

POÇOS DE INFILTRAÇÃO: PROPOSTA DE MODELAGEM MATEMÁTICA PARA SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS EM AMBIENTES URBANOS

Mateus Bezerra Alves da Costa¹; Jeferson da Costa¹; Luciano Leonardo Tenório Leoi¹;
Welber Ferreira Alves¹; Hudson Rocha de Oliveira¹

ABSTRACT: The increasing impermeabilization of urban areas intensifies surface runoff, resulting in flooding, inundation, and degradation of water bodies. Source control measures, such as infiltration wells, are essential for mitigating these impacts and promoting groundwater recharge. This study presents a design method for infiltration wells based on the envelope curve approach. The objective is to provide a mathematical tool that streamlines the process, making it more direct and efficient by minimizing the need for iterative calculations. The results demonstrate that the optimal well height can be determined by maximizing the function that relates height to rainfall duration. The practical application of the methodology was carried out using Wolfram Mathematica software, generating two-dimensional curves and a three-dimensional surface to facilitate designing considering different diameters, heights, and hydrological conditions. This methodology is expected to facilitate the implementation of infiltration wells in technical and regulatory projects, fostering sustainable water management.

RESUMO: A crescente impermeabilização do solo urbano intensifica o escoamento superficial, gerando alagamentos, inundações e degradação dos corpos hídricos. Medidas de controle na fonte, como os poços de infiltração, são cruciais para mitigar esses impactos, promovendo também a recarga subterrânea. Este trabalho propõe um método de dimensionamento para poços de infiltração fundamentado na abordagem da curva-envolvente. O objetivo é oferecer uma ferramenta matemática que simplifique o processo, tornando-o mais direto e eficiente ao minimizar a necessidade de cálculos iterativos. Os resultados demonstram que a altura ótima do poço pode ser determinada através da maximização da função que relaciona altura e tempo de duração da chuva. A aplicação prática da metodologia foi desenvolvida utilizando o *software Wolfram Mathematica*, gerando curvas bidimensionais e uma superfície tridimensional que facilitam o dimensionamento considerando diferentes diâmetros, alturas e condições hidrológicas. Espera-se que esta metodologia facilite a aplicação de poços de infiltração em projetos técnicos e regulatórios, fomentando a gestão hídrica sustentável.

Palavras-chave – Infiltração; Qualidade dos Corpos Hídricos; Modelagem Matemática.

INTRODUÇÃO

A urbanização provoca a formação de extensas áreas impermeáveis, o que dificulta a infiltração das águas pluviais no solo e altera o balanço hídrico natural existente antes da ocupação urbana. Esse cenário resulta no aumento do volume de escoamento superficial, intensificando episódios de alagamentos e inundações em áreas urbanas. Além disso, o escoamento superficial nessas regiões pode transportar contaminantes diversos, contribuindo para a degradação da qualidade dos corpos hídricos e comprometendo a sua disponibilidade.

Diante desses desafios, torna-se fundamental adotar técnicas e conceitos ambientais inovadores na gestão dos sistemas de drenagem urbana, com foco em eficiência, sustentabilidade e preservação dos recursos hídricos. As medidas de controle na fonte atuam diretamente na origem do problema,

1) Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (Adasa) – SAIN Estação Rodoviária de Brasília, S/N, Ala Norte, DF, 70631-900, Brasília, Distrito Federal, Telefone: (61) 3961-5066 – sdu@adasa.df.gov.br

controlando o excesso de escoamento superficial no local onde ele se forma, com o objetivo de restabelecer o equilíbrio hídrico e favorecer a infiltração da água da chuva (Reis *et al.*, 2008).

Dentre as medidas de controle na fonte, destacam-se os poços de infiltração, dispositivos pontuais que ocupam reduzida área superficial e são projetados para infiltrar as águas pluviais diretamente no subsolo. Estes dispositivos são, geralmente, preenchidos com material granular ou dotados de paredes estruturais porosas, podendo ser eficazmente integrados ao paisagismo urbano devido à sua pequena ocupação espacial e discrição (Adasa, 2023; Baptista *et al.*, 2011).

Diversas iniciativas, tanto práticas quanto em termos de modelagem computacional, mostram que a aplicação de poços é promissora como solução eficaz para a recarga das águas subterrâneas, recuperação de níveis piezométricos e controle de alagamentos e inundações (Arifin *et al.*, 2024; Ferreira *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2021; Uyeno *et al.*, 2023). As intervenções mostram resultados positivos, podendo elevar significativamente os níveis dos aquíferos confinados e não confinados e, inclusive, ajudar a reverter problemas de recalque e de escassez hídrica.

A evacuação da água acumulada nesses dispositivos pode ocorrer de duas formas principais: infiltração no solo ou injeção direta no lençol subterrâneo. No entanto, a injeção subterrânea é desaconselhada e, em alguns países, até proibida. No Brasil, a técnica de injeção geralmente não é recomendada devido ao significativo risco de contaminação das águas subterrâneas por poluentes presentes nas águas pluviais. A Resolução Adasa nº 54/2025, por exemplo, proíbe a recarga artificial mediante lançamento direto de água de chuva em poços de captação de água subterrânea no Distrito Federal.

De maneira geral, para poços de infiltração, recomenda-se uma distância mínima de um metro entre o fundo da estrutura e o nível mais alto do lençol freático. Além disso, deve-se buscar a minimização de processos erosivos subterrâneos e da possível instabilidade em fundações próximas.

O presente trabalho tem como objetivo contribuir para o aperfeiçoamento dos métodos de dimensionamento de técnicas compensatórias aplicadas à drenagem urbana, com especial ênfase nos poços de infiltração. A proposta busca favorecer a gestão sustentável dos recursos hídricos, promovendo a recarga subterrânea e a mitigação de impactos decorrentes do escoamento superficial. Para isso, adota-se uma abordagem matemática fundamentada no método da curva-envelope, que visa minimizar a necessidade de cálculos iterativos e tornar o processo de dimensionamento mais direto, preciso e eficiente. Espera-se, assim, oferecer uma metodologia aplicável tanto em projetos técnicos quanto em análises regulatórias, com potencial de ampliar a adoção dessas soluções sustentáveis em ambientes urbanos.

PRINCÍPIOS DE DIMENSIONAMENTO

Parâmetros Geométricos e Cálculo de Vazões

O poço de infiltração é normalmente preenchido com material poroso (cascalho, brita, pedra marroada, argila expandida, entre outros). Contudo, para maximizar o seu volume útil, pode ser construído sem preenchimento, utilizando paredes estruturais porosas para contenção. Os poços podem ser projetados para captação direta ou receber a descarga de coletores ou galerias de águas pluviais subterrâneas (desenho esquemático na Figura 1).

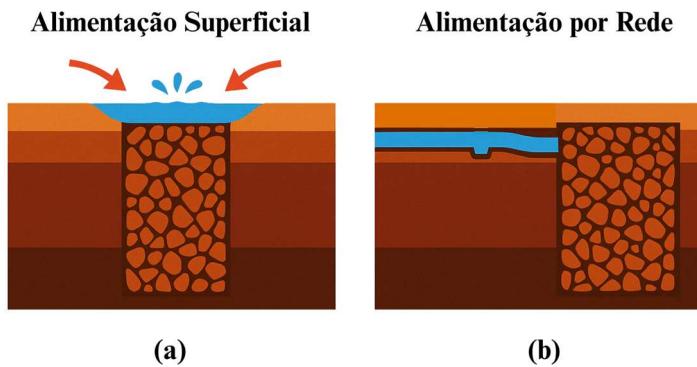


Figura 1 – Métodos de alimentação de poços de infiltração: (a) alimentação superficial e (b) alimentação por rede.

Os parâmetros listados na Tabela 1 foram utilizados como base para o desenvolvimento matemático do modelo proposto para o poço de infiltração.

Tabela 1 – Parâmetros característicos do poço de infiltração

Parâmetro	Unidade	Descrição do Parâmetro
D	m	Diâmetro do poço
H	m	Altura do poço
P	adimensional[–]	Porosidade do material de preenchimento

O sistema opera com base no escoamento das águas pluviais provenientes da área de contribuição, considerada impermeável. Essa água deve ser captada e direcionada ao poço de infiltração, enquanto o volume excedente, se houver, deve ser encaminhado ao sistema de drenagem ou a um curso d'água, respeitando a vazão regulamentada. O volume de preenchimento (V_p) do poço de infiltração é dado por:

$$V_p = \frac{\pi HD^2}{4} \quad (1)$$

Considerando que o poço seja preenchido por um material de porosidade P , o volume disponível para armazenamento de água é $PV_p = \frac{P\pi HD^2}{4}$. Se não houver material de preenchimento, adota-se $P = 1$.

A área de infiltração será considerada como a soma da área do fundo $\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)$ com a metade da área lateral $\left(\frac{\pi DH}{2}\right)$. Assim, a área de infiltração (A_{inf}) é dada por:

$$A_{inf} = \pi \left(\frac{D^2}{4} + \frac{DH}{2} \right) \quad (2)$$

Considerando o balanço hídrico no sistema, sabe-se que há uma vazão máxima permitida para lançamento no sistema de drenagem ou no corpo hídrico (Q_r , vazão de restrição). O poço receberá, portanto, para infiltração, o equivalente à intensidade da chuva menos essa vazão de restrição. Equacionando por meio do método racional, sabe-se que a vazão afluente no poço de infiltração é dada por:

$$Q_a = mAC(I - Q_r) \quad (3)$$

Onde Q_a = vazão afluente [$\frac{\text{L}}{\text{s}}$]; m = coeficiente de majoração (neste trabalho será adotado o valor 1,25); A = área de contribuição para o sistema [ha]; C = coeficiente de escoamento superficial [adimensional]; I = intensidade da chuva [$\frac{\text{L}}{\text{s} \cdot \text{ha}}$] e Q_r = vazão de restrição (neste trabalho será adotado o valor da Resolução Adasa nº 26/2023, que é $24,4 \frac{\text{L}}{\text{s} \cdot \text{ha}}$).

A intensidade da chuva (I) é dada pela curva IDF (Intensidade-Duração-Frequência) que, para o Distrito Federal, é:

$$I = \frac{4374,17T^{0,207}}{(t_d + 11)^{0,884}} \quad (4)$$

Onde T = período de retorno (anos); t_d = tempo de duração da chuva (min).

A vazão que infiltra no poço é dada pela equação a seguir, sabendo que a área de infiltração (A_{inf}) é calculada pela Eq. (2):

$$Q_{\text{inf}} = kA_{\text{inf}}C_s \quad (5)$$

Onde Q_{inf} = vazão de infiltração [$\frac{m^3}{s}$]; k = capacidade de percolação do solo [$\frac{\text{m}}{\text{s}}$];

C_s = coeficiente de segurança de redução do coeficiente de permeabilidade (neste trabalho será adotado o valor 0,5).

Determinação da Altura do Poço de Infiltração (H)

O volume que pode ser preenchido com água deve ser capaz de suportar, para um determinado tempo de duração da chuva (t_d), o volume de entrada menos o volume de saída para o sistema de drenagem. Com isso, adequando as unidades, unindo as Eqs. (1), (3) e (5) e considerando $(m; Q_r) = (1,25; 24,4)$, tem-se:

$$\frac{P\pi HD^2}{4} = \frac{60t_d}{P} [0,00125AC(I - 24,4) - kA_{\text{inf}}C_s] \quad (6)$$

A partir das Eqs. (2), (4) e (6), podemos isolar o parâmetro H em função de todos os outros parâmetros:

$$H = \frac{0,075ACt_d \left(\frac{4374,17T^{0,207}}{(11+t_d)^{0,884}} - Q_r \right) - 47,12C_sD^2kt_d}{0,78PD^2 + 94,25C_sDkt_d} \quad (7)$$

Em resumo, as unidades para utilização da Eq. (7) são: D (m), H (m), t_d (min), T (anos), P (adimensional), A (ha), C (adimensional), Q_r ($\frac{\text{L}}{\text{s} \cdot \text{ha}}$), k (m/s), C_s (adimensional).

DIMENSIONAMENTO

Determinação da Altura (H) a Partir do Diâmetro (D)

O tempo de duração da chuva determina a altura necessária do poço de infiltração. O poço deve ter, no mínimo, uma altura ($H_{máx}$) correspondente ao ponto de máximo da função $H(t_d)$ (Figura 2 (a)). A Figura 2 (b) apresenta os parâmetros utilizados e suas unidades. Este estudo empregará esses parâmetros ao longo de todo o trabalho. O desenvolvimento da programação deste trabalho utilizou o software *Wolfram Mathematica*.

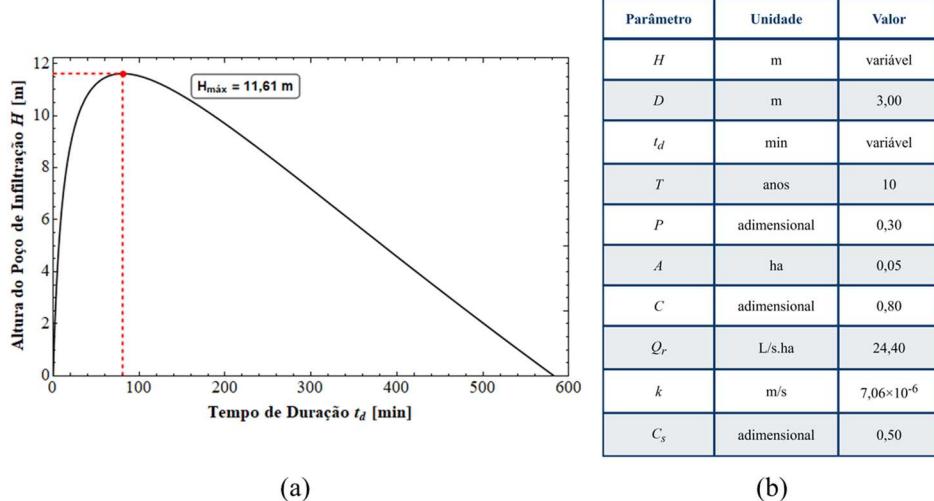


Figura 2 – Relação entre a altura do poço de infiltração (H) e o tempo de duração da chuva (t_d): (a) gráfico plotado $H \times t_d$ e (b) parâmetros utilizados

A altura $H_{máx}$ pode ser encontrada a partir da determinação do máximo global do gráfico da função no intervalo mostrado. Calculando a derivada de H em relação a t_d , tem-se:

$$\frac{dH}{dt_d} = \frac{0,075AC\left(\frac{4374.17T^{0,207}}{(11+td)^{0,884}} - Q_r\right) - 47,12C_sD^2k - \frac{290ACT^{0,207}t_d}{(11+t_d)^{1,884}} + 94,25C_sDk\left(47,12C_sD^2kt_d + 0,075ACt_d\left(\frac{4374.17T^{0,207}}{(11+td)^{0,884}} - Q_r\right)\right)}{0,78D^2P + 94,25C_sDkt_d} \quad (8)$$

O instante de tempo em que isso ocorre é tal que $\frac{dH}{dt_d} = H'(t_d) = 0$, visualizado na Figura 3,

onde o tempo de duração de 80,82 min é o tempo referente ao $H_{máx}$ da Figura 2, de modo que $H(80,82) = 11,61$ m.

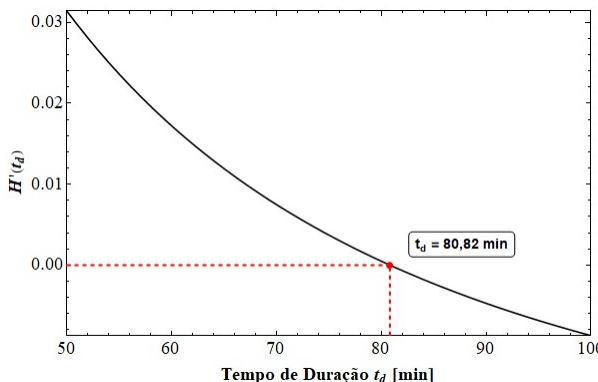


Figura 3 – Relação entre a derivada da altura (H) em relação ao tempo de duração da chuva (t_d) e o próprio t_d

Determinação da Altura (H) Variando-se o Diâmetro (D)

Utilizando os mesmos parâmetros do gráfico na Figura 2 (exceto o diâmetro D), pode-se obter a curva da altura do poço de infiltração (H) variando-se o diâmetro (D), como observado na Figura 4. O gráfico em vermelho representa o gráfico da Figura 2 (a).

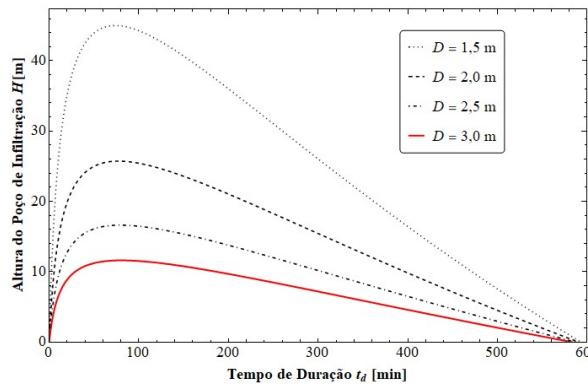


Figura 4 – Relação entre a altura do poço de infiltração (H) e o tempo de duração da chuva (t_d) variando-se o diâmetro (D)

Com isso, para o diâmetro (D) de maneira contínua, pode-se considerar ele como um terceiro eixo, obtendo-se uma superfície para dimensionamento dos poços de infiltração, conforme a Figura 5.

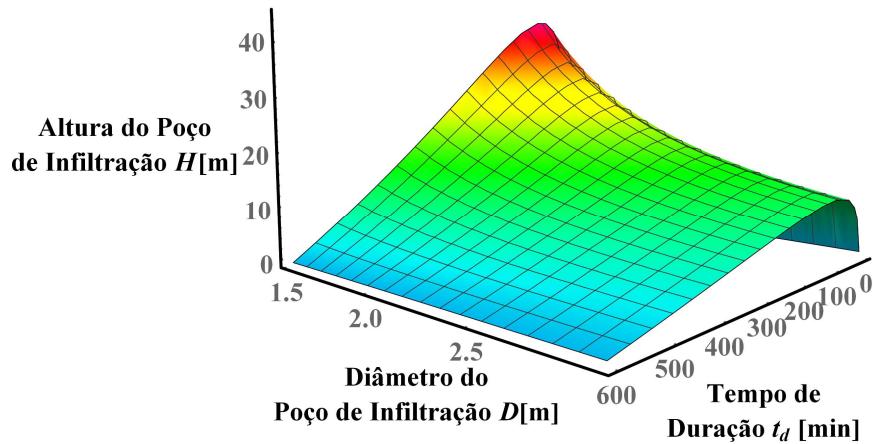


Figura 5 – Superfície para dimensionamento do poço de infiltração, mostrando a relação entre o seu diâmetro (D), a sua altura (H) e o tempo de duração da chuva (t_d)

CONCLUSÕES

O trabalho apresentou uma proposta para o dimensionamento de poços de infiltração baseada no método da curva-envelope, visando contribuir para a gestão sustentável dos recursos hídricos e a proteção dos corpos receptores por meio da implementação de técnicas compensatórias na drenagem urbana. A metodologia, fundamentada em cálculo diferencial, permitiu o estabelecimento de um critério para dimensionamento mínimo da altura dos poços de infiltração, complementado pela representação gráfica bidimensional e tridimensional das relações entre os principais parâmetros envolvidos. Espera-se que o dimensionamento preciso e facilitado dessas estruturas contribua para o aumento da disponibilidade hídrica subterrânea, recuperação de níveis piezométricos e mitigação da poluição difusa, promovendo práticas de manejo voltadas à conservação e à melhoria da qualidade das águas subterrâneas e superficiais. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a validação do método

em condições de campo, com monitoramento do desempenho hidráulico dos poços de infiltração em diferentes tipos de solo e cenários hidrológicos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (Adasa) pelo apoio institucional e pela colaboração fundamental na realização dos estudos necessários para a execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Adasa. (2023). Manual de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas do Distrito Federal. In Brasília, DF: Adasa: Unesco. Adasa - Unesco.
- Arifin, A., Isnawati, I., & Rahmawati, R. (2024). Utilizing Infiltration Wells for Flood Mitigation and Groundwater Recharge in Urban Educational Environments: A Case Study at Nahdatul Ulama Girls' Islamic Boarding School, Martapura. *Global Health & Environmental Perspectives*, 1(3), 235–246.
- Baptista, M. B., de Oliveira Nascimento, N., & Barraud, S. (2011). Técnicas compensatórias em drenagem urbana. ABRH.
- Ferreira, L. de A., Santos, C. S. A., Lima, L. M. da C., Ramos, S. R. da S., & Vieira, Z. C. (2023). Infiltration well as compensatory measure of urban drainage: A financial analysis. *REVISTA INTERDISCIPLINAR E DO MEIO AMBIENTE (RIMA)*, 5(1), e211–e211.
- Li, M.-G., Chen, J.-J., Xu, Y.-S., Tong, D.-G., Cao, W.-W., & Shi, Y.-J. (2021). Effects of groundwater exploitation and recharge on land subsidence and infrastructure settlement patterns in Shanghai. *Engineering Geology*, 282, 105995.
- Reis, R. P. A., de Oliveira, L. H., & Sales, M. M. (2008). Sistemas de drenagem na fonte por poços de infiltração de águas pluviais. *Ambiente Construído*, 8(2), 99–117.
- Uyeno, M. T., Bairros, L. G. de S., Lukiantchuki, J. A., Okawa, C. M. P., & Lautenschlager, S. R. (2023). Introducing an Innovative Design Approach for Drainage Systems: Facilitating Shallow Aquifer Recharge and Mitigating Flooding. *Sustainability*, 15(18), 13584.