

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

# **AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE JARDINS FILTRANTES DO PARQUE ORLA PIRATININGA DIANTE DE CENÁRIOS DE PRECIPITAÇÕES INTENSAS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

*Ana Carolina Dias Barboza<sup>1</sup> ; Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira<sup>2</sup>*

**Abstract:** Conventional urban drainage systems rely on structures designed to rapidly convey stormwater, a strategy that has proven insufficient in addressing current environmental and urban challenges. This situation is further worsened by the irregular discharge of untreated sewage into the drainage network. Nature-based solutions (NbS), such as biofiltration gardens, have emerged as viable alternatives due to their ability to retain, infiltrate, and treat stormwater, including possible sewage inflows, while mitigating urban flooding. The Orla Piratininga Park, located in Niterói/RJ, implemented such systems as part of an ecological restoration and socio-environmental development initiative around the Piratininga Lagoon. However, the hydraulic performance of these systems remains understudied, particularly under extreme rainfall events and future climate change scenarios. This study aims to evaluate the performance of the biofiltration gardens under intense rainfall, accounting for the potential impacts of climate change, including increased rainfall intensity and sea level rise. The methodology includes integrated hydrological and hydrodynamic simulations to represent different stress scenarios. The results highlight the effectiveness of the system under varying hydrological conditions and identify critical thresholds beyond which performance may be compromised, offering valuable insights into the resilience and limitations of NbS in urban flood management.

**Resumo:** A drenagem urbana convencional considera o conjunto de estruturas que possuem como função principal o escoamento de água pluvial de forma eficiente e rápida. A falência das soluções convencionais para os projetos de drenagem urbana demanda uma nova abordagem sobre o tema. Soma-se a esta falência a contribuição irregular de esgoto sanitário lançado ao sistema de drenagem. Os jardins filtrantes são uma das soluções baseadas na natureza (SbN) que possuem capacidade de reter e tratar as águas pluviais (incluindo possíveis contribuições de esgoto), além de promover a infiltração no solo, contribuindo para a redução de alagamentos. Neste contexto, destaca-se o Parque Orla Piratininga, localizado na lagoa de Piratininga, em Niterói/RJ, onde foi adotado o sistema de jardins filtrantes visando a recuperação do ecossistema local e a promoção do desenvolvimento socioambiental da região. O funcionamento hidráulico desta solução foi pouco explorado, principalmente sob o ponto de vista de eventos extremos e sob possíveis mudanças climáticas. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo uma avaliação do funcionamento do sistema diante de cenários de precipitação intensos, levando em consideração também o impacto das mudanças climáticas, que considerem o aumento da intensidade das precipitações e o nível médio do mar. Nessa circunstância, a metodologia utiliza simulação hidrológica e hidrodinâmica para simular possíveis cenários de funcionamento do sistema. O estudo permitiu identificar a eficiência dos jardins filtrantes em diferentes condições hidrológicas, considerando a capacidade de funcionamento diante de cenários que estressam o seu funcionamento.

**Palavras-Chave** – Soluções Baseadas na Natureza; Jardins Filtrantes; Mudanças Climáticas.

1) Afiliação: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Gávea, Rio de Janeiro, RJ. anacaroldb@hotmail.com

2) Afiliação: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Gávea, Rio de Janeiro, RJ. krishnamurti@puc-rio.br

## INTRODUÇÃO

O processo de urbanização tem se intensificado globalmente desde o século XX, impulsionado pelo crescimento populacional, pela industrialização e pelas migrações do campo para as cidades. Esse fenômeno, embora associado a oportunidades econômicas e sociais, também tem gerado sérios desafios no planejamento e na gestão urbana, especialmente nos países em desenvolvimento. Um dos aspectos mais críticos dessa expansão urbana é a ausência ou precariedade dos serviços de saneamento básico, que engloba o abastecimento de água potável, a coleta e o tratamento de esgoto, a drenagem urbana e o manejo de resíduos sólidos (BRASIL, 2020).

A ausência de saneamento básico nas cidades representa uma das mais graves deficiências em infraestrutura urbana no mundo atualmente. Segundo o Fundo das Nações Unidas para a Infância (UNICEF) e a Organização Mundial da Saúde (WHO), cerca de 3,6 bilhões de pessoas ainda não possuem acesso a serviços de saneamento seguros, o que corresponde a quase metade da população global (UNICEF; WHO, 2021). Essa problemática afeta principalmente países em desenvolvimento devido ao crescimento urbano ter superado a capacidade dos governos em prover serviços essenciais de forma equitativa.

Os impactos da falta de saneamento são extensos e multifacetados. Em termos de saúde pública, a inexistência de sistemas adequados de coleta e tratamento de esgoto contribui para a proliferação de doenças de veiculação hídrica (WHO, 2017). Além disso, a exposição constante a ambientes insalubres compromete o desempenho escolar, a produtividade e a qualidade de vida da população, gerando ciclos de pobreza e exclusão social (HUTTON; VARUGHESE, 2016).

Do ponto de vista ambiental, uma das consequências mais visíveis da ausência de saneamento é a degradação dos corpos hídricos urbanos. De acordo com dados da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), mais de 80% dos esgotos produzidos em países em desenvolvimento são descartados no meio ambiente sem tratamento (WWAP, 2023). Esse descarte inadequado promove a eutrofização das águas, a perda da biodiversidade aquática e a contaminação de recursos hídricos utilizados para consumo humano.

A poluição contínua dos corpos hídricos compromete não apenas o equilíbrio ecológico, mas também os diversos usos da água, como abastecimento público, irrigação, recreação e pesca. Em áreas densamente povoadas, a degradação da qualidade da água resulta em altos custos para o tratamento do recurso, além de tornar inviável sua utilização segura, ampliando a escassez hídrica (ANA, 2021). Rios urbanos poluídos apresentam baixos níveis de oxigênio dissolvido, alta turbidez e concentração de metais pesados, comprometendo a fauna aquática e afetando toda a cadeia trófica (BRASIL, 2020). Além disso, a sedimentação associada à erosão e ao despejo de resíduos sólidos urbanos acarreta o assoreamento dos cursos d'água, reduzindo sua capacidade de vazão e aumentando o risco de inundações nas áreas adjacentes (CARVALHO et al., 2017).

Frente a esse cenário, soluções vêm sendo adotadas para mitigar os impactos da ausência de saneamento. As soluções convencionais, centradas em infraestrutura cinza, consistem para o componente de águas pluviais em galerias e canalizações que aceleram os escoamentos e tendem a transferir alagamentos e inundações para jusante da intervenção. Para o componente de esgotamento sanitário as soluções convencionais correspondem a sistemas centralizados de coleta e tratamento de esgoto, por meio de redes subterrâneas e Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), baseadas em processos físico-químicos e biológicos (TSUTIYA, 1997). Embora eficientes em larga escala, essas soluções demandam altos custos de implantação, operação e manutenção, e muitas vezes não são adaptáveis a territórios ocupados de forma informal ou ambientalmente frágeis. Adicionalmente, esta abordagem setorial não prevê possíveis conexões irregulares entre estes dois componentes do

saneamento, dificultando sua gestão conjunta e a proposição de alternativas para problemas reais de interação entre os sistemas (Oliveira et al., 2024).

Como alternativa ou complemento às abordagens convencionais, surgem as Soluções Baseadas na Natureza (SbN), que consistem na aplicação de processos ecológicos naturais ou semi-naturais para prover serviços sanitários, como o tratamento de esgoto doméstico, a infiltração e reutilização de águas cinzas, e o controle da poluição difusa, ou até a contribuição irregular entre os componentes de drenagem urbana e esgotamento sanitário. De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, SbN são intervenções inspiradas e sustentadas por processos naturais, que têm como objetivo oferecer benefícios ambientais, sociais e econômicos de maneira eficaz e resiliente (UNEP, 2020). Além da capacidade de tratamento, as SbN oferecem cobenefícios que superam as funcionalidades dos sistemas convencionais de saneamento. Entre eles destacam-se a promoção da biodiversidade urbana, a criação de microclimas mais amenos, a melhoria da paisagem, a valorização imobiliária e a oferta de espaços de lazer e educação ambiental (BRASIL, 2020).

Apesar dos avanços, a ampliação do uso de SbN no Brasil ainda enfrenta desafios relacionados à falta de conhecimento técnico entre gestores públicos, ausência de normativas específicas, resistência cultural à inovação e limitação de recursos financeiros. Superar esses entraves requer investimentos em capacitação, promoção de experiências demonstrativas, apoio institucional e integração das SbN aos marcos legais e regulatórios de planejamento urbano e saneamento básico (UN-HABITAT, 2020). Apesar disto, o município de Niterói/RJ tem se projetado como um exemplo inovador de integração entre urbanismo e ecologia. Um dos marcos dessa abordagem é o Projeto ProSustentável, uma iniciativa municipal voltada à promoção da resiliência urbana, sustentabilidade ambiental e requalificação de ecossistemas costeiros e lagunares. Dentro do escopo do ProSustentável, destaca-se o Parque Orla Piratininga Alfredo Sirkis (POP), considerado o maior projeto de SbN do Brasil, com área de 680 mil metros quadrados (CAF, 2023).

O parque foi concebido para tratar as águas residuárias (pluviais e esgotamento sanitário) e melhorar a qualidade da água da Lagoa de Piratininga por meio de jardins filtrantes. Porém, o funcionamento hidráulico desta solução foi pouco explorado, principalmente sob o ponto de vista de eventos extremos e sob a possível ação de mudanças climáticas.

Dessa forma, o estudo tem como objetivo uma avaliação do funcionamento hidráulico do sistema de jardins filtrantes no Parque Orla Piratininga (especificamente do sistema do Rio Cafubá), em períodos de estiagem e cheia, levando em conta os últimos anos hidrológicos registrados em Niterói que incluem eventos de chuva intensos ocorrido em 2020, bem como a consideração do impacto das mudanças climáticas, considerando o aumento da intensidade de eventos meteorológicos extremos e do nível do mar.

## **ESTUDO DE CASO**

A cidade de Niterói está situada na margem leste da Baía de Guanabara entre o mar e as encostas ocidentais do maciço litorâneo fluminense, dentro da região metropolitana do estado do Rio de Janeiro, na região Sudeste do país. Faz divisa ao norte com o município de São Gonçalo, ao sul com o Oceano Atlântico, à leste com o município de Maricá e à oeste com a Baía de Guanabara. Atualmente, Niterói é o quinto município mais populoso do Estado, contando com 481.749 habitantes (IBGE, 2022) e densidade demográfica de 3601,67 hab/km<sup>2</sup>.

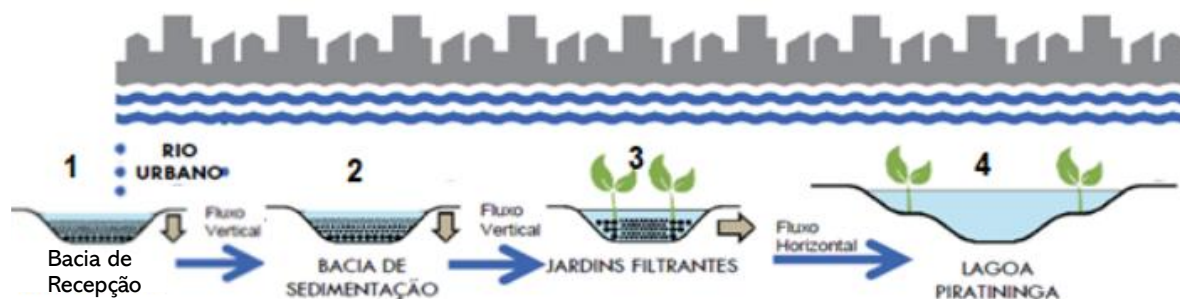
Em termos de saneamento básico vale destacar que entre 2018 e 2022, foram investidos mais de R\$ 200 milhões em melhorias no setor, incluindo a ampliação de reservatórios de água, construção de novas adutoras e modernização de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) em bairros como Sapê, Caramujo e Jurujuba (PREFEITURA DE NITERÓI, 2024). Adicionalmente nos últimos anos

Soluções Baseadas na Natureza para complementar a infraestrutura de saneamento vem sendo projetadas e implementadas no município, com destaque para o Parque Orla Piratininga, estudo de caso do presente trabalho.

O Parque Orla Piratininga Alfredo Sirkis (POP) é um parque público localizado na margem da Lagoa de Piratininga, projetado para aproximar os visitantes do meio natural em um contexto urbano, por meio de soluções baseadas na natureza. O projeto do Parque Orla Piratininga é reconhecido como o maior projeto de soluções baseadas na natureza (SbN) do Brasil. O parque possui 680 mil metros quadrados, conta com 10 píeres, 17 praças, 3 mirantes e um centro ecocultural voltado para educação ambiental (PRO SUSTENTÁVEL, PREFEITURA DE NITERÓI). Além da implementação dos jardins filtrantes, objeto de estudo do trabalho, promoveu a requalificação de algumas áreas, com obras de drenagem, pavimentação e saneamento.

O POP conta com 35.290m<sup>2</sup> de Jardins Filtrantes. O sistema atua nos rios Cafubá, Jacaré e Arrozal e a escolha desses 3 rios em relação aos disponíveis é justificada pela vazão mínima para a atuação do projeto e pela disponibilidade de área livre para sua implantação. O estudo de caso se concentra em analisar o funcionamento do sistema de Jardins Filtrantes aplicado especificamente no Rio Cafubá. O sistema dos Jardins Filtrantes destinados ao Rio Cafubá é composto por três etapas principais e sequenciais: a bacia de recepção, a Bacia de Sedimentação e os três Jardins Filtrantes, como observado na Figura 1.

Figura 1 – Sistema esquematizado dos Jardins Filtrantes da Lagoa de Piratininga. Fonte: Projeto Parque Orla Piratininga (2024)



## METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada em três etapas principais: uma etapa de análise hidrológica, uma para a definição das contribuições de esgoto ao sistema, e outra de modelagem hidrodinâmica, voltada à avaliação do desempenho hidráulico dos jardins filtrantes. Serão analisados quatro cenários, com base na simulação de sete anos de dados pluviométricos (2018 a 2024), incluindo eventos extremos ocorridos em 2020. Os cenários simulados consideram as chuvas reais ocorridas, e os possíveis efeitos das mudanças climáticas, representados pelo aumento da intensidade das chuvas, pela elevação do nível médio do mar e pela combinação de ambos os fatores.

Em relação ao estudo hidrológico, levando em conta a área da bacia hidrográfica de 2,12 km<sup>2</sup> foi possível adotar o método racional. Embora o método racional tradicional seja indicado para áreas de até 50 hectares, Fritsch (2013) sugere que ele pode ser estendido para bacias de até 100 hectares, desde que se adote um coeficiente de retardo, o qual busca corrigir a superestimativa da vazão provocada por áreas maiores ou por irregularidades de escoamento. Dessa forma, o cálculo da vazão segue a Equação 2.

$$Q_p = \frac{C \times Im \times A}{3,6} \times \phi \quad (2)$$

Na qual:  $Q_p$  = vazão de pico ( $m^3/s$ );  $C$  = coeficiente de escoamento superficial ;  $Im$  = intensidade máxima média de precipitação ( $mm/h$ );  $A$  = área da bacia hidrográfica;  $\phi$ =coeficiente de retardamento.

A intensidade máxima média da chuva ( $Im$ ) foi determinada a partir de dados de precipitação no intervalo de 2018 a 2024, com base em duas fontes: os dados históricos disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) abrangendo o período de julho de 2018 a dezembro de 2023, considerando eventos com duração de 60 minutos, e os registros de um pluviômetro instalado no bairro do Cafubá no ano de 2024, que forneceu dados mais localizados e atualizados, para eventos de mesma duração.

O aporte de esgotamento sanitário corresponde à estimativa da carga líquida gerada pelas atividades humanas em determinada área, representando um parâmetro essencial para o dimensionamento de sistemas de coleta, tratamento e disposição final de esgotos. Para a obtenção desse valor, adota-se, comumente, a premissa de que a geração de esgoto corresponde a uma fração do consumo de água potável, conforme estabelecido por autores técnicos e normativas setoriais.

Inicialmente, deve-se levantar o consumo médio diário de água per capita (litros/habitante/dia), valor que pode ser obtido por meio de dados fornecidos por companhias de abastecimento, estudos técnicos regionais ou referências bibliográficas. Esse valor é, então, multiplicado pela estimativa populacional da área de estudo, considerando as características da ocupação urbana.

Posteriormente, aplica-se um coeficiente de retorno, que expressa a fração do volume de água consumido que efetivamente se transforma em esgoto doméstico. Esse coeficiente, geralmente fixado entre 0,7 e 0,9, conforme literatura especializada, considera perdas por evaporação, infiltração, uso não sanitário e demais consumos não esgotáveis (TSUTIYA, 1997). No estudo em questão, o coeficiente utilizado será de 0,8 (ou 80%), de acordo com a norma ABNT NBR 9649:1986.

Quanto a bacia hidrográfica a ser estudada, a plataforma Infosnbas, que fornece dados e informações sobre saneamento básico nos municípios brasileiros, estima que o consumo de água na cidade de Niterói é de 193,8L/hab.dia. É importante destacar que o valor do consumo de água pode ser alterado dependendo das características sociais e ambientais locais. Tendo o consumo de água disponibilizado e o coeficiente de retorno, é possível encontrar a sua produção de esgoto.

O estudo hidráulico para a simulação do funcionamento do sistema utilizou o modelo matemático desenvolvido por Marcelo Gomes Miguez (2001) e difundido em maior escala em 2017, (MIGUEZ et al., 2017). O MODCEL (Modelo de Células de Escoamento) é um modelo hidrodinâmico que utiliza o conceito de células de escoamento para simular o comportamento hidrológico e hidráulico de bacias hidrográficas, especialmente em áreas urbanas. De acordo com Oliveira et al. (2022), o Modcel é destacado como uma ferramenta importante para a simulação de áreas destinadas ao armazenamento de volumes de controle de inundações, desempenhando a função de paisagens multifuncionais em projetos de infraestrutura azul-verde integrados aos sistemas de drenagem. Dessa forma, o Modcel se mostra eficaz para representar o funcionamento complexo do sistema de jardins filtrantes, como o estudo de caso estudado.

Para a análise do funcionamento dos Jardins Filtrantes, presente na Lagoa de Piratininga, 4 cenários foram considerados, com suas respectivas adequações realizadas no modelo hidrodinâmico, quando necessário.

O primeiro cenário corresponde a situação atual, utilizando dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pela Defesa Civil de Niterói, para gerar resultados de julho de

2018 a dezembro de 2024. O intuito desse primeiro cenário é entender o funcionamento do sistema e sua eficiência nesse período. É importante destacar que os Jardins Filtrantes da Lagoa de Piratininga foram inaugurados apenas no segundo semestre de 2023. O objetivo dessa simulação é entender seu possível funcionamento e sua eficácia, anteriormente e posteriormente à data de inauguração.

O segundo cenário analisa a influência das mudanças climáticas, considerando apenas o aumento da precipitação, com as condições do cenário anterior, isto é, levando em conta, ainda, as configurações anteriores no modelo hidrodinâmico. Para a adaptação da ocorrência das mudanças climáticas, a chuva de projeto sofreu um incremento de 30% na sua intensidade, prevista pelo IPCC e conforme sugerido no trabalho de Oliveira et al. (2023).

O terceiro cenário proposto tem por finalidade analisar os efeitos das mudanças climáticas sobre o sistema hídrico da Lagoa de Piratininga, considerando exclusivamente a elevação do nível médio do mar. Para tal, adota-se como referência o estudo intitulado “Cenário Otimista de elevação do nível médio do mar de 0,50 m e Possíveis Impactos Ambientais, Resultantes de Variações de Marés, na Cidade de Niterói”, realizado por pesquisadores da Universidade Federal Fluminense (UFF). Este cenário parte da premissa de que, ainda que a precipitação se mantenha constante, a elevação do nível do mar pode alterar significativamente os fluxos hidrodinâmicos da lagoa e impactar a eficiência dos Jardins Filtrantes, especialmente nas condições de maré alta e intrusão salina, podendo comprometer o escoamento gravitacional e o funcionamento das estruturas de drenagem.

Por fim, sugere-se um quarto cenário, integrando os efeitos analisados nos cenários dois e três, de forma a representar uma projeção mais abrangente e realista dos impactos das mudanças climáticas sobre a bacia hidrográfica. Neste cenário combinado, considera-se simultaneamente o incremento de 30% na intensidade das chuvas, conforme indicado pelo IPCC e Oliveira et al. (2023), e a elevação do nível médio do mar em 0,50 m, conforme estudo da UFF. Tal abordagem visa avaliar de maneira integrada o comportamento do sistema frente a eventos extremos de precipitação associados à elevação do nível do mar, permitindo identificar possíveis sobrecargas hidráulicas, riscos de transbordamento e comprometimentos na eficiência dos Jardins Filtrantes.

## RESULTADOS

Visando viabilizar as simulações hidrodinâmicas, conduziu-se um estudo hidrológico, com o objetivo de determinar as vazões de contribuição para o sistema de jardins filtrantes, fundamentado na caracterização da bacia hidrográfica em análise, conforme descrito no item de metodologia. Os dados da bacia hidrográfica utilizados nesse levantamento encontram-se apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 Dados do Estudo Hidrológico. Fonte: Própria

DESCRIÇÃO	Valor	Unidade
Área	2,12	km <sup>2</sup>
População	3.48	hab
Coefficiente de Escoamento	0,39	adimensional
Consumo de água por habitante	193,8	L/hab.dia
Produção de esgoto por habitante	155,04	L/hab.dia
Produção de esgoto no bairro do Cafubá	0,006	m <sup>3</sup> /s

Os registros pluviométricos adotados neste estudo referem-se a dois conjuntos de dados complementares. Os dados relativos ao período de julho de 2018 a dezembro de 2023 foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), órgão oficial de monitoramento meteorológico que disponibiliza integralmente os registros pluviométricos para o município de Niterói. Já os dados

de 2024 foram fornecidos pela Defesa Civil de Niterói, a qual implantou no próprio ano de 2024 uma rede de pluviômetros distribuídos pela cidade.

A partir do estudo hidrológico, foram obtidas as contribuições de vazão para o Jardim Filtrante. Na Figura 2 é representado o hidrograma relativo à resposta dos eventos pluviométricos reais, sem o aumento da precipitação, que foi utilizado como condição de contorno para realizar as simulações hidrodinâmicas dos cenários 1 e 3. Com o objetivo de realizar as simulações hidrodinâmicas dos cenários 2 e 4, foi necessário considerar um acréscimo de 30% na intensidade das chuvas, gerando um segundo hidrograma, demonstrado na Figura 3.

Figura 2 – Hidrograma referente ao cenário atual.

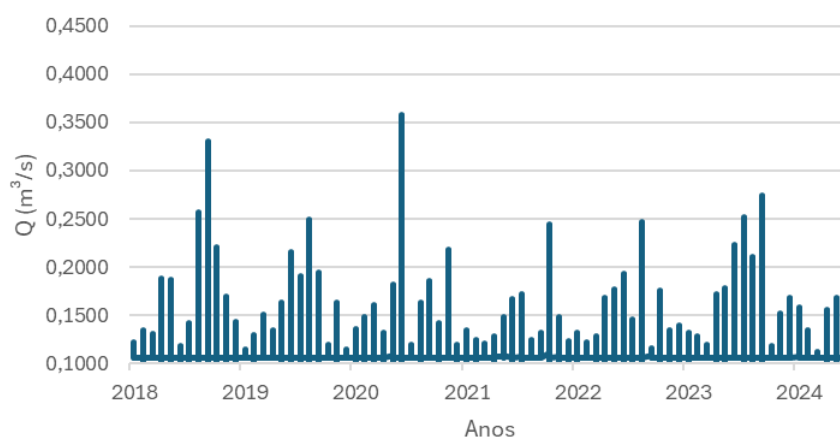
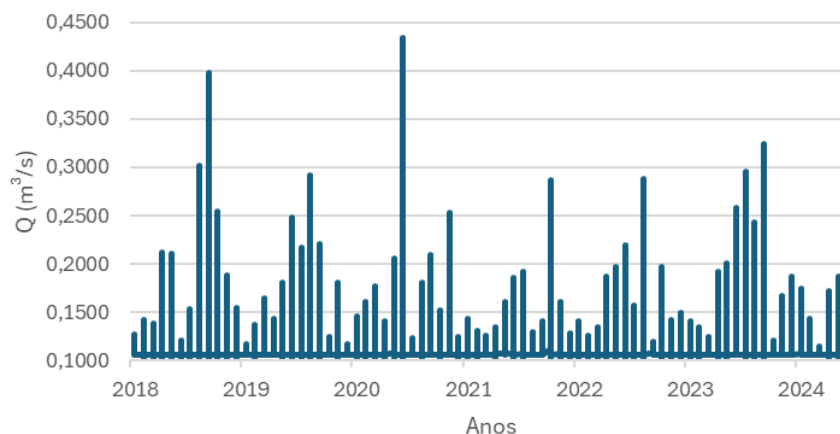


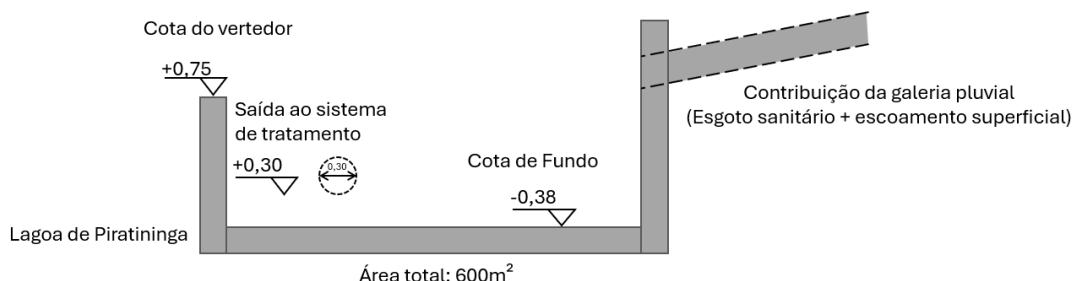
Figura 3 – Hidrograma considerando aumento da precipitação.



O modelo hidrodinâmico desenvolvido focou no funcionamento da bacia de recepção, bem como nas suas possíveis saídas, seja pela conexão com a bacia de sedimentação ou pelo vertimento direto à Lagoa de Piratininga. A simulação da Bacia de Sedimentação e os três Jardins Filtrantes foi realizada de maneira simplificada, uma vez que se o aporte da bacia de recepção ao sistema de tratamento superasse os 0,2 m³/s seria considerada a falha do sistema. A Figura 4 apresenta de forma esquemática a bacia de recepção simulada bem como as possíveis saídas.

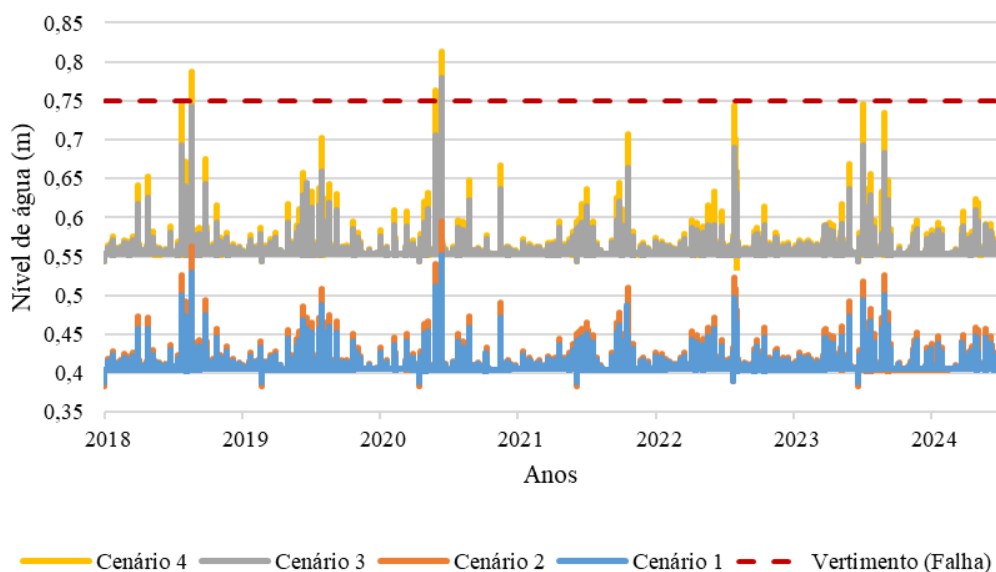
O modelo também incorporou uma condição de contorno a jusante para representar o nível médio da Lagoa de Piratininga. No cenário sem mudanças climáticas, o nível foi fixado na cota zero; já no cenário com mudanças climáticas, adotou-se a cota 0,50. Devido à ausência de dados sobre a variação do nível da lagoa, optou-se por essa abordagem simplificada.

Figura 4 – Esquema de funcionamento da bacia de recepção.



A partir dos dados de entrada citados foi possível elaborar a base de simulação no Modcel. A Figura 5 apresenta os resultados dos 4 cenários mostrando a variação de nível na bacia de recepção, resultados de níveis de água acima de 0,75 indicam vertimento da estrutura na direção da Lagoa sem tratamento. A análise comparativa entre os quatro cenários simulados possibilitou compreender os limites operacionais e os pontos de fragilidade do sistema de jardins filtrantes diante de distintas mudanças climáticas.

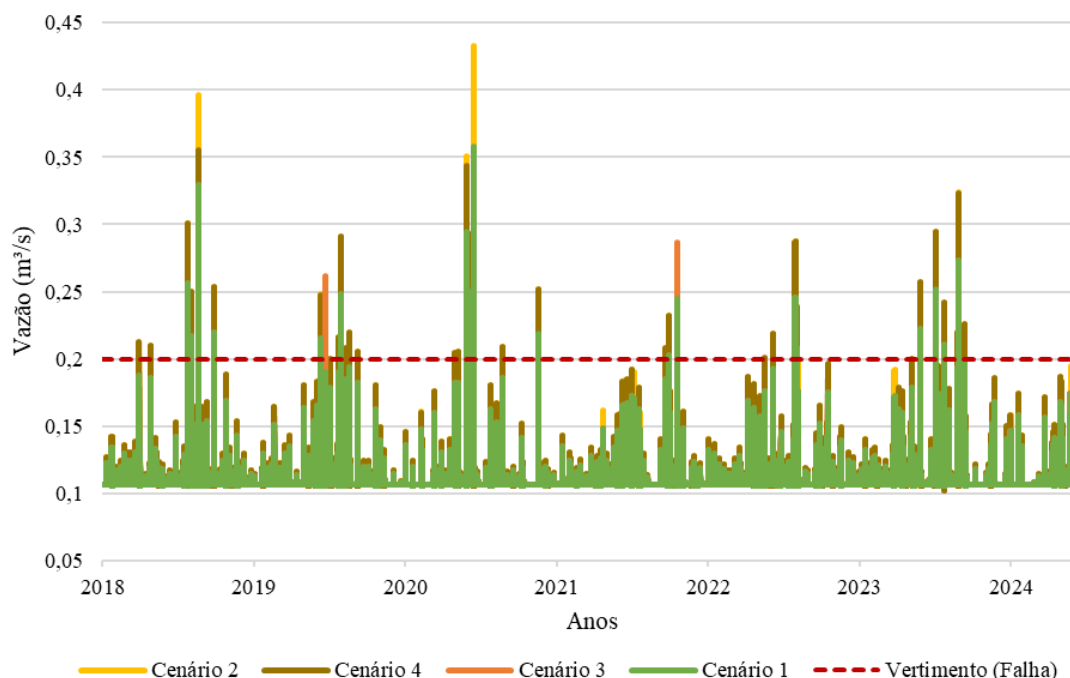
Figura 5 – Variação de Nível de Água na Bacia de Recepção de todos os cenários.



A elevação do nível do mar em 0,50m (cenário 3) faz com que toda a curva de variação de nível seja deslocada para valores mais elevados, provocando transbordamentos em situações pontuais, e a combinação de ambos os efeitos (cenário 4) resulta em extravasamentos com maior frequência, ainda que baixa, e níveis de até 0,80m.

Nos hidrogramas de vazão para a bacia de sedimentação, obtidos pela simulação hidrodinâmica, o cenário 1 raramente excede o critério de falha de  $0,20 \text{ m}^3/\text{s}$  (AquaFluxus, 2021), enquanto o cenário 2 atinge picos de até  $0,43 \text{ m}^3/\text{s}$ ; o cenário 3 aumenta modestamente a frequência de excedências e o cenário 4, embora um pouco atenuado em relação ao pico máximo do cenário 2, mantém as recorrências de falha, conforme pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Variação de Vazão na Bacia de Sedimentação de todos os cenários.



## CONCLUSÕES

Nas simulações dos cenários, o sistema de jardins filtrantes revelou desempenho resiliente, ainda que sujeito a variações conforme as condições impostas. No cenário de referência (situação atual), os jardins filtrantes operaram praticamente durante todo o período dentro de sua capacidade projetada, com vazões de entrada médias em torno de  $0,107 \text{ m}^3/\text{s}$  e picos isolados abaixo de  $0,30 \text{ m}^3/\text{s}$ , o que garante tempo de detenção adequado e eficiência na remoção de sólidos. Quando se aplicou o acréscimo de 30 % na intensidade pluviométrica, observou-se maior frequência de sobrecargas pontuais, com picos de até  $0,35 \text{ m}^3/\text{s}$  e falhas ocorrendo em aproximadamente 0,041% do tempo e, ainda assim, o sistema manteve hidrogramas suavizados e recuperou de forma rápida sua capacidade de infiltração. No cenário de elevação do nível do mar, embora a linha de base elevada tenha reduzido o gradiente hidráulico de saída, os jardins filtrantes continuaram a operar dentro dos limites operacionais em quase 100% do tempo, registrando picos moderados próximos a  $0,28 \text{ m}^3/\text{s}$ . Finalmente, na combinação dos dois impactos, a vazão de pico no jardim mais crítico atingiu  $0,30 \text{ m}^3/\text{s}$  e as durações acima do limiar de  $0,20 \text{ m}^3/\text{s}$  aumentaram, mas não comprometeram a funcionalidade principal do sistema, que apresentou eficiência superior a 99% do período simulado. Esses resultados destacam que, mesmo sob tensões provocadas por eventos climáticos extremos, o sistema de jardins filtrantes proporciona amortecimento hidráulico inicial eficaz e manutenção de condições de operação estáveis, evidenciando sua resiliência e adequação como solução baseada na natureza para manejo urbano de águas pluviais.

Em trabalhos que empregam modelagem hidrológica e hidrodinâmica para a avaliação de sistemas de jardins filtrantes, algumas limitações podem comprometer a precisão e a confiabilidade dos resultados. Inicialmente, a disponibilidade e a qualidade dos dados de campo muitas vezes são insuficientes: lacunas em séries pluviométricas, manutenção irregular de estações e ausência de monitoramento contínuo das cotas de jusante dificultam a calibração e validação do modelo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Atlas de saneamento: diagnóstico do esgotamento sanitário urbano. Brasília: ANA, 2021.
- AQUAFLUXUS. Estudo de concepção de sistema de jardins filtrantes para o Parque Orla de Piratininga Alfredo Sirkis – POPAS. Projeto AQF-2021005. Niterói: Aquafluxus, 2021.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Cadernos de Infraestrutura Verde Urbana. Brasília: MDR, 2020.
- CARVALHO, A. T. F.; SILVA, O. G.; CABRAL, J. J. P. Efeitos do revestimento de canal e impermeabilização do solo à dinâmica de inundação do rio Arrombados - PE. *Geociências*, v. 36, n° 1, p. 76 - 88, 2017.
- CAF – BANCO DE DESENVOLVIMENTO DA AMÉRICA LATINA. Inaugurado em Niterói o maior projeto de soluções naturais do Brasil. 2023.
- FRITSCH, F. E. D. Influência do uso e ocupação do solo nas vazões de pico na bacia hidrográfica do alto Rio Ligeiro, Pato Branco - PR. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tec. Federal do PR, 2013. 84p.
- HUTTON, G.; VARUGHESE, M. The Costs of Meeting the 2030 Sustainable Development Goal Targets on Drinking Water, Sanitation, and Hygiene. Washington: World Bank Group, 2016.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022). Indicadores de Desenvolvimento Sustentável: Brasil 2022.
- MIGUEZ, M. G. Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas. 2001. 410 f. Tese (Doutorado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.
- MIGUEZ, M. G. et al. Urban flood simulation using MODCEL—an alternative quasi-2D conceptual model. *Water*, v. 9, n. 6, p. 445, 2017.
- OLIVEIRA, A. K. B. Proposta de metodologia de simulação integrada das redes urbanas de drenagem pluvial e esgotamento sanitário. Tese (Doutorado). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2022.
- OLIVEIRA, A. K. B. et al. A framework for assessing flood risk responses of a densely urbanized watershed, to support urban planning decisions. *Sustainable And Resilient Infrastructure*, v. 1, p. 1-19, 2023.
- OLIVEIRA, A. K. B., MAGALHÃES, P. C. D., REZENDE, O. M., SOUSA, M. M. D., MARQUES, R. H. M., & GOMES MIGUEZ, M. MODCEL-MHUS: a comprehensive multilayer hydrodynamic unified simulation for stormwater, sanitary sewer systems, and urban surface. *Water Science & Technology*, v. 90, n. 1, p. 190-212, 2024.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE NITERÓI. Prefeitura de Niterói realiza seminário sobre Soluções Baseadas na Natureza. 2024. Disponível em: <https://niteroi.rj.gov.br/prefeitura-de-niteroi-realiza-seminario-sobre-solucoes-baseadas-na-natureza/>. Acesso em: 03 jun. 2025.
- TSUTIIYA, M. T. Instalações hidráulico-sanitárias. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1997.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People. Nairobi: UNEP, 2020.
- UN-HABITAT. World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization. Nairobi: UN-Habitat, 2020.
- UNICEF; WHO. Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000–2020: Five years into the SDGs. Geneva: World Health Organization, 2021.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Guidelines for Drinking-water Quality. 4. ed. Geneva: WHO, 2017.
- WWAP – UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water. Paris: UNESCO, 2023.