IMPACTOS CUMULATIVOS DE EVENTOS DE CHEIAS E SUAS IMPLICAÇÕES PARA A JUSTIÇA HÍDRICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUNDAÚ

Alysson Matheus Pimentel de Morais[1] ; Wesley Douglas Oliveira Silva[2] & Manoel Mariano Neto[3]

RESUMO – Eventos de cheias têm provocado impactos socioeconômicos crescentes, afetando de forma desigual os territórios e ampliando situações de vulnerabilidade. Neste contexto, o estudo analisou os impactos cumulativos das cheias na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, sob a perspectiva da justiça hídrica. Foram utilizados indicadores de Situação de Emergência e Estado de Calamidade Pública, redução do Produto Interno Bruto municipal, número de desalojados e desabrigados e registros de enfermos e feridos. Os dados foram normalizados e integrados por meio da Análise de Componentes Principais (ACP), permitindo a construção do Índice de Impactos Cumulativos (IIC). A redução do PIB apresentou a maior contribuição para o índice (33,64%), seguida pelos indicadores de emergência, deslocamento populacional e saúde. Foi evidenciado forte desigualdade espacial, com os maiores impactos registrados em São José da Laje (0,9117), Quipapá (0,8054) e Atalaia (0,7221). Os impactos das cheias são distribuídos de forma desigual na bacia, reforçando a necessidade de políticas públicas orientadas pela justiça hídrica e redução das vulnerabilidades territoriais.

ABSTRACT– Flood events have caused increasing socioeconomic impacts, affecting territories unequally and amplifying situations of vulnerability. In this context, the study analyzed the cumulative impacts of floods in the Mundaú River Basin, from the perspective of water justice. Indicators of Emergency Situation and State of Public Calamity, reduction in municipal Gross Domestic Product, number of displaced and homeless people, and records of sick and injured people were used. The data were normalized and integrated through Principal Component Analysis (PCA), allowing the construction of the Cumulative Impact Index (CII). The reduction in GDP showed the greatest contribution to the index (33.64%), followed by indicators of emergency, population displacement, and health. Strong spatial inequality was evidenced, with the greatest impacts recorded in São José da Laje (0.9117), Quipapá (0.8054), and Atalaia (0.7221). The impacts of floods are unevenly distributed across the basin, reinforcing the need for public policies guided by water justice and the reduction of territorial vulnerabilities.

Palavras-chave: Eventos climáticos; Gestão de riscos; Análise de Componentes Principais.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas e a expansão urbana têm contribuído para o aumento da frequência e intensidade dos eventos extremos de cheias, ampliando os impactos sobre os sistemas naturais e as populações expostas (Chen et al., 2023; Kim et al., 2023; Deng et al., 2024). Além dos danos à

[1]) Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Maceió, AL, Brasil, e-mail: alysson.morais@ctec.ufal.br
[2]) Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Maceió, AL, Brasil, e-mail: wesley.silva@ceca.ufal.br
[3]) Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Maceió, AL, Brasil, e-mail: manoel.mariano@ctec.ufal.br

infraestrutura e às atividades econômicas, esses eventos podem provocar deslocamentos populacionais, agravar problemas de saúde pública e aprofundar desigualdades socioambientais, afetando de forma mais intensa grupos socialmente vulneráveis (Xu et al., 2024; Rouhanizadeh et al., 2024).

No Brasil, esse cenário é particularmente relevante na região Nordeste, onde a ocorrência de eventos hidrológicos extremos tem gerado impactos recorrentes sobre os municípios mais vulneráveis (Costa et al., 2022; Medeiros et al., 2022). Entre as áreas suscetíveis destaca-se a Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú (BHRM), localizada entre os estados de Alagoas e Pernambuco, historicamente marcada por episódios de inundação que resultam em perdas humanas, econômicas e ambientais (Silva et al., 2018; Barros et al., 2022). O evento de junho de 2010 representa um dos casos mais emblemáticos, afetando aproximadamente 270 mil pessoas e causando prejuízos superiores a R$ 1,89 bilhão em Alagoas (Banco Mundial, 2012; Freire et al., 2014).

Diante desse contexto, compreender a distribuição espacial dos impactos das cheias torna-se fundamental para subsidiar ações de gestão de riscos e promoção da justiça hídrica. Assim, este estudo tem como objetivo analisar os impactos cumulativos das cheias na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú por meio da construção de um Índice de Impactos Cumulativos (IIC), identificando os municípios mais afetados e contribuindo para o fortalecimento da governança da água na região.

METODOLOGIA

Área de Estudo

A pesquisa foi desenvolvida na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú (BHRM), localizada na região Nordeste do Brasil, abrangendo territórios dos estados de Pernambuco e Alagoas (Figura 01). A bacia possui área aproximada de 4.126 km² e compreende 31 municípios, dos quais 16 estão situados em Pernambuco, no setor de montante, e 15 em Alagoas, na porção jusante da bacia (Marcuzzo et al., 2011).

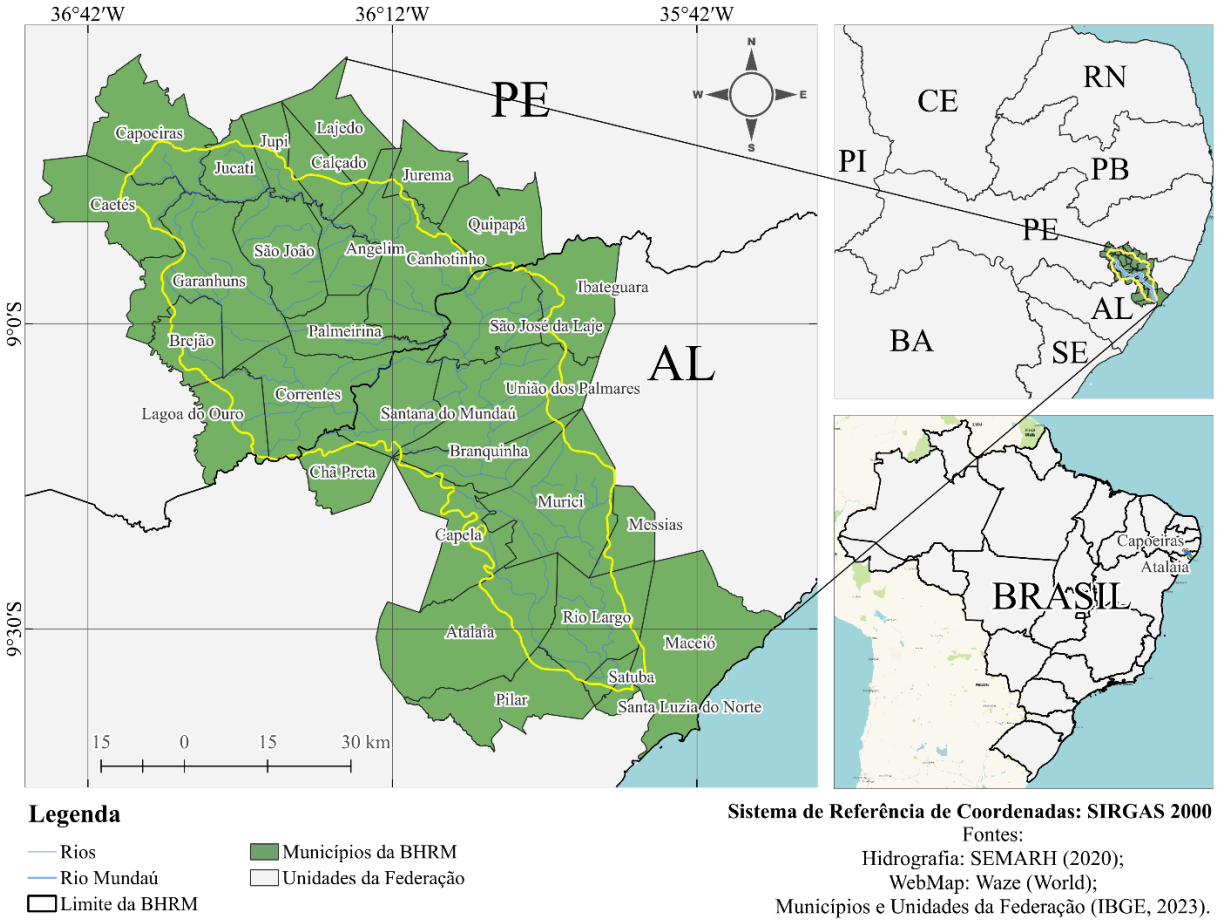


Figura 1 – Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú.

A BHRM apresenta elevada relevância socioeconômica, concentrando uma população superior a 1,7 milhão de habitantes (IBGE, 2022) e atividades ligadas à pecuária, ao cultivo da cana-de-açúcar e aos serviços urbanos. O clima predominante é do tipo tropical, com regime sazonal de chuvas que influencia diretamente a dinâmica hidrológica regional (Marcuzzo et al., 2011).

A escolha da área de estudo justifica-se pela recorrência histórica de eventos de cheias e pelos expressivos impactos socioeconômicos já registrados na bacia, conforme descrito na introdução.

Procedimentos Metodológicos

A análise dos impactos cumulativos das cheias foi realizada a partir da integração de indicadores socioeconômicos e humanos associados aos eventos extremos ocorridos na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú. O Quadro 1 enfoca as variáveis utilizadas para construção do Índice de Impactos Cumulativos.

Indicador/Variável	Descrição	Fonte
Emergência (SE) e Estado de Calamidade Pública (EPC)	Somatórios de reconhecimentos de SE e EPC, para enxurradas e chuvas intensas, na série histórica de 2003 a 2011.	S2iD (2024)
PIB	Somatório do número de anos em que houve redução do PIB municipal (2010 – 2020).	IBGE (2021)
Desalojados e Desabrigados	Provenientes da base de dados do MIDR (2017 – 2020)	MIDR (2024)
Feridos e Enfermos	Provenientes da base de dados do MIDR (2017 – 2020)	MIDR (2025)

Quadro 1 – Indicadores para a dimensão de impactos

Inicialmente, os indicadores foram submetidos ao processo de normalização min-max (Nardo et al., 2008), adotando valores entre 0 e 1 para compatibilizar as diferentes escalas dos dados. Como todos os indicadores adotados variam na mesma direção do impacto, aplicou-se apenas a normalização para maximização (Equação 01), de modo que valores mais elevados corresponderam a maiores níveis de impacto cumulativo.

$$I_{máx} = \frac{(I - V_{mín})}{(V_{máx} - V_{mín})} \quad (01)$$

Onde:

I_{max} - Valor normalizado para o indicador a ser maximizado;

I - Valor observado do indicador;

$V_{máximo}$ - Valor máximo do indicador;

$V_{mínimo}$ - Valor mínimo do indicador.

Posteriormente, aplicou-se a Análise de Componentes Principais (ACP), técnica amplamente utilizada para redução da dimensionalidade dos dados e identificação das variáveis com maior contribuição para a variabilidade observada (Prajapati et al., 2022). A adequação da base de dados foi verificada por meio do teste de esfericidade de Bartlett e da medida de adequação amostral de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO). Os pesos atribuídos aos indicadores foram obtidos a partir do quadrado dos autovetores associados ao primeiro componente principal (CP1), responsável por explicar a maior parcela da variância dos dados.

O Índice de Impactos Cumulativos (IIC) foi calculado pela expressão $IIC = \Sigma(wi \times Ii)$, em que Ii é o valor normalizado de cada indicador (Equação 01) e wi o peso obtido do quadrado do autovetor de CP1, sintetizando os efeitos econômicos, sociais e sanitários associados às cheias. A organização e o tratamento estatístico dos dados foram realizados no Microsoft Excel, enquanto a espacialização

dos resultados e a elaboração dos produtos cartográficos foram desenvolvidas em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), utilizando o software QGIS 3.40.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do teste de esfericidade de Bartlett (p = 0,01) e da medida de adequação amostral de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO = 0,622) indicaram que a matriz de correlação apresenta consistência estatística adequada para a aplicação da Análise de Componentes Principais (ACP). Esses resultados demonstram a existência de correlações significativas entre os indicadores utilizados e confirmam a adequação da técnica para a construção do Índice de Impactos Cumulativos (IIC).

A ACP revelou que o primeiro componente principal (CP1) apresentou autovalor de 1,32 e foi responsável por explicar 33,00% da variância total dos dados, enquanto o segundo componente explicou 29,25% (Figura 2).

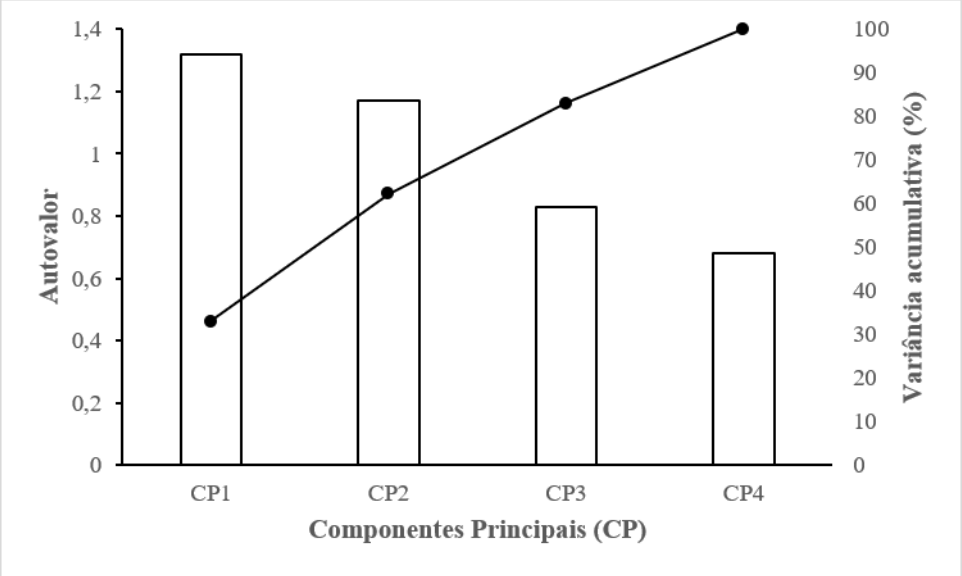


Figura 2 – Autovalores e variância acumulada – IIC

Em conjunto, os dois primeiros componentes concentraram 62,25% da variabilidade observada, indicando elevada capacidade de síntese das informações associadas aos impactos das cheias na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú. Esse resultado evidencia que os indicadores selecionados representam adequadamente as diferentes dimensões dos impactos acumulados decorrentes dos eventos extremos.

Conforme apresentado no Quadro 2, o Produto Interno Bruto (PIB) municipal apresentou a maior carga fatorial (0,58), seguido pelos registros de Situação de Emergência e Estado de Calamidade Pública (0,50), pelos desalojados e desabrigados (0,47) e pelos enfermos e feridos (0,44). Essa hierarquia também se reflete nos pesos normalizados obtidos por meio da ACP, evidenciando a maior relevância relativa da variável associada ao PIB na composição do índice. Nesse sentido, a

redução do PIB contribuiu com 33,64% para o índice, seguida pelos registros de SE e ECP (25,00%), pelos desalojados e desabrigados (22,09%) e pelos enfermos e feridos (19,36%).

Variável	CP1	Ponderação
SE e ECP	0,50	0,2500
PIB	0,58	0,3364
Enfermos	0,44	0,1936
Desalojados	0,47	0,2209

Quadro 2 – Pesos normalizados do IIC

Esses resultados demonstram que os impactos das cheias ultrapassam os danos físicos imediatos, afetando diretamente a dinâmica econômica dos municípios e as condições de vida da população atingida. Cabe ressaltar que a redução do PIB é multicausal, também influenciada por fatores conjunturais (preços agrícolas, sazonalidade da safra canavieira) não associados às cheias; ainda assim, a coincidência espacial com os eventos extremos reforça a plausibilidade de uma relação relevante com o desempenho econômico municipal, padrão semelhante ao observado por Freire et al. (2014) em municípios periféricos de Alagoas. A análise espacial dos indicadores individuais expressa diferentes padrões de distribuição dos impactos na bacia (Figura 3).

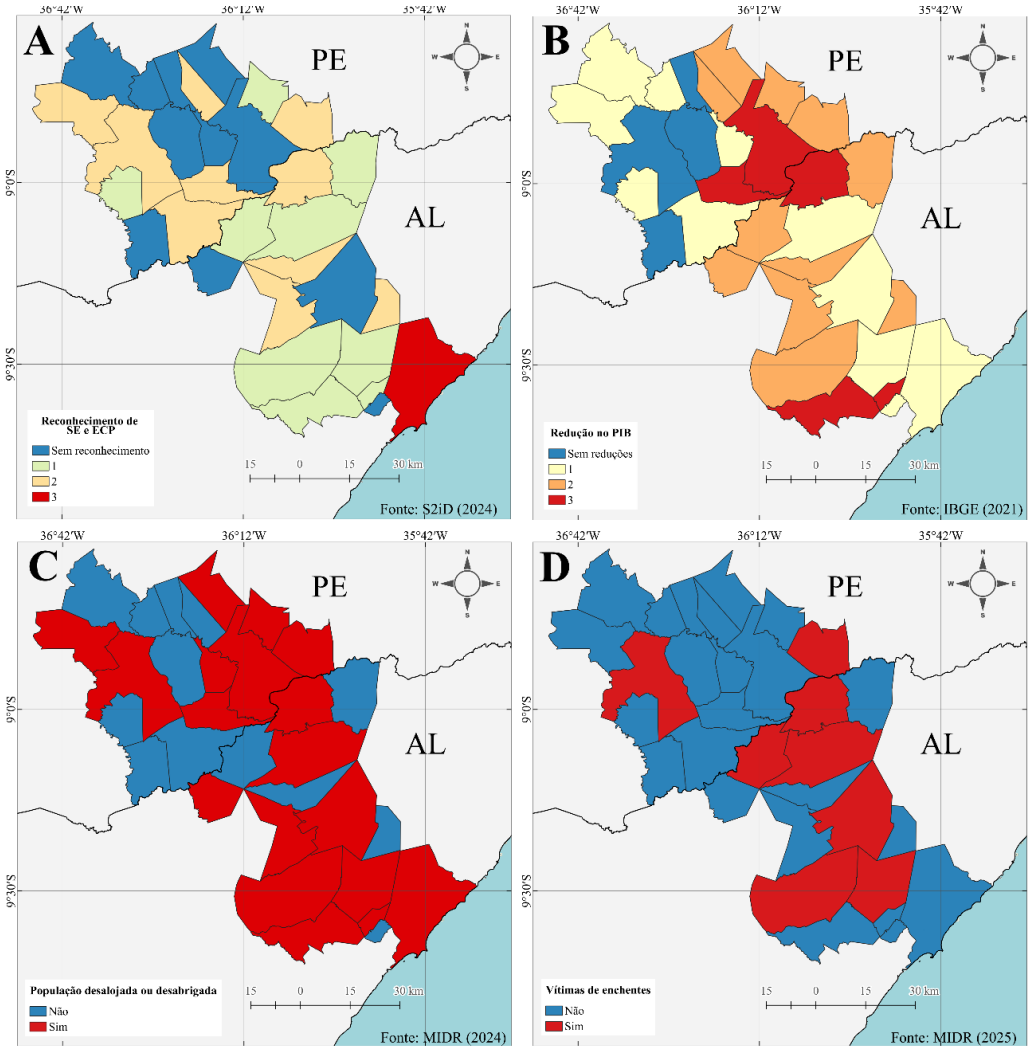


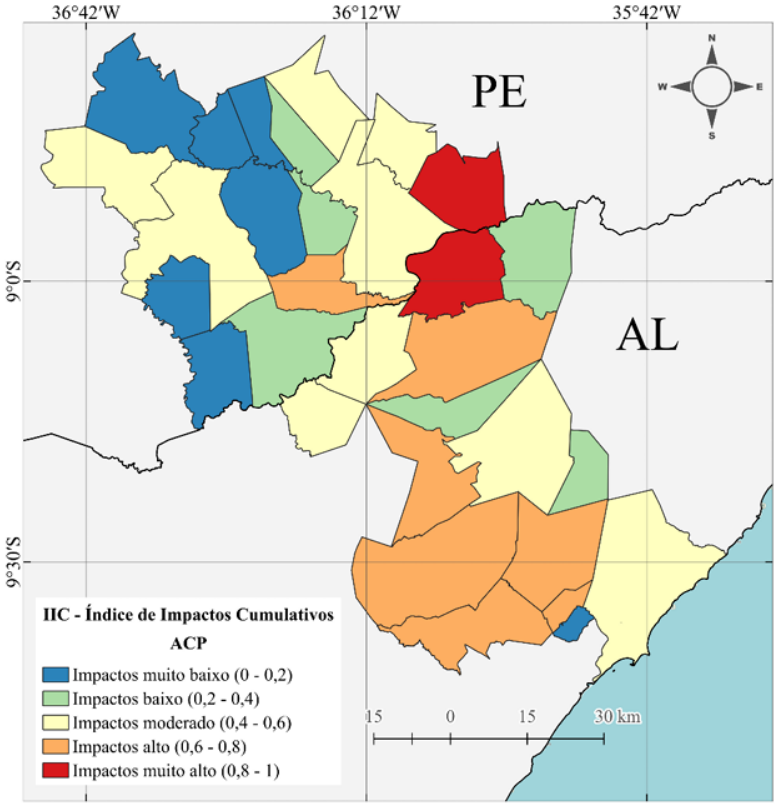
Figura 3 – Indicadores do IIC da BHRM.

Os reconhecimentos de Situação de Emergência e Estado de Calamidade Pública (Figura 3a) concentram-se principalmente nos municípios historicamente afetados por eventos hidrológicos extremos, refletindo a recorrência dos desastres e a necessidade frequente de apoio institucional. A redução do PIB municipal (Figura 3b) apresenta distribuição mais ampla, indicando que os efeitos econômicos das cheias extrapolam as áreas diretamente inundadas e podem comprometer a atividade produtiva local por períodos prolongados.

Os mapas de desalojados e desabrigados (Figura 3c) evidenciam a ocorrência de impactos sociais associados aos eventos de cheia, indicando que houve necessidade de deslocamento temporário da população em diversos municípios da bacia. Esse cenário sinaliza a exposição de áreas habitadas aos eventos extremos e sugere a existência de vulnerabilidades socioespaciais que podem comprometer a capacidade de resposta e recuperação das comunidades afetadas.

De forma complementar, a distribuição espacial dos registros de feridos e enfermos (Figura 3d) destaca a dimensão sanitária dos desastres, refletindo que as cheias produzem efeitos que se estendem para além do período de ocorrência do evento, influenciando diretamente a saúde e o bem-estar das populações afetadas.

A integração desses indicadores resultou no Índice de Impactos Cumulativos (Figura 4), que evidenciou forte desigualdade espacial na distribuição dos impactos das cheias na BHRM.



Sistema de Referência de Coordenadas: SIRGAS 2000
Fonte: IBGE (2022); BaseMap (Waze World).

Figura 4 – Mapa do Índice de Impactos Cumulativos da BHRM.

Os maiores valores foram observados nos municípios de São José da Laje (0,9117), Quipapá (0,8054) e Atalaia (0,7221), classificados nas categorias de impacto muito alto e alto. Esses municípios concentram simultaneamente perdas econômicas, deslocamentos populacionais, impactos à saúde pública e recorrentes reconhecimentos de situação de desastre, revelando a sobreposição espacial de múltiplas dimensões de vulnerabilidade nesses territórios. A concentração dos maiores impactos nesses municípios é compatível com sua posição na porção de montante da bacia, de maior declividade, e com o padrão histórico de ocupação pela cana de açúcar, que reduz a permeabilidade do solo nas várzeas, achado compatível com Rouhanizadeh et al. (2024) e Xu et al. (2024), que associaram uso do solo e condições socioeconômicas prévias a maior suscetibilidade a impactos cumulativos de cheias.

A distribuição espacial do IIC demonstra que os impactos das cheias não ocorrem de forma homogênea entre os municípios da bacia: os maiores índices concentram-se nos setores historicamente mais suscetíveis aos eventos extremos, enquanto localidades com menor recorrência de desastres registram valores mais baixos. Sob a perspectiva da justiça hídrica, esse padrão indica que determinados territórios suportam uma parcela desproporcional dos prejuízos, refletindo desigualdades associadas às condições socioeconômicas, à ocupação do território e à capacidade institucional de prevenção, resposta e recuperação, o que reforça a importância de considerar simultaneamente as dimensões econômica, social e sanitária na gestão dos riscos, refletindo a distribuição desigual da capacidade de adaptação entre os municípios, elemento central do conceito de justiça hídrica.

Cabe destacar que os indicadores baseiam-se em registros oficiais (S2iD, MIDR), sujeitos à subnotificação em municípios com menor capacidade institucional, o que pode subestimar impactos reais e atenuar as desigualdades identificadas pelo IIC.

CONCLUSÃO

A aplicação do Índice de Impactos Cumulativos (IIC) permitiu identificar e espacializar os efeitos acumulados das cheias na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, evidenciando diferenças significativas entre os municípios analisados. Os resultados demonstraram que os impactos associados aos eventos extremos possuem caráter multidimensional, envolvendo simultaneamente prejuízos econômicos, deslocamentos populacionais, danos à saúde pública e recorrentes situações de emergência e calamidade pública. A Análise de Componentes Principais mostrou-se adequada

para a integração desses indicadores, possibilitando a construção de um índice sintético capaz de representar a complexidade dos impactos das cheias.

A distribuição espacial do IIC confirmou a desigualdade territorial dos impactos, concentrados em municípios historicamente mais suscetíveis, o que reforça, sob a perspectiva da justiça hídrica, a necessidade de considerar as distintas capacidades municipais de prevenção, resposta e recuperação frente aos desastres.

Os resultados obtidos reforçam a importância de incorporar critérios de equidade na gestão dos recursos hídricos e no planejamento territorial, direcionando ações e investimentos para as áreas mais vulneráveis. Nesse contexto, o IIC contribui para a identificação de territórios prioritários, fornecendo subsídios para processos de tomada de decisão mais eficientes e alinhados aos princípios da gestão integrada dos recursos hídricos.

Por fim, conclui-se que o Índice de Impactos Cumulativos constitui uma ferramenta relevante para apoiar a governança da água e a gestão de riscos de desastres. Além de sintetizar diferentes dimensões dos impactos das cheias, o índice possibilita uma compreensão mais abrangente das desigualdades territoriais associadas aos eventos extremos, contribuindo para o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à redução das vulnerabilidades e à promoção da justiça hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú.

REFERÊNCIAS

BANCO MUNDIAL. *"Avaliação de Perdas e Danos: Inundações Bruscas em Alagoas"*. Brasília: Banco Mundial, 2012. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/Inun daes-Bruscas-em-Alagoas.pdf. Acesso em: 08 jun. 2026.

BARROS, J. P. F. G; GALVÍNCIO, J. D. "*Caracterização fisiográfica das bacias hidrográficas do rio Una e Mundaú utilizando dados do LiDAR, Pernambuco 3D"*. Revista Brasileira de Geografia Física, [S. l.], v. 15, n. 5, p. 2671, 2022. DOI: https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2671-2688.

CHEN, J.; SHI, X.; GU, L.; WU, G.; SU, T.; WANG, H.; KIM, J.; ZHANG, L.; XIONG, L. *"Impacts of climate warming on global floods and their implication to current flood defense standards"*. Journal of hydrology, [S. l.], v. 618, p. 129236, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129236.

COSTA, S. B.; HERDIES, D. L.; DE SOUZA, D. G. *"Extreme Precipitation Events on the East Coast of Brazil's Northeast: Numerical and Diagnostic Analysis"*. Water, [S. l.], v. 14, n. 19, p. 3135, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/w14193135.

DENG, Z.; WU, X.; VILLARINI, G.; WANG, Z.; ZENG, Z.; LAI, C. *"Stronger exacerbation of hydrology"*, [S. extreme rainfall at the hourly than daily scale by urbanization in a warming climate. Journal of l.], v. 633, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131025.

FREIRE, N. C. F.; BONFIM, C. V. DO; NATENZON, C. E. *"Vulnerabilidade socioambiental, inundações e repercussões na Saúde em regiões periféricas: o caso de Alagoas, Brasil"*. Ciencia & saude coletiva, v. 19, n. 9, p. 3755–3762, 2014.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *"Censo Demográfico. 2022"*. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html. Acesso em: 28 fev. 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *"Produto Interno Bruto - PIB 2021: Resultados anuais"*. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php. Acesso em: 28 fev. 2025.

KIM, S. T; LEE, W.S.; JUNG, I.W.; HAN, J. M.; BYUN, Y. H.; KIM, J. U. *"Change in Extreme Precipitation by Watersheds of South Korea Under Future Shared Socio Economic Pathway (SSP) Scenarios"*. Journal of Climate Change Research, [S. l.], v. 14, n. 2, p. 83–93, 2023. DOI: https://doi.org/10.15531/ksccr.2023.14.2.083.

MARCUZZO, F. F. N.; ROMERO, V.; CARDOSO, M. R. D. *"Detalhamento Hidromorfológico da Bacia do Rio Mundaú"*. In XIX Simpósio de Recursos Hídricos, Maceió. 2011. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/items/1dbef6f7-a1b2-4359-83a2-f290d0e074cb. Acesso em: 08 jun. 2026.

MEDEIROS, F.; OLIVEIRA, C. *"Assessment of dry and heavy rainfall days and their projected changes over Northeast Brazil in Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 models"*. International Journal of Climatology, [S. l.], v. 42, p. 8665–8686, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.7759.

MIDR – MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. "*Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD)"*. Brasília: MIDR, 2024. Disponível em: https://s2id.mi.gov.br. Acesso em: 10 jun. 2026.

NARDO, M.; SAISANA, M.; SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; HOFFMANN, A.; GIOVANNINI, E. *"Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide"*. Paris: OECD Publishing, 2008. DOI: https://doi.org/10.1787/533411815016.

PRAJAPATI, V. K; KHANNA, M.; SINGH, M; KAUR, R; SAHOO, R. N; SINGH, D. K. *"PCA-based composite drought index for drought assessment in Marathwada region of Maharashtra state, India"*. Theoretical and Applied Climatology, 149, 207–220, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s00704-022-04044-1

ROUHANIZADEH, B.; SAFAPOUR, E.; SILWAL, A. *"A GIS-Based Social Vulnerability Assessment of Communities in Coastal Areas Exposed to Extreme Flood Events: A Case Study of the New Orleans Urban Area"*. [S. l.], 2024. DOI: https://doi.org/10.1061/978078448'5279.061.

SILVA, S. A; CANDEIAS, A. L.B; GOMES, D. D. M; SOUZA, W. M. *"Variabilidade espaço temporal da precipitação na bacia hidrográfica do rio mundaú (pe/al)"*. [S. l.], v. 23, 2018. DOI: https://doi.org/10.5380/ABCLIMA.V23I0.61472.

XU, J; TAKAHASHI, M; LI, W. *"Identifying vulnerable populations in urban society: a case study in a flood-prone district of Wuhan, China"*. Natural Hazards and Earth System Sciences, [S. l.], 2024. DOI: https://doi.org/10.5194/nhess-24-179-2024.