

Avaliação de Soluções de Baixo Impacto para Mitigação de Alagamentos em Áreas Urbanas Não Monitoradas

Assessment of Low-Impact Development Solutions for Flood Mitigation in Unmonitored Urban Areas

Evaluación de Soluciones de Desarrollo de Bajo Impacto para la Mitigación de Inundaciones en Áreas Urbanas No Monitoreadas

Gisele Aparecida da Silva Santos¹

Benedito Cláudio da Silva²

Lucia del Rosario Garrido Rios³

RESUMO: Devido à histórica falta de planejamento no uso do solo, o problema dos alagamentos se tornou crônico em muitas cidades brasileiras. Para enfrentar suas causas, as soluções de drenagem baseadas na infiltração da água no solo, conhecidas por técnicas de desenvolvimento de baixo impacto, têm surgido como alternativas para redução de alagamentos em áreas urbanas. Neste contexto, este estudo buscou analisar o efeito potencial dessas soluções na redução das áreas de armazenamento na área central da cidade de Caxambu, Minas Gerais. Para isso, foi empregado o *Storm Water Management Model* na simulação de eventos hidrológicos para diferentes cenários. A ausência de dados de monitoramento para ajuste do modelo foi compensada utilizando recursos como registros fotográficos, relatos dos cidadãos e alguns levantamentos de campo. O cenário com a maior proporção de intervenção na área de estudo apresentou redução média de 33% do pico de vazão e 43% do volume de escoamento. Neste cenário mais permeável a lâmina d'água permanece dentro dos limites da calha de escoamento, minimizando os impactos. Com base nos resultados, conclui-se que as técnicas de desenvolvimento de baixo impacto avaliadas apresentaram bom desempenho para atuarem submetidas aos eventos de chuva de baixa intensidade.

PALAVRAS-CHAVES: gestão da drenagem; modelagem hidrológica; bacia sem monitoramento; Modelo SWMM.

ABSTRACT: *Due to the historical lack of planning in land use, the problem of flooding has become chronic in many Brazilian cities. To address its causes, drainage solutions based on water infiltration*

¹ Mestranda em Engenharia Hídrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). E-mail: giseleaparecida@unifei.edu.br.

² Professor Adjunto na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). E-mail: silvabenedito@unifei.edu.br.

³ Mestranda em Engenharia Hídrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). E-mail: garridorios.lucia@gmail.com.

into the soil, known as low-impact development techniques, have emerged as alternatives for reducing flooding in urban areas. In this context, this study sought to analyze the potential effect of these solutions on the reduction of flooding areas in the central area of the city of Caxambu, Minas Gerais. For this, the Storm Water Management Model was used in the simulation of hydrological events for different scenarios. The absence of monitoring data for model adjustment was compensated by using resources such as photographic records, citizen reports and some field surveys. The scenario with the highest proportion of intervention in the study area showed an average reduction of 33% in the peak flow and 43% in the volume of runoff. In this more permeable scenario, the water depth remains within the limits of the runoff channel, minimizing impacts. Based on the results, it is concluded that the low-impact development techniques evaluated performed well in situations subject to low-intensity rain events.

KEYWORDS: *drainage management; hydrological modeling; ungauged basin; SWMM Model.*

RESUMEN: *Debido a la falta histórica de planificación en el uso del suelo, el problema de las inundaciones se ha vuelto crónico en muchas ciudades brasileñas. Para abordar sus causas, han surgido soluciones de drenaje basadas en la infiltración de agua en el suelo, conocidas como técnicas de desarrollo de bajo impacto, como alternativas para reducir las inundaciones en zonas urbanas. En este contexto, este estudio buscó analizar el efecto potencial de estas soluciones en la reducción de áreas inundables en el área central de la ciudad de Caxambu, Minas Gerais. Para ello, se utilizó el Modelo de Gestión de Aguas Pluviales en la simulación de eventos hidrológicos para diferentes escenarios. La ausencia de datos de seguimiento para el ajuste del modelo se compensó con el uso de recursos como registros fotográficos, informes de ciudadanos y algunas encuestas de campo. El escenario con mayor proporción de intervención en el área de estudio mostró una reducción promedio de 33% en el caudal pico y 43% en el volumen de escorrentía. En este escenario más permeable, la profundidad del agua se mantiene dentro de los límites del canal de escorrentía, minimizando los impactos. Con base en los resultados, se concluye que las técnicas de desarrollo de bajo impacto evaluadas presentaron buen desempeño ante eventos de lluvia de baja intensidad.*

PALABRAS-CLAVE: *manejo de drenaje; modelación hidrológica; cuenca no monitoreada; Modelo SWMM.*

INTRODUÇÃO

A impermeabilização resultante do desenvolvimento urbano desordenado e a ausência de planejamento acentua os riscos de alagamentos e inundações urbanas. Como consequência disso, a população está sujeita a desalojamentos, perdas materiais, econômicas, risco de vida e interrupção dos serviços essenciais como transporte, eletricidade e saneamento. Os índices de prejuízos têm apresentado dados preocupantes no país. O último diagnóstico da prestação dos serviços de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas no Brasil, elaborado a partir das informações do Sistema Nacional de Informações para o Saneamento Básico (Brasil, 2023) indicou que, no ano de 2022, o Brasil registrou um total de 522,4 mil desabrigados e/ou desalojados, número que superou em mais da metade o registrado no ano de 2021 (218,4 mil). Dos municípios respondentes ao SNIS, o documento aponta o levantamento de 2,4 milhões de domicílios em risco de inundações em áreas urbanas.

As soluções estruturais têm auxiliado na mitigação dos riscos de inundações e alagamentos, porém a aplicação apenas dos sistemas tradicionais (unidades de retenção e retenção) atenua, mas não soluciona o problema. Isso ocorre pois são aplicadas após a ocupação acontecer, contudo a maioria desses problemas poderia ser minimizada com o planejamento de medidas na ocupação do solo que potencializam a infiltração e reduzem o escoamento superficial (Bezerra; Oliveira; Costa, 2020).

É nesse sentido que as soluções baseadas no controle na fonte, como as técnicas *Low Impact Development* (LID), no Brasil denominadas Desenvolvimento de Baixo Impacto, têm ganhado destaque por sua capacidade de mitigar os efeitos dos alagamentos, aproveitando estratégias de infiltração e retenção de água pluvial. As soluções LID atuam diretamente na redução do escoamento superficial e na melhoria da infiltração, além de serem comprovadamente sustentáveis e econômicas (Zhang *et al.*, 2021), principalmente se consideradas desde as fases de planejamento da expansão urbana.

Assim como no caso das técnicas tradicionais de drenagem, a eficiência das soluções LID para controle da drenagem pode ser estimada por meio de modelos hidrológicos adequados para este fim. Atualmente existe uma ampla gama de modelos hidrológicos dedicados a bacias urbanizadas (Elga; Jan; Okke, 2015), porém são poucos que possuem ferramentas específicas para técnicas LID. Dentre os modelos disponíveis, o *Storm Water Management Model* (SWMM), desenvolvido em 1971 pela United States Environmental Protection Agency (EPA), é capaz de simular a aplicação LIDs, incluindo trincheiras de infiltração, jardim de chuva, telhado verde, pavimento permeável, sistemas de biorretenção, valas vegetadas e cisternas.

As diferentes aplicações do SWMM, juntamente com as estruturas LID, lhe confere um vasto campo para apoiar tomadas de decisão e investigação científica. Recentes estudos têm enfatizado os ganhos na redução da vazão de pico a partir da associação de LID com a infraestrutura de macrodrenagem, o que possibilita sua aplicação desde os lotes urbanos até a escala de bacias urbanas complexas (Zanandrea; Silveira, 2019). O modelo também subsidia a análise da eficiência de LID apoiando estudos de avaliação de sua contribuição na demanda por água não potável, na redução da demanda energética e na redução da emissão de carbono para sistemas híbridos com LID (Macedo *et al.*, 2021).

Outro aspecto que vem sendo explorado pode auxiliar no entendimento da dinâmica da bacia em resistir aos efeitos climáticos adversos. Essa temática aplica a LID na perspectiva de avaliação da resiliência da bacia quanto ao impacto de inundações em condições climáticas atuais e futuras (Fava *et al.*, 2022; Samuel *et al.*, 2024), provendo, assim, situações hipotéticas que sirvam de parâmetros para tomadas de decisão.

Contudo, ainda que o SWMM tenha um amplo campo de aplicação, a disponibilidade de dados para alimentar as simulações na ferramenta ainda é um fator limitante para estudos

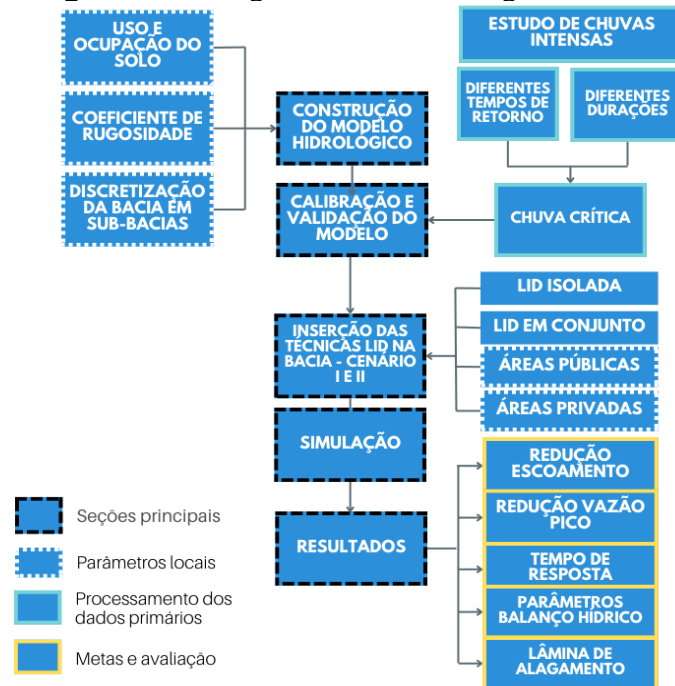
como este, principalmente no caso de países em desenvolvimento, devido à carência de investimento no monitoramento das bacias. No Brasil, a densidade de postos hidrológicos nas áreas urbanas ainda é pequena. Nas redes existentes, há postos com séries curtas, falhas ou dados insuficientes, obrigando a adoção de meios alternativos para a estimativa de dados pluviométricos. Infelizmente, obter os dados necessários às simulações é um processo caro, principalmente se os sistemas são dinâmicos e exigem atualizações com maior frequência dos modelos (Assumpção *et al.*, 2018).

Na ausência desse monitoramento, a ciência cidadã é uma aliada na determinação de parâmetros de controle para calibração. Por essa prática, as modelagens de bacias não monitoradas podem ser validadas por diferentes meios, como extensões das manchas históricas de inundação, registros em imagens de vídeo e fotografias de inundação, marcas de inundação ou evidências anedóticas coletadas em relatos e entrevistas com os cidadãos (Samuel *et al.*, 2024). Por sua abordagem inclusiva, a ciência cidadã promove a inserção da população nas pesquisas contribuindo para promoção científica das informações que estão mais acessíveis a este público do que à comunidade científica. Essa abordagem estabelece uma mudança de paradigma ao transformar os papéis dos cidadãos de receptores passivos para colaboradores proativos promovendo espaços mais sustentáveis e resilientes contra os desastres (Samuel *et al.*, 2024).

Em uma abordagem pertinente a alagamentos pontuais, este trabalho tem por objetivo avaliar a aplicabilidade de técnicas LID para redução de alagamentos recorrentes na região central da cidade de Caxambu, MG. Com este propósito, buscou-se demonstrar a viabilidade de ajustar o modelo SWMM com base em dados obtidos dos registros da população local.

METODOLOGIA

A metodologia deste estudo foi dividida em quatro etapas principais. A primeira etapa consiste na construção do modelo, utilizando dados e características físicas da bacia hidrográfica em estudo. Em seguida, procede-se à calibração do modelo, ajustando-o com base em dados observados para garantir maior precisão nos resultados. A terceira etapa envolve a definição e locação das técnicas LID, levando em consideração a viabilidade técnica e a localização estratégica dessas intervenções. Por fim, a última etapa abrange a obtenção e análise dos resultados, conforme o fluxograma apresentado na Figura 1, que descreve detalhadamente o processo metodológico aplicado.

Figura 1 - Fluxograma da metodologia de estudo

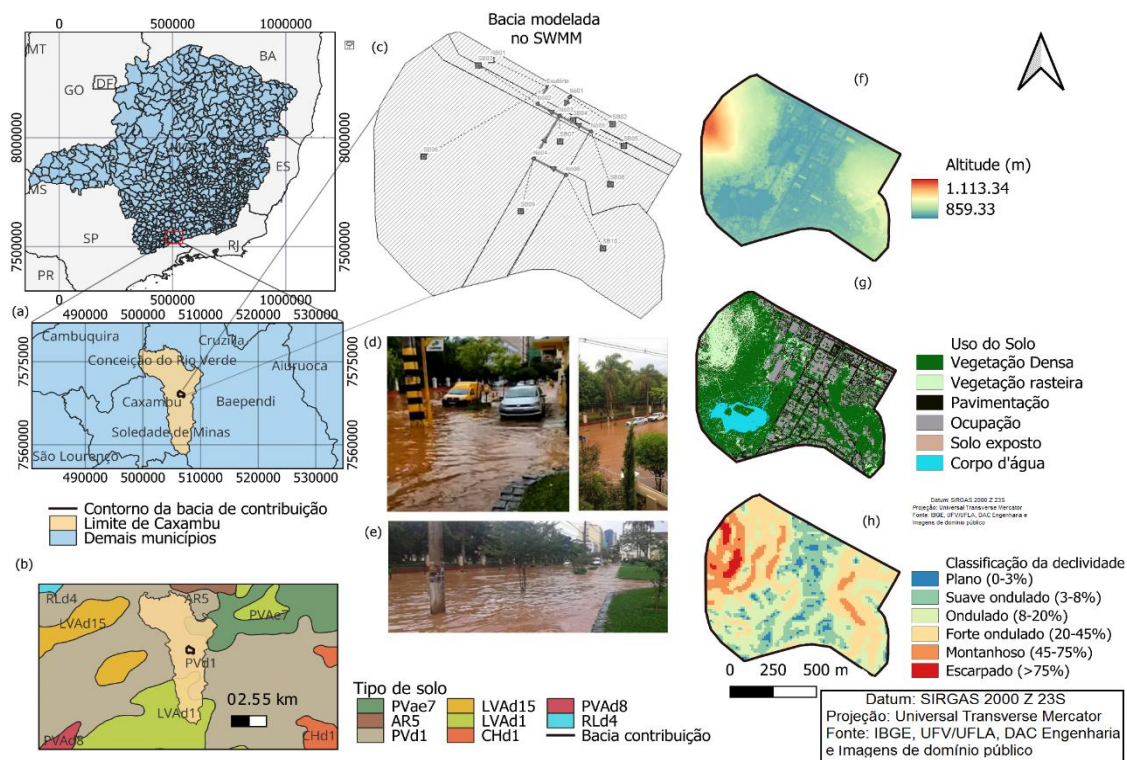
Fonte: Os autores.

Área de estudo

O estudo foi realizado no município de Caxambu (Figura 2a) localizado no estado de Minas Gerais, Brasil. Encontra-se sob as coordenadas 21°58'20" de latitude Sul, longitude 44° 56' 20" a Oeste e situa-se à altitude média de 904 metros. O clima do município é subtropical moderado úmido (Caxambu, 2015), sendo os meses mais quentes apresentam temperatura média de 22° C enquanto os meses mais frios apresentam temperatura média de 15° C. Com precipitação média anual de 1.470 milímetros, é registrado no município a concentração de chuvas entre os meses de novembro a março com inverno seco.

O local de aplicação da modelagem compreende uma parcela da região central de Caxambu, uma área comercial composta por comércio lojista, turismo, hotelaria e redes bancárias delimitada por uma extensão de 0,8 quilômetros quadrados. Os alagamentos (Figura 2d e Figura 2e) recorrentes acontecem na Avenida Camilo Soares, na rua João Carlos, na Rua Antônio Miguel Arnout e na rua João Pinheiro, trechos de acúmulo de águas pluviais em que o sistema de drenagem não é suficiente para captar e transportar as águas até o ribeirão à jusante.

Figura 2 - Localização do município (a); mapa de solos (b); modelagem da bacia no SWMM (c); evento de alagamento em 2015 (d) e 2021(e); altimetria (f); uso e ocupação do solo (g); e relevo (h) da área de estudo



Fonte: Os autores.

Parâmetros da bacia

Para os parâmetros da bacia foram aplicadas as seguintes ferramentas: i) Tipo de solo da bacia (Figura 2b), obtido pelo mapa de solos de Minas Gerais em escala 1:650.000, desenvolvido por UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA (UFV, 2010); ii) Relevo da região (Figura 2f): MDE da bacia adotando a classificação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1979); iii) Delimitação de áreas permeáveis e impermeáveis por classificação supervisionada do uso e ocupação do solo da bacia (Figura 2g) em imagens aéreas recentes (ano 2022) obtidas em aerolevantamento por meio de drones (resolução 8 centímetros).

A bacia de contribuição é compreendida por uma região com amplitude altimétrica de 254 metros, é composta majoritariamente por vegetação densa (árvores de médio a grande porte - 48,88%), solo PVd1 – Argissolo vermelho, distrófico típico A moderado/fraco textura média/argilosa; fase floresta subperenifólia (UFV, 2010) e relevo forte ondulado sendo identificado em sua região central a predominância do relevo suave ondulado (Figura 2h). O tempo de concentração (TC) da bacia foi determinado pela média dos valores obtidos pela aplicação de equações para bacias urbanas (Método de Carter, Desbordes, Schaake e Kirpich) sugeridas por Silveira (2005) além do tempo de concentração do método SCS. O

coeficiente de Manning para áreas permeáveis ou impermeáveis foi obtido pela média do CN ponderado pela área das classes de uso de solo.

Eventos de chuva intensa

Os índices pluviométricos adotados neste estudo pertencem à série de dados consistidos compreendida no período de jan. /1941 a set. /2022 do posto, código 2144003, sob a responsabilidade do Instituto Mineiro de Gestão das Águas, IGAM-MG. Inicialmente foi realizada a análise de falhas e frequência das chuvas por meio do estudo da série temporal para obtenção das precipitações raras (chuvas com volumes intensos e baixa frequência). Esses quantis raros foram estimados por ajustes de funções de distribuição de probabilidades. Para isso, os registros de precipitações foram organizados em ordem sequencial pela distribuição empírica de Weibull e ajustados pelas distribuições teóricas de probabilidade Gumbel (Extremo Tipo I), Log Pearson Tipo III e Log normal.

A escolha da distribuição mais adequada ao estudo pode ser feita considerando estimativas mais seguras e conservadoras, que garantem o maior volume de precipitação para um determinado tempo de retorno (Montes-Pajuelo *et al.*, 2024) ou pela avaliação dos dados empíricos submetidos a testes de aderência, como Qui-quadrado e Kolmogorov-Smirnov. Neste estudo, constatou-se que a distribuição Log-Normal apresentou maior aderência aos dados amostrais, de acordo com o teste Kolmogorov-Smirnov.

As chuvas de durações menores foram determinadas a partir da correlação entre as precipitações de 6 minutos, 1 hora e 24 horas, empregando os coeficientes do método de Isozonas, conforme Santos, Lucena e Carvalho (2015). Para a distribuição temporal, a chuva foi discretizada com passo de 1 minuto pelo método de Huff 1º Quartil com probabilidade de excedência de 50% para durações menores que 2 horas. Os volumes de precipitação foram selecionados para os tempos de retorno (TR) usuais aos projetos de drenagem adotando TR de 2, 5 e 10 anos. Contudo, considerando que os resultados das simulações para o TR de 1 ano se aproximavam mais às lâminas da área alagada no local, optou-se também por avaliar esse tempo de retorno.

Técnicas LID adotadas para avaliação

Para este estudo foram adotadas as seguintes técnicas LID: telhado verde, pavimento permeável, trincheira, poço de infiltração e jardim de chuva. Essas estruturas foram escolhidas segundo análise de restrições e aptidões locais da área para receber a implantação de LID (Quadro 1). Suas dimensões foram determinadas de acordo com as recomendações da

Instrução Técnica de Drenagem Urbana do município de Belo Horizonte - MG (Belo Horizonte, 2022) e o Manual de Drenagem Urbana de Curitiba-PR (Paraná, 2002).

Quadro 1 - Aptidões e restrições das áreas disponíveis na bacia e LIDs aplicáveis em cada local

Áreas disponíveis	Aptidões	Restrições	LID aplicável				
			TI	PP	JC	PI	TV
Calçadão (localizado na bacia 01)	- Baixa declividade - Ampla área de contribuição - Local amplo, reservado para circulação e lazer que favorece a ambientação e paisagismo com áreas verdes	- Para a escala de 1:650.000 o solo é considerado argiloso, necessário a análise do solo local		X	X		
Praça Hélio Castilho Moreira (localizado na bacia 10)	Extensa área de contribuição	- Para a escala de 1:650.000 o solo é considerado argiloso, necessário a análise do solo local - Exige-se modificações na camada superficial do pavimento para condução do fluxo até o poço central - Área de contribuição com baixa carga de sedimentos				X	
R. Benjamin Constant e R. Comendador Pereira	- Baixo tráfego - Baixa declividade	Ruas mais estreitas		X			
Áreas verdes	Baixa declividade	Áreas particulares	X				
Imóveis particulares	Alta densidade de imóveis com áreas de telhado grandes	- Áreas privadas - Necessidade de capacidade de suporte da estrutura - Depende da aceitação do proprietário					X
Calçadas	- Algumas ruas possuem calçadas mais largas - A extensão promove a inserção de medidas lineares	- Larguras estreitas - Calçadas situadas na Av. Camilo Soares estão próximas de locais de captação de água (zonas com possibilidade de contaminação do lençol freático) - Possibilidade de contaminação do lençol freático - Algumas ruas possuem declividade superior a 5%	Sem adição de LID				
Sarjetas	- Ruas ao norte da bacia com largura ampla - As sarjetas são medidas que já recebem o fluxo da água	- Algumas ruas são estreitas, o uso das sarjetas largas poderia restringir o espaço carroçável - Algumas ruas possuem declividade superior a 5%	Sem adição de LID				

Fonte: Os autores.

*TI: Trincheira de infiltração; PP: Pavimento permeável; JC: Jardim de chuva; PI: Poço de infiltração; TV: Telhado verde.

O manual determina as dimensões das estruturas em função do tipo e a condutividade hidráulica do solo predominante na bacia, para isso o manual de Belo Horizonte recomenda, a partir das características do solo, funções específicas para pré-dimensionamento, o que o torna aplicável a locais com características pedológicas semelhantes. Os parâmetros de caracterização de cada LID seguem as recomendações dos manuais do SWMM e recomendações da norma ABNT NBR 16.416/2015 - Pavimentos permeáveis de concreto (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015).

Cenários de simulação

Foram simulados três cenários a fim de avaliar o desempenho da implementação de técnicas LID, sendo um cenário referência, que representa as ocupações atuais da bacia (cenário base ou cenário zero) e dois cenários com redução das áreas impermeáveis, com diferentes proporções de implantação de LID na área da bacia, sendo eles:

- Cenário I: cenário com inserção de LID na proporção de 5,2% de área na bacia. Estruturas LID implantadas - Canteiro pluvial; Pavimento permeável e telhados verdes em 50% das edificações com área superior a 100 metros quadrados;

- Cenário II: cenário com inserção de LID na proporção de 9,3% de área na bacia. Estruturas LID implantadas - Canteiro pluvial; Pavimento permeável, Poço e trincheira de infiltração e telhados verdes em 100% das edificações com área superior a 100 metros quadrados.

Baseado na topografia e uso do solo, a área de estudo foi subdividida em 10 sub-bacias (Figura 2c) para orientar a inserção dos condutos e nós que recebem as contribuições individuais ou conjuntas das sub-bacias. Na modelagem foram adotados condutos de seção transversal retangular a fim de caracterizar o fluxo superficial, pois na maior parcela das ruas há poucas unidades coletoras e não foi possível obter dados sobre a rede de drenagem existente. Assim, optou-se por simular um escoamento superficial com lâmina d'água máxima aceitável compatível com a altura da guia (meio-fio) padrão de 15 centímetros. A área de alagamento compreende os nós 2 (Rua João Carlos), 3 (Esquina entre R. João Carlos e Av. Camilo Soares) e 4 (Avenida Camilo Soares) como pontos críticos (Figura 2c).

Nas simulações foram adotados o método da Onda Dinâmica para representar a propagação do escoamento, a separação dos escoamentos pelo método da Curva Número do *Service Conservation Soil*, com classe II para umidade antecedente do solo e a duração de análise de 2 horas com passo no tempo de 1 minuto.

Calibração do modelo SWMM

Com intuito de representar a dinâmica da precipitação e do escoamento, o modelo SWMM demanda uma grande quantidade de variáveis que incluem as características locais tanto da bacia quanto do sistema de drenagem (Assumpção *et al.*, 2018; Behrouz *et al.*, 2020), além dos dados de precipitação e eventos históricos. Para balizar a falta de informações de monitoramento, a calibração do modelo deste estudo baseou-se no conceito de ciência cidadã. A ciência cidadã é uma abordagem participativa que envolve a população na modelagem pelo fornecimento voluntário de informações geográficas e conhecimentos locais que auxiliem a validação e atualização dos modelos (Samuel *et al.*, 2024). Os dados via ciência cidadã foram obtidos de imagens divulgadas pela população nos meios digitais, redes sociais, notícias de jornais e relatos dos cidadãos documentados no diagnóstico do Plano Municipal de Saneamento Básico (Caxambu, 2020).

A calibração foi realizada de forma manual comparando os níveis de alagamentos das simulações em um ponto de controle (nó 4), com registro fotográfico da lâmina d'água observada em eventos ocorridos no local. Também foram determinados os parâmetros de

rugosidade, armazenamento em depressão e, para a análise da permeabilidade e impermeabilidade da bacia, o parâmetro *Curve Number*. Na calibração, cada um dos parâmetros foi modificado a partir dos valores de referência do manual do SWMM e ajustados até que se atingisse uma lâmina próxima à lâmina d'água observada localmente.

Como referência foi adotada a lâmina média de 25 centímetros identificada nos eventos de alagamento que ocorreram na data de 1 de dezembro de 2021 com registro de precipitação acumulada em 52,3 milímetros (Figura 2d) e em 10 de dezembro de 2015 (Figura 2e) com altura de chuva de 10,4 milímetros, ambos registrados pelo posto pluviométrico da ANA (IGAM - 02144003). Embora os eventos com diferentes volumes de chuva acumulados tenham apresentado a mesma magnitude de alagamento, a diferença de volume está associada a diferentes distribuições de chuva ao longo do dia.

A lâmina d'água atingida neste local foi adotada segundo o nível da lâmina próximo à borda da mureta de jardim (Figura 3) existente no local. A mureta possui uma borda arredondada com altura cerca de 32 centímetros e altura referente à face paralela à avenida, com 25 centímetros (Figura 3a e Figura 3c). Assim, o modelo foi calibrado de modo que a variação dos parâmetros de calibração resultasse em um cenário base com valores de lâmina de alagamento próximos aos observados nos eventos recorrentes (Figura 3b).

Figura 3 – Medição da mureta de jardim existente no local de controle (a) e imagem da área alagada (b) e sem alagamento (c)



Fonte: a) Os autores; b) Chuva [...], (2015); c) Os autores.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

No processo de calibração analisou-se a lâmina de alagamento resultante no ponto de controle, em função do parâmetro *Curve Number* (CN). Porém, constatou-se uma baixa sensibilidade do modelo em relação ao CN. Verificou-se maior sensibilidade em relação ao coeficiente de rugosidade e à permeabilidade do solo, sendo estes os parâmetros determinantes para a calibração (Costa; Tsuji; Koide, 2021; Silveira *et al.*, 2022). Em função disso, a rugosidade inicialmente considerada para asfaltos lisos foi alterada como asfalto rugoso. Adotou-se também o índice de 20% ao parâmetro taxa de área impermeável sem

armazenamento em depressão, valor um pouco inferior ao recomendado pelo manual do SWMM (25%). E, por fim, foi necessário alterar o parâmetro de profundidade de armazenamento em depressões nas áreas impermeáveis, considerando 1 milímetro acima do valor recomendado pelo manual do SWMM (3,54 milímetros).

Na literatura, os parâmetros de calibração geralmente seguem como referência os valores estipulados pelos manuais do SWMM. Em média, são aplicáveis alterações de 25 a 50% aos parâmetros de áreas impermeáveis (Costa; Tsuji; Koide, 2021; Silveira *et al.*, 2022) e os parâmetros de rugosidade dependem da textura da superfície avaliada. Cabe ressaltar que o intervalo de variação dos parâmetros não deve ser fixo, uma vez que este depende muito das características das bacias como as variações físicas, ecológicas e socioeconômicas (Silveira *et al.*, 2022). Deve-se considerar ainda que, a robustez da calibração é fortemente influenciada pela ausência de dados de chuva e níveis d'água medidos na escala adequada, tanto temporal como espacial. Dessa forma, é recomendável a revisão da calibração sempre que dados mais detalhados forem obtidos.

Além disso, o processo de calibração manual é dispendioso por demandar uma análise criteriosa, não apenas do modelo, mas também dos dados locais que estão sujeitos à subjetividade do ajuste manual (Behrouz *et al.*, 2020). Este será ainda mais trabalhoso quando a bacia for complexa, possuir grande extensão e heterogeneidade no uso e ocupação do solo. Neste estudo, os parâmetros foram analisados separadamente enquanto os demais eram mantidos fixos sem considerar as inter-relações dos parâmetros. Para estudos mais robustos, recomenda-se a calibração automática, pois permite a avaliação minuciosa do impacto conjunto das variáveis sobre o modelo.

Evidencia-se ainda que, embora a calibração manual do modelo baseada na ciência cidadã seja uma solução viável na ausência de dados monitorados, há um risco de incerteza elevada. Ainda que não seja possível obter novos dados para análise, os trabalhos de Macedo *et al.* (2022) e Etter *et al.* (2020) apoiam o uso da ciência cidadã como metodologia viável para coleta e calibração de dados em modelos de inundações.

Esses estudos relatam a importância de assegurar a coleta suficiente de dados para fomentar melhores desempenho nas modelagens, pois em geral o desempenho das validações dos modelos é pior quando calibrados com baixos índices de observações de campo. E sobretudo, o efeito depende da resolução temporal dos dados usados, assim, dados coletados com maior frequência (diária ou semanal) garantem melhores resultados nas calibrações. Pondera-se, portanto, que essa abordagem é uma solução válida em contextos onde o monitoramento formal de dados é limitado se asseguradas as medidas para redução de incertezas.

Após calibração e determinação do tempo crítico da duração da chuva em 20 minutos, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 1. As simulações dos cenários com LID, com

o modelo ajustado ao cenário base, resultaram na redução da vazão no intervalo de 14,57% a 36,15% e para o volume de escoamento no intervalo de 21,88% a 44,17% para os cenários I e para o cenário II.

Tabela 1 – Vazão de pico e volume de escoamento nos cenários modificados

Cenário	Vazão (m ³ /s)				Volume de escoamento (m ³)			
	TR01	TR02	TR10	TR15	TR01	TR02	TR10	TR15
P. crítica. (mm)	14,40	22,69	35,75	37,72	14,40	22,69	35,75	37,72
Cenário base	2,47	5,46	10,54	11,32	2.748,21	5.073,85	9.063,37	9.695,68
Cenário I	2,11	4,58	8,43	9,02	2.050,18	3.799,82	7.038,90	7.574,06
Cenário II	1,79	3,79	6,73	7,25	1.540,22	2.832,83	5.254,56	5.666,83

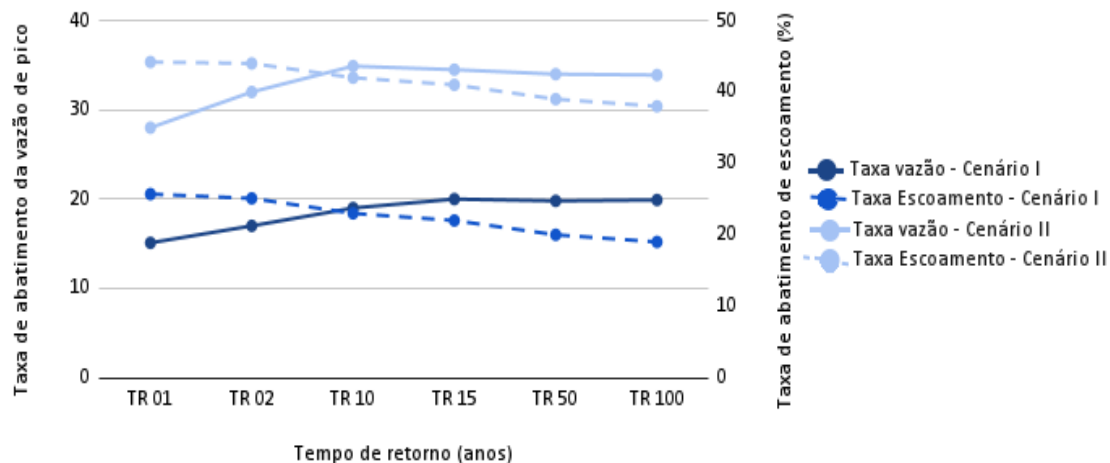
Fonte: Os autores.

*TR: Tempo de retorno.

Embora os resultados apontem uma redução da lâmina d'água, o alagamento reduzido no cenário mais promissor (cenário II) ao final da simulação (2 horas) para eventos com recorrência de 1 ano ainda superará a capacidade da calha no nó 2 (alcançando 24 centímetros) e continuará com lâmina observável inferiores a 10 centímetros nos condutos. O nó 2 possui pouca diferença (5 centímetros) em relação ao nó de montante (nó 3), portanto apresenta uma lâmina acumulada superior ao final da simulação. No cenário menos permeável as lâminas permanecem abaixo de 20 centímetros em todos os nós.

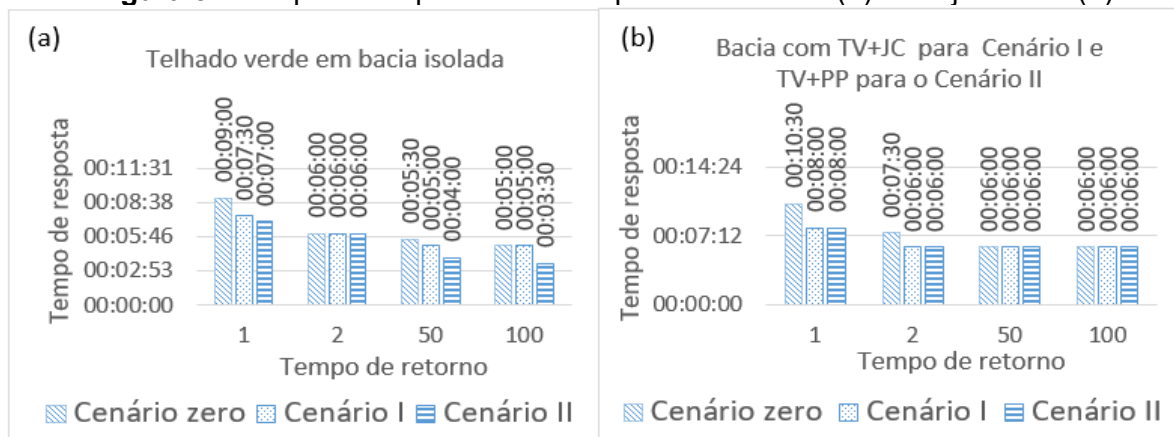
Ressalta-se que as estruturas LID têm sua eficiência limitada pelo volume de armazenamento, tipo de solo constituinte de sua camada drenante e modo de disposição na bacia. Sendo assim, considerando a proporção de LID simuladas e as áreas disponíveis para implementação LID, reforça-se que para eliminar completamente os alagamentos seria necessário a complementação da capacidade do sistema tradicional de drenagem existente. Além disso, é necessário realizar a manutenção da rede de drenagem com limpeza constante e desobstrução das galerias.

Na análise do conjunto da bacia, até o TR 15 anos para o cenário I e TR de 10 anos para o cenário II há um aumento da eficiência da taxa de abatimento da vazão de pico na bacia (Figura 4). Para os TR de 50 e 100 anos a eficiência de abatimento é reduzida conforme o aumento da intensidade, pois os eventos de menor frequência possuem maior volume de chuva. A taxa de redução da vazão alcançou os valores médios de 17,76% no cenário I e 32,55% no cenário II (TR de 1 a 15 anos). Entre os TR de 50 e 100 anos foram alcançados os respectivos índices médios de abatimento de vazão correspondente a 18,56% no cenário I e 34,03% no cenário II. Já para a taxa de redução do volume de escoamento (Figura 4), foram alcançados os valores médios de 23,68% no cenário I e 42,93% no cenário II (TR de 1 a 15 anos). Entre os TR de 50 e 100 foram alcançados os respectivos índices médios de 19,32% no cenário I e 38,71% no cenário II.

Figura 4 - Comparação da taxa de redução da vazão de pico (a) e do escoamento superficial (b) para diferentes tempos de retorno

Fonte: Os autores.

Analisando a aplicabilidade isolada dos telhados verdes (TV) em uma das sub-bacias, nota-se que embora a LID tenha influenciado a redução da vazão de pico e escoamento individual da sub-bacia, não foram capazes de aumentar o tempo de resposta da bacia. O pico acontece mais rápido com adiantamento (redução) variando de 2 a 16 minutos para os tempos de retorno (Figura 5), pois a vazão é menor e o escoamento ainda continua rápido. A aplicação conjunta de Telhado Verde (TV) e Jardim de Chuva (JC) no cenário I e TV e Pavimento Permeável (PP) no cenário II na sub-bacia 2 apresentaram tendência semelhante mantendo tendência constante para os TR de 50 e 100 anos.

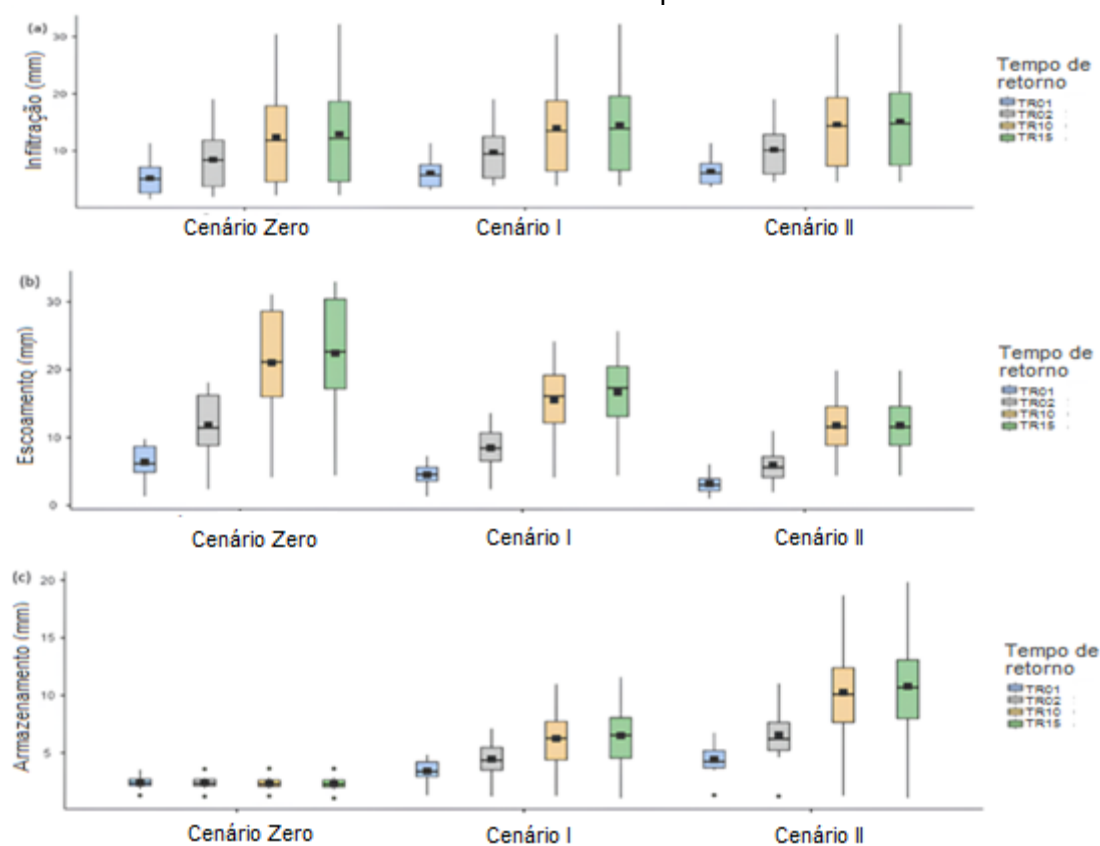
Figura 5 - Tempo de resposta da bacia para LID isolada (a) e conjunto LID (b)

Fonte: Os autores.

Nos gráficos da Figura 6 são apresentados os valores dos componentes do balanço hídrico (infiltração, escoamento e armazenamento) estimados para as sub-bacias nos diferentes tempos de retorno e cenários simulados. Cada box-plot apresentado representa a distribuição dos valores do componente nas 10 sub-bacias, em cada um dos cenários e

tempos de retorno específicos. Em relação ao total infiltrado (Figura 6a), nos dois cenários com implantação de LID é perceptível que ocorre um aumento até o tempo de retorno de 10 anos. Entretanto, do TR de 10 para 15 anos as diferenças na distribuição são muito pequenas, indicando uma tendência de se tornar constante com o aumento do TR. Isso é reflexo da saturação das áreas permeáveis implantadas, que é atingida ao longo da duração da chuva. Com o processo de infiltração, as camadas de armazenamento da estrutura LID são preenchidas limitando a percolação do volume de água, saturando a estrutura e favorecendo o processo de escoamento superficial.

Figura 6 - Box-plot para os componentes do balanço hídrico estimados para as sub-bacias em diferentes cenários e tempos de retorno



Fonte: Os autores.

Desse modo, a saturação das técnicas LID reduz a capacidade de infiltração, refletindo a redução de sua eficiência. Isso é numericamente avaliado a partir da análise da amplitude das médias (pontos pretos no gráfico) e medianas (linha contínua no meio do gráfico) entre os tempos de retorno. Para intensidades de chuva maiores, há um aumento no volume de chuva e à medida que aumenta a intensidade da chuva (maior TR) a diferença absoluta da mediana de infiltração entre os tempos de retorno é reduzida.

Com o aumento da intensidade (TR de 10 e 15 anos) observa-se a maior variabilidade (amplitude interquartílica) nas estimativas de infiltração individuais das sub-bacias. Isso é

resultado da variação das características individuais de cada sub-bacia (declividade, permeabilidade, área e perdas pelo armazenamento em depressão) que influenciam o processo de infiltração. A declividade e a taxa de área permeável possuem distribuições diferentes entre as sub-bacias contribuindo para a variabilidade da infiltração nas sub-bacias. Altas taxas de declividade não favorecem o processo de infiltração devido ao aumento da velocidade de escoamento, já a permeabilidade da bacia vai resultar no maior volume de infiltração à medida que a bacia é menos impermeabilizada. Assim como esperado, o cenário mais permeável apresenta maiores estimativas de infiltração.

Acerca do componente escoamento total, foi considerado o escoamento das áreas permeáveis e impermeáveis das sub-bacias. Para a estimativa do componente armazenamento foram consideradas as lâminas retidas em depressões tanto em áreas permeáveis como áreas impermeáveis. Como a capacidade de volume das técnicas de infiltração é constante, o volume de escoamento aumenta com o aumento do volume e intensidade da chuva mesmo quando superada a capacidade de infiltração. Por isso, é notado no gráfico o aumento proporcional do escoamento em função do aumento do tempo de retorno.

O cenário zero apresenta os menores índices de variabilidade do volume de armazenamento, pois é um cenário que possui maiores índices de escoamento. Nos demais cenários, a variação dos volumes se deve às diferentes proporções da lâmina de armazenamento em depressões adotadas para cada sub-bacia na calibração do modelo. A exemplo dessa variação cita-se as sub-bacias 9 (área de aproximadamente 6 hectares) e 10 (área de aproximadamente 16 hectares) que foram calibradas com as maiores lâminas de armazenamento. A sub-bacia 10 possui área maior em relação às demais, portanto tem capacidade para maior armazenamento dada sua proporção de áreas em depressão. Além disso, para intensidades maiores, há maior dificuldade de formação de lâminas de águas nas depressões devido à dificuldade de acomodação das poças de chuva.

Em um estudo semelhante, os autores Palla e Gnecco (2015) constataram, em um cenário com 36% da bacia permeável, o comportamento de redução da performance hidrológica das técnicas LID a uma taxa linear entre os tempos de retorno de 2 a 10 anos. Esse episódio está associado ao desempenho do sistema que é dado em função da capacidade de armazenamento efetivo das técnicas LID. Em contrapartida ao aumento do volume e do pico da chuva, a capacidade de retenção da técnica LID é mantida constante.

Este estudo apresentou aumento da eficiência da taxa de abatimento da vazão de pico até o TR de 15 anos. Por este resultado, compreende-se que o volume da LID dimensionado foi suficiente para atender a demanda hídrica com saturação suportável até pelo menos a recorrência de 10 anos (ponto de inflexão da reta na Figura 4). Para TR maiores, a eficiência de abatimento da vazão é reduzida conforme o aumento da intensidade. Portanto, infere-se

que os melhores resultados na redução do escoamento são obtidos com quantis de chuvas de baixa magnitude e maiores durações.

Assim como identificado por Zhou *et al.* (2023), reforça-se que a taxa de redução do volume de escoamento também decai com o aumento da intensidade (maior TR e mesma duração). Contudo, este resultado se mostrou menos eficiente a outros estudos que alcançaram redução para eventos associados até o TR de 20 anos (Zanandrea; Silveira, 2019). Apesar disso, independentemente da amplitude de recorrência analisada, tais resultados apoiam a assertiva de que as técnicas sejam aplicadas para mitigar os alagamentos associados aos eventos mais frequentes (Fava *et al.*, 2022).

Outro fator que também afeta a eficiência das técnicas LID está associado à capacidade de armazenamento e escala de aplicação. Para que o efeito de implantação seja perceptível, é requerido no mínimo a conversão de 5% da área impermeável da bacia em área permeável (Palla; Gnecco, 2015). A partir dessa proporção, as soluções LID são capazes de contribuir com o aumento da resiliência em bacias com características de média urbanização, quando sujeitas a eventos de cheias (Macedo *et al.*, 2022). Neste estudo, a aplicação de 5% de LID foi capaz de gerar redução da lâmina de alagamentos. Contudo, teria mais eficiência se aplicada em maiores proporções. A baixa disponibilidade de áreas limita a eficiência das técnicas LID em áreas urbanas já consolidadas.

Ademais, a forma de distribuição da estrutura na área de planejamento também refletirá efeitos sobre o escoamento (Zhou *et al.*, 2023). Por isso é imprescindível o planejamento do solo no desenvolvimento urbano. As sub-bacias analisadas receberam diferentes distribuições de LID de modo que a menor sub-bacia possui LID em toda extensão e a maior tem as estruturas concentradas em proporções maiores na região central de sua área de abrangência. É constatado que há melhor eficiência na instalação de LID em áreas à jusante do que à montante, entretanto, independentemente do método de instalação, como o desempenho hidrológico é mais afetado pela intensidade das chuvas, a maior resiliência será alcançada com a aplicação de ambas as distribuições (Fan *et al.*, 2022).

Outra forma de aplicação das soluções LID que contribui para maior eficiência dessas práticas é a distribuição em cascata. Neste modo de disposição, o deságue da LID de montante ocorre sobre outra à jusante, até atingir o sistema de drenagem ou deságue final (Zhang *et al.*, 2021). Essa disposição, além de contribuir para a redução de poluentes, retarda o escoamento para jusante, mas demanda espaço disponível para aplicação linear. Já para locais íngremes e espaço disponível, a aplicação da LID em degraus pode auxiliar na redução da velocidade de escoamento e permitir um maior intervalo de infiltração da água no solo.

Sua eficiência também está associada à magnitude e ao padrão de chuvas, além de ser influenciada pelo comportamento do pico de intensidade (Macedo *et al.*, 2021; Yin *et al.*, 2020;

Zhou *et al.*, 2023). Além do método de Huff aplicado no processo de determinação das chuvas intensas, foi avaliada a aplicação da metodologia dos blocos alternados, com maiores intensidades no meio da chuva. Porém os resultados obtidos nas simulações com hietogramas gerados por este método (pico de intensidades centrais) são mais críticos, o que em bacias urbanas pequenas não reflete estatisticamente a realidade local (Abreu *et al.*, 2017).

O volume de chuva mais acentuado no meio do hietograma, ou final do evento de chuva, refletirá em maiores proporções dos volumes máximos sobre o volume total durante o processo de chuva-vazão (Zhang *et al.*, 2021). Isso se explica pois, se o pico da intensidade da chuva ocorre no começo do evento, só uma parcela da chuva gerará escoamento superficial, o restante irá atender às perdas iniciais (infiltração e abstração inicial), provocando, assim, uma vazão menor. No segundo caso, com a saturação do solo e a abstração inicial já satisfeitas, iniciará o escoamento superficial e a precipitação efetiva será análoga ao total precipitado provocando uma vazão maior (Abreu *et al.*, 2017). Assim, é mais provável que as técnicas LID respondam eficientemente às simulações com picos adiantados no hietograma. Diante do exposto, entende-se que as LID são mais adequadas para chuvas mais distribuídas e com baixa frequência. As técnicas possuem tendência de serem mais eficientes nas localizações onde os eventos de chuva têm maior duração (Yin *et al.*, 2020).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo reforça a aplicabilidade das técnicas LID na contribuição para a restauração das condições de pré-urbanização das bacias urbanas e a viabilidade de ajustar o modelo SWMM baseado em registros da população local. Das análises conclui-se que para ser notada a redução da lâmina de água alagada é requerido a implementação de pelo menos 5% de LID na bacia; a aplicação mínima de 9% de LID na bacia reduziria a vazão de pico em até 27% e o volume de escoamento em até 43,9% nos eventos de recorrência de um ano; para tempos de retorno maiores, a eficiência de abatimento da vazão é reduzida conforme o aumento da intensidade da chuva; e a variação dos componentes do balanço hídrico é reflexo de como as características individuais das sub-bacias têm influência sobre a infiltração da bacia.

Dentre as limitações do estudo destacam-se questões pontuais relacionadas à disponibilidade de área, ausência de dados de monitoramento, baixa precisão na determinação do solo da bacia e desconhecimento do nível do lençol freático. Os dados monitorados de chuva seriam aliados na calibração, no entanto, sua ausência obriga a simplificação do processo de calibração e validação. Seria interessante a implementação e manutenção de um sistema de monitoramento que pudesse, aliado à ciência cidadã, refinar a compreensão da dinâmica hidrológica da bacia.

Considerando que as soluções adotadas são baseadas no processo de infiltração, o tipo de solo é a principal característica que define as dimensões das estruturas LID para garantir seu desempenho. Assim, o mapa de solos adotado na escala gráfica disponível serviu para obter conclusões preliminares acerca da inserção das estruturas na bacia, o que seria mais preciso com o conhecimento do solo local. Quanto ao desconhecimento do nível do lençol freático existente, recomenda-se, por precaução e a favor da segurança hídrica, evitar a inserção de LID em áreas propensas à presença de lençol raso.

Compreende-se que a eficiência das técnicas de infiltração LID está intimamente associada à capacidade de infiltração, volume, distribuição e escala de implantação. Portanto, a baixa densidade de área disponível restringiu a inserção de LID na bacia, limitando a ampliação de áreas permeáveis e o aumento da capacidade de infiltração do solo. O planejamento das áreas urbanas com instrumentos legais que incentivem a inserção de LID é essencial para a remodelação das bacias e fomento da gestão urbana sustentável. Para estudos futuros sugere-se a avaliação de outras técnicas não aplicadas e a viabilidade de comutação da distribuição das técnicas já avaliadas.

REFERÊNCIAS

ABREU, Fernando Girardi; ANGELINI SOBRINHA, Lôide; BRANDÃO, João Luiz Boccia. Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos. **Engenharia Sanitária Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, p. 239-250, mar./abr. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016146750>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.416**: pavimentos permeáveis de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSUMPCÃO, Thaine Hermana; POPESCU, Ioana; JONOSKI, Andreja; SOLOMATINE, Dimitri P. Citizen observations contributing to flood modelling: opportunities and challenges. **Hydrology and Earth System Science**, Göttingen, v. 22, n. 2, p. 1473-1489, Feb. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-22-1473-2018>.

BEHROUZ, Mina Shahed; ZHU, Zhenduo; MATOTT, Loren Shawn; RABIDEAU, Alan. A new tool for automatic calibration of the storm water management model (SWMM). **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 581, p. 1-9, Feb. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124436>.

BELO HORIZONTE. Prefeitura Municipal. **Instrução técnica para elaboração de estudos e projetos de drenagem**. Belo Horizonte: Prefeitura Municipal, 2022. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/obras-e-infraestrutura/informacoes/publicacoes/instrucao-estudos-e-projetos-de-drenagem>. Acesso em: 15 jun. 2024.

BEZERRA, Maria do Carmo; OLIVEIRA, Aline da Nóbrega; COSTA, Maria Elisa; KOIDE, Sérgio. Simulação de técnicas de infraestrutura verde de drenagem urbana para captação do escoamento superficial. **Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v. 16, n. 40, p. 1-16, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.3895/rts.v16n40.9430>.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico temático drenagem e manejo**

das águas pluviais urbanas visão geral. Brasília, DF: SNSA, 2023. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AP_SNIS_2023.pdf. Acesso em: 18 jun. 2024.

CAXAMBU. Prefeitura Municipal. **Plano estratégico de desenvolvimento econômico de Caxambu.** Caxambu: Prefeitura Municipal, 2015.

CAXAMBU. Prefeitura Municipal. **Plano municipal de saneamento básico de Caxambu:** produto C. Caxambu: SanBas, 2020. Disponível em: <https://sanbas.eng.ufmg.br/caxambu-mg2/>. Acesso em: 18 jun. 2024.

CHUVA provoca alagamento e faz estragos em Caxambu, MG. **G1**, Rio de Janeiro, 9 dez. 2015. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2015/12/chuva-provoca-alagamento-e-faz-estragos-em-caxambu-mg.html#:~:text=Parque%20das%20Águas%20teve%20diversos%20pontos%20inundados%20e,A%20avenida%20Camilo%20Soares%20foi%20tomada%20pela%20água>. Acesso em: 19 abr. 2023.

COSTA, Luísa de Faria Machado; TSUJI, Maria Elisa Leite; KOIDE, Sérgio. Hydrological and hydraulic modeling using SWMM: storm water management model in the urban basin of Riacho Fundo I - Distrito Federal. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 10, n. 1, p. 1-15, Jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i1.11458>.

ELGA, Salvadore; JAN, Broners; OKKE, Batelaan. Hydrological modelling of urbanized catchments: a review and future directions. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 529, p. 62-81, Oct. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.028>.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Súmula 10:** reunião técnica de levantamento de solos. Rio de Janeiro: Embrapa, 1979.

ETTER, Simon; STROBL, Barbara; SEIBERT, Jan; VAN MEERVELD, Ilja. Value of crowd-based water level class observations for hydrological model calibration. **Water Resources Research**, Malden, v. 56, n. 2, p.1-17, Jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019WR026108>.

FAVA, Maria Clara; MACEDO, Marina Batalini; BUARQUE, Ana Carolina Sarmento; SARAIVA, Antonio Mauro; DELBEM, Alexandre Cláudio Botazzo; MENDIONDO, Eduardo Mario. Linking urban floods to citizen science and low impact development in poorly gauged basins under climate changes for dynamic resilience evaluation. **Water**, Basel, v. 14, n. 9, p.1467-1491, May 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14091467>.

FAN, Gongduan; LIN, Ruisheng; WEI, Zhongqing; XIAO, Yougan; SHAGGUAN, Haidong; SONG, Yiqing. Effects of low impact development on the stormwater runoff and pollution control. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 805, n. 20, p. 1-14, Jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150404>.

MACEDO, Marina Batalini; OLIVEIRA, Thalita Raquel Pereira; OLIVEIRA, Tassiana Halmenschlager; GOMES JUNIOR, Marcus Nóbrega; BRASIL, José Artur Teixeira; LAGO, Cesar Ambrogi Ferreira; MENDIONDO, Eduardo Mario. Evaluating low impact development practices potentials for increasing flood resilience and stormwater reuse through lab-controlled bioretention systems. **Water Science & Technology**, London, v. 84, n. 5, p. 1103-1124, July 2021. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2021.292>.

MACEDO, Marina Batalini; FAVA, Maria Clara; BUARQUE, Ana Carolina Sarmento; MENDIONDO, Eduardo Mario. Aplicação de técnicas compensatórias de biorretenção para aumento da resiliência a cheias em uma bacia de média urbanização. In: SIMPÓSIO DE REVITALIZAÇÃO DE RIOS URBANOS, 4., 2022, Brasília, DF. **Anais [...]**. Brasília, DF:

ABRH, 2022. p. 1-10. Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/189/XIV-ENAU_IV-SRRU0082-1-0-20220818-164138.pdf. Acesso em: 20 jul. 2024.

MONTES-PAJUELO, Raúl; RODRÍGUEZ-PÉREZ, Ángel Mariano; LÓPEZ, Raúl; RODRIGUÉZ, César Antônio. Analysis of probability distributions for modelling extreme rainfall events and detecting climate change: insights from mathematical and statistical methods. **Mathematics**, Basel, v. 12, n. 7, p. 1093-1117, Apr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12071093>.

PALLA, Anna; GNECCO, Ilaria. Hydrologic modeling of low impact development systems at the urban catchment scale. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 528, p. 361-368, Sept. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.050>.

PARANÁ. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. **Manual de Drenagem Urbana: Região Metropolitana de Curitiba- PR**. Curitiba: Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 2002. Disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/mdu_versao01.pdf. Acesso em: 10 jul. 2024.

SAMUEL, Park; KIM, Jaekyoung; KIM, Yejin; KANG, Junsuk. Participatory framework for urban pluvial flood modeling in the digital twin era. **Sustainable Cities and Society**, Amsterdam, v. 108, p. 1-20, Aug. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105496>.

SANTOS, Robson Arruda; LUCENA, Pedro Gomes; CARVALHO, Rafaela da Silva. Cálculo da chuva intensa pelo método das Isozonas para cidades do estado da Paraíba. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 1334-1343, maio/ago. 2015. DOI: <https://doi.org/10.5902/2236117016748>.

SILVEIRA, Alexandre; CAVALCANTI, Allana Abreu, MENEZES FILHO, Frederico Carlos Menezes; SEVERINO, Matheus Franco. Calibração do modelo hidrológico SWMM para a bacia do ribeirão vai e volta – Poços de Caldas, Minas Gerais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 1, p. 55-65, jan./fev. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200300>.

SILVEIRA, André Luiz Lopes. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 5-23, jan./mar. 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v10n1.p5-29>.

UFV – UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: UFRV, 2010. Disponível em: <https://dps.ufv.br/software/>. Acesso em: 1 mar. 2023.

YIN, Dingkun; EVANS, Barry; WANG, Qi; CHEN, Zhengxia; JIA, Haifeng; CHEN, Albert Shiuan-Hung; FU, Guangtao; AHMAD, Shakeel; LENG, Linyuan. Integrated 1D and 2D model for better assessing runoff quantity control of low impact development facilities on community scale. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 720, p. 1-10, June 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137630>.

ZANANDREA, Franciele; SILVEIRA, André Luiz Lopes da. Uso de técnicas de low impact development no controle de impactos hidrológicos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 6, p. 1195-1208, nov./dez. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019188729>.

ZHANG, Ying; XU, Hongliang; LIU, Honglei; ZHOU, Bin. The application of low impact development facility chain on storm rainfall control: a case study in Shenzhen, China. **Water**, Basel, v. 13, n. 23, p. 1-16, Nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13233375>.

ZHOU, Zhengmo; LI, Qiongfang; HE, Pengfei; DU, Yao; ZOU, Zhenhua; XU, Shuhong; HAN, Xingye; ZENG, Tianshan. Impacts of rainstorm characteristics on flood inundation mitigation

performance of LID measures throughout an urban catchment. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 624, p. 1-14, Sept. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129841>.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG pelo financiamento concedido pelo projeto APQ-01598-21.

Recebido: agosto de 2024.

Aceito: dezembro de 2024.