1º HIDROGEOMINAS
SIMPÓSIO MINEIRO DE HIDROGEOMORFOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS
07 – 10 de setembro de 2026
Departamento de Geografia – UFMG
Belo Horizonte - MG

Efeito da impermeabilização do solo sobre o funcionamento de um sistema de drenagem urbano

Samuel José Marquês Timano [1]
Júlia Queiroz Moreira [2]
Laura Pedrozo [3]
Mateus Alexandre da Silva [4]
Renato Antônio da Silva [5]
Michael Silveira Thebaldi [6]

RESUMO

O crescimento urbano tem provocado alterações no ciclo hidrológico natural, principalmente devido ao aumento da impermeabilização do solo, o que resulta no aumento do escoamento superficial e da ocorrência de inundações urbanas. O aumento da impermeabilização do solo urbano intensifica o escoamento superficial e compromete o desempenho dos sistemas de drenagem. Este estudo avaliou os efeitos do incremento da área impermeável e a eficiência de jardins de chuva na mitigação desses impactos, por meio de modelagem hidrológica e hidráulica usando o PCSWMM. Foram simulados cenários com aumento de 1% e 5% da área impermeável, com e sem a implementação de técnicas de *Low Impact Development* (LID), em uma área urbana da Universidade Federal de Lavras. Os resultados indicaram aumento das vazões e do número de nós inundados com o avanço da impermeabilização. No cenário mais crítico, reduções de vazão mediana de até 40,43% (O001) e reduções de vazão máxima superiores a 50% foram observadas com a implementação de jardins de chuva. Além disso, o número de nós inundados foi reduzido em até 100% em alguns exutórios e entre 78% e 80% no exutório mais crítico (O050). Os resultados evidenciam a eficácia dos jardins de chuva na atenuação do escoamento superficial e na melhoria do desempenho hidráulico, mesmo sob cenários de maior urbanização, reforçando o potencial das LIDs na gestão sustentável da drenagem urbana.

Palavras-chave: drenagem urbana sustentável; PCSWMM; impermeabilização do solo; jardins de chuva; modelagem hidrológica; LID

INTRODUÇÃO

O processo de urbanização tem provocado alterações significativas no funcionamento do ciclo hidrológico natural, principalmente devido à substituição de áreas permeáveis por superfícies impermeáveis, como ruas, telhados e estacionamentos. Esse processo reduz a infiltração da água no solo e aumenta o escoamento superficial, resultando em maiores vazões de pico e maior frequência de

[1] Doutorando em Recursos Hídricos na Universidade Federal de Lavras - UFLA, samuel.timano1@estudante.ufla.br
[2] Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Lavras - UFLA, julia.moreira3@estudante.ufla.br;
[3] Engenheira Civil, mestra em Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Lavras - UFLA, lapedrozo9@gmail.com;
[4] Professor, Doutor em Recursos Hídricos, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG mateusalexandre@cefetmg.br;
[5] Mestre em Engenharia Agrícola, Técnico em Hidrologia do Departamento de Recursos Hídricos da Universidade Federal - UFLA, renato.silva@ufla.br;
[6] Professor, Doutor em Recursos Hídricos, Departamento de Recursos Hídricos e da Pós-Graduação em Recursos Hídricos - UFLA, michael.thebaldi@ufla.br

inundações urbanas (Mello; Silva; Beskow, 2020). O aumento da impermeabilização do solo é considerado um dos principais fatores responsáveis pelo agravamento de problemas relacionados à drenagem urbana, causando impactos ambientais, econômicos e sociais (Benedito; Lombo e Lima, 2024).

Com o crescimento das cidades, os sistemas tradicionais de drenagem urbana têm apresentado limitações significativas em sua capacidade de conduzir os volumes gerados durante eventos de precipitação intensa. Esses sistemas, frequentemente denominados sistemas higienistas, foram concebidos com o objetivo de remover rapidamente a água pluvial das áreas urbanas, promovendo seu transporte para jusante por meio de galerias, canais e condutos (Samouei; Ozger, 2020). Entretanto, essa abordagem hidráulica convencional desconsidera os processos naturais de infiltração e armazenamento, resultando no aumento da velocidade do escoamento superficial, redução do tempo de concentração e elevação das vazões de pico, o que contribui diretamente para a intensificação de alagamentos e inundações urbanas (Fletcher et al., 2015).

A impermeabilização do solo altera significativamente as componentes do ciclo hidrológico, promovendo a redução da infiltração e da evapotranspiração e o consequente aumento do escoamento superficial, ocasionando a intensificação da resposta hidrológica das bacias urbanas, caracterizada pelo aumento da vazão de pico dos hidrogramas, diminuição da recarga de aquíferos e maior suscetibilidade à ocorrência de inundações (Shuster et al., 2007). Diversos estudos têm mostrado que o avanço da urbanização pode elevar de forma expressiva os valores de vazão máxima em bacias hidrográficas urbanas, comprometendo a eficiência dos sistemas de drenagem convencionais e ampliando os riscos associados a eventos hidrológicos extremos (Berland et al., 2017).

Diante desse cenário, destacam-se as técnicas compensatórias de drenagem urbana sustentável, também conhecidas como *Low Impact Development* (LID), que buscam restabelecer, ainda que parcialmente, as condições hidrológicas naturais das bacias hidrográficas anteriores à urbanização. Essas abordagens promovem processos como infiltração, retenção e armazenamento da água pluvial, contribuindo para a redução do escoamento superficial e melhoria da qualidade da água. Entre as soluções LID, os jardins de chuva têm recebido crescente atenção por sua capacidade de atenuar vazões de pico, favorecer a infiltração e atuar na remoção de poluentes difusos, além de apresentarem relativa simplicidade construtiva e baixos custos de manutenção (Fletcher et al., 2015). Apesar dos avanços, ainda persistem lacunas relacionadas à quantificação da eficiência dessas técnicas sob diferentes níveis de impermeabilização e condições de precipitação, especialmente em contextos urbanos de países em desenvolvimento, o que reforça a necessidade de estudos aplicados que integrem modelagem hidrológica e análise de cenários.

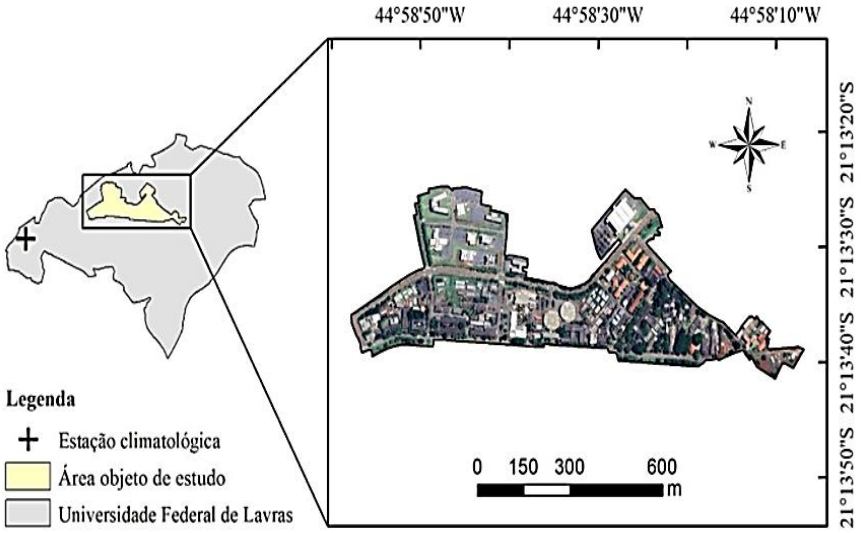
Desta forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar o efeito do aumento da impermeabilização do solo sobre o funcionamento de um sistema de drenagem urbana e verificar a eficiência da implementação de jardins de chuva na redução das vazões de escoamento superficial, através da modelagem hidrológica e hidráulica utilizando o software PCSWMM, considerando diferentes cenários de aumento da área impermeável.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado numa região urbanizada localizada no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil (Figura 1), com uma área de aproximadamente 34 hectares, com características típicas de ocupação urbana, incluindo edificações, vias pavimentadas, estacionamentos e áreas verdes. O levantamento espacial da área foi realizado a partir de imagens obtidas por meio de levantamento com veículo aéreo não tripulado (drone Phantom 3 Pro), permitindo a geração de ortomosaico e modelo digital de elevação.

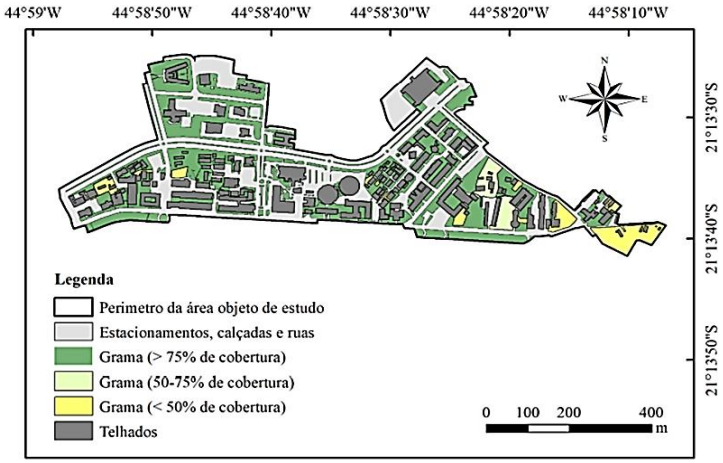
Figura 1 – Localização da área de estudo



Fonte: Silva (2024).

O processamento dos dados foi realizado nos softwares OpenDroneMap e QGIS, possibilitando a classificação do uso e cobertura do solo e a delimitação das sub-bacias e exutórios do sistema de drenagem. A análise indicou que 67,28% da área é impermeável e 32,72% permeável, condição que favorece o aumento do escoamento superficial e alterações no comportamento hidrológico da bacia urbana.

Figura 2 – Mapa de uso e cobertura de solo



Fonte: Silva (2024).

2.2 Modelagem hidrológica e hidráulica

A modelagem hidrológica e hidráulica foi realizada no software PCSWMM (versão 7.4), utilizando dados do sistema de drenagem existente previamente verificados em campo. A área foi discretizada em sub-bacias, sendo a largura característica do fluxo estimada com base na área de contribuição e em fator de forma calibrado na literatura.

A infiltração foi simulada pelo método Curva-Número (CN-SCS), sendo os grupos hidrológicos do solo definidos com base na condutividade hidráulica saturada obtida em campo. Os valores de CN foram ajustados para condições de umidade antecedente seca e posteriormente ponderados de acordo com o uso e ocupação do solo em cada sub-bacia, conforme a metodologia proposta por Mello, Silva e Beskow (2020).

Adicionalmente, estimou-se o tempo de secagem do solo, visando aprimorar a representação dos processos de infiltração. Como dados de entrada, foram utilizadas séries temporais de precipitação com resolução de 10 minutos e temperatura do ar, referentes ao período de 2020 a 2021. A propagação do escoamento foi simulada pelo método da onda dinâmica, em função de sua maior precisão na representação hidráulica do sistema. O cenário controle, sem incremento da área impermeável, foi então simulado para avaliação do comportamento hidrológico da bacia.

A área destinada à implantação dos jardins de chuva foi definida como 10% da área impermeável de cada sub-bacia, porém, sendo alocada prioritariamente em áreas permeáveis disponíveis. Na ausência destas, adotou-se a distribuição equitativa entre as regiões de montante, centro e jusante. A modelagem dos jardins de chuva baseou-se nos parâmetros físico-hidráulicos recomendados pelo manual do SWMM5 (EPA, 2015), apresentados na Tabela 1, assegurando consistência na simulação dos processos de infiltração e armazenamento no solo.

Tabela 1 – Atributos do solo usados na modelagem dos jardins de chuva.

Atributo	Valor
φ	0,525
θ_{cc}	0,2
θ_{PM}	0,1
K_{sat}	95,25
HCO	42,5
$\psi_{méd}$	76,2

ϕ é a porosidade em cm³/cm³, θ_{CC} a umidade na capacidade de campo em cm³/cm³, θ_{PMP} a umidade no ponto de murcha permanente em cm³/cm³, K_{sat} a condutividade hidráulica do solo saturado em mm/h, HCO a declividade da curva de condutividade hidráulica, constante adimensional, e $\Psi_{méd}$ o potencial matricial médio na frente de umedecimento em mm.

Com base no cenário controle e no cenário com implantação de jardins de chuva, foram definidos cenários adicionais de aumento da área impermeável, visando avaliar a resposta hidrológica da bacia sob diferentes níveis de urbanização.

Tabela 2 – Cenários de impermeabilização

Cenário	**Descrição**
C1	Condição atual (cenário controle, sem aumento de impermeabilização)
C2	Aumento de 1% da área impermeável (sem jardins de chuva)
C3	Aumento de 1% da área impermeável (com jardins de chuva)
C4	Aumento de 5% da área impermeável (sem jardins de chuva)
C5	Aumento de 5% da área impermeável (com jardins de chuva)

Fonte: Autores (2026).

Com o aumento da área impermeável e consequente redução da área permeável, os valores de CN foram recalculados para cada sub-bacia, conforme a proporção das classes de uso e cobertura do solo. Para a atualização das áreas, adotaram-se os seguintes critérios: o incremento da impermeabilização foi considerado exclusivamente em superfícies urbanas como ruas, calçadas e estacionamentos, não sendo incluídas áreas de telhado e redução da área permeável foi distribuída proporcionalmente entre as classes de cobertura vegetal existente (grama).

A distribuição percentual do aumento da área impermeável para cada exutório, nos diferentes cenários analisados, está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Percentual de aumento da área impermeável por exutório

Exutório	**Aumento (1%)**	**Aumento (5%)**
O001	10,32%	11,59%
O022	18,15%	15,57%
O050	56,68%	57,88%
O226	14,86%	14,96%

Fonte: Autores (2026).

Foi realizada uma análise de sensibilidade do cenário de controle utilizando a ferramenta Sensitivity-based Radio Tuning Calibration (SRTC), disponível no software PCSWMM. Foram avaliadas as incertezas associadas à largura das sub-bacias, ao armazenamento em depressão das áreas permeáveis e impermeáveis, aos coeficientes de rugosidade de Manning e aos valores do Número de Curva (CN), visando verificar a influência desses parâmetros sobre as respostas hidrológicas simuladas.

Após a simulação dos cenários no PCSWMM, foram elaborados gráficos do tipo *box-plot* para análise da distribuição das vazões em cada exutório, sendo que estes foram utilizados apenas para entendimento da variabilidade dos dados por meio de quartis, mediana e amplitude interquartil, permitindo a identificação de valores discrepantes e a comparação entre cenários, sendo estes resultados apresentados de forma textual.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise de sensibilidade indicaram baixa influência das faixas de incerteza consideradas para os parâmetros avaliados, incluindo largura característica das sub-bacias, armazenamento em depressão, coeficientes de rugosidade de Manning e valores do Número de Curva (CN). Isso sugere que eventuais erros associados à estimativa desses parâmetros não alterariam significativamente as respostas hidrológicas simuladas. Embora essa análise não substitua a calibração e validação do modelo com dados observados, ela fornece uma avaliação da robustez das simulações realizadas e reduz a incerteza associada à parametrização adotada.

A análise estatística indicou que a maior parte das vazões se concentrou em intervalos reduzidos, evidenciando baixa variabilidade na maioria dos cenários. Os exutórios O001, O022 e O226 apresentaram valores predominantemente entre 0 e 50 L/s, enquanto o exutório O050 apresentou maior amplitude, com valores que atingiram aproximadamente 100 L/s.

A comparação entre os cenários evidenciou a eficiência dos jardins de chuva na redução das vazões. No cenário mais crítico (C5), observou-se redução das medianas no cenário com LID (JC5) em todos os exutórios, com reduções de 40,43% (O001), 34,62% (O022), 29,18% (O050) e 22,5% (O226), indicando a capacidade dessas estruturas em atenuar o escoamento superficial mesmo sob condições de maior impermeabilização.

Adicionalmente, a análise dos valores extremos (*outliers*) revelou maior magnitude de vazões no exutório O050, associada à sua maior área de contribuição, sendo que, os valores máximos atingiram 2671,58 L/s no cenário C5 e 1998,4 L/s no cenário JC5, enquanto nos demais exutórios os valores máximos foram significativamente inferiores, comportamento esse que de acordo com Palla e Gnecco (2015) associam ao efeito cumulativo de escoamento superficial.

As séries temporais de vazão e precipitação para os diferentes cenários e exutórios foram apresentadas na Figura 3. De modo geral, observou-se que o aumento da área impermeável resultou em elevação das vazões ao longo do tempo, tanto nos cenários com quanto sem a implementação de jardins de chuva.

Entre os cenários avaliados, aqueles com maior nível de impermeabilização (C5 e JC5) apresentaram as maiores vazões em todos os exutórios, quando comparados aos cenários com menor incremento (C1, JC1 e controle). Esse comportamento esteve diretamente associado ao aumento da área impermeável, que intensifica o escoamento superficial e reduz a infiltração.

A implementação de jardins de chuva resultou em reduções significativas das vazões no evento de precipitação de pico, em todos os cenários analisados. Na condição atual, a comparação entre os cenários sem (C0) e com jardins de chuva (JC0) evidenciou reduções expressivas na maioria dos exutórios, destacando-se o exutório O001, com diminuição de aproximadamente 53%.

Mesmo com o aumento da área impermeável, os cenários com jardins de chuva (JC1 e JC5) apresentaram melhor desempenho em relação ao cenário sem LID e sem incremento de impermeabilização (C0). No exutório O050, por exemplo, a vazão observada no cenário C0 foi de 1,826 m^3/s, enquanto nos cenários JC1 e JC5 foram de 1,138 m^3/s e 1,173 m^3/s, correspondendo a reduções de 33,68% e 35,76%, respectivamente. Segundo Elliott e Trowsdale (2020), esse comportamento está associado à capacidade dos LIDs de restaurar parcialmente processos hidrológicos naturais.

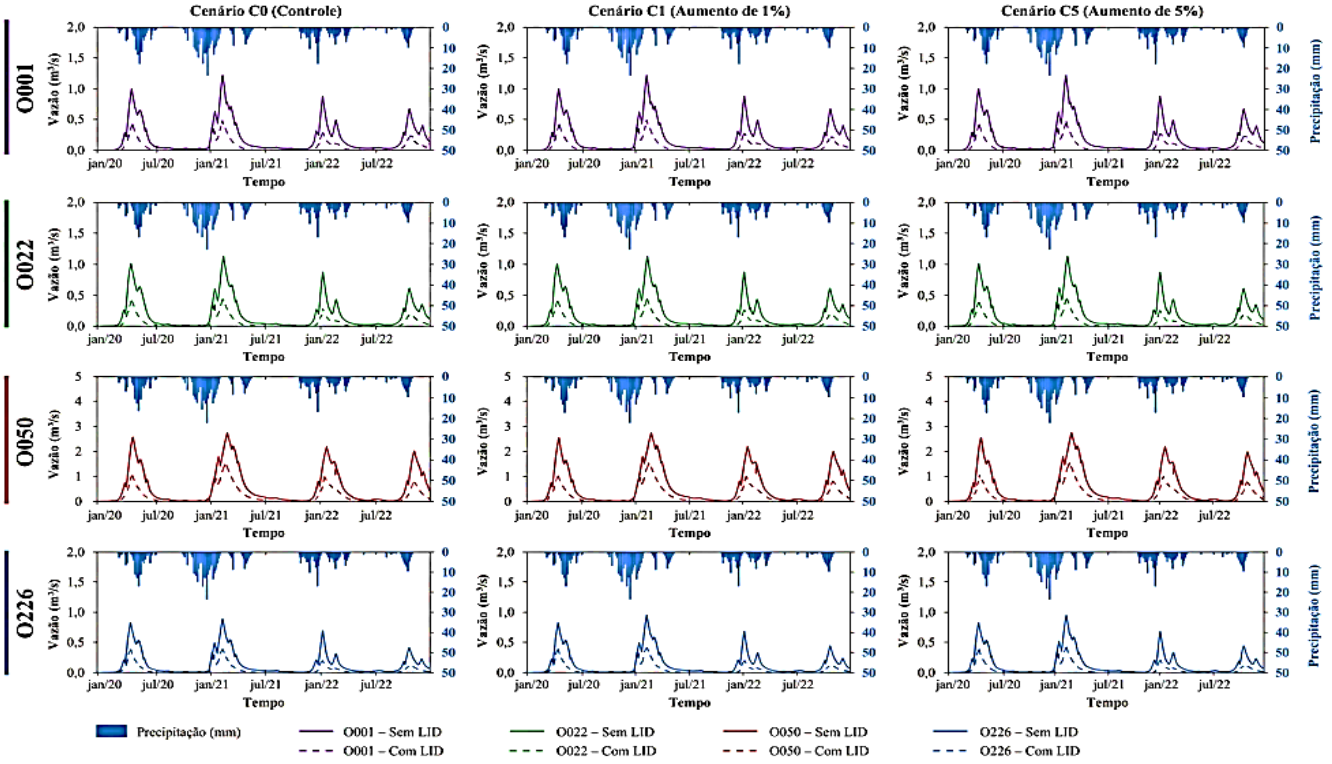
Comportamento semelhante foi observado nos demais exutórios, com reduções de aproximadamente 48% (O001), 52% (O022) e 44% (O226), evidenciando a eficiência dos jardins de chuva na mitigação dos efeitos da impermeabilização, mesmo em cenários de maior pressão urbana.

O aumento da impermeabilização resultou em elevação das vazões em todos os cenários, inclusive naqueles com jardins de chuva. No entanto, as variações de vazão foram mais acentuadas nos cenários sem LID quando comparadas aos cenários com jardins de chuva, evidenciando o efeito atenuador dessas estruturas. Essa diferença foi mais expressiva nos exutórios O001, O050 e O226.

De modo geral, os cenários com jardins de chuva apresentaram menor sensibilidade ao aumento da impermeabilização, indicando que a adoção dessas técnicas contribui para reduzir os impactos hidrológicos associados à urbanização. Assim, a expansão de áreas impermeáveis tende a apresentar melhor desempenho quando acompanhada da implementação de LIDs.

Resultados semelhantes foram observados em estudos de Silva, (2024) e Pedrozo, (2025), que apontam maior eficiência dos jardins de chuva quando distribuídos ao longo da bacia. Além disso, destaca-se que os parâmetros do solo influenciam diretamente o desempenho dessas estruturas, podendo levar a estimativas mais otimistas quando utilizados valores padrão do manual do SWMM5.

Figura 3 – Séries de vazão e precipitação por cenário ao longo do tempo para o exutório O001



Fonte: Autores (2025).

A redução das vazões foi avaliada comparando cenários com a mesma taxa de impermeabilização (C0–JC0, C1–JC1 e C5–JC5), evidenciando a eficiência dos jardins de chuva. Para a vazão máxima, o exutório O001 apresentou as maiores reduções em todos os cenários: 51,14%, 51,78% e 52,80%, respectivamente. Em contraste, o exutório O050 apresentou os menores ganhos, com reduções próximas de 25%. Igualmente, observou-se que apenas o O001 apresentou aumento de eficiência com o incremento da impermeabilização, enquanto os demais exutórios apresentaram leve redução, associada à ausência de ampliação das áreas de LID.

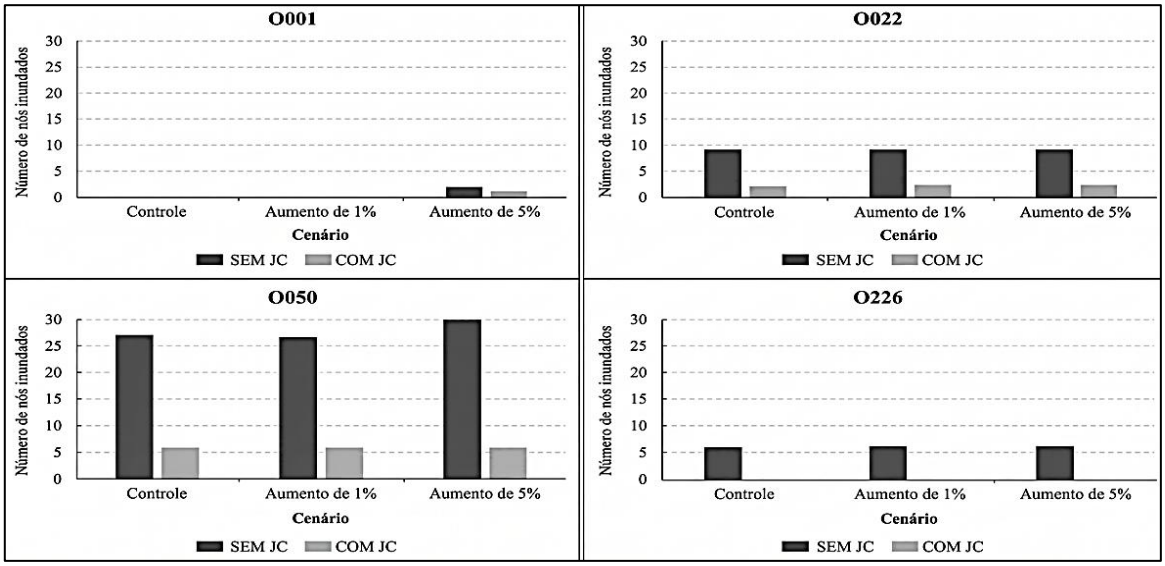
Para a vazão média, os resultados foram mais variáveis: o maior percentual foi observado no exutório O022 (46,71%) no cenário base, no O001 (55,01%) no cenário com aumento de 1% e novamente no O022 (46,22%) no cenário com aumento de 5%. De modo geral, o exutório O050 apresentou menores reduções devido à sua maior área de contribuição, enquanto o O001 apresentou maior eficiência, associada à menor impermeabilização inicial e declividade.

Mesmo com o aumento da impermeabilização, os jardins de chuva mantiveram elevada eficiência, com reduções no cenário de 5% semelhantes às do cenário sem incremento, indicando robustez da técnica.

Quanto aos nós inundados, o exutório O050 foi o mais crítico, com 27 nós nos cenários C0 e C1 e 30 no C5, reduzidos para 6 nós com LID (redução de 78% a 80%). O aumento da impermeabilização

impactou principalmente os exutórios O001 e O050, sendo que o O001 apresentou nós inundados apenas no cenário C5. Já os exutórios O022 e O226 não apresentaram variação sem LID, mas com jardins de chuva houve reduções expressivas, atingindo 100% no O226 e cerca de 78% no O022.

Figura 4 – Número de nós inundados nos exutórios O001, O022, O050, O226



Fonte: Autores (2025).

De forma geral, os resultados confirmam a relação direta entre vazão máxima e número de nós inundados, destacando o exutório O050 como o mais crítico e reforçando a eficiência dos jardins de chuva na mitigação da sobrecarga do sistema de drenagem urbana.

4. CONCLUSÃO

A impermeabilização do solo promoveu aumento das vazões e da ocorrência de nós inundados, com destaque para o exutório O050. Nas condições simuladas, a implementação de jardins de chuva resultou em reduções superiores a 50% nas vazões de pico e de até 80% no número de nós inundados, evidenciando seu potencial na mitigação dos impactos hidrológicos da urbanização.

Mesmo sob cenários de maior impermeabilização, as técnicas de Low Impact Development (LID) mantiveram desempenho relevante, indicando que a adoção de jardins de chuva pode contribuir para a redução do escoamento superficial e para a melhoria do desempenho dos sistemas de drenagem urbana.

Contudo, os resultados devem ser interpretados considerando as simplificações inerentes ao processo de modelagem, sendo recomendados estudos futuros com calibração e validação do modelo para ampliar a confiabilidade das estimativas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pela concessão de bolsa pela FAPEMIG e pelo apoio financeiro prestado ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e para participação no evento pela FAPEMIG e CAPES (código 001).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENEDITO JUNIOR, Carlos Alberto et al. Utilização de sistemas de drenagem urbana sustentável (SUDS) como ferramenta ao cumprimento ao ODS 11. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, Miami, v. 18, n. 10, p. 1–18, 2024. DOI: https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n10-093.

BERLAND, A. et al. The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and Urban Planning*, Amsterdam, v. 162, p. 167–177, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.02.017.

ELLIOTT, A. H.; TROWSDALE, S. A. A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software*, Oxford, v. 125, p. 104622, 2020.

FLETCHER, T. D. et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, London, v. 12, n. 7, p. 525–542, 2015. DOI: https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314.

MELLO, C. R. de; SILVA, A. M. da; BESKOW, S. *Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas*. Lavras: Editora UFLA, 2013. 531 p.

PALLA, A.; GNECCO, I. Hydrologic modeling of low impact development systems: a review. *Water Resources Management*, Dordrecht, v. 36, p. 1023–1038, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.050.

PEDROZO, Laura. *Efeito dos atributos físicos e hidráulicos do solo sobre os desempenhos de práticas de baixo impacto em sistema de drenagem*. 2025. 125 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2025.

RAIMONDI, A.; BECCIU, G. On the efficiency of green infrastructures for urban flood mitigation. *Water*, Basel, v. 14, n. 2, p. 245, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161291.

SAMOUEI, Sina; ÖZGER, Mehmet. Evaluating the performance of low impact development practices in urban runoff mitigation through distributed and combined implementation. *Journal of Hydroinformatics*, London, v. 22, n. 6, p. 1506–1520, 2020. DOI: https://doi.org/10.2166/HYDRO.2020.054.

SHUSTER, W. D. et al. Impacts of impervious surface on watershed hydrology: a review. *Urban Water Journal*, London, v. 2, p. 263–275, 2005. DOI: https://doi.org/10.1080/15730620500386529.

SILVA, M. A. da. *Modelagem de práticas de desenvolvimento de baixo impacto (LID) em sistema de drenagem sob simulação temporal contínua*. 2024. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2024.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency, 2015.