

ANÁLISE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO E DO DIMENSIONAMENTO DE DOIS JARDINS DE CHUVA COM DIFERENTES RAZÕES DE CONFLUÊNCIA

Maria Thereza Rocha Chaves¹; Francisco Anderson Paulo Rodrigues², Pedro Levi Sousa dos Santos³, Teresa Raquel Lima Farias⁴ & Iran Eduardo Lima Neto⁵

RESUMO – Apesar da eficácia dos jardins de chuva, esses sistemas enfrentam obstáculos, como a falta de consenso na literatura para o dimensionamento de biorretenção, especialmente no que se refere à camada de armazenamento interna. Este estudo, desenvolvido em Fortaleza-CE, analisou o comportamento hidráulico de dois jardins de chuva (JC1 e JC2), os quais foram dimensionados com a metodologia Soil Conservation Service (SCS) sob diferentes condições. As premissas de projeto de ambos os sistemas foram avaliadas com base em dados de precipitação e níveis máximos registrados, com foco na efetiva utilização das camadas internas como volume de armazenamento. O JC1, com razão de confluência de 2,7% (área contribuinte de 155 m² para 4,24 m² de jardim), considerou o solo nativo como camada de armazenamento, devido à restrição de espaço disponível para implantação. Essa premissa foi confirmada pelos sensores, que registraram níveis de até 100 cm em eventos de chuva de 50 mm, evidenciando o uso efetivo de todas as camadas da estrutura. Já o JC2, com razão de confluência de 7,1% (84 m² para 6 m² de jardim), foi dimensionado para manter o armazenamento interno restrito à camada de brita, e apresentou níveis máximos de apenas 25 cm, mesmo para chuvas intensas. Diante do exposto, conclui-se que a metodologia SCS revelou-se adequada para o dimensionamento de jardins de chuva nas condições analisadas. Adicionalmente, verificou-se que a utilização da camada de solo como meio de armazenamento constitui uma alternativa viável em cenários onde a restrição de espaço para implantação limita a adoção de soluções convencionais.

Palavras-Chave – Solução Baseada na Natureza, SCS, Drenagem Urbana.

ABSTRACT– Despite the effectiveness of rain gardens, these systems face challenges, such as a lack of consensus in the literature regarding bioretention sizing, particularly concerning the internal storage layer. This study, conducted in Fortaleza, Ceará, analyzed the hydraulic behavior of two rain gardens (JC1 and JC2), which were sized using the Soil Conservation Service (SCS) methodology under different conditions. The design assumptions for both systems were evaluated based on precipitation data and recorded maximum water levels, focusing on the effective use of internal layers for storage volume. JC1, with a drainage area ratio of 2.7% (a contributing area of 155 m² to a 4.24 m² garden), utilized the native soil as a storage layer due to space constraints for implementation. This assumption was confirmed by sensors, which recorded water levels of up to 100 cm during 50 mm rainfall events, demonstrating the effective use of all structural layers. In contrast, JC2, with a drainage area ratio of 7.1% (84 m² to a 6 m² garden), was designed to restrict internal storage to the crushed stone layer; it exhibited maximum levels of only 25 cm, even during heavy rainfall. Based on these findings, the SCS methodology proved suitable for sizing rain gardens under the analyzed conditions. Furthermore, the study demonstrated that utilizing the soil layer for storage is a viable alternative in scenarios where space constraints limit the adoption of conventional solutions.

Key-words – Nature-Based Solution, SCS, Urban Drainage

1, 5) Universidade Federal do Ceará, mtchaves50@gmail.com; iran@deha.ufc.br

2, 3 e 4) Instituto Federal do Ceará, andersonpaulo025@gmail.com; pedro.santos63@aluno.ifce.edu.br; teresafarias@ifce.edu.br

INTRODUÇÃO

A urbanização, impulsionada pelo crescimento demográfico desordenado, tem alterado significativamente o ciclo hidrológico natural, principalmente por meio da impermeabilização do solo e da ocupação irregular de áreas legalmente protegidas, fundamentais para a preservação dos recursos hídricos (Christofidis et al., 2019; Gülbaz e Kazezyilmaz-Alhan, 2016). Em decorrência desse cenário, os sistemas convencionais de drenagem urbana, projetados com base em séries históricas estacionárias, vêm demonstrando crescente ineficiência no manejo dos elevados volumes de escoamento em centros urbanos densamente ocupados (Chen et al., 2015; Christofidis et al., 2019). Esse modelo tradicional, ao assumir um risco de falha inerente, mostra-se particularmente frágil diante das incertezas impostas pelas mudanças climáticas. Agravando esse quadro, Silva Junior et al. (2020) destacam que a vulnerabilidade às inundações não deriva apenas de fatores climáticos, mas também do adensamento populacional, de lacunas no planejamento territorial e de deficiências na gestão pública, problemas esses intensificados pela escassez de espaços físicos para implantação de soluções convencionais de mitigação.

Diante desses desafios, as soluções baseadas na natureza emergem como alternativas mais sustentáveis e de efeito duradouro. Entre elas, os jardins de chuva, sistemas de biorretenção, vêm ganhando destaque por sua capacidade de atuar em múltiplas frentes: mitigação de inundações urbanas, restauração do ciclo hidrológico natural, redução do pico de escoamento superficial, filtragem de poluentes, promoção da biodiversidade, regulação do microclima e recarga de aquíferos, tudo isso com custos relativamente baixos (Asleson et al., 2009; Burszta-Adamiak et al., 2023; Greksa et al., 2022). Evidências empíricas mostram que a conversão de pequenas parcelas impermeáveis em jardins de chuva é capaz de atenuar significativamente os efeitos negativos da urbanização sobre o escoamento pluvial (Burszta-Adamiak et al., 2023; Tang et al., 2016).

Entretanto, apesar do potencial desses sistemas, Chaves et al. (2024) alertam para a ausência de consenso na literatura técnica quanto aos critérios de dimensionamento da biorretenção, especialmente no que se refere à camada de armazenamento interno. Essa lacuna se torna ainda mais crítica quando se considera a necessidade de adequar os parâmetros de projeto a diferentes regimes pluviométricos, bem como de revisar os protocolos vigentes à luz de análises atualizadas de precipitação, de modo a incorporar as projeções climáticas futuras (Spraaakman et al., 2022; Tansar et al., 2023).

Nesse contexto, o presente artigo tem por objetivo dimensionar as camadas de armazenamento interno de um jardim de chuva empregando a metodologia SCS (Soil Conservation Service) e, em seguida, avaliar se esse dimensionamento se mostra adequado às condições operacionais típicas de

regiões de clima tropical. Com isso, espera-se que os resultados obtidos possam não apenas ampliar a compreensão sobre as metodologias de projeto existentes, mas também fornecer diretrizes práticas e tecnicamente embasadas para a elaboração de novos empreendimentos, contribuindo para uma drenagem urbana mais resiliente e alinhada aos princípios da sustentabilidade.

MATERIAL E MÉTODOS

Condições de Projeto

Neste estudo, são monitorados dois sistemas de biorretenção implantados no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), na cidade de Fortaleza, localizada no nordeste do Brasil. O jardim de chuva 1 (JC1) está situado no campus Fortaleza, foi implementado em 2023 e recebe parte das águas pluviais provenientes de um telhado com área efetiva de contribuição estimada em 155 m². Já o jardim de chuva 2 (JC2) encontra-se no campus da Reitoria, tendo sido implantado em 2024, e capta o escoamento de uma fração de telhado com 84 m² de área de contribuição. A configuração das camadas de ambos os jardins é apresentada na Figura 1, por meio de um corte longitudinal.

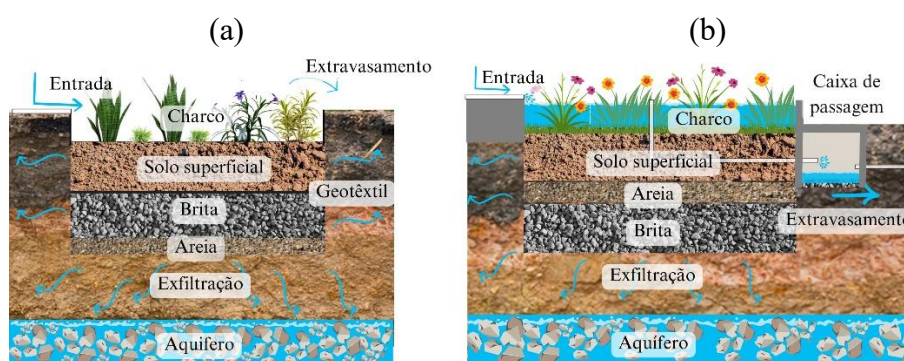


Figura 1 – Composição interna e esquema de balanço hídrico referente ao jardim de chuva 1 (a) e jardim de chuva 2 (b).

Para a coleta de dados, foram instalados piezômetros ao longo da extensão das estruturas dos jardins de chuva. Esses piezômetros, destinados à determinação do nível de água, são compostos por tubulações com diâmetro de 50 mm, posicionadas tanto em nível superficial quanto subsuperficial. As medições dos níveis d'água são realizadas com sensores de nível HOB0-U20L-02 (cujo limite de detecção é de 0,2 mm), os quais são inseridos nos piezômetros localizados na superfície e na subsuperfície das estruturas de biorretenção.

Por fim, as porosidades dos materiais empregados foram determinadas em laboratório, com base nos ensaios de densidade real (DNER, 1994) e de massa específica aparente seca (ABNT, 2016).

Método de Dimensionamento do *Soil Conservation Service* (SCS)

Nesse método, comparam-se as condições pré e pós desenvolvimento. O volume necessário para manter o volume de escoamento pré desenvolvimento (V), primeiramente é calculado. São

determinados os valores de *Curve Numbers* nas condições pré (CN_{pre}) e pós (CN_{pos}) desenvolvimento da área de instalação da célula. A intensidade de chuva de projeto é calculada a partir da equação IDF. Sugere-se a adoção do período de retorno (T_R) de 5 anos e duração de chuva (t) de 15 minutos. A altura de precipitação (P) é calculada a partir da multiplicação da intensidade de chuva (i) pela duração de chuva (t) e a precipitação efetiva (Pe) para as condições pré e pós desenvolvimento é determinada através das Equações 1 e 2.

$$Pe = \frac{(P - 0,2 \times S)^2}{P + 0,8 \times S} \quad (1)$$

$$S = 25,4 \times \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (2)$$

Em que, P é a altura de precipitação (mm), S é a capacidade de armazenamento de água do solo (mm) e CN é um parâmetro hidrológico usado para estimar a quantidade de escoamento da chuva com base na característica da bacia, considerado como 65 e 92 para as condições pré e pós desenvolvimento, respectivamente.

O volume necessário de armazenamento interno (V_{arm}) foi determinado considerando a Equação 3 e por fim, a altura da camada de armazenamento interno (db) foi calculado, através da Equação 4, levando em consideração a área superficial do jardim (A_J).

$$V_{arm} = \left(\frac{Pe(pos) - Pe(pre)}{1000} \right) \times A_C \quad (3)$$

$$db = \frac{V_{arm}}{n} \times \frac{1}{A_J} \quad (4)$$

Em que, $Pe(pos)$ e $Pe(pre)$ são as precipitações efetivas para as condições pós e pré desenvolvimento (mm), respectivamente, A_J é a área do jardim (m^2), A_C é a área de contribuição (m^2) e n a porosidade do material utilizado na camada de armazenamento interno.

RESULTADOS

As porosidades dos materiais foram determinadas experimentalmente, sendo 0,47 para a brita, 0,43 para a areia e 0,30 para o solo. No dimensionamento do jardim de chuva 1 (JC1), que recebe o escoamento de uma área contribuinte de $155 m^2$, optou-se por considerar também a camada de solo como armazenamento, além das camadas de brita e areia, devido à restrição de espaço disponível para implantação ($4,24 m^2$), obtendo-se, portanto, uma razão de confluência de 2,7%. Já no jardim de chuva 2 (JC2), que recebe o escoamento de uma área de $84 m^2$ e ocupa uma área de $6 m^2$, com uma razão de confluência de 7,1%, as camadas de armazenamento interno consideradas no projeto foram apenas brita e areia, excluindo-se o solo nativo dessa função.

Para a chuva de projeto admitida, foi calculado um volume necessário de armazenamento de $1,61 m^3$ para o JC1 e $0,83 m^3$ para o JC2. O JC1 é composto por cinco estratos organizados de cima

para baixo na seguinte sequência: camada de charco de 45 cm, camada de solo nativo de 45 cm, manta geotêxtil Bidim RT 10, camada de brita de 43 cm e camada de areia de 15 cm. O JC2, por sua vez, apresenta camada de charco de 30 cm, 50 cm de solo nativo, 10 cm de areia e 30 cm de brita, sem a utilização da manta geotêxtil, que foi substituída pela camada de areia de transição.

Para este estudo, foram analisados os níveis subsuperficiais máximos dos eventos de até 60 mm (Figura 2). Os dados dos sensores de níveis internos revelaram que, conforme admitido no dimensionamento, todas as camadas internas do JC1 são efetivamente utilizadas como armazenamento, enquanto o volume interno do JC2 ficou restrito principalmente à camada de brita.

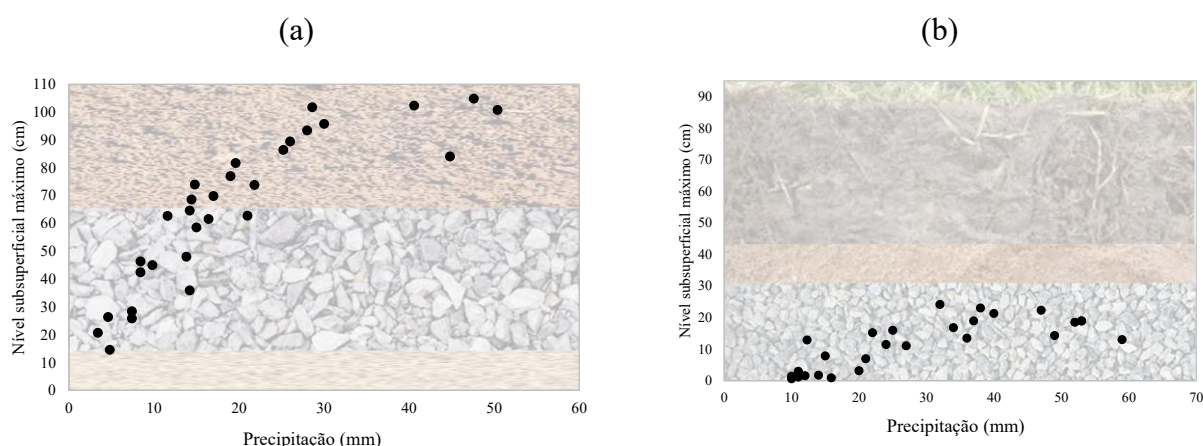


Figura 2- Nível superficial máximo nos eventos monitorados no (a) jardim de chuva 1 e (b) jardim de chuva 2

Os dados do JC1 mostram uma correlação positiva e consistente entre a precipitação acumulada e o nível máximo registrado, embora com dispersão significativa para eventos de maior magnitude. Observa-se que o menor nível foi de 14,65 cm para uma chuva de 5 mm, enquanto o maior nível alcançou 100 cm para uma chuva de 50 mm. Analisando mais detalhadamente a relação entre precipitação e nível nesse jardim, percebe-se que, a partir de chuvas superiores a cerca de 40 mm, a elevação do nível tende a ser menos proporcional ao aumento da chuva. Esse comportamento sugere que o sistema começa a extravasar superficialmente ou a ter sua taxa de infiltração reduzida, devido à saturação das camadas inferiores.

Essa constatação é particularmente relevante para a análise do dimensionamento, pois a diferença de comportamento entre os dois jardins de chuva evidencia a adequação das premissas adotadas para cada um. No caso do JC1, a premissa de considerar o solo nativo como camada de armazenamento mostrou-se adequada, uma vez que os sensores confirmaram que a água efetivamente ocupou os poros do solo, da areia e da brita ao longo dos eventos monitorados acima de 25 mm. Trata-se de uma solução especialmente vantajosa quando há restrição de área superficial, como ocorre no

JC1, que possui uma pequena razão de confluência de apenas 2,7%. Nesse contexto, ao incorporar o solo como reservatório, o dimensionamento otimizou o uso do espaço vertical, aumentando o volume total armazenado sem necessidade de ampliar a superfície do jardim. Em contrapartida, o JC2, por apresentar uma razão de confluência maior (7,1%), pôde operar com uma estratégia distinta, mantendo a zona saturada restrita praticamente à camada de brita.

Comparando-se agora os dois jardins de chuva com base nos dados empíricos, percebe-se uma diferença fundamental no comportamento hidráulico de cada um. O JC1, com níveis que chegam a 100 cm, utiliza efetivamente todas as suas camadas ao longo da altura da estrutura. Já o JC2, com níveis máximos de apenas 25 cm, opera de forma completamente diferente do previsto no dimensionamento original, restringindo seu armazenamento às camadas inferiores, principalmente à brita. Essa divergência entre o comportamento observado e o projetado para o JC2 reforça a importância de se ajustar as premissas de projeto conforme as características específicas de cada dispositivo, especialmente no que diz respeito à razão de confluência e à profundidade efetiva de armazenamento.

CONCLUSÃO

Com base nos dados analisados, conclui-se que o dimensionamento do JC1 se mostrou adequado e eficiente, pois o solo nativo atuou efetivamente como camada de armazenamento, otimizando o uso da área restrita com razão de confluência de apenas 2,7%. Já o JC2, embora funcional, operou de forma distinta do previsto, com armazenamento restrito à camada de brita e níveis máximos reduzidos, evidenciando superdimensionamento para sua maior razão de confluência de 7,1%. Recomenda-se, portanto, que futuros projetos ajustem as premissas de projeto com base na relação área contribuinte/área do jardim, evitando-se subutilização das camadas internas e otimizando-se custos e espaço.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado concedida ao primeiro autor, ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFCE) pela concessão da bolsa de iniciação científica ao segundo autor ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Iniciação Tecnológica concedida ao terceiro autor. Este trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio do projeto "Avaliação de técnicas compensatórias de baixo impacto para o manejo de águas pluviais urbanas" (processo 405958/2023-4).

REFERÊNCIAS

- ASLESON, B. C. *et al.* Performance assessment of rain gardens 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, v. 45, n. 4, p. 1019-1031, 2009.
<https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2009.00344.x>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9813: Solo — Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação. 2. ed. Rio de Janeiro, 2016b.
- BURSZTA-ADAMIAK, E. *et al.* Rain Garden hydrological performance—Responses to real rainfall events. Science of the Total Environment, v. 887, p. 164153, 2023.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.4394312>.
- CHAVES, M. T. R.; FARIAS, T. R. L.; ELOI, W. M. Comparative analysis of bioretention design strategies for urban runoff infiltration: a critical overview. Ecological Engineering, v. 207, p. 107352, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107352>
- CHEN, Y. *et al.* Urban flood risk warning under rapid urbanization. Environmental research, v. 139, p. 3-10, 2015 <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.02.028>.
- CHRISTOFIDIS, D.; ASSUMPÇÃO, R. S. F. V.; KLIGERMAN, D. C. The historical evolution of urban drainage: from traditional drainage to harmony with nature. Saúde em Debate, v. 43, p. 94-108, 2019. <https://doi.org/10.1590/0103-11042019s307>
- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. Solos – determinação da densidade real, Norma rodoviária, Método de ensaio. DNER-ME 093, 1994
- GREKSA, A.; GRABIC, J.; BLAGOJEVIC, B. Contribution of low impact development practices- bioretention systems towards urban flood resilience: case study of Novi Sad, Serbia. Environmental Engineering Research, v. 27, n. 4, 2022. <https://doi.org/10.4491/eer.2021.125>
- GÜLBAZ, S.; KAZEZYILMAZ-ALHAN, C. M. Experimental investigation on hydrologic performance of LID with rainfall-watershed-bioretention system. Journal of Hydrologic Engineering, v. 22, n. 1, p. D4016003, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943.5584.0001450](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943.5584.0001450).
- SILVA JUNIOR, M. A. B. *et al.* Desafios para a adaptação da infraestrutura de drenagem urbana em cenário de mudança do clima no Recife-PE. Journal of Environmental Analysis and Progress, v. 5, n. 3, p. 302-318, 2020. <https://doi.org/10.24221/jeap.5.3.2020.302-318>
- SPRAAKMAN, S.; MARTEL, J.; DRAKE, J. How much water can bioretention retain, and where does it go?. Blue-Green Systems, v. 4, n. 2, p. 89-107, 2022.
<https://doi.org/10.22541/au.163255049.94952987/v1>
- TANG, S. *et al.* Evaluating retention capacity of infiltration rain gardens and their potential effect on urban stormwater management in the sub-humid loess region of China. Water Resources Management, v. 30, p. 983-1000, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1206-5>
- TANSAR, H.; DUAN, H.; MARK, O. Global sensitivity analysis of bioretention cell design for stormwater system: a comparison of VARS framework and Sobol method. Journal of Hydrology, v. 617, p. 128895, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128895>