

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

DIAGNÓSTICO E MODELAGEM DA BACIA DO CÓRREGO SAPATEIRO EM SÃO PAULO E PROPOSTA DE SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA (SbN) PARA O ATENDIMENTO ÀS METAS DO CADERNO DE DRENAGEM DO MUNICÍPIO

Carvalho, G.S.Y.¹; Graciosa, M.C.P. ¹

¹Universidade Federal do ABC

(gabrielly.yacabo@aluno.ufabc.edu.br, melissa.graciosa@ufabc.edu.br)

Abstract: Due to climate change, extreme precipitation events are becoming more intense, with urban municipalities characterized by high population density, a high degree of impermeability, and the occupation of river floodplains suffering more consequences. Thus, this study proposes Nature-based Solutions (NbS) in the Sapateiro Stream basin, in São Paulo, for the sustainable management of rainwater. The proposed solutions were evaluated through hydrological-hydraulic modeling in the HEC-HMS software, considering alternatives such as rain gardens, bioswales, permeable pavements, and the raising of the lakes in Ibirapuera Park. The watershed diagnosis was conducted using the SCS hydrological model, and the calculated values of precipitation of TR 10, 25, and 100 years were very close to those found in the city's Drainage Manual. For the hydraulic diagnosis, the Muskingum-Cunge method was used. For the prognosis, an innovative approach was adopted in the simulation by using the Reservoir tool in HEC-HMS, in which a reservoir was inserted per sub-basin with a volume equivalent to the total NbS structures proposed per sub-basin. The sizing aimed to mitigate volumes corresponding to a 25-year TR, and the results indicated mitigation capacity of up to 65% of the volume of a 100-year TR rainfall. Therefore, the results demonstrate the potential of NbS as effective decentralized solutions for urban flood control. When compared to the solutions proposed in the City Hall's Drainage Manual, which prioritizes gray infrastructure, the NbS proved to be technically feasible and efficient, reinforcing the importance of integrating green and gray infrastructure in urban drainage systems.

Resumo: Devido às mudanças climáticas, os eventos extremos de precipitação são agravados, onde municípios urbanos com elevada densidade demográfica, alto grau de impermeabilização e ocupação das várzeas dos rios sofrem mais consequências. Assim, este trabalho propõe Soluções baseadas na Natureza (SbN) na bacia do Córrego Sapateiro, em São Paulo, para o manejo sustentável das águas pluviais. As soluções propostas foram avaliadas por meio de modelagem hidrológica-hidráulica no software HEC-HMS, considerando alternativas como jardins de chuva, biovaletas, pavimentos permeáveis e o alteamento dos lagos do Parque Ibirapuera. O diagnóstico da bacia foi realizado por meio do modelo hidrológico SCS, e os valores calculados de precipitações de TR 10, 25 e 100 anos foram muito próximos aos valores encontrados pelo Caderno de Drenagem. Para o diagnóstico hidráulico, foi utilizado o método Muskingum. Para o prognóstico, a simulação adotou uma

abordagem inovadora utilizando a ferramenta Reservoir no HEC-HMS, onde foi inserido um reservatório por sub-bacia com o volume equivalente ao total das estruturas SbN propostas por sub-bacia. O dimensionamento visou a mitigação de volumes correspondentes a TR 25, e os resultados indicaram capacidade de mitigação de até 65% do volume de uma chuva de TR de 100 anos. Assim, os resultados demonstram o potencial das SbN como soluções descentralizadas eficazes para o controle de alagamentos urbanos. Quando comparadas às soluções propostas no Caderno de Drenagem da Prefeitura, que prioriza estruturas cinzas, as SbN mostraram-se tecnicamente viáveis e eficientes, reforçando a importância da integração entre infraestrutura verde e cinza na drenagem urbana.

Palavras-Chave – Soluções baseadas na Natureza (SbN), modelagem hidrológica-hidráulica, manejo de águas pluviais.

INTRODUÇÃO

Com o agravamento das mudanças climáticas, eventos extremos como chuvas intensas e de maior recorrência têm se tornado cada vez mais comuns (Campos, 2021), provocando alagamentos e inundações em diversas regiões do Brasil, como no caso recente do Rio Grande do Sul (abril de 2024). Em resposta a esse cenário, torna-se urgente a melhoria dos sistemas de drenagem urbana, especialmente nas grandes cidades, que enfrentam altos níveis de impermeabilização, ocupação irregular das várzeas e redes de drenagem subdimensionadas. Tradicionalmente baseados em estruturas cinzas (Depietri e McPhearson, 2017), esses sistemas não têm conseguido reter o aumento do escoamento superficial nas bacias urbanas.

Nesse contexto, o presente Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado para a obtenção do título de Engenheira Ambiental e Urbana pela Universidade Federal do ABC (UFABC), propõe uma abordagem alternativa para a bacia do Córrego Sapateiro, em São Paulo, por meio de modelagem hidrológica-hidráulica utilizando o software HEC-HMS e da aplicação de Soluções baseadas na Natureza (SbN). Essas soluções incorporam processos naturais ao planejamento urbano, promovendo maior eficiência e sustentabilidade na gestão das águas pluviais. O objetivo foi avaliar se as intervenções propostas podem mitigar os volumes de alagamento da bacia e comparar com as soluções propostas no Caderno de Drenagem da Prefeitura Municipal de São Paulo.

OBJETIVOS

Avaliar a eficiência de sistemas descentralizados de drenagem sustentável aplicando SbN na redução dos volumes de cheia em uma bacia hidrográfica urbana – a saber, a bacia do Córrego Sapateiro em São Paulo – SP, para comparação das propostas estabelecidas no Caderno de Drenagem do município, por meio de modelagem hidrológica-hidráulica utilizando o software HEC-HMS.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste trabalho foi embasada por temas como manejo das águas pluviais urbanas por meio de SbN, modelagem hidrológica-hidráulica e o Caderno de Drenagem elaborado pela Prefeitura Municipal de São Paulo. O conceito de SbN tem ganhado destaque como resposta à intensificação dos eventos climáticos extremos (Devecchi *et al.*, 2020), potencializados pelas mudanças climáticas e pela crescente impermeabilização das cidades. As SbN, como jardins de chuva e biovaletas, são propostas que mimetizam processos naturais para aumentar a infiltração da água no solo, reduzir o escoamento superficial e minimizar os impactos dos alagamentos urbanos

(Herzog e Rozado, 2019). Estudos demonstram que, quando integradas aos sistemas tradicionais de drenagem — conhecidos como “sistemas cinzas” —, essas soluções são capazes de reduzir significativamente os volumes escoados e os pontos de alagamento nas cidades (Oliveira *et al.*, 2023).

A modelagem hidrológica-hidráulica é uma ferramenta essencial para diagnosticar e propor soluções para as cheias urbanas. A modelagem permite simular tanto a resposta da bacia a eventos de chuva quanto o comportamento dos corpos hídricos urbanos em situações extremas. O modelo hidrológico SCS (Natural Resources Conservation Service) simula o escoamento superficial da bacia por meio do CN (Curve Number). Este é amplamente utilizado devido à sua simplicidade e eficácia, sendo adequado especialmente em áreas urbanas com escassez de dados por exigir poucos parâmetros e permitir uma boa calibração entre dados simulados e observados (Tucci, 2005; Porto *et al.*, 1995). O CN calcula a precipitação efetiva a partir de características do solo (classificados em grupos hidrológicos A, B, C e D) e da condição de umidade anterior, utilizando o parâmetro CN, que relaciona o uso e ocupação do solo à capacidade de infiltração. O modelo também utiliza o conceito de hidrograma unitário para transformar a chuva de projeto em vazões ao longo do tempo, possibilitando a previsão dos efeitos de diferentes cenários.

Para aplicação prática da modelagem, foi utilizado o software HEC-HMS (Hydrologic Modeling System), ferramenta gratuita desenvolvida pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2002). O HEC-HMS foi escolhido pela sua ampla aceitação, facilidade de uso e confiabilidade em simulações hidrológicas de bacias urbanas. Neste estudo, o software foi aplicado à bacia do córrego Sapateiro, onde há uma urbanização consolidada com alta taxa de impermeabilização, o que contribui nos recorrentes alagamentos. Destacam-se ainda os lagos do Parque Ibirapuera como importantes elementos de retenção, ainda que insuficientes diante do déficit histórico da infraestrutura de drenagem da região (SIURB, 2022).

Os Cadernos de Drenagem, elaborados pela Prefeitura de São Paulo por meio da SIURB (Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras), constituem uma das principais referências técnicas e estratégicas para o planejamento da drenagem urbana. Esses documentos fornecem diagnósticos detalhados das bacias hidrográficas da cidade e propõem intervenções de engenharia com o objetivo de mitigação dos volumes de cheia. Esses estudos são complementados por outros instrumentos normativos, como os Manuais de Drenagem (2012), e por políticas públicas integradas nos Planos Diretores de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais, que têm por objetivo mitigar os efeitos das cheias, preservar o meio ambiente urbano e garantir segurança hídrica às populações.

METODOLOGIA

A metodologia adotada no estudo da bacia do Córrego Sapateiro envolveu a modelagem hidrológica-hidráulica por meio do software livre HEC-HMS, escolhido por sua gratuidade, ampla disponibilidade de materiais *online*, validação pelos órgãos brasileiros e integração com o QGIS, um software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) também gratuito. A modelagem visou diagnosticar quantitativamente a bacia utilizando dados espaciais em formato *shapefile* extraídos do portal GeoSampa (da Prefeitura de São Paulo), como hidrografia, contorno da área da bacia, curvas de nível, pontos cotados, sistema viário e imagens de satélite.

Assim, a base cartográfica da bacia foi realizada no QGIS, com a realização da divisão da bacia em 20 sub-bacias, a partir da criação de camadas de nós e polígonos representando o escoamento das águas, com base em critérios como confluências, mudanças de uso e ocupação do solo e interseções com avenidas. A partir disso, foram obtidos parâmetros físicos de cada sub-bacia, como área, cotas e comprimentos de talvegues, além dos valores de Curve Number (CN) e coeficiente de escoamento superficial (C), conforme as características da bacia.

Para a simulação, adotou-se o modelo chuva-vazão do SCS, desenvolvido pelo Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (USDA em inglês), que se baseia na precipitação efetiva calculada a partir do CN, considerando o tipo e uso de solo da bacia. Foram utilizados parâmetros como capacidade de retenção da bacia (S), perdas iniciais (I_a), tempo inicial de escoamento (t_i), tempo de translado (t_t), tempo de concentração (t_c) e tempo de retardo (Lag Time), segundo equações específicas (Gonçalves, 2019). Com esses dados, foi elaborado o hidrograma triangular unitário (Sherman, 1932), que descreve a variação da vazão ao longo do tempo durante um evento de chuva.

A chuva de projeto foi definida por meio da equação IDF (intensidade, duração e frequência), elaborada a partir de dados do posto pluviométrico do observatório do Instituto de Astronomia e Geofísica da USP (Universidade de São Paulo), conforme a equação (Martinez e Piteri, 2016) mostrada abaixo:

$$i_{t,T} = 32,77 x (t + 20)^{-0,8780} + 16,10 x (t + 30)^{-0,9306} x (-0,4692 - 0,8474 x \ln(\ln(\frac{T}{T-1}))) \quad (1)$$

A duração da chuva foi definida com base na média dos tempos de concentração das sub-bacias. Para representar o comportamento da chuva no tempo, utilizou-se o método dos blocos alternados na construção do hietograma (gráfico de precipitação por tempo).

Para a propagação das vazões ao longo do curso d'água, foi aplicado o método de Muskingum, que considera perdas de energia durante o escoamento e utiliza os parâmetros K (tempo de translado) e x (fator de ponderação entre vazões de entrada e saída), baseando-se na Equação da Continuidade.

Com a modelagem hidrológica concluída, foi possível identificar os volumes excedentes e, a partir disso, propor intervenções com base em SbN. As SbN escolhidas consideraram o uso e ocupação do solo, a disponibilidade de áreas públicas e a capacidade de armazenamento das estruturas, como jardins de chuva, biovaletas e pavimentos permeáveis. Para simplificar os cálculos volumétricos, foram adotados parâmetros como o valor de 0,3 para o coeficiente de vazios da brita 2, as áreas das estruturas estimadas no QGIS, a profundidade de 0,50 m para os jardins de chuva e para as biovaletas, 0,70 m de profundidade para os pavimentos permeáveis e 0,10 m de alteamento das margens dos lagos do Parque Ibirapuera.

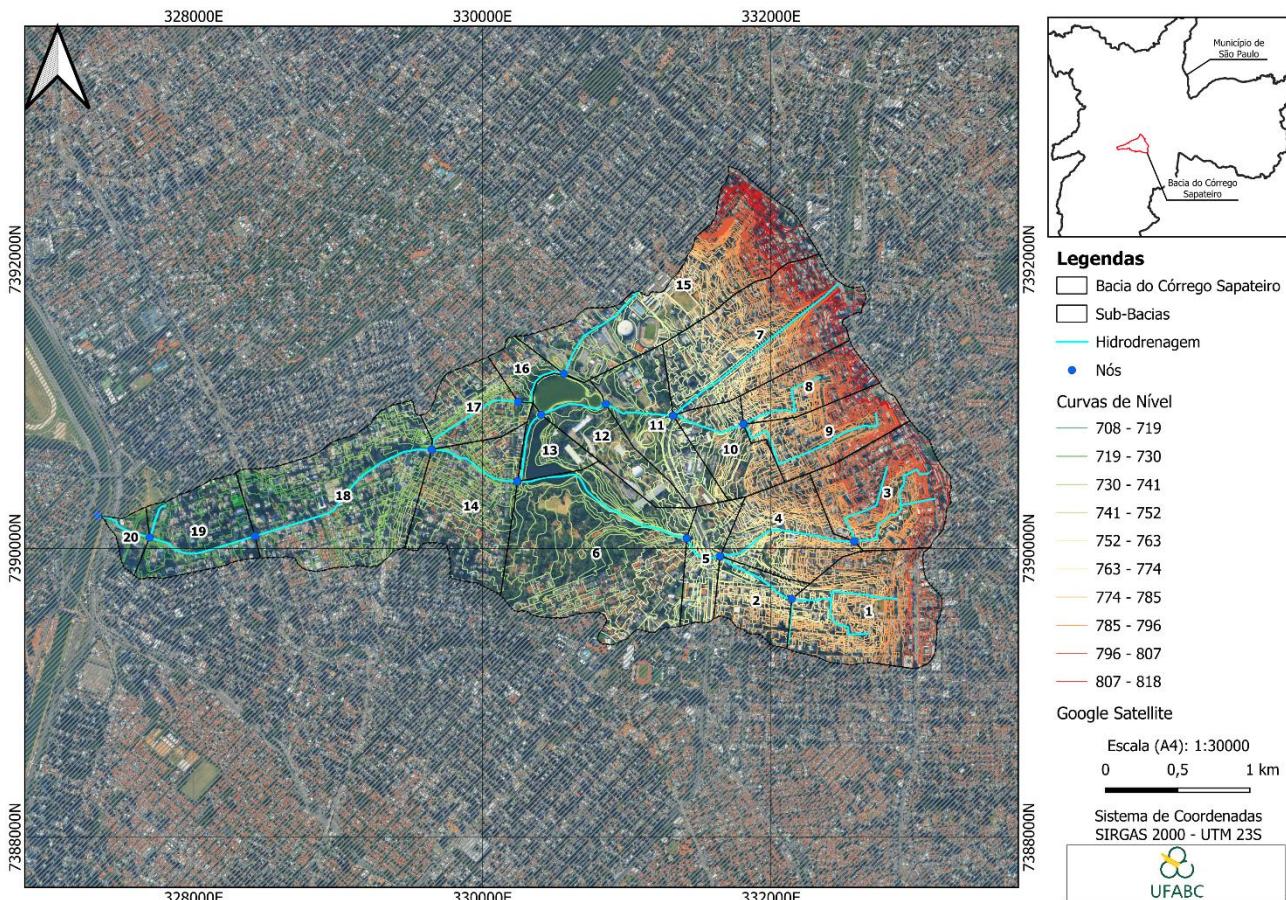
Calculados os volumes das estruturas de SbN, as propostas foram inseridas no HEC-HMS com a ferramenta Reservoir como um reservatório de volume equivalente à soma das estruturas individuais por sub-bacia, e uma nova simulação foi realizada para analisar os resultados da modelagem considerando essas retenções. Dessa forma, foi possível entender o volume que as estruturas propostas poderão contribuir na diminuição do escoamento superficial da região.

O Caderno de Drenagem de São Paulo propõe alternativas para reduzir os alagamentos que ocorrem na bacia, como reservatórios, reforço e substituição de galerias, alteamento das margens dos lagos do Parque, desassoreamento, abertura de córrego, praça de infiltração e rota rememorativa. Duas propostas similares incluem também elementos paisagísticos, algumas classificadas como SbN. Diferente disso, o estudo da bacia do córrego Sapateiro focou exclusivamente em SbN para mitigar o excesso de chuva, avaliando se essas soluções atenderiam às metas de controle estabelecidas pelo Caderno.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A base cartográfica da bacia do Córrego Sapateiro elaborada no QGIS está apresentada nas Figura 1, onde pode-se observar o contorno da área da bacia, as curvas de nível do terreno, os córregos e afluentes da bacia e a divisão das sub-bacias elaboradas.

Figura 1 - Representação cartográfica da bacia do Córrego Sapateiro



Com esses dados foi possível calcular as demais variáveis necessárias para a simulação hidrológica-hidráulica, como o tempo de concentração e o Lag Time. As chuvas de projeto foram simuladas com duração de 2 horas e para os Tempos de Retorno (TR) de 10, 25 e 100 anos, utilizando a curva IDF exposta na metodologia. Os valores de precipitação total calculados foram muito próximos aos calculados no Caderno de Drenagem, e estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de precipitação

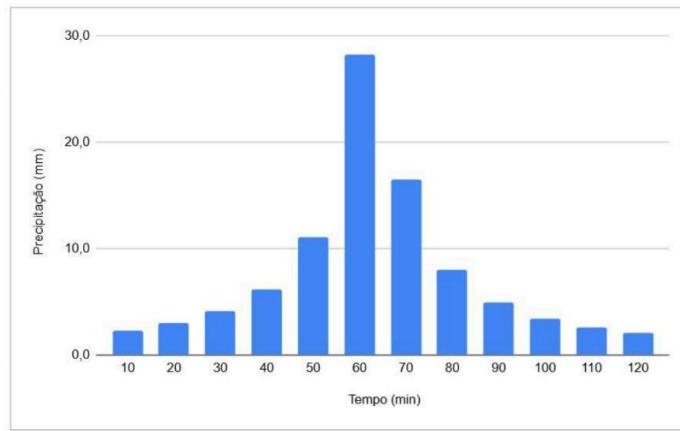
TR (anos)	Precipitação Calculada (mm)	Precipitação apresentada no Caderno de Drenagem (mm)
10	77,6	77,5
25	92,2	92,1
100	113,9	113,7

Na Figura 2 está apresentado o hietograma para TR 25 anos, bem como os dados usados na sua elaboração, com o método dos blocos alternados.

Figura 2 - Hietograma de TR 25 anos

Parâmetros	Símbolo	Valor	Unidade
Tempo de retorno	T	25	anos
Duração da chuva	t	10	min

Duração parcial (min)	Intensidade (mm/min)	Precipitação acumulada (mm)	Incremento de P (mm)	Precipitação para Hietograma (mm)
10	2,8	28,2	28,2	2,3
20	2,2	44,6	16,4	3,0
30	1,9	55,7	11,0	4,1
40	1,6	63,7	8,0	6,2
50	1,4	69,9	6,2	11,0
60	1,3	74,8	5,0	28,2
70	1,1	78,9	4,1	16,4
80	1,0	82,3	3,4	8,0
90	1,0	85,3	3,0	5,0
100	0,9	87,9	2,6	3,4
110	0,8	90,2	2,3	2,6
120	0,8	92,2	2,0	2,0



Com as simulações hidrológicas-hidráulicas, as vazões de pico no exutório da bacia (nó 20) foram obtidas para os TR definidos. Para a vazão de restrição do sistema de drenagem da bacia foi considerada o valor de $65 \text{ m}^3/\text{s}$, que é a máxima vazão suportada no sistema de drenagem mais próximo ao exutório da bacia - próxima ao Rio Pinheiros -, apresentada no Caderno de Drenagem. Esse valor foi definido como simplificação do estudo, e pesquisas futuras podem considerar a vazão de restrição de cada trecho do sistema para maior precisão nos resultados. A partir desses dados, foram calculados os volumes que excedem a vazão de restrição de $65 \text{ m}^3/\text{s}$, oriunda do Caderno, resultando em volumes significativos a serem mitigados na bacia, que estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3- Resultados de vazão e volume da simulação

TR (anos)	Vazão Simulada (m^3/s)	Volume excedente (m^3/s)
10	161,4	113.682
25	213,2	195.249
100	293,3	332.590

Na etapa de proposição de alternativas com SbN, foram considerados diferentes tipos de intervenção. Os jardins de chuva foram instalados em áreas verdes de uso público, com volume de mitigação estimado em 9.409 m^3 . As biovaletas, implantadas em áreas lineares com pouco acesso de pedestre, resultaram em 4.375 m^3 de mitigação. Os pavimentos permeáveis foram propostos em estacionamentos e calçadas da bacia, totalizando significativo volume de infiltração de 91.447 m^3 , enquanto os lagos do Parque Ibirapuera receberam proposta de alteamento das suas margens em 10 cm, possibilitando um volume adicional de armazenamento de 114.775 m^3 (25,12% de aumento na capacidade do lago Norte e 9,45% do lago Sul). A Tabela 4 apresenta os dados usados nos cálculos de cada estrutura.

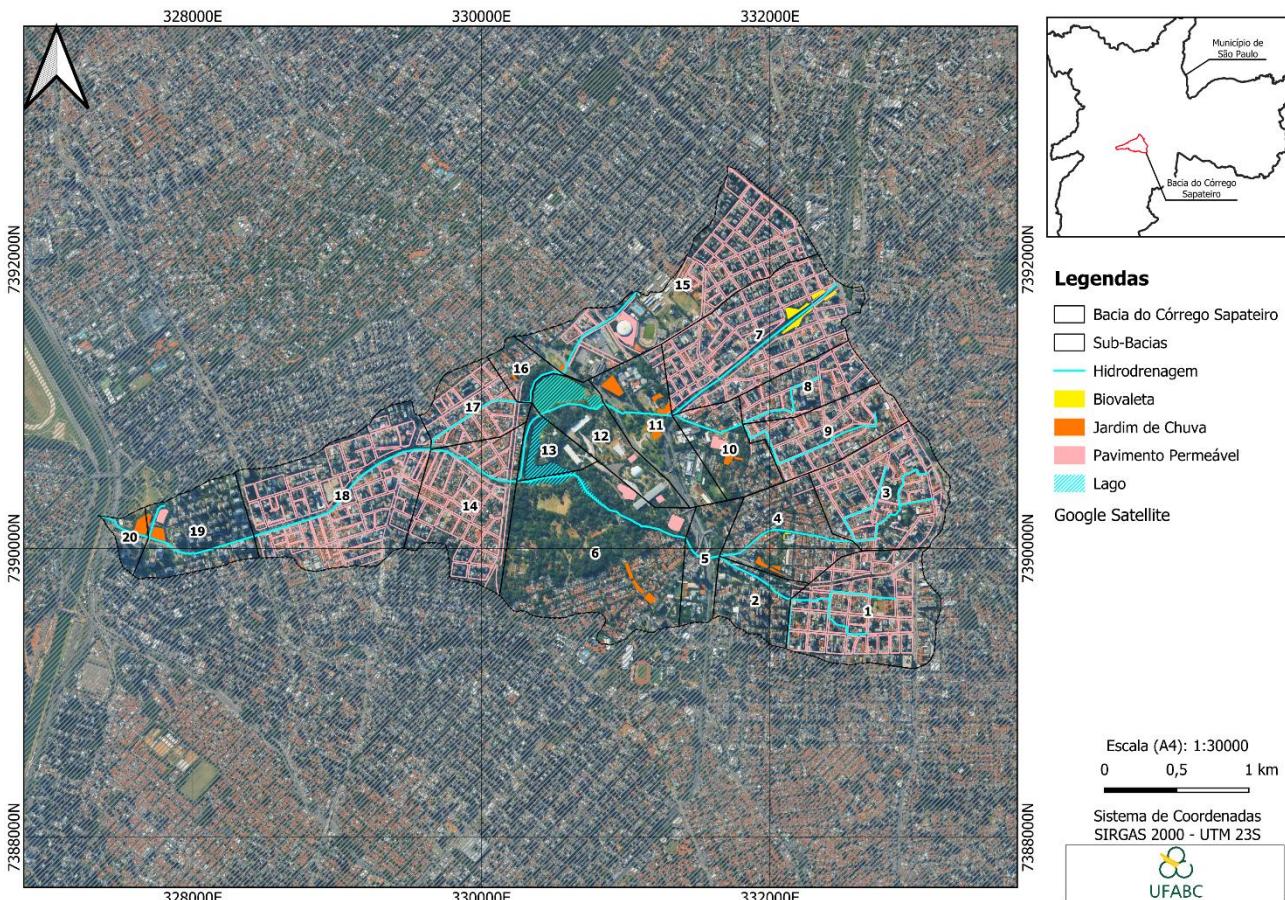
Tabela 4 – Valores para os cálculos das SbN

SbN	Profundidade (m)	Quantidade	Área (km^2)	Volume (m^3)
Biovaleta	0,50	7	0,029	4.375
Jardim de chuva	0,50	16	0,063	9.409
Pavimento Permeável	0,70	2.531	0,435	91.447
Lago	0,10	2*	0,136	114.775

*existentes

A localização das propostas na bacia está apresentada na Figura 3.

Figura 3 - Localização das SbN propostas



Os maiores volumes mitigados concentram-se na cabeceira, a jusante e na região central da bacia, devido à proposta dos pavimentos permeáveis e à presença dos lagos do Parque Ibirapuera. As sub-bacias com escassez de áreas disponíveis, como a 2 e 5, não receberam propostas de intervenções. Ainda assim, os volumes mitigados mostram boa distribuição espacial, destacando o potencial das SbN como sistema descentralizado no manejo de águas pluviais em bacias urbanas.

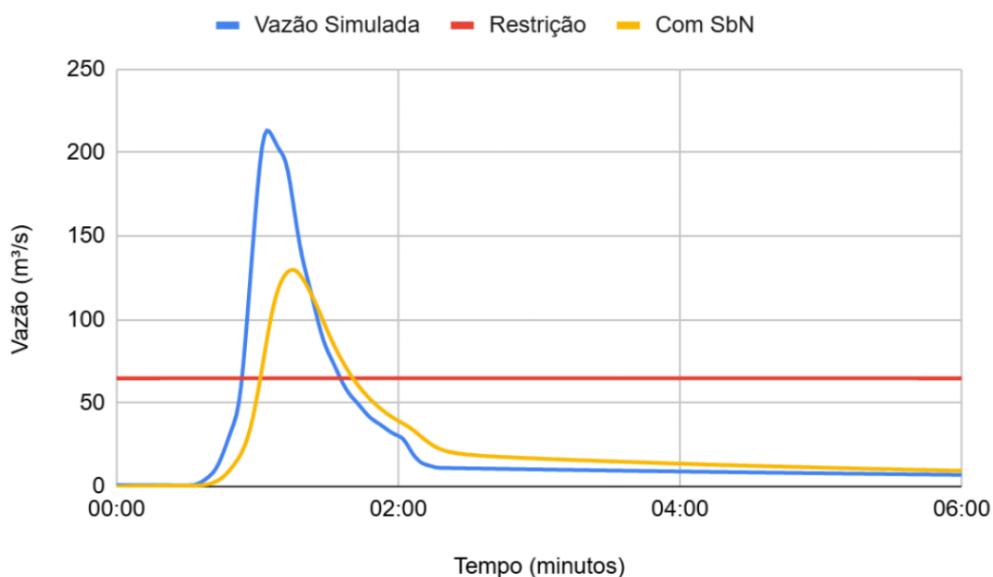
Para a simulação das SbN no HEC-HMS, os volumes de mitigação por sub-bacia foram somados e inseridos no software como um único reservatório. Os volumes calculados para cada estrutura foram muito similares aos obtidos através da inserção das curvas de cota, volume e vazão necessárias para a ferramenta Reservoir. Com isso, foi feita a simulação do comportamento da chuva na bacia com a retenção dos volumes nos reservatórios inseridos. A vazão de pico no exutório reduziu para 129,9 m³/s com as intervenções de SbN. A comparação com os TR simulados indica redução nas vazões máximas para todos os casos, embora o dimensionamento tenha sido feito visando apenas TR 25 anos. A tabela a seguir apresenta as vazões remanescentes na bacia e volumes amortecidos para cada TR.

Tabela 5 – Resultados de vazão e volume com as SbN propostas

TR (anos)	Vazão Excedente (m ³ /s)	Volume Mitigado (%)
10	31,5	90,4%
25	83,3	11,1%
100	163,4	-34,8%

O hidrograma de TR 25 está apresentado na Figura 4, onde é possível observar as curvas de vazão ao longo do tempo para o cenário sem as propostas SbN (linha de cor azul), com as propostas inseridas (linha de cor amarela) e a vazão de restrição, sendo a linha de cor vermelha.

Figura 4 - Hidrograma de TR 25



Assim, o volume calculado a ser mitigado na bacia para TR 25 foi de 195.249 m³ e foi alcançado volume simulado de retenção de 216.952 m³, o que representa 11,1% a mais do necessário, e quase 65% do volume de alagamento para chuvas extremas de TR 100 anos.

As propostas do Caderno de Drenagem, que priorizam soluções convencionais (estruturas cinzas), como pequenos reservatórios em praças ou ao longo dos córregos, foram comparadas com os resultados obtidos. Embora o Caderno trate também de zoneamento de áreas inundáveis, como propostas não estruturais, e contenha análises orçamentárias, o estudo mostrou que é possível atender às metas de TR 25 anos por meio de SbN, com potencial de melhoria se combinadas com soluções cinzas adicionais, como bacias de detenção e melhorias em redes de drenagem existentes, bem como outras SbN incorporadas, como canteiros de chuva, telhados verdes, parques lineares, entre outros.

CONCLUSÃO

As proposições de estruturas SbN mostraram-se eficientes através da simulação com modelagem hidrológica-hidráulica no HEC-HMS, confirmando, quantitativamente, a efetividade dessas soluções descentralizadas na redução das vazões de pico e do escoamento superficial em bacias de cidades urbanas. Diferente do Caderno de Drenagem, que propõe apenas estruturas cinzas convencionais com foco em TR 100 anos, este estudo destacou o potencial das SbN dimensionadas para TR 25 anos. Ainda assim, aponta-se que outras soluções, como telhados verdes e bacias de detenção, poderiam ser incorporadas para mitigar volumes maiores de precipitação. É possível avançar com o uso das SbN para conseguir volumes de amortecimento efetivos com capacidade de mitigar as cheias na bacia do Córrego Sapateiro e demais bacias urbanas.

REFERÊNCIAS

a) Livro

HERZOG, C.P.; ROZADO, C.A. (2019). *Diálogo setorial EU-Brasil sobre soluções baseadas na natureza: contribuição para um roteiro brasileiro de soluções baseadas na natureza para cidades resilientes*. Bélgica/ União Europeia, 136 p.

MARTINEZ JÚNIOR, F.; PITERI, R.F. (2016). *Precipitações intensas para São Paulo*. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos, Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE, Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos – CTH, 206 p.

PORTO, R.L.L.; TUCCI, C.E.M.; E BARROS, M.T.L. (1995). *Drenagem Urbana*. ABRH, ed. UFRGS, Porto Alegre - RS, 428 p.

SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA URBANA E OBRAS – SIURB (2022). *Caderno de bacia hidrográfica: bacia do córrego Sapateiro*. São Paulo - SP, 262 p.

TUCCI, C.E.M. (2005). *Modelos Hidrológicos*. UFRGS Porto Alegre - RS, 678 p.

b) Capítulo de livro

DEPIETRI, Y.; McPHEARSON, T. (2017). “*Integrating the grey, green, and blue in cities: nature-based solutions for climate change adaptation and risk reduction*”, in *Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas: Linkages between Science, Policy and Practice*. Org. por Kabisch, N. et al., Springer Open, pp 91 - 109.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (2002). “*Hydrologic modelling system – applications guide*” in *Hydrologic Engineering Center*. 106 p.

c) Artigo em revista

CAMPOS, V.N.O. (2021). “*Soluções baseadas na natureza (SbN) e drenagem urbana em cidades latino-americanas: desafios para implementar soluções fluidas em ambientes rígidos*”. Revista LABVERDE, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 73–94.

DEVECCHI, A. M.; CHRIMICI, A. C., SIMONETTI, C.; CORRÊA, T. B. (2020). “*Desenhando cidades com Soluções baseadas na Natureza*”. Parcerias Estratégicas - Edição Especial, Brasília - DF, v. 25, n. 50, p. 217-234.

GONÇALVES, M. J. S. (2019). “*Curvas integradas das médias acumuladas de precipitação e vazão (CIMApv) e sua interação com o tempo de retardo médio (TRM)*”. Salvador - BA.

OLIVEIRA, M.; GALLARDO, A. L. C. F.; RIBEIRO, A. P.; GARCIA, J. I. B. (2023). “*Nature-Based Solutions in integrated drainage and climate change mitigation projects in the city of São Paulo (Brazil)*”. Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 19, n. 1, 2023.

SHERMAN, LeRoy K. (1932). “*The relation of hydrographs of runoff to size and character of drainage-basins*”. Transactions, American Geophysical Union, v. 13, p. 332-339.