

SOLUÇÃO BASEADA NA NATUREZA APLICADA À DRENAGEM URBANA: CONCEPÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE PROTÓTIPO EXPERIMENTAL EM CURITIBA (PR)

Gabriel Troyan Rodrigues¹; Altair Rosa¹; Guilherme Marques Colombo²; Luiz Guilherme Gonçalves da Silva Borges².

RESUMO – A urbanização, associada à impermeabilização do solo, à ocupação de áreas ambientalmente sensíveis e à intensificação de eventos extremos de precipitação, tem ampliado os desafios relacionados à drenagem urbana, à ocorrência de alagamentos e à degradação da qualidade da água. Nesse contexto, as Soluções baseadas na Natureza (SbN) apresentam-se como alternativas capazes de integrar funções hidrológicas, ambientais e paisagísticas. Este artigo apresenta a concepção e o dimensionamento de um protótipo experimental de SbN no Memorial do Rio Iguaçu, em Curitiba (PR), integrando princípios de *wetlands* construídas e biorretenção. O sistema é composto por três células experimentais: uma destinada ao recebimento de água pluvial, uma voltada à água fluvial e uma terceira à mistura controlada entre ambas. O dimensionamento considerou o Decreto Municipal de Curitiba nº 1.733/2020, a equação de intensidade pluviométrica de Pedro Viriato Parigot de Souza, o Método Racional e critérios de armazenamento em meio poroso. Obteve-se vazão de projeto de 16,80 L/s, volume de armazenamento de 6,72 m³ por célula e volume geométrico adotado de 18,00 m³ por célula. Conclui-se que o protótipo pode subsidiar avaliações experimentais sobre retenção de águas pluviais, controle de vazões e remoção de poluentes.

Palavras-Chave – Soluções baseadas na Natureza; Drenagem urbana sustentável; Biorretenção.

ABSTRACT– Urbanization, associated with soil imperviousness, the occupation of environmentally sensitive areas, and the intensification of extreme precipitation events, has increased the challenges related to urban drainage, the occurrence of flooding, and water quality degradation. In this context, Nature-based Solutions (NbS) emerge as alternatives capable of integrating hydrological, environmental, and landscape functions. This article presents the conceptual design and sizing of an experimental NbS prototype at the Memorial do Rio Iguaçu, in Curitiba, Paraná, Brazil, integrating principles of constructed wetlands and bioretention. The system consists of three experimental cells: one designed to receive stormwater, another intended for river water, and a third for the controlled mixture of both. The sizing process considered Curitiba Municipal Decree No. 1,733/2020, the rainfall intensity equation proposed by Pedro Viriato Parigot de Souza, the Rational Method, and porous-media storage criteria. The results indicated a design flow rate of 16.80 L/s, a storage volume of 6.72 m³ per cell, and an adopted geometric volume of 18.00 m³ per cell. It is concluded that the prototype may support experimental assessments of stormwater retention, flow control, and pollutant removal.

Key-words – *Nature-based Solutions; Sustainable urban drainage; Bioretention.*

Afiliação: 1) Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). E-mail: gtr_gabriel@hotmail.com.
2) Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI) da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

INTRODUÇÃO

A urbanização contemporânea tem produzido transformações significativas sobre os sistemas naturais, sobretudo em áreas metropolitanas marcadas pela expansão da impermeabilização, pela supressão de áreas vegetadas e pela concentração de infraestrutura cinza de drenagem. A substituição de superfícies permeáveis por pavimentos e edificações reduz a infiltração, acelera o escoamento superficial e amplia a vazão de pico conduzida às galerias pluviais. Quando associados ao lançamento irregular de efluentes, à poluição difusa e à ocupação de áreas ambientalmente sensíveis, esses processos intensificam os impactos urbanos. Seus efeitos manifestam-se tanto em alagamentos recorrentes quanto na degradação da qualidade da água dos corpos hídricos.

As mudanças climáticas intensificam esse quadro ao alterar padrões de precipitação e ampliar a frequência de eventos hidrológicos extremos. Berghuijs *et al.* (2017) indicam que mudanças recentes em eventos extremos de cheia têm sido observadas em diferentes continentes, reforçando a necessidade de estratégias de adaptação urbana. Nesse cenário, torna-se necessário adotar medidas que não apenas ampliem a capacidade hidráulica do sistema, mas também promovam benefícios ambientais e sociais complementares. Assim, soluções exclusivamente estruturais e convencionais, embora relevantes, tornam-se insuficientes quando aplicadas de forma isolada para enfrentar problemas complexos de drenagem, qualidade hídrica e resiliência climática.

As Soluções baseadas na Natureza (SbN) têm sido incorporadas ao planejamento urbano como alternativas capazes de integrar funções ecológicas, hidrológicas e paisagísticas. De acordo com Faivre *et al.* (2017), essas soluções permitem inovar com a natureza para responder a desafios sociais, econômicos e ambientais. Hansen *et al.* (2017) também destacam a infraestrutura verde urbana como elemento estratégico de planejamento, especialmente quando associada à restauração de ecossistemas, à conectividade ambiental e à provisão de serviços ecossistêmicos. No contexto brasileiro, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE, 2022) ressalta que as SbN contribuem para cidades mais sustentáveis, resilientes e adaptadas aos efeitos das mudanças climáticas.

Entre as tipologias de SbN aplicáveis à drenagem urbana e ao tratamento de águas urbanas, destacam-se as *wetlands* construídas e as estruturas de biorretenção. As *wetlands* construídas são sistemas projetados para simular processos naturais de áreas úmidas, favorecendo sedimentação, filtração, absorção por macrófitas e processos microbiológicos capazes de melhorar a qualidade da água. Já as estruturas de biorretenção são concebidas para receber, armazenar temporariamente e tratar o escoamento superficial, reduzindo volumes e vazões de pico. Quando integradas, essas abordagens podem produzir um sistema multifuncional, capaz de atuar simultaneamente no controle quantitativo das águas pluviais e na melhoria qualitativa da água pluvial e fluvial.

Curitiba (PR), embora reconhecida por experiências de planejamento urbano, enfrenta desafios relacionados a chuvas intensas, alagamentos e contaminação de corpos hídricos urbanos. A área do Memorial do Rio Iguaçu, localizada em região próxima ao município de São José dos Pinhais e contígua à Avenida Comendador Franco, apresenta características adequadas à implantação de um protótipo experimental por reunir proximidade com sistema de drenagem urbana, presença de corpo hídrico e potencial de uso para educação ambiental. Além disso, as cavas de mineração existentes no entorno recebem poluição difusa e lançamentos clandestinos advindos das áreas de ocupação irregular, o que cria condições reais e desafiadoras para avaliar o desempenho de técnicas compensatórias de drenagem e tratamento.

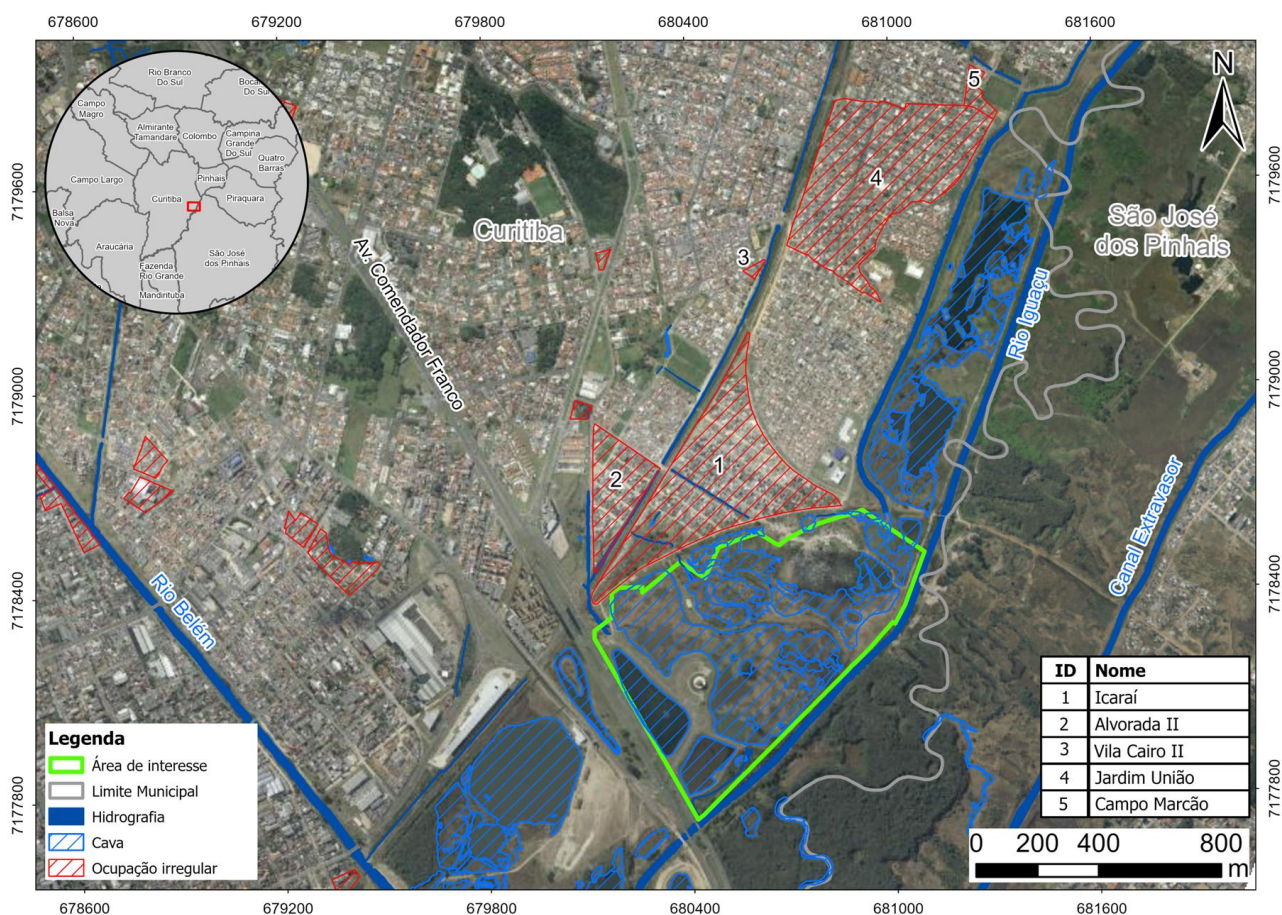


Figura 1 – Localização da Área de Interesse

Diante desse contexto, este artigo apresenta e discute a implantação de um protótipo experimental de SbN, concebido para integrar *wetlands* construídas e biorretenção, com vistas à mitigação de alagamentos e à melhoria da qualidade da água em Curitiba. Especificamente, busca-se sintetizar os critérios de dimensionamento, a configuração técnica do protótipo, a metodologia de

operação e monitoramento e os principais resultados esperados para subsidiar avaliações futuras de desempenho hidrológico e ambiental.

METODOLOGIA

A pesquisa caracteriza-se como um estudo técnico-aplicado, de natureza experimental, fundamentado na concepção e no dimensionamento de um protótipo piloto para avaliação de SbN. A metodologia foi organizada em quatro etapas principais: seleção da área de implantação, definição da configuração experimental, dimensionamento hidrológico e geométrico das células e estabelecimento dos procedimentos de operação e monitoramento.

Na primeira etapa, foram analisadas áreas em Curitiba e na Região Metropolitana que atendessem a três condições essenciais: proximidade com corpo hídrico, proximidade com sistema de drenagem urbana e disponibilidade de espaço de titularidade pública ou vinculado à Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), parceira institucional do projeto. O Memorial do Rio Iguaçu foi selecionado por atender a esses requisitos e por apresentar potencial educativo, uma vez que o local é utilizado para ações de educação ambiental. A presença de cavas provenientes de mineração de areia e argila, posteriormente associadas ao recebimento de cargas poluentes, reforçou a pertinência da área para um experimento voltado à melhoria da qualidade da água.

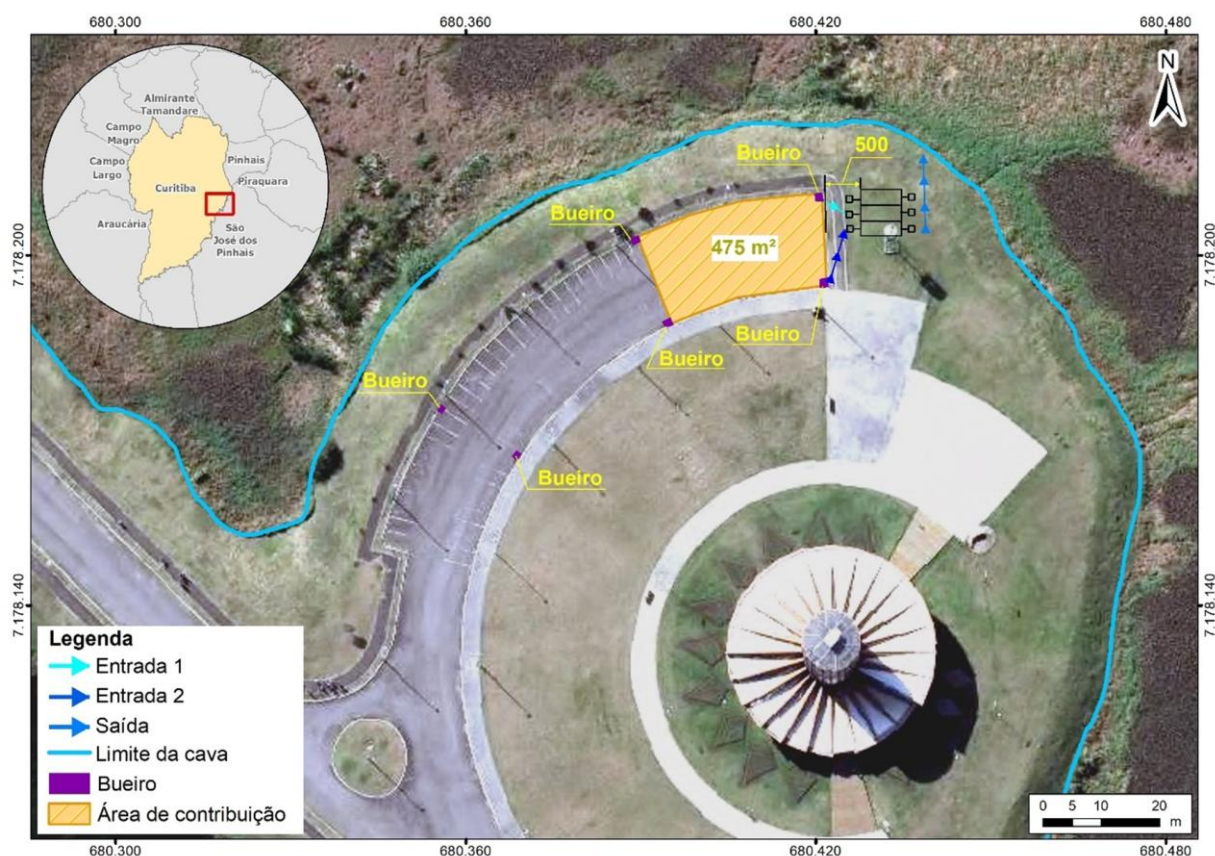


Figura 2 – Localização da Área de Implantação

A segunda etapa consistiu na definição da configuração experimental, o protótipo foi concebido com três células independentes, de igual capacidade de armazenamento, mas com diferentes origens de água: célula pluvial, célula fluvial e célula mista. A célula pluvial receberá água proveniente do escoamento superficial captado por bueiros e galerias de drenagem urbana; a célula fluvial receberá água bombeada de corpo hídrico urbano associado às cavas; e a célula mista receberá proporções controladas de água pluvial e fluvial. Essa organização permite comparar experimentalmente o comportamento das células diante de diferentes cargas hidráulicas e poluentes, além de avaliar a aplicabilidade da solução em períodos chuvosos e de estiagem.

O dimensionamento hidrológico foi desenvolvido com base nas diretrizes do Decreto Municipal de Curitiba nº 1.733/2020, adotado como referência normativa para mecanismos de contenção de cheias, retenção e detenção de águas pluviais. Para a chuva de projeto, adotou-se a equação de intensidade pluviométrica de Pedro Viriato Parigot de Souza, considerando tempo de retorno de 10 anos e tempo de concentração de 10 minutos. A vazão foi estimada pelo Método Racional, a partir da área de contribuição, do coeficiente de escoamento superficial e da intensidade pluviométrica. Em complemento, foram considerados critérios associados ao armazenamento em meio poroso, incluindo porosidade efetiva, volume geométrico, área superficial e profundidade útil.

A composição do meio filtrante foi definida a partir de camadas de brita com diferentes granulometrias, evitando-se a adoção de camada de areia em razão do risco de colmatção indicado no memorial técnico. A porosidade efetiva foi obtida por média ponderada das camadas, considerando brita nº 2 na camada superior, brita nº 3 na camada intermediária e brita nº 4 na camada inferior. A profundidade útil adotada foi de 1,50 m, compatível com a proposta de armazenamento temporário e com o uso experimental de *wetlands* construídas e biorretenção.

Por fim, a etapa de operação e monitoramento foi estruturada para permitir a avaliação quantitativa e qualitativa do desempenho do protótipo. Foram previstos pontos de amostragem na entrada do sistema, no interior das células e na saída, além de dispositivos de medição de vazão e sensores de nível conectados a módulo de monitoramento remoto. Os parâmetros físico-químicos e microbiológicos previstos incluem pH, sólidos totais suspensos, sólidos totais dissolvidos, demanda química de oxigênio, demanda bioquímica de oxigênio, fósforo total, nitrogênio total e cadeia do nitrogênio, coliformes termotolerantes, oxigênio dissolvido e temperatura, tendo como referência a Resolução CONAMA nº 357/2005.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O dimensionamento do protótipo iniciou-se pela definição da chuva de projeto. Com tempo de retorno de 10 anos e tempo de concentração de 10 minutos, obteve-se intensidade pluviométrica de 2,65 mm/min. A área de contribuição identificada para o sistema foi de 475 m², e o coeficiente de escoamento superficial adotado foi de 0,80, compatível com superfície pavimentada em asfalto. A aplicação do Método Racional resultou em vazão de projeto de 16,80 L/s. Considerando a necessidade de armazenamento correspondente a 10 minutos de vazão de pico, adotou-se duração de entrada de 600 s, resultando em volume afluente de 6,72 m³ por célula.

A vazão total calculada foi distribuída conforme a lógica experimental das células. A célula pluvial foi dimensionada considerando 66,66% da vazão de projeto, equivalente a 11,20 L/s, enquanto a célula mista receberá 33,33% da vazão pluvial, correspondente a 5,60 L/s, complementada por bombeamento de água fluvial. Essa divisão possibilita manter a mesma capacidade de armazenamento nas três células, ao mesmo tempo em que permite comparar diferentes condições de entrada e misturas de água.

Com base na composição do meio filtrante, foi calculada porosidade efetiva de 0,4210. A partir do volume de armazenamento de 6,72 m³, o volume geométrico necessário por célula foi estimado em 15,96 m³. Considerando a profundidade útil de 1,50 m, a área superficial calculada foi de 10,64 m². Em razão das condições topográficas e da necessidade de simplificação construtiva, as dimensões foram ajustadas para 6,00 m de comprimento, 2,00 m de largura e 1,50 m de profundidade, resultando em volume geométrico adotado de 18,00 m³ por célula. Com a porosidade efetiva indicada, o volume poroso disponível em cada unidade é de aproximadamente 7,58 m³.

O tempo de detenção hidráulico foi avaliado sob duas perspectivas. A primeira, baseada no volume poroso, representa o tempo útil de contato da água com o meio filtrante e é mais adequada para analisar processos de tratamento, como sedimentação, retenção física, absorção por raízes e atividade microbológica. Nessa condição, o tempo estimado foi de 677 s, equivalente a aproximadamente 11 min por célula. A segunda perspectiva considera o volume geométrico total da célula e serve como verificação hidrológica global do reservatório, resultando em 1.607 s, ou aproximadamente 26 min. Para fins de eficiência de tratamento, o tempo de detenção de projeto foi definido com base no volume poroso.

Tabela 1 – Síntese dos principais parâmetros de dimensionamento do protótipo

Parâmetro	Valor adotado/calculado	Finalidade no projeto
Tempo de retorno	10 anos	Definição da chuva de projeto
Tempo de concentração	10 min	Tempo mínimo de contribuição hidrológica
Intensidade pluviométrica	2,65 mm/min	Cálculo da vazão pelo Método Racional

Área de contribuição	475 m ²	Delimitação do escoamento captado
Coefficiente de escoamento	0,80	Representação da superfície asfaltada
Vazão de projeto	16,80 L/s	Dimensionamento hidráulico do protótipo
Volume de água por célula	6,72 m ³	Armazenamento temporário no meio poroso
Porosidade efetiva	0,4210	Cálculo do volume geométrico necessário
Volume geométrico adotado	18,00 m ³ /célula	Capacidade física de cada célula experimental
Dimensões adotadas	6,00 m x 2,00 m x 1,50 m	Ajuste construtivo ao espaço disponível

A solução proposta apresenta uma configuração operacional composta por pré-tratamento, equalização, distribuição e monitoramento, de modo a controlar a entrada de água e acompanhar o desempenho hidráulico e qualitativo do sistema. O escoamento superficial será inicialmente conduzido a uma área de filtragem de sólidos grosseiros, executada com geomembrana e preenchimento em brita, com declividade mínima de 1% em direção à tubulação de entrada. Em seguida, a água chegará à caixa de equalização, responsável por dividir a vazão entre a célula pluvial e a célula mista. No caso da água fluvial, o abastecimento será realizado por bombeamento a partir da cava, direcionando o fluxo à célula fluvial e, quando necessário, à célula mista.

A célula pluvial permitirá avaliar o desempenho da estrutura durante eventos de precipitação, incluindo retenção de vazão de pico, armazenamento temporário e remoção de poluentes carregados pelo escoamento superficial. A célula fluvial possibilitará testar a capacidade da solução de atuar em períodos de estiagem, quando a água de corpos hídricos urbanos poderá ser derivada para tratamento. A célula mista, por sua vez, permitirá investigar condições intermediárias e comparar a resposta do sistema diante de diferentes proporções de água pluvial e fluvial.

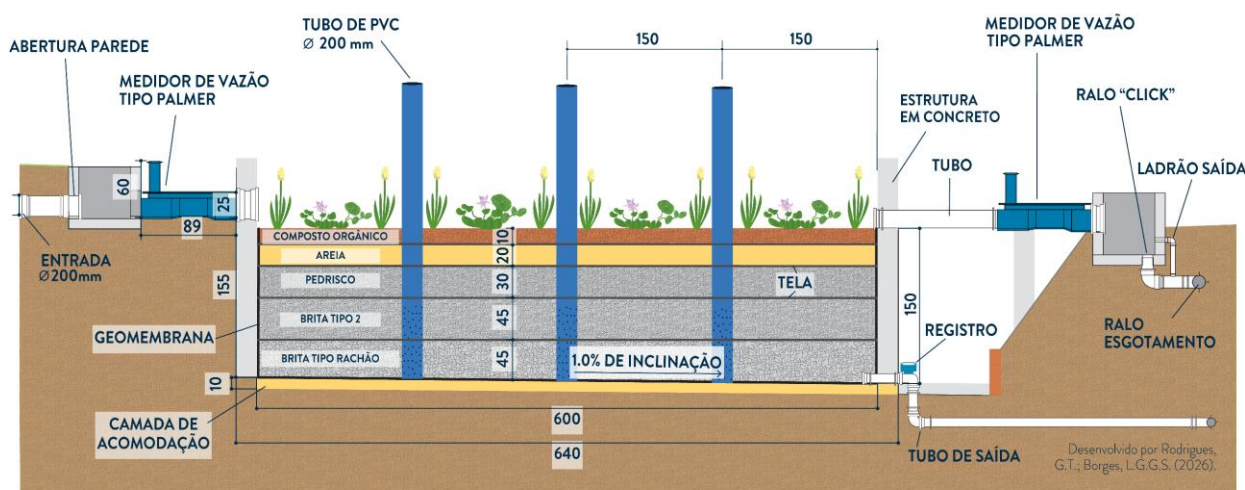


Figura 3 – Seção de uma célula

No que se refere ao monitoramento, o protótipo prevê a instalação de calhas Palmer e medidores de vazão a montante e a jusante das células, além de sensores de nível no interior das estruturas, permitindo acompanhar variações hidráulicas durante a operação. Os pontos de coleta foram

organizados em três posições: P1 na entrada, P2 no interior das células e P3 na saída. Essa estratégia permite acompanhar a evolução da qualidade da água ao longo do sistema, identificar possíveis perdas de carga, verificar o tempo de permanência e analisar a eficiência de remoção de poluentes. O uso de módulo de monitoramento remoto e armazenamento de dados em nuvem amplia a precisão do acompanhamento e favorece a posterior modelagem de cenários.

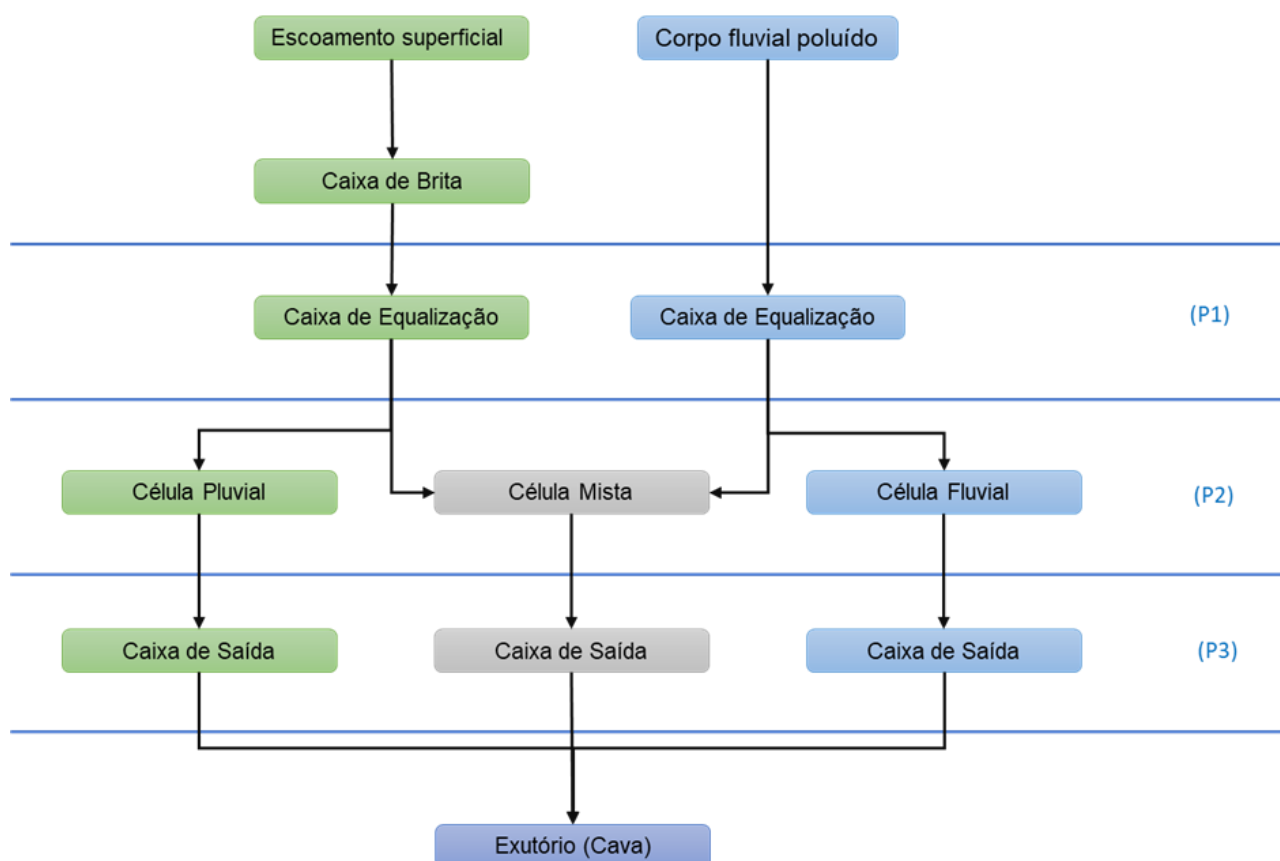


Figura 4 – Fluxograma de monitoramento

As análises laboratoriais previstas abrangem parâmetros indicadores de matéria orgânica, sólidos, nutrientes, oxigenação e contaminação microbiológica. A inclusão de pH, DQO, DBO5,20, fósforo, nitrogênio, coliformes, OD e temperatura permite avaliar tanto a remoção de poluentes associados ao escoamento urbano quanto a possível melhoria de água fluvial impactada por lançamentos irregulares. A periodicidade semanal ou mensal das coletas, ajustável conforme a ocorrência de eventos de precipitação, é adequada para capturar variações hidrológicas e sazonais.

A configuração proposta indica que o protótipo não deve ser interpretado apenas como estrutura de retenção, mas como unidade experimental multifuncional. Essa característica amplia o potencial de aplicação futura em áreas urbanas com restrição de espaço, onde a substituição ou complementação

de bacias convencionais por soluções mais integradas pode gerar benefícios adicionais de qualidade ambiental, paisagismo e educação ambiental.

Apesar do potencial da solução, alguns fatores críticos deverão ser acompanhados durante a operação, especialmente aqueles relacionados à manutenção, ao desempenho hidráulico e à estabilidade do meio filtrante. A colmatação do meio filtrante, a necessidade de manutenção das caixas e tubulações, a sobrevivência das macrófitas, a variabilidade das cargas poluentes e o controle das vazões bombeadas são fatores que podem influenciar a eficiência do sistema. Portanto, a fase experimental deverá produzir dados suficientes para verificar a estabilidade hidráulica, a eficiência de tratamento e as condições de manutenção. Esses dados também poderão subsidiar modelagens futuras e adaptações de projeto para aplicação em maior escala.

CONSIDERAÇÕES

O artigo apresentou a concepção e o dimensionamento de um protótipo de Solução baseada na Natureza voltado à mitigação de alagamentos e à melhoria da qualidade da água em Curitiba (PR). A proposta integra fundamentos de *wetlands* construídas e estruturas de biorretenção, sendo composta por três células experimentais com diferentes fontes de água: pluvial, fluvial e mista. Essa configuração permite avaliar o desempenho do sistema em condições de chuva, em períodos de estiagem e em situações de mistura de cargas hidráulicas e poluentes.

Os resultados de dimensionamento indicam a viabilidade técnica inicial da solução. Para área de contribuição de 475 m², intensidade de precipitação de 2,65 mm/min e coeficiente de escoamento de 0,80, obteve-se vazão de projeto de 16,80 L/s. Cada célula foi dimensionada para volume de água de 6,72 m³, com volume geométrico adotado de 18,00 m³ e tempo de detenção baseado no volume poroso de aproximadamente 11 min. A adoção de camadas de brita com diferentes granulometrias e porosidade efetiva de 0,4210 permite associar armazenamento temporário e contato da água com o meio filtrante.

A metodologia de operação e monitoramento proposta contempla instrumentos e procedimentos compatíveis com os objetivos experimentais, incluindo medição de vazão, sensores de nível, pontos de coleta e análises de qualidade da água. A avaliação dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos permitirá verificar a eficiência da solução tanto no controle quantitativo quanto na melhoria qualitativa da água. Além disso, o monitoramento remoto e o armazenamento dos dados em nuvem favorecem a construção de séries experimentais e a posterior modelagem de cenários.

Conclui-se que o protótipo apresenta potencial para contribuir com pesquisas aplicadas em drenagem urbana sustentável, adaptação climática e recuperação de corpos hídricos urbanos, desde

que sua eficiência seja confirmada na fase experimental. Caso os resultados experimentais confirmem a eficiência esperada, a solução poderá subsidiar diretrizes para políticas públicas e projetos de infraestrutura verde, especialmente em áreas urbanas sujeitas a alagamentos, poluição difusa e limitações de espaço para implantação de estruturas convencionais de contenção.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), à Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) e às instituições parceiras pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa e à viabilização do protótipo experimental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERGHUIJS, W. R.; AALBERS, E. E.; LARSEN, J. R.; TRANCOSO, R. Recent changes in extreme floods across multiple continents. *Environmental Research Letters*, 2017. DOI: 10.1088/1748-9326/aa8847.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Brasília, DF: CONAMA, 2005.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). Políticas e soluções para cidades sustentáveis: Soluções baseadas na Natureza (SbN). Resumo Executivo. Brasília, DF: CGEE, 2022.

CURITIBA. Decreto nº 1.733, de 12 de outubro de 2020. Estabelece normas e diretrizes para a execução de obras de drenagem urbana no município de Curitiba e dá outras providências. Curitiba: Prefeitura Municipal de Curitiba, 2020.

FAIVRE, N.; FRITZ, M.; FREITAS, T.; DE BOISSEZON, B.; VANDEWOESTIJNE, S. Nature-based solutions in the EU: innovating with nature to address social, economic and environmental challenges. *Environmental Research*, v. 159, p. 509-518, 2017. DOI: 10.1016/j.envres.2017.08.026.

HANSEN, R.; RALL, E.; CHAPMAN, E.; ROLF, W.; PAULEIT, S. Urban green infrastructure planning guide. *Green Surge*, 2017.

XING, Y.; JONES, P.; DONNISON, I. Characterisation of nature-based solutions for the built environment. *Sustainability*, v. 9, n. 1, art. 149, 2017. DOI: 10.3390/su9010149.