

SOLUÇÕES DE DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL EM ESCALA DE LOTE PARA REDUÇÃO DE ALAGAMENTOS: ESTUDO APLICADO A UM BAIRRO NA BACIA DO RIO ACARI (RIO DE JANEIRO/RJ)

João Pedro Moraes Fernandes de Freitas¹ ; Bruna Peres Battemarco²

RESUMO – A intensificação da urbanização tem provocado alterações no ciclo hidrológico urbano, com aumento do escoamento superficial e recorrência de alagamentos. Nesse contexto, soluções de drenagem urbana sustentável, aplicadas na escala do lote, surgem como alternativas complementares ao modelo convencional de drenagem. O presente estudo tem como objetivo avaliar o potencial dessas soluções na redução de lâminas de alagamento no bairro de Osvaldo Cruz, inserido na Bacia do Rio Acari, no município do Rio de Janeiro (RJ). A metodologia baseou-se na aplicação do Modelo de Células de Escoamento (MODCEL), integrado a análises espaciais em ambiente SIG, utilizando como cenário de referência um projeto prévio de macrodrenagem para a Bacia do Rio Acari, para simulação de três cenários: (i) implantação de reservatórios de retardo nos lotes, (ii) adoção de soluções de infiltração e (iii) combinação das duas estratégias. Os resultados indicaram reduções no volume total de inundação de 48,6% no cenário de armazenamento, 5,7% no cenário de infiltração e 55,9% no cenário combinado. Observou-se que a integração entre retenção e infiltração potencializa o controle hidrológico, promovendo redução mais expressiva das lâminas de inundação. Os resultados evidenciam que intervenções descentralizadas apresentam elevado potencial na mitigação de alagamentos urbanos recorrentes, atuando de forma complementar às intervenções em escala de bacia e reforçando a importância da integração entre diferentes escalas de planejamento da drenagem.

Palavras-Chave – Drenagem Urbana, Alagamentos, Escala de lote.

ABSTRACT– The intensification of urbanization has caused significant changes in the urban hydrological cycle, increasing surface runoff and the recurrence of urban flooding. In this context, sustainable urban drainage solutions applied at the lot scale emerge as complementary alternatives to conventional drainage systems. This study aims to evaluate the potential of these solutions to reduce flood depths in the Osvaldo Cruz neighborhood, located within the Acari River Basin, in the city of Rio de Janeiro, Brazil. The methodology was based on the application of the Flow Cell Model (MODCEL), integrated with spatial analyses in a GIS environment, using as reference scenario a previous macrodrainage project developed for the Acari River Basin, in order to simulate three scenarios: (i) implementation of on-site detention reservoirs, (ii) adoption of infiltration-based solutions, and (iii) combination of both strategies. The results indicated reductions in total flood volume of 48.6% in the storage scenario, 5.7% in the infiltration scenario, and 55.9% in the combined scenario. The integration between detention and infiltration enhanced hydrological control, resulting in more significant reductions in flood depths. The findings demonstrate that decentralized interventions have high potential for mitigating recurrent urban flooding, acting as complementary measures to basin-scale interventions and reinforcing the importance of integrating different drainage planning scales.

Key-words – Urban Drainage, Urban Flooding, Lot-scale Interventions.

1) Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua São Francisco Xavier, 524 - Maracanã, Rio de Janeiro – RJ, freitas.joao@graduacao.uerj.br;

2) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, R. São Francisco Xavier, 524 - Maracanã, Rio de Janeiro - RJ, 20550-013 e Programa de Engenharia Urbana, Universidade Federal do Rio de Janeiro, brunabattemarco@eng.uerj.br

INTRODUÇÃO

A drenagem urbana constitui um dos pilares do saneamento básico e desempenha papel essencial na organização do espaço urbano, tendo como objetivo o manejo adequado das águas pluviais e a prevenção de inundações e prejuízos associados. Nesse sentido, destaca-se que a drenagem requer não apenas infraestrutura de condução, mas também áreas destinadas à infiltração, retenção e detenção, o que reforça a importância de parques, jardins e áreas de preservação ambiental nas cidades (Netto e Fernandez, 2015).

Cabe destacar que a urbanização acelerada e as mudanças climáticas têm exposto as limitações dos sistemas de drenagem, fazendo com que as inundações urbanas permaneçam entre os principais desafios enfrentados pelas cidades. Dados recentes evidenciam a magnitude desse problema. Aproximadamente 40% dos desastres registrados globalmente em 2024 estiveram associados a eventos hidrológicos, como inundações e tempestades (CRED, 2025). No Brasil, entre 2013 e 2023, foram contabilizadas 18.918 ocorrências de desastres relacionados a inundações, enxurradas e alagamentos, que impactaram diretamente a vida de populações vulneráveis e comprometeram a infraestrutura urbana (CNM, 2024).

Nesse sentido, torna-se necessário repensar abordagens baseadas no rápido afastamento da água, em direção a estratégias mais integradas e sustentáveis. A integração entre infraestrutura cinza e infraestrutura verde desponta como uma estratégia complementar capaz de potencializar a eficiência da drenagem urbana (Miguez *et al.*, 2016), sendo incorporada a instrumentos normativos recentes, como a Norma de Referência nº 12/2025 da ANA (ANA, 2025), alinhada às diretrizes da Lei nº 14.026/2020 (BRASIL, 2020).

Nesse cenário, destaca-se o papel estratégico da escala do lote, uma vez que a forma de ocupação urbana influencia diretamente o comportamento hidrológico das bacias. A impermeabilização associada às edificações aumenta o escoamento superficial e contribui para a intensificação dos picos de vazão (PROSAB, 2009). Assim, intervenções descentralizadas nessa escala, como reservatórios de retardo e soluções de infiltração (jardins de chuva e pavimentos permeáveis, por exemplo) permitem atuar diretamente na fonte, promovendo armazenamento temporário e redução da carga hidráulica direcionada aos sistemas de drenagem (GUAJAVA; AQUAFLORA; KRALINGEN, 2023).

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar o potencial de soluções de drenagem urbana sustentável na escala do lote, focadas no armazenamento e na infiltração, para a redução de lâminas de alagamento no bairro de Osvaldo Cruz, inserido na Bacia do Rio Acari, no município do Rio de Janeiro (RJ).

METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada em três etapas principais. A primeira etapa corresponde à estruturação da base territorial e hidrodinâmica da Bacia do Rio Acari, envolvendo o levantamento e a sistematização de informações físicas, hidrológicas e cartográficas, bem como a incorporação dos produtos da modelagem hidrodinâmica previamente desenvolvida para a bacia por Oliveira (2018) e posteriormente aplicada por Guimarães (2022). Os autores utilizaram o Modelo de Células de Escoamento – MODCEL (Míguez *et. al*, 2017), que representa a bacia por meio de células de escoamento e permite a simulação integrada do escoamento superficial. Para as análises, foi considerado o cenário de referência com tempo de recorrência de 10 anos (TR10), adotado como parâmetro para o dimensionamento de sistemas de microdrenagem no município do Rio de Janeiro, conforme estabelecido no Manual de Drenagem da Fundação Rio-Águas (RIO DE JANEIRO, 2019).

A segunda etapa envolve a análise em escala local do bairro de interesse a esse estudo, baseada em procedimentos de geoprocessamento no QGIS para caracterização do padrão construtivo, quantificação de edificações e processamento das manchas de inundação, incluindo o cálculo de áreas, lâminas médias e volumes associados. O bairro de Osvaldo Cruz foi escolhido com base em critérios como a presença de manchas de inundação remanescentes, recorrência de alagamentos e predominância de edificações formais, o que favorece a viabilidade de implementação de medidas de drenagem na escala do lote.

A terceira etapa consistiu na estruturação e simulação de cenários de intervenção local, com base no cenário de projeto de macrodrenagem previamente existente, proposto por Oliveira (2018). Foram considerados três cenários: (i) aplicação de reservatórios de retardo em escala de lote, representando medidas de armazenamento; (ii) adoção de soluções de infiltração, como jardins de chuva e pavimentos permeáveis, implementadas nas áreas livres dos lotes; e (iii) combinação das duas estratégias. Para a representação espacial das intervenções, foram utilizadas as células de escoamento do MODCEL integradas a dados de edificações em ambiente SIG, permitindo estimar o número de edificações por célula e associar os parâmetros de intervenção correspondentes.

O dimensionamento do reservatório de retardo foi realizado com base nos critérios estabelecidos pelo Decreto Municipal nº 23.940/2004 (RIO DE JANEIRO, 2004), por meio da Equação (1), que relaciona a área impermeabilizada do lote, um coeficiente de abatimento e a altura de chuva correspondente à localização do projeto, para a estimativa do volume do reservatório. Ressalta-se que cada edificação inserida no recorte do bairro passou a ser associada a um reservatório de retardo individual.

$$V = K \times A_i \times h \quad (1)$$

Onde: V é o volume do reservatório (m^3); K é o coeficiente de abatimento, correspondente a 0,15; A_i é a área impermeabilizada (m^2); h é altura de chuva (m), correspondente a 0,06 m nas Áreas de Planejamento 1, 2 e 4 e a 0,07 m nas Áreas de Planejamento 3 e 5 do município.

No cenário de infiltração, a área livre passível de intervenção foi estimada a partir da ocupação das células de esgoto, sendo atribuído a essa parcela um coeficiente de runoff (C) igual a 0,15, representativo de superfície com elevada capacidade de infiltração. O novo coeficiente de runoff da célula foi, então, determinado por meio de média ponderada entre a parcela da área que permaneceu com o coeficiente original do cenário de referência e a parcela correspondente à área livre do lote, à qual foi atribuído o valor reduzido de C . No cenário combinado, as duas estratégias foram aplicadas simultaneamente. Em todos os casos, os parâmetros das células foram atualizados e as simulações executadas no MODCEL, mantendo-se as demais condições constantes, possibilitando a comparação direta com o cenário de referência.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Estudo de Caso e Análise Local

A área de estudo está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Acari, localizada na Zona Norte do município do Rio de Janeiro (Área de Planejamento 3) e integrante da macrorregião de drenagem da Baía de Guanabara. A bacia possui área superior a 140 km^2 e abrange aproximadamente 42 bairros, dentre eles, Osvaldo Cruz, bairro de interesse (Figura 1). De acordo com Oliveira (2018), a ocupação da bacia do Rio Acari ocorreu de forma desordenada, sem a implantação adequada de infraestrutura urbana básica, especialmente nos fundos de vale e margens fluviais. Como consequência, a região apresenta sérios problemas de inundações, agravados pela elevada densidade populacional, pela degradação dos cursos d'água e pelas limitações hidráulicas tanto na macrodrenagem quanto na microdrenagem urbana.

Oliveira (2018) estruturou o modelo hidrológico-hidrodinâmico da bacia por meio do MODCEL e, a partir da simulação da situação atual e de cenários de projeto, para o tempo de recorrência de 25 anos, o autor evidenciou que os problemas de inundação na bacia não se restringem a eventos extremos, estando associados a alterações no funcionamento hidrológico decorrentes da urbanização e da limitação das infraestruturas de drenagem.

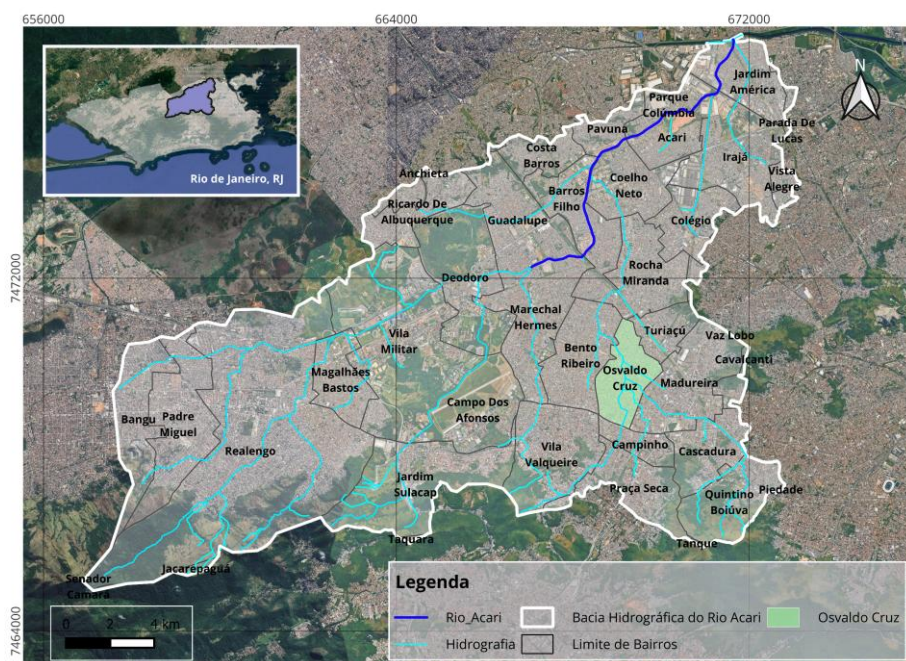


Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Acari, com delimitação da área de drenagem, rede hidrográfica principal e bairros abrangidos. Elaborado pelo autor (2026).

O autor avaliou diferentes alternativas de intervenção em escala de bacia, com foco na macrodrenagem, com destaque para a proposta que concilia as medidas previstas no Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais do Rio de Janeiro - PDMAP (HIDROSTUDIO/FCTH, 2014), que envolvem majoritariamente soluções de infraestrutura cinza, como reservatórios de retenção e obras de canalização, com a implantação de parques fluviais ao longo dos cursos d'água principais. A alternativa reduziu níveis máximos de lâmina d'água associados à macrodrenagem, mas não eliminou completamente os alagamentos em escala local, permanecendo lâminas remanescentes em áreas urbanizadas. Ressalta-se, contudo, que a microdrenagem não foi representada no modelo utilizado e, portanto, algumas lâminas de alagamento eram esperadas.

Com base nesse modelo, Guimarães (2022) aprofundou a análise das alternativas de intervenção ao incorporar uma abordagem integrada, considerando aspectos econômicos, sociais e ambientais para diversos tempos de recorrência, incluindo o de 10 anos, usado como referência para esse estudo. Os resultados também evidenciaram que, mesmo com intervenções em escala de bacia e para tempos de recorrência menores, persistem lâminas de alagamento em escala local, reforçando a necessidade de estratégias complementares.

Nesse estudo, o foco recaiu sobre o bairro de Osvaldo Cruz, selecionado por apresentar lâminas remanescentes no cenário de projeto proposto por Oliveira (2018) e predominância de edificações formais. O recorte possui área aproximada de 2,07 km², população de 29.819 habitantes e 7.717 edificações, com área média edificada de 118,62 m² por lote.

A Figura 2 apresenta a comparação entre as manchas de inundação resultantes da simulação da situação atual e do cenário de projeto de Oliveira (2018), considerando tempo de recorrência (TR) de 10 anos. A área inundada no bairro atinge aproximadamente 887.192 m², o que corresponde a cerca de 43% da área total de Osvaldo Cruz. Na situação atual, a lâmina média de alagamento estimada é de aproximadamente 0,36 m, associada a um volume total aproximado de 315.612 m³. No cenário de projeto, observa-se uma redução dos valores médios associados às inundações. A lâmina média estimada passa a 0,27 m, com volume total aproximado de 240.779 m³, evidenciando uma diminuição significativa tanto da lâmina média quanto do volume de água acumulada no bairro em relação à situação atual.

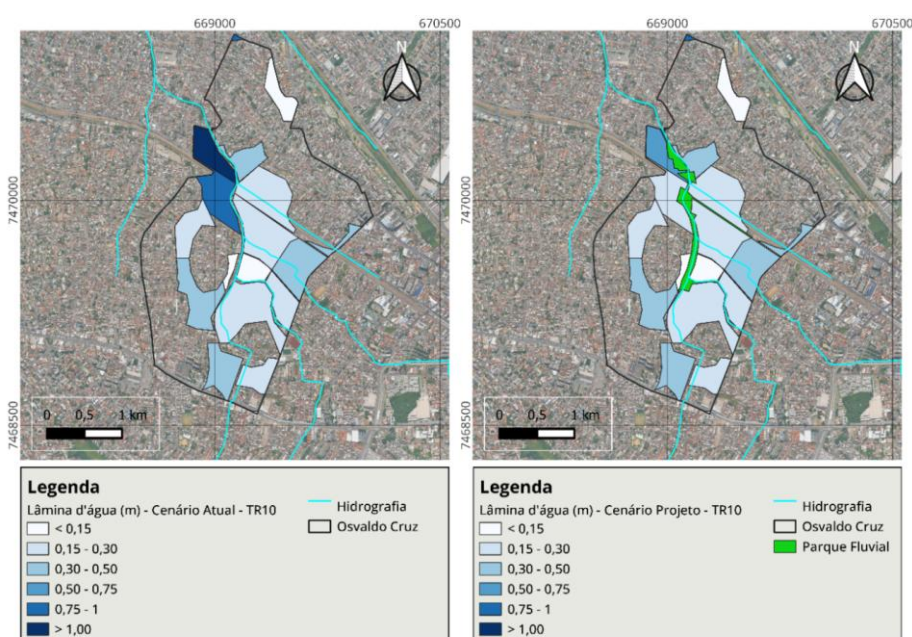


Figura 2 - Manchas de inundação no bairro de Osvaldo Cruz: situação atual e cenário de projeto – TR10. Elaborado pelo autor (2026) com dados de Oliveira (2018) e Guimarães (2022).

Proposta de técnicas sustentáveis em drenagem urbana na escala local

A partir da análise local, foram simulados três cenários de intervenção com base no cenário de projeto da Bacia do Rio Acari, originalmente desenvolvido por Oliveira (2018) e posteriormente simulado para o evento de TR = 10 anos por Guimarães (2022). Os cenários consideraram: (i) a implantação de reservatórios de retardo, (ii) a adoção de soluções de infiltração e (iii) a combinação de ambas as estratégias.

Ressalta-se que, no primeiro cenário, o dimensionamento foi realizado conforme os critérios estabelecidos pelo Decreto Municipal nº 23.940/2004, considerando como área impermeabilizada a área média da edificação (118,62 m²), coeficiente de abatimento igual a 0,15 e altura da chuva igual a 0,07 m, correspondente à Área de Planejamento 3. O volume resultante foi de 1,25 m³ por lote, sendo adotada profundidade máxima de 1,50 m e área superficial aproximada de 0,83 m². No modelo

hidrodinâmico, foi adotado orifício de saída de 50 mm, calibrado de modo a garantir o amortecimento das vazões locais, assegurando equilíbrio entre retenção e descarga controlada.

A Tabela 1 apresenta a síntese dos indicadores globais de inundação para o evento de $TR = 10$, permitindo a comparação entre os cenários simulados e o cenário de projeto. Observa-se que a aplicação de reservatórios de retardo promoveu uma redução significativa no volume total de inundação, da ordem de 48,6%, evidenciando a efetividade do armazenamento temporário no controle do escoamento superficial. Por outro lado, o cenário baseado exclusivamente em soluções de infiltração apresentou redução mais limitada, de aproximadamente 5,7%, indicando que seu desempenho está condicionado à disponibilidade de áreas livres e à capacidade de infiltração do solo urbano. O cenário combinado, por sua vez, apresentou o melhor desempenho entre os analisados, com redução de 55,9% no volume total de inundação, evidenciando que a integração entre estratégias de detenção e infiltração potencializa o controle hidrológico. Esse resultado indica que a atuação simultânea na redução da geração do escoamento e no controle do seu escoamento superficial contribui de forma mais eficiente para a mitigação dos alagamentos.

Tabela 1 - Indicadores Globais de Inundação (TR10).

Cenário	Lâmina Média (m)	Redução (%)	Volume Total (m³)	Redução (%)
Projeto	0,27	-	240.779	-
Cenário 1	0,14	48,1%	123.721	48,6%
Cenário 2	0,26	3,7%	227.126	5,7%
Cenário 3	0,12	55,6%	106.186	55,9%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise dos resultados por faixas de lâmina d'água permite uma avaliação mais detalhada do impacto das intervenções. A Tabela 2 apresenta a comparação para lâminas superiores a 0,30 m, que representam situações com maior potencial de causar danos. Observa-se que o cenário combinado promove a maior redução da área alagada e do volume associado a essas condições, indicando elevada eficiência na mitigação dos alagamentos mais críticos. O cenário com reservatórios de retardo apresenta desempenho intermediário, enquanto o cenário baseado exclusivamente em infiltração apresenta resultados mais limitados.

Tabela 2 - Comparação para Lâminas > 0,30 m (TR10).

Cenário	Área alagada (m²)	Redução (%)	% da Área do Bairro	Volume (m³)	Redução (%)
Projeto	305.341	-	15%	121.779	-
Cenário 1	194.651	36,3%	9%	78.788	35,3%
Cenário 2	268.316	12,1%	13%	103.815	14,8%
Cenário 3	137.852	54,9%	7%	57.134	53,1%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Por sua vez, a análise das lâminas superiores a 0,50 m indica que as intervenções propostas possuem impacto mais restrito nas situações de inundação mais severas. A área alagada permanece

inalterada entre os cenários (48.488 m²), enquanto as reduções de volume são pouco expressivas, sendo a maior delas de 7,7%, no Cenário 3. Esse comportamento sugere que, embora as soluções em escala de lote contribuam significativamente para a redução de alagamentos de menor magnitude, sua capacidade de atuação é limitada frente a eventos mais críticos, que estão fortemente associados às condições da macrodrenagem. A Figura 3 apresenta as manchas de inundação correspondentes aos cenários simulados, permitindo visualizar a redução das áreas alagadas e das lâminas d'água em relação ao cenário de referência.

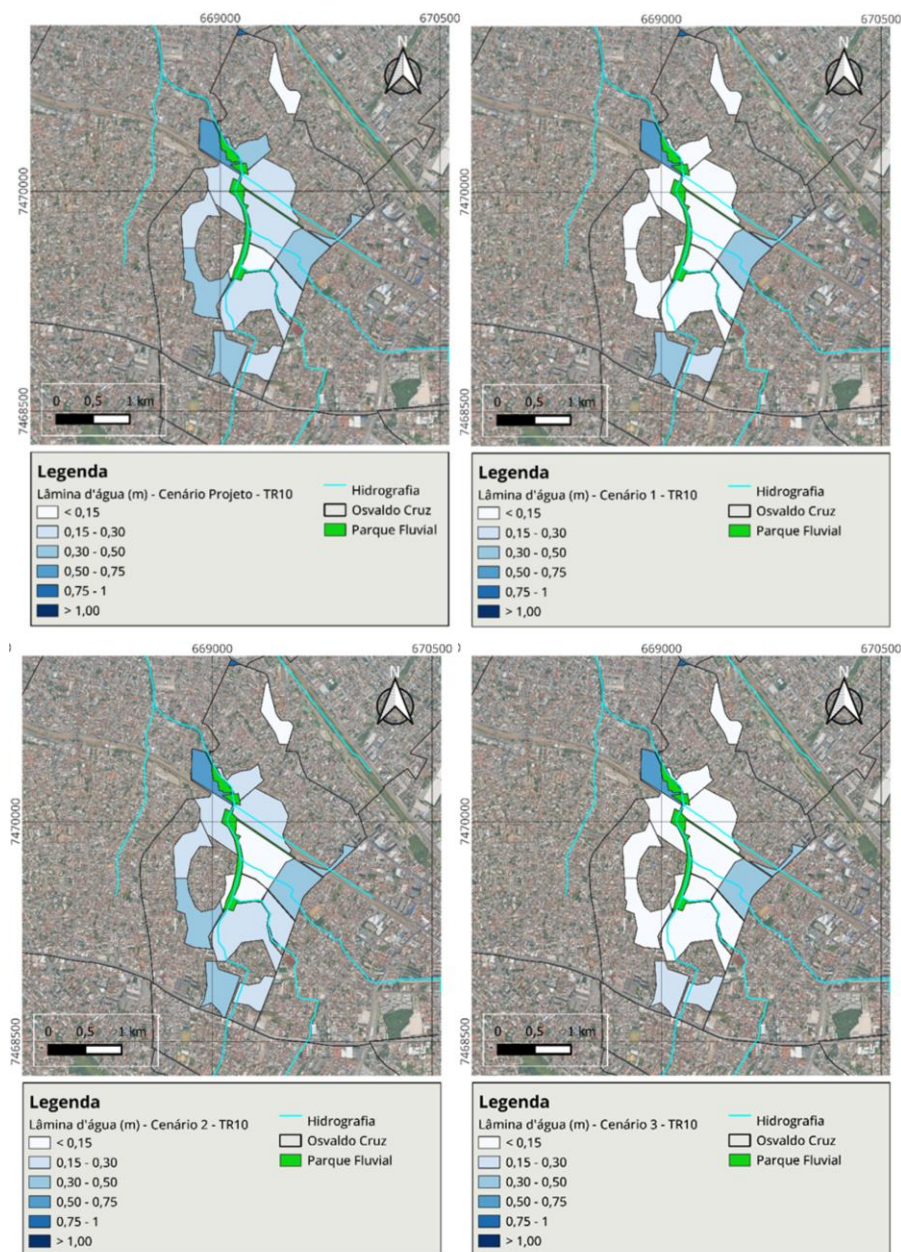


Figura 3 - Comparação das manchas de inundação no bairro de Osvaldo Cruz. Elaborado pelo autor (2026).

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos indicaram que soluções aplicadas na escala do lote apresentam capacidade efetiva de redução de volumes acumulados e de mitigação de lâminas intermediárias. A análise dos cenários mostrou que a implantação de reservatórios de retardo promove reduções expressivas nos volumes de inundação, enquanto as soluções de infiltração, quando aplicadas isoladamente, apresentam desempenho mais limitado. Por outro lado, a combinação dessas estratégias resultou no melhor desempenho entre os cenários avaliados, indicando que a articulação entre diferentes técnicas potencializa os ganhos hidráulicos e amplia a eficiência das intervenções descentralizadas.

A avaliação por faixas de lâmina d'água evidenciou que as intervenções em escala de lote são mais eficazes na redução de alagamentos de menor magnitude, contribuindo para a mitigação de impactos recorrentes no ambiente urbano. No entanto, para eventos mais severos, associados a maiores lâminas de inundação, sua atuação se mostra limitada, reforçando a dependência de intervenções estruturais em escala de bacia.

No entanto, é importante ressaltar que a análise se concentrou em um recorte espacial específico da Bacia do Rio Acari, não sendo automaticamente generalizável para toda a bacia ou para outros contextos urbanos com características distintas. Além disso, os cenários simulados consideram hipóteses de implantação sistemática das soluções, o que, na prática, depende de condições institucionais, econômicas e sociais para sua efetiva implementação.

Por fim, conclui-se que as soluções descentralizadas não substituem os sistemas convencionais de drenagem, mas atuam de forma complementar, contribuindo para a redução da carga hidráulica sobre a rede existente. Nesse contexto, a adoção integrada de medidas em diferentes escalas, combinando intervenções de macrodrenagem e soluções em escala de lote, mostra-se fundamental para o aumento da resiliência urbana frente aos eventos de precipitação.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (2025). Resolução nº 245, de 17 de março de 2025. “*Aprova a Norma de Referência nº 12/2025 que dispõe sobre a estruturação dos serviços públicos de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas.*” Brasília, Brasil.

NETTO, J. M. A.; FERNÁNDEZ, M. F. (2015). *Manual de hidráulica*. 9. ed. São Paulo: Blucher, 632 p.

BRASIL, GOVERNO FEDERAL (2020). “*Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020: atualiza o marco legal do saneamento básico*”.

CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS (2025). "2024 Disasters in Numbers". Brussels, Belgium.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS (2024). "Panorama dos Desastres no Brasil 2013 a 2023". Brasília, Brasil.

GUAJAVA; AQUAFLOA; KRALINGEN (2023). "Catálogo de soluções baseadas na natureza para espaços livres".

GUIMARÃES, L. F. (2022). "Avaliação de projetos de requalificação fluvial urbana em uma abordagem integrada de aspectos econômicos, sociais e ambientais". Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro.

HIDROSTUDIO/FCTH (2014). "Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Rio de Janeiro – PDMAP". Rio de Janeiro.

MIGUEZ, M. G.; BATTEMARCO, B. P.; SOUSA, M. M. et al. "Urban flood simulation using MODCEL-an alternative quasi-2D conceptual model". Water (Switzerland), v. 9, n. 6, 2017.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; REZENDE, O. M. (2016). "Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade". Rio de Janeiro: Elsevier, 384 p.

OLIVEIRA, A. K. B. (2018). "O sistema de drenagem como eixo estruturante do planejamento urbano: caso da bacia hidrográfica do Rio Acari. 2018. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro.

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO (2004). Decreto nº 23.940, de 30 de janeiro de 2004: Torna obrigatório, nos casos previstos, a adoção de reservatórios que permitam o retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem. Rio de Janeiro.

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO (2019). "Instruções técnicas para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana". Rio de Janeiro.

PROSAB (2009). "Manejo de águas pluviais urbanas". Rio de Janeiro: ABES.