

AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE AS INUNDAÇÕES E MEDIDAS DE ADAPTAÇÃO EM MARICÁ-RJ

Luiz Eduardo Siqueira Saraiva¹, Hudson de Mello Neto², Francis Martins Miranda³, Matheus Martins de Sousa⁴, Marcelo Gomes Miguez⁵ & Osvaldo Moura Rezende⁶

Resumo: O presente trabalho avalia os impactos das mudanças climáticas sobre as inundações urbanas e a eficácia de medidas de adaptação no município de Maricá-RJ. A área de estudo compreende as bacias dos rios Bambu e Mumbuca-Ubatiba, caracterizadas por elevada urbanização e influência do sistema lagunar. Foram analisados quatro cenários, considerando condições atuais e futuras (2050 – SSP3-7.0), com e sem intervenções de macrodrenagem, para eventos críticos com tempo de recorrência de 100 anos. As chuvas de projeto foram definidas por meio de curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF) específicas para cada cenário climático, enquanto a modelagem hidrológico-hidrodinâmica foi realizada com o *software* MODCEL. As medidas de adaptação incluem reservatórios, parques fluviais alagáveis e intervenções na rede de drenagem, baseadas em soluções de infraestrutura verde-azul. Adicionalmente, as manchas de inundação foram plotadas sobre a base de lotes, permitindo estimar o número de edificações potencialmente afetadas em cada cenário. Os resultados indicam aumento das áreas inundadas no cenário futuro, em função da intensificação das chuvas e da elevação do nível do mar. Entretanto, as intervenções propostas promoveram reduções expressivas das manchas de inundação e do número de lotes impactados em todos os cenários analisados, evidenciando elevada eficiência hidráulica. Conclui-se que as medidas de adaptação apresentam resiliência frente às mudanças climáticas, contribuindo para a mitigação dos riscos de inundação e para o planejamento urbano sustentável em áreas costeiras.

Abstract: This study evaluates the impacts of climate change on urban flooding and the effectiveness of adaptation measures in the municipality of Maricá, Rio de Janeiro, Brazil. The study area comprises the Bambu and Mumbuca-Ubatiba river basins, characterized by high levels of urbanization and the influence of a lagoon system. Four scenarios were analyzed, considering current and future conditions (2050 – SSP3-7.0), with and without macrodrainage interventions, for critical events with a 100-year return period. Design storms were defined using Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves specific to each climate scenario, while hydrological-hydrodynamic modeling was performed using the MODCEL software. The adaptation measures include reservoirs, floodable river parks, and interventions in the drainage network, based on green-blue infrastructure solutions. Additionally, flood extent maps were overlaid onto the parcel database, enabling the estimation of the number of potentially affected buildings in each scenario. The results indicate an increase in flooded areas under future scenarios due to intensified rainfall and sea level rise. However, the proposed interventions led to significant reductions in flood extent and in the number of affected parcels across all analyzed scenarios, demonstrating high hydraulic efficiency. It is concluded that the adaptation measures are resilient to climate change, contributing to flood risk mitigation and to sustainable urban planning in coastal areas.

Palavras-Chave: Drenagem urbana, inundações, MODCEL, mudanças climáticas, Maricá.

1) Escola Politécnica – POLI/UFRJ. lessaraiva@poli.ufrj.br

2) Escola Politécnica – POLI/UFRJ. hudson.mello.neto@poli.ufrj.br

3) Programa de Engenharia Ambiental – PEA – POLI/UFRJ. francismiranda@poli.ufrj.br

4) Programa de Engenharia Ambiental – PEA – POLI/UFRJ. matheus@poli.ufrj.br

5) Programa de Engenharia Ambiental – PEA – POLI/UFRJ. marcelomiguez@poli.ufrj.br

6) Programa de Engenharia Ambiental – PEA – POLI/UFRJ. omrezende@poli.ufrj.br

Keywords: Urban drainage, floods, MODCEL, climate change, Maricá.

INTRODUÇÃO

As inundações são fenômenos naturais que passam a ser enquadrados como desastres na medida em que são potencializadas por intervenções antrópicas, resultando em impactos relevantes sobre os sistemas socioeconômicos. Segundo informações do *The International Disaster Database* (EM-DAT), esses eventos correspondem ao tipo de desastre mais recorrente em nível global, concentrando cerca de 40% das ocorrências e 39% do total de pessoas afetadas no período entre 2000 e 2024. Além disso, figuram como a segunda principal causa de perdas econômicas estimadas (21%) e ocupam a quarta posição em número de mortes (8%) no mesmo recorte temporal (CRED, 2025).

Esses eventos tendem a se intensificar no contexto das mudanças climáticas, em função do aumento da frequência e da intensidade das precipitações, aliado à elevação do nível médio do mar e à ocorrência de marés meteorológicas mais elevadas, além da crescente impermeabilização do solo e ocupação de planícies de inundação associadas à expansão urbana.

O município de Maricá, localizado na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, é uma cidade litorânea que tem vivenciado um processo acelerado de expansão urbana, impulsionado principalmente à implementação de programas sociais estruturantes e ao fortalecimento socioeconômico local possibilitado, em grande parte, pelas receitas provenientes dos royalties do petróleo.

Além de seu dinamismo econômico, Maricá destaca-se pela diversidade ambiental e cultural, incluindo o complexo lagunar Maricá–Guarapina, um dos maiores do estado, além de relevantes patrimônios históricos e naturais. O município apresenta configuração geomorfológica em “anfiteatro” natural, com encostas íngremes que convergem para extensas planícies costeiras. Essa dinâmica favorece o escoamento superficial rápido e a concentração de águas nas várzeas, sob influência lagunar e marinha, restringindo o escoamento fluvial e intensificando inundações urbanas.

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo apresentar a avaliação de impactos das mudanças climáticas sobre as inundações urbanas e respectivas medidas de adaptação propostas no município de Maricá-RJ, utilizando uma ferramenta de modelagem matemática quasi-2D: o MODCEL – Modelo de Células de Escoamento para Cheias Urbanas (Miguez, 2001).

MATERIAIS E MÉTODOS

Estudo de Caso

A área de estudo compreende as bacias hidrográficas do rio Bambu e do rio Mumbuca-Ubatiba, situadas, respectivamente, nos Distritos de Inoã e Itaipuaçu e no Distrito Sede em Maricá, na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Estas bacias foram selecionadas por concentrarem parcela significativa da população e da área urbanizada do município, sendo estratégicas para análise de riscos de inundações, impactos das mudanças climáticas para o sistema urbano e formulação de soluções de adaptação. Ambas as bacias têm seus exutórios na Lagoa de Maricá, que é influenciada pelo regime de marés e pela dinâmica costeira, impondo o efeito de represamento fluvial nas desembocaduras, criando um ambiente propício para a intensificação de alagamentos nos bairros próximos ao sistema lagunar. A Figura 1 apresenta o mapa de Maricá com a delimitação das duas bacias analisadas neste estudo.

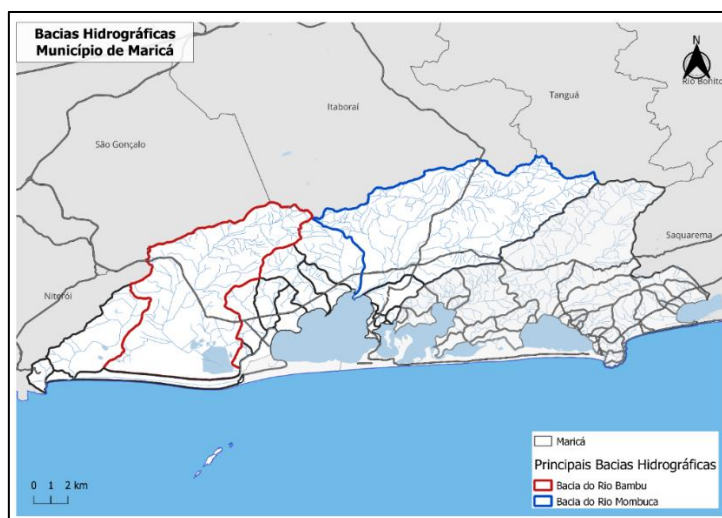


Figura 1 – Município de Maricá com destaque para as bacias do rio Bambu e rio Mumbuca-Ubatiba.

Medidas de Adaptação

Como medidas de adaptação, foram consideradas as intervenções propostas no âmbito do Programa de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais de Maricá – PDMAP-MAR (SOMAR, 2023), atualizadas no Estudo Estratégico para Recuperação Ambiental do Sistema Lagunar do Município de Maricá: Navegabilidade, Balneabilidade Costeira e Operação Urbana Consorciada (LAC, 2025).

No Distrito Sede, as medidas de adaptação concentram-se na bacia do rio Mumbuca-Ubatiba, com a implantação de reservatórios na região mais a montante voltados à acomodação das águas durante a cheia fluvial, como os reservatórios do Caxito (volume de armazenamento de 348.000 m^3), e do Condado (volume de armazenamento de 613.426 m^3). Destacam-se, ainda, o Parque Ubatiba, que alia armazenamento hídrico à preservação ambiental e uso recreativo em área menos urbanizada, projetado com capacidade de armazenamento de $1.430.951 \text{ m}^3$; o Parque Central, localizado na confluência dos rios Mumbuca-Ubatiba e Itapeteiú, concebido para amortecimento de cheias e oferta de espaço público multifuncional, com capacidade de 444.045 m^3 ; e o Parque do Aeroporto, voltado à requalificação ambiental em área próxima à lagoa. Complementarmente, intervenções na calha, como dragagem e alargamento de canais, contribuem para restabelecer a capacidade de descarga do sistema.

Nos 3º e 4º Distritos (Inoã e Itaipuaçu), as intervenções estruturam-se em dois eixos principais: o Eixo Bambu/Taquaral/Vigário e o Eixo Itaocaia. No primeiro, destaca-se o Parque Inoã-Norte, um parque fluvial com reservatórios de grande porte para armazenamento temporário a montante, com capacidade total de 685.150 m^3 e espelho d'água com área de 542.670 m^2 ; o Parque Inoã, que integra três conjuntos de reservatórios urbanos para amortecimento de cheias, projetado com capacidade de armazenamento de 862.658 m^3 e espelho d'água com área de 580.927 m^2 ; e o Parque Marighella, associado à criação de espaços de lazer e conexão ecológica, com área de 206.013 m^2 e capacidade de 719.254 m^3 . Soma-se a recuperação da Lagoa Brava, com foco na requalificação ambiental e controle hídrico. No eixo Itaocaia, o Parque Taboal (área de 173.000 m^2 e volume de 360.000 m^3) atua como área de amortecimento e preservação de várzea, associado a intervenções de microdrenagem e recuperação da dinâmica fluvial.

Em conjunto, as propostas de intervenção, apoiadas em um conceito de infraestruturas verdes-azuis, utiliza Soluções baseadas na Natureza para mitigar as inundações urbanas, buscando também oferecer diversos outros cobenefícios ao município, como a melhoria de qualidade da água e do ar, redução de ilhas de calor e aumento de oferta de áreas verdes de lazer.

Cenários Climáticos

Foram avaliados quatro cenários, todos com eventos hidrológicos com tempo de recorrência de 100 anos: considerando as condições do sistema de macrodrenagem com e sem os projetos de adaptação, para cenários climáticos atual e futuro (ano 2050). Dentre os cenários climáticos projetados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC, foi escolhido o cenário SSP3-7.0 (modelo MRI-ESM2), por ter apresentado o maior aumento de intensidade de chuvas para o horizonte temporal de 2050. Em todos, foi representada a condição atual de urbanização das bacias. A Tabela 1 sintetiza a concepção dos quatro cenários avaliados.

Tabela 1 – Cenários de simulação hidrológico-hidrodinâmica.

Cenário climático	Condição do sistema de macrodrenagem
Atual - Chuva com Tempo de Recorrência de 100 anos no clima atual	Atual
	Projeto de adaptação
Futuro - Chuva com Tempo de Recorrência de 100 anos no clima previsto para 2050 / SSP3-7.0	Atual
	Projeto de adaptação

A estimativa do impacto das mudanças climáticas no padrão de ocorrência de chuvas intensas foi realizada com base no estudo inédito da Funceme, elaborado para o projeto ao qual o presente estudo está vinculado. Nesse sentido, foram calculadas chuvas de projeto distintas para cada cenário climático (incluindo o cenário atual) por meio da equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) desenvolvida pela Funceme. Ressalta-se que foram adotados valores específicos dos parâmetros da equação para o cenário atual e para o cenário SSP3-7.0 previsto para 2050, resultando em curvas IDF diferenciadas e coerentes com as respectivas condições climáticas projetadas. Assim, a Equação 1 apresenta a IDF para o cenário climático atual e a Equação 2, a IDF para o cenário climático futuro (SSP3-7.0-2050).

$$i = \frac{2000 \cdot TR^{0,0898}}{(t + 10,26)^{0,7175}} \quad (1)$$

$$i = \frac{2000 \cdot TR^{0,0938}}{(t + 9,7596)^{0,7087}} \quad (2)$$

A partir das equações IDF, foram elaboradas as respectivas chuvas de projeto, com 12 horas de duração e distribuídas em intervalos de tempo regulares de 5 minutos. Considerando para ambas eventos hidrológicos de TR100 anos, foi obtida uma altura total de 320 mm para o cenário atual e 346 mm para 2050 (aumento de 8%).

Para o cenário climático futuro, além de representar o aumento na intensidade de precipitações, as curvas de oscilação dos níveis d'água no Sistema Lagunar de Maricá, associadas à curva de maré, foram alteradas adotando um incremento de 0,20m para 2050, a fim de considerar possíveis efeitos de elevação do nível médio do mar e intensificação de marés meteorológicas. Nessa perspectiva, buscando representar o cenário mais crítico em relação ao efeito de represamento fluvial durante eventos de cheia pelo nível elevado da lagoa, o pico do hidrograma de cheia das bacias modeladas foi posicionado coincidindo com os níveis de preamar de sigízia. A Figura 2 apresenta estas curvas de nível d'água, que são representadas no modelo hidrodinâmico como uma condição de contorno de jusante no exutório das bacias hidrográficas.

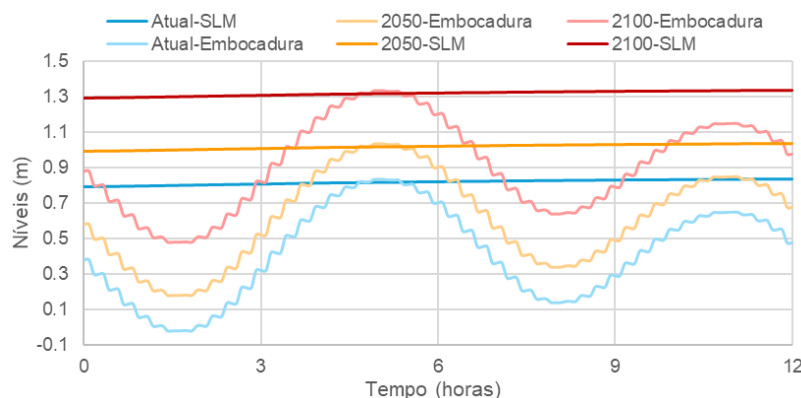


Figura 2 - Variação dos níveis d'água no Sistema Lagunar de Maricá e na sua embocadura, para diferentes cenários climáticos, utilizados nos cenários avaliados.

Modelo hidrológico-hidrodinâmico

Como ferramenta de modelagem, foi empregado no estudo o Modelo de Células de Escoamento para Cheias Urbanas – MODCEL, desenvolvido por Miguez (2001). Trata-se de um modelo *Quasi-2D* (Miguez *et al.*, 2017; Cunge *et al.*, 1980), no qual o espaço urbano é representado através de compartimentos homogêneos, as células. A bacia hidrográfica é sistematicamente discretizada em células, interligadas por equações unidimensionais da hidráulica, formando uma rede de fluxo. Dessa forma, o modelo é capaz de representar a hidrodinâmica de cursos d'água naturais e artificiais, bem como elementos detalhados do tecido urbano (como ruas, praças e telhados), o fluxo nos drenos pluviais subterrâneos e as conexões entre as camadas superior e inferior entre estes elementos. Assim, embora use apenas equações 1D, o MODCEL consegue descrever as características bidimensionais da bacia hidrográfica.

A divisão das bacias hidrográficas em células baseia-se na observação integrada de padrões topográficos, urbanísticos e de uso do solo, buscando a delimitação de áreas homogêneas. Os principais tipos de célula utilizados no presente estudo foram: (i) células de Rio ou Canal – representam o escoamento principal da macrodrenagem a céu aberto; (ii) células de Planície Natural – representam escoamentos à superfície livre em planícies alagáveis ou áreas de encosta não urbanizadas; (iii) células de Planície Urbanizada – representam escoamentos à superfície livre em planícies urbanizadas, sendo aplicados padrões de urbanização locais; (iv) células de Reservatório – simulam o armazenamento de água em um reservatório, dispondo de uma curva cota x área superficial.

As ligações entre as células representam os caminhos preferenciais percorrido pela água durante os eventos de chuva. Em áreas urbanas, em geral, correspondem às ruas. No presente estudo, destaca-se a utilização de: (i) ligações do tipo planície, que representam o escoamento à superfície livre entre células vizinhas, utilizando a equação de Saint-Venant sem os termos de inércia; (ii) ligações tipo vertedor, que representam o vertimento por transbordamento, aplicando a equação clássica do vertedor.

É relevante salientar que modelos hidrológico-hidrodinâmicos que serviram de base para o estudo aqui apresentado foram construídos, calibrados e validados a partir de eventos de inundação registrados no território. Estas etapas fizeram parte de estudos pretéritos e seus resultados são apresentados no artigo de Mello Neto *et al.* (2024). Assim, para o presente trabalho, foram feitos ajustes pontuais nos modelos e alteradas as chuvas de projeto e as condições de contorno de nível na Lagoa de Maricá, que são dados de entrada para o modelo.

Após a obtenção das lâminas de inundação do estudo de caso por meio do MODCEL, estas

foram sobrepostas à delimitação de lotes com o auxílio do *software* QGIS, a fim de estimar o número de edificações afetadas em cada cenário simulado. Adotou-se a premissa de que lotes interceptados por múltiplas profundidades são impactados pela condição mais crítica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação de impacto das intervenções para mitigação das inundações é realizada por meio da análise das manchas de inundação resultantes das simulações dos cenários de projeto, em comparação às manchas resultantes das simulações do cenário atual do sistema de macrodrenagem. Estas manchas de inundação são fornecidas como resultados da modelagem hidrológico-hidrodinâmica e são analisadas espacialmente através de *softwares* de georreferenciamento como o QGIS. As Figuras 3a e 3b ilustram as manchas de inundação obtidas para o cenário climático atual, sem e com medidas de adaptação, respectivamente.

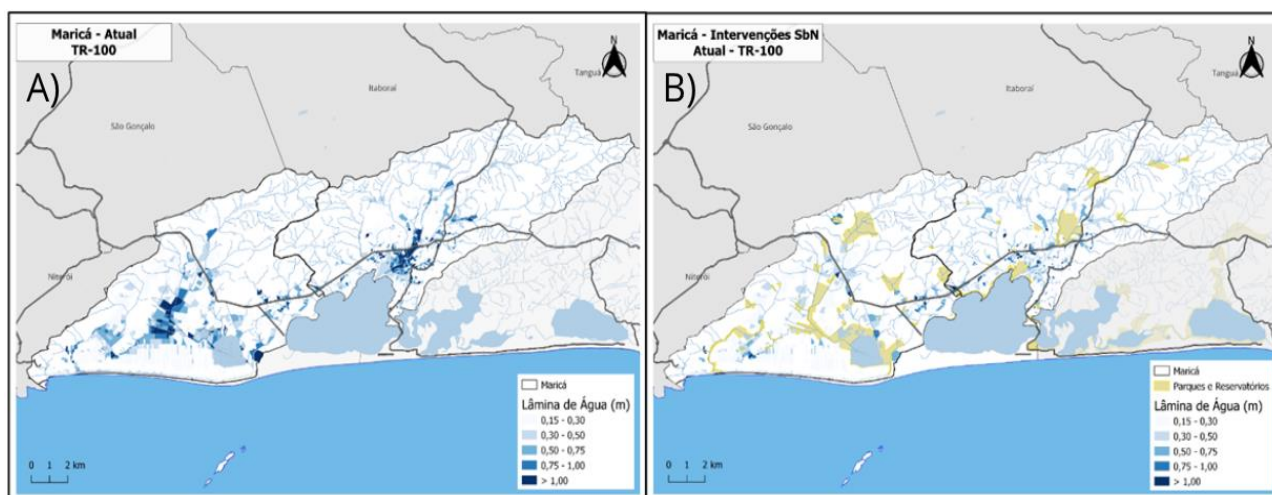


Figura 3 - Mancha de inundação resultante da simulação de um evento hidrológico com 100 anos de tempo de recorrência com o padrão climático atual, nas bacias dos rios Bambu e Mumbuca-Ubatiba: (a) sem projeto de adaptação. (b) com projeto de adaptação.

Nota-se uma redução bastante significativa de áreas alagadas, demonstrando a eficiência hidráulica do conjunto de soluções propostas, considerando as condições climáticas atuais, em ambas as bacias estudadas. A partir das lâminas de inundação obtidas, prosseguiu-se à avaliação de lotes impactados. A Tabela 2 mostra os resultados em termos de lotes atingidos para duas condições do território, sem e com intervenções, considerando o padrão climático atual. Evidencia-se que a implementação dos projetos reduz em 72% o número de lotes atingidos por inundações de alto impacto potencial (profundidades superiores a 1,0m).

Tabela 2 - Número de lotes atingidos por inundações no cenário sem e após implantação de projetos de adaptação, considerando uma chuva com 100 anos de tempo de recorrência no padrão climático atual.

Altura de inundação (m)	Cenário Atual (nº lotes)	Cenário Projeto (nº lotes)	Redução	
0,15	28.727	23.474	5.253	18%
0,30	14.051	9.260	4.791	34%
0,50	7.426	3.030	4.396	59%
1,00	1.989	556	1.433	72%

Em seguida, os impactos das mudanças climáticas no sistema de drenagem foram avaliados a partir das manchas de inundação das condições sem e com projeto de adaptação. Esses resultados podem ser vistos nas Figuras 4a e 4b, que apresentam, respectivamente, a mancha de inundação para 2050 sem e com medidas de adaptação.

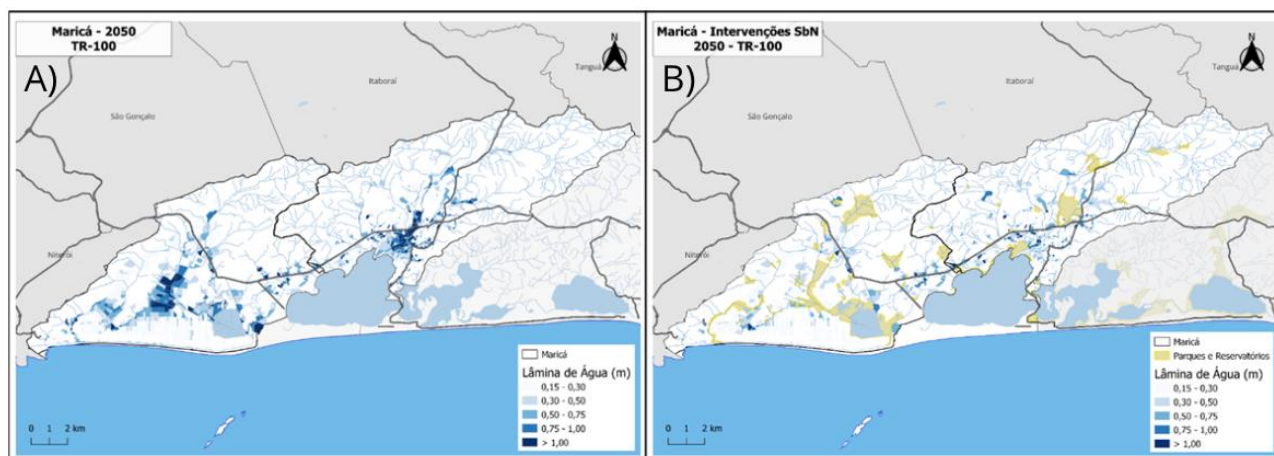


Figura 4 - Mancha de inundação resultante da simulação de um evento hidrológico com 100 anos de tempo de recorrência no padrão climático para 2050 (Cenário climático SSP3-7.0), nas bacias dos rios Bambu e Mumbuca-Ubatiba. (a) sem projeto de adaptação. (b) com projeto de adaptação.

A avaliação da eficiência das intervenções no cenário climático futuro também foi realizada pela estimativa de lotes atingidos. A Tabela 3 apresenta os resultados de lotes atingidos sem e com a implantação do projeto de adaptação proposto, para o cenário climático futuro (SSP3-7.0 para 2050). Mesmo diante do aumento da intensidade das chuvas e da sobrelevação do nível do mar (que levam a maiores lâminas em relação ao cenário climático atual), as intervenções propostas permanecem apresentando resultados expressivos no controle de inundações. Considerando as inundações de alto impacto potencial, com profundidades superiores a 1,0m, a capacidade de mitigação é de 68%, valor muito próximo à capacidade obtida para o cenário climático atual, apontando a resiliência e a robustez do projeto de adaptação frente aos impactos das mudanças climáticas no sistema de drenagem.

Tabela 3 - Número de lotes atingidos por inundações no cenário sem e após implantação de projetos de adaptação, com uma chuva de 100 anos de tempo de recorrência no padrão climático futuro.

Altura de inundação (m)	Cenário Atual (nº lotes)	Cenário Projeto (nº lotes)	Redução	
0,15	30.073	24.926	5.147	17%
0,30	14.534	10.127	4.407	30%
0,50	7.952	3.769	4.183	53%
1,00	2.216	700	1.516	68%

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos evidenciam que as bacias dos rios Bambu e Mumbuca-Ubatiba apresentam elevada suscetibilidade a inundações, intensificada pelas características geomorfológicas locais, pela urbanização acelerada e pela influência do sistema lagunar. A análise dos cenários atuais demonstrou que, sem intervenções, eventos extremos de precipitação resultam em extensas áreas

alagadas, reforçando a necessidade de planejamento integrado da drenagem urbana.

A implementação das medidas de adaptação, baseadas em infraestruturas verde-azuis, mostrou-se altamente eficaz na mitigação das inundações. A redução significativa das manchas de inundação e do número de lotes atingidos evidencia o potencial dessas intervenções em promover resiliência urbana a inundações, ao mesmo tempo em que agregam benefícios ambientais e urbanos ao município.

Mesmo sob o cenário climático futuro (SSP3-7.0 – 2050), caracterizado pelo aumento da intensidade das chuvas e pela elevação do nível do mar, as intervenções mantêm desempenho satisfatório, demonstrando robustez e resiliência frente às mudanças climáticas. Assim, os resultados reforçam a importância da incorporação de estratégias adaptativas no planejamento urbano, contribuindo para a redução de riscos e para o desenvolvimento sustentável de cidades costeiras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Cátedra UNESCO de Drenagem Urbana em Regiões de Baixada Costeira, sediada na UFRJ.

REFERÊNCIAS

CRED (2025). Disasters in Numbers 2024: A Significant Year of Disaster Impact. EM-DAT.

CUNGE, J. A.; HOLLY, F. M.; VERWEY, A. (1980). “*Practical aspects of computational river hydraulics.*” Pitman Advanced Publishing Program.

LAC (2025). “*Estudo Estratégico Para Recuperação Ambiental Do Sistema Lagunar Do Município De Maricá: Navegabilidade, Balneabilidade Costeira e Operação Urbana Consorciada.*”

MELLO NETO, H. de; SOARES, B. B.; VELEZ, L. T.; SOUSA, M. M. de; OLIVEIRA, A. K. B. de; REZENDE, O. M.; MIGUEZ, M. G. (2024). “*Mapeamento de inundações em uma bacia urbanizada em planície costeira, com apoio de modelo hidrológico-hidrodinâmico – Maricá-RJ.*” In: XV Encontro Nacional de Águas Urbanas (ENAU) e V Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos, 2024, Recife–PE. Anais... Recife: [s.n.], 2024.

MIGUEZ, M. G. (2001). “*Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas.*” Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.

MIGUEZ, M. G.; BATTEMARCO, B. P.; SOUSA, M. M.; REZENDE, O. M.; VERÓL, A. P.; GUSMAROLI, G. (2017). “*Urban flood simulation using MODCEL-an alternative quasi-2D conceptual model.*” Water (Switzerland), v. 9, n. 6.

SOMAR. (2023). “*Plano Diretor de Manejo de Águas Pluviais do Município de Maricá. Tomo IV – Maricá e as Águas: Um Futuro em Harmonia.*” Rio de Janeiro, 2023.