# PERFIS DE VULNERABILIDADE À INUNDAÇÃO NOS MUNICÍPIOS DO CEARÁ: DESENVOLVIMENTO DE UM ÍNDICE E ANÁLISE DE CLUSTERS

*Yasmin Teixeira Bernardo Castelo Branco [1]; Tereza Margarida Xavier de Melo Lopes [2]& Samiria Maria Oliveira da Silva [3]*

**Palavras-Chave** – Índice de Vulnerabilidade 1, Inundações 2, Clusterização 3.

## INTRODUÇÃO

Eventos climáticos extremos, como as inundações, geram impactos socioeconômicos e ambientais significativos em escala global, e sua frequência e severidade tendem a ser intensificadas pelas mudanças climáticas UNESCO (2024). Nesse cenário, os índices de vulnerabilidade têm se consolidado como importantes instrumentos de políticas públicas, inclusive para o direcionamento de investimentos na mitigação de desastres Tate et al. (2025). Segundo o IPCC (2007), a vulnerabilidade caracteriza-se como uma função do caráter, da magnitude e da taxa de variação climática à qual um sistema está exposto, aliada à sua sensibilidade e à sua capacidade adaptativa.

Apesar de seu clima ser historicamente marcado por longos períodos de estiagem, o estado do Ceará apresenta ocorrência esporádica de eventos extremos de chuva, resultando em enchentes que afetam áreas urbanas frequentemente despreparadas para lidar com esses fenômenos Monteiro (2011). A partir dessa definição conceitual estabelecida pelo IPCC, o presente estudo tem como objetivo elaborar um índice de vulnerabilidade à inundação e fazer uma análise em relação a sua distribuição nos municípios do estado do Ceará.

## METODOLOGIA

### *Seleção e definição de indicadores*

Os dados utilizados, referentes aos indicadores de águas pluviais, foram extraídos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022), abrangendo os municípios do estado do Ceará. As variáveis selecionadas estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Indicadores selecionados.

| Código | Indicador | Categoria | Unidade |
|---|---|---|---|
| IN020 | Taxa de Cobertura de Pavimentação e Meio-Fio na Área Urbana do Município | SUSCEPTIBILIDADE | % |
| IN021 | Taxa de cobertura de vias públicas com redes ou canais pluviais subterrâneos na área urbana | CAPACIDADE DE RESPOSTA | % |

[1]) Graduanda em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, yasmin.tbcb@gmail.com.
[2]) Doutoranda em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, lopes.melo.tereza@gmail.com.
[3]) Professora do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici, samiriamaria@gmail.com.

| | | | |
|---|---|---|---|
| IN026 | Parcela de Cursos d'Água Naturais Perenes com Canalização Aberta | SUSCEPTIBILIDADE | % |
| IN027 | Parcela de Cursos d'Água Naturais Perenes com Canalização Fechada | SUSCEPTIBILIDADE | % |
| IN040 | Parcela de Domicílios em Situação de Risco de Inundação | EXPOSIÇÃO | % |
| IN049 | Investimento per capita em drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas | CAPACIDADE DE RESPOSTA | R$/habitante·ano |

Posteriormente, os dados foram normalizados, para uma faixa de [0,1] por meio do método de Min-Max.

***Redução da dimensionalidade dos dados***

Durante essa etapa, empregou-se a Análise de Componentes Principais (PCA) utilizando o software GeoDa, com o objetivo de sintetizar os indicadores e atribuir pesos.

Contudo, foi necessário adotar o método de agregação dos componentes principais Pérez-Foguet (2011) e Giné-Garriga (2011), uma vez que cada indicador tem, inicialmente, mais de um peso, visto que o método PCA gera mais de um componente Carvalho et al. (2020).

Para o cálculo do índice de vulnerabilidade aplicaram-se para cada indicador seus respectivos pesos, e posteriormente definiu-se o índice a partir da seguinte equação, seguindo o conceito de vulnerabilidade/risco definido pelo IPCC (2007):

$$VIC = E + S - CR \quad (1)$$

Sendo, E a exposição, S a susceptibilidade e CR a capacidade de resposta dos municípios.

***Clusterização***

A clusterização de dados permite o agrupamento de recursos que possuem similaridade em um mesmo cluster, com base em localizações. Dentre os métodos mais utilizados, destaca-se o algoritmo k means Hastie et al. (2009). A clusterização foi feita utilizando a linguagem R.

Porém, inicialmente foi necessário determinar o número ideia de cluster, para isso, ela foi realizada utilizando a combinação de dois métodos: o Método do Cotovelo (que analisa a redução da soma dos erros quadráticos) e o índice de silhueta (que mede a coesão interna e a separação entre os grupos).

## RESULTADOS

Embora o índice de silhueta tenha indicado k = 2, a curva do cotovelo apontou estabilização em k = 5. Adotou-se a divisão em cinco clusters para equilibrar o rigor estatístico com a necessidade de capturar a extensa heterogeneidade socioespacial cearense. Essa escolha permite mapear perfis

distintos de vulnerabilidade com maior detalhamento, otimizando o planejamento e o direcionamento de políticas públicas.

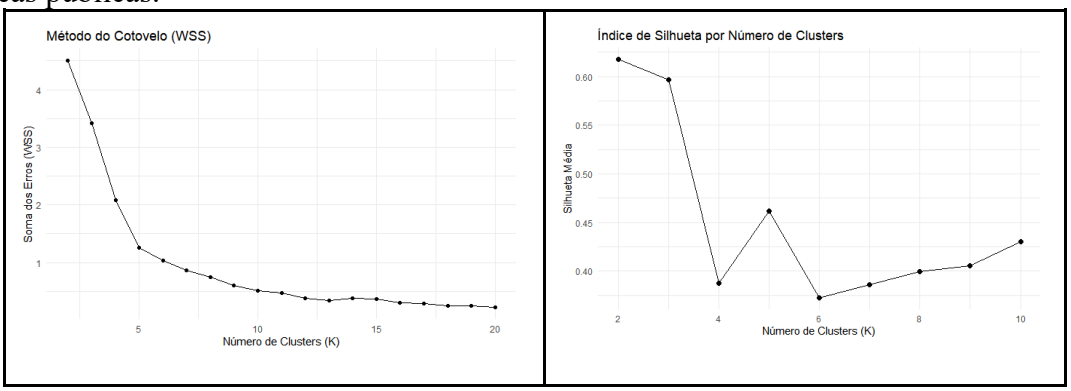



Figura 1. Resultado da análise do número ideal de clusters

A análise bidimensional (Figura 2) delineou perfis distintos de vulnerabilidade. O Cluster 1 desponta como o grupo mais propenso a inundações, unindo alta susceptibilidade a baixas exposição e capacidade de resposta. Em contraste, os Clusters 4 e 5 configuram um cenário seguro, onde a vulnerabilidade reduzida justifica a menor necessidade de investimentos em contingência. Já o Cluster 3 representa o perfil mais resiliente, combinando baixa exposição com alta capacidade de resposta. Por fim, o Cluster 2 (Ipaporanga) isola-se com os maiores índices de vulnerabilidade do estado, apesar de manter uma boa capacidade de resposta.

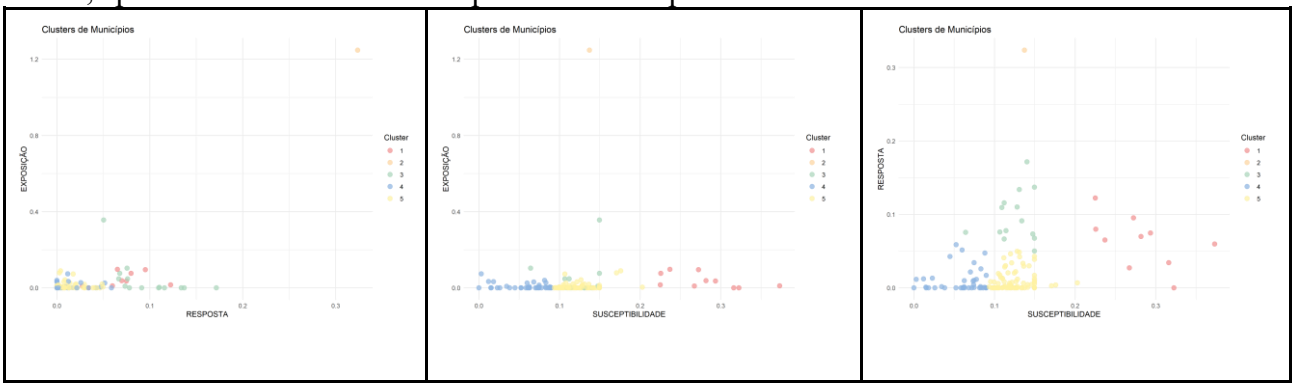



Figura 2. Visualização bidimensional dos clusters dos municípios

A espacialização dos resultados (Figura 3) indica que os Clusters 4 e 5 apresentam ampla distribuição no estado, sugerindo que grande parte dos municípios possui menor vulnerabilidade relativa. Contudo, essa predominância não deve ser interpretada como ausência de risco, mas como um indicativo de que essas áreas demandam ações contínuas de monitoramento, manutenção da infraestrutura de drenagem e planejamento preventivo frente à intensificação de eventos extremos.

Em contrapartida, o Cluster 1 exibe uma distribuição espacial dispersa, evidenciando que a alta vulnerabilidade está atrelada a fragilidades locais, o que exige políticas públicas e investimentos focados especificamente nessas localidades. Destaca-se também a singularidade de Ipaporanga, isolada no Cluster 2, que requer investigação aprofundada para entender seus indicadores atípicos. Assim, a gestão do risco no Ceará deve integrar o monitoramento territorial amplo a intervenções localizadas para os perfis mais críticos.

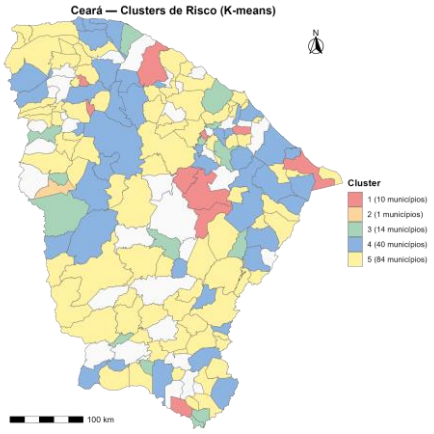



Figura 3. Distribuição da vulnerabilidade para o estado do Ceará

## CONCLUSÕES

O estudo propôs um índice de vulnerabilidade à inundação que evidenciou a elevada heterogeneidade espacial dos municípios cearenses, demonstrando que políticas padronizadas são menos eficazes do que intervenções direcionadas. Dessa forma, o índice consolida-se como uma ferramenta estratégica para a gestão pública, subsidiando a priorização de investimentos em infraestrutura de drenagem, o planejamento territorial e a adoção de medidas eficientes para a adaptação às mudanças climáticas.

Apesar de a modelagem possuir limitações inerentes à disponibilidade de dados do SNIS e ao seu recorte temporal estático, a metodologia desenvolvida apresenta alto potencial de replicação em outras regiões. Em investigações futuras, o modelo poderá ser aprimorado com a incorporação de variáveis hidrológicas, socioeconômicas e climáticas, ampliando ainda mais a compreensão e a representação da complexa dinâmica da vulnerabilidade frente aos eventos extremos.

## REFERÊNCIAS

CARVALHO, T. M. et al. (2020). “Índice de vulnerabilidade à COVID-19: uma aplicação para a cidade de Fortaleza (CE), Brasil”. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, p. e242.

HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. 2. ed. Springer, New York.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ed. por M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden e C. E. Hanson. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 p.

MONTEIRO, J. B. (2011). *Chover, mas chover de mansinho: desastres naturais e extremas chuvas no estado do Ceará*. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Ciências, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza.

RELATÓRIO MUNDIAL DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE O DESENVOLVIMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS 2024. (2024). *Água para a Prosperidade e a Paz*. Paris: UNESCO.

TATE, E.; RUFAT, S.; RAHMAN, M. A.; HOOVER, S. (2025). “Profiles of social vulnerability for flood risk reduction”. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 118, p. 105250.