VULNERABILIDADE SOCIAL FRENTE ÀS INUNDAÇÕES URBANAS EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS: ESTUDO DE CASO NA BACIA DO RIO MARANGUAPINHO

Antony Gabriel Ferreira Sales [1] ;Rebeca de Alencar Costa [2]; Letícia Fontenele de Oliveira [3] & Samiria Maria de Oliveira Silva[3]

Palavras-Chave –Vulnerabilidades socioambientais, Mudanças climáticas, Drenagem urbana.

INTRODUÇÃO

Em ambientes naturais, a chuva é absorvida pelo solo, pela vegetação e por corpos d'água, mantendo o equilíbrio do chamado ciclo hidrológico. Nas cidades, esse processo é interrompido pela grande quantidade de superfícies impermeáveis como asfalto, concreto e construções (Marengo, 2009). Nesses trechos urbanos, a combinação entre chuvas intensas e elevada impermeabilização do solo favorece a ocorrência de cheias rápidas e recorrentes, ampliando os riscos de inundações (FUNCEME, 2020). No contexto brasileiro, em que houve processo de urbanização desenfreado e pouco estruturado, é comum a presença de populações morando em locais de risco, bem como com falta de infraestrutura adequada de drenagem, caracterizando um ambiente vulnerável socialmente e ampliando os impactos de eventos extremos.

Somado a isso, têm-se o avanço das mudanças climáticas que reconfigura padrões hidrológicos em escala global, impactando diretamente o comportamento das precipitações e o funcionamento das infraestruturas urbanas. Assim, eventos extremos, como chuvas intensas concentradas, vêm superando a capacidade de escoamento dos sistemas de drenagem, provocando alagamentos recorrentes, inundações, colapsos estruturais e prejuízos socioeconômicos, além de doenças de veiculaçao hídrica, como leptospirose e hepatite A.

No caso de Fortaleza- CE, esse processo não é diferente, apresentando uma densidade demográfica de cerca de 7.700 km² (IBGE, 2022), uma das maiores do Brasil, constituindo uma grande área urbana impermeável. Embora as inundações possam ocorrer em vários pontos da cidade, algumas áreas são mais suscetíveis, como a bacia do Rio Maranguapinho, em que há um histórico de alagamentos e enchentes, afetando milhares de pessoas, somado ao fato de ser uma região com desigualdades econômicas mais acentuadas, tornando a área particularmente sensível aos possíveis efeitos das mudanças climáticas sobre a drenagem urbana.

Dessa forma, o objetivo desse artigo é investigar os efeitos das mudanças climáticas sobre a ocorrência de inundações urbanas na bacia do rio Maranguapinho, relacionando os resultados da modelagem hidrológica às condições de vulnerabilidade social dos bairros potencialmente afetados.

METODOLOGIA

A fim de analisar o comportamento da drenagem urbana, foi selecionada a área da bacia do rio Maranguapinho inserida na zona urbana de Fortaleza. Portanto, o posto pluviométrico localizado no município de Maranguape de código 338016, representativo de toda a bacia Metropolitana onde se localiza o rio Maranguapinho, foi escolhido com base no maior número de anos válidos, de 1910 à

1) Mestrando em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará (PosDEHA-UFC), salesfgabriel@gmail.com
2) Graduada em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Ceará, rebecaalcr@gmail.com.
3) Graduada pelo Curso de Ciências Sociais da Universidade Estadual do Ceará, leticia.fontenele.lf@gmail.com.
4) Professora do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, samiriamaria@ufc.br.

2023. Com isso, utilizaram-se os dados desse posto disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) para o cálculo de chuvas máximas anuais, médias e variâncias anuais.
Em relação à modelagem hidrológica sob diferentes regimes climáticos, o estudo usou séries das de precipitação diárias provenientes de um ensemble de 25 Modelos de Circulação Global (GCMs) selecionados da iniciativa CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*) e extraídos do site Copernicus. Os modelos foram escolhidos com base na consistência da disponibilidade, considerando a presença na série histórica e nas projeções futuras (2015- 2100), para melhores efeitos de comparação.
Para as projeções futuras, foi escolhido o cenário SSP5-8.5 (Emissões Altas), que representa o cenário pessimista de crescimento contínuo e acelerado de gases de efeito estufa. Para isso, foram utilizadas as linguagens de programação Python e R, Para a correção de viés usou-se o método de EQM (Equal Quantile Matching), que baseia-se no mapeamento direto dos quantis da distribuição simulada para os quantis correspondentes da distribuição observada, permitindo a correção da média, da variabilidade e dos extremos pluviométricos (Li *et al.*, 2010; Teutshbein *et al.*, 2011). A equação do EQM utilizada para o ajuste dos valores de precipitação é apresentada como:

$$\hat{x}_{m-p*} = x_{m-p}{}_{o-c} + F^{-1}\ (F_{m-p}(x_{m-p}))_{m-c} - F^{-1}\ \ (F_{m-p}(x_{m-p})) \quad (1)$$

Com os dados corrigidos e o tempo de retorno definido para 50 anos, foi usado a distribuição Gumbel para análise de chuvas extremas, usado a precipitação total diária. Como a série histórica apresentou um grande volume de dados e elevada variabilidade climática, optou-se pela construção de cenários climáticos para subsidiar as análises. Nesse contexto, foi adotado o quartil superior (Q75), representando uma condição mais crítica em termos de disponibilidade hídrica, associada a precipitações inferiores às observadas em 75% dos registros. Essa abordagem permite avaliar o comportamento do sistema sob um cenário mais pessimista, contribuindo para análises mais conservadoras no contexto da gestão dos recursos hídricos. Para a distribuição de Gumbel, onde x_t corresponde à precipitação associada ao tempo de retorno T, pode ser obtido por:

$$x_t = \mu - \beta \ln\left[-\ln(1 - \tfrac{1}{T})\right] \quad (2)$$

Finalizada a cenarização, os dados foram inseridos no SWMM (Storm Water Management Model), usando o Plano Municipal de Saneamento Básico- Fortaleza (2025), sendo adotado como estrutura de simulação para o presente estudo.
Com a identificação dos pontos de alagamento resultantes da simulação hidrológica, procedeu-se à análise das vulnerabilidades socioambientais dos bairros mais afetados. Para isso, foram utilizados indicadores socioeconômicos obtidos na plataforma Fortaleza em Bairros, incluindo Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), renda per capita, densidade demográfica e número de assentamentos residenciais. Dessa forma, foi possível comparar bairros com diferentes níveis de desenvolvimento socioeconômico e compreender como fatores como desigualdade social, ocupação urbana e disponibilidade de infraestrutura podem potencializar os impactos das inundações previstas nos cenários climáticos futuros

RESULTADOS

A simulação hidrológica realizada para o cenário climático futuro indicou a ampliação das áreas suscetíveis a alagamentos na bacia do rio Maranguapinho (Figura 1). Além da permanência de pontos críticos já observados nas condições atuais, foram identificados novos pontos de alagamento, concentrados principalmente nos bairros Genibaú, Henrique Jorge e Presidente Kennedy. Esse resultado sugere que o aumento da intensidade das precipitações associado às mudanças climáticas pode elevar significativamente a pressão sobre o sistema de drenagem urbana, ampliando a exposição da população aos eventos de inundação

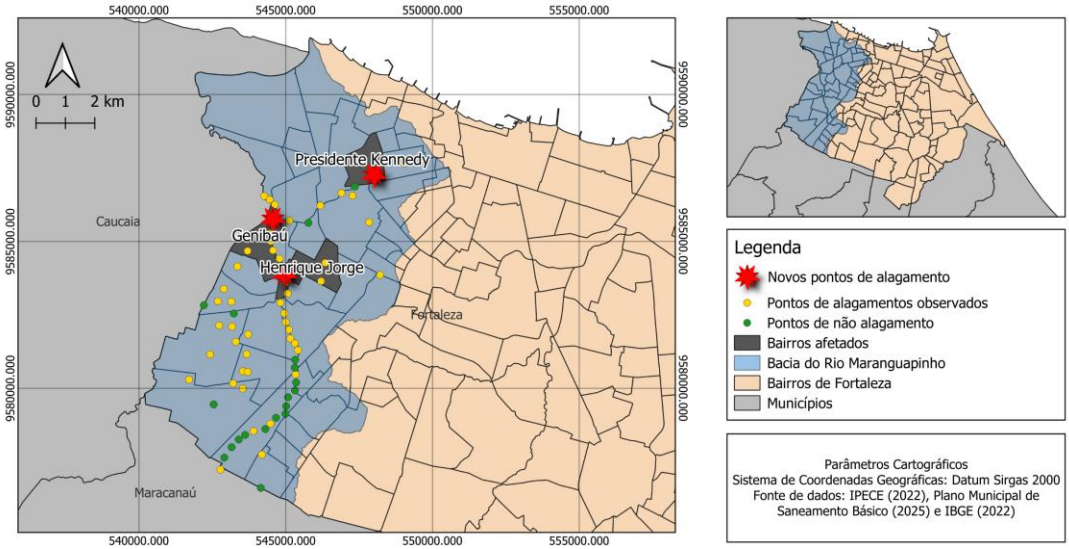


Figura 1. Novos pontos de alagamentos. Fonte: autores (2026)

Entretanto, a análise dos indicadores socioeconômicos demonstra que a exposição ao perigo não é suficiente para explicar a magnitude dos impactos esperados. Os três bairros apresentam condições distintas de desenvolvimento social e econômico, o que influencia diretamente sua capacidade de adaptação e recuperação frente aos eventos extremos. Entre eles, o Genibaú apresenta o quadro de maior vulnerabilidade social, caracterizado por elevada densidade demográfica, menor renda per capita e menor Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). Essas condições indicam uma população com menor capacidade de absorver perdas econômicas, acessar infraestrutura adequada e responder aos impactos decorrentes das enchentes. (Quadro 2).

Quadro 2 – Dados socioeconômicos dos bairros estudados

	Bairros afetados			Bacia do Rio Maranguapinho (Fortaleza)	Fortaleza
	Genibaú	**Henrique Jorge**	**Presidente Kennedy**		
População	40.336	26.994	23.004	750.000	2.428.708
IDH	0,138	0,340	0,429	0,225	0,754
Densidade demográfica	18.691,4	13.914,6	13.405,6	11.993,0	7.775,5
Renda per capita mensal	1.272,2	2.245,7	3.381,9	1.650,0	3.084,1
Assentamentos residenciais	861	5.797	6.001	234.341	859.995

Fonte: IPECE (2022)

A combinação entre alta exposição aos alagamentos e vulnerabilidade social torna o Genibaú particularmente suscetível aos efeitos das mudanças climáticas. Segundo Santos *et al.* (2017), a ocupação desigual do espaço urbano resulta em diferenças no acesso à infraestrutura e aos benefícios da urbanização, tornando determinadas áreas mais suscetíveis aos impactos ambientais. Por outro lado, embora Henrique Jorge e Presidente Kennedy também apresentem pontos de alagamento, seus indicadores socioeconômicos sugerem maior capacidade de enfrentamento e recuperação diante desses eventos.

Os resultados evidenciam que os riscos associados às inundações urbanas não decorrem apenas das características hidrológicas do território, mas da interação entre a ameaça climática e as condições socioeconômicas da população exposta. Assim, áreas socialmente mais vulneráveis tendem a concentrar os impactos mais severos das mudanças climáticas, reforçando a necessidade de incorporar

critérios de vulnerabilidade social no planejamento urbano e nas estratégias de adaptação climática, em consonância com a discussão apresentada por Santos.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que as mudanças climáticas tendem a intensificar os riscos de inundação na bacia do rio Maranguapinho, ampliando tanto a extensão das áreas alagáveis quanto o número de populações potencialmente expostas. Entretanto, a análise integrada dos aspectos hidrológicos e socioeconômicos revelou que os impactos das inundações não dependem apenas da intensidade da ameaça climática, mas também das condições de vulnerabilidade social das populações expostas.

Dessa forma, o estudo reforça a importância de abordagens multidimensionais para a avaliação de riscos climáticos urbanos, incorporando simultaneamente fatores físicos e sociais. Somente por meio da integração entre gestão ambiental, planejamento urbano e inclusão social será possível aumentar a resiliência das comunidades frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Dados hidrológicos e pluviométricos. Brasília, DF.

Copernicus Climate Change Service. CMIP6 climate projections database. Disponível em plataforma Copernicus Climate Data Store

EPA – U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Storm Water Management Model user's manual*. Washington, D.C.: EPA, 2023.

FUNCEME – FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. *Boletim de monitoramento hidrometeorológico do Ceará*. Fortaleza, 2018.

GUMBEL, E. J. *Statistics of extremes*. New York: Columbia University Press, 1958.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Demográfico 2022: resultados preliminares*. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/. Acesso em: 13 ago. 2025.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2021: the physical science basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

LI, H.; SHEFFIELD, J.; WOOD, E. F. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from intercomparison of climate models. *Journal of Geophysical Research*, v. 115, D10101, 2010.

MARENGO, J. A. *et al. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2009.

Plano Municipal de Saneamento Básico de Fortaleza. Plano Municipal de Saneamento Básico de Fortaleza. Fortaleza, 2025.

SANTOS, Alexandre P. et al. (2017). *O Lugar dos Pobres nas Cidades: Exploração Teórica sobre Periferização e Pobreza na Produção do Espaço Urbano Latino-Americano.* urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana (Brazilian Journal of Urban Management), 9(3), pp. 430 – 442

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological applications: a review. *Water Resources Research*, v. 48, n. 11, 2012.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), por meio do projeto "Revisão, desenvolvimento e aprimoramento da regulação dos serviços hídricos no Brasil".