AVALIAÇÃO DE SbN PARA AMORTECIMENTO DE VAZÃO DE PICO EM TERRENO INCLINADO NA ÁREA URBANA DE ILHÉUS - BA

Matheus Silva de Azevêdo [1] & Andrea Sousa Fontes [2]

RESUMO – Com o aumento do número de desastres associados a água nas cidades devido a intensificação dos eventos de chuva pelas mudanças climáticas, e, também, a rápida expansão urbana ocupando áreas irregulares sem o devido acompanhamento e adaptação das infraestruturas de drenagem, as Soluções baseadas na Natureza (SbN) surgem como alternativas para compensar o impacto da urbanização e mitigar as consequências negativas. Assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar o desempenho de SbN com foco na redução da vazão de pico e área disponível para implantação (adequação espacial) em um terreno inclinado na área urbana de Ilhéus – BA. Foram realizadas simulações em código Python e com o SWMM em 4 níveis de ocupação de um lote de 1000 m² com declividade de 5% (plano) e 30% (inclinado) para Trincheira de Infiltração, Célula de Biorretenção e Microrreservatório, variando as respectivas áreas buscando-se atingir o valor da vazão de pico do terreno natural. Os resultados mostraram que o Microrreservatório foi a solução com melhor desempenho em eficiência no amortecimento da vazão de pico e da demanda de espaço em ambas as condições de declividade, seguido da Trincheira de Infiltração, com o segundo melhor desempenho. Já a Célula de Biorretenção conseguiu atingir o objetivo em três das quatro condições de ocupação, mas demandou maiores áreas em relação ao Microrreservatório e à Trincheira em todas as condições de declividade.

ABSTRACT– With the rising number of water-related urban disasters driven by climate-induced rainfall intensification—compounded by rapid urban expansion into unplanned areas lacking adequate drainage infrastructure adaptation—Nature-based Solutions (NbS) have emerged as alternatives to offset urbanization's impacts and mitigate negative consequences. This study aimed to

[1]) Afiliação: Mestrando Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente, Águas e Saneamento - MAASA/UFBA, R. Haroldo Caino 2 Z AP -203, Hab. Sussuarana, BL 02, Salvador, Bahia. Email: azevedo.m@ufba.br

[2]) Afiliação: Professora do Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente, Águas e Saneamento - MAASA/UFBA, Salvador, Bahia. Email: asfontes@ufba.br

evaluate the performance of NbS—specifically regarding peak flow reduction and required implementation area (spatial suitability)—on a sloped urban site in Ilhéus, Bahia. Simulations were conducted using Python and SWMM across four occupancy levels for a 1,000 m² lot with slopes of 5% (flat) and 30% (steep). Three solutions were tested—infiltration trenches, bioretention cells, and micro-reservoirs—with their respective surface areas varied to match the peak flow of the natural (undeveloped) terrain. Results indicated that the micro-reservoir performed best in terms of peak flow attenuation efficiency and space requirements under both slope conditions, followed by the infiltration trench. The bioretention cell met the target in three of the four occupancy scenarios but required a larger footprint than both the micro-reservoir and the infiltration trench across all slope conditions.

Palavras-Chave – Soluções baseadas na Natureza (SbN), Vazão de Pico, Controle na Fonte, Declividade

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são marcadas pela intensificação dos eventos hidrológicos, com a ocorrência de eventos extremos como secas prolongadas e chuvas acima da média, que afetam a vida de várias pessoas tanto em zonas urbanas como nas rurais (UNESCO, 2016). Nota-se que a quantidade de chuvas intensas que provocam danos as comunidades urbanas tem aumentado em todo o mundo e no Brasil, onde, no ano de 2025, conforme relatório anual do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) (2025), foram destacados 23 desastres associados a chuvas intensas no país.

A intensificação das chuvas, somada à expansão urbana acelerada, em que infraestrutura e gestão do planejamento não acompanham a ampliação das cidades, faz com que os sistemas de drenagem tenham sua capacidade excedida e encontrem dificuldade de adaptação devida à complexidade dos sistemas urbanos (Tucci, 2007; Zhou et al., 2019). Como forma de aumentar a resiliência das cidades frente a esses eventos, algumas alternativas envolvem a drenagem urbana com o uso de Soluções baseadas na Natureza (SbN) (Seyedashraf *et al.*, 2021). As SbN são alternativas voltadas à redução do volume e do pico de escoamento, aumentando a infiltração e a evapotranspiração e melhorando a qualidade da água com infraestrutura que se inspira nas condições naturais (Miguez *et al.*, 2015; Kõiv-Vainik *et al*., 2022; Palermo *et al.*, 2023).

Além disso, em cidades como Ilhéus-BA que apresentam relevo acidentado e pouca disponibilidade de áreas planas em seu centro urbano, as vazões de pico são elevadas devido a influência da declividade na velocidade de escoamento, ou seja, levando ao encurtamento da base do

hidrogramas e aumento em sua altura (Tucci, 2007; Seyedashraf *et al.*, 2021). Assim, é interessante verificar o impacto do aumento da declividade no escoamento do lote e como adequar as soluções de drenagem, colaborando para a redução dos picos de vazão que excedem a capacidade dos sistemas de drenagem.

Nesse sentido, esse trabalho buscou contribuir para os estudos das SbN em áreas urbanas, avaliando o desempenho hidrológico e a viabilidade espacial da utilização de SbN em terrenos inclinados com foco na manutenção do pico do escoamento no bairro de Conquista em Ilhéus - BA.

METODOLOGIA

Área de Estudo

A área de estudo compreende o bairro Conquista, localizado na cidade de Ilhéus, na região sul do estado da Bahia. O bairro caracteriza-se por sua topografia acidentada, com predominância de densa ocupação urbana em áreas de encosta. Essa combinação de alta impermeabilização com elevadas declividades contribui para problemas recorrentes de ineficiência do sistema de drenagem a jusante e suscetibilidade a deslizamento de terra devido ao rápido escoamento superficial (Figura 1).

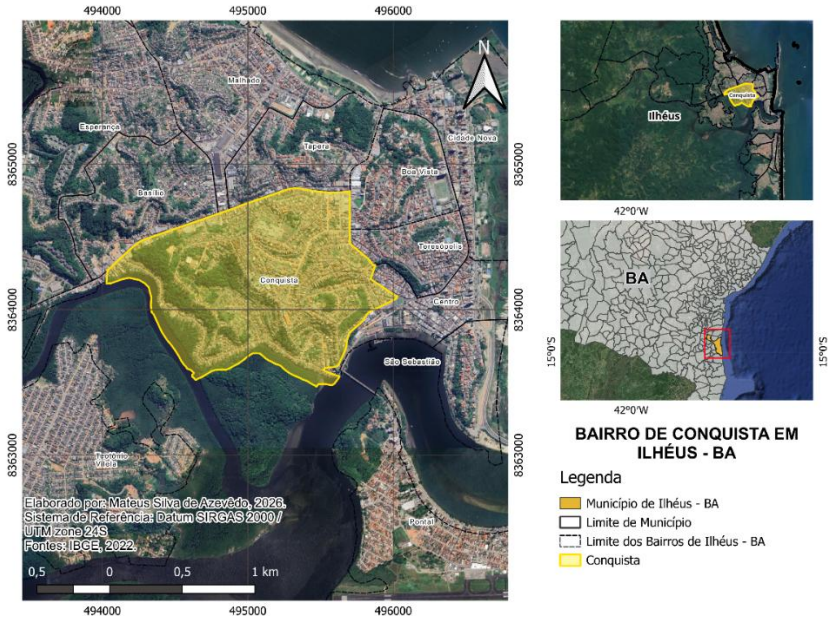


Figura 1 - Localização do Bairro de Conquista em Ilhéus - BA

Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos estão resumidos no fluxograma a seguir (Figura 2):

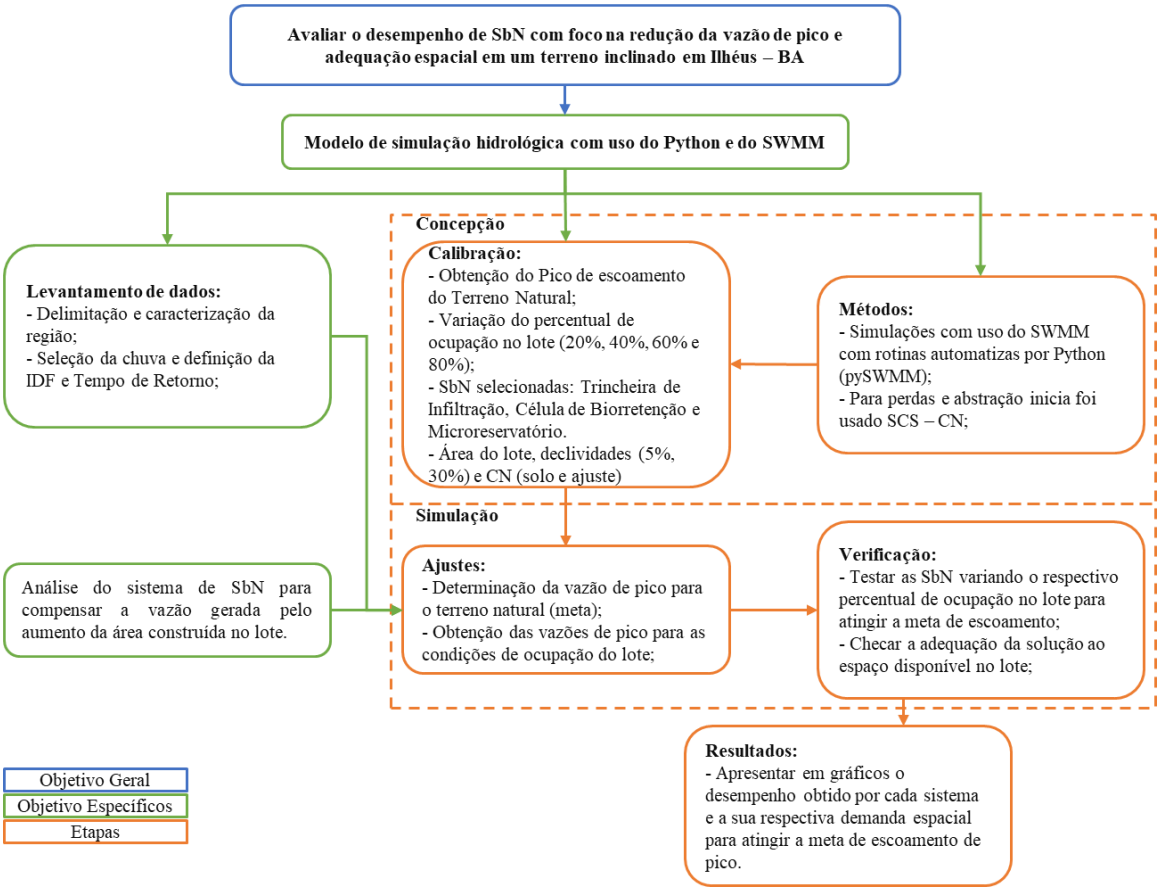


Figura 2 – Etapas metodológicas para realização da avaliação do desempenho das SbN

Levantamento de dados

Para a modelagem hidrológica em escala de lote, definiu-se um terreno de lados iguais (lote quadrado) de 1.000 m² (0,1 ha), de dimensões 31,62 m x 31,62 m. Com base na topografia predominante do bairro Conquista, foram verificadas as variações das declividades médias na região, extraídas com base nas elevações, que variaram entre 24% e 36%, adotou-se para o estudo do lote uma declividade de 30%.

Os dados pluviométricos utilizados foram da estação do Cemaden localizada no próprio bairro. A partir dos dados de chuva, que apresentaram apenas 6 anos com menos de 20% falhas para a elaboração do hietograma de projeto, foi obtida a Equação de Chuvas Intensas (IDF) elaborada com a ferramenta web GAM-IDF. Para o Tempo de Retorno (TR) foi utilizado o Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem do DNIT (2005), adotando-se o tempo de retorno de 10 anos (Figura 3).

Tempo [min]	Chuva [mm] - 10 anos
10	40,71
20	60,54
30	73,76
40	83,75
50	91,86
60	98,72
70	104,69
80	110,01
90	114,80
100	119,19
110	123,23
120	126,99
130	130,51
140	133,83

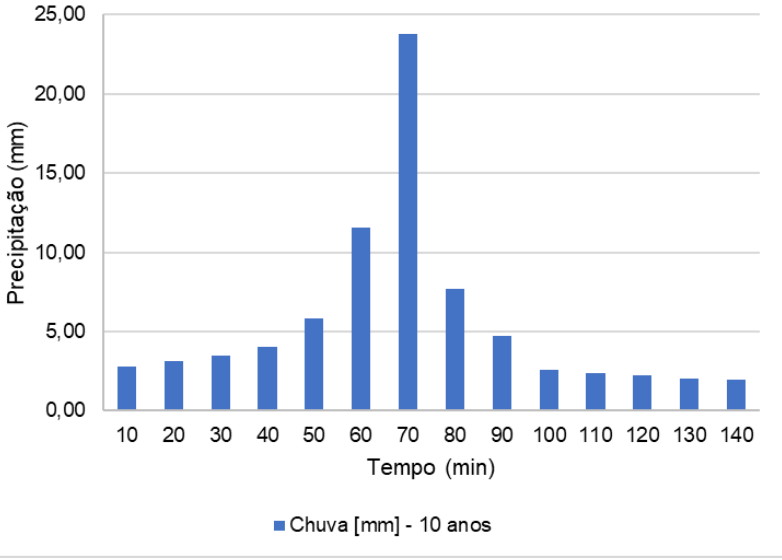


Figura 3 - Chuva resultante da IDF para TR de 10 anos e o Hietograma

Modelo e simulação

As simulações foram realizadas utilizando o motor de cálculo do Storm Water Management Model (EPA SWMM 5.2) (Rossman, 2012), operado de forma automatizada via linguagem de programação Python, por meio da biblioteca PySWMM. O método de perdas e abstração inicial escolhido para a transformação chuva-vazão foi o Curva-Número (CN) do Soil Conservation Service (SCS). Para representar o terreno no estado natural, adotou-se um CN base igual a 70 (Tucci, 2003) para o terreno plano (5% de declividade). Visando fazer a equivalência da infiltração para terrenos íngremes, o valor do CN foi ajustado matematicamente para a declividade de projeto (30%) utilizando a equação proposta por Sharpley e Williams (1990), que eleva o valor do CN em função do aumento da inclinação do solo.

Para avaliar o impacto da urbanização, foram modelados arranjos com taxa de ocupação da área construída de 20% a 80% da área do lote em intervalos de 20%, adotando-se CN 98 (Tucci, 1993), para as superfícies impermeáveis referentes à respectiva área construída. Em seguida, para mitigar o impacto do escoamento, três tipologias de SbN foram dimensionadas para receber as águas da área impermeável: Trincheira de Infiltração, Célula de Biorretenção e Microrreservatório.

O dimensionamento das SbNs baseou-se na equação da continuidade e nas restrições devido à geometria do lote. O código computacional foi programado para atuar como um otimizador geométrico: a área demandada pela SbN cresceu iterativamente em passos de 1% da área disponível do lote. Para garantir a viabilidade espacial, o modelo incluiu regras de readequação de geometria, em que estruturas cujos diâmetros ou comprimentos ultrapassassem os limites do terreno (31,62 m) eram automaticamente redesenhadas para assumirem formas de prismas retangulares junto ao lote.

Por fim, o algoritmo estabeleceu o ponto de parada para avaliação das SbN, onde a respectiva solução selecionada só seria "Aprovada" se o pico de vazão (L/s) produzido pelo lote fosse igual ou inferior ao registrado no modelo do terreno em sua condição natural. Caso não fosse possível mitigar a vazão de pico do terreno ocupado por essa condição, mesmo na condição do respectivo SbN ocupar toda a área não construída, a solução seria declarada como “Reprovada”.

O desenvolvimento do código computacional para a otimização geométrica das Soluções Baseadas na Natureza (SbN), bem como a geração de gráficos estatísticos, contou com o auxílio da ferramenta de Inteligência Artificial Generativa Gemini (Google). A ferramenta foi utilizada para a estruturação dos scripts em linguagem Python (bibliotecas PySWMM, Matplotlib e Seaborn) e para suporte na revisão e formatação textual desta metodologia, sendo todo o conteúdo final revisado e validado pelos autores desta pesquisa. A concepção do estudo, a definição da lógica matemática e a análise e discussão dos resultados foram realizadas exclusivamente pelos autores.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A avaliação do lote no estado inicial (terreno 100% natural, CN 70) nas condições de declividade de 5% e 30% resultou, respectivamente, nas vazões de pico de 30,32 l/s e 35,84 l/s para o TR de 10 anos. A simulação, a partir da impermeabilização progressiva de área construída no lote, sem a adoção de medidas compensatórias (SbN), resultou no aumento do escoamento superficial para 39,87 l/s para 20% de ocupação e alcançou 68,10 l/s com 80% de área construída no terreno com declividade 30%, ocorrendo para o terreno plano (declividade 5%) vazões que variaram de 44,26 l/s a 69,10 l/s, ou seja, valores menores devido ao efeito da declividade que eleva as vazões de pico.

No entanto, as SbN demonstraram uma ótima eficácia na redução da vazão de pico em ambas as situações de declividade do terreno (Figura 4 e Figura 5). Os três tipos analisados conseguiram mitigar os picos de vazão gerados para valores abaixo do limite tolerável (antes da ocupação) em ambas as condições de declividade (5% e 30%). Este resultado demonstra a importância de se pensar na microdrenagem no próprio lote ou na fonte geradora, especialmente em regiões com declividade, como encostas, pois funciona como amortecimento e proteção para a infraestrutura de micro e macrodrenagem a jusante. Ao compensar o escoamento produzido em uma área impermeável, que já é naturalmente mais elevado se comparado a um terreno plano nas mesmas condições, por meio do uso de SbN, também estaria colaborando indiretamente para a economia com infraestrutura de drenagem e melhoria na resiliência da cidade diante dos eventos de chuvas extremas (Tucci, 2003; Miguez *et al.*, 2015).

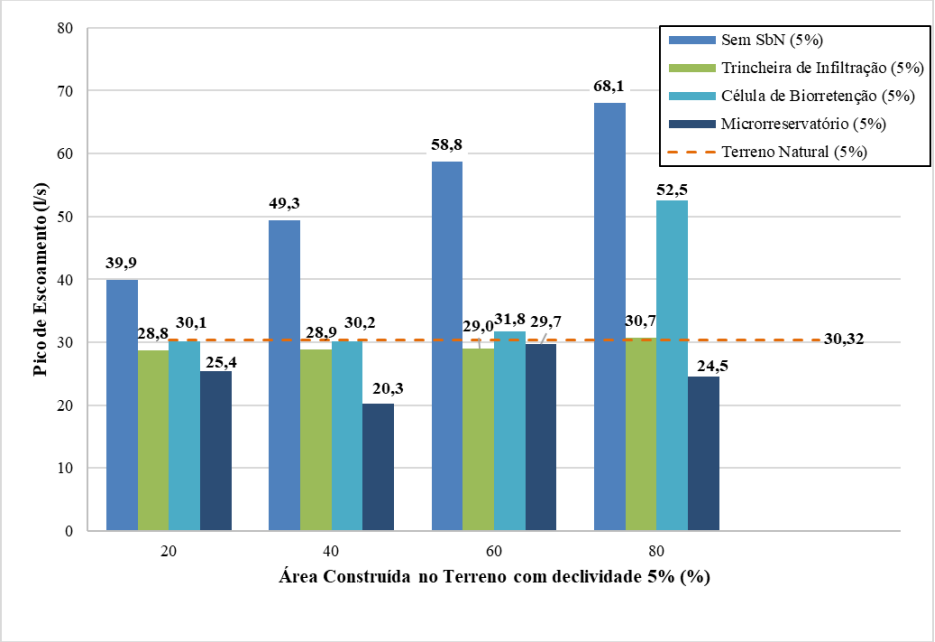


Figura 4 - Pico de Escoamento das SbN em relação à Área Construída no Terreno com declividade de 5%

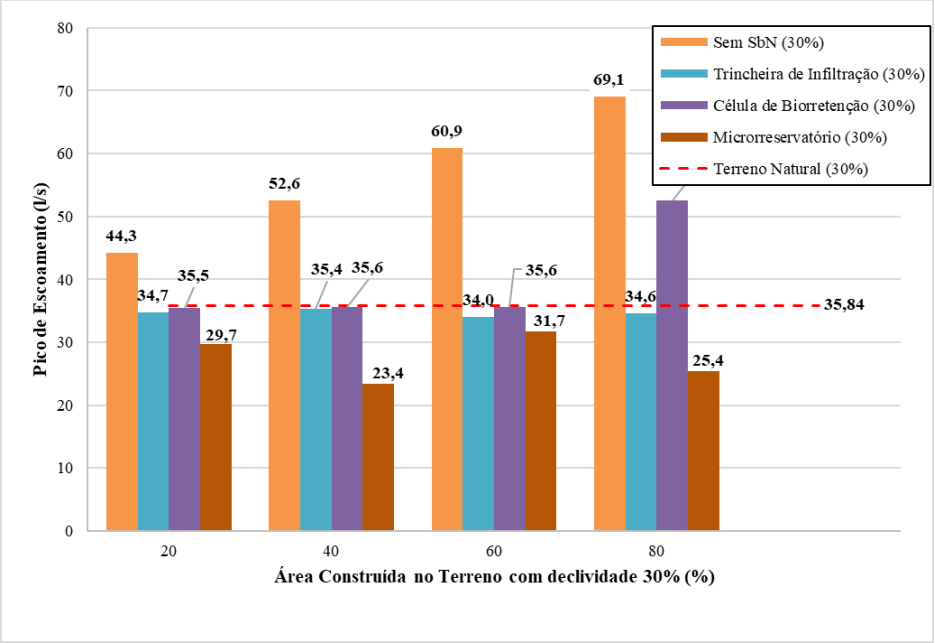


Figura 5 - Pico de Escoamento das SbN em relação à Área Construída no Terreno com declividade de 30%

Outro ponto, é que, praticamente todas as SbN conseguiram reduzir o pico de escoamento para um valor menor que o do terreno natural, com destaque para o Microrreservatio, que chegou mitigar a vazão de pico em 33%, resultando em um valor de 20,3 l/s para o terreno com declividade de 5% e 40% de ocupação, e, em 34,71%, resultando em um valor de 23,4 l/s, para o terreno com 30% de declividade com mesma ocupação. Esse resultado indica o potencial de seu uso para o controle do escoamento na própria fonte geradora tanto em terrenos planos quanto em lotes em declive.

Já em relação à demanda de espaço, o Microrreservatório apresentou a maior eficiência espacial em ambas as situações de declividade por se tratar de uma estrutura de retenção verticalizada. Demandou apenas 2% da área total do lote (30 m²) para mitigar o pico de escoamento em 33% na ocupação de 40%, e 3% (30 m²) no cenário crítico de 80% de ocupação, tanto para o terreno plano quanto para o terreno inclinado (Figura 6 e Figura 7).

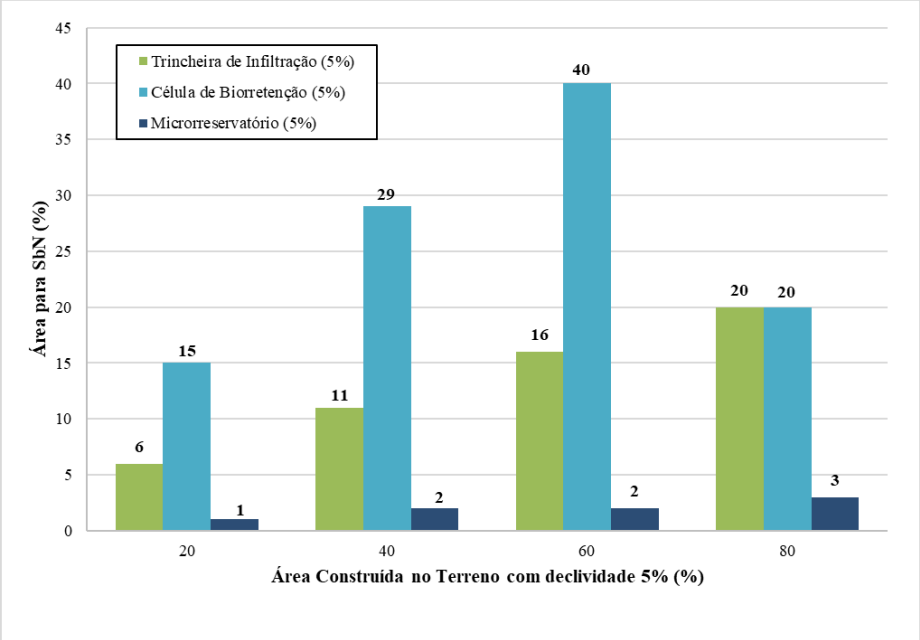


Figura 6 -Área para SbN em relação à Área Construída no Terreno com declividade 5%

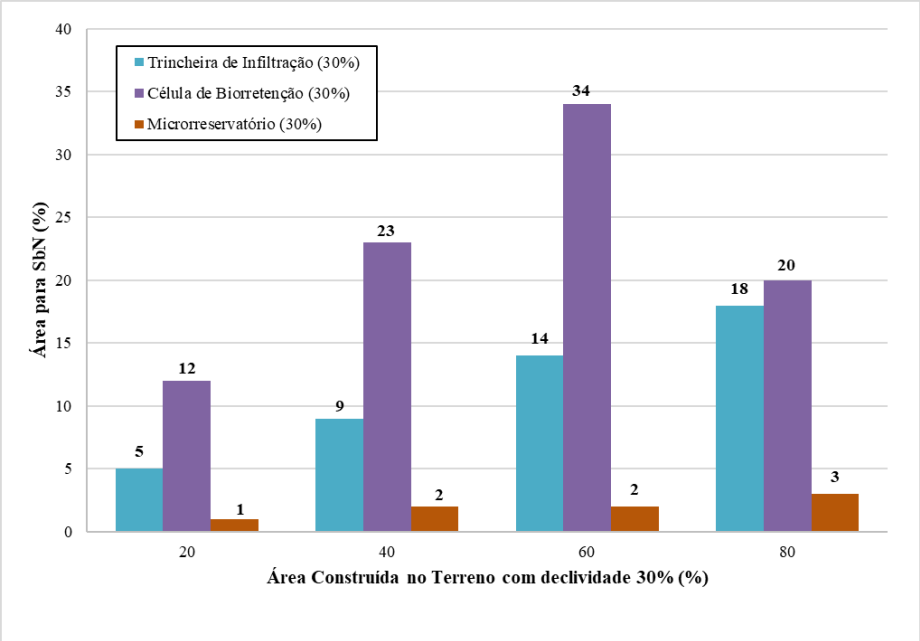


Figura 7 -Área para SbN em relação à Área Construída no Terreno com declividade 30%

Já a Célula de Biorretenção não conseguiu atingir o objetivo de reduzir a vazão de pico ao nível do terreno natural na condição de 80% de ocupação do terreno. A trincheira de infiltração conseguiu

atingir a meta de redução do pico de escoamento em ambas as condições de declividade em todas as condições de ocupação. Na condição de 80% de construção, por exemplo, a trincheira necessitaria de 20% (200 m²) para atingir a meta no terreno plano e 18% (180 m²) no terreno com declividade de 30%.

Assim, pensando-se nas soluções que demandariam menor espaço com o mesmo desempenho, nesse estudo de caso, o Microrreservatório mostrou-se como a solução mais eficiente para ambas as situações de declividade do terreno, seguido da Trincheira de Infiltração, que conseguiu atingir o objetivo dentro dos limites espaciais para os dois casos de declividade e por último a Célula de Biorretenção.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dessa forma, esse trabalho conseguiu demonstrar o desempenho entre três SbN para o amortecimento do pico de escoamento em um terro inclinado em Ilhéus – BA.

A solução que apresentou melhor desempenho em termos de redução do pico de escoamento e aproveitamento do espaço no lote foi o Microrreservatório, ocupando apenas 3% do terreno na situação de maior área construída e chegando aos maiores valores de redução do pico de escoamento para ambas as condições de declividade (5% e 30%). Em seguida, a Trincheira de Infiltração conseguiu reduzir o escoamento, utilizando até 100% da área disponível, na condição de maior ocupação para atingir a meta de redução de escoamento nas duas condições de declividade. A Célula de Biorretenção conseguiu atingir a meta de reduzir o escoamento ao nível do terreno pré-urbanizado apenas para as três primeiras condições de ocupação (20%, 40% e 60%). No entanto, foi a solução que demandou maior área para atingir o objetivo, chegando, na maior faixa de ocupação, a necessitar de 40% e 34% do terreno para compensar a área impermeável nas respectivas declividades de 5% e 30%.

Por fim, os resultados evidenciaram que é possível fazer o uso de SbN para manutenção do escoamento gerado em lotes inclinados, sendo tão eficiente quanto em terrenos planos. Ainda assim, é importante para trabalhos futuros buscar avaliar outras SbN e outras condições de área, solo e os custos para cada solução. Trabalhos nesse sentido podem contribuir para a melhoria e a tomada de decisão quanto ao uso de soluções de drenagem urbana, principalmente para as SbN.

AGRADECIMENTOS Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) o fomento que viabilizou o desenvolvimento deste trabalho, no âmbito do projeto

aprovado pelo PEPEEC - Programa Emergencial de Prevenção e Enfrentamento de Desastres Relacionados a Emergências Climáticas, eventos extremos, acidentes ambientais.

REFERÊNCIAS

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). *Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem*. Rio de Janeiro: IPR, 2005

KÕIV-VAINIK, Margit *et al*. (2022). *Urban stormwater retention capacity of nature-based solutions at different climatic conditions*. Nature-Based Solutions, v. 2, art. 100038, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100038.

MIGUEZ, Marcelo Gomes; VERÓL, Aline Pires; REZENDE, Osvaldo de Moura. (2015). *Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade*. Rio de Janeiro: Elsevier.

PALERMO, S. A. *et al*. (2023). *Nature-based solutions for urban stormwater management: an overview*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 1196, art. 012027, p. 1-6, 2023. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1196/1/012027.

ROSSMAN, L. A. EPA SWMM 5.0: *Modelo De Gestão De Drenagem Urbana: Manual Do Usuário*. Tradução de Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS); coordenação de Heber Pimentel Gomes. João Pessoa: UFPB, 2012.

SEYEDASHRAF, Omid; BOTTACIN-BUSOLIN, Andrea; HAROU, Julien J. (2021). *Many-Objective Optimization of Sustainable Drainage Systems in Urban Areas with Different Surface Slopes. Water Resources Management*, v. 35, n. 8, p. 2449–2464.

SHARPLEY, A.; WILLIAMS, J. (1990). *Epic—Erosion/Productivity Impact Calculator: I. Model Documentation. II: User Manual; Technical Bulletin, No*. 1768 1990; United State Department of Agriculture: Washington, DC, USA.

TUCCI, Carlos E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1993. 943 p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 4). ISBN 8570252986

TUCCI, Carlos E. M. *Inundações urbanas*. Porto Alegre: ABRH, 2007.

TUCCI, Carlos E. M.; BERTONI, Juan Carlos (org.). *Inundações urbanas na América do Sul*. Porto Alegre: ABRH, 2003.

UNESCO. (2016). *Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2016: Água e Emprego*. Paris: UNESCO, 2016.

ZHOU, Qianqian *et al*. (2019). *Comparison of urbanization and climate change impacts on urban flood volumes: Importance of urban planning and drainage adaptation*. Science of The Total Environment, v. 658, p. 24–33.