

DESEMPENHO DA RESPOSTA HIDROLÓGICA DE SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA PARA CONTROLE DE CHEIAS URBANAS

Pedro Henrique Santos Barbosa¹ ; William Dantas Vichete² & Gerson Araújo de Medeiros³

RESUMO – Este trabalho avaliou o uso de telhados verdes e pavimentos permeáveis na mitigação de cheias na bacia do Córrego Supiriri (Sorocaba, SP). Por meio do software HEC-HMS, cinco cenários foram simulados: situação atual, aplicação individual de cada Solução Baseada na Natureza (SbN), combinação total das duas e aplicação parcial realista (15% de telhados verdes e 25% de pavimentos permeáveis). Os resultados mostraram que todas as alternativas com SbNs reduziram o pico de vazão e o volume escoado. A combinação integral foi a mais eficaz, alcançando cerca de 11% de redução no pico e 12% no volume para um tempo de retorno de 100 anos. No cenário realista, as reduções foram menores, porém expressivas, indicando o potencial das SbNs como complemento à infraestrutura convencional. Conclui-se que a integração distribuída dessas soluções constitui estratégia viável para a gestão sustentável de águas pluviais, embora sua implantação em larga escala enfrente desafios técnicos e econômicos.

Palavras-Chave – Modelagem computacional; Córrego Supiriri; Drenagem urbana.

ABSTRACT – *This study evaluated the use of green roofs and permeable pavements to mitigate flooding in the Supiriri Creek basin (Sorocaba, SP). Using HEC-HMS software, five scenarios were simulated: current conditions, individual application of each Nature-based Solution (NbS), full combination of both, and a realistic partial application (15% green roofs and 25% permeable pavements). The results showed that all NbS alternatives reduced peak flow and runoff volume. The full combination was the most effective, achieving approximately 11% peak reduction and 12% volume reduction for a 100-year return period. In the realistic scenario, reductions were smaller but still significant, indicating the potential of NbSs as a complement to conventional infrastructure. The study concludes that the distributed integration of these solutions constitutes a viable strategy for sustainable stormwater management, although large-scale implementation faces technical and economic challenges.*

Key-words – Computational modeling; Supiriri Stream; Urban drainage.

1) Engenheiro Ambiental e Mestrando em Ciências Ambientais - UNESP Sorocaba, email: phs.barbosa@unesp.br, fone: (11)95727-7643;

2) Professor do departamento de Engenharia Ambiental- UNESP Sorocaba; e-mail: w.vichete@unesp.br;

3) Professor do departamento de Engenharia Ambiental- UNESP Sorocaba; e-mail: gerson.medeiros@unesp.br;

INTRODUÇÃO

A urbanização acelerada e desordenada transforma a paisagem e pressiona o ciclo hídrico natural (Albuquerque et al., 2019). A substituição de solo permeável por extensas superfícies impermeáveis reduz a infiltração, aumenta o volume e a velocidade das águas pluviais e, conseqüentemente, eleva a frequência e a magnitude das inundações urbanas (Ongaga et al., 2024; Paul & Meyer, 2001). Esse cenário se manifesta de maneira crítica nas cidades brasileiras. O município de Sorocaba-SP, acumula um histórico de enchentes desde 1929 que vem se agravando em eventos recentes, a exemplo das cheias de 2024 (Souza, 2024).

Diante desse desafio, a engenharia evoluiu das soluções convencionais, a chamada “infraestrutura cinza”, para uma gestão integrada (Canholi, 2015). Nesse contexto, ganham destaque as Soluções Baseadas na Natureza (SbN), ou “infraestrutura verde”. Telhados verdes, pavimentos permeáveis e jardins de chuva buscam restaurar processos hidrológicos, promovendo infiltração e retenção, com benefícios adicionais como melhora da qualidade da água, redução de ilhas de calor e aumento da biodiversidade urbana (Dobkowitz et al., 2025; Esraz-UI-Zannat et al., 2024). No entanto, a implantação dessas soluções esbarra em obstáculos práticos: investimento inicial elevado, necessidade de manutenção especializada e carência de normas específicas no Brasil limitam sua adoção em larga escala (Barcelos et al., 2025).

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho da resposta hidrológica de SbNs na mitigação de enchentes na bacia do Córrego Supiriri, em Sorocaba-SP. Foi considerado a utilização de telhados verdes e pavimentos permeáveis para realizar o balanço de água no processo de infiltração por meio do método NRCS-CN (USDA-NRCS, 2004; Ferreira & Rocha, 2023).

OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho da resposta hidrológica de Soluções Baseadas na Natureza na redução do escoamento superficial direto por meio de um modelo chuva-vazão para chuvas de projeto com diferentes intensidades.

METODOLOGIA

Para a avaliação do desempenho da resposta hidrológica das soluções baseadas na natureza, foi considerado o método de chuva-vazão do NRCS-CN, onde a lâmina do escoamento superficial é determinada pela capacidade de armazenamento de água no solo em função das suas características

e tipos de cobertura (USDA-NRCS, 2004). O escoamento superficial é determinado para parcela da precipitação que fica disponível com base no valor CN considerado. A equação 1 apresenta a lâmina efetiva da precipitação disponível para o escoamento superficial direto.

Equação 1.
$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}$$

Onde: P_e é a precipitação efetiva em mm; P é a precipitação total em mm e S é a capacidade de armazenamento no solo em mm;

Neste estudo, foi considerado a utilização do software HEC-HMS para a construção de um modelo semidistribuído na Bacia do Córrego Supiriri (Sorocaba, SP).

Caracterização da Área de Estudo

A Bacia do Córrego Supiriri está localizada no município de Sorocaba-SP, abrangendo os bairros Vila São João, Vila Augusta, Vila Trujillo e Vila Casa Nova, com área de drenagem total de aproximadamente 4,2 km². O exutório localiza-se na margem esquerda do rio Sorocaba, com altitude de 562 m. A bacia possui 68% de área urbanizada, 22,84% de área pavimentada e 9,16% de área vegetada, com aproximadamente 5.000 habitantes. Essa bacia enfrenta enchentes frequentes, com registros de inundações entre a Rua Cel. Freire de Andrade e a Rua Maestro Zeferino Santana e alagamentos ao longo da sua extensão.

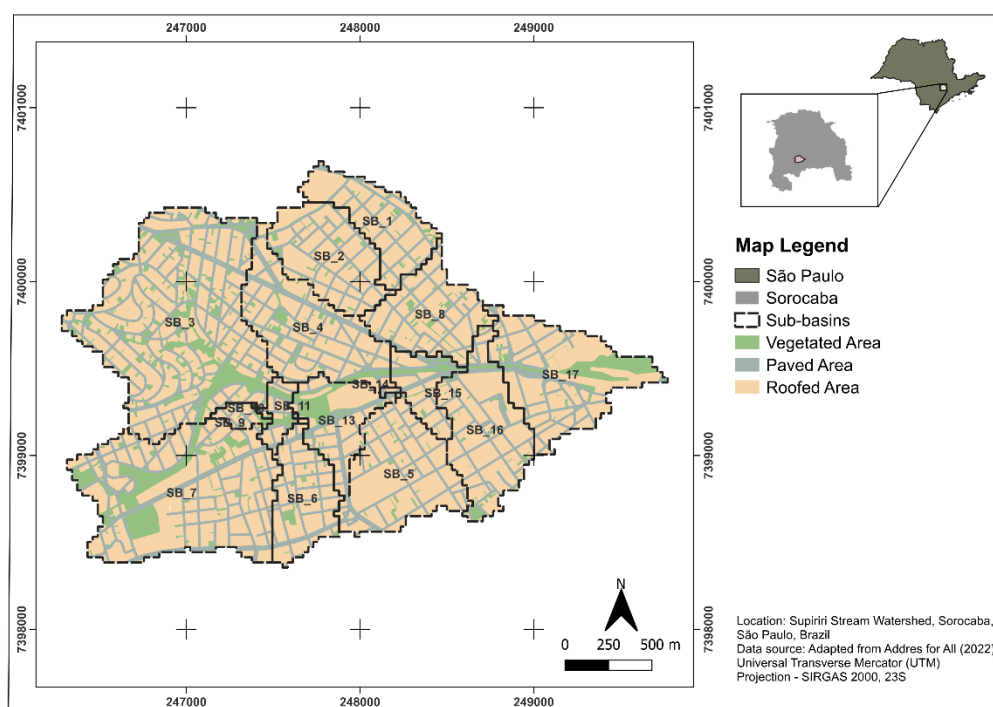


Figura 1. Mapa de apresentação, e uso e ocupação do solo, da área de estudo (fonte: o autor).

A caracterização topográfica foi realizada com base no MDE SRTM de 30 m de resolução. O solo da área de estudo foi classificado como grupo hidrológico B, com áreas de vale apresentando solo tipo C (Genovez et al., 2005; Rossi, 2017).

A bacia do Supiriri possui o Reservatório de Detenção de Cheias Parque dos Italianos (RDC PQ ITA) com capacidade de armazenamento de aproximadamente 57.000 m³ e volume útil de 37.500 m³. O seu funcionamento é por gravidade e o seu controle de saída é realizado através de duas galerias tubulares de concreto com diâmetros de 2,10 m cada.

Foram identificados três cursos d'água que desaguam no RDC PQ ITA: Córrego Supiriri, Córrego Tabuleiro e um córrego sem nome na Rua Piracicaba. Para cada um, foi considerado as estruturas de controle hidráulico que limitam a vazão afluente ao reservatório.

O parâmetro Curve Number (CN) foi ponderado considerando as classes de uso e ocupação do solo: área vegetada (CN=74); área construída (CN=87); e área pavimentada (CN=98). Os valores de CN foram obtidos para a condição atual foram obtidos a partir de Satori et al. (2005). Os valores de CN referente as SbNs consideradas foram obtidas em Niquini et al. (2019). Para telhado verde foi considerado o CN=86 e CN=91 para pavimento poroso.

O tempo de concentração da bacia (Tc) foi estimado pelo método cinemático. As chuvas de projeto foram definidas para os tempos de retorno de 2, 10 e 100 anos, com duração de 1 hora, utilizando a equação de chuvas intensas do SAAE Sorocaba³.

Configuração das Simulações Computacionais

A simulação computacional para avaliar o desempenho das SbNs foram organizadas em cinco cenários:

- Cenário 1: situação atual;
- Cenário 2: adoção integral de telhado verde em toda área construída;
- Cenário 3: adoção integral de pavimento poroso em toda área pavimentada;
- Cenário 4: combinação total de telhado verde e pavimento poroso;
- Cenário 5: cenário realista com adoção parcial (15% de telhado verde e 25% de pavimento permeável).

A Figura 2 ilustra o modelo hidrológico semidistribuído construído no HEC-HMS.

³ Disponível em <https://www.saaesorocaba.com.br/> (chuva TR 100 anos com duração de 1 hora igual a 81,6 mm e chuva de TR 10 anos com duração de 1 hora igual a 62,64 mm).

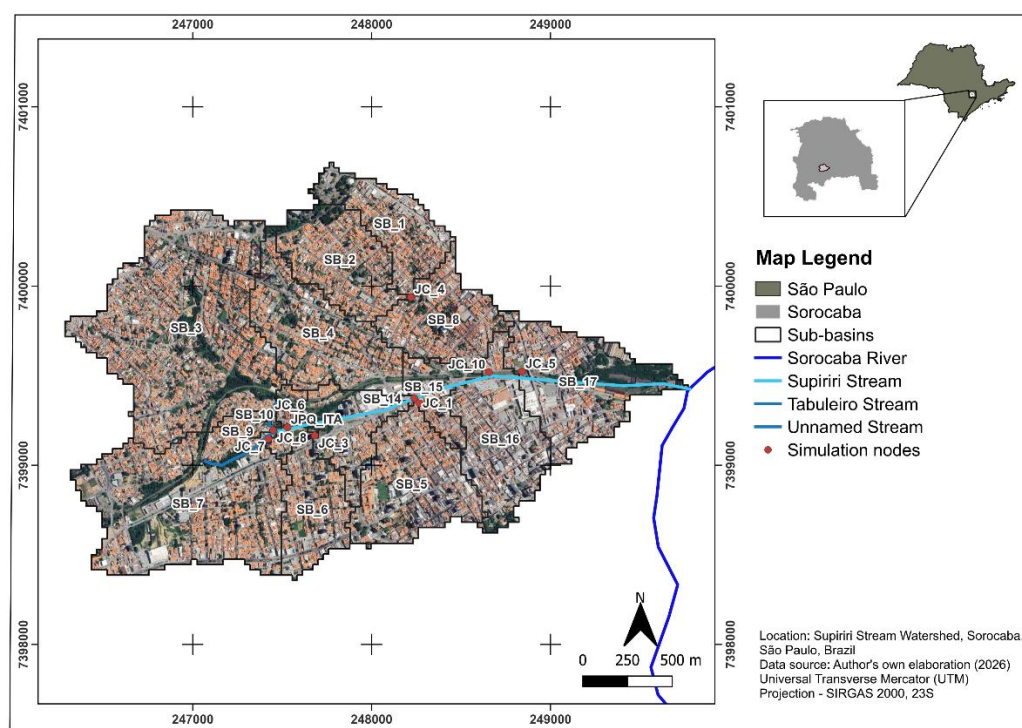


Figura 2. Modelo HEC-HMS construído (fonte: o autor).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os cenários com SbNs promoveram reduções no pico de vazão (Q_p) e no volume de escoamento superficial direto (ESD) em relação ao cenário atual. A Tabela 1 apresenta os resultados para os pontos de análise: entrada do reservatório Parque Italianos e foz da bacia e a Tabela 2 apresenta o volume do escoamento superficial direto.

Tabela 1 - Pico de vazão (m^3/s) nos diferentes cenários

Cenários Simulados	Seção de Controle	TR = 2 anos	TR = 10 anos	TR = 100 anos
1	PQ ITA	19,8	34,0	53,2
	Foz	17,3	29,7	46,6
2	PQ ITA	18,7	32,6	51,6
	Foz	16,2	28,5	45,0
3	PQ ITA	17,0	30,2	48,6
	Foz	14,8	26,6	42,8
4	PQ ITA	16,1	28,9	47,1
	Foz	13,8	25,5	41,4

Tabela 2 - Volume de escoamento superficial direto (m³) nos diferentes cenários

Cenários Simulados	Seção de Controle	TR = 2 anos	TR = 10 anos	TR = 100 anos
1	PQ ITA	28200	48500	75900
	Foz	41000	77700	126500
2	PQ ITA	26800	46700	73800
	Foz	38400	74300	122300
3	PQ ITA	24400	43700	70100
	Foz	34300	69000	115700
4	PQ ITA	23100	42100	68100
	Foz	31900	65800	111700

Foi possível observar que o pavimento permeável apresentou um desempenho superior ao telhado verde na redução do volume escoado. Já a estratégia de SbN com adoção de telhados verdes têm benefícios adicionais de retenção de calor e evapotranspiração. A combinação das duas medidas (cenário 4) demonstrou-se a maior redução do ESD, com reduções aproximadas de 18,86% (3,7 m³/s) no pico de vazão e 18,08% (5.100 m³) no volume para TR 100 anos.

Considerando as limitações práticas de implantação, o cenário 5 (15% de telhado verde e 25% de pavimento permeável) apresentou reduções mais modestas. Para o TR 100 anos, observou-se redução de 2,60% na vazão de pico e 2,70% no volume escoado na foz, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados do cenário realista

Métrica	Seção de Controle	TR = 2 anos	TR = 10 anos	TR = 100 anos
Vazão (m ³ s ⁻¹)	PQ ITA	18.8	32.8	51.7
	Foz	18.5	28.8	45.4
Volume de Escoamento Superficial (1000m ³)	PQ ITA	27	46,9	74,1
	Foz	38,9	74,9	123,1

Os resultados indicam que as SbNs contribuem para a redução dos picos de cheia e do volume escoado, sendo mais efetivas em eventos de menor recorrência (TR 2 anos), vide Figura 3. A combinação distribuída de telhados verdes e pavimentos permeáveis mostrou-se a estratégia mais

assertiva, corroborando estudos como o de Niquini et al. (2019) na bacia do Córrego Ressaca em Belo Horizonte.

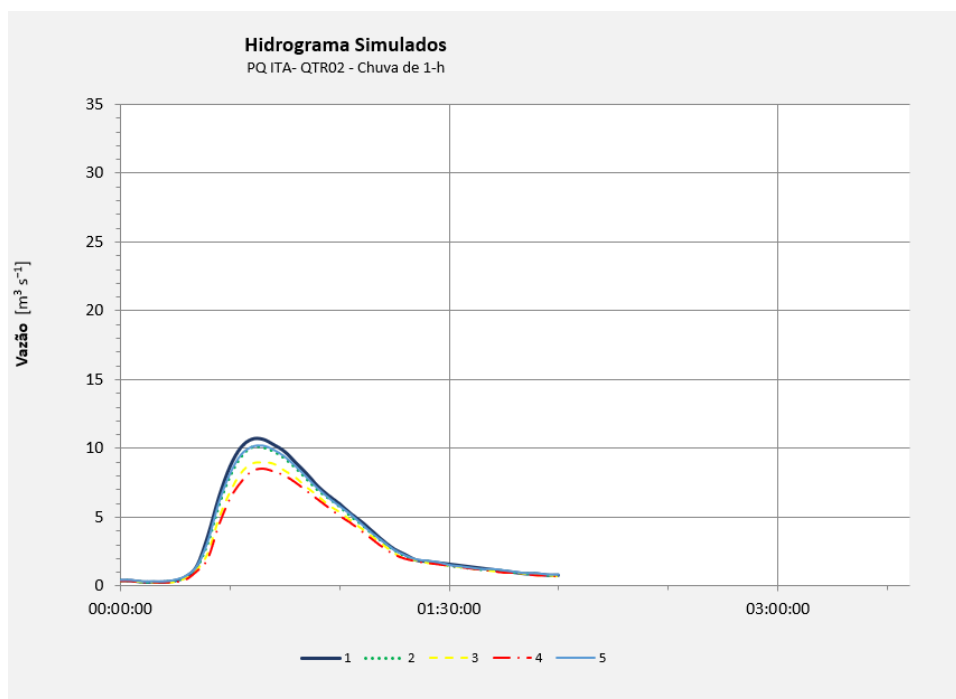


Figura 3. Hidrograma Simulados para os cenários 1 a 5 (fonte: o autor).

A abordagem metodológica demonstrou que o pavimento poroso e o telhado verde possuem potencial para redução de picos de vazão, mas as reduções no escoamento superficial são inferiores ao amortecimento proporcionado por reservatórios de detenção/retenção de cheias, indicando que as SbNs devem ser consideradas como complemento à infraestrutura cinza existente.

Apesar das limitações impostas pelo erro estrutural do método de chuva-vazão considerado e da utilização de modelos computacionais sem uma calibração formal (Beven & Young2013), foi possível identificar que o aumento da intensidade da chuva resulta em um desempenho inversamente proporcional das SbN na redução do ESD.

CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou o desempenho da resposta hidrológica de pavimentos porosos e telhados verdes como Soluções Baseadas na Natureza para mitigação de enchentes na bacia do Córrego Supiriri, em Sorocaba-SP. Os resultados indicaram redução de 18,08% no volume de escoamento superficial para chuvas de TR 2 anos e de 11,15% para TR 100 anos na foz do Córrego Supiriri, no cenário 4. Considerando as limitações de implantação das alternativas de SbN em toda a bacia, o cenário realista com 15% de telhado verde e 25% de pavimento permeável atenuou em 2,60% a vazão de pico e 2,70% o volume escoado para TR 100 anos. A utilização de soluções baseadas na natureza não exclui o uso da infraestrutura convencional. As SbNs são mais eficientes em chuvas recorrentes

(TR 2 anos), contribuindo para a melhoria da qualidade ambiental urbana, tais como benefícios térmicos não avaliados neste estudo. Recomenda-se para trabalhos futuros a análise integrada de SbNs com infraestrutura azul e a utilização de modelos distribuídos para simulação dos processos de infiltração e escoamento superficial por outros métodos em um modelo computacional calibrado e validado.

REFERÊNCIAS

- Albuquerque, M. B., Araújo, A. A. de, Martinez, C. E. N. M., Mauad, F. F., & Okawa, C. M. P. (2019). Sustainable Urban Drainage: a brief review of the compensatory techniques of structural and non-structural measures [Review of *Sustainable Urban Drainage: a brief review of the compensatory techniques of structural and non-structural measures*]. *Revista Eletrônica Em Gestão Educação e Tecnologia Ambiental*, 23, 35. Universidade Federal de Santa Maria. <https://doi.org/10.5902/2236117039837>
- Barcelos, D. de Á. M., Jonov, C. M. P., Silva, A. de P. e, Filho, E. R., & Barcelos, H. J. (2025). Principais barreiras à adoção de telhados verdes: uma revisão de literatura para evitá-las no Brasil. *Ambiente Construído*, 25. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212025000100799>
- Beven, K. J., & Young, P. C. (2013). A guide to good practice in modeling semantics for authors and referees. *Water Resources Research*, 49(8), 5092–5098. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20393>
- Canholi, A. P (2015). Drenagem urbana e controle de enchentes. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Dobkowitz, S., Bronstert, A., & Heistermann, M. (2025). Water retention by green infrastructure to mitigate urban flooding: a meta-analysis. *Urban Water Journal*, 22(5), 477. <https://doi.org/10.1080/1573062x.2025.2472325>
- Esraz-Ul-Zannat, Md., Dedekorkut-Howes, A., & Morgan, E. (2024). A review of nature-based infrastructures and their effectiveness for urban flood risk mitigation. *Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change*, 15(5). <https://doi.org/10.1002/wcc.889>
- Ferreira, M. J., & Rocha, H. R. da. (2023). Green roof infrastructure outperforms grey technology in flood mitigation in São Paulo's urbanized region. *Frontiers in Built Environment*, 9. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1254942>
- Genovez, A. M., Neto, F. L., & Sartori, A. (2005). Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10(4), 5.

<https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n4.p5-18>

JORNAL CRUZEIRO DO SUL. (2024). Há 95 anos, Sorocaba ficava isolada por uma grande enchente. *Cruzeiro Do Sul*.

Niquini, L. L., Nunes, A. de A., Pontes, B. S., Lopes, C. P. de L., Souza, J. C. de, Drummond, J. M., & Gonçalves, R. R. (2019). MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O USO DE INFRAESTRUTURAS VERDES: ESTUDO DE CASO PARA A BACIA DO CÓRREGO RESSACA, SITUADA NO MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE. *Sustentare*, 3(1), 42. <https://doi.org/10.5892/st.v3i1.5703>

Ongaga, C. O., Makokha, M., Obiero, K., Kipkemai, I., & Diang'a, J. (2024). Urbanization and hydrological dynamics: a 22-year assessment of impervious surface changes and runoff in an urban watershed. *Frontiers in Water*, 6. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1455763>

Paul, M. J., & Meyer, J. L. (2001). Streams in the Urban Landscape. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32(1), 333. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114040>

Rossi, M. (2017). *Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado*. Instituto Florestal.

Souza, R. de. (2024). Prefeitura decreta estado de calamidade pública em Sorocaba devido às chuvas. *Gl Sorocaba e Jundiá*.

Sartori, A., Lombardi Neto, F., & Genovez, A. M. (2005). Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10(4), 5–18.

USDA-NRCS. (2004). National Engineering Handbook, Part 630: Hydrology, Chapter 10: Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.