MITIGAÇÃO DE ALAGAMENTOS POR SISTEMA DIVERSIFICADO DE SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA PARA RECUPERAÇÃO DA CAPACIDADE OPERACIONAL DE REDE DE MICRODRENAGEM: ESTUDO DE CASO EM SUZANO (SP)

Bruna Siqueira Aguiar[(1)]
Engenheira Civil formada pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), com formação técnica em Edificações pela ETEC. Atua na área de saneamento e infraestrutura urbana na Engecorps Engenharia S.A., com interesse em drenagem urbana sustentável e Soluções Baseadas na Natureza.

Endereço[(1)]**:** Rua Sete de Setembro, 1257 - Centro - São Carlos - SP - CEP: 13560-180 - Brasil - Tel: +55 (15) 99719-5918 - e-mail: brunasiqueira@alumni.usp.br.
Qualificação do Autor Principal em estilo normal, fonte Times New Roman, corpo 10, alinhamento de parágrafo justificado, que deverá abranger um resumo curricular que não exceda a 5 (cinco) linhas.

RESUMO

Os sistemas de microdrenagem em áreas urbanas periféricas frequentemente operam no limite de sua capacidade, reflexo da impermeabilização progressiva sem ampliação correspondente da infraestrutura. Este estudo propõe e avalia um sistema diversificado de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) para mitigação dos alagamentos recorrentes na microbacia do Bairro Cidade Miguel Badra, Suzano (SP), com apoio da modelagem *Building Information Modeling* (BIM). O diagnóstico hidrológico revelou vazão de pico de 4,47 m³/s frente a uma capacidade de rede de 4,63 m³/s, margem de apenas 3,5%. Foram dimensionadas três tipologias complementares: reservatório de lote híbrido (113 m³), calçada drenante (1.624 m³) e praça esponja multifuncional (607 m³), totalizando 2.344 m³ de armazenamento. A modelagem BIM no Autodesk Revit viabilizou o dimensionamento paramétrico de 48 trechos de calçada com larguras variáveis. A análise comparativa em três cenários cumulativos demonstrou que o sistema integrado reduz o coeficiente de escoamento de C = 0,75 para Cmit = 0,23 (ΔC = 0,52), com eficiência de pico EQ = 69,60% e índice volumétrico IV = 52,54%. As SbN não substituem a infraestrutura cinza existente, mas restauram sua folga hidráulica. O método proposto é replicável em microbacias urbanas consolidadas com perfil similar.

Palavras-chave: Drenagem urbana, Soluções baseadas na natureza, BIM

1. INTRODUÇÃO

O processo acelerado de urbanização nas últimas décadas tem alterado significativamente o ciclo hidrológico natural, sobretudo pela intensificação da impermeabilização dos solos urbanos e pela redução das áreas de infiltração. Conforme o Censo de 2022, dos mais de 203 milhões de brasileiros, 177,5 milhões residiam em áreas urbanas (IBGE, 2022b), e nos últimos 38 anos a área urbanizada do país triplicou (MAPBIOMAS, 2023). Entre 1985 e 2022, a cada 100 hectares de urbanização, 11,5 foram implantados em áreas suscetíveis a inundações (MAPBIOMAS, 2023). Como consequência direta, verifica-se o aumento da frequência e da severidade dos eventos de alagamento, comprometendo não apenas a infraestrutura urbana, mas também a eficiência dos sistemas de saneamento básico. A sobrecarga das redes de drenagem intensifica o transporte de sedimentos, poluentes orgânicos e metais pesados para os corpos receptores, agravando a contaminação hídrica e os riscos à saúde pública (TUCCI, 2008; BEZERRA et al., 2020). Atualmente, um terço dos municípios brasileiros, 1.932 cidades contemplando 73% da população, são classificados como altamente suscetíveis a desastres hidrológicos (BRASIL, 2023), evidenciando a urgência de soluções que promovam não apenas o controle das vazões, mas a resiliência integrada dos sistemas urbanos de drenagem e saneamento.

A infraestrutura cinza é o conjunto de soluções convencionais de drenagem urbana, fundamentada na rápida condução do escoamento superficial excedente para jusante, visando mitigar alagamentos (ANA, 2025). Compreende sistemas de microdrenagem, como guias, sarjetas, bocas coletoras e galerias, e de macrodrenagem, como canais artificiais e reservatórios de detenção (BRASIL, 2019). Esse tipo de sistema depende da ocupação do solo vigente em sua concepção, tornando-se insuficiente frente ao crescimento urbano

desordenado e gerando necessidade constante de manutenções e ampliações. Como consequência, gera alagamentos por sobrecarga do sistema, contribui para a redução da infiltração de água no solo e para o esvaziamento dos reservatórios subterrâneos, comprometendo o ciclo hidrológico (BEZERRA et al., 2020). Além disso, o escoamento pluvial carrega poluentes orgânicos e metais pesados para os corpos receptores, principalmente durante eventos de precipitação intensa (TUCCI, 2008; BEZERRA et al., 2020). Torna-se, portanto, indispensável a adoção de estratégias complementares que incorporem processos naturais e promovam retenção e infiltração, não como substituição à infraestrutura existente, mas como reforço à sua capacidade operacional.

O Bairro Cidade Miguel Badra, localizado no município de Suzano, na Região Metropolitana de São Paulo, constitui um exemplo representativo dos desafios de drenagem urbana enfrentados em áreas periféricas brasileiras. Trata-se de um bairro com elevada vulnerabilidade social e expressivo número de moradias em situação irregular, reflexo de um histórico de ocupação desordenada e carência de infraestrutura urbana (SILVA, 2018). O problema dos alagamentos não é recente nem pontual: registros públicos documentam ocorrências recorrentes ao longo de mais de uma década, de 2014 a 2025, conforme ilustrado na Figura 1. Essa persistência revela não apenas a fragilidade da infraestrutura de drenagem existente, mas também a insuficiência de intervenções isoladas frente a um problema de natureza sistêmica, justificando a necessidade de soluções estruturadas e tecnicamente robustas.

Figura 1 - Linha do tempo com registros de alagamentos no Bairro Cidade Miguel Badra, Suzano (SP).

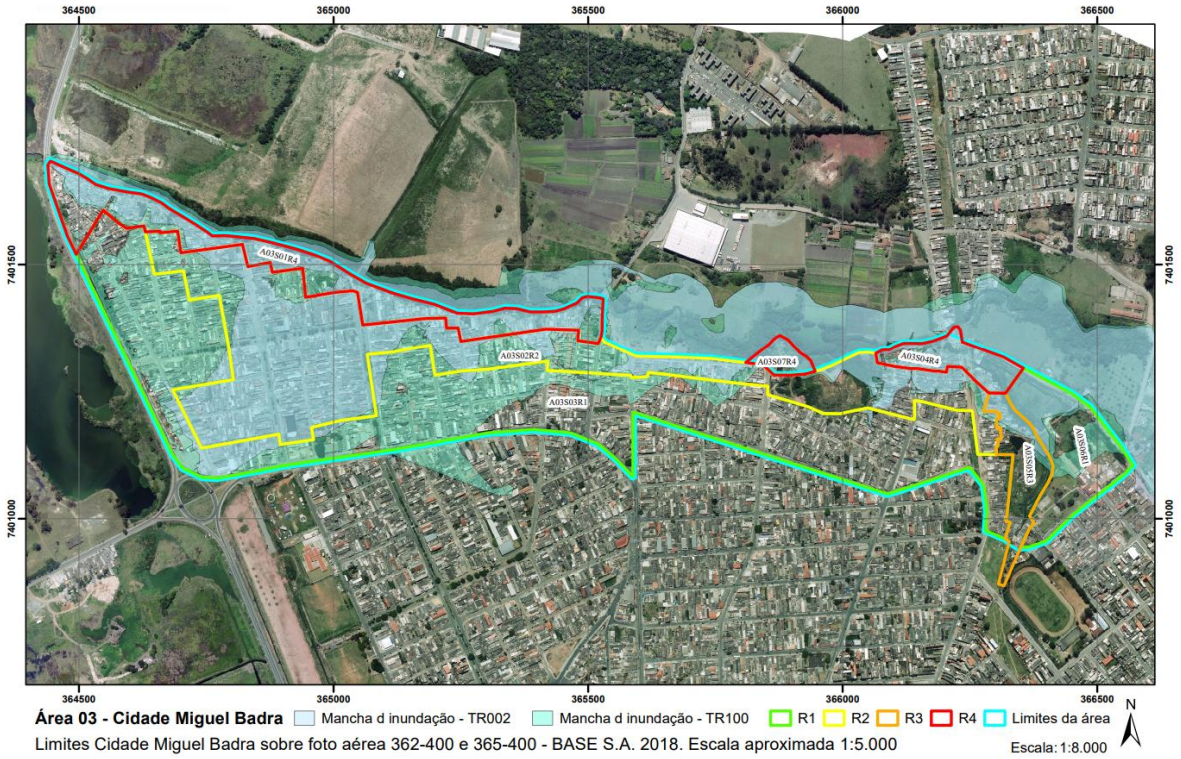


Fonte: Elaborado pela autora a partir de notícias públicas (2014–2025).

O território do Bairro Cidade Miguel Badra apresenta condicionantes ambientais e urbanos que ampliam a complexidade do problema. O bairro está localizado no limite de uma Área de Proteção Ambiental (APA) do

Rio Tietê (IBGE, 2022a), contexto que reforça a adequação de soluções que incorporem processos naturais de infiltração e retenção como complemento à infraestrutura existente. Adicionalmente, segundo o Plano Municipal de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais de Suzano (PMDMAP), a envoltória de inundação da bacia do Ribeirão Jaguari atinge o bairro, sendo esta uma das áreas de maior incidência de ocorrências registradas pela Defesa Civil, conforme ilustrado na Figura 2, o que reforça a urgência de intervenções sustentáveis na microbacia. No âmbito municipal, a área de estudo conta com uma praça pública de dimensões consideráveis, atualmente subutilizada, cuja requalificação está alinhada ao programa "Suzano Mais Praças", que prevê a implantação e revitalização de áreas verdes no município (DIÁRIO DE SUZANO, 2025), evidenciando a viabilidade institucional de uma das intervenções propostas.

Figura 2 - Mancha de inundação à jusante da bacia Ribeirão Jaguari e suas áreas de risco.



Fonte: Produto 23 do Plano Municipal de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais do município de Suzano.

As Soluções Baseadas na Natureza (SbN) representam a base conceitual da infraestrutura verde e consistem em ações para proteger, gerir de forma sustentável e restaurar ecossistemas naturais ou modificados, enfrentando desafios sociais e proporcionando bem-estar humano (IUCN, 2020). No contexto da drenagem urbana, operam a partir dos princípios de redução, retenção e absorção do escoamento superficial, aumentando o tempo de concentração, reduzindo os picos de vazão e contribuindo para a recarga dos aquíferos (EPA, 2022). Além do controle hidrológico, essas soluções promovem melhoria na qualidade da água, redução da carga de poluentes transportada para os corpos receptores, ampliação de áreas verdes e aumento da biodiversidade (ANA, 2025; EPA, 2022). Esses benefícios ganham especial relevância em áreas vulneráveis próximas a corpos hídricos protegidos, como é o caso da área de estudo.

A seleção das tipologias de SbN adequadas a cada contexto requer uma abordagem técnica que considere as características físicas, hidrológicas, urbanísticas e espaciais da área de intervenção, incluindo o volume e a qualidade do escoamento superficial e os padrões de uso e ocupação do solo (EPA, 2022; ANA, 2025). Em áreas urbanas consolidadas e adensadas, nas quais predominam superfícies impermeáveis e há restrição de espaço, podem ser adotadas, conforme as condições locais, soluções como pavimentos permeáveis, calçadas drenantes e dispositivos distribuídos de detenção, retenção ou aproveitamento de águas pluviais. Essas tipologias podem desempenhar funções complementares de infiltração, armazenamento temporário, retenção e

tratamento do escoamento, possibilitando a composição de sistemas diversificados e integrados à infraestrutura convencional de drenagem (ANA, 2025). Nesse contexto, o presente estudo propõe um sistema dimensionado de acordo com as características morfológicas e hidrológicas de uma microbacia urbana periférica, combinando soluções distribuídas, lineares e concentradas de forma complementar à rede de microdrenagem existente.

2. OBJETIVOS

O presente estudo tem por objetivo geral propor e avaliar a eficiência hidrológica de um sistema diversificado de Soluções Baseadas na Natureza (SbN), combinando intervenções distribuídas, lineares e concentradas, para mitigação dos alagamentos recorrentes na microbacia do Bairro Cidade Miguel Badra, em Suzano (SP), com apoio da modelagem *Building Information Modeling* (BIM).

Os objetivos específicos são:

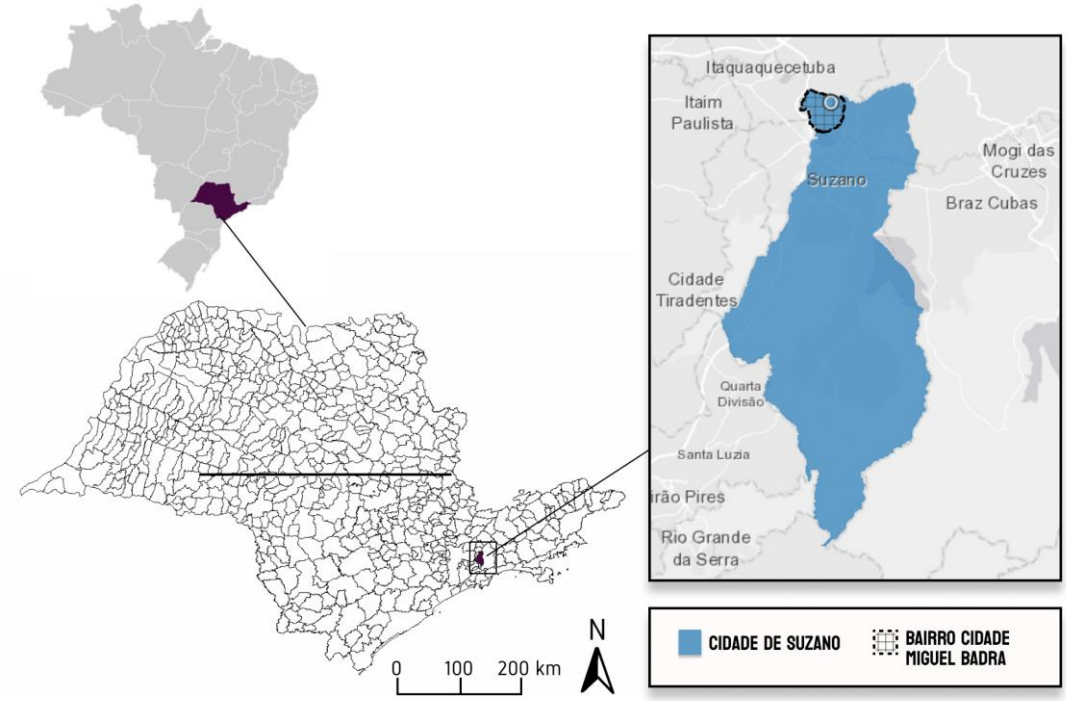
- Diagnosticar as condições hidrológicas e hidráulicas da microbacia, estimando a vazão de pico pelo método racional e verificando a capacidade da rede existente pela equação de Manning.
- Selecionar e dimensionar SbN adequadas ao contexto urbano do bairro, orientadas por critérios hidrológicos, urbanísticos e espaciais.
- Modelar as intervenções em ambiente BIM, integrando dados hidráulicos e espaciais em modelo paramétrico tridimensional.
- Comparar o desempenho hidrológico dos cenários propostos em relação ao cenário atual, avaliando eficiência de redução de pico, índice volumétrico e coeficiente de escoamento efetivo.

3. METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

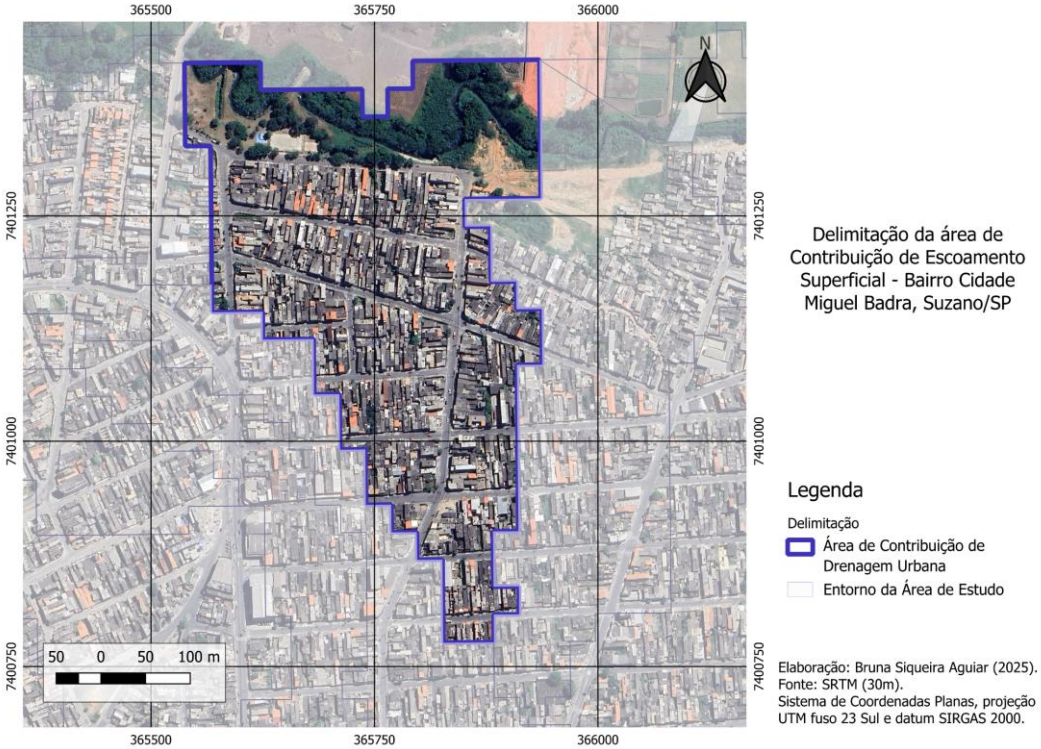
A área de estudo corresponde a uma microbacia urbana de 0,17 km² (165.850 m²) localizada no Bairro Cidade Miguel Badra, município de Suzano, na Região Metropolitana de São Paulo. A delimitação da área de contribuição foi realizada no *software* QGIS, com base em imagem Google Satellite e em um Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução espacial de 30 metros, reprojetado para o sistema SIRGAS 2000/UTM zona 23S. A partir do processamento hidrológico do MDE, com geração de camadas de direção e acumulação de fluxo, foram delimitadas as sub-bacias da área. A sub-bacia selecionada foi adotada por apresentar superfície impermeabilizada expressiva, inserção na mancha de inundação da bacia do Ribeirão Jaguari, quarteirões bem definidos e condições favoráveis à implantação de soluções sustentáveis. A área conta ainda com uma praça pública de dimensões consideráveis na porção norte, atualmente subutilizada e única área verde pública dentro da microbacia. A localização do bairro no município e a área de contribuição adotada são apresentadas nas Figuras 3 e 4.

Figura 3 - Localização ilustrativa do bairro Cidade Miguel Badra, Suzano (SP).



Fonte: Elaborado a partir de dados do GEOSuzano (PREFEITURA DE SUZANO, [s.d.]).

Figura 4 - Área de contribuição de escoamento superficial selecionada para o estudo no Bairro Cidade Miguel Badra.



Fonte: Elaborado com base em dados do SRTM (30 m), processamento no software QGIS.

A caracterização do uso e ocupação do solo foi realizada a partir da análise das superfícies impermeáveis e permeáveis identificadas na microbacia, com base em imagens de satélite e dados vetoriais da plataforma GeoSuzano (PREFEITURA DE SUZANO, [s.d.]) . Para as áreas urbanas pavimentadas, concretadas ou cobertas por telhados, adotou-se coeficiente de escoamento C = 0,95, e para áreas de parques e matas, C = 0,10, conforme valores tabelados no Manual de Drenagem Urbana da Prefeitura de Suzano (2020a). Os dados pluviométricos foram obtidos a partir das curvas IDF (Intensidade, Duração e Frequência) do município de Suzano, disponibilizadas no Plano Municipal de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais (Prefeitura de Suzano, 2020b), adotando-se tempo de retorno (TR) de 2 anos, correspondente ao uso residencial, e tempo de duração igual ao tempo de concentração (tc) da bacia.

3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA

A modelagem hidrológica do cenário atual foi desenvolvida pelo método racional, indicado para microbacias urbanas com área inferior a 2 km² por sua simplicidade e eficácia na estimativa de vazões de pico em projetos de microdrenagem (TUCCI, 2008; DNIT, 2005). O método relaciona a vazão máxima ao coeficiente de escoamento médio ponderado (C), à intensidade máxima de precipitação (imáx) e à área da bacia (A), conforme a Equação 1:

$$\mathbf{Qmáx = 0{,}278 \cdot C \cdot imáx \cdot A} \qquad \mathbf{(1)}$$

A intensidade de precipitação foi obtida pelas equações IDF do município de Suzano (Prefeitura de Suzano, 2020b), com TR = 2 anos e tempo de duração igual ao tc, calculado pela equação de Kirpich (1940) a partir do comprimento do percurso principal e do desnível altimétrico extraídos do MDE. O volume de escoamento do evento foi estimado pelo hidrograma triangular, com tempo de ascensão igual a tc e tempo de recessão igual a 2tc, conforme Porto (1995 apud TOMAZ, 2012).

A capacidade hidráulica da rede existente foi verificada pela equação de Manning, aplicada ao trecho final da microbacia, imediatamente a montante do exutório, adotado como elemento de controle da bacia. Por ausência de cadastro da rede pluvial, assumiu-se conduto circular com diâmetro mínimo Dmín = 0,40 m, conforme o Manual de Drenagem Urbana de Suzano (2020a), coeficiente de rugosidade n = 0,012, usual para tubos de concreto, e declividade obtida na plataforma GeoSuzano (PREFEITURA DE SUZANO, [s.d.]) . A capacidade hidráulica foi calculada para duas condições de enchimento: y0/D = 0,94, correspondente à vazão máxima em condutos circulares, e y0/D = 0,75, condição usual de projeto, conforme Porto (2006). Os resultados foram comparados à vazão de pico obtida pelo método racional, permitindo diagnosticar a margem operacional da rede e evidenciar a necessidade de intervenções complementares. Os parâmetros adotados estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros adotados na verificação hidráulica pela equação de Manning.

Parâmetro	Volume (m³)
Diâmetro mínimo (Dmín)	0,40 m
Coeficiente de rugosidade (n)	0,012
Declividade (S)	Obtido na plataforma GeoSuzano (PREFEITURA DE SUZANO, [s.d.])
Condição de enchimento 1 (y0/D)	0,94 (vazão máxima em condutos circulares)
Condição de enchimento 1 (y0/D)	0,75 (condição usual de projeto)

Fonte: A autora.

3.3 SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DAS SBN

A seleção das Soluções Baseadas na Natureza foi orientada pela natureza multifonte do problema identificado no diagnóstico: o escoamento superficial da microbacia é gerado em diferentes tipos de superfície, cada um exigindo uma resposta específica. Cada solução foi definida para interceptar a fração do escoamento originada

em um desses tipos, sem sobreposição de área de contribuição: os reservatórios de lote atuam sobre o escoamento gerado pelos telhados, as calçadas drenantes sobre o escoamento dos passeios, e a praça esponja sobre o volume concentrado na porção jusante da microbacia. A Tabela 2 apresenta uma síntese das principais características de cada tipologia, cujas descrições detalhadas são apresentadas nas subseções seguintes.

Tabela 2 - Síntese das tipologias de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) avaliadas e suas principais características.

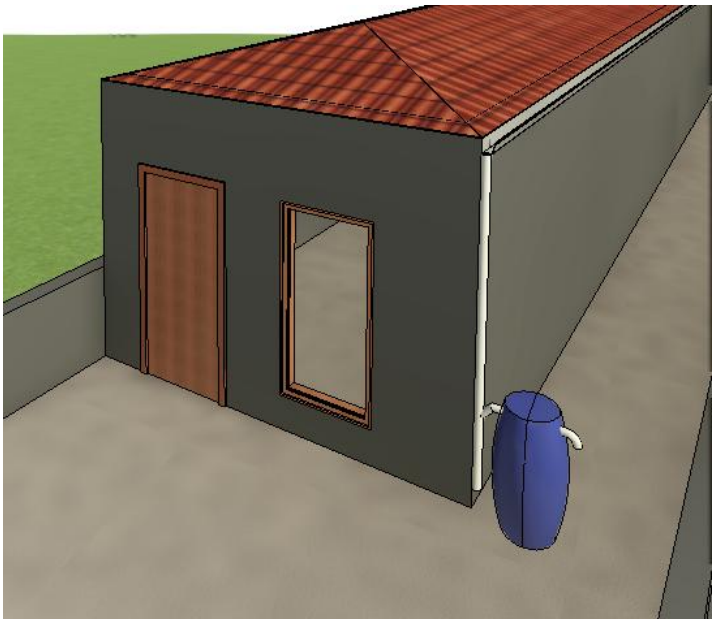
Tipologia	Descrição	Objetivo principal
Reservatórios de Lote	Sistema descentralizado de reservatórios em PEAD instalados nos lotes residenciais para armazenamento temporário das águas pluviais.	Detenção na fonte e redução do pico de vazão.
Calçadas drenantes	Pavimento permeável implantado ao longo do sistema viário, com camada granular para armazenamento e infiltração.	Redução do escoamento superficial e promoção da infiltração.
Praça esponja	Área pública multifuncional projetada para retenção temporária e infiltração das águas pluviais.	Amortecimento dos picos de vazão e aumento do armazenamento.

Fonte: A autora.

Observa-se que as tipologias representam diferentes estratégias de implantação das Soluções Baseadas na Natureza, abrangendo intervenções distribuídas (reservatórios de lote), lineares (calçadas drenantes) e pontuais ou localizadas (praça esponja), permitindo avaliar a contribuição de diferentes escalas de atuação no desempenho hidrológico da bacia

Nos lotes residenciais, foi proposto o reservatório de lote híbrido, composto por bombonas modulares em polietileno de alta densidade (PEAD) conectadas às calhas dos telhados existentes. O sistema combina detenção temporária e reuso não potável, sendo o volume superior dotado de extravasor que direciona o excedente para as calçadas drenantes a jusante. O volume útil unitário foi determinado pela geometria interna do reservatório e o volume total obtido pela multiplicação do volume unitário pelo número de lotes identificados na área de estudo. O esquema do reservatório de lote híbrido proposto é apresentado na Figura 5.

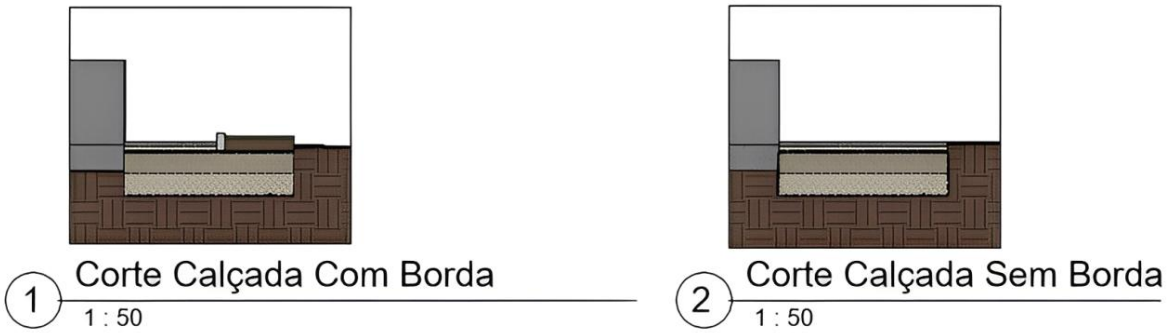
Figura 5 - Esquema do reservatório de lote híbrido proposto para os lotes da área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora no software Revit (AUTODESK INC., 2023).

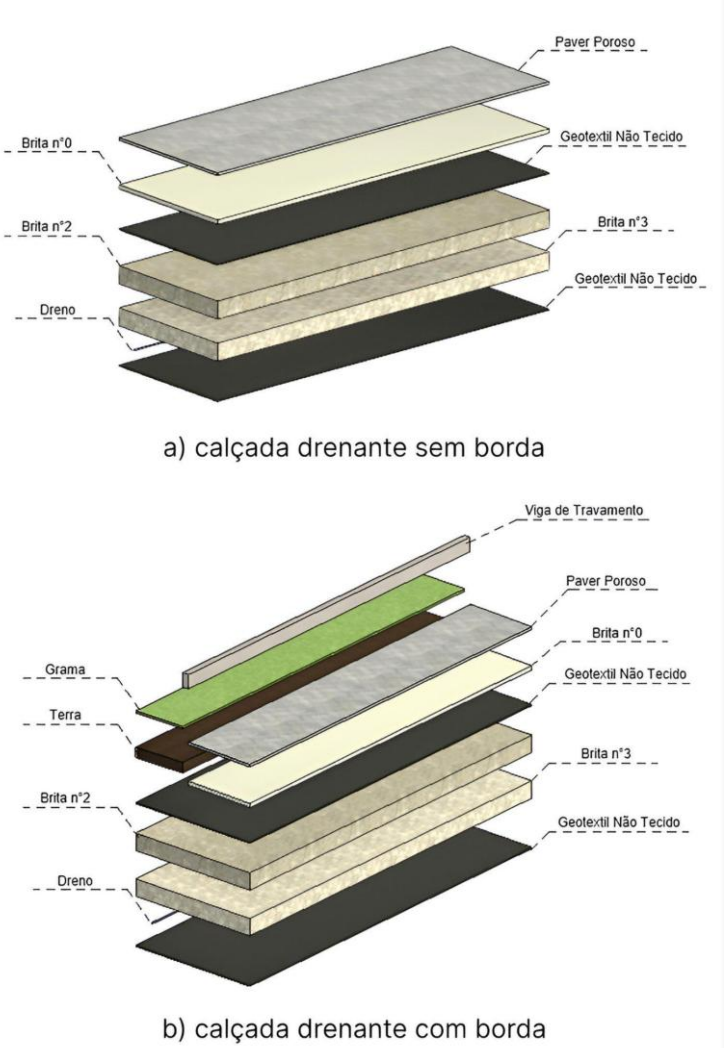
Nos passeios públicos, foi adotada a calçada drenante, composta por vala de infiltração preenchida com camadas granulares de brita, manta geotêxtil não tecida e pavimento de blocos de concreto poroso tipo *paver* na superfície. A espessura da camada drenante foi adotada como h = 0,50 m e a porosidade como n = 0,33, correspondente à brita nº 1, conforme Aguiar et al. (2019), garantindo condição conservadora no dimensionamento. Foram definidas duas tipologias: calçada drenante sem borda, para passeios com largura inferior a 2,5 m, e calçada drenante com borda, para larguras iguais ou superiores a 2,5 m, preservando faixa mínima de circulação de 1,20 m. O dimensionamento foi realizado para 48 trechos de calçada com larguras variáveis, com volumes calculados a partir do modelo BIM. As tipologias são apresentadas nas Figuras 6 e 7.

Figura 6 - Cortes típicos das tipologias de calçada drenante: sem borda e com borda.



Fonte: Elaborado pela autora no software Revit (AUTODESK INC., 2023).

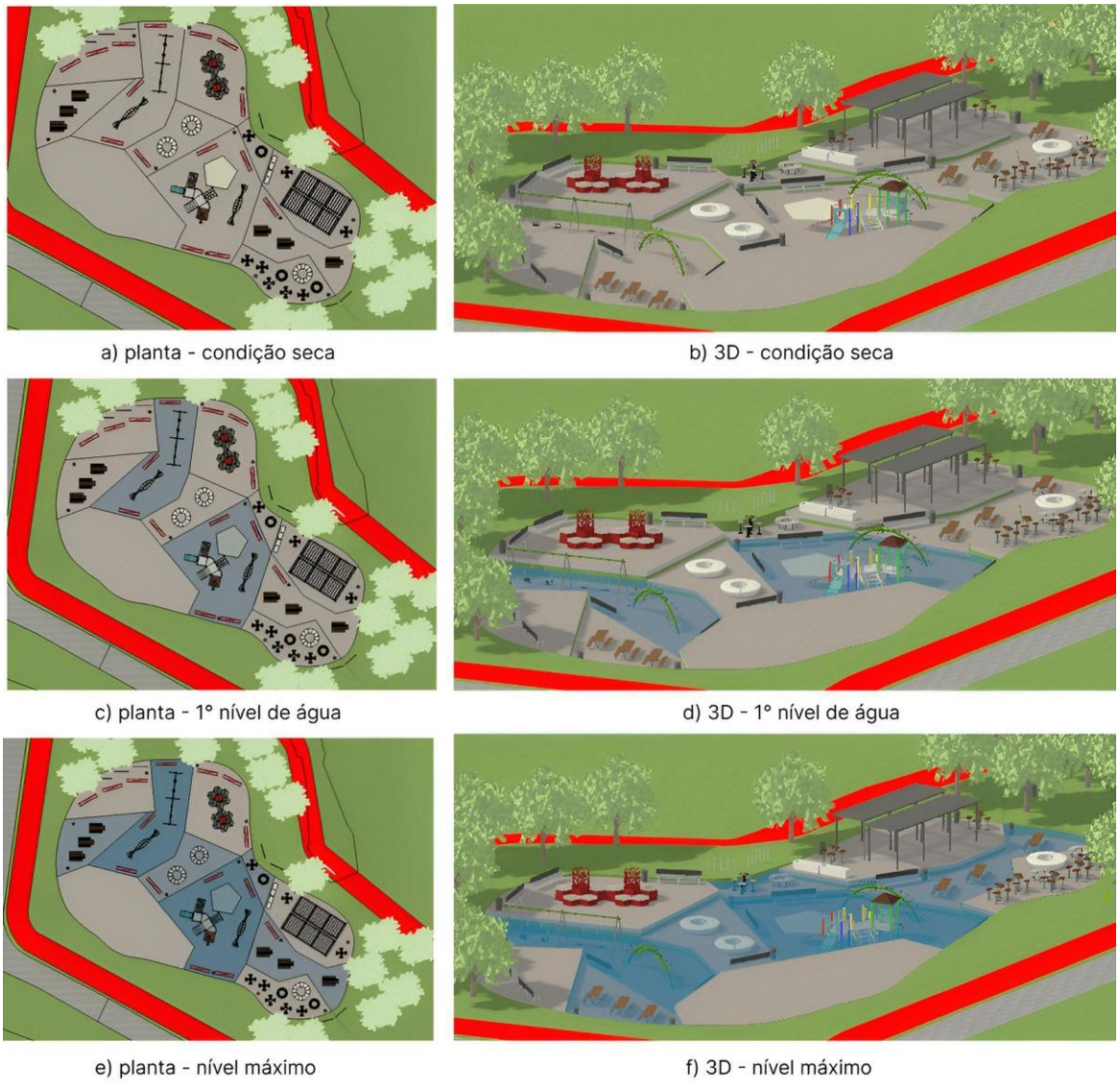
Figura 7 - Vistas explodidas das tipologias de calçada drenante: a) sem borda; b) com borda.



Fonte: Elaborado pela autora no software Revit (AUTODESK INC., 2023).

Na porção jusante da microbacia, a praça pública existente foi configurada como uma solução multifuncional de retenção, detenção e infiltração, seguindo o conceito de "praça esponja" (Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro; Prefeitura Municipal de Campinas; GIZ, 2023). O sistema integra uma bacia de detenção seca com três patamares escalonados, uma pista de skate rebaixada como reservatório raso complementar e uma galeria linear de tubos perfurados em PEAD com diâmetro nominal (DN) de 400 mm sob a pista de corrida. Em tempo seco, a bacia funciona como área de lazer; durante eventos de chuva, os patamares se enchem progressivamente. O sistema foi dimensionado para liberar o volume retido em até 24 horas. A praça esponja é apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Praça esponja em planta e vista tridimensional: (a-b) condição seca; (c-d) primeiro volume; (e-f) nível máximo.



Fonte: Elaborado pela autora no software Revit (AUTODESK INC., 2023).

3.4 MODELAGEM BIM

A modelagem *Building Information Modeling* (BIM) teve como objetivo representar tridimensionalmente as SbN dimensionadas, integrando informações espaciais, geométricas e hidrológicas em ambiente digital unificado. A base cartográfica foi desenvolvida no QGIS e exportada em formato DWG com coordenadas SIRGAS 2000/UTM 23S. No *software* Autodesk Revit (AUTODESK INC., 2023), foram modeladas as três tipologias de SbN como famílias paramétricas, com parâmetros hidrológicos — área efetiva (A), espessura (h), porosidade (n), volume útil (V), diâmetro (D) e vazão (Q) — vinculados a fórmulas internas que possibilitaram o cálculo automático de volumes a partir das propriedades geométricas. Essa abordagem foi determinante para o dimensionamento das calçadas drenantes, cujas larguras variam ao longo de 48 trechos distintos, tornando o cálculo manual suscetível a inconsistências. O modelo BIM consolidou os resultados em plataforma única, reunindo parâmetros hidrológicos, construtivos e geoespaciais.

3.5 CENÁRIOS E INDICADORES DE AVALIAÇÃO

A análise comparativa foi estruturada em três cenários progressivos e cumulativos: Cenário 1, com apenas os reservatórios de lote híbridos; Cenário 2, com reservatórios de lote e calçadas drenantes; e Cenário 3, com as três SbN integradas. Essa progressão permite isolar a contribuição individual de cada solução e quantificar o ganho hidrológico incremental, mantendo a lógica da cobertura complementar por superfície adotada na seleção das intervenções.

O desempenho de cada cenário foi avaliado por quatro indicadores hidrológicos complementares, calculados a partir dos parâmetros intermediários: a vazão equivalente das SbN (QSbN) e a vazão mitigada (Qmit).

O volume efetivo (Vef) corresponde ao volume útil de armazenamento proporcionado por cada tipologia de Solução Baseada na Natureza. Sua determinação variou conforme a solução analisada, considerando a capacidade volumétrica dos reservatórios modulares, o volume de vazios da camada granular das calçadas drenantes e o volume de armazenamento da praça esponja. A partir desse volume efetivo, foi calculada a vazão equivalente das SbN (QSbN), conforme a Equação 2.

$$\boldsymbol{QSbN} = \frac{\boldsymbol{Vef}}{\boldsymbol{tc}} \quad \textbf{(2)}$$

A vazão equivalente das SbN (QSbN), obtida a partir do volume efetivo de armazenamento, foi subtraída da vazão de pico para obter a vazão mitigada (Qmit), conforme Equação 3:

$$Qmit = Qmáx - \boldsymbol{QSbN} \quad \textbf{(3)}$$

Além da mitigação das vazões de pico, a avaliação do desempenho hidrológico considerou também o comportamento do coeficiente de escoamento da microbacia. Esse parâmetro representa a fração da precipitação convertida em escoamento superficial, estando diretamente relacionado ao grau de impermeabilização da bacia hidrográfica. Dessa forma, valores mais elevados estão associados ao aumento dos volumes escoados e dos picos de vazão, intensificando a demanda sobre os sistemas de drenagem urbana e o potencial de ocorrência de alagamentos.

Com base nos parâmetros hidrológicos descritos, foram determinados quatro indicadores hidrológicos complementares. A eficiência de redução do pico de vazão (EQ), calculada pela Equação 4, expressa percentualmente o quanto o pico de cheia foi reduzido em relação à vazão original. O índice volumétrico (IV), expresso pela Equação 5, representa a fração do volume total precipitado sobre a microbacia que é retida pelas SbN. O coeficiente de escoamento mitigado (Cmit), obtido pelo caminho inverso do método racional conforme a Equação 6, converte Qmit em um coeficiente de escoamento equivalente, permitindo comparar o comportamento hidrológico da microbacia antes e após as intervenções em termos de permeabilidade efetiva. O delta do coeficiente de escoamento (ΔC = C − Cmit) quantifica a redução absoluta promovida pelas SbN. A verificação hidráulica foi realizada comparando Qmit com a capacidade da rede existente (Qcap), sendo a condição de segurança satisfeita quando Qmit ≤ Qcap.

$$\boldsymbol{EQ} = \frac{\boldsymbol{Qmáx - Qmit}}{\boldsymbol{Qmáx}} \cdot \boldsymbol{100} \quad \textbf{(4)}$$

$$\boldsymbol{IV} = \frac{\boldsymbol{Volume,SbN}}{\boldsymbol{Volume,precipitado}} \cdot \boldsymbol{100} \quad \textbf{(5)}$$

$$\boldsymbol{Cmit} = \frac{\boldsymbol{Qmit}}{\boldsymbol{0{,}278 \cdot imáx \cdot A}} \quad \textbf{(6)}$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DIAGNÓSTICO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO

A modelagem hidrológica resultou em coeficiente de escoamento ponderado C = 0,75, tempo de concentração tc = 12,55 minutos e intensidade de precipitação de 128,59 mm/h pela curva IDF para TR = 2 anos. A vazão de pico resultante foi Qmáx = 4,47 m³/s, representando o comportamento hidrológico mais crítico da microbacia e servindo de referência para todas as etapas comparativas. A verificação hidráulica pela equação de Manning resultou em capacidade Qcap = 4,63 m³/s para y0/D = 0,75 e Qcap = 5,79 m³/s para y0/D = 0,94.

A comparação evidencia que a rede opera no limite da sua capacidade de projeto, com margem de apenas 3,5%, confirmando a necessidade de intervenções complementares. O hidrograma do cenário atual é apresentado em comparação com os cenários propostos na Figura 9.

4.2 DIMENSIONAMENTO DAS SBN

O reservatório de lote híbrido foi dimensionado com volume unitário de 0,22 m³ por lote. Com 514 lotes identificados, o volume total é de 113,08 m³, distribuído por toda a microbacia, interceptando o escoamento dos telhados antes de sua chegada à rede.

As calçadas drenantes totalizam 1.623,98 m³, distribuídos ao longo de 48 trechos de passeio. A heterogeneidade das larguras exigiu tratamento trecho a trecho, viabilizado pela modelagem BIM, que calculou os volumes automaticamente a partir das geometrias parametrizadas.

A praça esponja totalizou 607,40 m³, distribuídos entre a bacia de detenção multinível, a pista de skate rebaixada e o reservatório tubular em PEAD, todos calculados automaticamente no modelo BIM.

O conjunto das três SbN totaliza 2.344,46 m³ de volume de armazenamento. A distribuição dos volumes por tipologia e a composição de cada cenário são apresentadas na Tabela 3. As calçadas drenantes respondem pela maior parcela (1.623,98 m³), seguidas pela praça esponja (607,41 m³) e pelos reservatórios de lote (113,08 m³), refletindo a lógica da cobertura complementar por superfície.

Tabela 3 - Volumes de armazenamento por tipologia de SbN e total acumulado por cenário.

Tipologia	Volume (m³)	C1	C2	C3
Reservatório de lote híbrido	113,08	✓	✓	✓
Calçada drenante	1.623,98	—	✓	✓
Praça esponja multifuncional	607,40	—	—	✓
Total acumulado por cenário	**—**	**113,08**	**1.737,06**	**2.344,46**

Fonte: A autora.

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CENÁRIOS

A análise comparativa avalia os três cenários cumulativos em relação ao cenário atual, isolando a contribuição de cada tipologia de SbN e quantificando o ganho hidrológico incremental. Em todos os cenários, a condição de segurança Qmit ≤ Qcap = 4,63 m³/s foi satisfeita, confirmando a compatibilidade das soluções com a capacidade da rede existente. No Cenário 1, QSbN = 0,15 m³/s e Qmit = 4,32 m³/s. No Cenário 2, QSbN = 2,31 m³/s e Qmit = 2,17 m³/s. No Cenário 3, QSbN = 3,11 m³/s e Qmit = 1,36 m³/s. Os indicadores hidrológicos completos para os três cenários são consolidados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros e indicadores hidrológicos por cenário.

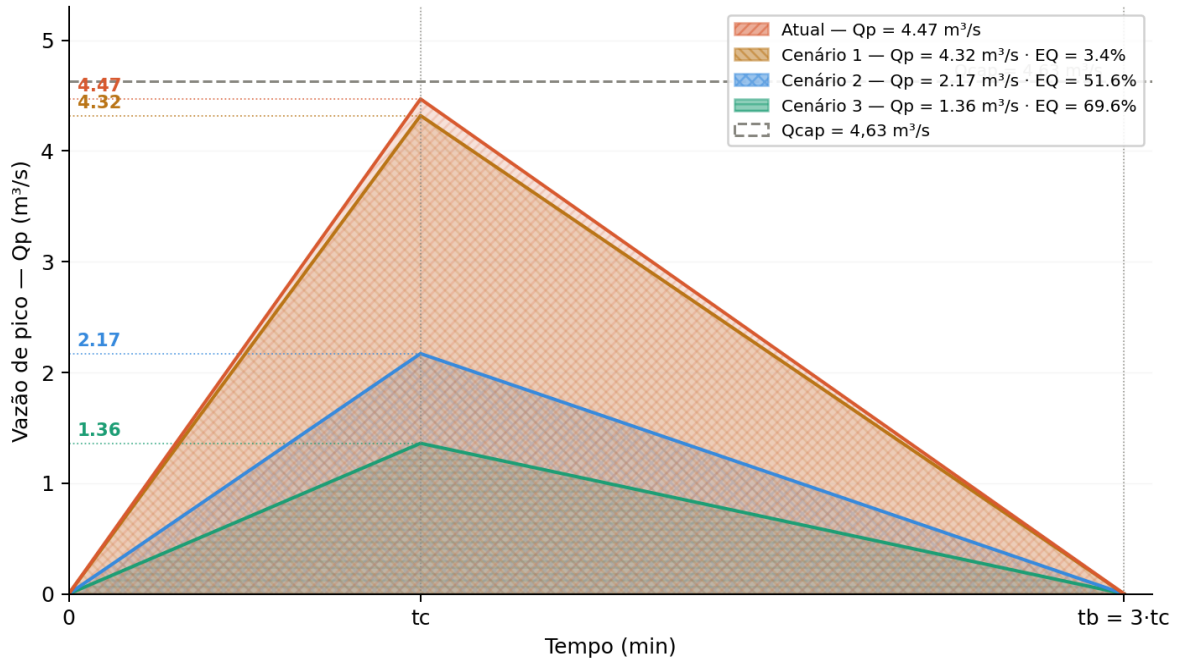
Cenário	QSbN (m³/s)	Qmit (m³/s)	EQ (%)	IV (%)	Cmit	ΔC
Atual	—	4,47	—	—	0,75	—
Cenário 1	0,15	4,32	3,36	2,53	0,73	0,03
Cenário 2	2,31	2,17	51,57	38,93	0,37	0,38
Cenário 3	**3,11**	**1,36**	**69,60**	**52,54**	**0,23**	**0,52**

Fonte: A autora.

A vazão equivalente das SbN (QSbN) cresceu de 0,15 m³/s no Cenário 1 para 2,31 m³/s no Cenário 2 e 3,11 m³/s no Cenário 3, refletindo diretamente o aumento da capacidade de armazenamento acumulada a cada cenário. Como consequência, a vazão mitigada (Qmit) reduziu-se de 4,32 m³/s para 2,17 m³/s e, finalmente, para 1,36 m³/s, representando uma queda de 69,6% em relação à vazão original de 4,47 m³/s. Em todos os cenários, Qmit permaneceu abaixo de Qcap = 4,63 m³/s, confirmando que o sistema de SbN é compatível com a infraestrutura de microdrenagem existente.

A eficiência de redução do pico (EQ) evoluiu de 3,36% no Cenário 1 para 51,57% no Cenário 2, ganho de 48,21 pontos percentuais promovido exclusivamente pela incorporação das calçadas drenantes, tipologia de maior impacto hidrológico individual do sistema. O acréscimo da praça esponja no Cenário 3 elevou o EQ para 69,60%, com ganho adicional de 18,03 pontos percentuais. O índice volumétrico acompanhou essa progressão: IV = 2,53% (C1), IV = 38,93% (C2) e IV = 52,54% (C3), indicando que mais da metade do volume precipitado sobre a microbacia é retida no cenário mais completo. A diferença de incremento entre os cenários, 48,21 pp pela calçada e 18,03 pp pela praça, evidencia que a tipologia linear, por sua extensão distribuída ao longo de toda a malha viária, possui capacidade de armazenamento substancialmente superior à solução concentrada na jusante. A progressão dos hidrogramas e dos indicadores de eficiência são ilustrados nas Figuras 9 e 10.

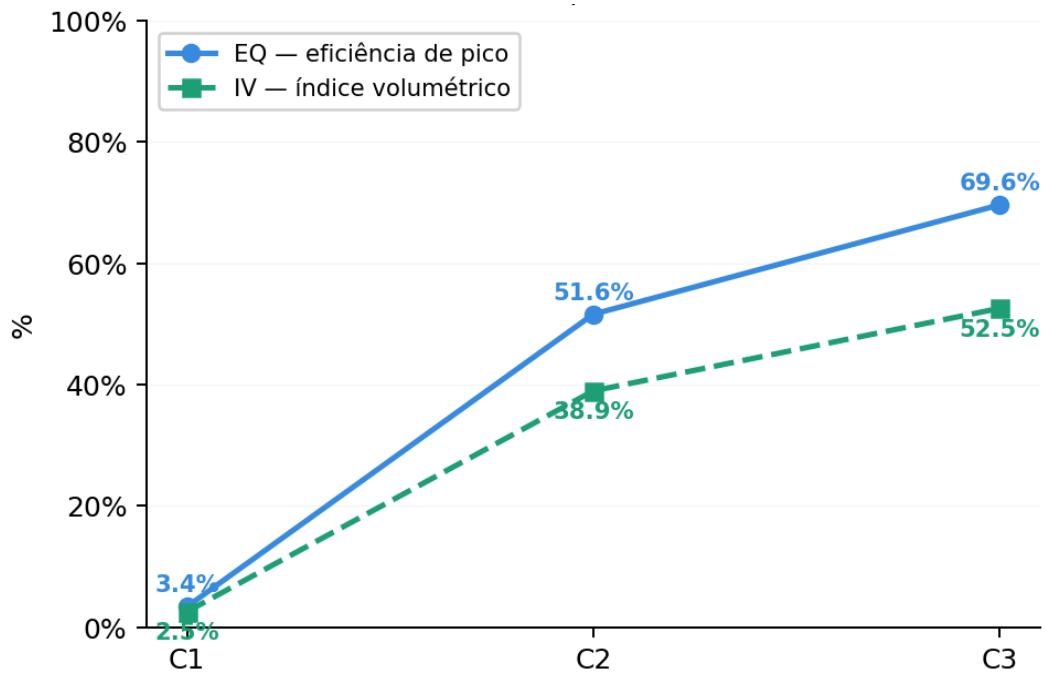
Figura 9 – Hidrogramas triangulares sobrepostos por cenário (atual, C1, C2 e C3).



Fonte: A autora.

A Figura 9 evidencia a redução progressiva da vazão de pico à medida que as Soluções Baseadas na Natureza são incorporadas aos cenários avaliados. A inclusão da linha correspondente à capacidade hidráulica da rede (Qcap = 4,63 m³/s) permite observar que a condição atual opera muito próxima do limite do sistema. No Cenário 1, a implantação dos reservatórios modulares promove uma redução mais branda da vazão de pico, indicando uma contribuição inicial para o amortecimento do hidrograma. Com a incorporação das calçadas drenantes no Cenário 2, observa-se uma redução significativamente mais expressiva, alcançando uma eficiência de redução do pico de vazão (EQ) de 51,6%, evidenciando a elevada capacidade dessa tipologia em reter e infiltrar parte do escoamento superficial. Por fim, a inclusão da praça esponja no Cenário 3 amplia o desempenho do sistema, reduzindo a vazão mitigada para 1,36 m³/s e atingindo uma eficiência de 69,6%, proporcionando uma margem de segurança consideravelmente superior em relação à capacidade hidráulica da rede existente.

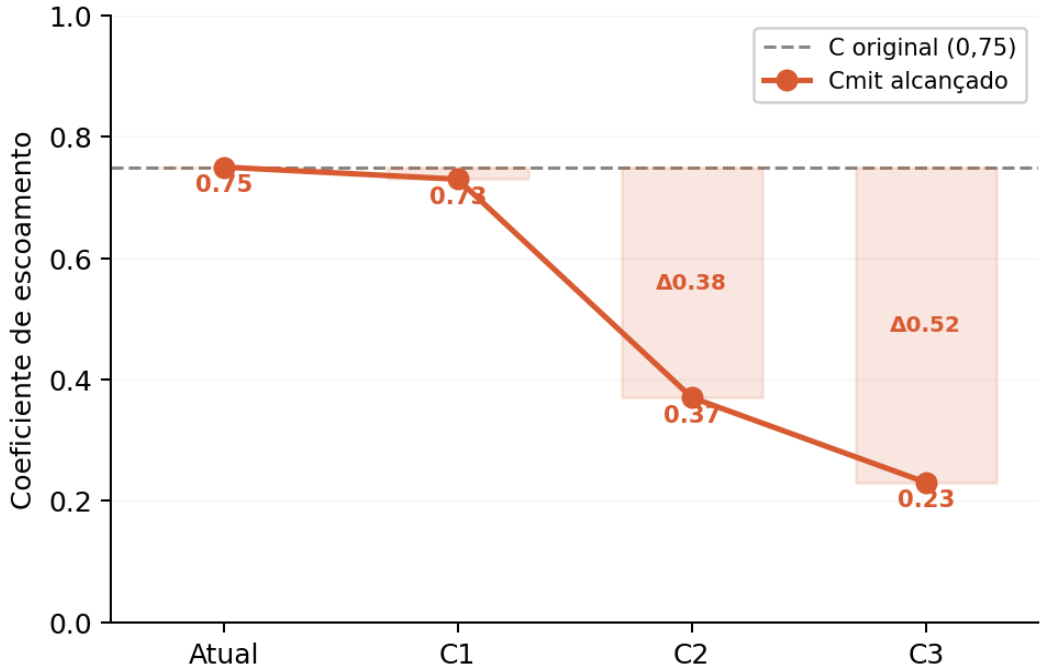
Figura 10 – Eficiência de redução do pico (EQ) e índice volumétrico (IV) por cenário (%).



Fonte: A autora.

A Figura 10 evidencia a relação direta entre o aumento da capacidade de armazenamento proporcionada pelas Soluções Baseadas na Natureza e a mitigação das vazões de pico. Observa-se que, à medida que novas tipologias são incorporadas aos cenários, ocorre um incremento simultâneo do índice volumétrico (IV) e da eficiência de redução do pico de vazão (EQ), demonstrando que o maior volume efetivamente retido pelas intervenções resulta em menor parcela da precipitação contribuindo para o escoamento superficial. Enquanto o Cenário 1 apresenta ganhos iniciais em ambos os indicadores, a incorporação das calçadas drenantes no Cenário 2 promove o maior incremento relativo, elevando o EQ para 51,6% em decorrência do aumento da capacidade de armazenamento do sistema. No Cenário 3, a integração da praça esponja amplia ainda mais o volume efetivo disponível, refletindo no maior IV e em uma eficiência de redução do pico de 69,6%. Esses resultados evidenciam que o desempenho hidrológico das SbN está diretamente associado à sua capacidade de armazenamento, reforçando que a retenção temporária das águas pluviais constitui o principal mecanismo responsável pela mitigação das vazões de pico observada na microbacia.

Figura 11 – Coeficiente de escoamento mitigado (Cmit) por cenário, com faixa indicando ΔC em relação ao valor original (C = 0,75).



Fonte: A autora.

O coeficiente de escoamento efetivo reduziu-se progressivamente de C = 0,75 (sem intervenção) para Cmit = 0,73 (Cenário 1, ΔC = 0,03), Cmit = 0,37 (Cenário 2, ΔC = 0,39) e Cmit = 0,23 (Cenário 3, ΔC = 0,52), conforme ilustrado na Figura 11. O aumento sucessivo de ΔC demonstra que a implantação das Soluções Baseadas na Natureza reduz a parcela da precipitação convertida em escoamento superficial, resultado diretamente associado ao aumento da capacidade de armazenamento e à consequente mitigação das vazões de pico observadas nos cenários anteriores. No Cenário 3, a microbacia, que inicialmente apresentava coeficiente característico de uma área altamente impermeabilizada, passa a apresentar comportamento hidrológico equivalente ao de uma superfície com permeabilidade moderada, evidenciando que a integração das diferentes tipologias de SbN é capaz de restituir parcialmente as funções hidrológicas naturais suprimidas pela urbanização.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou que a mitigação de alagamentos em bairros urbanos consolidados e socialmente vulneráveis é tecnicamente viável por meio de um sistema diversificado de Soluções Baseadas na Natureza (SbN). A seleção das intervenções foi orientada exclusivamente por critérios hidrológicos, urbanísticos e espaciais, sem que o perfil socioeconômico da área restringisse previamente o escopo técnico avaliado. No Bairro Cidade Miguel Badra, Suzano (SP), uma microbacia de 0,17 km² com margem hidráulica de apenas 3,5% (Qmáx = 4,47 m³/s vs. Qcap = 4,63 m³/s) foi avaliada por três cenários cumulativos, combinando reservatórios de lote híbridos, calçadas drenantes e praça esponja multifuncional.

O resultado do Cenário 3 comprova essa escolha: o coeficiente de escoamento caiu de C = 0,75 para Cmit = 0,23 (ΔC = 0,52), a eficiência de pico atingiu EQ = 69,60% e o índice volumétrico chegou a IV = 52,54%, com Qmit = 1,36 m³/s, muito abaixo da capacidade existente. Entre as tipologias, a calçada drenante destacou-se como a de maior impacto hidrológico individual, responsável por 48,21 pontos percentuais do ganho total de EQ. A rede que operava no limite passa a dispor de folga hidráulica expressiva, não porque foi ampliada, mas porque a demanda sobre ela foi substancialmente reduzida pelo sistema integrado de SbN.

A sequência metodológica adotada, diagnóstico pelo método racional, seleção de SbN por cobertura complementar por superfície, modelagem BIM paramétrica e avaliação por cenários cumulativos, é replicável em outras microbacias urbanas consolidadas com perfil similar: alta impermeabilização, rede no limite da capacidade e restrição de espaço para grandes obras.

Como desdobramentos recomenda-se: simulação hidráulica integrada em *software* dinâmico como o *Storm Water Management Model* (SWMM); estudo de priorização por custo-efetividade; e desenvolvimento de protocolo de manutenção das calçadas drenantes, elemento crítico para a sustentabilidade do desempenho hidrológico ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Resolução nº 245, de 17 de março de 2025. *Norma de Referência nº 12/2025*: estruturação dos serviços públicos de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas. Brasília: ANA, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2025/245>. Acesso em: 20 maio 2025.
2. AGUIAR, L. E. R.; COSTA, R. O.; SANTOS, S. A. S. *Estruturação de Modelo Físico e Análise de Sistema de Múltiplas Camadas de Agregados voltadas para Pavimentação Permeável.* In: XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul – GEOSUL 2019. Joinville: ABMS, 2019.
3. AUTODESK INC. *Revit 2023: Building Information Modeling Software.* Versão 2023. San Rafael, CA, 2023. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/revit/overview>. Acesso em: 3 jun. 2025.
4. BEZERRA, M. C. L. et al. Simulação de técnicas de infraestrutura verde de drenagem urbana para captação do escoamento superficial. *Revista Tecnologia e Sociedade,* v. 16, n. 40, p. 1–16, 2020.
5. BRASIL. Casa Civil da Presidência da República. *Nota Técnica nº 1/2023/SADJ-VI/SAM/CC/PR*: municípios suscetíveis a desastres hidrológicos. Brasília, 2023.
6. BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. *Do SNIS ao SINISA – Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas.* Brasília, 2019.
7. DIÁRIO DE SUZANO. Programas preveem 32 novas praças e oficialização de 25 bairros. Suzano, 2025. Disponível em: <https://www.diariodesuzano.com.br>. Acesso em: 21 out. 2025.
8. DNIT. *Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem*. Rio de Janeiro: DNIT, 2005.
9. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Different Shades of Green – Green Infrastructure Research.* Washington, D.C.: EPA, 2022.
10. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Mapa municipal de Suzano – SP.* Rio de Janeiro: IBGE, 2022a.
11. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Panorama do Censo 2022.* Rio de Janeiro: IBGE, 2022b. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 19 maio 2025.
12. IUCN – International Union for Conservation of Nature. *Guidance for using the IUCN Global Standard for Nature-based Solutions.* 1. ed. Gland: IUCN, 2020.
13. KIRPICH, Z. P. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering,* v. 10, n. 6, p. 362, 1940.
14. MAPBIOMAS. *Relatório técnico: áreas urbanizadas no Brasil – 1985 a 2022.* São Paulo: MapBiomas, 2023.
15. PORTO, R. M. *Hidráulica básica.* 4. ed. São Carlos: EESC/USP, 2006.
16. PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO; PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS; GIZ. *Catálogo de Soluções Baseadas na Natureza para Espaços Livres.* Rio de Janeiro: GIZ, 2023.
17. PREFEITURA DE SUZANO. *GEOSuzano – Infodata: ferramenta de acesso a informação de dados abertos, aplicações interativas e mapas temáticos*. Plataforma ArcGIS Hub, [s.d.]. Disponível em: <https://infodata-geosuzano.hub.arcgis.com/datasets/1bc2a54f5e594119abfb302dcb5f3228_0>. Acesso em: 29 jun. 2025.
18. PREFEITURA DE SUZANO. *Manual de Drenagem Urbana.* Suzano: Prefeitura Municipal de Suzano, 2020a. Disponível em: <https://pmdmap.suzano.sp.gov.br/>. Acesso em: 22 maio 2025.
19. PREFEITURA DE SUZANO. *Plano Municipal de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais de Suzano – PMDMAP.* Suzano: Prefeitura Municipal de Suzano, 2020b. Disponível em: <https://pmdmap.suzano.sp.gov.br/>. Acesso em: 22 maio 2025.
20. QGIS DEVELOPMENT TEAM. *QGIS Geographic Information System*. Versão 3.x. Open Source Geospatial Foundation Project, 2025. Disponível em: <https://qgis.org>. Acesso em: 3 jun. 2025.

21. SILVA, A. N. Mídia e polít*icas públicas: um estudo de caso do Bairro Miguel Badra – Suzano – SP.* 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Mogi das Cruzes, 2018.

22. TOMAZ, P. *Curso de manejo de águas pluviais – Capítulo 2: Método Racional.* 2012. Disponível em: <https://909d9be6-f6f1-4d9c-8ac9-115276d6aa55.filesusr.com>. Acesso em: 21 maio 2025.

23. TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. *Estudos Avançados,* v. 22, n. 63, p. 97–112, 2008.