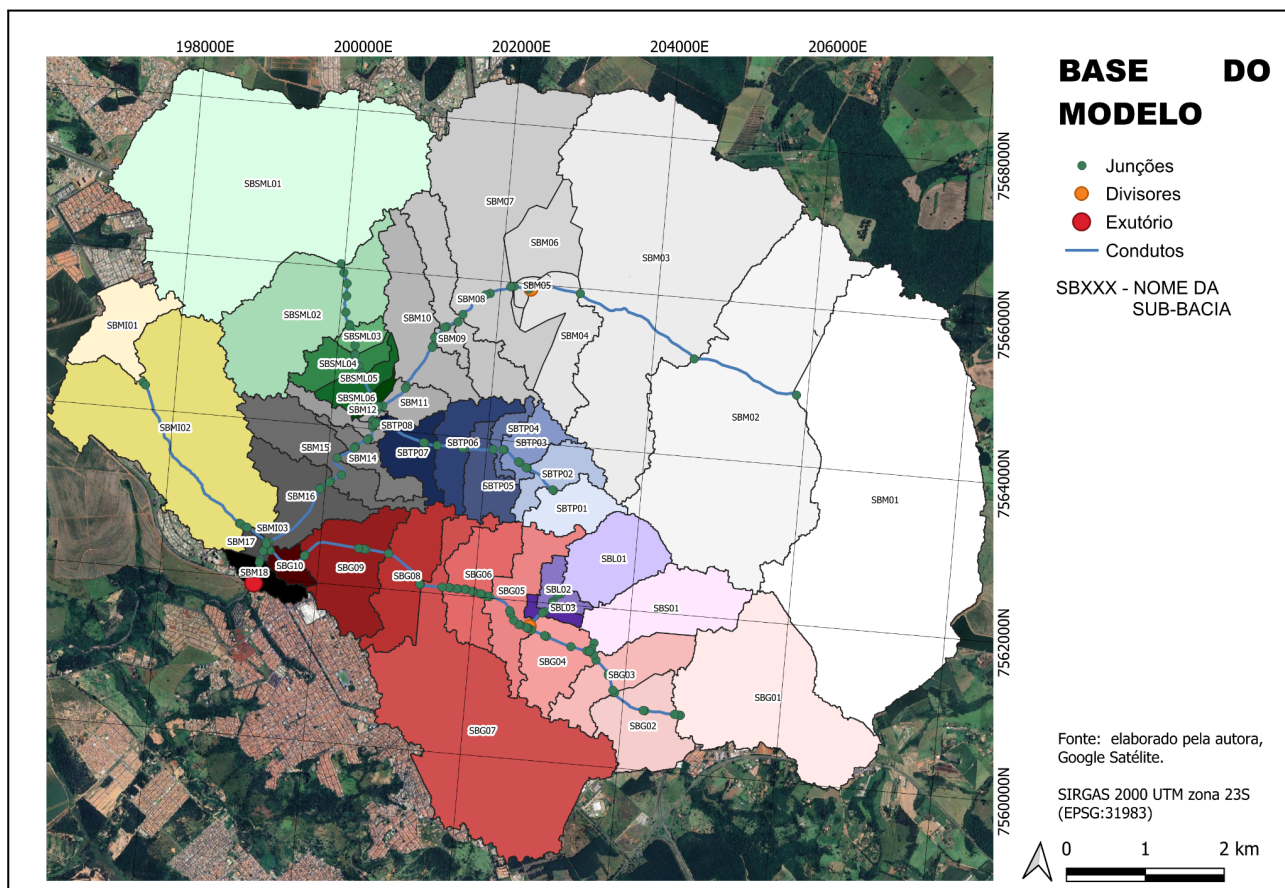


Figura 3 – Mapa base do modelo mais detalhado (Souza, 2026), para a bacia do Monjolinho, em São Carlos, SP, Brasil

Ambos os modelos foram rodados para nove eventos ocorridos entre novembro de 2024 e junho de 2025 e que apresentaram pelo menos 20 mm de precipitação em uma hora, ou seja, foram considerados eventos de precipitação com potencial de geração de cheias em bacias urbanas. A chuva interpolada para as sub-bacias foi obtida pelo método *Inverse Distance Weighted (IDW)* utilizando dados dos sete pluviômetros apresentados na Figura 1. Os coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) foram calculados, comparando-se os níveis de água obtidos com as modelagens e os níveis observados em quatro pontos de monitoramento, localizados próximo aos exutórios de alguns afluentes do Rio Monjolinho, conforme apresentado na Figura 1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de NSE obtidos para cada um dos pontos de controle, eventos e modelos são apresentados na Tabela 1. Ao analisar a qualidade dos modelos apenas pelos NSE, é possível

perceber que o modelo mais detalhado (Souza, 2026) obteve melhor desempenho para quase todos os eventos em três dos quatro pontos de controle. O único ponto de controle em que o modelo menos detalhado (Fava, 2019) obteve melhor desempenho foi o N2, que se situa no Córrego do Gregório, o qual é canalizado e retificado. Os outros três pontos de controle situam-se em rios com calhas naturais.

Tabela 1 – NSE obtidos para os dois modelos para os pontos de controle e eventos de precipitação analisados

Evento	NSE dos modelos nos pontos de controle							
	N1		N2		N3		PN1	
	Modelo menos detalhado	Modelo mais detalhado	Modelo menos detalhado	Modelo mais detalhado	Modelo menos detalhado	Modelo mais detalhado	Modelo menos detalhado	Modelo mais detalhado
1	-11,526	0,798	0,69	-0,438	-0,074	0,586	-3,389	0,609
2	-0,721	0,772	0,594	0,504	-0,095	0,514	-0,685	0,661
3	-1,087	0,658	-0,605	0,088	-0,711	0,423	-0,694	0,542
4	-0,134	0,868	0,748	0,618	-0,077	0,491	-1,058	0,324
5	-5,879	0,754	0,79	0,323	-0,737	-0,6	-3,415	-0,042
6	-37,741	0,078	0,53	-0,064	-1,467	0,403	-0,687	0,04
7	-4,004	0,611	0,811	0,077	0,116	0,555	-0,741	0,735
8	-	-	0,757	0,555	-20,259	0,096	-16,365	-8,373
9	-1,578	0,91	0,798	0,508	-0,625	0,48	-0,475	0,564
Mediana	-2,791	0,763	0,748	0,323	-0,625	0,48	-0,741	0,542

Entretanto, ao analisar apenas os NSE, não é possível compreender as especificidades de cada modelo, de modo que a Figura 4 apresenta os hidrogramas comparativos dos modelos para o evento 9, para embasar a discussão de suas qualidades e fragilidades. Nesta figura é possível observar que há dados observados (séries vermelhas tracejadas) apenas para níveis d'água superiores a 0,25 m, que é a altura dos sensores com relação ao fundo do canal. As vazões de tempo seco não atingem este nível na maior parte dos eventos para os pontos N1 e N2, mas comumente atingem no N3, pois, neste ponto observa-se um acúmulo de resíduos na entrada da ponte onde está instalado o sensor. Isto faz com que os dados do N3 devam ser utilizados com cautela e ajustes manuais, se necessário, para calibração de modelos. Ademais, os modelos não serão capazes de reproduzir as características variáveis de obstrução da passagem de água ocasionada pelo acúmulo de resíduos. Como as vazões de tempo seco não são bem representadas pelos dados observados, a calibração desta parte da vazão é mais dificultosa, podendo ocasionar nas diferenças de vazão de base observadas entre os modelos, representados nas figuras pela linha azul (modelo menos detalhado) e pela linha verde (modelo mais

detalhado). Para avaliar apenas as vazões de cheias, objeto de interesse mais comum nos estudos de hidrológicos urbanos, os NSE foram calculados apenas para os trechos em que há dados observados, ou seja, apenas quando verificou-se um aumento do nível da água no canal devido à ocorrência de chuvas na bacia de contribuição.

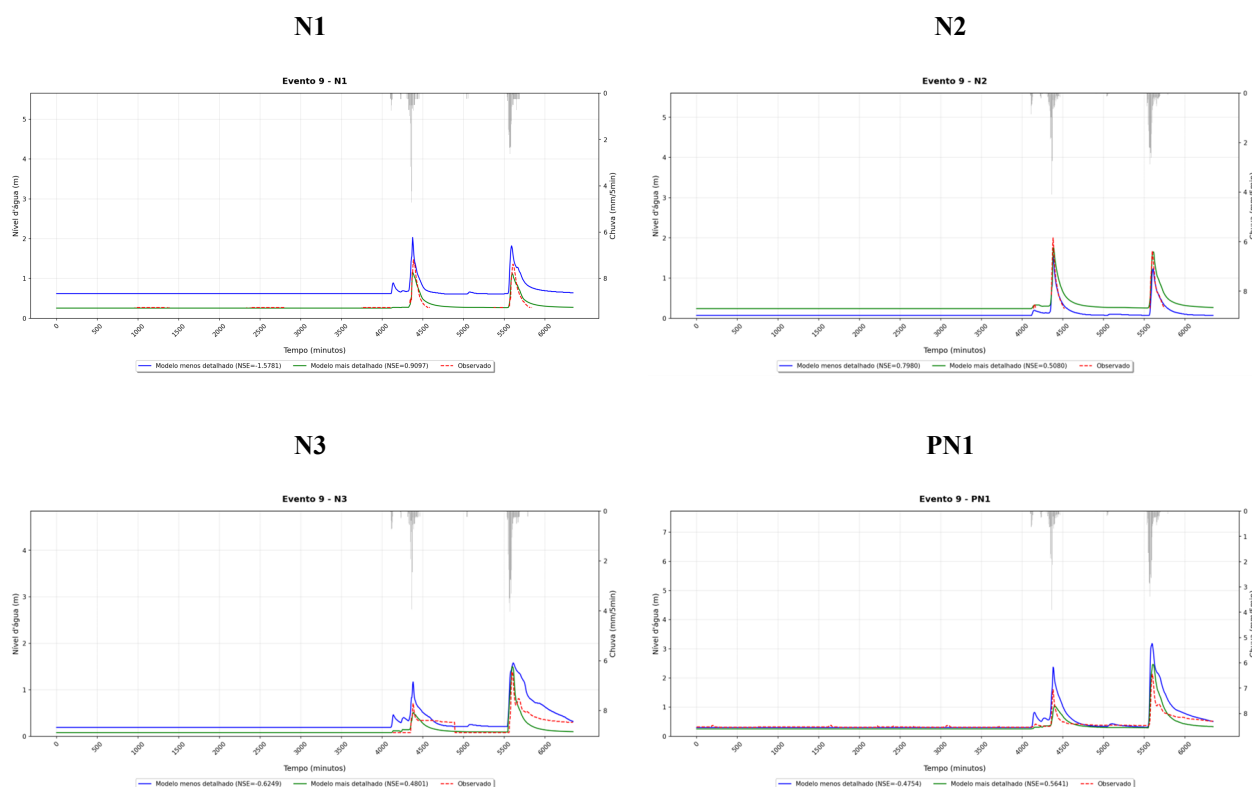


Figura 4 - Hidrogramas do evento 9 para os quatro pontos de controle

Ao analisar a resposta de cada um dos modelos por ponto de controle, é possível observar que o modelo menos detalhado superestimou a vazão de base e as vazões de pico no N1, enquanto o modelo mais detalhado obteve resultados muito bons para a maioria dos eventos neste ponto. Apesar da superestimativa, é possível observar que o comportamento geral dos hidrogramas do modelo menos detalhado está muito similar aos dados observados, de modo que, provavelmente, ao se ajustar a vazão de base, os NSE deste modelo melhorem significativamente. É importante reforçar que o modelo menos detalhado foi calibrado com dados de 2013, de modo que as características da seção transversal do canal, que é natural neste trecho, podem ter se alterado significativamente. O sensor de nível do N1, assim como no N3, está instalado na entrada de uma ponte e, apesar de isto não ter acontecido no período e medições para calibração do modelo mais detalhado, pode ser que tenha ocorrido acúmulo de resíduos ou problema similar no período de medições utilizado para a calibração do modelo menos detalhado, o que pode ter ocasionado um nível de base distorcido e alterado os resultados do modelo calibrado.

Já no ponto N2, o modelo menos detalhado apresentou NSE consistentemente melhores, apesar de os níveis de pico obtidos com o modelo mais detalhado estarem mais próximos dos observados. Neste ponto, o nível de base utilizado no modelo menos detalhado foi menor do que no do mais detalhado e isto fez com que a recessão dos hidrogramas coincidissem melhor com o modelo menos detalhado, apesar da subestimativa das vazões de pico, justificando, provavelmente, os maiores valores de NSE.

O ponto N3 é o ponto crítico de acúmulo de resíduos e dificuldade de representação das condições reais na modelagem, o que provavelmente justifica os NSE ruins obtidos por ambos os modelos. Para contornar este problema, os níveis d'água de tempo seco (medidos como interiores a 0,30 m) foram ajustados para um valor de 0,08 m (valor mais coerente com a vazão de tempo seco neste trecho do canal) para a calibração do modelo mais detalhado, visando calibrar o modelo para um cenário ideal, em que a calha da rede de macrodrenagem seja mantida limpa e funcional. No entanto, como é possível observar nos hidrogramas, este ajuste não seria simples para níveis d'água maiores, de modo que nenhum dos modelos conseguiu representar bem as recessões dos hidrogramas.

Finalmente, o ponto PN1 é o mais complexo de todos, por se localizar no Rio Monjolinho, o qual recebe as contribuições de seus afluentes e, conseqüentemente, os erros embutidos em suas modelagens. Apesar disso, os níveis de base deste ponto foram bem representados em ambos os modelos. Observou-se uma superestimativa consistente dos níveis de pico do modelo menos detalhado e dos níveis de recessão do hidrograma, o que justifica os NSE menores. Apesar disso, o hidrograma como um todo apresentou comportamento similar ao observado, demonstrando possibilidade de ajustes do modelo para melhoria de sua acurácia.

O hidrograma evidencia que o nível de detalhamento espacial influencia diretamente a forma da resposta hidrológica: o modelo menos detalhado produz curvas mais suavizadas e arredondadas, devido à representação agregada da bacia e à adoção de tempos de trânsito médios, o que gera maior difusão do escoamento. Em contraste, o modelo mais detalhado discretiza melhor as sub-bacias e suas características, captando a variabilidade dos tempos de propagação e permitindo uma sincronização mais realista das contribuições, resultando em picos mais definidos e maior aderência aos dados observados. Destaca-se, ainda, que houve intervenções na seção de jusante que anteriormente estrangulava o escoamento, realizadas após a calibração do modelo menos detalhado e antes da calibração do modelo mais detalhado, o que pode ter contribuído para a superestimação dos picos pelo modelo menos detalhado.

CONCLUSÃO

Ao analisar os NSE foi possível verificar que o modelo mais detalhado obteve melhor desempenho em três dos quatro pontos de controle. O único ponto de controle em que o modelo menos detalhado obteve melhor desempenho foi o N2, que se situa no Córrego do Gregório, o qual é canalizado e retificado, diferentemente dos outros três pontos de controle, que se situam em rios com calhas naturais. No entanto, ao avaliar os hidrogramas, é possível observar que, apesar dos valores de NSE, os níveis de pico foram melhor representados pelo modelo mais detalhado para todos os pontos de controle, inclusive para o N2. Os melhores valores de NSE no N2 para o modelo menos detalhado podem ser justificados pelo melhor ajuste das recessões dos hidrogramas, provavelmente relacionado a uma representação mais precisa dos níveis de escoamento de base. De forma análoga, os melhores resultados obtidos pelo modelo mais detalhado nos N1 e N3 também parecem estar relacionados aos ajustes dos níveis de escoamento de base e da qualidade dos dados observados.

Pode-se concluir que ambos os modelos foram capazes de representar adequadamente os comportamentos dos hidrogramas, não sendo verificadas diferenças significativas neste quesito. No entanto, existe potencial de melhoria de ambos com relação às vazões de tempo seco para melhor representação dos níveis de base dos hidrogramas, os quais interferem especialmente nas representações de períodos com menor nível d'água e nas recessões dos hidrogramas. Para que isso seja possível, é essencial melhorar a qualidade dos dados observados e garantir a manutenção e funcionamento adequado das calhas da rede de macrodrenagem urbana, de modo que não haja variações sazonais tão bruscas que não possam ser representadas pelos modelos.

REFERÊNCIAS

- AL-SABHAN, W.; MULLIGAN, M.; BLACKBURN, G. A. A real-time hydrological model for flood prediction using GIS and the WSW. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 27, n. 1, p. 9–32, 2003.
- BRAGG, M. A.; POUDEL, A.; VASCONCELOS, J. G. Comparing SWMM and HEC-RAS Hydrological Modeling Performance in Semi-Urbanized Watershed. **Water**, v. 17, n. 9, p. 1331, 29 abr. 2025.
- DEMERITT, D. *et al.* Challenges in communicating and using ensembles in operational flood forecasting. **Meteorological Applications**, v. 17, n. 2, p. 209–222, 2010.
- FAVA, M. C.. **Improving flood forecasting using real-time data to update urban models in poorly gauged areas**. 2019. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. doi:10.11606/T.18.2019.tde-29062020-175420. Acesso em: 03 jul. 2025.
- GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D. de. Comparação das respostas do modelo SWMM para diferentes amplitudes de cheia. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL, 1.;

SIMPÓSIO DE ÁGUAS DA AUGM, 1., 2004, Santa Maria, RS. **Anais [...]**. Santa Maria: ABRHydro, 2004.

GHANGHAS, A.; DEY, S.; MERWADE, V. Evaluating the reliability of synthetic rating curves for continental scale flood mapping. **Journal of Hydrology**, v. 606, 2022.

HEC-HMS Technical Reference Manual. **Calibration Summary Statistics**. HEC. 2015. Disponível em:

<<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/calibration/calibration-summary-statistics>>. Acesso em: 29 out. 2025.

KHAKBAZ, B.; IMAM, B.; HSU, K.; SOROOSHIAN, S. From lumped to distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 418, p. 61-77, 2012.

MEHRI, M. *et al.* Block-scale use of bioretention cells to restore the urban water balance: A case study in Tehran metropolis. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 51, p. 101621, fev. 2024.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282–290, abr. 1970.

NIAZI, Mehran *et al.* Storm Water Management Model: Performance Review and Gap Analysis. **Journal of Sustainable Water in the Built Environment**, v. 3, n. 2, p. 04017002, maio 2017.

OKIRIA, E.; OKAZAWA, H.; NODA, K.; KOBAYASHI, Y.; SUZUKI, S.; YAMAZAKI, Y. A comparative evaluation of lumped and semi-distributed conceptual hydrological models: does model complexity enhance hydrograph prediction?. **Hydrology**, v. 9, n. 5, p. 89, 2022.

PINA, R. *et al.* Semi- vs. Fully-Distributed Urban Stormwater Models: Model Set Up and Comparison with Two Real Case Studies. **Water**, v. 8, n. 2, p. 58, 16 fev. 2016.

SANTOS, F. M. dos. **Modelagem concentrada e semi-distribuída para simulação de vazão, produção de sedimentos e de contaminantes em bacias hidrográficas do interior de São Paulo**. 2018. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-26112018-145857/>>. Acesso em: 17 abr. 2026.

SOUZA, M. F. e. **Estudo comparativo entre curvas-chave empíricas e sintéticas para gerenciamento de riscos de inundações urbanas: o caso de São Carlos, SP**. Mestrado em Engenharia Urbana—São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 29 abr. 2026.

STORM WATER Management Model (SWMM). US EPA. 17 mar. 2026. Disponível em: <<https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>>. Acesso em: 17 abr. 2026.

WILLIAM, J. A little intro to and story of SWMM. CHI Water, 1996. Disponível em: <<https://www.chiwater.com/Company/Staff/WJamesWebpage/original/homepage/Teaching/KeyModels/swmmHistory.html>>. Acesso em: 9 fev. 2026.

YAZDI, M. N. *et al.* An evaluation of HSPF and SWMM for simulating streamflow regimes in an urban watershed. **Environmental Modelling & Software**, v. 118, p. 211–225, ago. 2019.

AGRADECIMENTOS - Este estudo contou com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio do projeto (processo nº 446043/2023-0) e da concessão de bolsas de estudo (Código de Financiamento 001), bem como da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por meio de bolsa de iniciação científica (processo nº 2025/10595-9).