

GESTÃO DE CHEIAS COM TIPOLOGIAS DE SBN: INTEGRAÇÃO ENTRE POLDER E RESERVAÇÃO NO BAIRRO SÃO BENTO, DUQUE DE CAXIAS (RJ)

*Nichollas Schmidt Bastos Marques Pereira Santos¹ ; Luiz Eduardo Siqueira Saraiva² & Matheus
Martins de Sousa³*

RESUMO – A frequência de inundações em setores periféricos urbanos evidencia desafios relacionados à impermeabilização intensa, drenagem deficiente, baixa declividade e ocupações consolidadas vulneráveis a eventos extremos. Nesse cenário, foi conduzida uma avaliação hidrodinâmica voltada à proposição de soluções sustentáveis para mitigação de cheias, por meio de armazenamento integrado a um sistema de polder implantado no bairro São Bento, em Duque de Caxias, inserido na bacia Iguaçu–Sarapuí. A metodologia utilizou modelagem quasi-bidimensional com o software ModCel, aplicada a uma sub-bacia discretizada em células interconectadas. Foram simulados três arranjos: situação atual, reservatório concentrado em estrutura externa e configuração combinada com reservatório principal conectado a módulo adjacente. As simulações consideraram precipitações com tempos de recorrência de 25 e 50 anos. A integração das manchas de inundação com dados demográficos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022) possibilitou estimar a população exposta a lâminas críticas. Os resultados indicaram reduções superiores a 60% na extensão dos setores inundados e no contingente populacional afetado, sobretudo em locais de elevada fragilidade socioambiental. O estudo oferece subsídios técnicos para o planejamento urbano adaptativo na região, implantação de infraestrutura sustentável e gestão integrada das águas pluviais em contextos metropolitanos consolidados.

Palavras-Chave – Modelagem hidrodinâmica; Infraestrutura sustentável; Resiliência socioambiental

ABSTRACT– Flood recurrence in peripheral urban areas reveals challenges linked to soil sealing, poor drainage, low terrain slope, and consolidated settlements vulnerable to extreme hydrological events. To address these issues, a hydrodynamic assessment was conducted in the São Bento district (Duque de Caxias, Iguaçu–Sarapuí watershed) to support the proposition of flood mitigation measures through integrated storage and a polder system. The quasi-two-dimensional modeling, performed with ModCel, simulated three scenarios: current conditions, a concentrated external reservoir, and a combined reservoir and adjacent module arrangement. Rainfall events with 25- and 50-year return periods were analyzed. Flood maps integrated with demographic data from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (2022) allowed estimation of exposed populations. Results showed reductions above 60% in inundated areas and affected residents, especially in highly vulnerable sectors. The findings provide technical support for adaptive urban planning, resilient infrastructure, and integrated stormwater management in metropolitan environments.

Key-words – Hydrodynamic modeling; Sustainable infrastructure; Socio-environmental resilience.

1) Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Cidade Universitária, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, CEP 21941-909. Tel.: +55 (21) 98049-0348. E-mail: nichollas.smpps@hotmail.com

2) Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Cidade Universitária, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, CEP 21941-909. Tel.: +55 (21) 97204-8652. E-mail: lessaraiva@poli.ufrj.br

3) Programa de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Cidade Universitária, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, CEP 21941-909. Tel.: +55 (21) 99571-8426. E-mail: matheus@poli.ufrj.br

INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

A ocorrência frequente de enchentes e alagamentos em áreas urbanas periféricas constitui um dos principais desafios para a gestão de riscos e adaptação urbana frente a eventos extremos na Baixada Fluminense. Inserido integralmente na Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu–Sarapuí, o bairro São Bento, no município de Duque de Caxias (RJ), apresenta elevada suscetibilidade a inundações em função das reduzidas declividades topográficas, da intensa impermeabilização do solo e das limitações históricas da infraestrutura de drenagem. Episódios recentes evidenciam a persistência desse cenário: em fevereiro de 2020, moradores permaneceram temporariamente ilhados após chuvas intensas, enquanto, em janeiro de 2024, diversos bairros do município registraram alagamentos prolongados decorrentes de eventos pluviométricos severos [VALOR ECONÔMICO (2024)]. Esses eventos ilustram os impactos das inundações sobre a mobilidade urbana, a habitabilidade e, sobretudo, a população residente em territórios marcados por elevada vulnerabilidade socioambiental.

Nesse contexto, torna-se necessária a adoção de estratégias de gestão integrada de cheias que superem a lógica convencional da drenagem urbana, frequentemente associada à rápida transferência de vazões para jusante e à limitada capacidade adaptativa frente à intensificação das chuvas e à expansão urbana. Entre essas estratégias, sistemas de reservação e polders integrados ao território urbano podem desempenhar papel relevante na mitigação de cheias ao promover o armazenamento temporário de volumes excedentes, reduzir picos de inundação e ampliar a resiliência hidrológica local. Além disso, tais soluções apresentam potencial de integração a abordagens de infraestrutura azul-verde e soluções baseadas na natureza voltadas à adaptação hidrológica urbana.

Assim, o presente estudo avalia a integração entre sistema de polder e estruturas de reservação hidráulica no bairro São Bento, utilizando modelagem hidrodinâmica quasi-2D com o modelo ModCel. A análise busca quantificar o desempenho hidráulico das soluções propostas, voltadas ao armazenamento temporário de excedentes pluviais e ao amortecimento de cheias, por meio da redução das manchas de inundação, das profundidades máximas e da população potencialmente exposta a lâminas d'água críticas em diferentes tempos de recorrência. Nesse sentido, a integração entre polder e reservatórios é discutida como alternativa de gestão de riscos urbanos e adaptação a eventos extremos, contribuindo para a redução da exposição socioambiental ao risco e para o suporte ao planejamento urbano adaptativo.

CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA DA ÁREA DE ESTUDO

O bairro São Bento, localizado no município de Duque de Caxias (RJ), insere-se integralmente na Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu–Sarapuí, unidade caracterizada por intensa urbanização e limitações históricas na infraestrutura de drenagem. A área de estudo apresenta elevada suscetibilidade a inundações em função da combinação entre reduzida altitude, relevo predominantemente plano e baixas declividades, condições que limitam o escoamento superficial e favorecem o acúmulo de água durante eventos de precipitação intensa. Os mapas hipsométrico e de declividade da bacia evidenciam o predomínio de cotas reduzidas e inclinações inferiores a 3% nos setores urbanizados, incluindo o bairro São Bento, configurando um ambiente naturalmente desfavorável à drenagem rápida das águas pluviais.

Nos setores densamente ocupados, esses condicionantes fisiográficos são intensificados pela elevada impermeabilização do solo, pelas alterações na rede de drenagem e pela insuficiência dos sistemas de micro e macrodrenagem. Além disso, a reduzida declividade longitudinal dos cursos d'água associados ao sistema Iguaçu–Sarapuí favorece a ocorrência de efeito de remanso, prolongando a permanência das lâminas d'água em áreas topograficamente deprimidas. Como consequência, observam-se alagamentos recorrentes, impactos sobre a mobilidade urbana e elevada vulnerabilidade hidrológica em áreas periféricas da Baixada Fluminense. Nesse contexto, a compreensão integrada dos condicionantes naturais e antrópicos torna-se fundamental para subsidiar ações de planejamento e gestão sustentável das águas urbanas na região.

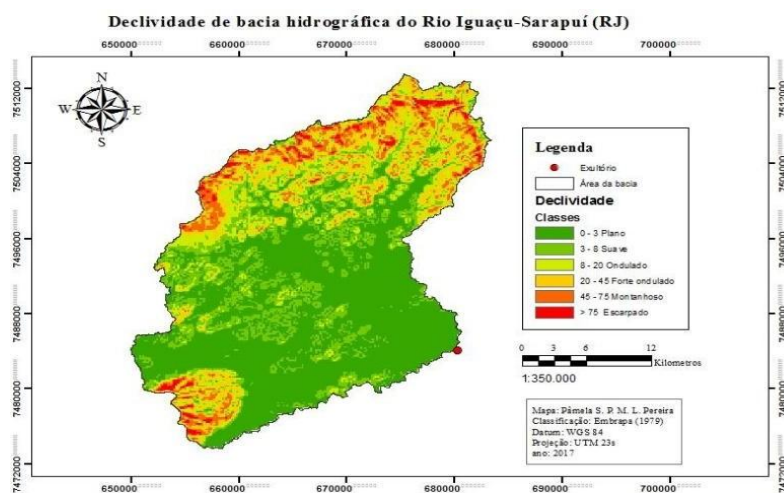


Figura 1 – Mapa de declividade da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu–Sarapuí (RJ). Fonte: Pereira e Mendes (2019).

METODOLOGIA

O procedimento de coleta de dados e o arranjo experimental utilizados neste estudo seguem os mesmos adotados no trabalho anterior dos mesmos autores, aceito para a apresentação no 5º Congresso Internacional de Engenharia Ambiental (5º CIEA), que enfocou a proposição do polder e

do canal auxiliar, comparando alternativas de reservação e bombeamento para o TR50. Contudo, diferentemente daquela abordagem, o presente estudo apresenta análises inéditas voltadas para a avaliação quantitativa da redução populacional afetada por alagamentos, considerando exclusivamente soluções de reservação. A avaliação inclui cenários TR25 e TR50, para os dois reservatórios propostos, permitindo comparar o impacto das intervenções sobre a população e a área inundada.

Modelagem Computacional da Bacia

No presente estudo, a sub-bacia modelada abrange aproximadamente 2,9 km² do bairro de São Bento, incluindo toda a área urbanizada à esquerda da Rua Castro Alves até a divisa com o município de Belford Roxo, na Rua Alexandrino Pinto, e cerca de 1,4 km² do bairro Parque Fluminense, ambos em Duque de Caxias. Estima-se que aproximadamente 38.971 pessoas residam na região analisada, de acordo com os dados mais recentes do IBGE (Censo Demográfico 2022), o que permite um nível adequado de detalhamento para avaliar a vulnerabilidade populacional e a distribuição urbana.

Para a simulação hidrodinâmica, foi utilizado o modelo ModCel (Modelo de Células de Escoamento), desenvolvido no Laboratório de Hidráulica Computacional da COPPE/UFRJ, baseado em abordagem quasi-2D para representação integrada do escoamento urbano [Miguez *et al.* (2017)]. O software representa a bacia como um conjunto de 1.598 células interconectadas, incluindo 58 células detalhadas especificamente para o bairro São Bento. Dessas, 37 foram definidas como tipo 2, correspondendo a planícies com comportamento de reservação, enquanto 21 foram classificadas como tipo 0, representando trechos de canal com escoamento confinado.

A discretização buscou refletir as características fisiográficas e hidráulicas locais, permitindo um refinamento da representação sem comprometer a coerência do arranjo hidráulico regional. A divisão das células resultou do cruzamento entre a topografia, representada pelas curvas de nível, e a malha urbana, garantindo que os fluxos preferenciais fossem simulados de forma realista. A incorporação dessas células ao modelo global possibilitou simular diferentes cenários de precipitação, identificar pontos críticos de acúmulo de água e estimar níveis máximos de inundação.

A calibração dos parâmetros e a definição dos eventos de precipitação adotados basearam-se em aplicações previamente validadas para a bacia Iguaçu–Sarapuí, com o modelo de base calibrado [Marques *et al.* (2017)], apresentando boa concordância entre os níveis simulados e observados. Dessa forma, o ModCel forneceu uma base robusta para a avaliação do desempenho de soluções de reservação e estratégias de gestão sustentável das águas urbanas, destacando a interação entre canais,

planícies de inundação e áreas urbanizadas, bem como o impacto potencial sobre a população residente.

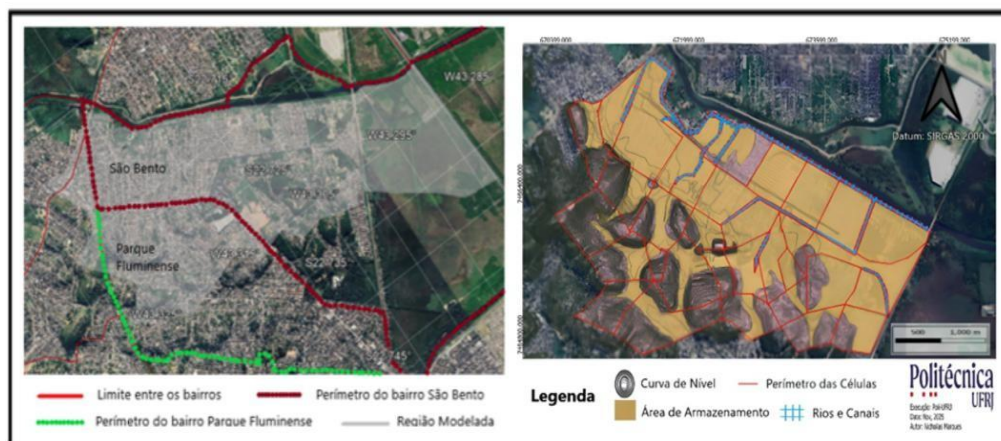


Figura 2 – Delimitação dos bairros São Bento e Parque Fluminense e discretização em células da Bacia do Rio Iguaçu–Sarapuá (RJ). Fonte: Elaboração Própria

Modelagem Hidrológica e Hidrodinâmica da Bacia

Na modelagem hidrológica, cada célula recebeu um coeficiente de deflúvio (c), que representa a fração da precipitação convertida em escoamento superficial, considerando o uso do solo e o grau de impermeabilização. Adotou-se uma abordagem simplificada chuva–vazão para estimar o escoamento gerado. Os valores de c seguiram faixas típicas do Método Racional: altas ($\approx 0,70–0,95$) para áreas densamente urbanizadas, intermediárias ($\approx 0,30–0,50$) para zonas residenciais e baixas ($\approx 0,10–0,30$) para superfícies pouco impermeabilizadas. Nas 37 células tipo 2, correspondentes a planícies de reservação no bairro São Bento, os coeficientes foram ajustados individualmente conforme a ocupação predominante, resultando em média ponderada de $0,603$, compatível com a urbanização local. A integração entre c e a topografia evidencia que as áreas mais impermeáveis coincidem com os setores urbanizados e que os fluxos se concentram nas porções de menor altitude, configurando resposta rápida e maior suscetibilidade a alagamentos.

Já para a modelagem hidrodinâmica do escoamento superficial, utilizou-se o coeficiente de rugosidade de Manning (n) para representar a resistência dos pavimentos urbanos. Valores de $n = 0,06$ foram aplicados a avenidas largas, $n = 0,07$ a ruas comuns e $n = 0,08$ a vias estreitas ou degradadas, considerando conservação, irregularidades e obstáculos. Essa parametrização permite simular a propagação do fluxo, velocidade e acúmulo superficial, reproduzindo de forma realista a interação entre canais, planícies de inundação e áreas urbanizadas, fornecendo subsídios para avaliar o desempenho das soluções de reservação e seu efeito na redução do impacto sobre a população.

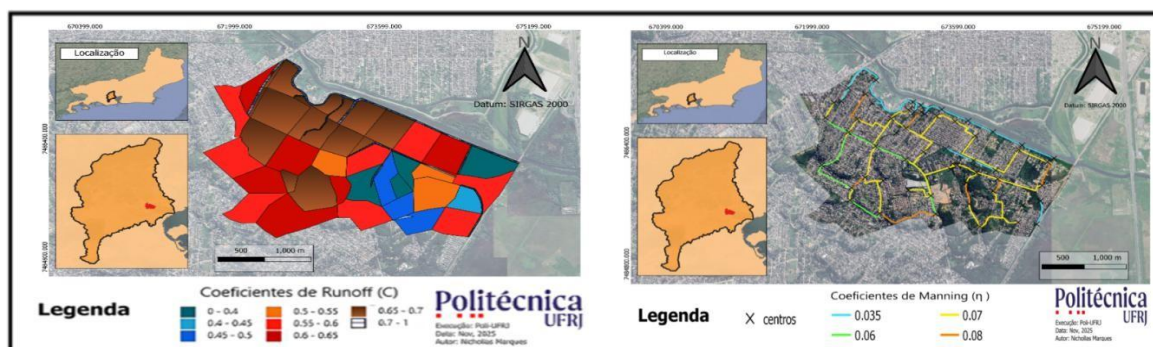


Figura 3 – Distribuição dos coeficientes de deflúvio e rugosidade de Manning na bacia. Fonte: Elaboração própria.

RESERVAÇÃO

As estruturas de reservação propostas foram concebidas como bacias de retenção multifuncionais integradas à dinâmica hidrológica da planície fluvial, utilizando áreas topograficamente favoráveis ao armazenamento temporário de excedentes. A iniciativa incorpora princípios associados à infraestrutura azul-verde e às Soluções Baseadas na Natureza (SbN) para controle de cheias, adaptação urbana e redução da vulnerabilidade socioambiental. O sistema prevê uma bacia de retenção principal com aproximadamente 59 hectares, associada a uma estrutura complementar interna de cerca de 3,8 hectares integrada ao sistema polder adotado.

Além do amortecimento hidrodinâmico, as estruturas apresentam potencial complementar de retenção de sedimentos e cargas difusas associadas ao escoamento superficial urbano. Para avaliar preliminarmente esse potencial ambiental, foi realizado um estudo de regionalização baseado em bacias urbanas monitoradas no Distrito Federal, cujos resultados indicam que dispositivos de retenção podem favorecer a redução de turbidez e sólidos suspensos por meio da sedimentação associada ao aumento do tempo de retenção hidráulica [Henz *et al.* (2019)]. As principais similaridades e limitações da regionalização adotada são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Estudo de Regionalização adotado para a sub-bacia de São Bento – projeções e ressalvas

Parâmetro	Bacia DF (monitorada)	Bacia São Bento município DC (projeção)	Limitações da Regionalização em DC
Turbidez e SST	Redução muito elevada ($\approx 90\%$)	Redução média a elevada	Chuvvas mais intensas
DQO e carga orgânica	Melhora moderada ($\approx 61\%$)	Melhora parcial	Recebe esgoto contínuo
Nutrientes (N e P)	Diminuição forte em P e média em N	Diminuição moderada da eutrofização	Aporte contínuo de N e P dissolvidos via drenagem
Escala Hidrológica	Microbacia urbana ($\approx 7,4 \text{ km}^2$)	Sub-bacia de mesma escala	Rio Iguaçu recebe influência de outras áreas
Urbanização	Altamente urbanizado	Altamente urbanizado	Ocupação mais irregular
Solos	Argilosos com baixa infiltração	Solos aluviais	Maior tendência ao assoreamento

Fonte: Elaboração própria

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos resultados foi estruturada em etapas voltadas à avaliação do desempenho das soluções de reservação sob diferentes condições hidrológicas e seus impactos sobre a população exposta. Inicialmente, foi realizado o diagnóstico da condição atual da área de estudo, considerando manchas de inundação para tempos de recorrência de 25 e 50 anos (TR25 e TR50). Em seguida, foram avaliados os cenários com implantação isolada do reservatório externo de maior porte e a configuração conjunta com o reservatório interno de menor porte.

Na sequência, foi conduzida análise diferencial das manchas de inundação em relação ao diagnóstico. Como as diferenças entre os cenários com um e dois reservatórios foram pequenas frente à diferença de ambos em relação à situação inicial, a comparação espacial foi realizada apenas entre o diagnóstico e a configuração com dois reservatórios. Em contrapartida, os cenários TR25 e TR50 apresentaram variações espaciais mais expressivas nas manchas de inundação.

Por fim, estimou-se a população potencialmente afetada por lâminas d'água superiores a 30 cm, para todos os cenários e tempos de recorrência, por meio do cruzamento espacial entre as manchas de inundação simuladas e os setores censitários do IBGE (Censo Demográfico 2022), permitindo quantificar o impacto das intervenções sobre a população exposta.

Essa abordagem possibilita discutir não apenas o desempenho hidráulico das estruturas de reservação, mas também seus potenciais efeitos sobre a redução da exposição socioambiental ao risco em setores periféricos densamente ocupados. Além disso, destaca-se a importância da manutenção da capacidade de armazenamento, do controle de assoreamento e da conservação dos dispositivos associados para a efetividade das intervenções ao longo do tempo.

Diagnóstico

O diagnóstico da inundação urbana no bairro de São Bento, em Duque de Caxias, evidencia a ampliação das manchas de inundação entre os cenários de TR25 e TR50, destacando áreas urbanizadas mais suscetíveis ao acúmulo de água, especialmente em setores impermeabilizados e com limitações de drenagem. Para o evento de 50 anos (TR50), observa-se aumento das profundidades e expansão das áreas inundadas, com lâminas superiores a 0,75 m atingindo espaços de uso comum, como a Praça do Beira Rio. As inundações concentram-se no entorno da oficina Delta Comerc, onde predominam edificações térreas com cotas de piso próximas ao terreno, evidenciando maior vulnerabilidade da ocupação. Esse cenário reforça a importância de estratégias de gestão de águas urbanas associadas a soluções baseadas na natureza para reduzir o escoamento superficial e aumentar a resiliência local.

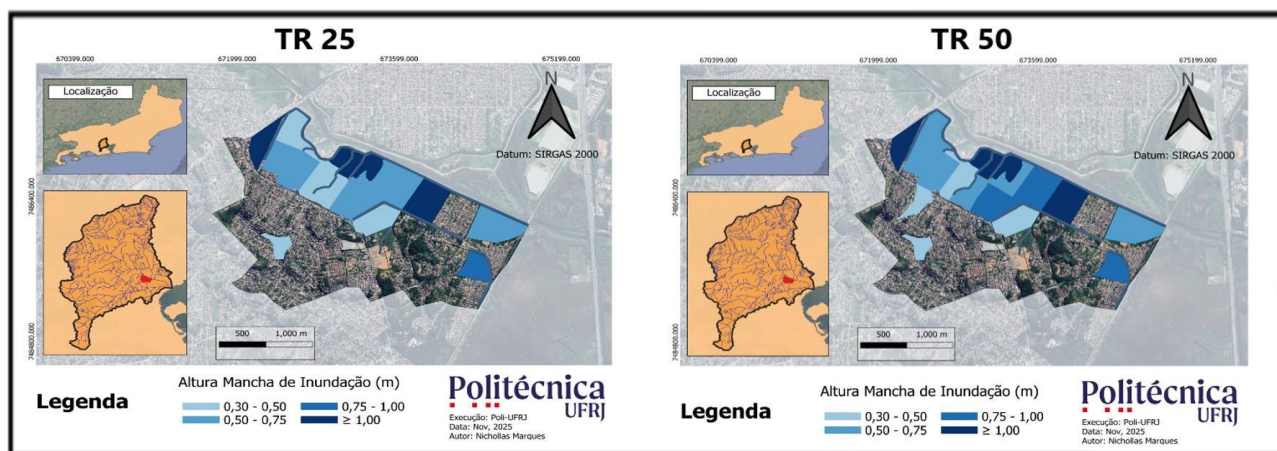


Figura 4 – Diagnóstico da distribuição espacial da inundação para os cenários TR25 e TR50. Fonte: Elaboração própria

Cenário com um reservatório externo (único)

Os mapas de mancha de inundação para os tempos de retorno (TR) de 25 e 50 anos apresentam distribuição espacial semelhante das áreas suscetíveis ao alagamento, concentradas principalmente nas proximidades do reservatório e das drenagens associadas ao Rio Iguaçu. A principal mudança no TR 50 ocorre em um setor mais afastado do rio, marcado por maior declividade, drenagem mais eficiente e elevada ocupação urbana (onde se localiza a Assembleia de Deus Ministério Gerar).

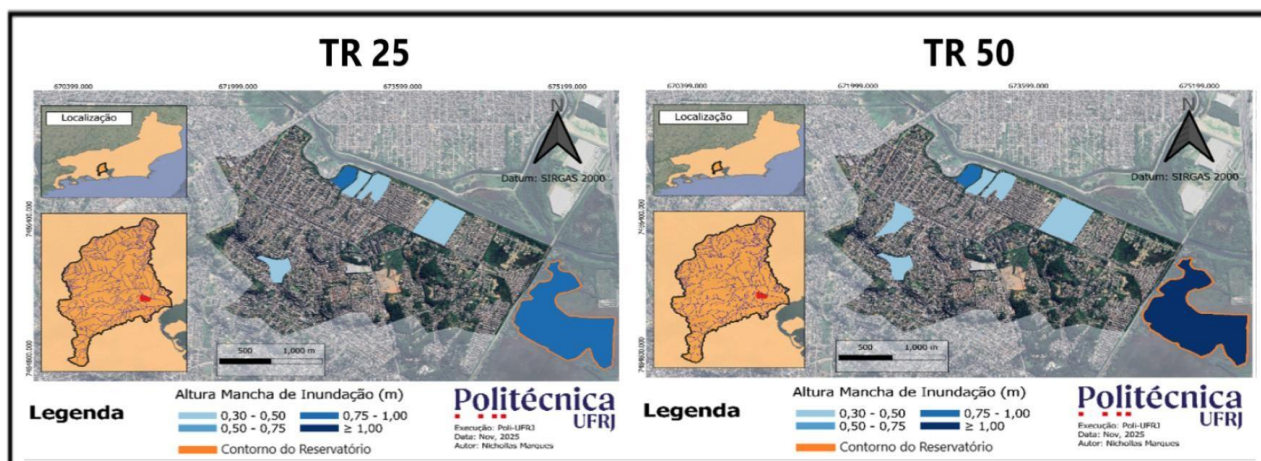


Figura 5 – Distribuição espacial das áreas inundadas com reservação externa (TR25 e TR50).Fonte: Elaboração própria.

Cenário com sistema de dupla reservação (reservatório externo e interno)

Na condição de dupla reservação, as alterações em relação ao cenário anterior concentram-se principalmente no entorno do reservatório complementar, em uma região urbanizada onde se localiza a Sociedade Educativa Paraíso do Saber. No TR50, esse setor passa a apresentar ausência de inundação, em contraste com o cenário anterior, correspondente à configuração com reservação única, no qual eram observadas lâminas d'água superiores a 0,30 m e, no diagnóstico inicial, acima de 1,0 m. Além disso, sob essa nova conjuntura, diferentemente da alternativa anterior, para chuvas de TR

25, não ocorre inundação na área adjacente ao Rio Iguaçu, a oeste do reservatório, onde se localizam a oficina mecânica Delta Comerc e o escritório Arquiteto Alessandro Henrique.

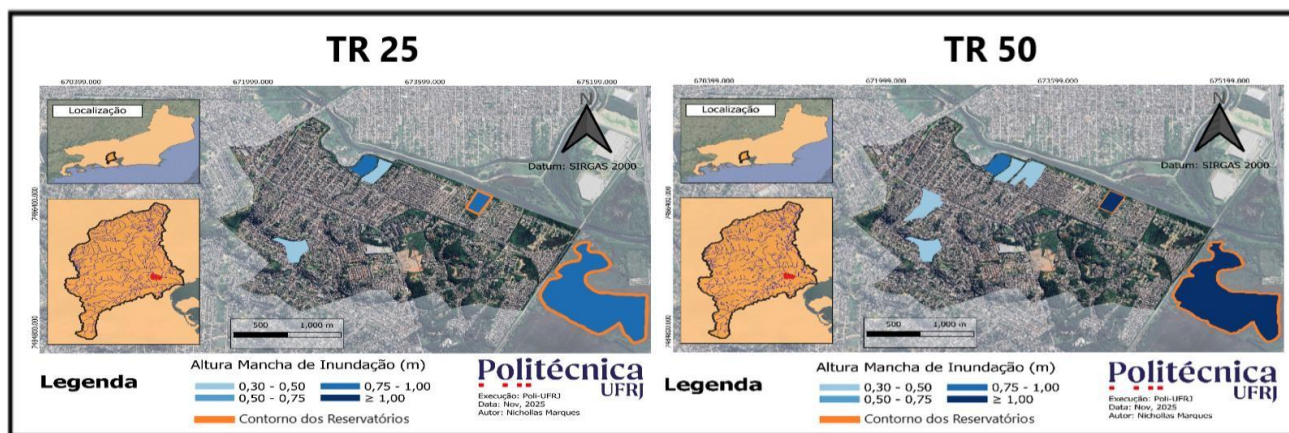


Figura 6 – Distribuição espacial das áreas inundadas – dupla reservação (TR25 e TR50). Fonte: Elaboração própria

Diferenças espaciais entre reservação integrada e diagnóstico

Observa-se melhoria nas regiões adjacentes ao Rio Iguaçu em ambos os cenários. No TR25, registram-se melhorias entre 20 e 30 cm, entre 30 e 50 cm e superiores a 50 cm, enquanto no TR50 as reduções da lâmina d'água limitam-se às faixas entre 30 e 50 cm e acima de 50 cm.

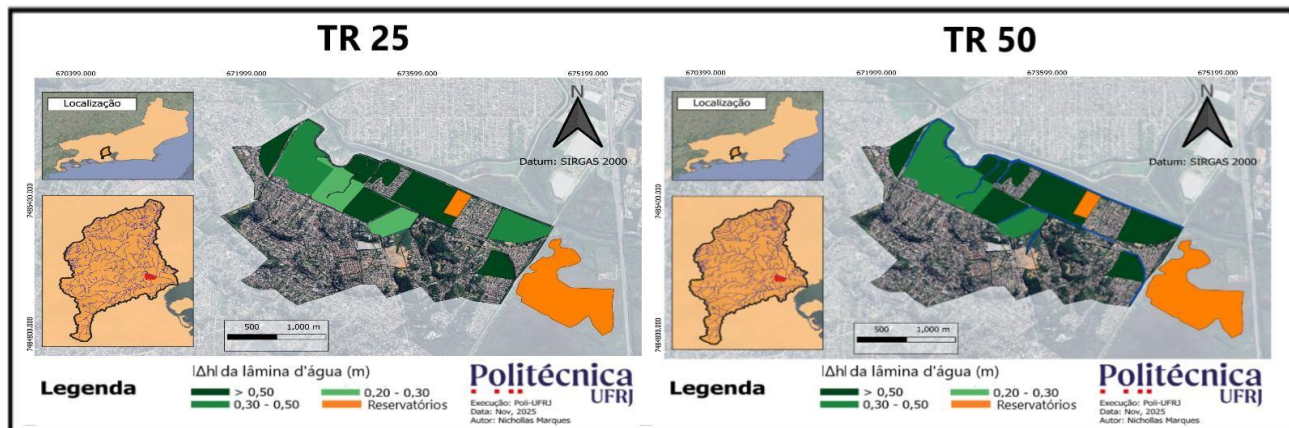


Figura 7 – Análise diferencial da inundação com reservação integrada frente ao diagnóstico. Fonte: elaboração própria.

Análise da população exposta a lâminas d'água superiores a 30 cm

Foi feita a projeção por meio do cruzamento entre dados do IBGE e modelagem hidrodinâmica, estimando a população afetada pelas cheias na tabela e no gráfico abaixo.

Tabela 2 – Número de habitantes (≈) com lâmina d'água igual ou superior a 30 cm

TR (anos)	Diagnóstico Inicial	1 Reservatório	2 Reservatórios
25	19.699	6.870	6.163
50	21.468	8.639	7.932

Fonte: Elaboração própria

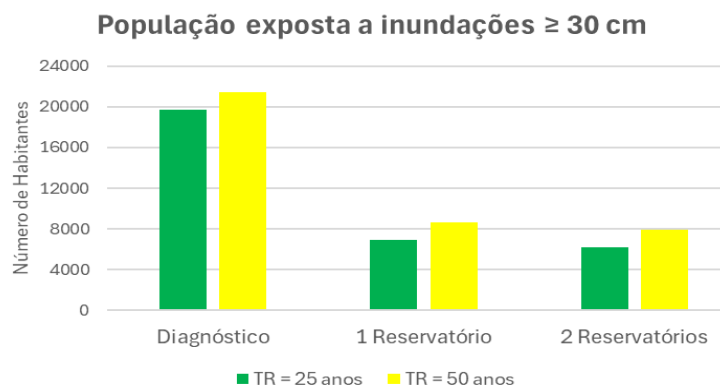


Figura 8 – População exposta à inundação > 30 cm no diagnóstico e com 1 e 2 reservatórios. Fonte: Elaboração própria

CONCLUSÃO

Os resultados apresentam uma incerteza estimada entre 500 e 1.000 pessoas, decorrente da discretização booleana das áreas inundadas, da ocupação irregular, da continuidade espacial da lâmina d'água no sistema real e da estimativa da rede de microdrenagem a partir de imagens de satélite. Ainda assim, em comparação ao diagnóstico, todos os cenários reduziram a população exposta em pelo menos 60%, alcançando cerca de 6.163 habitantes ($\approx 69\%$) no melhor cenário e 8.639 ($\approx 60\%$) no pior cenário. Esses resultados evidenciam o elevado potencial das estratégias integradas de reservação para a mitigação de cheias e a redução da vulnerabilidade socioambiental.

REFERÊNCIAS

- HENZ, S. K. F.; GONÇALVES, M. C.; BAPTISTA, M. B.; LIMA, J. A. T. R. (2019). “Monitoramento da qualidade da água em uma bacia de retenção no Distrito Federal” in Anais do XXIII SBRH, Foz do Iguaçu, Nov. 2019.
- MARQUES, L. S.; SOUSA, M. M.; MIGUEZ, M. G.; MAGALHÃES, P. C.; OLIVEIRA, L. F. G. S.; ARRAIS, C. M.; BIGATE, I. L.; VERÓL, A. P.; OLIVEIRA, A. K. B. (2017). “Elaboração e calibração de um modelo hidrodinâmico para simulação de cheias fluviais na bacia dos rios Iguaçu e Sarapuí com uso do MODCEL” in Anais do XXII SBRH, Florianópolis, Nov. 2017.
- MIGUEZ, M. G.; BATTEMARCO, B. P.; SOUSA, M. M. (2017). “Urban flood simulation using MODCEL – an alternative quasi-2D conceptual model”. Water 9(6). DOI: 10.3390/w9060445.
- PEREIRA, P. S. P. M. L.; MENDES, L. D. (2019). “Morfometria de bacia hidrográfica urbanizada: uma análise do rio Iguaçu-Sarapuí, na Baixada Fluminense (RJ), para avaliação de parâmetros de suscetibilidade à ocorrência de enchente e inundação”. Revista Continentes, n. 13.
- VALOR ECONÔMICO (2024). “Após fortes chuvas, bairros inteiros de Duque de Caxias, no Rio, seguem alagados”. Disponível em: <https://valor.globo.com/brasil/noticia/2024/01/15/apos-fortes-chuvas-bairros-inteiros-de-duque-de-caxias-no-rio-seguem-alagados.ghtml>.