

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE PARÂMETROS RELACIONADOS À EFICIÊNCIA HIDROLÓGICA DE JARDINS DE CHUVA: estudo de caso em Belo Horizonte - MG

Otávio Rogério da Costa¹ ; Maria Thereza Rocha Chaves² & Daniel Augusto de Miranda³

Abstract: The municipality of Belo Horizonte, Minas Gerais state (Brazil), faces significant challenges related to hydrological risks, such as flooding, due to its rugged topography and high rates of precipitation and soil impermeability. In this context, rain gardens emerge as a sustainable drainage alternative, promoting the retention and infiltration of rainwater, and consequently reducing surface runoff. This study evaluated the hydrological efficiency, through water balance, of rain gardens implemented in the Northern Region of Belo Horizonte, based on a sensitivity analysis that considered variables such as precipitation rates, soil infiltration rate, device area, freeboard, contribution area and surface runoff coefficient. The results of the sensitivity analyses demonstrated that, although rain gardens are effective in retaining considerable volumes of rainwater, reaching efficiency above 40% in almost all cases analyzed, and even reaching 100% in some, their efficiency is clearly affected by factors such as incorrect sizing, especially regarding the contribution area above the structure's capacity. It is concluded that, in order to maximize their benefits, it is essential to adopt an integrated approach, which involves urban planning, continuous maintenance of the devices, data monitoring, engagement of the local community in the conservation of these spaces and incentives for their implementation directly in residences, commercial and industrial areas, especially in locations where the permeability rate is low.

Resumo: O município de Belo Horizonte - MG, devido à sua topografia acidentada e altos índices de precipitação e impermeabilização do solo, enfrenta desafios significativos relacionados aos riscos hidrológicos, como inundações e alagamentos. Neste contexto, os jardins de chuva surgem como uma alternativa sustentável de drenagem, promovendo a retenção e a infiltração das águas pluviais, e reduzindo, por consequência, o escoamento superficial. Este estudo avaliou a eficiência hidrológica, por meio de balanço hídrico, de jardins de chuva implantados na Regional Norte de Belo Horizonte, a partir de uma análise de sensibilidade que considerou variáveis como índices de precipitação, taxa de infiltração do solo, área do dispositivo, borda livre, área de contribuição e coeficiente de escoamento superficial. Os resultados das análises de sensibilidade demonstraram que, embora os jardins de chuva sejam eficazes na retenção de volumes consideráveis de águas pluviais, alcançando eficiência acima de 40% em quase todos os casos analisados, e chegando até mesmo em 100% em alguns, sua eficiência é evidentemente afetada por fatores como dimensionamento incorreto, especialmente quanto à área de contribuição acima da capacidade da estrutura. Conclui-se que, para maximizar seus benefícios, é fundamental adotar uma abordagem integrada, que envolva planejamento urbano, manutenção contínua dos dispositivos, monitoramento de dados, engajamento da comunidade local na conservação desses espaços e incentivos para que sejam implantados diretamente nas residências, áreas comerciais e industriais, em destaque para localidades onde a taxa de permeabilidade seja baixa.

Palavras-Chave – Riscos hidrológicos. Drenagem sustentável. Eficiência hidrológica.

1) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, IFMG, Santa Luzia, otavio.orc@gmail.com

2) Universidade Federal do Ceará, UFCE, mtchaves50@gmail.com

3) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, IFMG, Santa Luzia, d.miranda@ifmg.edu.br

INTRODUÇÃO

A gestão eficaz dos recursos hídricos para a mitigação dos riscos associados às enchentes, inundações, alagamentos e movimentos de massa representam desafios significativos para as áreas urbanas em todo o mundo, ainda mais para grandes municípios que se encontram em ambientes topograficamente complexos, como é o caso de Belo Horizonte, localizada no estado de Minas Gerais, Brasil. Por ser uma região montanhosa, numa combinação de planícies, morros e encostas, a capital mineira é suscetível a eventos hidrológicos extremos que, frequentemente, resultam em escoamentos rápidos e volumosos e em consideráveis danos à infraestrutura, ao meio ambiente e à vida humana, especialmente em épocas chuvosas [Drumond *et al.* (2023); Rodrigues e Silva (2022)]. Esses riscos aumentam nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, que são os de maior intensidade de precipitação, segundo a série histórica de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A interação entre as características físicas do município, os padrões climáticos locais e as atividades antropogênicas, como a expansão desordenada da urbanização, o denso povoamento, o desmatamento de encostas, a impermeabilização do solo devido ao crescimento urbano, e a ineficácia ou ausência de infraestrutura de drenagem, são fatores que contribuem para o aumento dos riscos hidrológicos em Belo Horizonte. Consoante a isso, Lucas *et al.* (2015), explicam que, embora tenham origens em fenômenos naturais, as enchentes, inundações e alagamentos:

[...] são potencializadas pelo processo de urbanização devido à ocupação do solo e transformação desse em superfícies impermeáveis, aumentando a velocidade de escoamento superficial e alterando o ciclo hidrológico, já que diminui a infiltração, além de favorecer a poluição das águas, comprometer a qualidade e diminuir a recarga dos reservatórios subterrâneos.

Mediante estes sérios problemas, a aplicação de conhecimentos em hidrologia e drenagem urbana surge como uma ferramenta essencial na prevenção e mitigação dos impactos causados pelos fenômenos hidrológicos mencionados, bastante presentes em Belo Horizonte. Dentre diversas técnicas, destacam-se a implementação de sistemas de drenagem sustentáveis, como pavimentos permeáveis, bacias de retenção, canais de drenagem e jardins de chuva, que são dispositivos projetados para coletar, armazenar e direcionar as águas pluviais [Benedito Junior *et al.* (2024)].

Considerando a importância deste assunto, foi feita uma abordagem multidisciplinar, que integra conceitos de engenharia civil, geociências, ciências ambientais e planejamento urbano, identificando os problemas e buscando soluções baseadas na natureza para enfrentar os desafios relacionados à gestão dos recursos hídricos e à proteção das áreas urbanas contra eventos extremos.

A escolha do tema justifica-se pela crescente frequência e intensidade dos eventos hidrológicos extremos em Belo Horizonte, que vêm resultando em prejuízos sociais, econômicos e ambientais cada vez mais significativos, tendo sido registrados 11.182 eventos de desastres hidrológicos no período de 2010 a 2023, o que corresponde a 63,6% de todas as ocorrências registradas pela Defesa Civil [Lucas *et al.* (2024)]. Os impactos são perceptíveis não apenas na infraestrutura, que pode colapsar ou extravasar diante de fortes chuvas, mas também na população mais vulnerável, que reside em áreas de risco e, muitas vezes, não é devidamente atendida pelas políticas públicas de prevenção e resposta aos desastres.

Nesse contexto, a abordagem do presente trabalho mostra-se relevante ao propor a análise de uma técnica alternativa e sustentável para o controle do escoamento superficial, como os jardins de chuva, que podem reduzir de 30% a 50% deste volume através de uma estratégia de baixo custo e alto potencial de implementação em áreas urbanas densamente ocupadas. Ademais, funcionam não

apenas como mecanismo de drenagem, mas também como elemento ambiental e paisagístico. Vislumbrou-se, nesse sentido, avaliar a eficiência hidrológica de jardins de chuva na Regional Norte de Belo Horizonte (MG), com base em uma análise de sensibilidade de eventos chuvosos e variação de parâmetros como precipitação, taxa de infiltração do solo, área do dispositivo, altura da borda livre, área de contribuição e coeficiente de escoamento superficial.

METODOLOGIA

Para dar suporte à presente pesquisa, foi realizada a coleta de dados hidrológicos, meteorológicos e geoespaciais relevantes, sendo a maior parte através de mapas, notícias de jornais, do *site* da Prefeitura de Belo Horizonte, da Defesa Civil e o do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que foram analisados para identificar a ocorrência, histórico e tendências relacionadas à precipitação e riscos hidrológicos, com base nas características topográficas e de uso do solo.

Com base nos resultados encontrados, foram avaliadas estratégias e medidas de intervenção para aprimorar a gestão dos recursos hídricos e reduzir os riscos de desastres naturais em Belo Horizonte, mais especificamente valendo-se de soluções baseadas na natureza, como é o caso dos jardins de chuva, amplamente estudados quando ao seu funcionamento, implantação e eficiência.

Realizaram-se simulações de eventos hidrológicos para avaliar a capacidade de drenagem dos jardins de chuva, tanto de um modelo controlado, quanto dos implantados em Belo Horizonte. Para isso, foi utilizada uma planilha de modelagem no *software Excel*, desenvolvida por Chaves (2024), que a aplicou em um estudo similar, realizado no IFCE de Fortaleza. A referida planilha foi adaptada para a localidade de Belo Horizonte, na Regional Norte, alterando parâmetros relevantes como a intensidade da precipitação (em mm/h), a discretização temporal (com intervalos de 10, 30, 45, 60 e 90 minutos), a taxa de infiltração do solo (em mm/h), a área do jardim de chuva (em m²), a área de contribuição (em m²), a borda livre (Hc) (em m) e o coeficiente de escoamento.

Os dados de entrada acerca da precipitação foram obtidos por meio da Instrução Técnica para Elaboração de Estudos e Projetos de Drenagem, elaborado pela Prefeitura de Belo Horizonte - PBH (2022), que apresenta informações sobre as Curvas IDF (Intensidade, Duração e Frequência) para a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH).

Para a taxa de infiltração do solo local, foi adotado o valor de 187,56 mm/h, baseado nos resultados encontrados por Caputo *et al.* (2013) em seu trabalho de campo, que envolveu uma análise do solo na Regional Pampulha, onde a localidade que os autores referenciaram como “sítio experimental de infiltração 1” situa-se próximo à do presente estudo, e foi determinada por meio de um ensaio com permeâmetro, em $5,21 \times 10^{-5}$ m/s, que, convertidos para a unidade mais usual, milímetros por hora, resultou no valor supramencionado. Cabe observar que este valor de taxa de infiltração é bastante próximo ao de Chaves (2024) para o solo do jardim de chuva implantado em Fortaleza, dentro do *campus* do IFCE, que foi de 176,90 mm/h.

Quanto à área dos jardins de chuva e borda livre (Hc), foram consideradas as informações dos projetos, encontradas no *site* da PBH, bem como as medições realizadas durante visita a campo, isto é, entre 9 e 12 m² os de tipologia simples e entre 18 a 20 m² os de tipologia dupla – adotando-se, respectivamente, 11 e 20 m².

Para determinar a área de contribuição, foi utilizado o método de divisão das bissetrizes na esquina, que é uma técnica de delimitação de áreas de drenagem que se baseia na ideia de que o escoamento superficial tende a se dividir simetricamente em relação às bissetrizes dos ângulos formados pelo encontro de ruas [Mendes (2014)].

Para o presente estudo, foram selecionados dois jardins de chuva específicos, ambos em Belo Horizonte, por seus bons aspectos construtivos e de manutenção, com vegetação preservada e localização em áreas de declividade moderada. Um deles é de tipologia simples, localizado na Rua Professor Coelho Júnior, nº 265, no Bairro Planalto, que possui área de contribuição igual a 4.066 m². O outro é de tipologia dupla, localizado na Rua Massanielo Santos, nº 173, no Bairro Planalto, e possui área de contribuição igual a 2.577 m². Ambas as áreas foram obtidas aplicando-se o método das bissetrizes, citado anteriormente.

Os coeficientes de escoamento (ou coeficiente de *runoff*) foram estabelecidos com base nos valores do Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem, do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes [DNIT (2005)]. Levando em consideração que os dois jardins utilizados como referência para a análise em Belo Horizonte se encontram em área residencial, com algumas praças, parques, canteiros e áreas permeáveis, pode-se utilizar como valor de referência 0,5, o que indica que metade da precipitação se converte em escoamento superficial.

Variando separadamente cada parâmetro, foi possível analisar a sensibilidade de cada um deles, e simular os mais diversos eventos hidrológicos para testar qual seria a eficiência do dispositivo em tais situações. Para uma melhor avaliação dos resultados, estes foram comparados com os achados de outros autores, principalmente com os de Chaves (2024), que serviram de referência principal para esta pesquisa. Nessa etapa, essencial para verificar a consistência dos dados encontrados na atual pesquisa, foram selecionados diversos eventos de chuva monitorados pela citada autora no município de Fortaleza, entre janeiro e maio de 2024, intervalo em que todas as precipitações ocorridas foram registradas.

Tais informações de monitoramento foram extraídas para outra planilha, onde os eventos foram agrupados por data, horário de início e fim, tempo de duração e a precipitação total registrada. A intensidade de precipitação (*i*, em mm/min) foi obtida pela razão entre a precipitação total (em mm) e a duração do evento (*t*, em min) e depois convertida para mm/h.

Com a intensidade de precipitação calculada e o tempo de duração dos eventos (*t*, em minutos) já organizados, foi possível aplicar uma equação de curva IDF, desenvolvida por Silva *et al.* (2013) para o município de Fortaleza, a fim de determinar o período de retorno (*T*, em anos) de cada evento. O cálculo segue a Equação 1.

$$i = \frac{2345,29 \times T^{0,173}}{(t+28,31)^{0,904}} \quad (1)$$

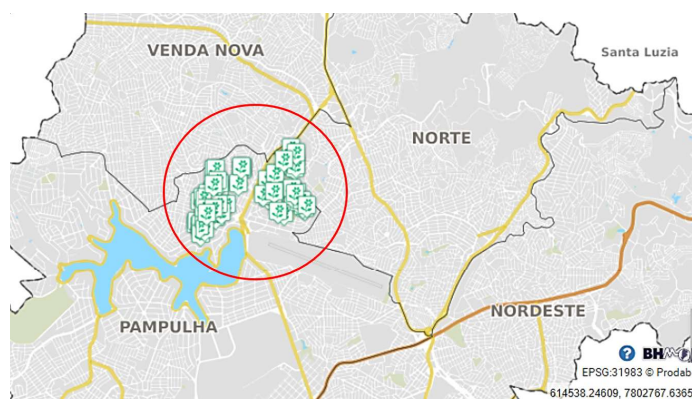
Para analisar a sensibilidade de cada parâmetro individualmente, isto é, o quanto cada variação influencia diretamente na eficiência do jardim de chuva, foi escolhido o cenário que possui tempo de retorno de 10 anos (*TR* = 10 anos) e duração de chuva de 120 minutos, pois, além de ser referência na elaboração de projetos de microdrenagem, também foi o que mais se assemelhou a um dos eventos monitorado por Chaves (2024) em Fortaleza/CE (calculado pela Equação 1), e que foi utilizado para fins de comparação. Os parâmetros variados individualmente foram a intensidade de precipitação (com sua discretização temporal), a taxa de infiltração, a área do jardim de chuva, a área de contribuição, a altura da borda livre (*Hc*) e o coeficiente de escoamento.

Com a inserção dos dados sobre a realidade local na planilha do *Excel*, de modo a realizar o balanço hídrico, pode-se obter o Volume de Entrada Total (*VE*), o Volume Extravasado (*Vext*) e, consequentemente, a eficiência hidrológica (%) dos jardins de chuva. O cálculo da eficiência é mostrado na Equação 2 e os resultados encontrados foram arredondados para o número inteiro mais próximo.

$$Eficiência\ hidrológica\ (\%) = \frac{VE - ext}{VE} \times 100\% \quad (2)$$

Quanto à localização dos dispositivos, a Prefeitura de Belo Horizonte informa, em sua última atualização feita em julho de 2024, que o município conta com 64 jardins de chuva, sendo um na Praça JK, um na Praça José de Magalhães, um no Parque Lagoa do Nado e os demais espalhados por vários bairros da Regional Pampulha e parte da Regional Norte, na Sub-Bacia Hidrográfica do Córrego do Nado, afluente do Córrego Vilarinho, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 – Localização dos jardins de chuva no município de Belo Horizonte (circulados em vermelho)



Fonte: Prefeitura de Belo Horizonte (2024, adaptado)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise de sensibilidade quanto à eficiência de um modelo de jardim de chuva implantado em Belo Horizonte

Nesta primeira análise, foi verificada a eficiência do modelo de referência, de Fortaleza (CE) para chuvas de Belo Horizonte (MG), considerando diversos tempos de retorno e discretizações temporais, conforme pode ser observado na Tabela 1. Os demais parâmetros, neste primeiro momento, foram mantidos os mesmos.

Tabela 1 – Comparação da eficiência do jardim de chuva modelo em diferentes cenários de tempo de retorno (TR) e duração de chuvas (t) de Belo Horizonte

TR (anos)	t (min)	Intensidade da Precipitação (mm/h)	V _{entrada total} (m ³)	V _{extravasado} (m ³)	Eficiência
10	10	194,48	2,92	0,52	82%
	30	89,67	4,03	1,35	67%
	45	67,41	4,55	1,68	63%
	60	55,08	4,96	1,90	62%
	90	41,45	5,60	2,17	61%
	120	33,89	6,10	2,31	62%
25	10	220,85	3,31	0,92	72%
	30	101,82	4,58	1,89	59%
	45	76,55	5,17	2,28	56%
	60	62,54	5,63	2,56	55%
	90	47,06	6,35	2,92	54%
	120	38,48	6,93	3,12	55%
50	10	243,65	3,66	1,26	66%

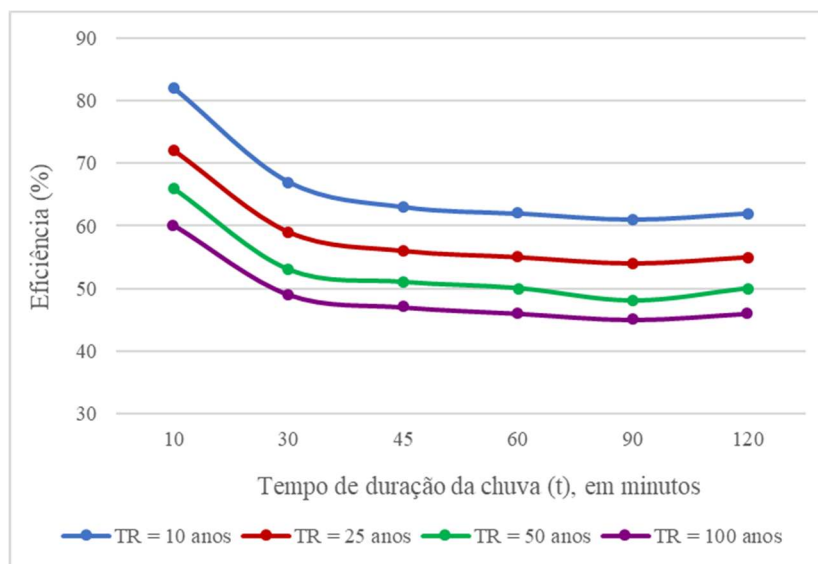
TR (anos)	t (min)	Intensidade da Precipitação (mm/h)	V _{entrada total} (m³)	V _{extravasado} (m³)	Eficiência
	30	112,44	5,06	2,37	53%
	45	84,6	5,71	2,81	51%
	60	69,17	6,22	3,14	50%
	90	53,12	7,17	3,72	48%
	120	42,69	7,68	3,87	50%
	10	264,37	3,97	1,57	60%
100	30	121,99	5,49	2,80	49%
	45	91,77	6,19	3,29	47%
	60	75,02	6,75	3,66	46%
	90	56,52	7,63	4,17	45%
	120	46,27	8,33	4,50	46%
	10	264,37	3,97	1,57	60%

NOTA: Os valores em destaque, para TR = 10 anos e t = 120 minutos, referem-se ao cenário de referência para a comparação entre as chuvas de Fortaleza e de Belo Horizonte, pois apresentaram os índices com maior similaridade entre os eventos analisados em ambas as localidades.

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Para melhor observação dos resultados obtidos quanto à eficiência do jardim de chuva modelo, de acordo com a duração da chuva e Tempo de Retorno (TR), foi elaborado o gráfico da Figura 2.

Figura 2 – Relação de eficiência do jardim de chuva de acordo com a duração da chuva, para diferentes tempos de retorno (TR), em porcentagem (%)



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

A análise dos dados sobre a eficiência do modelo de jardim de chuva mostra diversas tendências importantes, que devem ser consideradas no planejamento e execução de projetos de drenagem urbana. Em primeiro lugar, de modo mais evidente, observa-se que a eficiência do jardim de chuva diminui à medida que o Tempo de Retorno (TR) aumenta. Em cenários com TR de 10 anos, a eficiência varia de 82% para chuvas de curta duração (10 minutos) até 61-62% para chuvas mais longas (120 minutos). Já para um TR de 100 anos, a eficiência começa em 60% e decresce para 46%,

evidenciando que eventos de maior magnitude resultam em menor desempenho do sistema, como é esperado, já que estão relacionados a precipitações mais intensas, isto é, com maior volume.

A duração da chuva (t) também exerce influência direta na eficiência do jardim. Para um mesmo TR, a eficiência tende a diminuir com o aumento da duração da precipitação, o que indica que o sistema é mais eficaz durante eventos de curta duração e menos preparado para lidar com chuvas prolongadas, embora ainda tenha uma eficiência considerável, dadas as chuvas intensas utilizadas na modelagem.

Outro ponto relevante é a relação entre o volume extravasado (Vextravasado) e a intensidade da precipitação. Em cenários de TR menores e chuvas curtas, o volume extravasado é significativamente menor, refletindo a capacidade do jardim de chuva de captar e infiltrar a água de maneira eficiente. No entanto, à medida que o TR e a duração aumentam, o volume de extravasamento cresce, indicando que o sistema atinge sua capacidade máxima de retenção e infiltração. Para um TR de 10 anos e uma chuva de 10 minutos, o volume extravasado é de apenas 0,52 m³, enquanto para um TR de 100 anos e uma chuva de 120 minutos, o extravasamento sobe para 4,50 m³ (Tabela 1).

A eficiência do jardim de chuva também tem relação com o volume de entrada (Ventrada total): quanto maior o volume de entrada, menor a eficiência do sistema. Esta grandeza está diretamente relacionada com a área de contribuição (superfície do terreno que contribui com o escoamento de água para aquele ponto) e coeficiente de escoamento. Logo, se a área de contribuição para o jardim de chuva é muito grande, sua eficiência fica bastante reduzida, uma vez que não comporta todo o escoamento superficial direcionado para ele e não consegue infiltrá-lo.

Além dessas observações, o gráfico mostra uma tendência muito próxima à das curvas IDF (Intensidade, Duração e Frequência), utilizadas para determinar as chuvas máximas em um determinado local, conforme já esperado, uma vez que os valores das curvas IDF foram utilizados na modelagem dos dados. Essa disposição sugere que o sistema possui uma capacidade máxima de absorção e, após atingir esse limite de eficiência, o excesso de água inevitavelmente extravasa.

Ainda, a análise demonstra que o sistema mantém uma eficiência mínima de 45% a 50%, mesmo em cenários extremos. Isso mostra que, apesar de uma significativa redução nessa eficiência, o jardim de chuva ainda é capaz de mitigar parcialmente os efeitos de eventos intensos, evitando extravasamentos completos. Essas conclusões são fundamentais para o planejamento de jardins de chuva e outras soluções baseadas na natureza, permitindo a adaptação do projeto a diferentes cenários climáticos e níveis de precipitação.

Para analisar a sensibilidade de cada parâmetro individualmente, foi elaborada a Tabela 2, que compara os valores do modelo de Fortaleza com a realidade de Belo Horizonte, de modo a observar seu comportamento sob as condições do novo território. O cenário utilizado no regime pluviométrico foi o que possui tempo de retorno TR de 10 anos e duração de chuva t de 120 minutos, pois, além de ser referência na elaboração de projetos de microdrenagem, também é o que mais se assemelha com um dos eventos monitorados por Chaves (2024) em Fortaleza/CE, e será utilizado para fins de comparação.

É interessante notar que, apesar da intensidade de precipitação em Belo Horizonte ser menor que a de Fortaleza, a eficiência também foi reduzida, em um cenário em que se esperaria um aumento. Isso se deve à forma como a chuva é distribuída ao longo do tempo (120 minutos): em Fortaleza, a precipitação ocorre de maneira mais uniforme, com maior concentração entre 50 e 70 minutos. Já em Belo Horizonte, a chuva concentra-se nos minutos iniciais (até 60 minutos), saturando o jardim de chuva mais rapidamente e reduzindo sua eficiência.

Tabela 2 – Análise de sensibilidade dos jardins de chuva de Belo Horizonte, comparado ao modelo de referência, para TR = 10 anos e t = 120 min

Parâmetro variado	Modelo de referência (Fortaleza, CE)	Dados de Belo Horizonte	Eficiência do modelo de referência	Eficiência do modelo de referência, se implantado em Belo Horizonte
Intensidade da Precipitação	41,26 mm/h	33,89 mm/h	77%	62%
Taxa de infiltração	176,90 mm/h	187,56 mm/h	62%	63%
Área do jardim de chuva	5 m ²	11 m ² (tipologia simples)	62%	100%
Área de Contribuição	100 m ²	4.066 m ² ⁽¹⁾	62%	2%
Área de Contribuição	100 m ²	2.577 m ² ⁽²⁾	62%	3%
Borda Livre (Hc)	45 cm	10 cm	62%	29%
Coeficiente de Escoamento	0,85	0,50	62%	99%

- (1) Esta área de contribuição refere-se ao jardim de chuva de tipologia simples localizado na Rua Professor Coelho Júnior, nº 265, no Bairro Planalto, escolhido pelas suas boas condições, e foi estimada pelo método da bisettriz nas esquinas.
- (2) Esta área de contribuição refere-se ao jardim de chuva de tipologia dupla localizado na Rua Massanielo Santos, nº 173, no Bairro Planalto, escolhido pelas suas boas condições, e foi estimada pelo método da bisettriz nas esquinas.

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

A taxa de infiltração é ligeiramente maior em Belo Horizonte do que em Fortaleza (187,56 x 176,90 mm/h, respectivamente), o que acarreta em uma leve variação positiva na eficiência que, embora esperada, é mínima (de 62 para 63%) e não tem impacto significativo nos volumes de chuva analisados. No entanto, isso não significa que o a taxa de infiltração seja um parâmetro de importância secundária; muito pelo contrário: se nos casos analisados esse valor fosse, por exemplo, 100 mm/h, a eficiência já seria reduzida para 52%.

Em relação à área do jardim de chuva, nota-se que o dispositivo de tipologia simples em Belo Horizonte tem mais que o dobro da área do modelo de referência. Esse aumento tem impacto significativo na eficiência, que passou de 62% (modelo de referência) para 100% (situação real de BH), mostrando-se um dos parâmetros mais importantes e de maior sensibilidade a variações, o que reforça a importância do dimensionamento adequado para a retenção e infiltração da água. Também é importante notar que a profundidade dos jardins de BH é bem próxima às de Chaves (2024), sendo as primeiras de 131 cm (Tipo A) e 147 cm (Tipo B), e a da citada autora 138 cm.

A área de contribuição mostrou-se um fator preocupante, visto que se trata de uma grande área de drenagem, muito além da capacidade do dispositivo, fazendo com que os jardins de chuva tenham influência pouco expressiva na retenção e infiltração das águas pluviais.

Quanto à borda livre, a dos dispositivos implantados em Belo Horizonte é consideravelmente menor que a do modelo de Fortaleza, o que reduz o volume de água armazenado temporariamente e, conseqüentemente, o volume infiltrado. Segundo as análises realizadas, esse parâmetro se mostrou como um dos mais sensíveis, onde pequenas variações (até mesmo de 1 cm) já acarretaram em consideráveis flutuações na eficiência. No entanto, essa redução pode ser compensada pela maior taxa de infiltração, pela área ampliada do jardim de chuva e pela menor intensidade da precipitação, mesmo em cenários críticos.

Por fim, o coeficiente de escoamento mostrou-se como fator preponderante: considerando-se a área residencial onde as estruturas estão implantadas, com algumas praças, parques, canteiros e áreas

permeáveis, pode-se utilizar como valor de referência 0,5, o que indica que metade da precipitação se converte em escoamento superficial, conferindo uma eficiência de 99% aos jardins de chuva.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento desta pesquisa possibilitou o aprofundamento teórico, prático e metodológico sobre os jardins de chuva, uma solução baseada na natureza relativamente pouco explorada na literatura científica, contribuindo para a ampliação do entendimento acerca de seu potencial funcional e aplicabilidade em contextos urbanos.

Os resultados obtidos evidenciam a importância dos estudos acerca de hidrologia e da drenagem urbana na mitigação dos riscos hidrológicos, seja em Belo Horizonte ou em qualquer outra localidade, onde os dispositivos analisados mostraram uma considerável eficiência hidrológica como solução baseada na natureza, quando implantados corretamente, sem sobrecarregá-los.

A análise de sensibilidade demonstrou que os jardins de chuva podem realmente contribuir na redução do escoamento superficial e na infiltração de águas pluviais, com potencial para a mitigação de inundações e alagamentos, onde os parâmetros de área do jardim, área de contribuição, borda livre e coeficiente de escoamento mostraram-se como os mais preponderantes nos casos estudados. Também se observou que a eficiência dos jardins de chuva pode ser comprometida por fatores como falhas no projeto, construção e distribuição espacial; manutenção; declividade do local de implantação; e variações na intensidade e duração das chuvas – especialmente no que se refere à área de contribuição, onde se pode observar que os modelos implantados em Belo Horizonte têm eficiência mínima, dado que atendem a áreas muito acima de sua capacidade. Ainda assim, mesmo em eventos extremos, quando analisados os parâmetros individualmente, a estrutura apresenta significativa parcela de contribuição, chegando até mesmo a 100% ou próximo disso em alguns cenários.

Ainda, as simulações mostraram que a área do jardim de chuva é um dos principais fatores de influência, conseguindo até mesmo compensar as perdas geradas pela redução da borda livre, que também é um fator determinante. Porém, a eficiência é quase totalmente anulada quando a área de contribuição é exacerbada, sem a distribuição adequada dos dispositivos nas áreas de implantação.

Enfatiza-se que qualquer redução na demanda do sistema de drenagem urbana já proporciona benefícios, especialmente quando se trata de reduções de volume próximas à metade do escoamento superficial, como observado na maioria das situações estudadas. Inclusive, essa diminuição corrobora com os achados de outras pesquisas, até mesmo realizadas em diferentes localidades.

Políticas de planejamento urbano, com incentivos para que os moradores implantem um jardim de chuva diretamente nas residências, especialmente em áreas com novos loteamentos, onde as construções ainda estão no início, seria uma boa proposta a ser apresentada, e manteriam as áreas de contribuição dentro de limites que os dispositivos conseguem atender com considerável eficiência. Ademais, rever a distribuição dos jardins no espaço, implantando mais dispositivos ou estruturas auxiliares, como bocas de lobo, sarjetas e mais áreas permeáveis, como canteiros e parques, certamente trarão resultados positivos na eficiência dos sistemas de drenagem urbana – um estudo que pode ser realizado em trabalhos futuros, inclusive valendo-se de dados coletados diretamente em campo, além daqueles disponíveis na literatura. A continuidade das pesquisas sobre essa técnica e o monitoramento de longo prazo dos dispositivos implantados são essenciais para aprimorar sua eficiência, comparar resultados e os adaptar às condições específicas de Belo Horizonte.

Por fim, conclui-se que os jardins de chuva representam uma alternativa viável e promissora para a gestão das águas pluviais em áreas urbanas, desde que sua implementação seja realizada corretamente, em locais estratégicos, com declividade e métodos construtivos adequados, além de

acompanhado por políticas públicas eficientes, planejamento e ações educativas voltadas à participação ativa da população.

REFERÊNCIAS

BELO HORIZONTE (Município). (2022). *“Intensidade, Duração e Frequência (IDF2024) para a Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH. Instrução Técnica para Elaboração de Estudos e Projetos de Drenagem. Apêndice 1”*. Prefeitura de Belo Horizonte, 2022, pp. 1-10.

BELO HORIZONTE (Município). (2024). *“Adote um Jardim de Chuva”*. Prefeitura de Belo Horizonte, 2024.

BENEDITO JUNIOR, C. A.; LONGO, R. M.; LIMA, G. T. N. P. (2024). *“Utilização de Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável (SUDS) como Ferramenta ao Cumprimento ao ODS 11”*. Revista de Gestão Social e Ambiental, v. 18, n. 10, pp. 1-18.

BRASIL. Ministério dos Transportes. (2005). *“Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem”*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), Brasília, 2005, pp. 128-129.

CAPUTO, U. K. *et al.* (2013). *“Trincheiras de Infiltração Instaladas em Belo Horizonte - Aspectos Operacionais”* in Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, Nov. 2013, pp. 1-8.

CHAVES, M. T. R. (2024). *“Jardim de Chuva como Solução Baseada na Natureza em Ambiente Tropical Urbano: Critérios de Design, Desempenho Hidrológico e Adaptabilidade Vegetal”*. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). Programa de Pós-graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental. Fortaleza, 2024, pp. 1-127.

DRUMOND, R. A. S.; ALMEIDA, R. P.; NASCIMENTO, N. O. (2023). *“Mudanças climáticas e Plano Diretor: mitigação de inundações em Belo Horizonte”*. Cadernos Metrópole, v. 25, n. 58, pp. 899-922.

LUCAS, T. P. B. *et al.* (2015). *“Impactos Hidrometeorológicos em Belo Horizonte – MG”*. Revista Brasileira de Climatologia, ano 11, v. 16, pp. 7-28.

LUCAS, T. P. B. *et al.* (2024) *“Desastres Geológicos e Hidrológicos Ocorridos em Belo Horizonte-MG, 2010-2023”* in Anais do XX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Out. 2024, pp. 1-8.

MENDES, M. (2014). *“Notas de Aula da Disciplina Drenagem”*. PUC Minas, Belo Horizonte, 2014, 65p.

RODRIGUES, L. A. A.; SILVA, J. F. (2022). *“O impacto do processo de urbanização na formação de enchentes e alagamentos em Belo Horizonte, MG”*. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, v. 5, n. 4, pp. 4304-4310.

SILVA, F. O. E.; PALÁCIO JÚNIOR, F. F. R.; CAMPOS, J. N. B. (2013). *“Equação de chuvas para Fortaleza - CE com dados do pluviógrafo da UFC”*. Revista DAE, n. 192, pp. 56.