



PADRÕES ESPAÇO-TEMPORAIS DE EXTREMOS CLIMÁTICOS E VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL EM MINAS GERAIS (1961–2024)

¹Thyago Henrique Dantas da Silva, ²Miguel Girão Zaniboni dos Santos, ³Lara de Melo Barbosa Andrade, ⁴Albert Smith Feitosa Suassuna Martins, ⁵Cláudio Moisés Santos e Silva

¹UFRN, e-mail: thyago.silva.123@ufrn.edu.br; ²UFRN, e-mail: miguel.santos.124@ufrn.edu.br; ³UFRN, e-mail: lara.andrade@ufrn.edu.br; ⁴UFRN, e-mail: albert.sfsm@gmail.com; ⁵UFRN, e-mail: claudiom8@gmail.com

*Educação Ambiental e Saúde
Inclusão, racismo ambiental e justiça socioambiental.*

Resumo

As mudanças climáticas intensificam eventos extremos no Brasil, afetando desproporcionalmente populações vulneráveis, fenômeno central no debate sobre justiça climática. O objetivo deste estudo foi analisar a relação entre extremos climáticos e vulnerabilidade socioambiental nos 853 municípios de Minas Gerais. Utilizaram-se dados meteorológicos diários (1961–2024) e indicadores socioeconômicos (Censos 2010/2022) e de mortalidade infantil (DataSUS). Nove índices de extremos climáticos do ETCCDI foram calculados e suas tendências estimadas pelos testes de Sen e Kendall. Construiu-se um Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) via Análise de Componentes Principais com dados de IDHM, escolarização, densidade, PIB per capita e mortalidade infantil. O primeiro componente da ACP explicou 37,6% da variância. O K-means ($k=3$) identificou três perfis: o Cluster 3 (381 municípios) apresentou o maior IVS médio (+0,50) e as mais intensas tendências de aquecimento ($TXx = 3,21$ °C/déc.). A Regressão Geograficamente Ponderada revelou forte heterogeneidade espacial, indicando que políticas uniformes são inadequadas. Os municípios mais vulneráveis concentram-se no Vale do Jequitinhonha e Norte de Minas, com destaque para São João das Missões (IVS = 8,00) e Bonito de Minas (IVS = 7,97). Conclui-se que a justiça climática em MG exige adaptação territorializada com investimentos prioritários nesses territórios.

Palavras-chave: Extremos climáticos; Justiça climática; Minas Gerais; Regressão Geograficamente Ponderada; Vulnerabilidade socioambiental.

Introdução

Minas Gerais (MG) possui uma grande diversidade climática, com transição entre climas tropicais úmidos no sul e semiáridos no norte. A região tem experimentado tendências significativas de aquecimento e mudanças nos padrões de precipitação (Silva et al., 2019). Ao mesmo tempo, as populações mais pobres, especialmente no Vale do Jequitinhonha e Norte de Minas, possuem baixa capacidade adaptativa e estão mais expostas a eventos extremos (Andrade et al., 2021; Tinoco et al., 2020).



O objetivo do presente estudo foi analisar os padrões espaço-temporais dos extremos climáticos e sua relação com a vulnerabilidade socioambiental nos 853 municípios mineiros, integrando dados climáticos de longo prazo com indicadores socioeconômicos atualizados do Censo demográfico de 2022.

Os objetivos específicos são: (i) identificar tendências significativas nos índices do *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI); (ii) construir um Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) multidimensional via Análise de Componentes Principais (ACP); (iii) classificar os municípios em perfis climático-sociais por K-means; (iv) avaliar a associação entre extremos climáticos e vulnerabilidade por regressão múltipla e Regressão Geograficamente Ponderada (GWR) com bandwidth otimizado.

Metodologia

Para calcular os índices de extremos climáticos foram usados os dados meteorológicos de temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação acumulada diária. A base de dados estava disposta em uma grade regular com resolução espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ e disponível para o período de 01 de janeiro de 1961 a 31 de dezembro de 2024 (Xavier et al., 2022).

Com os dados meteorológicos determinou-se os seguintes índices de extremos climáticos do ETCCDI: TXx, TNx, DTR, TX90p, TN90p, PRCPTOT, Rx1day, R95pTOT e SDII. A intensidade da tendência linear foi quantificada pelo método de inclinação de Sen, enquanto a inferência estatística de significância foi avaliada pelo teste Mann-Kendall (Sen, 1968; Kendall, 1975), ambas para uma significância estatística de 5%.

Para avaliar a vulnerabilidade dos municípios, construiu-se um Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) a partir da Análise de Componentes Principais (ACP), considerando o conjunto de 15 indicadores socioeconômicos, que abrangem as dimensões: renda, educação, habitação, saneamento e saúde. Dentre esses indicadores, destacam-se o IDHM (2010), a escolarização (6–14 anos), a densidade demográfica, o PIB per capita (IBGE, 2023), os rendimentos médio e mediano, e a mortalidade infantil média (2006–2024, DataSUS), além dos percentuais de domicílios sem banheiro, sem acesso à rede de água, sem coleta de lixo, sem internet e em condição inadequada (IBGE Censos 2000, 2010 e 2022).

O primeiro componente da ACP explicou 37,6% da variância total. A classificação dos municípios em perfis climático-sociais foi obtida por K-means, com $k=3$ definido pelo método do cotovelo (Hartigan & Wong, 1979). As associações foram testadas por correlação de Spearman e regressão múltipla. Aplicou-se a Regressão Geograficamente Ponderada

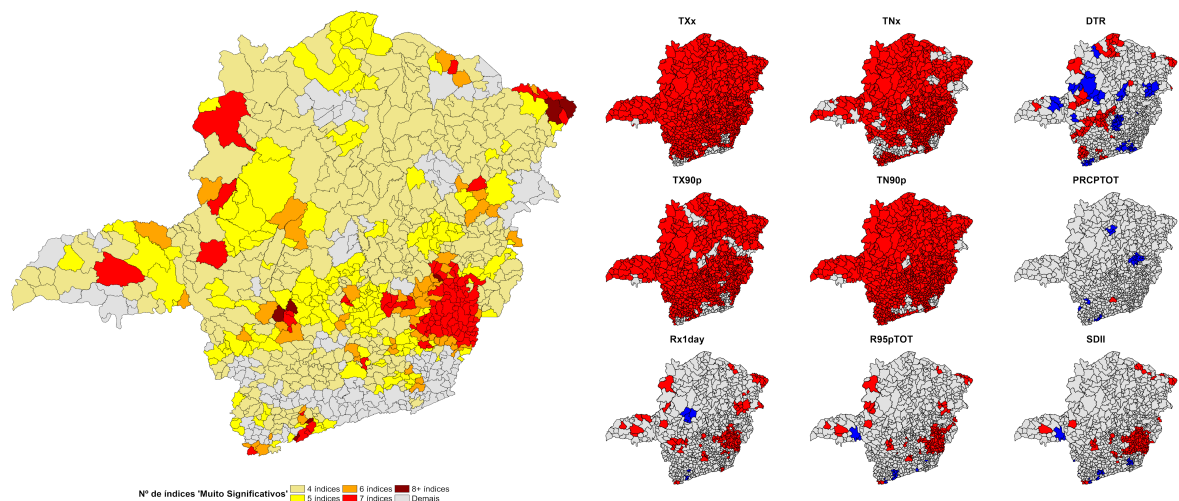


(GWR), que ajusta coeficientes locais com kernel gaussiano e bandwidth otimizada por validação cruzada (Brunsdon et al., 1996). Todas as análises foram executadas no ambiente R (R Core Team, 2024).

Resultados e Discussão

A análise das tendências dos nove índices ETCCDI (1961–2024) revelou que as maiores concentrações de municípios com tendências "Muito Significativas" ($p < 0,01$) ocorrem no leste, nordeste e norte de MG, abrangendo o Vale do Mucuri, Vale do Jequitinhonha e Norte de Minas. Nessas áreas, vários municípios exibiram de cinco a oito índices com alterações altamente significativas, especialmente aumento de TXx e TNx e redução de PRCPTOT. Essa sobreposição entre as áreas de maior intensidade de mudança climática e as mesorregiões historicamente mais pobres constitui uma forte evidência de injustiça climática estrutural (Schlosberg & Collins, 2014), uma vez que os territórios de menor capacidade adaptativa são justamente aqueles submetidos às alterações climáticas mais expressivas (Marengo & Bernasconi, 2015).

Figura 1: Distribuição espacial das tendências significativas ($p < 0,01$) dos índices ETCCDI em Minas Gerais (1961-2024). As cores representam as tendências por município: vermelho = tendências significativas de aumento; azul = tendências significativas de redução.



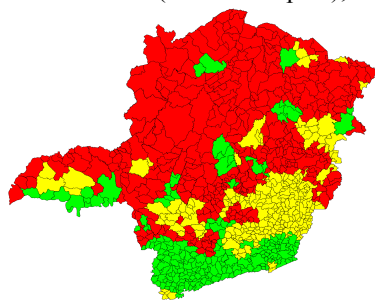
Fonte: Elaboração própria.

O método do cotovelo indicou $k = 3$ como o número ótimo de grupos, e o algoritmo K-means classificou os 853 municípios em três perfis climáticos-sociais distintos (Figura 2). Enquanto os Clusters 1 e 2 apresentam, respectivamente, vulnerabilidade baixa a intermediária e aquecimento moderado, o Cluster 3 é o grupo de piores indicadores socioambientais e climáticos. Composto por 381 municípios (cerca de 45% do estado), esse



cluster concentra a maior vulnerabilidade social (IVS médio = +0,50) e as mais intensas taxas de aquecimento (TXx = 3,21 °C/déc.), configurando a dupla penalidade da injustiça climática: a maior exposição ao calor extremo recai justamente sobre as populações com menor capacidade adaptativa (Schlosberg & Collins, 2014; Andrade et al., 2021).

Figura 2. Classificação dos 853 municípios mineiros em três perfis climáticos-sociais pelo método K-means. Cluster 1 (224 municípios); Cluster 2 (248 municípios); Cluster 3 (381 municípios).

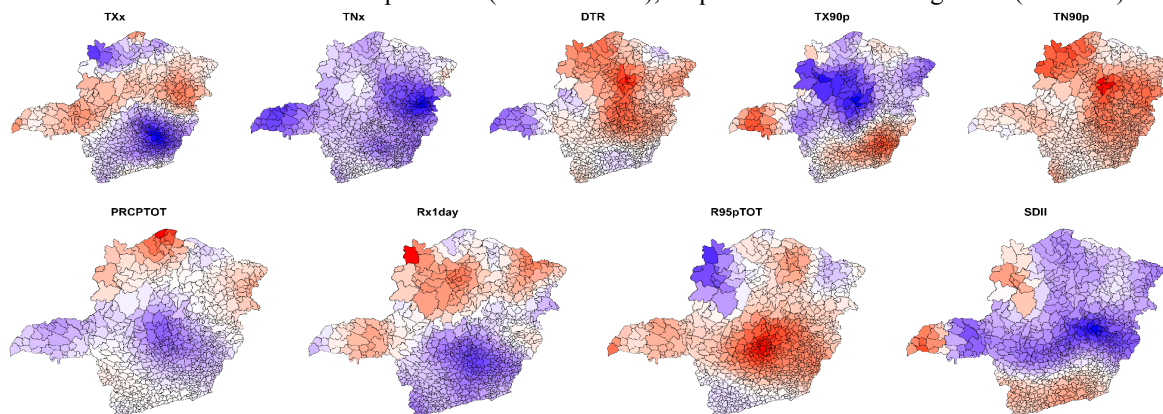


Cluster	n	IVS médio	TXx mag. (°C/déc)	TNx mag. (°C/déc)	DTR mag. (°C/déc)
1	224	-0,79	1,96	0,69	0,21
2	248	-0,06	2,31	1,29	-0,20
3	381	0,5	3,21	1,74	0,1

Fonte: Elaboração própria.

A correlação de Spearman mostrou correlações positivas entre os índices de precipitação (PRCPTOT, Rx1day, R95pTOT, SDII) ($\rho > 0,6$), TXx e TNx ($\rho = 0,53$), e negativa entre DTR e TNx ($\rho = -0,27$), consistente com aquecimento assimétrico noturno (Haylock et al., 2006; Vose et al., 2005). O IVS correlacionou-se fortemente com IDHM ($\rho = -0,90$), PIB per capita ($\rho = -0,74$), mortalidade infantil ($\rho = 0,82$) e domicílios sem banheiro ($\rho = 0,86$). A regressão múltipla ($R^2 \approx 0,045$) mostrou coeficiente negativo para TXx ($\beta = -0,23$; $p < 0,001$), e positivos para DTR ($\beta = 0,20$), TX90p, TN90p e R95pTOT. Coeficientes positivos para índices térmicos e de precipitação extrema indicam que seu aumento agrava a vulnerabilidade, especialmente em áreas rurais com baixa infraestrutura. O impacto de extremos de precipitação em áreas vulneráveis também é documentado em contextos urbanos (Rodrigues et al., 2021).

Figura 3: Distribuição espacial dos coeficientes locais do (GWR) para a relação entre os índices de extremos climáticos e IVS. Coeficientes positivos (avermelhados), enquanto coeficientes negativos (azulados).





Fonte: Elaboração própria.

Os municípios com maiores IVS estão todos localizados no Vale do Jequitinhonha e Norte de Minas (Tabela 1).

Tabela 1: Municípios de Minas Gerais com maiores Índices de Vulnerabilidade Social (IVS) e suas respectivas variáveis climáticas e socioeconômicas.

Município	IVS	TXx (°C/déc.)	DTR (°C/déc.)	PRCPTOT (mm/déc.)	Mortalidade infantil média (%)	Salário médio (R\$)	Lixo coletado (%)
São João das Missões	8,00	3,07	1,11	-60,00	16,81	897,26	22,75
Bonito de Minas	7,97	2,82	1,02	-31,52	21,49	896,35	23,64
Santo Antônio do Itambé	6,11	2,57	-0,81	-192,64	21,91	849,17	32,47
Monte Formoso	5,98	3,68	0,26	12,49	24,09	726,43	39,17
São Sebastião do Maranhão	5,59	3,40	-0,19	-343,30	20,95	903,14	25,21
Ladainha	5,50	3,00	-0,98	127,65	21,99	943,42	27,43
Novo Cruzeiro	5,43	3,47	-0,65	42,05	18,41	974,76	31,68
Carai	5,42	3,91	-0,01	-20,38	18,6	884,51	43,93
Setubinha	5,22	3,11	-0,93	87,98	22,15	1.074,19	21,14

Fonte: Elaboração própria.

Esses municípios coincidem espacialmente com o Cluster 3 e com as áreas de coeficientes positivos de TXx na GWR, configurando o triplo risco: baixa capacidade adaptativa, aquecimento intenso e alta frequência de dias quentes. Essa acumulação de vulnerabilidades expressa o ponto de convergência da injustiça climática (Schlosberg & Collins, 2014; Machado et al., 2026). Diante disso, recomenda-se a priorização desses territórios em programas de fortalecimento institucional, infraestrutura hídrica, sistemas de alerta precoce e seguridade social, em alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 1, 3, 6, 11 e 13). Tais ações devem ser integradas a políticas estaduais de adaptação climática, considerando as especificidades locais identificadas pela GWR, para que as intervenções sejam efetivas e não reproduzam desigualdades.

Conclusão

A análise integrada dos nove índices ETCCDI com o IVS revelou hotspots de transformação climática no norte e nordeste de MG, coincidentes com as áreas de maior vulnerabilidade social, evidenciando a injustiça climática estrutural. O IVS mostrou-se um sintetizador robusto (ρ com IDHM = -0,90; ρ com mortalidade infantil = 0,82), confirmando que a precariedade socioeconômica está fortemente associada à exposição climática. O Cluster 3 (381 municípios) é o mais crítico, com IVS médio +0,50 e TXx = 3,21 °C/década, configurando a dupla penalidade: maior vulnerabilidade e maior aquecimento. A GWR



(bandwidth = 0,764°) confirmou a forte heterogeneidade espacial e a inadequação de políticas uniformes, reforçando a necessidade de diagnósticos locais. Municípios como São João das Missões (IVS = 8,00) demandam ações territorializadas urgentes. Para pesquisas futuras, sugerem-se projeções climáticas (CMIP6) e extensão a outros estados do Sudeste. Por fim, os resultados evidenciam que a justiça climática em Minas Gerais exige não apenas mitigação, mas também adaptação territorializada, com investimentos prioritários nos territórios mais vulneráveis, sob pena de perpetuar desigualdades históricas.

Referências

- ANDRADE, L. M. B.; GUEDES, G. R.; NORONHA, K. V. M. S.; SANTOS E SILVA, C. M.; ANDRADE, J. P.; MARTINS, A. S. F. S. **Health-related vulnerability to climate extremes in homoclimatic zones of Amazonia and Northeast region of Brazil**. PLOS ONE, v. 16, n. 11, p. e0259780, 2021. DOI: 10.1371/journal.pone.0259780.
- BRUNSDON, C.; FOTHERINGHAM, A. S.; CHARLTON, M. E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. **Geographical Analysis**, v. 28, n. 4, p. 281-298, 1996. DOI:10.1111/j.1538-4632.1996.tb00936.x
- DATASUS. Departamento de Informática do SUS. Sistema de Informações sobre Mortalidade (SIM).
- HARTIGAN, J. A.; WONG, M. A. Algorithm AS 136: a k-means clustering algorithm. **Applied Statistics**, v. 28, n. 1, p. 100-108, 1979. DOI: 10.2307/2346830
- HAYLOCK, M. R. et al. Trends in total and extreme South American rainfall in 1960–2000 and links with sea surface temperature. **Journal of Climate**, v. 19, n. 8, p. 1490-1512, 2006. DOI: 10.2307/2346830
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>.
- KENDALL, M. G. Rank Correlation Methods. 4. ed. London: Griffin, 1975.
- MACHADO, R. B. M.; BATISTA, F. F.; ANDRADE, L. M. B.; MARTINS, A. S. F. S.; SANTOS E SILVA, C. M. Climatic regionalization of the Brazilian Semi-Arid Region and its sociodemographic dynamics. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, 2026. DOI: 10.5327/z2176-94782654
- R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org>
- RODRIGUES, D. T.; GONÇALVES, W. A.; SPYRIDES, M. H. C.; ANDRADE, L. M. B.; SOUZA, D. O.; ARAÚJO, P. A. A.; SILVA, A. C. N.; SANTOS E SILVA, C. M. Probability of occurrence of extreme precipitation events and natural disasters in the city of Natal, Brazil. **Urban Climate**, v. 35, p. 100753, 2021. DOI: 10.1016/j.uclim.2020.100753
- SCHLOSBERG, D.; COLLINS, L. B. From environmental to climate justice: climate change and the discourse of environmental justice. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 5, n. 3, p. 359-374, 2014. DOI: 10.1002/wcc.275
- SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, n. 324, p. 1379-1389, 1968. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934
- SILVA, P. E.; SANTOS E SILVA, C. M.; SPYRIDES, M. H. C.; ANDRADE, L. M. B. Análise de índices de extremos climáticos no Nordeste e Amazônia Brasileira para o período entre 1980 a 2013. **Anuário do Instituto de Geociências, Rio de Janeiro**, v. 42, n. 2, p. 137-148, 2019. DOI: 10.11137/2019_2_137_148
- TINOCO, I. C. M. et al. Perfis de vulnerabilidade do semiárido brasileiro à luz das características sociais, demográficas, dos padrões de precipitação e da produção agrícola. In: SANTOS E SILVA, C. M. (Org.). Meteorologia e climatologia aplicadas às questões ambientais, econômicas e sociais no Nordeste do Brasil. Natal: Edições UERN, 2020. v. 1, p. 59-82. Disponível em: <https://portal.uern.br/wp-content/uploads/sites/14/2024/09/E-book-Meteorologia-e-climatologia.pdf>.
- VOSE, R. S. et al. Maximum and minimum temperature trends for the globe: an update through 2004. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 23, p. L23822, 2005. DOI: 10.1029/2005GL024379
- Xavier, A. C., Scanlon, B. R., King, C. W., & Alves, A. I. (2022). New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, 42(16), 8390–8404. <https://doi.org/10.1002/joc.7731>