

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DE RESERVATÓRIOS INFORMAIS E A MITIGAÇÃO NÃO PLANEJADA DE CHEIAS URBANAS

Mel Paes Gomes Moretto¹; Cora Furtado Lobão Pegurier¹; Matilde Masetti¹; Eduarda Mulinari do Amaral¹; Carlos Eduardo Falcão de Carvalho Junior¹; Enzo Toni Caravello¹; Gustavo Spiegelberg²; Osvaldo Moura Rezende²; Matheus Martins de Sousa²; Marcelo Gomes Miguez²; Leandro Torres Di Gregorio² & Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira¹

RESUMO – A urbanização altera significativamente a dinâmica hidrológica das bacias hidrográficas, intensificando os processos de inundação e modificando os mecanismos naturais de armazenamento e propagação das vazões. Este trabalho avalia a influência de reservatórios informais no amortecimento de vazões em bacias urbanas, considerando como estudo de caso a bacia hidrográfica do Rio Acari, no Rio de Janeiro. O estudo parte do entendimento de que estruturas urbanas com capacidade hidráulica limitada, como travessias ferroviárias e sistemas de drenagem subdimensionados, podem provocar inundações locais e transformar áreas urbanas em espaços temporários de armazenamento de água. Foi desenvolvida uma metodologia baseada em modelagem hidrológica capaz de representar esses processos de reservação informal, cujos resultados foram comparados a um modelo hidrodinâmico previamente calibrado. Os resultados demonstraram que a metodologia foi capaz de representar adequadamente o amortecimento e o atraso dos picos de vazão observados na bacia. A abordagem proposta amplia a capacidade representativa de modelos hidrológicos aplicados a bacias urbanas com redução de custos computacionais e da necessidade de dados topobatimétricos detalhados. O trabalho reforça a importância de abordagens integradas para o manejo de águas pluviais em áreas urbanas densamente ocupadas.

Palavras-Chave – Reservatórios informais; Inundações urbanas; Modelagem hidrológica.

ABSTRACT– Urbanization significantly alters the hydrological dynamics of watersheds, intensifying flood processes and modifying the natural mechanisms of flow storage and propagation. This study evaluates the influence of informal reservoirs on flow attenuation in urban watersheds, considering the Acari River basin, in Rio de Janeiro, as a case study. The research is based on the understanding that urban structures with limited hydraulic capacity, such as railway crossings and undersized drainage systems, can generate local flooding and transform urban areas into temporary water storage spaces. A methodology based on hydrological modeling was developed to represent these informal storage processes, and its results were compared with those obtained from a previously calibrated hydrodynamic model. The results demonstrated that the proposed methodology was capable of adequately representing the attenuation and delay of peak flows observed in the basin. The proposed approach enhances the representational capacity of hydrological models applied to urban watersheds while reducing computational costs and the need for detailed topobathymetric data. The study reinforces the importance of integrated approaches for stormwater management in densely urbanized areas.

Key-words – Informal reservoirs; Urban flooding; Hydrological modeling.

1) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, melpgmoretto@gmail.com

2) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica.

INTRODUÇÃO

A expansão urbana sobre bacias hidrográficas tende a compactar e impermeabilizar o solo, aumentar o volume e o pico do escoamento superficial e potencializar inundações (Rezende et al., 2019). Paralelamente, os cursos d'água perdem espaço de suas margens para a ocupação, sendo frequentemente capeados e enterrados. Este processo mascara problemas de contaminação, dificulta a manutenção e permite que, em eventos de cheia, as galerias extravasem sobre áreas urbanas despreparadas para eventos extremos.

Historicamente, o manejo de águas pluviais no Brasil se apoiou em obras higienistas voltadas à aceleração do escoamento (Paraná, 2002). Essa abordagem, porém, esbarra em limitações práticas: ampliar a capacidade hidráulica dos rios exige expansão lateral da calha, algo que conflita diretamente com a ocupação urbana consolidada, sobretudo nas porções mais baixas e planas das bacias. Como alternativa, recorre-se a reservatórios de amortecimento, os chamados "piscinões" (Paraná, 2002). São estruturas enterradas de alto custo de implantação e operação, sobrecarregadas quando recebem lançamentos irregulares de esgoto sanitário (Oliveira et al., 2024), o que compromete sua vida útil e expõe operadores a riscos de contaminação.

Esse modelo mostra-se falido na maioria das cidades brasileiras, com poucas exceções bem-sucedidas. No Rio de Janeiro, a Barragem de Gericinó foi construída nos anos 1990 após as cheias de 1988 na Baixada Fluminense para conter os rios Sarapuí e Pavuna (Rio de Janeiro, 1996). Este é um dos raros casos de sucesso de amortecimento planejado, inundando áreas não ocupadas a montante para proteger regiões densamente ocupadas a jusante.

O mais comum na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, entretanto, é o amortecimento não planejado: estruturas subdimensionadas (galerias, pontes) ou elementos urbanos (vias, ferrovias). Estes elementos acabam funcionando como barragens informais, transformando regiões urbanas em reservatórios de fato, às custas da população local. A resolução pontual desses gargalos pode até aliviar problemas localizados, mas frequentemente desloca e agrava as inundações a jusante. Isto evidencia que há necessidade de uma abordagem integrada de bacia e de metodologias capazes de representar essa complexidade, inclusive para orientar o zoneamento de áreas ainda desocupadas em bacias em urbanização.

Essa representação, porém, esbarra em uma limitação metodológica: modelos hidrológicos não simulam explicitamente o escoamento superficial, de modo que captar fenômenos de reserva informal normalmente exige simulações hidrodinâmicas mais complexas, pouco viáveis em estudos preliminares, análises de larga escala ou contextos com restrição de dados. Diante disso, este trabalho

propõe uma metodologia de simulação hidrológica para bacias urbanas, tendo a bacia do Rio Acari como estudo de caso, buscando incorporar estruturas de controle hidráulico e espaços de reserva informal ao modelo hidrológico, assim, ampliando sua capacidade representativa sem substituir os modelos hidrodinâmicos.

METODOLOGIA

A bacia hidrográfica do Rio Acari, estudo de caso, está localizada na zona norte do município do Rio de Janeiro, caracterizando-se por elevada densidade urbana e recorrentes problemas de inundação. Estudos anteriores evidenciam a elevada vulnerabilidade da região frente aos eventos hidrológicos extremos. Guimarães (2016) demonstrou que a população local apresenta baixa capacidade de recuperação das perdas causadas por inundações, mesmo para eventos frequentes, com tempo de recorrência de apenas dois anos. Já Oliveira *et al.* (2022) identificaram, para uma chuva de projeto com TR de 25 anos, mais de 45 mil residências inundadas, com lâmina média próxima de 40 cm e pontos críticos, como a região do Parque Columbia, apresentando profundidades superiores a 3 m. Além dos impactos diretos às moradias, os estudos destacam prejuízos significativos aos sistemas de transporte, às unidades de saúde, aos equipamentos educacionais, às atividades econômicas e ao patrimônio cultural da região.

A metodologia desenvolvida a ser aplicada no estudo de caso parte da definição do modelo hidrológico. No presente trabalho foi utilizado o software HEC-HMS (Hydraulic Engineering Center – Hydrologic Modelling System). O HEC-HMS é um software desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC) do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE), projetado para simular processos de precipitação-runoff de sistemas de bacias hidrográficas (U.S. Army Corps of Engineers, 2023).

O software é um sistema de modelagem capaz de representar diferentes bacias hidrográficas e seus variados parâmetros hidrológicos. Esta abordagem permite caracterizar de maneira adequada heterogeneidades territoriais nos aspectos de transformação de chuva em escoamento superficial.

A representação física de uma bacia hidrográfica é feita através da ferramenta *Basin Model*. Elementos hidrológicos são adicionados nesta *Basin Model* e são conectados em uma rede ramificada para simular processos de escoamento superficial. Os elementos disponíveis são *Subbasin* (subbacia), *Reach* (curso d'água), *Junction* (confluência), *Reservoir* (reservatório), *Sink* (exutório), entre outros.

Foi necessária a definição das sub-bacias da região estudada. Para isto, através do uso da ferramenta QGIS, foi utilizada a topografia levantada para Região Metropolitana do Rio de Janeiro

na escala 1:1000, como auxílio para delimitação das sub-bacias. Foram definidas trinta e oito subbacias que englobam os rios Pavuna, Calogi, Acari, Tingui, Sapopemba, Marangá, Arroio dos Afonsos, Marinho, Piraquara, Catarino, Caranguejo, Pedras, Sanatório, Ninguém, Cachorros Jusante, Cachorros Montante e São João de Meriti. A Figura 1 apresenta o mapa de delimitação destas subbacias e os nomes dados a cada uma na modelagem desenvolvida no software HEC-HMS.

Para cada sub-bacia, foi criada um elemento *Subbasin*. Dentro deste componente, foram definidas informações como área e métodos de perda e de transformação. Para o método de perda, foi escolhido o SCS *Curve Number* e para o método de transformação o SCS *Unit Hydrograph*. Foi necessário definir o parâmetro *Curve Number* (CN) de cada sub-bacia. O CN é um parâmetro adimensional que estima o volume de escoamento superficial. Neste projeto, o *Curve Number* foi definido a partir de referência do HEC (U.S. Army Corps of Engineers, S.D.). Nos parâmetros do modelo de transformação SCS *Unit Hydrograph*, também é possível ajustar o *Peak Rate Factor* (Fator de Pico), no qual é refletido o abatimento do pico do hidrograma. Bacias hidrográficas mais planas, que podem caracterizar uma extensa área de inundação, têm tipicamente um PRF (*Peak Rate Factor*) mais baixo como PRF100. Já as bacias mais íngremes apresentam PRF maiores como 600. O valor padrão é de 484.

Os elementos *Reaches* são representações de cursos d'água, que podem ter uma ou mais afluições e somente uma efluência. Como método de percurso foi escolhido *Kinematic Wave* (onda cinemática), que aproxima todo fluxo irregular ao ignorar forças de inércia e de pressão. Este método é geralmente usado em áreas urbanas nas quais canais naturais foram modificados para um formato mais regular, como na área de estudo deste modelo.

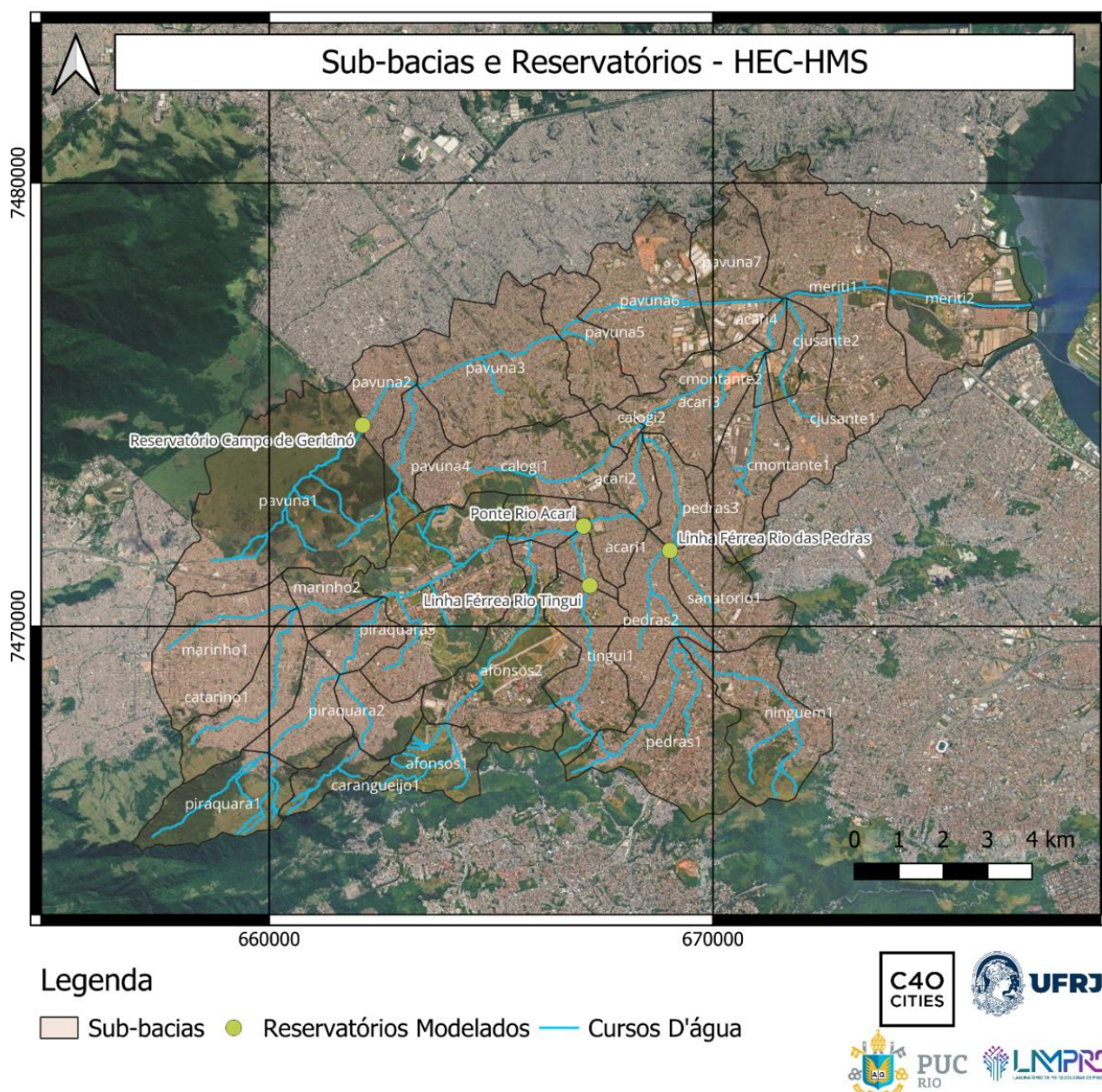


Figura 1 – Mapa da delimitação de sub-bacias no HEC-HMS.

Vale ressaltar que a bacia do Rio Pavuna possui em seu trecho de montante, no Campo de Gericinó, um reservatório de amortecimento das cheias fluviais. Este reservatório é composto por uma estrutura de barramento e uma estrutura hidráulica que limita a capacidade de escoamento do rio e possibilita um vertimento acima dela em caso de acúmulo excessivo de água no reservatório. A não consideração deste elemento no modelo hidrológico faria com que as vazões simuladas fossem superdimensionadas. Desta forma, foi utilizado o elemento *Reservoir* (reservatório) que representa possibilidade de amortecimento de vazões.

No elemento hidrológico *Reservoir*, foi escolhido o método *Culvert Outlet* (Saída de Galeria), que permite um fluxo parcialmente cheio ou submerso através de uma galeria, com uma variedade de

formatos. Sobre os parâmetros, foram inseridas dimensões extraídas dos documentos proporcionados pela Fundação Rio Águas e apresentados na Figura 2. A estrutura hidráulica possui formato celular, um comprimento de 2 metros, 1,3 metros de altura e 1,3 metros de largura, coeficiente adotado de Manning 0,02 para representar o material em concreto e uma cota de saída de 12 metros.

O elemento *Reservoir* ainda requer informações de como é realizada a ocupação da água em seu interior. Dessa forma, a topografia disponível para a região e apresentada no tópico de dados fisiográficos foi utilizada para a definição de uma curva cota-área que estabelece a regra de ocupação da água no modelo.

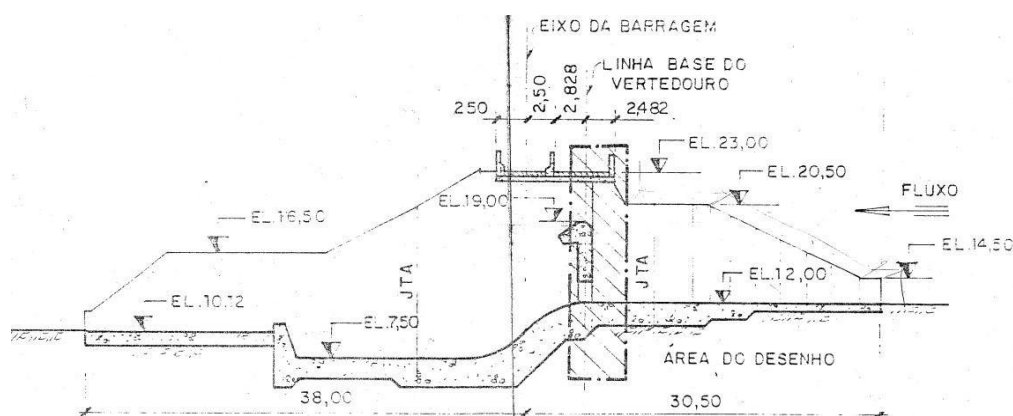


Figura 2 – Seção do reservatório no Campo Gericinó.

O comportamento da cheia fluvial visto neste reservatório, é replicado de forma involuntária em diversas regiões da bacia hidrográfica. Vias e linhas férreas funcionam como diques e pontes e galerias subdimensionadas trabalham como limitadores hidráulicos do sistema de drenagem. Desta forma, a lógica de representação de reservatórios idealizada para o Campo de Gericinó foi replicada para outras regiões urbanas que geravam também um amortecimento das cheias fluviais devido a falhas do sistema de drenagem. A Figura 3 apresenta as principais estruturas localizadas a montante da bacia que geram inundações locais em virtude de limitações de capacidade hidráulica. Os pontos 1 e 4 representam, respectivamente, as travessias dos rios Acari e das Pedras sob a linha férrea (no Parque Madureira); o ponto 2 corresponde à passagem do Rio Acari sob a ponte da Rua Luís Coutinho Cavalcanti; e o ponto 3 representa a travessia do Rio Tingui sob a linha férrea.

As estruturas hidráulicas responsáveis pelo esvaziamento dos reservatórios informais foram representadas a partir das características geométricas e dos materiais das galerias e pontes existentes nos pontos de controle hidráulico. Já os reservatórios foram representados por meio de curvas cota-área elaboradas com base nas áreas urbanas com potencial de inundação localizadas a montante dessas estruturas hidráulicas, permitindo representar o armazenamento superficial temporário associado às inundações urbanas.

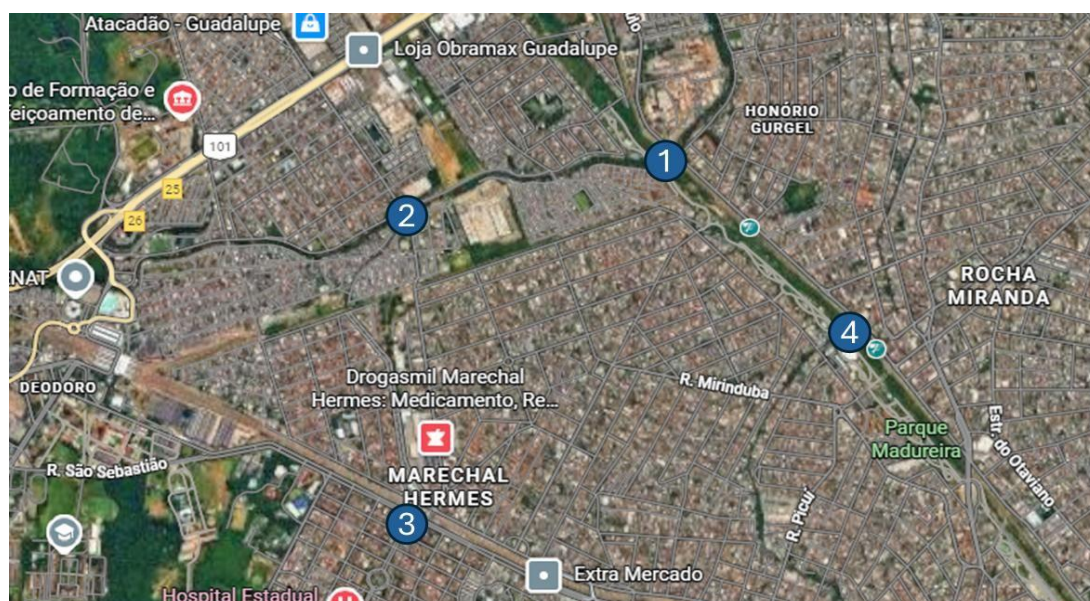


Figura 3 – Localização das principais estruturas hidráulicas que geram extravasamento a montante.

De modo a verificar os resultados, as vazões simuladas foram comparadas aos resultados de um modelo hidrodinâmico previamente calibrado (Oliveira, et al. 2022), com o objetivo de avaliar se a representação dos reservatórios informais era capaz de reproduzir adequadamente o amortecimento de vazões observado na bacia. Essa etapa mostrou-se necessária em virtude de o modelo hidrológico adotado não representar inicialmente os processos de extravasamento em calha e armazenamento superficial distribuído, associados às inundações urbanas.

RESULTADOS

A Figura 4 apresenta a comparação entre os resultados do estudo prévio e do estudo atual para as vazões dos rios Acari e das Pedras. Os pontos de comparação entre os modelos foram definidos em seções localizadas no Parque Madureira, em ambos os cursos d'água. A jusante dessas seções, a influência da maré compromete a representatividade da abordagem hidrológica adotada.

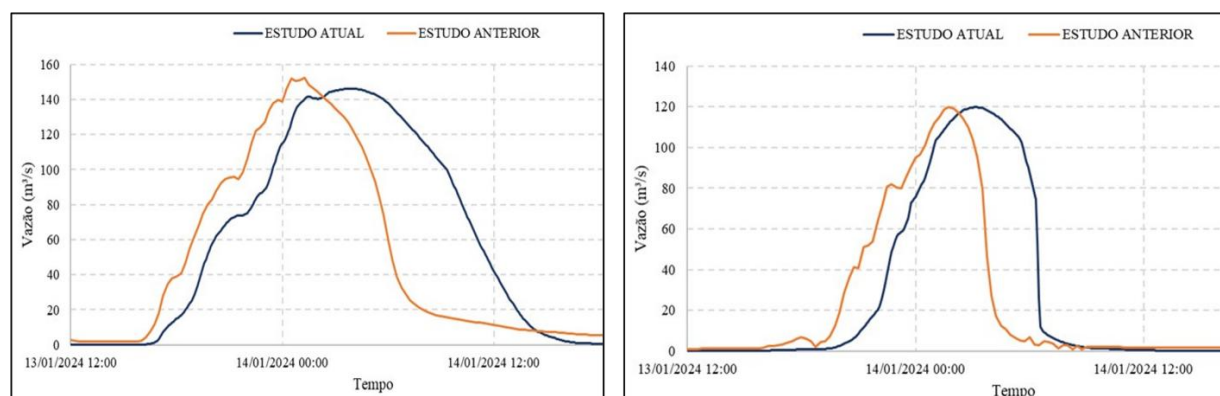


Figura 4 – Gráfico de comparação entre estudos da vazão do Rio Acari (esquerda) e Rio das Pedras (direita).

Os resultados evidenciam uma representação satisfatória dos picos dos hidrogramas, bem como valores próximos de volume escoado entre os modelos analisados. No Rio Acari, o estudo atual apresentou um pico de vazão da ordem de 145 m³/s, ligeiramente inferior aos aproximadamente 155 m³/s obtidos no estudo anterior, porém com uma diferença relativamente pequena. Já no Rio das Pedras, a diferença de magnitude entre os picos foi quase nula, com ambos os modelos convergindo para valores próximos de 120 m³/s.

Por outro lado, observa-se que em ambos os cursos d'água, há um deslocamento do pico do hidrograma do estudo atual em relação ao estudo anterior. Esse deslocamento pode estar associado a um maior amortecimento no modelo hidrológico ocasionado pela não representação hidrodinâmica na calha do rio o que faz com que o amortecimento ocorra mesmo para vazões nas quais o sistema de drenagem seria capaz de escoar sem extravasamentos. A inclusão dos dispositivos de amortecimento no modelo hidrológico introduz efeitos adicionais de retardo no escoamento, já que parte do volume afluente passa a ser temporariamente armazenada a montante das seções de controle, como em galerias e pontes subdimensionadas, vias e trechos ferroviários que funcionam como barramentos, sendo liberada de forma gradual.

Para ilustrar esse mecanismo, analisou-se o comportamento do modelo atual desenvolvido em três pontos críticos da bacia do Rio Acari, identificados como potenciais áreas de reserva informal e localizados na Figura 3 (Capítulo Metodologia). As Figuras 5, 6 e 7 apresentam, respectivamente, os hidrogramas de vazão afluente (linha tracejada) e vazão efluente (linha contínua) simulados para os Pontos 3, 4 e 2 (Figura 3), gerados diretamente pela ferramenta HEC-HMS. É possível então avaliar o efeito de amortecimento e retardo promovido pelas estruturas de controle representadas no modelo.

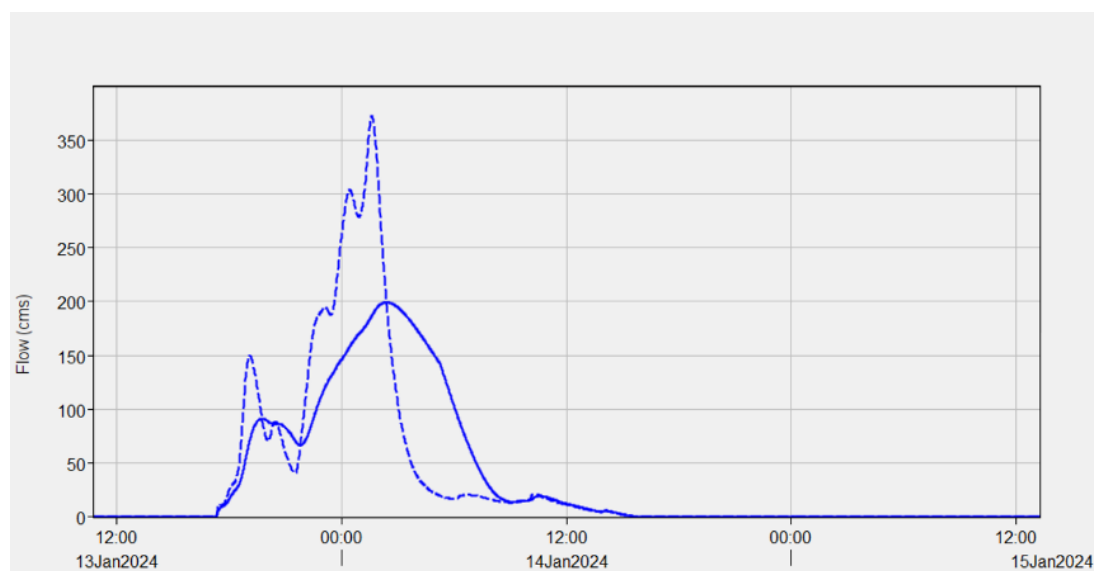


Figura 5 – Hidrograma de vazões afluente e efluente do Reservatório 3 (Ponte Rio Acari), Ponto 2.

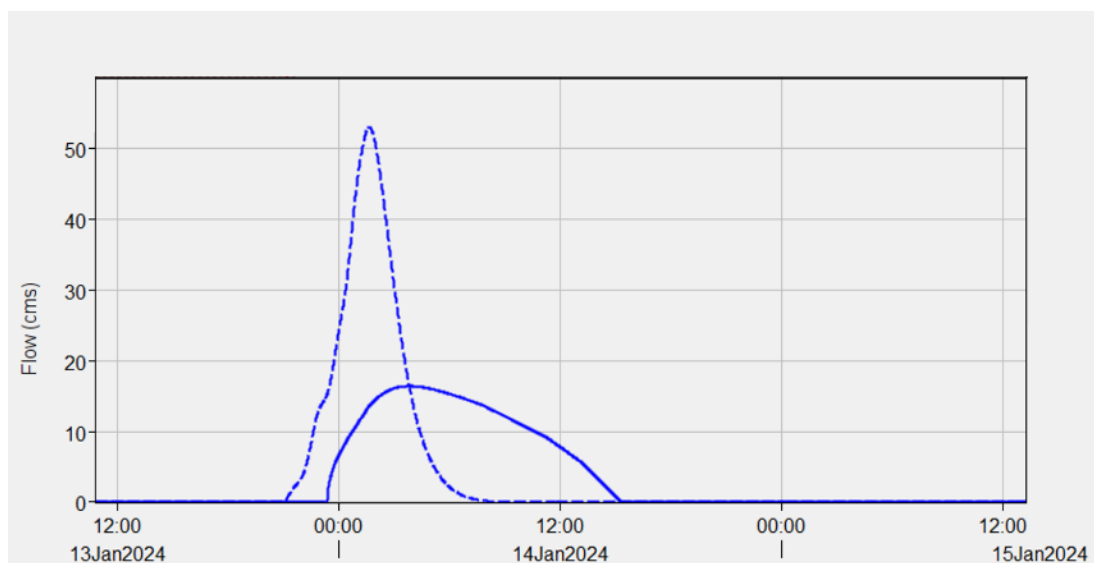


Figura 6 – Hidrograma de vazões afluente e efluente do Reservatório 5 (Linha Férrea Rio Tingui), Ponto 3.

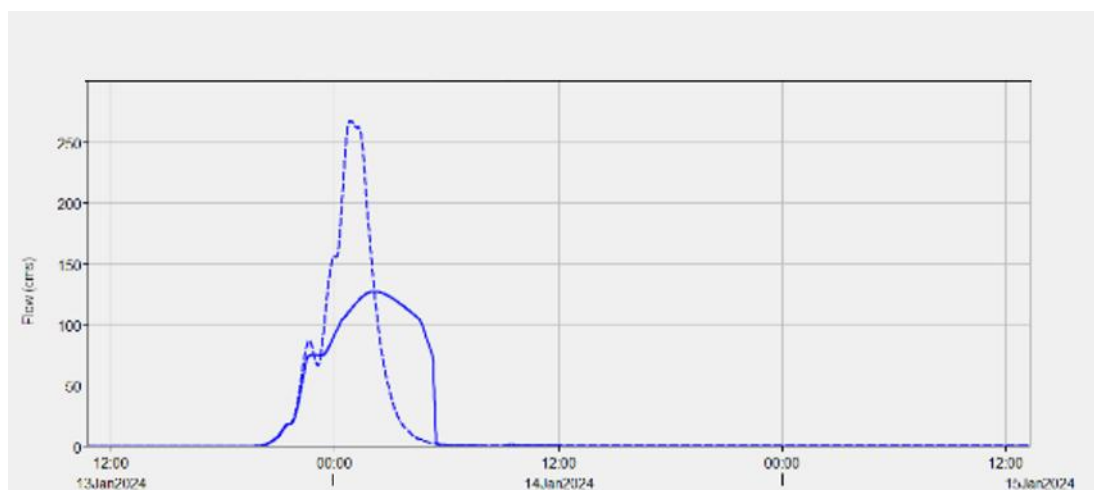


Figura 7 – Hidrograma de vazões afluente (de entrada) e efluente (de saída) do Reservatório 4 (Linha Férrea Rio das Pedras), Ponto 4.

No Ponto 2 (Figura 5), observou-se uma vazão afluente com comportamento com dois picos distintos, atingindo um pico primário de aproximadamente 150 m³/s, seguido de um pico principal próximo a 370 m³/s. A vazão efluente, por sua vez, apresentou um único pico suavizado de cerca de 200 m³/s, defasado em relação ao pico afluente. No Ponto 3 (Figura 6), observou-se o maior efeito relativo de amortecimento entre os três pontos: a vazão afluente, com pico de aproximadamente 54 m³/s, foi reduzida para cerca de 17 m³/s na saída, acompanhada de uma cauda de recessão consideravelmente mais longa, estendendo-se até a tarde do dia 14/01. No Ponto 4 (Figura 7), a vazão afluente atingiu um pico de aproximadamente 265 m³/s, enquanto a vazão efluente apresentou pico de cerca de 125 m³/s, reduzindo metade de sua vazão.

De maneira geral, as três seções analisadas reproduzem de forma consistente o mecanismo de amortecimento e retardo promovido pelas áreas de reservação informal. Entretanto, esse efeito

também é simulado para vazões de menor magnitude, em razão da não representação do escoamento em calha no modelo hidrológico. Essa simplificação constitui uma limitação da modelagem; contudo, no que se refere à estimativa do pico de vazão, o fenômeno é representado de forma adequada.

Esse comportamento é compatível com o mecanismo de amortecimento e retardo identificado na comparação com o estudo anterior (Figura 4).

A representação adequada dessas contribuições permite reduzir a necessidade de aplicação de simulações hidrodinâmicas em todas as regiões sujeitas a inundação. Além disso, permite que haja uma estimativa consistente das vazões de montante para eventual contribuição com simulações hidrodinâmicas em trechos de jusante. Dessa forma, o modelo hidrológico foi considerado adequadamente ajustado para representar a contribuição do escoamento superficial na bacia hidrográfica estudada, considerando inclusive os efeitos dos reservatórios informais citados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo demonstrou que a representação de estruturas urbanas com capacidade hidráulica limitada, capazes de promover amortecimento de vazões e transformar determinadas regiões urbanas em reservatórios informais durante eventos de cheia, pode ser adequadamente incorporada a um modelo hidrológico. A comparação com um modelo hidrodinâmico previamente calibrado indicou que essa simplificação é capaz de reproduzir satisfatoriamente o amortecimento e o atraso dos picos de vazão observados, reforçando o potencial de modelos hidrológicos adequadamente parametrizados para representar, de forma preliminar, processos hidrodinâmicos associados a inundações urbanas. Assim, é reduzida a necessidade de modelagens hidrodinâmicas extensas em determinadas etapas de análise, com ganhos relevantes em custo computacional e na demanda por dados detalhados.

Os resultados reforçam, ainda, a necessidade de uma abordagem integrada das bacias hidrográficas urbanas, pois intervenções pontuais voltadas exclusivamente à resolução de problemas locais podem alterar significativamente a propagação das vazões e potencializar impactos a jusante. O trabalho evidencia, assim, que processos de inundação urbana podem exercer função hidráulica relevante na dinâmica de propagação das cheias, indicando que áreas urbanas inundadas passam, em determinados contextos, a integrar funcionalmente o sistema de drenagem da bacia hidrográfica.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro pela disponibilização dos dados utilizados neste trabalho e à C40 *Cities* pela parceria no desenvolvimento do projeto “Sistema de Alerta Comunitário de Inundações Acari”, que impulsionou parte das avaliações realizadas no contexto desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ. Manual de drenagem urbana: Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba. Curitiba. 2002. Disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/mdu_versao01.pdf
- GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Iguaçu-Sarapuí. Rio de Janeiro, 1996. Disponível em: <https://tainacan-ehelo.agenciaja.com/wpcontent/uploads/tainacan-items/93/1755/ig-re-29-vol1-Plano-Diretor-Bacia-do-Iguacu.pdf>
- GUIMARÃES, L. F., Metodologia para avaliação da capacidade de recuperação em função de prejuízos de sucessivos eventos de inundação. Dissertação (Mestrado), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.
- OLIVEIRA, A. K. B., *et al.* (2022). Evaluating the role of urban drainage flaws in triggering cascading effects on critical infrastructure, affecting urban resilience. *Infrastructures*, 7(11), 153.
- OLIVEIRA, A. K. B., *et al.* (2024). MODCEL-MHUS: a comprehensive multilayer hydrodynamic unified simulation for stormwater, sanitary sewer systems, and urban surface. *Water Science & Technology*, 90(1), 190-212.
- REZENDE, O. M., DE OLIVEIRA, A. K. B., JACOB, A. C. P., & MIGUEZ, M. G. (2019). A framework to introduce urban flood resilience into the design of flood control alternatives. *Journal of Hydrology*, 576, 478-493.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-HMS CN Tables. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm/cn-tables>. Acesso em: 11 jan. 2026.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. HEC-HMS User's Manual. Version 4.11. Davis: U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center, 2023. Disponível em: https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_User's_Manualv4.11-20231018.pdf. Acesso em: 11 dez. 2025.