ISSN 23591919 (Online)
ARTIGO CIENTÍFICO

Soluções baseadas na Natureza (SbN) para a drenagem urbana brasileira: estudo de caso da aplicabilidade de dispositivos SbN no enfrentamento integrado aos eventos hídricos extremos

Nature based Solutions (NbS) for Brazilian urban drainage: case study of the applicability of NbS devices in the integrated response to extreme water events

Gabriela Borba Silveira[1], Lucia Helena Ribeiro Rodrigues[1], Fernando Dornelles[1]

[1]Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.
E-mails: gabriela.borba.ec@gmail.com, luciarrodrigues@gmail.com, fernando.dornelles@ufrgs.br

Como citar: Silveira, G. B., Rodrigues, L. H. R., & Dornelles, F. (2026). Soluções baseadas na Natureza (SbN) para a drenagem urbana brasileira: estudo de caso da aplicabilidade de dispositivos SbN no enfrentamento integrado aos eventos hídricos extremos. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, *23*, e09. https://doi.org/10.21168/rega.v23e09

RESUMO: Os eventos hidrológicos extremos representam grandes desafios à gestão urbana. O município de Estrela/RS (Brasil) apresenta episódios recorrentes devido a grandes acumulados de chuva e sua proximidade ao rio Taquari. Nesse contexto, as Soluções baseadas na Natureza (SbN) surgem como alternativas complementares à infraestrutura cinza de drenagem pluvial. Este estudo avaliou a aplicabilidade das SbN na zona urbana de Estrela, considerando o atendimento a requisitos técnicos para implantação. O método aplicado adotou a delimitação da mancha de inundação do rio Taquari com tempo de retorno de 25 anos, via modelo HAND, associada a critérios topográficos, pedológicos e hidrológicos. A análise por geoprocessamento permitiu identificar áreas aptas para implementação de diferentes tipologias de SbN. Os resultados indicam que cerca de 30% da área urbana do município é suscetível a inundações. Em contrapartida, 15% do território, fora da mancha de inundação, mostrou-se apto à implantação dos dispositivos. As SbN revelaram potencial de integrar-se à infraestrutura tradicional. O mapeamento elaborado configura-se como ferramenta replicável. Conclui-se que a incorporação das SbN ao planejamento urbano de Estrela contribui para reduzir vulnerabilidades com práticas sustentáveis frente aos eventos hidrológicos extremos.

Palavras-chave: Manejo de águas pluviais; Inundações; Enchentes; Resiliência urbana; Mapeamento; Sustentabilidade.

ABSTRACT: Extreme hydrological events pose major challenges for urban management. The municipality of Estrela/RS (Brazil) experiences recurring episodes due to heavy rainfall and its proximity to the Taquari River. In this context, Nature-based Solutions (NbS) emerge as complementary alternatives to gray stormwater drainage infrastructure. This study evaluated the applicability of NbS in the urban area of Estrela, considering compliance with technical requirements for implementation. The method applied adopted the delimitation of the Taquari River floodplain with a 25-year return period, using the HAND model, associated with topographic, pedological, and hydrological criteria. Geoprocessing analysis identified areas suitable for implementing different types of NbS. The results indicate that about 30% of the municipality's urban area is susceptible to flooding. In contrast, 15% of the territory, outside the floodplain, proved suitable for implementing the devices. The NbS revealed potential for integration with traditional infrastructure. The mapping developed is a replicable tool. It is concluded that the incorporation of NbS into the urban planning of Estrela contributes to reducing vulnerabilities with sustainable practices in the face of extreme hydrological events.

Keywords: Stormwater management; Floods; Flash floods; Urban resilience; Mapping; Sustainability.

Recebido: Outubro 23, 2025. Revisado: Janeiro 29, 2026. Aceito: Março 19, 2026.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

INTRODUÇÃO

Os alagamentos, enxurradas e inundações representam um dos desastres naturais mais recorrentes e destrutivos em todo o mundo, causando prejuízos significativos em termos de vidas perdidas, danos materiais e consequentes impactos socioeconômicos (Aerts, 2018; Agarwal & Bharat, 2023; Pacetti et al., 2022).

Esses fenômenos hidrológicos estão diretamente ligados à dinâmica da água na superfície terrestre, desde sua movimentação natural no ciclo hidrológico até os eventos extremos que impactam ecossistemas e sociedades. A compreensão desses processos é essencial para o manejo sustentável dos recursos hídricos e a mitigação dos riscos associados a enchentes, inundações, enxurradas e alagamentos.

O balanço hídrico representa a relação entre a entrada e a saída de água em uma determinada região, sendo uma ferramenta essencial para avaliar a disponibilidade hídrica e planejar seu uso sustentável (Collischonn & Dornelles, 2017). Fatores como precipitação, evapotranspiração e escoamento são determinantes nesse processo. Alterações no uso do solo, principalmente devido à urbanização, impactam significativamente esse balanço, pois a impermeabilização do solo reduz a infiltração e intensifica o escoamento superficial, aumentando o risco de eventos hídricos extremos (Hu et al., 2020; Huang et al., 2024; Tucci, 2001).

No trabalho de Barbino et al. (2024), os eventos extremos são identificados com base em desvios significativos dos padrões climáticos médios, sendo a precipitação a principal variável de referência. Esses eventos, no entanto, não são explicados apenas por fatores naturais. Eles apresentam dois lados interdependentes: o natural e o antrópico. Os autores explicam que o lado natural diz respeito às variações climáticas e hidrológicas que ocorrem como parte do funcionamento dos ecossistemas. Já o lado antrópico se refere às ações humanas que intensificam esses fenômenos, como o desmatamento, a urbanização, a impermeabilização do solo e a ocupação de áreas de risco. Essas intervenções alteram o ciclo hidrológico natural, diminuem a capacidade de infiltração do solo, aumentam o escoamento superficial e reduzem os serviços ecossistêmicos prestados pelas áreas naturais, como a regulação das vazões e a consequente proteção contra eventos extremos.

Dessa forma, conforme apontado por Fritzen & Binda (2011), os eventos hídricos extremos, como as enxurradas, os alagamentos e as inundações, ocorrem quando há uma alteração significativa no escoamento da água, resultante da interação entre processos naturais e modificações antrópicas.

As enchentes, ou cheias, são fenômenos naturais caracterizados pela elevação do nível de água (NA), devido ao aumento da vazão, sem que ocorra transbordamento do leito do corpo d'água para as áreas adjacentes (Sousa & Rocha, 2022). As inundações, por sua vez, acontecem quando o volume de água em um corpo d'água ultrapassa sua capacidade, transbordando e impactando áreas ribeirinhas, sendo então um desastre de origem hídrica (Ghosh et al., 2024; Tucci, 2001). Já as enxurradas ou inundações bruscas são escoamentos superficiais intensos e concentrados, com alta energia de transporte (Kuksina & Golosov, 2020; Brasil, 2013). Por fim, os alagamentos ocorrem principalmente em áreas urbanizadas, quando o acúmulo de água em vias e terrenos supera a capacidade da drenagem da infraestrutura local (Alves et al., 2024; Tucci, 2007). A Figura 1 representa tais fenômenos de maneira simplificada.

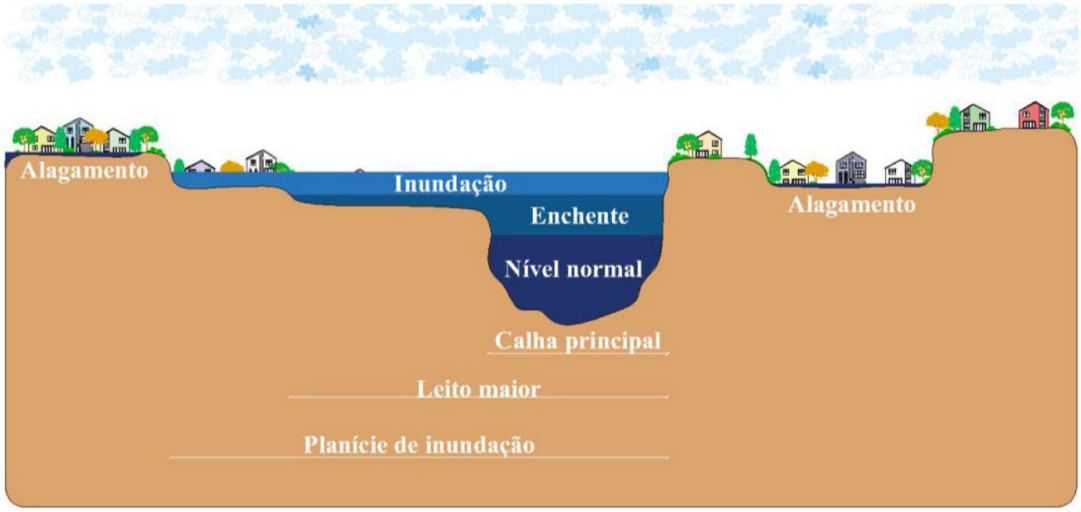


Figura 1. Ilustração das denominações enchente, inundação e alagamento.
Fonte: os autores, com base em Eckhardt (2008) e Tucci (2001).

No contexto brasileiro, o rio Taquari, que limita a oeste o município de Estrela, no estado do Rio Grande do Sul (RS/Brasil), tem se destacado como uma região propensa a desastres hídricos, afetando diretamente a população urbana que vive em suas proximidades (Bombassaro & Robaina, 2010).

Estes desastres, de acordo com Collischonn & Dornelles (2017), Hu et al. (2020), Huang et al. (2024) e Tucci (2007), têm a urbanização como um fator crítico: a impermeabilização do solo altera a dinâmica hídrica natural, favorecendo o aumento da vazão superficial e reduzindo a capacidade de infiltração, conforme demonstrado na Figura 2, resultando em corpos d'água urbanos com volumes de água maiores em menor tempo, e consequentemente elevando a frequência e a intensidade das inundações e alagamentos. Além disso, o crescimento dos centros urbanos favorece a ocupação de áreas impróprias, como planícies de inundação e faixas de passagem de cheia, aumentando os riscos para a população e os prejuízos decorrentes desses eventos (Mandarino et al., 2023; Melisa et al., 2020; Tiepolo & Galligari, 2021; Tucci, 2001).

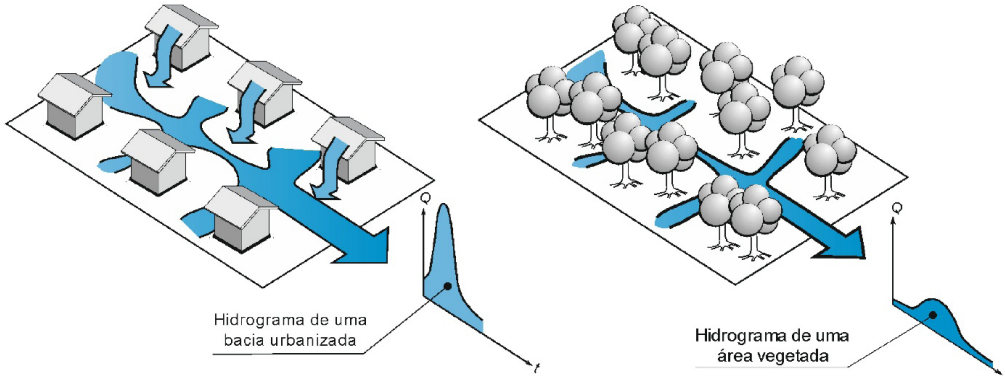


Figura 2. Efeito da transformação de uma bacia rural em urbana sobre o volume e o tempo de resposta dos hidrogramas.
Fonte: Collischonn & Dornelles (2017).

A interação complexa entre fatores meteorológicos (grandes acumulados de chuva), geomorfológicos (vales encaixados de ligeira declividade) e antrópicos (planícies de inundação densamente ocupadas), torna a região do rio Taquari particularmente suscetível a inundações e enxurradas, o que exige uma análise abrangente e multidisciplinar para proposição de medidas de mitigação adequadas (Oliveira et al., 2018).

A efetividade das soluções de drenagem urbana está condicionada a um conjunto de fatores inter-relacionados (Pappalardo & La Rosa, 2020; Romano & Akhmouch, 2019; Tucci, 2001). Entre eles, destacam-se: a formulação de políticas públicas específicas para o setor, com definição clara de metas e dos instrumentos necessários à sua implementação; a integração entre as políticas de drenagem urbana e de uso e ocupação do solo, sobretudo no que se refere ao controle da ocupação em áreas sujeitas a inundações e alagamentos; o planejamento de ações abrangendo toda a bacia hidrográfica inserida no contexto urbano; a existência de instituições com capacidade técnica e administrativa de gerenciamento; e a promoção de campanhas educativas e informativas voltadas à sensibilização e ao engajamento da população a respeito dessas medidas de controle.

SBN APLICADAS AO MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS

As Soluções baseadas na Natureza (SbN) se destacam neste contexto pela sua ampla gama de benefícios para além da função hidrológica (Adesoji & Pearce, 2024; Baptista et al., 2016; Sørup et al., 2019): minimização dos efeitos adversos da urbanização sobre os serviços ecossistêmicos, já que as SbN protegem e recuperam áreas verdes, essenciais para a regulação do clima, para a purificação da água e para a preservação da biodiversidade; aumento da resiliência urbana; e melhoria da qualidade de vida dos habitantes, pois também criam espaços que promovem uma maior integração com a natureza e oportunidades de lazer.

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2025) aprovou recentemente a Norma de Referência nº 12/2025, que estabelece diretrizes para a organização dos serviços públicos de drenagem e manejo das águas pluviais urbanas. Esta normativa reconhece, incorpora e prevê a observância prioritária na concepção dos sistemas e projetos de drenagem urbana de diversas estruturas e conceitos relacionados às SbN, também definindo-as como ações voltadas à proteção, conservação, restauração,

uso sustentável e gestão de ecossistemas. Essas ações visam enfrentar desafios sociais, econômicos e ambientais de forma eficaz e adaptativa, promovendo simultaneamente o bem-estar humano, os serviços ecossistêmicos, a resiliência e a biodiversidade.

Essas soluções englobam uma ampla gama de medidas, tanto estruturais quanto não estruturais (Cohen-Shacham et al., 2016). A partir das informações apresentadas nos trabalhos de Silveira et al. (2025a, 2025b), foi possível elaborar a Figura 3, na qual são identificadas as principais tipologias de SbN aplicáveis à drenagem urbana, bem como os dispositivos associados a cada uma delas.

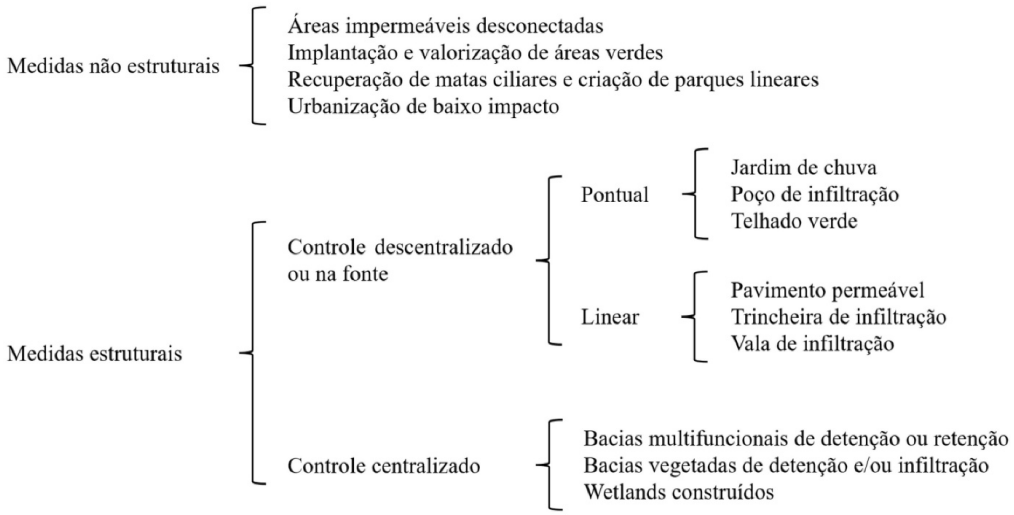


Figura 3. Organograma da tipologia de SbN para o manejo de águas pluviais urbanas e seus dispositivos.

Ultimamente, observa-se um crescimento expressivo no interesse e na adoção das SbN. Essa abordagem tem se integrado de forma progressiva a diferentes políticas públicas e instrumentos de planejamento, abrangendo setores variados como gestão de recursos hídricos, agricultura, conservação da biodiversidade, meio ambiente, prevenção de desastres, urbanismo e enfrentamento das mudanças climáticas (Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura, 2018).

A eficácia e eficiência dessas medidas dependem de diversos fatores, além das condições locais (Blagojević et al., 2023; Meshram et al., 2021; Su et al., 2023). Por isso, compreender esses aspectos é essencial para uma implementação bem-sucedida. Entre os desafios enfrentados na implementação das SbN, destacam-se as barreiras socioinstitucionais e os obstáculos políticos e de conhecimento, sendo que as SbN ainda ocupam um espaço marginal dentro das estruturas políticas, legais, institucionais e sociais (Castro, 2022; Neumann & Hack, 2019; Sarabi et al., 2020; Zuniga-Teran et al., 2020).

Outro ponto a ser dito é que a implantação bem-sucedida de um dispositivo estrutural SbN depende de múltiplos fatores (Meshram et al., 2021; Su et al., 2023). Por isso, ao projetá-las, é essencial que elas sejam ajustadas às particularidades locais, levando em conta fatores como a disponibilidade de área, as exigências particulares de cada dispositivo e as condições climáticas da região (Monteiro et al., 2023).

A definição das áreas de implantação é um fator crucial para o bom desempenho das intervenções (Allende-Prieto et al., 2024; Pacetti et al., 2022). Diversos estudos têm proposto metodologias para a identificação de áreas adequadas à implantação de SbN voltadas à gestão de águas pluviais urbanas. Parte desses trabalhos baseia-se em análises geoespaciais e no uso de índices topográficos, dados de sensoriamento remoto e indicadores físico-ambientais para identificar locais prioritários em ambientes urbanos (Allende-Prieto et al., 2024; Kuller et al., 2019; Martin-Mikle et al., 2015). Outros estudos incorporam abordagens multicritério e avaliações integradas de benefícios hidrológicos, hidráulicos, econômicos, sociais e ambientais, visando apoiar o planejamento urbano e a tomada de decisão (Baldwin et al., 2022; Caloir et al., 2023; Kaykhosravi et al., 2019).

Pesquisas como as de Allende-Prieto et al. (2024) e Pacetti et al. (2022) destacam que a escolha do local deve estar alinhada ao tipo de SbN adotado e ao objetivo da intervenção. Com base nisso, Adesoji & Pearce (2024) e Pacetti et al. (2022) indicaram os locais mais adequados para a instalação de diferentes tipos de dispositivos SbN, conforme relatado na Tabela 1.

Tabela 1. Dispositivos SbN e seus locais mais adequados para a instalação

Dispositivos	Locais mais adequados para a instalação
Bacias e lagoas de detenção e retenção	Estacionamentos, parques e comunidades
Biorretenção e jardim de chuva	Estradas, estacionamentos, propriedades (públicas ou privadas), parques, praças e áreas de passeio para pedestres e ciclistas
Biovaletas	Estradas, estacionamentos e propriedades (públicas ou privadas)
Parques	Comunidades
Pavimento permeável	Estacionamentos, praças, parques e áreas de passeio para pedestres e ciclistas
Telhado verde	Propriedades (públicas ou privadas)
Trincheiras de infiltração	Parques e locais de tráfego
Valas vegetadas	Locais de tráfego, estacionamentos e propriedades (públicas ou privadas)
Wetlands	Parques e comunidades

Fonte: os autores, com base em Adesoji & Pearce (2024) e Pacetti et al. (2022).

Tabela 2. Requisitos e seus valores recomendados para cada dispositivo SbN

<table>
<tr><th rowspan="2">Dispositivo</th><th colspan="3">Topografia e Pedologia</th><th rowspan="2">Carga de Sedimentos</th></tr>
<tr><th>Permeabilidade do solo</th><th>Declividade do terreno</th><th>Tipo de solo - Classificação NRCS-USDA</th></tr>
<tr><td>Bacia de Retenção</td><td>< 3.6 mm/h</td><td rowspan="8">0 - 5%</td><td>Tipo C e D</td><td rowspan="2">Baixa (< 0,1 kg/m³), Moderada (0,1 a 0,5 kg/m³) Alta (> 0,5 kg/m³)</td></tr>
<tr><td>Bacia de Infiltração</td><td rowspan="6">> 3.6 mm/h</td><td rowspan="3">Tipo A e B</td></tr>
<tr><td>Vala de Infiltração</td><td rowspan="3">Baixa (< 0,1 kg/m³)</td></tr>
<tr><td>Trincheira de Infiltração</td></tr>
<tr><td>Jardim de Chuva</td><td>Tipo A, B e C</td></tr>
<tr><td>Poço de Infiltração</td><td rowspan="2">Tipo A e B</td></tr>
<tr><td>Pavimentos Permeáveis</td></tr>
<tr><td>Telhado Verde</td><td colspan="4">Não aplicável</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Dispositivo</td><td colspan="4">Hidrologia</td></tr>
<tr><td colspan="2">Controle de vazão</td><td>Proximidade do lençol freático</td><td>Área de contribuição</td></tr>
<tr><td>Bacia de Retenção</td><td colspan="2" rowspan="2">< TR 100 anos</td><td>< 1m</td><td rowspan="2">1000 até > 5000 m²</td></tr>
<tr><td>Bacia de Infiltração</td><td rowspan="6">> 1m</td></tr>
<tr><td>Vala de Infiltração</td><td colspan="2" rowspan="3">TR 2 - 5 anos</td><td>500 a 5000 m²</td></tr>
<tr><td>Trincheira de Infiltração</td><td rowspan="2">Até 1000 m²</td></tr>
<tr><td>Jardim de Chuva</td></tr>
<tr><td>Poço de Infiltração</td><td colspan="2" rowspan="3">< TR 10 anos</td><td rowspan="2">Até 500 m²</td></tr>
<tr><td>Pavimentos Permeáveis</td></tr>
<tr><td>Telhado Verde</td><td>Não aplicável</td><td>Até 1000 m²</td></tr>
</table>

Fonte: adaptado de Patussi (2025).

Além disso, o estudo desenvolvido por Patussi (2025) contribui significativamente para o aprofundamento da compreensão sobre as especificidades envolvidas na aplicação de SbN para a drenagem urbana. A autora chama a atenção para uma série de fatores específicos e particulares que variam conforme o tipo de dispositivo adotado, os quais influenciam diretamente na efetividade e viabilidade técnica. Esses fatores funcionam como diretrizes no processo de planejamento e seleção das SbN, permitindo decisões mais alinhadas às condições locais e aos objetivos pretendidos. A Tabela 2 organiza e apresenta esses elementos, oferecendo uma visão mais clara das variáveis envolvidas em cada caso.

O parâmetro de permeabilidade do solo refere-se à capacidade intrínseca que um solo possui de permitir o escoamento da água através de seus poros, ou seja, em termos práticos, trata-se da maior ou menor facilidade com que a água se infiltra e se movimenta no interior do solo (Caputo & Caputo, 2022).

De acordo com Genovez et al. (2005), o critério relacionado ao tipo de solo refere-se à sua classificação hidrológica, a qual considera o comportamento do solo em termos de geração de escoamento superficial e suscetibilidade à erosão, com base em suas propriedades físicas e hidrológicas intrínsecas. Essa classificação é estabelecida independentemente das condições de cobertura do solo ou da declividade do terreno.

Com base nesse critério, o Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (*Natural Resources Conservation Service* - NRCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (*United States Department of Agriculture* - USDA) categorizou os solos em quatro grupos, cada um associado a diferentes níveis de permeabilidade, sendo: grupo A para taxa mínima de infiltração maior que 7,62 mm/h; grupo B para taxa mínima de infiltração entre 3,81 mm/h e 7,62 mm/h; grupo C para taxa mínima de infiltração entre 1,27 mm/h e 3,81 mm/h; e grupo D para taxa mínima menor que 1,27 mm/h (Genovez et al., 2005).

No contexto brasileiro, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) desenvolveu o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), que organiza os solos nacionais (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2018). Além disso, o sistema estabelece correlações entre os grupos pedológicos brasileiros e a classificação hidrológica adotada pelo modelo norte-americano do NRCS-USDA. Com base nessa correspondência, Genovez et al. (2005) reuniram e sistematizaram essas informações, propondo uma adaptação do modelo hidrológico norte-americano à realidade brasileira. Nesse esforço, os 13 principais grupos de solos identificados no território nacional foram associados às classes hidrológicas estabelecidas pelo NRCS-USDA.

Já a declividade corresponde à inclinação do terreno em relação à horizontal, expressa por meio de uma medida angular ou percentual. Esse parâmetro é fundamental para a caracterização morfológica do relevo e influencia diretamente processos hidrológicos, de escoamento superficial, de infiltração, de erosão e de uso e ocupação do solo. Conforme a classificação proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2018), os terrenos podem ser agrupados em diferentes categorias, de acordo com o intervalo de declividade observado: plano (inferior a 3%), suave ondulado (entre 3% e 8%), ondulado (entre 8% e 20%), fortemente ondulado (entre 20% e 45%), montanhoso (entre 45% e 75%) e escarpado (entre 75% e 100%).

Ademais, segundo a *United States Environmental Protection Agency* (EPA - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) (United States Environmental Protection Agency, 2025), o requisito "carga de sedimentos" se define pela quantidade de material particulado sólido transportado pela água ao longo de um curso d'água ou de um escoamento.

Ainda, no contexto do dimensionamento hidráulico de dispositivos de drenagem, o controle da vazão e a área contribuinte configuram-se como aspectos fundamentais. A vazão de projeto está associada à capacidade do sistema em suportar a intensidade de um evento hidrológico com determinada probabilidade de ocorrência, ou seja, considera-se o risco associado à recorrência da chuva. Já a área contribuinte refere-se à superfície que direciona o escoamento superficial para o dispositivo, sendo, portanto, um parâmetro diretamente relacionado à vazão máxima e ao volume de contribuição durante um evento chuvoso.

Segundo Feitosa et al. (2008), a profundidade do lençol freático refere-se à distância vertical entre a superfície do solo e o nível freático propriamente dito, localizado abaixo da zona não saturada. Essa zona é caracterizada pela presença de vazios no solo parcialmente preenchidos por ar e água, o que permite a movimentação vertical da umidade. O nível freático marca o início da zona saturada, onde todos os poros do solo estão ocupados por água.

Contudo, como dispositivos para sistemas de drenagem urbana, as SbN tratam-se de técnicas pontuais, não atuando significativamente em grandes volumes de água e velocidades de escoamento, tanto pela capacidade destrutiva destes, quanto pela sua própria capacidade de retenção e infiltração, como demonstrado no estudo de Wübbelmann et al. (2023). Portanto, tratam-se de soluções integradas

aos sistemas tradicionais de drenagem e técnicas cinzas, sendo então de suma importância determinar áreas suscetíveis a inundações, para implantação adjacente, e também seus requisitos, muitas vezes limitantes, de implementação.

Dessa forma, esta pesquisa teve como objetivo avaliar, em escala urbana, o potencial de aplicação de SbN como estratégias complementares ao sistema tradicional de drenagem no município de Estrela/RS, região intensamente afetada por eventos hidrológicos, por meio de uma análise espacial baseada em critérios fisiográficos e hidrológicos. O estudo busca identificar áreas urbanas com maior viabilidade primária para a implantação desses dispositivos, considerando suas limitações frente a eventos extremos, bem como discutir as implicações dos resultados para o planejamento urbano e para a replicabilidade da metodologia em outros municípios brasileiros.

Para isso, este trabalho foi organizado em quatro partes principais: a descrição da metodologia adotada, com suas etapas essenciais; a exposição dos resultados obtidos; uma síntese técnica e as recomendações com base no referencial teórico e nos procedimentos realizados; e, por fim, uma discussão dos resultados e as conclusões do trabalho.

METODOLOGIA

Considerando que este estudo propõe avaliar a implementação de SbN em conjunto com o sistema de drenagem pluvial já implantado no município de Estrela/RS, isso se dará por meio de um mapeamento das áreas mais propícias à sua adoção e com base no contexto hídrico e geomorfológico do município. A seguir dispõe-se uma breve contextualização da área de estudo e posteriormente a descrição das etapas utilizadas para a avaliação da aplicabilidade das SbN na zona urbana do município.

Esta metodologia apresenta potencial de replicabilidade, podendo ser adaptada e aplicada em diferentes contextos urbanos para subsidiar o planejamento e a implementação de SbN de forma estratégica e tecnicamente embasada.

Para tanto, esta seção foi dividida em quatro partes: (1) a contextualização do local de estudo; (2) a delimitação da zona de passagem de cheia do rio Taquari no município, a fim de avaliar a aplicabilidade das SbN integradas ao sistema de drenagem urbana, em áreas seguras e com baixo risco de inundação, por conta de suas próprias limitações; (3) levantamento e determinação de áreas propícias por meio de alguns requisitos e limitações particulares de cada dispositivo, que foram elencados levando em consideração a eficácia dessas soluções; (4) e mapeamento das áreas aplicáveis considerando a intersecção positiva das etapas anteriores.

Área de Estudo

O MUNICÍPIO

O município de Estrela/RS situa-se na região centro-oriental do estado, abrangendo uma área de aproximadamente 185 km^2, com população de cerca de 32 mil habitantes em 2022 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2025a). De acordo com o Mapbiomas (2024), o uso e a ocupação do solo no município são predominantemente caracterizados pelas atividades agropecuárias e pela presença de áreas florestais. De acordo com Estrela (2025), a zona urbana corresponde a uma área de aproximadamente 18,9 km^2, 10,20% do território total. Além disso, o município compartilha limites geográficos com o município de Lajeado e Cruzeiro do Sul por meio do rio Taquari, sendo notável que esses municípios têm um histórico notório de ocorrências de inundações.

A Figura 4 apresenta o mapa de localização do município, inserido no contexto regional, permitindo a compreensão de sua posição geográfica em relação às áreas vizinhas. Na sequência, a Figura 5 traz um detalhamento da zona urbana, evidenciando a divisão territorial entre os bairros e facilitando a visualização da organização espacial interna. Complementando essa caracterização, a Figura 6 ilustra as edificações existentes na região de interesse, utilizando-se do banco de dados elaborado por Possantti et al. (2023), que reúne informações sobre a cheia do rio Taquari-Antas registrada em setembro de 2023, no que diz respeito ao vetor das poligonais das edificações, obtidas a partir da base de dados aberta *Bing Buildings Footprints* (Microsoft Bing, 2023).

A BACIA HIDROGRÁFICA

O município em estudo localiza-se no Vale do Rio Taquari, região correspondente à área mais baixa da Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas (Kurek, 2012). Essa bacia abrange a porção nordeste do estado do Rio Grande do Sul, iniciando no topo do Planalto dos Campos Gerais, de onde suas águas escoam em direção à Depressão Central Gaúcha, até desaguarem no rio Jacuí (Sccoti et al., 2024).

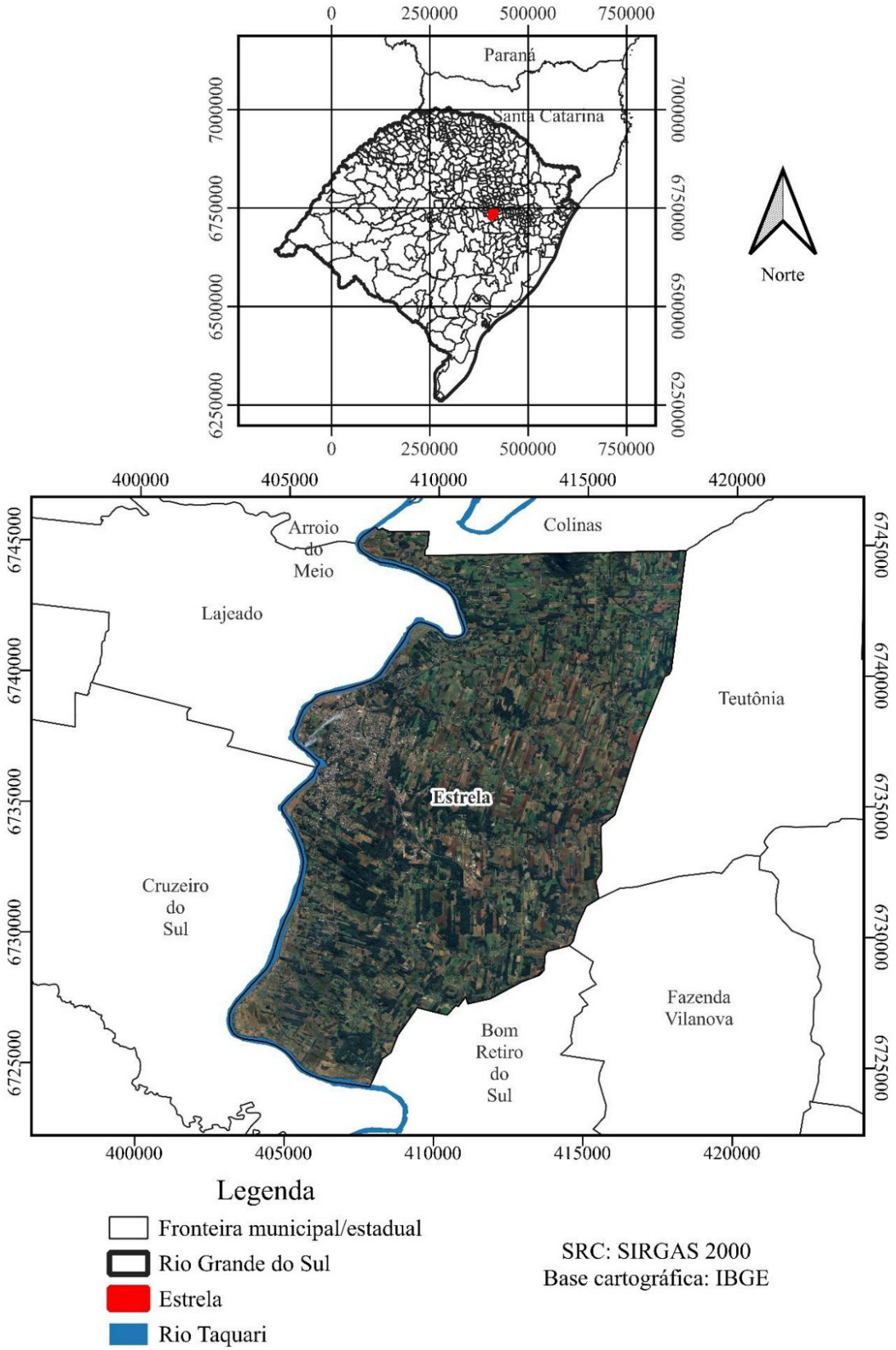


Figura 4. Mapa de localização do município de Estrela/RS.
Fonte: os autores, a partir de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023).

O rio Taquari, por sua vez, percorre aproximadamente 140 km no sentido norte-sul, apresentando uma declividade média de 0,2 m/km. Esse trecho integra a subdivisão de baixo curso da bacia hidrográfica, onde se localizam as planícies de inundação: áreas caracterizadas por um rio encaixado

em seu leito principal, mas com margens relativamente baixas e alguns trechos com extensas planícies e terraços fluviais, o que torna a região propensa a inundações recorrentes (Oliveira et al., 2018; Polis, 2013). A Figura 7 apresenta o município de Estrela/RS e sua localização na respectiva bacia.

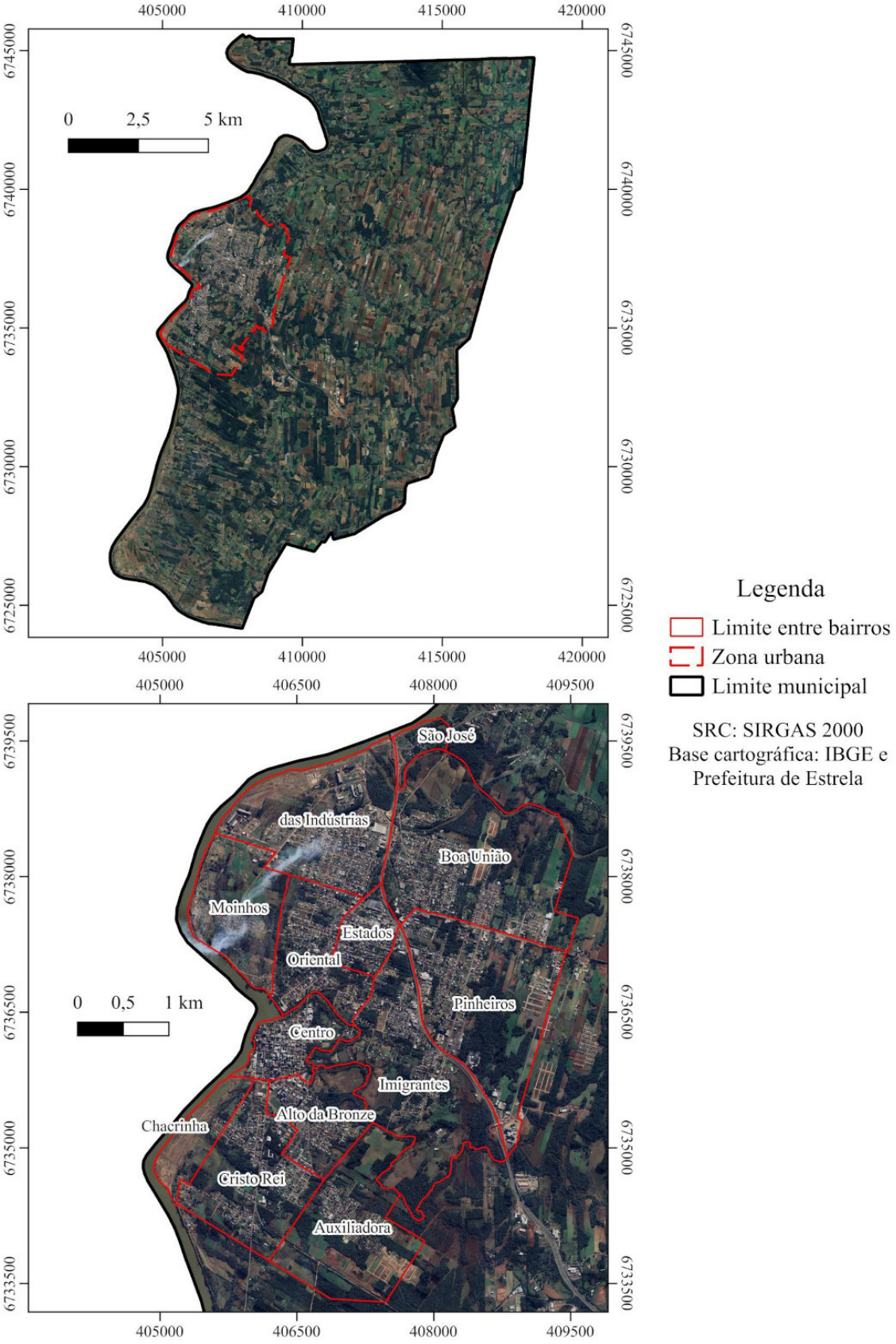


Figura 5. Mapa da zona urbana de Estrela/RS e seus bairros.
Fonte: os autores, a partir de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023) e Estrela (2025).

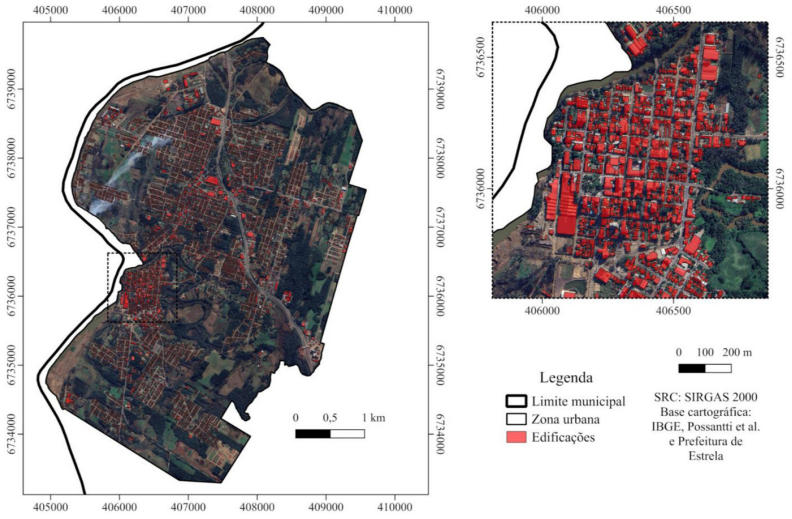


Figura 6. Edificações mapeadas na zona urbana de Estrela/RS.
Fonte: os autores, a partir de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023), Possantti et al. (2023) e Estrela (2025).

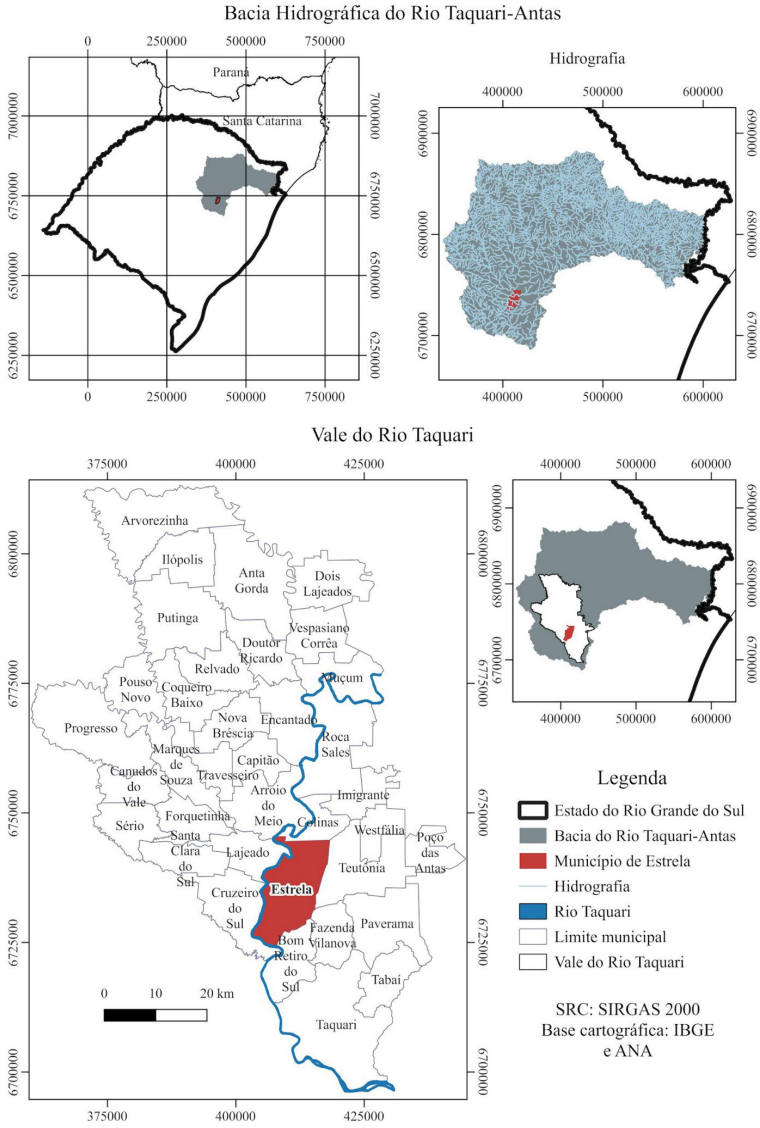


Figura 7. Localização de Estrela/RS na Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas.
Fonte: os autores, a partir de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística e Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2021).

AS INUNDAÇÕES

O rio Taquari-Antas tem uma grande amplitude de vazão entre a sua condição de normalidade e cheia, podendo chegar a uma variação de cerca de 20 metros como observado na cheia de 2024. Isso dá pelo padrão de resposta hidrológica às precipitações que, devido à ligeira declividade da bacia hidrográfica, resulta em um fluxo de grande velocidade ao longo do curso do rio (Kurek, 2012). Em relação à ocupação do solo, as áreas urbanizadas de diversos municípios, incluindo Estrela/RS, se encontram às margens do rio Taquari, ocupando parte da planície de inundação (Eckhardt, 2008; Sccoti et al., 2024). Logo, as inundações no Vale do Rio Taquari ocorrem por diversos fatores naturais, como climáticos, geomorfológicos, pedológicos e hidrológicos, que têm seus impactos agravados por fatores antrópicos devido à exposição e vulnerabilidade da ocupação de suas margens (Kurek, 2012).

No estudo de Moraes et al. (2024), foi consolidada a série histórica das cotas máximas anuais do rio Taquari, com registros obtidos nas cidades de Lajeado/RS e Estrela/RS entre os anos de 1939 e 2023. Os autores destacam que, ao se considerar uma cota de 17 metros (altitude ortométrica) como nível de alerta para inundações em Lajeado, foram identificados 189 episódios de cheia ao longo do período analisado. Complementando esses dados, o Centro Nacional de Monitoramento a Alertas de Desastres Naturais (Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais, 2024) disponibilizou a cota máxima registrada em 2024, atualizando a série histórica. A Figura 8 apresenta o gráfico com essa série completa de cotas máximas anuais ajustadas para a régua atual de Estrela/RS, sendo destacados o nível médio (altura na maior parte do tempo) do rio Taquari em Estrela/RS em verde, que corresponde à 13 metros, a cota de alerta em vermelho e o nível correspondente a um Tempo de Retorno (TR) de 25 anos em cinza utilizado neste trabalho.

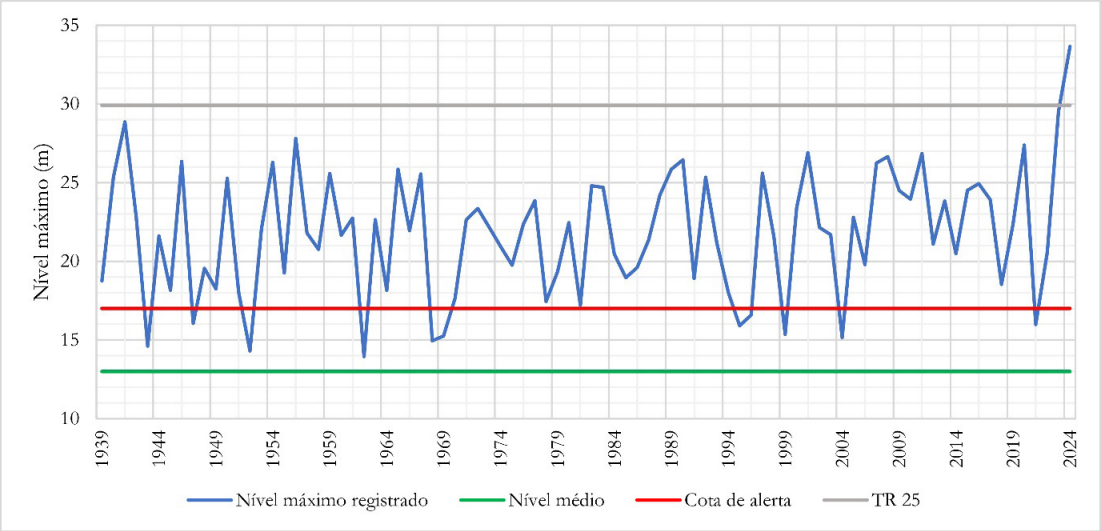


Figura 8. Série completa das cotas máximas anuais em Estrela/RS.
Fonte: os autores, a partir de Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (2024) e Moraes et al. (2024).

Procedimentos Adotados

Todos os procedimentos descritos a seguir foram direcionados à zona urbana do município (Figura 5), tendo em vista que essa região apresenta maior grau de impermeabilização do solo, o que acentua o risco de inundações e alagamentos. Soma-se a isso o fato de que os impactos das mudanças climáticas tendem a se manifestar com maior intensidade em áreas urbanizadas. Essa delimitação também está em consonância com a premissa central do estudo, que propõe o uso de SbN como estratégias complementares ao sistema convencional de drenagem urbana. A Figura 9 apresenta o fluxograma dos procedimentos adotados neste estudo de caso.

Além disso, todos os mapas elaborados nesta pesquisa adotaram o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS) 2000 como Sistema de Referência de Coordenadas (SRC). Essa padronização assegura o alinhamento preciso dos vetores mapeados com as posições reais na superfície terrestre, além de ser o sistema oficialmente recomendado para levantamentos geoespaciais no Brasil, garantindo maior compatibilidade e confiabilidade na análise espacial (Technische Universität München, 2025).

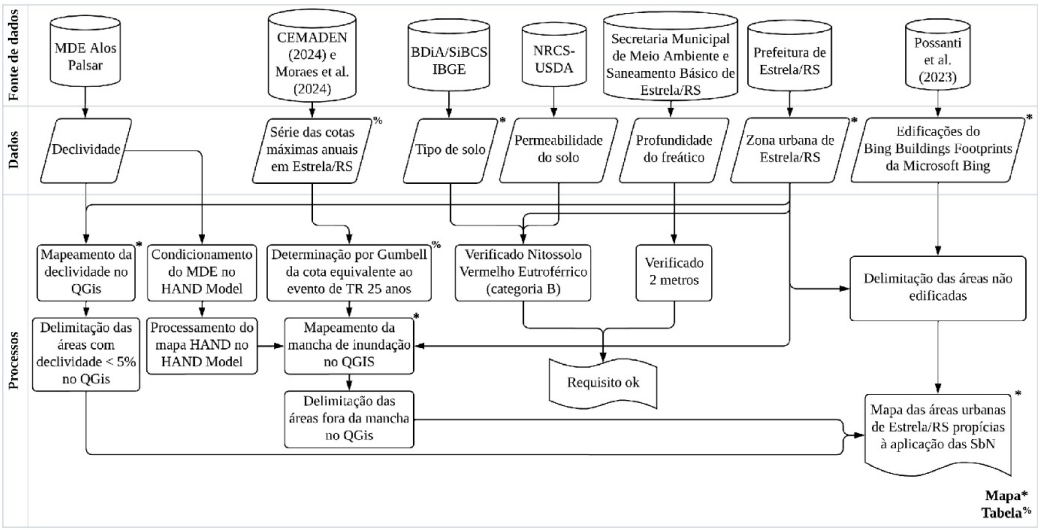


Figura 9. Fluxograma dos procedimentos adotados.

MAPEAMENTO DA MANCHA DE INUNDAÇÃO

A delimitação da mancha de inundação é essencial, considerando a premissa de que a passagem da cheia sobre as SbN a serem implementadas poderia resultar em sua destruição parcial ou total. Para essa análise, foram utilizados dois softwares: o HAND (*Height Above the Nearest Drainage* - Altura Acima da Drenagem mais Próxima) Model, empregado como uma ferramenta de suporte à análise hidrológica, e o QGIS, para processamento e visualização dos resultados.

O primeiro passo foi a obtenção do Modelo Digital de Elevação (MDE) Alos Palsar, com resolução espacial de 12,5 metros. O MDE Alos Palsar é um modelo digital de elevação derivado de dados do Radar de Abertura Sintética (*Synthetic Aperture Radar* - SAR) do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite* - Satélite Avançado de Observação Terrestre), que fornece informações altimétricas de alta precisão, sendo gratuito, amplamente acessível e utilizado em estudos hidrológicos e geomorfológicos (*Japan Aerospace Exploration Agency* ou Agência de Exploração Aeroespacial Japonesa) (Japan Aerospace Exploration Agency, 2025).

Com o MDE obtido, foi possível alimentar o HAND Model, uma ferramenta simplificada que utiliza a diferença de altitude entre os pontos do terreno e o canal de drenagem mais próximo. A grade resultante HAND representa o desnível, ou seja, a altura vertical de cada pixel em relação ao curso d'água mais próximo. Para isso, a ferramenta assume um fluxo unidirecional, identificando o caminho preferencial da água até alcançar a drenagem (Nobre et al., 2011).

Os valores das distâncias verticais obtidos com o HAND Model foram calculados com base na topografia derivada do MDE do Alos Palsar. Para gerar essa grade, foi necessário definir previamente a rede de drenagem de referência, que é automaticamente extraída do próprio MDE. Ainda no Model, o MDE foi corrigido para garantir coerência hidrológica, removendo depressões espúrias e calculando as direções de fluxo. Em seguida, foi gerado um mapa das áreas de acumulação e, posteriormente, a rede de drenagem, a partir da definição do limiar de início de canal arbitrado com base na hidrografia local. Com base nesses processos, o mapa HAND foi criado, representando a diferença de altura em relação ao canal mais próximo. Vale ressaltar que a mancha de inundação utilizada é uma aproximação estática, não representando a variação temporal nem uma cota instantânea, e pode diferir de uma área inundada em um NA específico, sendo, portanto, uma mancha de suscetibilidade à inundação, e não um mapa hidrodinâmico clássico.

O resultado do processamento pelo método HAND foi reclassificado no QGIS para destacar exclusivamente a mancha de inundação correspondente a um TR de 25 anos. Este TR foi arbitrado com base no risco aceitável de reconstrução dos dispositivos devido às inundações, tendo em vista que as SbN analisadas neste estudo estão associadas principalmente à infiltração e retenção de água. Por essa razão, são particularmente sensíveis a grandes volumes, podendo perder eficiência ou até mesmo ser destruídas em caso de inundação e/ou enxurradas.

Optou-se por um TR intermediário: elevado para padrões de microdrenagem (como 2, 5 ou 10 anos), mas relativamente baixo se comparado aos eventos extremos que atingiram a região do rio Taquari em 2023 e 2024. A escolha buscou equilibrar a viabilidade da implementação com a estabilidade das intervenções. Dentro da mancha de inundação associada ao TR de 25 anos, o risco de que as SbN sejam

comprometidas, seja pela perda de funcionalidade ou por danos estruturais, é significativamente maior. Por isso, o estudo se concentrou em áreas fora dessa mancha, onde a probabilidade de falha é menor.

Dessa forma, as SbN são concebidas para atuar de forma complementar às soluções convencionais de drenagem urbana e de controle de cheia, reforçando-as, e não substituindo-as. Essa foi a premissa central da proposta. Além disso, a escolha do TR levou em consideração tanto a frequência das inundações quanto o potencial destrutivo do rio Taquari, buscando um equilíbrio entre cenários extremos - nem tão elevados a ponto de inviabilizar a implementação, nem tão baixos que desconsiderem os riscos reais.

A determinação dessa altura foi realizada por meio do método de Gumbel, uma abordagem estatística utilizada para análise de eventos extremos, como cheias e precipitações intensas. O método baseia-se na distribuição de valores máximos para estimar a probabilidade de ocorrência de eventos raros (Collischonn & Dornelles, 2017).

A probabilidade de que uma determinada cota venha a ser igualada ou excedida em um ano qualquer foi estimada usando a distribuição Gumbel, de acordo com a equação 1, extraída de Collischonn & Dornelles (2017):

$$P = 1 - e^{-e^{-b}} \quad (1)$$

onde P é a probabilidade, e é a base dos logaritmos naturais e b é dado por:

$$b = \frac{1}{0,7797 \cdot s} \cdot \left(x - \overline{x} + 0,45 \cdot s \right) \quad (2)$$

onde x é a cota máxima, $\overline{x}$ é a média das máximas anuais, e s é o desvio padrão das máximas anuais. Combinando as duas equações 1 e 2, foi possível estabelecer um TR em anos para determinada cota através da equação 3 (Collischonn & Dornelles, 2017):

$$x = \overline{x} - s \cdot \left\{ 0,45 + 0,7797 \cdot ln\left[ln\left(\frac{TR}{TR-1} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

onde x é o valor máximo desejado, TR é o tempo de retorno em anos, s é o desvio padrão dos dados máximos anuais e $\overline{x}$ é a média dos dados máximos anuais.

No presente estudo, o método de Gumbel foi aplicado às cotas máximas anuais registradas nos últimos 86 anos (1939 a 2024), mostradas na Figura 8, que compila os dados de Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (2024) e Moraes et al. (2024), este último referente à cheia de maio de 2024. Essa distribuição é empregada em estudos hidrológicos de eventos extremos, sendo recomendada para a análise de valores máximos, conforme discutido por Collischonn & Dornelles (2017). A escolha dessa distribuição, portanto, está alinhada com a literatura consolidada e com a natureza dos dados utilizados neste estudo.

A Tabela 3 reúne os resultados obtidos por meio da aplicação do método de Gumbel às cotas máximas anuais observadas, permitindo a estimativa da altura correspondente ao TR de 25 anos utilizado na delimitação da mancha de inundação. Como é possível observar, esse evento corresponde a uma altura de 29,92 metros.

Tabela 3. Aplicação do método de Gumbel para estimativa da cota correspondente a um TR de 25 anos

		Nível				
		x=	**29,92**	**m**		
Método de Gumbel						
Média	**Desvio padrão**	**Parâmetros**			**P**	**TR**
		alfa	**mi**	**b**		
x̄	s	0,7797.s	x̄-0,5772.alfa	(x-mi)/alfa	1-e^(-e^(-b))	(anos)
21,80	3,97	3,09	20,02	3,20	0,04	25

Ainda, considerando a cota de inundação estimada (29,92 metros) e o fato de que o MDE foi criado em 18 de janeiro de 2011, quando o rio Taquari apresentava uma cota de 13 metros (dado obtido através dos autores de Moraes et al., 2024), a reclassificação do HAND foi realizada subtraindo esse valor, resultando em uma altura de 16,92 metros (29,92 - 13 metros). Esse processo permitiu a delimitação da

área potencialmente inundável para o TR de 25 anos, servindo de base para a análise de aplicabilidade das SbN no local.

MAPEAMENTO DOS REQUISITOS

Para cada um dos requisitos e dispositivos listados na Tabela 2, foram elaborados mapas temáticos com o auxílio de técnicas de geoprocessamento. Nos casos em que a geração do mapa não foi viável, a limitação foi devidamente justificada a seguir.

No caso do requisito de permeabilidade do solo, o mapa não pôde ser elaborado devido à falta de dados vetoriais disponíveis sobre o tema, sendo então necessária uma avaliação mais precisa, a qual exige estudos *in loco*, uma vez que as características do solo podem variar significativamente em pequenas escalas, podendo interferir na implantação e consequente dinâmica dos dispositivos SbN. No entanto, este requisito pôde ser incorporado, para fins de mapeamento, na diretriz de classificação do tipo de solo, também listado na Tabela 2, conforme o método do NRCS-USDA, que categoriza os solos em quatro grupos (A, B, C e D), cada um associado a diferentes níveis de permeabilidade (Genovez et al., 2005).

Dessa forma, as áreas aptas para a implementação de SbN de drenagem com base no parâmetro de tipo de solo foram identificadas a partir da interseção da respectiva seção da Tabela 2 com as informações do mapa de solos do Banco de Dados e Informações Ambientais (BDiA), disponibilizado na escala 1:250.000 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2025b), construído com base no SiBCS (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2018).

A associação entre os dois sistemas (NRCS-USDA e SiBCS) foi realizada conforme a correspondência proposta por Genovez et al. (2005), permitindo a integração das informações e a análise das condições edáficas no município estudado.

De forma semelhante ao requisito de permeabilidade do solo, a análise da carga de sedimentos exige estudos mais aprofundados em campo, dado que se trata de um parâmetro fortemente condicionado pelas particularidades locais e por dinâmicas ambientais específicas. Logo, a ausência de dados consolidados inviabilizou a realização de um mapeamento representativo para esse critério.

Para a avaliação da aplicabilidade das SbN em relação ao requisito de profundidade do lençol freático, foram utilizadas informações obtidas por ensaios e fornecidas por técnicos da Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Saneamento Básico do município de Estrela/RS, que serviram de base para a análise realizada.

Para a verificação do requisito de declividade do terreno, também foi utilizado o MDE Alos Palsar, processado no QGIS para obtenção dos valores de declividade em porcentagem, conforme os intervalos da Tabela 2, com o objetivo de identificar as áreas mais adequadas à implantação das SbN.

No caso dos requisitos de controle de vazão e de área de contribuição, a elaboração de um mapa temático não se faz necessária, uma vez que os intervalos indicados se referem a critérios de projeto aplicados nos cálculos de dimensionamento, com base na relação entre a capacidade dos dispositivos, o tempo de retorno do evento adotado e a área que será escoada.

MAPEAMENTO DAS ÁREAS PROPÍCIAS À APLICAÇÃO DE SBN

Com base nas etapas previamente descritas, elaborou-se um mapa de áreas propícias à implantação de dispositivos SbN, a partir da interseção dos mapas correspondentes a cada requisito, definidos conforme os intervalos estabelecidos na Tabela 2, com o mapa da mancha de inundação associada a um TR de 25 anos.

Foram, contudo, excluídas as áreas demarcadas no mapa de edificações (Figura 6), uma vez que já se encontram ocupadas. Dessa forma, o mapa de aplicabilidade resultante considera a sobreposição de áreas não sujeitas a inundações de TR 25 anos, que atendem simultaneamente aos critérios de declividade, tipologia do solo e ausência de edificações.

RESULTADOS

Mapas e Informações Obtidas

MAPA DA MANCHA DE INUNDAÇÃO DE TR 25 ANOS

A Figura 10 apresenta o mapa da mancha de inundação correspondente a um evento com TR de 25 anos para a zona urbana do município de Estrela/RS, associada a uma cota de 29,92 metros registrada na régua do atual posto fluviométrico local. Nota-se que os dois cursos d'água que atravessam a zona urbana - o Arroio Boa Vista, ao norte, e o Arroio Estrela, na região central - também

transbordam, contribuindo significativamente para a expansão da mancha de inundação, que abrange aproximadamente 5,56 km^2, o que representa cerca de 30% da zona urbana do município. Apesar da ampla extensão da área atingida, é possível identificar "ilhas" não submersas dentro da mancha, onde a cota de 29,92 metros não é alcançada, evidenciando variações altimétricas no terreno urbano.

Além dessas informações, através da Figura 10, é possível visualizar a distribuição espacial da mancha em relação aos bairros urbanos: dentre os bairros mais impactados destacam-se Chacrinha, Moinhos e Alto da Bronze, conforme listado na Tabela 4, em ordem decrescente da área afetada em relação à área total do bairro. O bairro Chacrinha, por exemplo, apresenta mais de 83% de sua área inundada, enquanto Moinhos ultrapassa 79%, indicando áreas altamente suscetíveis a inundações mesmo em eventos com TR intermediário.

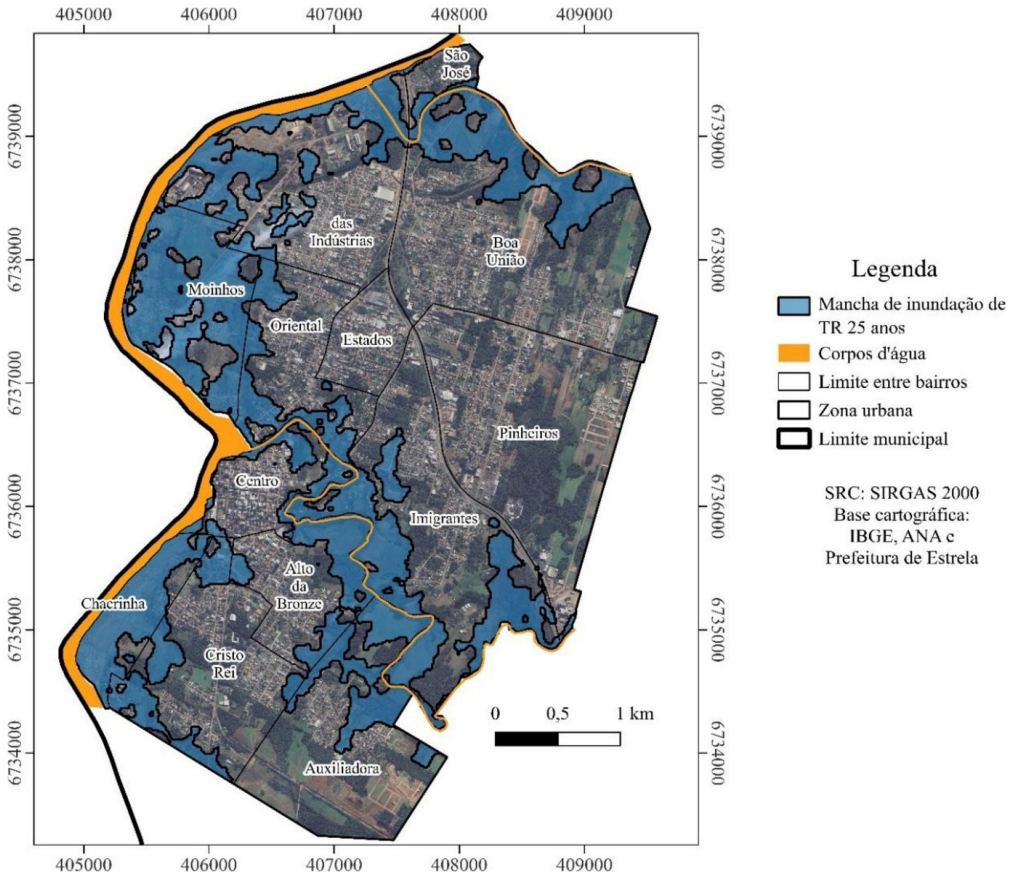


Figura 10. Mapa da mancha de inundação de TR 25 anos na zona urbana de Estrela/RS.
Fonte: os autores, a partir de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística e Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2021) e Estrela (2025).

MAPA DO TIPO DE SOLO

Considerando o requisito de tipo de solo, apresentado na Tabela 2, foi elaborado o mapa da Figura 11, que evidencia a predominância do Nitossolo Vermelho Eutroférrico na zona urbana do município de Estrela/RS. Essa unidade pedológica, reconhecida pelo SiBCS como uma das 13 classes de primeira ordem (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2018), cobre uma extensa área dentro do limite municipal, inclusive toda a zona urbana delimitada pela Prefeitura de Estrela (Estrela, 2025).

Quando relacionada ao sistema de classificação do NRCS-USDA, essa tipologia de solo é enquadrada na categoria B, correspondente a solos com permeabilidade intermediária entre 3,81 mm/h a 7,62 mm/h (Genovez et al., 2005).

MAPA DE DECLIVIDADE

A Figura 12 apresenta o mapa de declividade da zona urbana de Estrela/RS, elaborado conforme os critérios definidos para o requisito de declividade da Tabela 2. A representação espacial permite observar que uma parcela expressiva da zona urbana é caracterizada por declividades superiores a 5%,

indicadas em vermelho. Nessas áreas, as SbN não são indicadas justamente pelo comprometimento de sua eficiência no processo de infiltração e também na prevenção de processos erosivos.

Tabela 4. Ordenamento pelo percentual de área mais atingida por bairro pelo cenário de TR 25 anos

Bairros	Área total do bairro (km²)	Área inundada no cenário de TR 25 anos (km²)	% com relação à área total do bairro	% com relação à área inundada na zona urbana
Chacrinha	0,566	0,470	83,07%	8,46%
Moinhos	1,258	0,997	79,19%	17,93%
Alto da Bronze	0,950	0,361	37,96%	6,49%
Imigrantes	2,484	0,935	37,65%	16,83%
Das Industrias	2,132	0,686	32,17%	12,34%
Oriental	1,113	0,354	31,81%	6,37%
Centro	0,693	0,219	31,61%	3,94%
Auxiliadora	1,828	0,436	23,87%	7,85%
Cristo Rei	1,594	0,373	23,40%	6,71%
São José	0,224	0,049	21,97%	0,89%
Boa União	3,074	0,667	21,68%	11,99%
Pinheiros	2,504	0,011	0,45%	0,20%
Estados	0,464	0	0%	0%

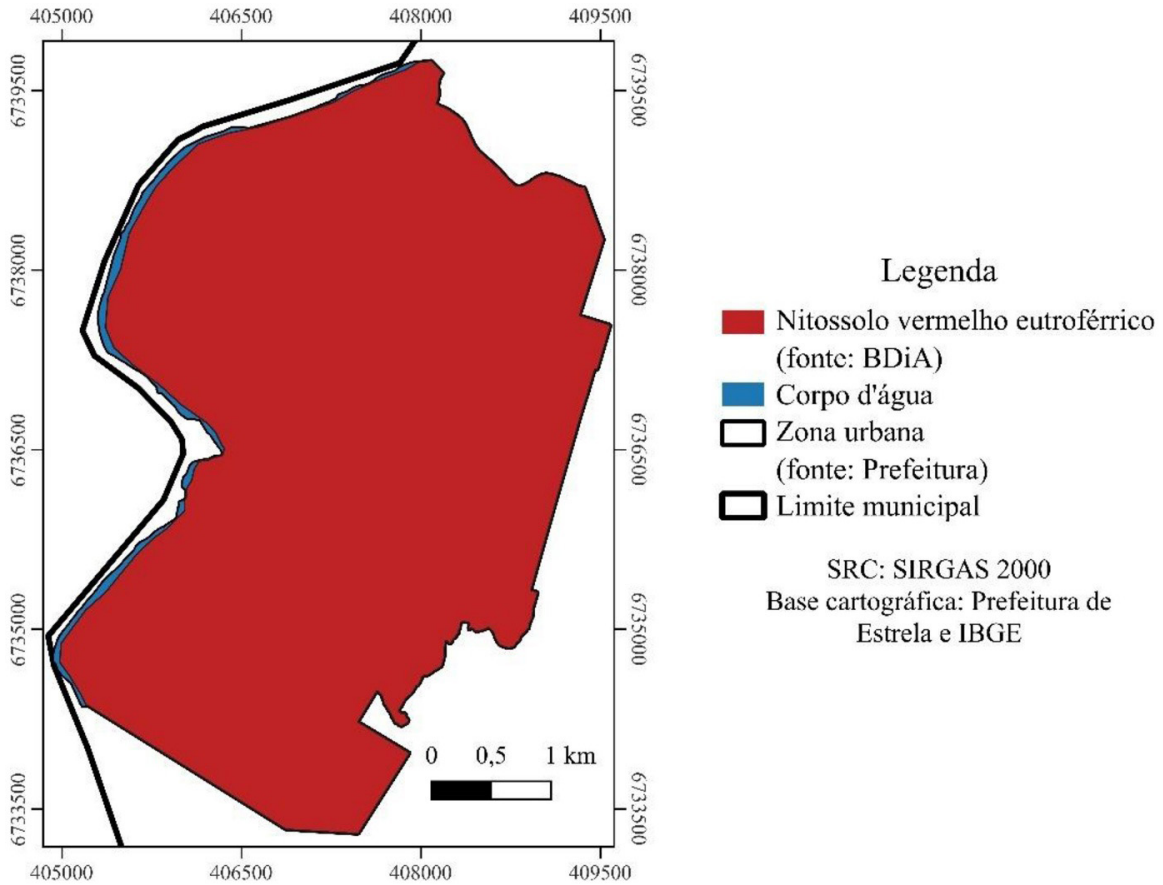


Figura 11. Mapa do tipo de solo encontrado na zona urbana de Estrela/RS.
Fonte: os autores, a partir de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023, 2025b) e Estrela (2025).

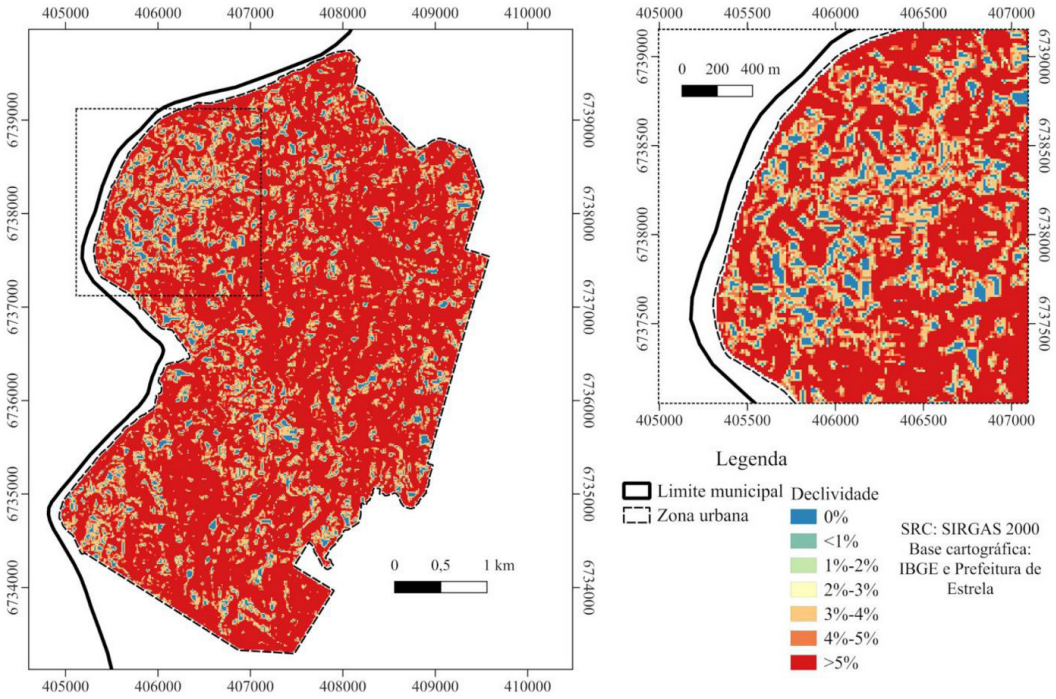


Figura 12. Mapa de declividade da zona urbana de Estrela/RS classificado por requisito.
Fonte: os autores, a partir de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023) e Estrela (2025).

A inclusão do detalhe em escala ampliada (à direita da Figura 12) oferece uma visão mais refinada da porção noroeste da zona urbana, evidenciando a heterogeneidade topográfica e a dispersão de pequenas áreas planas ou suavemente inclinadas.

A Tabela 5 reforça a análise cartográfica ao quantificar as áreas relativas a cada faixa de declividade. Destaca-se que cerca de 70% da zona urbana mapeada (13,18 km^2) está inserida na classe acima de 5%, seguida pelas faixas de 3%-4% (2,21 km^2) e 4%-5% (1,58 km^2). As classes com menor declividade representam proporções significativamente reduzidas: menos de 1 km^2 para cada uma das faixas de 0%-2% (0,93 km^2) e de 2%-3% (0,15 km^2), e 0,83 km^2 de áreas planas (0%).

Tabela 5. Áreas correspondentes a cada faixa de declividade

Declividade	Área (km^2)	% da área da zona urbana
>5%	13,18	69,79%
4%-5%	1,58	8,37%
3%-4%	2,21	11,70%
2%-3%	0,15	0,79%
0-2%	0,93	4,92%
0%	0,83	4,40%

REQUISITO DE PROFUNDIDADE DO LENÇOL FREÁTICO

Com relação ao requisito de profundidade do lençol freático, as informações fornecidas pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Saneamento Básico do município de Estrela/RS indicaram que o NA no solo do município apresenta pouca variação, mantendo-se geralmente em profundidades rasas, próximas dos 2 metros. Ressaltou-se, ainda, que essa profundidade pode sofrer alterações ao longo do ano, especialmente em períodos chuvosos, quando há tendência de elevação do NA devido à maior recarga hídrica.

Ainda assim, a profundidade do lençol freático requer levantamentos específicos em campo, pois é um parâmetro altamente sensível às condições locais, sendo influenciado, sobretudo, pelo uso e ocupação do solo e pelas variações sazonais de precipitação. Essas oscilações podem afetar diretamente a viabilidade de implantação de determinadas SbN.

Além disso, esse é um requisito fundamental para a viabilidade dos dispositivos, pois seu descumprimento inviabilizaria a aplicação das soluções propostas. No entanto, considerando que os dispositivos analisados demandam no mínimo 1 metro de profundidade em relação ao lençol freático, conforme a Tabela 2, as condições observadas no município demonstram compatibilidade com esse requisito, favorecendo sua adoção.

MAPA DAS ÁREAS PROPÍCIAS À APLICAÇÃO DE SBN

A Figura 13 apresenta o mapa das áreas urbanas de Estrela/RS propícias à aplicação de SbN, resultante da interseção dos mapas temáticos de tipo de solo, declividade, de inundação e de edificações anteriormente elaborados. No mapa obtido, podem ser consideradas aptas à aplicação todas as SbN analisadas neste estudo, com exceção das bacias de retenção, cujos requisitos de implantação divergem das condições locais avaliadas, e dos telhados verdes, que necessitam estar associados a edificações, áreas estas que foram previamente removidas da análise espacial.

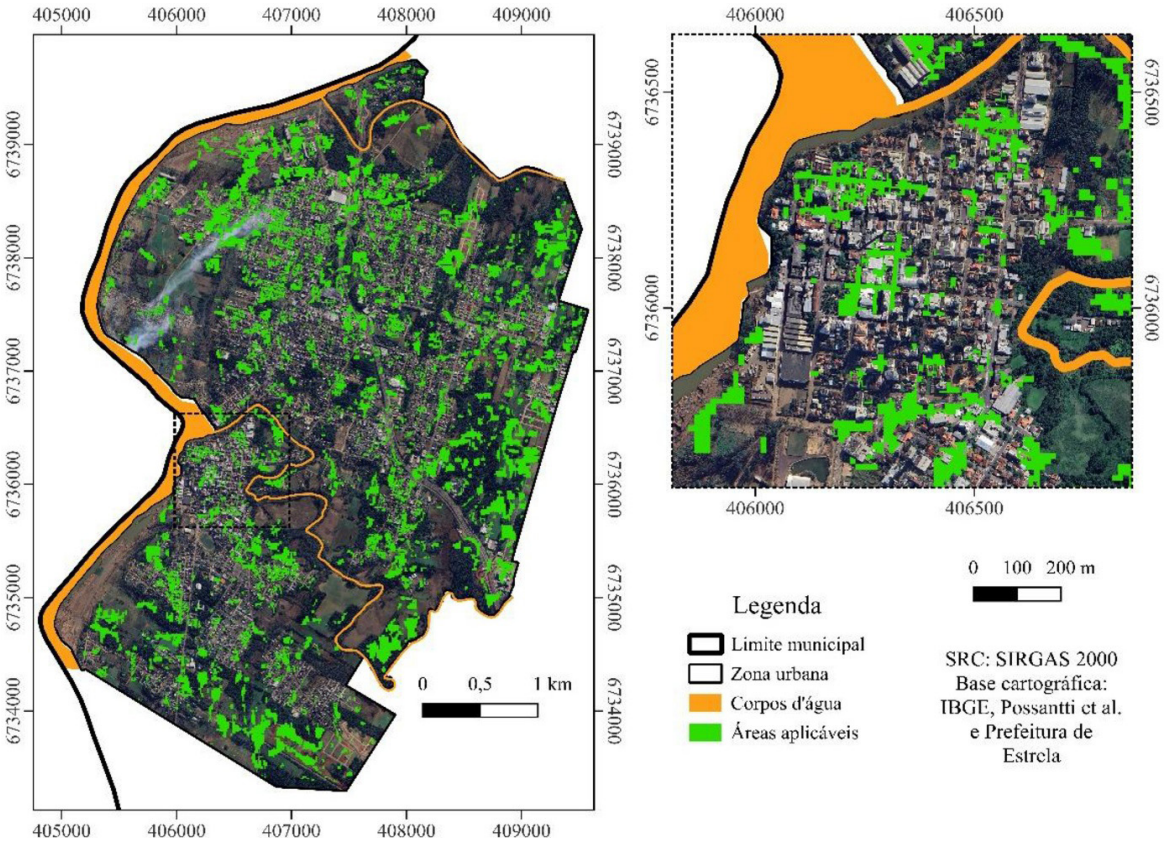


Figura 13. Mapa das áreas urbanas de Estrela/RS propícias à aplicação das SbN.
Fonte: os autores, a partir de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística e Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2021), Possantti et al. (2023) e Estrela (2025).

As manchas destacadas em verde representam as áreas consideradas mais adequadas para a implementação de SbN, de acordo com os critérios estabelecidos, e compreendem 2,86 km², cerca de 15,13% da zona urbana. Essas áreas resultam da combinação favorável entre tipo de solo (nitossolo vermelho eutroférrico, com permeabilidade intermediária), declividade (abaixo de 5%), risco baixo de inundação (TR superior a 25 anos) e áreas não edificadas. A sobreposição dessas camadas permitiu identificar porções do território com maior potencial técnico para implantação de SbN.

A análise espacial revela que as áreas aplicáveis estão distribuídas de maneira relativamente dispersa, embora com concentrações significativas nos bairros das Indústrias, Pinheiros e Boa União, que apresentam maior proporção de manchas, conforme dispõe-se na Tabela 6. Por outro lado, regiões limítrofes com o rio Taquari, como os bairros Moinhos, Chacrinha e São José, apresentam menor presença de áreas aplicáveis, justamente por possuírem maior área inundável.

Tabela 6. Ranking com relação à proporção (%) de áreas aplicáveis pela área total dos bairros

Bairros	Área total do bairro (km^2)	Área propícia à implantação de SbN (km^2)	% com relação à área total do bairro	% com relação à área total da zona urbana
Das Industrias	2,132	0,462	21,69%	2,45%
Pinheiros	2,504	0,519	20,73%	2,75%
Boa União	3,074	0,499	16,24%	2,64%
Cristo Rei	1,594	0,228	14,27%	1,20%
Estados	0,464	0,066	14,18%	0,35%
Imigrantes	2,484	0,350	14,08%	1,85%
Alto da Bronze	0,950	0,131	13,81%	0,70%
Oriental	1,113	0,148	13,28%	0,78%
Auxiliadora	1,828	0,231	12,65%	1,22%
Centro	0,693	0,083	11,96%	0,44%
São José	0,224	0,025	11,37%	0,13%
Chacrinha	0,566	0,043	7,62%	0,23%
Moinhos	1,258	0,072	5,74%	0,38%
Total	18,885	2,858	—	15,13%

Síntese Técnica e Implicações para a Gestão Urbana

Com base na análise geoespacial e hidrológica realizada, é possível concluir que os bairros da zona urbana do município de Estrela/RS apresentam entre 5,74 e 21,69% de área com condições favoráveis à implementação das SbN mencionadas, com potencial para complementar o sistema tradicional de drenagem urbana. A avaliação dos requisitos técnicos dos dispositivos, aliada ao mapeamento das áreas de risco e das características geomorfológicas, permitiu identificar as regiões urbanas com maior aptidão para essas intervenções.

A delimitação da mancha de inundação para um TR de 25 anos revelou que aproximadamente 30% da zona urbana encontra-se sujeita a essa frequência de inundações. Dentro desse cenário, os bairros Chacrinha e Moinhos apresentaram os maiores percentuais de área inundada, sendo considerados de alta vulnerabilidade, como é possível notar na Tabela 4.

Nessas áreas, onde a expressiva extensão dos bairros se sobrepõe à mancha de inundação, recomenda-se a priorização de ações estruturais de controle de cheias, como a requalificação de áreas ribeirinhas com zonas de amortecimento, a remoção ou adaptação de usos incompatíveis com a dinâmica de inundação, entre outras, e a aplicação cautelosa de SbN apenas em zonas mais seguras dentro do bairro, de preferência em articulação com soluções convencionais.

Por outro lado, bairros com menor percentual de área inundada, como Pinheiros e Estados, apresentam condições mais favoráveis para a implantação de SbN voltadas à retenção, infiltração e detenção de águas pluviais, podendo funcionar como áreas estratégicas para contenção a montante e redução da sobrecarga nas zonas mais vulneráveis. Nesses locais, é possível adotar as medidas de SbN aqui estudadas de maneira mais ampla, além de integrar essas soluções a projetos urbanos e habitacionais de médio e longo prazo, garantindo ganhos ambientais e resiliência climática.

A presença de corpos d'água dentro da zona urbana deve ser vista tanto como um elemento limitante - devido à faixa de inundação que aumenta a suscetibilidade à elevação do NA - quanto como uma oportunidade estratégica para a adoção de medidas preventivas. Nesses locais, recomenda-se priorizar intervenções como SbN extensivas e indiretas ou obras estruturais cinzas de controle de cheias ao longo dos cursos d'água, visando a melhoria da drenagem urbana, o controle de inundações e a requalificação ambiental.

Assim, as regiões urbanizadas localizadas às margens dos corpos hídricos demandam atenção especial. Para esses casos, são geralmente indicadas as seguintes medidas, as quais requerem, contudo, estudos prévios mais aprofundados para atender às exigências técnicas e regulatórias:

1. Medidas estruturais intensivas: dispositivos de controle de cheias, como diques, *polders*, bacias de detenção e/ou retenção, e modificações nos corpos d'água;
2. Medidas estruturais extensivas: revitalização das áreas afetadas pelas inundações através da implantação de parques lineares multifuncionais ribeirinhos com lagoas de detenção e/ou retenção.
3. Medidas não estruturais: aumento da cobertura vegetal, com o objetivo de reduzir o pico de cheia e a erosão; ações voltadas à adaptação da população residente; regulamentação do uso e ocupação do solo; zoneamento de áreas inundáveis; implantação e monitoramento do Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDrU) e legislações correlatas; aplicação de gestão de risco; e sistemas de previsão e alerta.

Além disso, as áreas totalmente circundadas na mancha de inundação - por serem áreas elevadas - podem representar pontos estratégicos para a instalação de infraestruturas críticas de proteção contra cheias.

Com relação aos requisitos, conforme mostrado na Figura 12, observa-se uma predominância de áreas com maior inclinação na zona urbana, o que impõe restrições importantes ao planejamento e à execução de SbN voltadas ao manejo das águas pluviais. Inclinações acentuadas podem comprometer a eficiência das estruturas de infiltração, além de exigir cuidados adicionais com a contenção do escoamento superficial e a prevenção de processos erosivos.

Ainda que limitadas, as áreas com declividades mais suaves representam zonas prioritárias para a implantação de SbN focadas em infiltração, armazenamento e controle do escoamento superficial.

Ainda, as áreas fora da mancha de inundação e que apresentam solo classificado como do tipo B (nitossolo vermelho eutroférrico, com permeabilidade moderada), declividade inferior a 5% e ausência de edificações foram identificadas como tecnicamente propícias à implementação das SbN em complementação à drenagem urbana, conforme os critérios definidos.

A profundidade do lençol freático, geralmente em torno de 2 metros, conforme a Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Saneamento Básico do município de Estrela/RS, indica a viabilidade primária dessas intervenções, uma vez que a maioria desses dispositivos requer uma distância mínima de 1 metro entre o fundo da estrutura e o nível do lençol freático. Ressalta-se, entretanto, que a adequação final da área depende da tipologia da SbN adotada e da profundidade do dispositivo projetado, sendo indispensável, em fases posteriores, a utilização de dados mais precisos do lençol freático em escala local para a confirmação da viabilidade técnica.

Entre as regiões que mais se destacam pela proporção de áreas urbanas adequadas ao uso das SbN, observa-se predominância das mais afastadas das margens dos cursos d'água, onde há menor risco de inundação. Esse fato evidencia a importância do zoneamento como instrumento estratégico na implementação das SbN e no controle dos prejuízos decorrentes das cheias.

Considerando que todos os dispositivos analisados são recomendados para intervalos de TR de 2 a 5 anos, conclui-se que sua aplicação como complemento ao sistema convencional de drenagem urbana é adequada. Isso porque, por se tratarem de soluções voltadas à drenagem, essas SbN costumam ser dimensionadas para os mesmos intervalos de tempo de retorno utilizados nos sistemas de microdrenagem tradicionais. No caso específico das bacias de detenção e retenção, por se tratarem de estruturas de macrodrenagem, admite-se um TR maior, sendo indicada sua implantação nas áreas marginais ao rio Taquari, por demandarem maior espaço livre e também por terem maior capacidade de armazenamento.

Para o controle das águas pluviais em propriedades privadas e estímulo à adesão por parte da população, recomenda-se que o Poder Público ofereça incentivos, como, por exemplo, o abatimento no Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU) - popularmente conhecido como IPTU Verde, já regulamentado em outros municípios do Brasil. Esse benefício pode ser concedido aos cidadãos que adotarem em suas propriedades práticas de paisagismo que integrem de forma eficaz as áreas impermeabilizadas com áreas verdes e dispositivos de controle na fonte, tais como telhados verdes, jardins de chuva, pavimentos permeáveis, valas e trincheiras de infiltração. Essas intervenções contribuem para a redução do escoamento superficial e a atenuação dos picos de vazão no sistema de drenagem tradicional.

Além disso, recomenda-se considerar o uso de SbN em locais de grande potencial de conexão social e ambiental, como praças, escolas, áreas institucionais e espaços de convivência, para além da função hidrológica, como demonstrado na Tabela 1. Tais intervenções ampliam os benefícios ao promoverem sombreamento, recreação e melhoria da qualidade ambiental urbana, contribuindo também para a valorização do espaço urbano e o bem-estar da comunidade.

Recomendações para a Zona Rural

Considerando a Tabela 1, observa-se que a zona rural também apresenta potencial para a implementação de SbN nas áreas com maior proporção de estrutura viária e impermeabilização. No entanto, os principais problemas observados nessa região estão relacionados à degradação das margens dos corpos hídricos e à carência de cobertura vegetal por conta da agropecuária, predominante no município, o que agrava processos erosivos e compromete a qualidade da água.

Diante desse cenário, recomenda-se que sejam adotadas estratégias voltadas à valorização das áreas verdes, à proteção de áreas de preservação ambiental, à fiscalização e recuperação das Áreas de Preservação Permanente (APP) localizadas ao longo dos cursos d'água, bem como ao controle da erosão decorrente do escoamento superficial em terrenos com solo exposto.

Para enfrentar essas questões, as seguintes SbN são especialmente indicadas: restauração ecológica das matas ciliares, implantação de sistemas agroflorestais, revegetação de nascentes e terraceamento com vegetação. Tais medidas, além de promoverem a conservação do solo e da água, fortalecem a resiliência da paisagem rural frente aos eventos extremos e contribuem para o equilíbrio ambiental da bacia hidrográfica como um todo.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que as SbN apresentam potencial para complementar o sistema tradicional de drenagem urbana no município de Estrela/RS, especialmente em áreas fora da mancha de inundação associada a eventos mais intensos. A identificação de áreas urbanas potencialmente aptas à implantação desses dispositivos, a partir da integração de critérios fisiográficos e hidrológicos, encontra respaldo em abordagens adotadas em estudos internacionais que utilizam análises espaciais como etapa inicial no processo de tomada de decisão (Allende-Prieto et al., 2024; Baldwin et al., 2022; Caloir et al., 2023; Kaykhosravi et al., 2019; Kuller et al., 2019; Martin-Mikle et al., 2015).

A adoção de critérios gerais e replicáveis, como tipo de solo, declividade, suscetibilidade à inundação e presença de edificações, reflete uma escolha metodológica coerente com o objetivo do trabalho, voltado à análise da aplicabilidade primária das SbN em contexto urbano. Essa abordagem mostra-se particularmente relevante em realidades municipais marcadas por limitações de dados, recursos técnicos e institucionais, cenário comum em grande parte dos municípios brasileiros. A análise integrada dos requisitos técnicos e dos condicionantes geográficos permitiu identificar zonas urbanas com maior aptidão à aplicação dessas soluções, contribuindo para a redução de riscos, a ampliação da infraestrutura verde e azul e o fortalecimento da resiliência urbana.

Ressalta-se que os critérios adotados neste estudo refletem uma abordagem conservadora, voltada à identificação preliminar de áreas com maior viabilidade primária para a implantação de SbN. Conforme discutido por Patussi (2025), diversos dispositivos podem ser adaptados por meio de soluções técnicas. Tais adaptações ampliam o espectro de aplicabilidade das SbN, porém também implicam maior complexidade de projeto, custos adicionais e necessidade de planejamento e avaliação técnica em escala local. Da mesma forma, a implantação de SbN em áreas edificadas, como telhados verdes e microrreservatórios, é tecnicamente viável e desejável, mas depende de análises estruturais, legais e operacionais específicas. Assim, embora todos os dispositivos de SbN possam ser adaptados desde que se preserve sua eficácia e eficiência, tais soluções demandam estudos aprofundados e projetos executivos, que, extrapolando a proposta deste trabalho, servem de guia para pesquisas futuras.

A análise espacial identificou que aproximadamente 15% da área urbana apresenta condições favoráveis à implantação dos dispositivos, evidenciando uma oportunidade significativa para a integração dessas soluções ao planejamento urbano. Contudo, é importante destacar que parte dessas áreas se localiza ao longo do eixo viário ou em propriedades privadas, o que pode restringir a efetiva implementação e demandar a priorização de espaços públicos ou lotes desocupados para maximizar seu aproveitamento.

Embora os resultados não permitam inferir diretamente ganhos hidrológicos quantitativos, eles oferecem uma base espacial consistente para orientar estudos posteriores, projetos piloto e análises mais detalhadas em escala local.

A escolha do período de retorno de 25 anos para a delimitação da mancha de inundação também se mostra consistente com o papel atribuído às SbN neste estudo. Considerando a sensibilidade desses dispositivos a grandes volumes de precipitação, sua implantação revela-se mais adequada em zonas menos expostas a inundações frequentes, onde podem operar de forma mais eficiente e segura frente a eventos de menor intensidade e maior frequência, em conjunto com a drenagem urbana tradicional

e os sistemas de controle de cheia. Ao reconhecer que essas soluções possuem capacidade limitada diante de eventos extremos, o trabalho reforça que sua função é atuar de forma complementar aos sistemas convencionais, e não substituí-los, em consonância com estudos recentes que apontam a vulnerabilidade de dispositivos baseados em infiltração e retenção frente a grandes volumes e altas velocidades de escoamento (Wübbelmann et al., 2023).

Cabe destacar que a mancha de inundação utilizada neste estudo, derivada do método HAND, representa uma aproximação estática baseada na diferença altimétrica em relação à drenagem mais próxima, não incorporando a propagação temporal de uma onda de cheia. Ainda assim, a abordagem adotada mostra-se adequada para o objetivo do trabalho, ao fornecer um critério conservador de exclusão de áreas mais suscetíveis à inundação para a implantação das SbN estudadas por seus perfis sensíveis à eventos de grande magnitude.

O mapeamento de aplicabilidade desenvolvido configura-se como uma ferramenta relevante para o planejamento estratégico de intervenções, ao fornecer subsídios objetivos que possibilitam a priorização de áreas para implantação. Os resultados podem subsidiar a incorporação das SbN em políticas públicas e instrumentos urbanísticos, como os Planos Diretores, os PDDrU e os Códigos de Obras, bem como apoiar processos de revisão desses instrumentos, favorecendo maior alinhamento com as dinâmicas territoriais e ambientais locais. Ademais, a utilização desse tipo de abordagem reforça a importância da capacitação técnica e da articulação entre diferentes setores da gestão pública, promovendo uma visão integrada das SbN como estratégias para o desenvolvimento urbano sustentável.

Algumas limitações encontradas durante a pesquisa, como a ausência de dados consolidados sobre a permeabilidade do solo e a carga de sedimentos, evidenciam a necessidade de futuros estudos em escala local, capazes de fornecer diagnósticos mais precisos e refinados sobre as condições locais. Destaca-se, ainda, que a resolução espacial do MDE utilizado (12,5 m) restringe a representação de feições urbanas típicas de pequena escala. Dessa forma, as áreas identificadas como potencialmente aptas à implantação de SbN devem ser interpretadas como indicativas, compatíveis com uma análise primária em escala municipal e coerentes com o objetivo do trabalho. Para aplicações em escala local ou executiva, recomenda-se a utilização de bases topográficas de maior resolução.

Recomenda-se, ainda, o aprimoramento da delimitação da mancha de inundação por meio da aplicação de modelos hidrodinâmicos mais detalhados, visando aumentar a acurácia das análises de risco e o suporte às decisões de planejamento.

Apesar dessas limitações, o presente trabalho se insere como um primeiro passo metodológico, ao adaptar e aplicar abordagens já consolidadas internacionalmente ao contexto regional brasileiro. Embora haja espaço para aprofundamentos futuros, como a incorporação de critérios urbanísticos mais detalhados, análises quantitativas de desempenho e validações em campo, os resultados apresentados contribuem para ampliar o debate sobre a inserção das SbN no planejamento urbano e para reduzir uma lacuna ainda existente na literatura nacional.

Por fim, destaca-se que o valor das SbN transcende sua função hidrológica. Ao promoverem a gestão integrada da vegetação, dos solos e dos corpos hídricos, inclusive em contextos urbanos, essas soluções reforçam o papel dos ecossistemas para o equilíbrio ambiental e a adaptação climática. Assim, contribuem de forma significativa para a construção de cidades mais seguras, sustentáveis e resilientes. O êxito de sua implementação, contudo, depende não apenas de aspectos técnicos e ambientais, mas também da articulação entre poder público, profissionais especializados e comunidade local, sendo a inserção das SbN nas diretrizes urbanísticas, com apoio institucional e participação social, um caminho para transformar essas soluções em instrumentos eficazes de enfrentamento aos desafios das águas urbanas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo financiamento concedido a esta pesquisa através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Soluções baseadas na Natureza (INCT SbN), projeto financiado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), também pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS).

REFERÊNCIAS

Adesoji, T., & Pearce, A. (2024). Interdisciplinary perspectives on green infrastructure: a systematic exploration of definitions and their origins. *Environments*, *11*(1), 8. Recuperado em 17 de abril de 2024, de https://www.mdpi.com/2076-3298/11/1/8

Aerts, J. C. (2018). A review of cost estimates for flood adaptation. *Water*, *10*(11), 1646. Recuperado em 17 de abril de 2024, de http://www.mdpi.com/2073-4441/10/11/1646

Agarwal, D. S., & Bharat, A. (2023). Nature-based solutions for flood–drought mitigation using a composite framework: a case-based approach. *Journal of Water and Climate Change*, *14*(3), 778-795. Recuperado em 17 de abril de 2024, de https://iwaponline.com/jwcc/article/14/3/778/93439/Nature-based-solutions-for-flood-drought

Allende-Prieto, C., Roces-García, J., & Sañudo-Fontaneda, L. Á. (2024). The high-resolution calibration of the topographic wetness index using PAZ satellite radar data to determine the optimal positions for the placement of smart sustainable drainage systems (SuDS) in urban environments. *Sustainability*, *16*(2), 598. Recuperado em 11 de abril de 2025, de https://www.mdpi.com/2071-1050/16/2/598

Alves, P. B., Amanguah, E., McNally, D., Espinoza, M., Ghaedi, H., Reilly, A. C., & Hendricks, M. D. (2024). Navigating the definition of urban flooding: A conceptual and systematic review of the literature. *Water Science & Technology*, *90*(10), 2796-2812. Recuperado em 23 de janeiro de 2026, de https://iwaponline.com/wst/article/90/10/2796/105425/Navigating-the-definition-of-urban-flooding-A

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2025). Resolução ANA nº 245, de 17 de março de 2025. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília. Recuperado em 20 de maio de 2025, de https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2025/245

Brasil. Secretaria Nacional de Defesa Civil. (2013). Portaria Conjunta nº - 148, de 18 de Dezembro de 2013. Estabelece o Protocolo de Ação Integrada para os casos de Inundação Gradual entre a Agência Nacional de Águas - ANA, o Centro Nacional de Monitoramento a Alertas de Desastres Naturais - CEMADEN, representado pela Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento - SEPED/MCTI, o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres - CENAD, representado pela Secretaria Nacional de Defesa Civil - SEDEC/MI e a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília.

Baldwin, M., Fox, A., Klondike, T., Hovis, M., Shear, T., Joca, L., Hester, M., & Cubbage, F. (2022). Geospatial analysis and land suitability for "FloodWise" practices: Nature-based solutions for flood mitigation in Eastern, Rural North Carolina. *Land*, *11*(9), 1504. Recuperado em 5 de dezembro de 2025, de https://www.mdpi.com/2073-445X/11/9/1504

Baptista, M. B., Nascimento, N. O., & Barraud, S. (2016). *Técnicas compensatórias em drenagem urbana*. São Paulo: ABRH.

Barbino, G. C., Silva, J. M., Caramello, N. D. A., & Andrade, N. L. R. (2024). Os eventos extremos como instrumentos de informação na gestão dos recursos hídricos. *Revista Brasileira de Climatologia*, *34*, 224-241. Recuperado em 17 de junho de 2025, de https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/16497

Blagojević, B., Vasilevska, L., Anđelković, D., Bogojević, A., & Lousada, S. (2023). A framework for assessing nature-based urban stormwater management solutions: a preliminary spatial analysis approach applied to Southeast Serbia. *Water, 15*(20), 3604. Recuperado em 17 de abril de 2024, de https://www.mdpi.com/2073-4441/15/20/3604

Bombassaro, M., & Robaina, L. E. S. (2010). Contribuição geográfica para o estudo das inundações na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, RS. *Revista Geografias*, *6*(2), 69-86. Recuperado em 27 de abril de 2024, de https://periodicos.ufmg.br/index.php/geografias/article/view/13297

Caloir, B. E. G., Abebe, Y. A., Vojinovic, Z., Sanchez, A., Mubeen, A., Ruangpan, L., Manojlovic, N., Plavsic, J., & Djordjevic, S. (2023). Combining machine learning and spatial data processing techniques for allocation of large-scale nature-based solutions. *Blue-Green Systems, 5*(2), 186-199. Recuperado em 7 de novembro de 2025, de https://iwaponline.com/bgs/article/5/2/186/98780/Combining-machine-learning-and-spatial-data

Caputo, H. P., & Caputo, A. N. (2022). *Mecânica dos solos – Teoria e aplicação* (8. ed.). Rio de Janeiro: LTC Editora.

Castro, C. V. (2022). Systems-thinking for environmental policy coherence: Stakeholder knowledge, fuzzy logic, and causal reasoning. *Environmental Science & Policy*, *136*, 413-427. Recuperado em 11 de abril de 2025, de https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S146290112200209X

Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais – CEMADEN. (2024). *Nota Técnica No 469/2024/SEI-CEMADEN*. São José dos Campos: CEMADEN.

Cohen-Shacham, E., Janzen, C., Maginnis, S., & Walters, G. (Org.). (2016). *Nature-based solutions to address global societal challenges*. Gland, Switzerland: IUCN. Recuperado em 8 de agosto de 2023, de https://portals.iucn.org/library/node/46191

Collischonn, W., & Dornelles, F. (2017). *Hidrologia para engenharia e ciências ambientais*. São Paulo: ABRH.

Eckhardt, R. R. (2008). *Geração de modelo cartográfico aplicado ao mapeamento das áreas sujeitas às inundações urbanas na cidade de Lajeado/RS* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Recuperado em 6 de fevereiro de 2025, de http://hdl.handle.net/10183/13755

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília: Embrapa.

United States Environmental Protection Agency – EPA. (2025). *National Menu of Best Management Practices (BMPs) for Stormwater*. Recuperado em 27 de abril de 2025, de https://www.epa.gov/npdes/national-menu-best-management-practices-bmps-stormwater

Feitosa, F. A. C., Manoel Filho, J., Feitosa, E. C., & Demetrio, J. G. A. (Org.). (2008). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Rio de Janeiro: CPRM.

Fritzen, M., & Binda, A. L. (2011). Alterações no ciclo hidrológico em áreas urbanas: cidade, hidrologia e impactos no ambiente. *Ateliê Geográfico*, *5*(3), 239-254. Recuperado em 4 de fevereiro de 2025, de http://www.revistas.ufg.br/index.php/atelie/article/view/16703

Genovez, A. M., Lombardi Neto, F., & 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), 5-18. Recuperado em 12 de abril de 2025, de http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=26&SUMARIO=440

Ghosh, P., Sudarsan, J. S., & Nithiyanantham, S. (2024). Nature-based disaster risk reduction of floods in urban areas. *Water Resources Management*, *38*(6), 1847-1866. Recuperado em 23 de janeiro de 2026, de https://link.springer.com/10.1007/s11269-024-03757-4

Hu, S., Fan, Y., & Zhang, T. (2020). Assessing the effect of land use change on surface runoff in a rapidly urbanized city: a case study of the central area of Beijing. *Land*, *9*(1), 17. Recuperado em 23 de janeiro de 2026, de https://www.mdpi.com/2073-445X/9/1/17

Huang, S., Gan, Y., Chen, N., Wang, C., Zhang, X., Li, C., & Horton, D. E. (2024). Urbanization enhances channel and surface runoff: A quantitative analysis using both physical and empirical models over the Yangtze River basin. *Journal of Hydrology*, *635*, 131194. Recuperado em 23 de janeiro de 2026, de https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169424005894

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2025a). *Estrela*. Recuperado em 19 de fevereiro de 2025, de https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/estrela/panorama

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2025b). *Pedologia*. Recuperado em 12 de abril de 2025, de https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2023). *Malha municipal*. Recuperado em 14 de fevereiro de 2024, de https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2021). *Bacias e divisões hidrográficas do Brasil*. Recuperado em 7 de janeiro de 2025, de https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/estudos-ambientais/31653-bacias-e-divisoes-hidrograficas-do-brasil.html?=&t=acesso-ao-produto

Japan Aerospace Exploration Agency – JAXA (2025). *ALOS science program*. Recuperado em 9 de abril de 2025, de https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/alos/science_program_e.htm#concept

Kaykhosravi, S., Abogadil, K., Khan, U. T., & Jadidi, M. A. (2019). The low-impact development demand index: A new approach to identifying locations for LID. *Water*, *11*(11), 2341. Recuperado em 18 de abril de 2024, de https://www.mdpi.com/2073-4441/11/11/2341

Kuksina, L., & Golosov, V. (2020). Flash floods: formation, study and distribution. *E3S Web of Conferences*, *163*, 02005. Recuperado em 23 de janeiro de 2026, de https://www.e3s-conferences.org/10.1051/e3sconf/202016302005

Kuller, M., Bach, P. M., Roberts, S., Browne, D., & Deletic, A. (2019). A planning-support tool for spatial suitability assessment of green urban stormwater infrastructure. *Science Of The Total Environment*, *686*, 856-868. Recuperado em 18 de abril de 2024, de https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969719326129

Kurek, R. K. M. (2012). *Avaliação do tempo de retorno dos níveis das inundações no Vale do Taquari/RS* (Monografia de graduação). Centro Universitário UNIVATES, Lajeado.

Mandarino, A., Faccini, F., Luino, F., Bono, B., & Turconi, L. (2023). Integrated approach for the study of urban expansion and river floods aimed at hydrogeomorphic risk reduction. *Remote Sensing*, *15*(17), 4158. Recuperado em 23 de janeiro de 2026, de https://www.mdpi.com/2072-4292/15/17/4158

Mapbiomas. (2024). *Cobertura*. Recuperado em 23 de janeiro de 2026, de https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/.

Martin-Mikle, C. J., de Beurs, K. M., Julian, J. P., & Mayer, P. M. (2015). Identifying priority sites for low impact development (LID) in a mixed-use watershed. *Landscape and Urban Planning*, *140*, 29-41. Recuperado em 18 de abril de 2024, de https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016920461500078X

Melisa, C. K., Varol, N., & Gungor, O. (2020). Investigation of the role of land use method on increased flood vulnerability in rural areas: a case study on Güneysu River, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, *13*(13), 578. Recuperado em 23 de janeiro de 2026, de https://link.springer.com/10.1007/s12517-020-05627-w

Meshram, S. G., Ilderomi, A. R., Sepehri, M., Jahanbakhshi, F., Kiani-Harchegani, M., Ghahramani, A., & Rodrigo-Comino, J. (2021). Impact of roof rain water harvesting of runoff capture and household consumption. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(36), 49529-49540. Recuperado em 18 de abril de 2024, de https://link.springer.com/10.1007/s11356-021-14098-9

Microsoft Bing. (2023). *Bing maps global building footprints released*. Recuperado em 26 de abril de 2024, de https://blogs.bing.com/maps/2023-06/Bing-Maps-Global-Building-Footprints-released

Monteiro, C. M., Mendes, A. M., & Santos, C. (2023). Green roofs as an urban NbS strategy for rainwater retention: Influencing factors—A review. *Water*, *15*(15), 2787. Recuperado em 11 de abril de 2025, de https://www.mdpi.com/2073-4441/15/15/2787

Moraes, S. R., Collischonn, W., Buffon, F. T., & Eckhardt, R. R. (2024). *Revisão e consolidação da série histórica dos níveis das cheias do rio Taquari em Lajeado de 1939 a 2023*. Recuperado em 20 de fevereiro de 2025, de http://www.bibliotecadigital.ufrgs.br/da.php?nrb=001199403&loc=2024&l=7818d897802ef3c6

Neumann, V. A., & Hack, J. (2019). A methodology of policy assessment at the municipal level: Costa Rica´ s readiness for the implementation of nature-based-solutions for urban stormwater management. *Sustainability, 12*(1), 230. Recuperado em 11 de abril de 2025, de https://www.mdpi.com/2071-1050/12/1/230

Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M., Rennó, C. D., Rodrigues, G., Silveira, A., & Saleska, S. (2011). Height Above the Nearest Drainage–a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, *404*(1-2), 13-29. Recuperado em 9 de abril de 2025, de https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169411002599

Oliveira, G. G. D., Eckhardt, R. R., Haetinger, C., & Alves, A. (2018). Caracterização espacial das áreas suscetíveis a inundações e enxurradas na Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas. *Geociencias*, *37(4), 849-863.* Recuperado em 3 de fevereiro de 2025, de https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/12312

Pacetti, T., Cioli, S., Castelli, G., Bresci, E., Pampaloni, M., Pileggi, T., & Caporali, E. (2022). Planning Nature Based Solutions against urban pluvial flooding in heritage cities: A spatial multi criteria approach for the city of Florence (Italy). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *41*, 101081. Recuperado em 18 de abril de 2024, de https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214581822000945

Pappalardo, V., & La Rosa, D. (2020). Policies for sustainable drainage systems in urban contexts within performance-based planning approaches. *Sustainable Cities and Society*, *52*, 101830. Recuperado em 23 de janeiro de 2026, de https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210670719317986

Patussi, I. L. L. (2025). *Requisitos para implementação de dispositivos de SbN de drenagem levando em conta particularidades regionais* (Monografia de graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre. No prelo.

Polis, E. (2013). *Geração da carta de inundação na zona urbana de Estrela/RS* (Monografia de graduação). Centro Universitário UNIVATES, Lajeado.

Possantti, I., Laipelt, L., Moraes, S. R., Zanandrea, F., Eckhardt, R. R., Michel, G. P., Fan, F., Paiva, R., Ruhoff, A., Marques, G., Kobiyama, M., & Collischonn, W. (2023). *Banco de dados da cheia do Rio Taquari-Antas de 2023*. Recuperado em 26 de abril de 2025, de https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.8368530

Estrela. (2025). *Mapeamento Ambiental - Estrela/RS*. Recuperado em 24 de fevereiro de 2025, de https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?mid=1HOKtc3Hrm77QEPSHNrFzNaeaqak&ll=-29.515711757232065%2C-51.94527487940497&z=12

Romano, O., & Akhmouch, A. (2019). Water governance in cities: current trends and future challenges. *Water*, *11*(3), 500. Recuperado em 23 de janeiro de 2026, de https://www.mdpi.com/2073-4441/11/3/500

Sarabi, S., Han, Q., Romme, A. G. L., De Vries, B., Valkenburg, R., & Den Ouden, E. (2020). Uptake and implementation of nature-based solutions: an analysis of barriers using interpretive structural modeling. *Journal of Environmental Management*, *270*, 110749. Recuperado em 11 de abril de 2025, de https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479720306812

Sccoti, A. A. V., Pereira, S., Bateira, C., Robaina, L. E. S., & Trentin, R. (2024). Identificação dos elementos expostos à inundação em Estrela e Lajeado, Rio Grande do Sul, Brasil. *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, *12*, 147-151.

Silveira, G. B., Ribeiro Rodrigues, L. H., & Dornelles, F. (2025a). Nature-based Solutions (NbS) for urban drainage: A review focused on sustainable stormwater management. *Urban Water Journal*, *22*(6), 627-641. Recuperado em 7 de maio de 2025, de https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1573062X.2025.2494784

Silveira, G. B., Rodrigues, L. H. R., & Dornelles, F. (2025b). Uso de soluções baseadas na natureza (SbN) pela gestão pública brasileira no manejo de águas pluviais urbanas. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, *17*, e20240012. Recuperado em 7 de maio de 2025, de http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2175-33692025000100200&tlng=pt

Sørup, H. J. D., Fryd, O., Liu, L., Arnbjerg-Nielsen, K., & Jensen, M. B. (2019). An SDG-based framework for assessing urban stormwater management systems. *Blue-Green Systems*, *1*(1), 102-118. Recuperado em 18 de abril de 2024, de https://iwaponline.com/bgs/article/1/1/102/70194/An-SDG-based-framework-for-assessing-urban

Sousa, R. V. B., & Rocha, P. C. (2022). Inundações e conceitos correlatos: revisão bibliográfica e análise comparativa. In O. A. Carvalho Júnior, M. C. V. Gomes, R. F. Guimarães, & R. A. T. Gomes (Eds.), *Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira* (pp. 265-277). Brasília: Universidade de Brasília. Recuperado em 4 de fevereiro de 2025, de https://livros.unb.br/index.php/portal/catalog/view/376/593/6641

Su, J., Wang, M., Razi, M. A. M., Dom, N. M., Sulaiman, N., & Tan, L. W. (2023). A bibliometric review of nature-based solutions on urban stormwater management. *Sustainability*, *15*(9), 7281. Recuperado em 18 de abril de 2024, de https://www.mdpi.com/2071-1050/15/9/7281

Technische Universität München. (2025). *Acerca de SIRGAS*. Recuperado em 14 de abril de 2025, de https://www.sirgas.org/pt/sirgas-definition/

Tiepolo, M., & Galligari, A. (2021). Urban expansion-flood damage nexus: Evidence from the Dosso Region, Niger. *Land Use Policy*, *108*, 105547. Recuperado em 23 de janeiro de 2026, de https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264837721002702

Tucci, C. E. M. (Org.). (2001). *Hidrologia: ciência e aplicação* (2. ed.). Porto Alegre: Editora da UFRGS.

Tucci, C. E. M. (2007). Inundações urbanas. São Paulo: ABRH.

Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura – UNESCO. (2018). *Relatório mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos 2018: Soluções baseadas na Natureza para a gestão da água - resumo executivo*. Recuperado em 25 de abril de 2025, de https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261594_por

Wübbelmann, T., Förster, K., Bouwer, L. M., Dworczyk, C., Bender, S., & Burkhard, B. (2023). Urban flood regulating ecosystem services under climate change: how can Nature-based Solutions contribute? *Frontiers in Water*, *5*, 1081850. Recuperado em 21 de maio de 2024, de https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frwa.2023.1081850/full

Zuniga-Teran, A. A., Staddon, C., De Vito, L., Gerlak, A. K., Ward, S., Schoeman, Y., Hart, A., & Booth, G. (2020). Challenges of mainstreaming green infrastructure in built environment professions. *Journal of Environmental Planning and Management*, *63*(4), 710-732. Recuperado em 11 de abril de 2025, de https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09640568.2019.1605890

Contribuições dos autores:

Gabriela Borba Silveira: concepção do estudo; elaboração do referencial teórico; definição da metodologia adotada; coleta, organização e análise dos dados; redação integral do manuscrito; e consolidação das principais conclusões.

Lucia Helena Ribeiro Rodrigues: revisão crítica do conteúdo; validação metodológica; supervisão geral do desenvolvimento do trabalho; sugestões e orientações para consistência teórica, clareza dos resultados e qualidade final do texto.

Fernando Dornelles: revisão crítica do conteúdo; validação metodológica; supervisão geral do desenvolvimento do trabalho; sugestões e orientações para consistência teórica, clareza dos resultados e qualidade final do texto.