

ANÁLISE ESPACIAL DA VULNERABILIDADE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS DA RESERVA DA BIOSFERA DA SERRA DO ESPINHAÇO¹

SPATIAL ANALYSIS OF CLIMATE CHANGE VULNERABILITY IN THE SERRA DO ESPINHAÇO BIOSPHERE RESERVE

Autor(es): Elizângela Aparecida dos Santos; Mércia Guilherme Barbosa; Isadora Santos Cardoso de Oliveira

Filiação: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Campus Unai

E-mail: elizangela.santos@ufvjm.edu.br; mercia.guilherme@ufvjm.edu.br;

isadora.cardoso@ufvjm.edu.br

GRUPO DE TRABALHO (GT): GT04. QUESTÃO AMBIENTAL, AGROECOLOGIA E SUSTENTABILIDADE

Resumo

As mudanças climáticas têm se intensificado globalmente, afetando padrões climáticos, regimes hídricos e aumentando a frequência de eventos extremos. No Brasil, essas alterações impactam de forma desigual os territórios, exigindo análises específicas sobre vulnerabilidade socioambiental. Este estudo avalia a vulnerabilidade climática dos municípios que compõem a Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço (RBSE), território reconhecido pela UNESCO por sua relevância ecológica e sociocultural. A metodologia adotou um índice composto por três dimensões: suscetibilidade, capacidade de enfrentamento e capacidade adaptativa, complementado por análises de autocorrelação espacial (Índice de Moran e LISA). Os resultados revelaram médias de 48,35 para suscetibilidade, 36,36 para capacidade de enfrentamento e 52,84 para capacidade adaptativa, com ampla variação entre os municípios. O Índice de Vulnerabilidade apresentou média de 53,05, com destaque para Botumirim (menor vulnerabilidade: 43,89) e Joanésia (maior vulnerabilidade: 62,13). A análise espacial indicou uma fraca autocorrelação negativa (Moran = -0,123), sugerindo distribuição heterogênea da vulnerabilidade na região. A análise LISA identificou microterritórios críticos (Alto-Alto) como Espinosa, Cândido Sales, Gouveia e Alvorada de Minas, além de núcleos de resiliência (Baixo-Alto) como Carmésia e Ipatinga. Esses achados reforçam a importância de abordagens territorializadas e multiescalares para formulação de políticas públicas eficazes. Ao revelar desigualdades intrarregionais, o estudo contribui para o planejamento climático sustentável, promovendo a conservação ambiental, a inclusão social e a resiliência das comunidades agrícolas da RBSE frente às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Vulnerabilidade climática; Análise espacial; Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço

Abstract

Climate change has intensified globally, altering climatic patterns, hydrological regimes, and increasing the frequency of extreme events. In Brazil, these changes affect territories unequally, requiring specific analyses of socio-environmental vulnerability. This study assesses the climate vulnerability of the municipalities comprising the Serra do Espinhaço Biosphere Reserve (SEBR), a territory recognised by UNESCO for its ecological and sociocultural significance. The methodology employed a composite index encompassing three dimensions: susceptibility, coping capacity, and adaptive capacity, supplemented by spatial autocorrelation analyses (Moran's I and LISA). The results revealed average values of 48.35 for susceptibility, 36.36 for coping capacity, and 52.84 for adaptive capacity, with wide variation among municipalities. The Vulnerability Index presented a mean of 53.05, with Botumirim exhibiting the lowest vulnerability (43.89) and Joanésia the highest (62.13). Spatial analysis indicated a weak negative spatial autocorrelation (Moran's I = -0.123), suggesting a heterogeneous distribution of vulnerability across the region. LISA analysis identified critical micro-territories (High-High), such as Espinosa, Cândido Sales, Gouveia, and Alvorada de Minas, as well as resilience nuclei (Low-High), such as Carmésia and Ipatinga. These findings underscore the importance of territorially grounded and multi-scalar approaches in the formulation of effective public policies. By revealing intra-regional disparities, the study contributes to sustainable climate planning, promoting environmental conservation, social inclusion, and the resilience of agricultural communities within the SEBR in the face of climate change.

Key words: Climate vulnerability; Spatial analysis; Serra do Espinhaço Biosphere Reserve

¹ Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

1. Introdução

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios globais da atualidade, impactando ecossistemas, economias e sociedades em diferentes escalas. O Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023) destaca que os impactos das mudanças climáticas já são evidentes em diversas regiões do planeta, afetando padrões climáticos, regimes hídricos e a ocorrência de eventos extremos, como ondas de calor, secas e tempestades intensas. Além disso, o relatório ressalta que a vulnerabilidade às mudanças climáticas varia significativamente entre regiões, sendo influenciada por fatores socioeconômicos, ambientais e institucionais (IPCC, 2023).

A vulnerabilidade às mudanças climáticas pode ser compreendida atualmente a partir de três indicadores principais: suscetibilidade, capacidade adaptativa e capacidade de enfrentamento (Birkmann et al., 2022; Dos Santos et al., 2023). A suscetibilidade refere-se às condições e características estruturais, econômicas, nutricionais e de infraestrutura às quais as comunidades e os indivíduos estão expostos. A capacidade de enfrentamento é definida como a capacidade de um indivíduo, comunidade ou sistema de usar seus recursos para lidar com emergências, condições anormais e desastres causados por eventos. A capacidade de enfrentamento já está disponível e é de curto prazo, ações *ex-post*. Eles visam manter o sistema e suas funções em cenários adversos. A capacidade adaptativa, por outro lado, refere-se às estratégias que as comunidades e os indivíduos usam que lhes permitem mudar para minimizar as consequências negativas esperadas de eventos climáticos e desastres. Assim, pode ser definido como estratégias de longo prazo vinculadas a um perigo específico, consideradas ações *ex-ante*. Portanto, a capacidade de adaptação envolve mudanças e requer processos e reorganizações (Birkmann et al., 2022; Dos Santos et al., 2023).

Estudos indicam que países, regiões e grupos sociais apresentam diferentes graus de vulnerabilidade às mudanças climáticas, com riscos e possibilidades de adaptação variando conforme as condições socioeconômicas e estruturais locais (Dos Santos et al., 2023). No Brasil, as projeções climáticas apontam para cenários preocupantes, incluindo elevações de temperatura em áreas suscetíveis à seca (Kotz et al., 2021) e chuvas de verão mais intensas em algumas regiões (Mahmoud, 2020).

Por outro lado, mesmo apresentando cenários insustentáveis, o Brasil possui riquezas que contribuem para minimizar os impactos adversos das mudanças climáticas, como as conceituadas reservas da biosfera. As Reservas da Biosfera surgem como estratégias fundamentais para a conservação da biodiversidade e a promoção do desenvolvimento sustentável, minimizando o impacto das mudanças climáticas. Definidas pela UNESCO no Programa O Homem e a Biosfera (MAB), as Reservas da Biosfera são territórios designados para equilibrar a conservação da natureza com o uso sustentável dos recursos naturais, promovendo pesquisas e práticas inovadoras que conciliem a proteção ambiental e o desenvolvimento humano. Atualmente, existem mais de 700 Reservas da Biosfera reconhecidas pela UNESCO em 136 países, cobrindo ecossistemas diversos e funcionando como laboratórios vivos para a experimentação de estratégias de sustentabilidade (UNESCO, 2023). No Brasil, existem sete reservas, as quais abrangem todos os biomas nacionais: Reserva da Mata Atlântica, Reserva do Cinturão Verde de São Paulo, Reserva do Cerrado, Reserva do Pantanal, Reserva da Caatinga, Reserva da Amazônia Central e Reserva da Serra do Espinhaço (REDE BRASILEIRA DE RESERVAS DA BIOSFERA - RBRB, 2025).

A Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço apresenta singularidade ecológica e relevância para a conservação ambiental. Reconhecida pela UNESCO em 2005, essa reserva abriga ecossistemas únicos como os campos rupestres, caracterizados por alta biodiversidade e elevados índices de endemismo, especialmente de flora, sendo considerados um dos ecossistemas mais ricos e ameaçados do Brasil (Silveira et al., 2016; UNESCO, 2005). Além

disso, a região representa uma zona de transição entre os biomas Cerrado, Mata Atlântica e Caatinga, reunindo características ecológicas diversas e complexas (Giulietti et al., 2000). A presença de comunidades tradicionais que mantêm modos de vida fortemente conectados à natureza, como os quilombolas e agricultores familiares, contribui para a construção de modelos sustentáveis de uso dos recursos naturais (Drummond et al., 2009). Apesar de sua importância, a Serra do Espinhaço ainda é menos estudada do que outras reservas da biosfera brasileiras, como a Amazônia ou a Mata Atlântica, evidenciando a necessidade de aprofundamento científico sobre os impactos ambientais e socioculturais locais, especialmente diante de ameaças como mineração, desmatamento, expansão urbana (Ministério do Meio Ambiente - MMA, 2021) e a mudança climática. Nesse contexto, concentrar esforços de pesquisa na Reserva da Serra do Espinhaço contribui para preencher lacunas de conhecimento e subsidiar estratégias eficazes de conservação e desenvolvimento sustentável.

Do ponto de vista socioeconômico, a RBSE abriga diversas comunidades agrícolas que dependem diretamente dos serviços ecossistêmicos para sua subsistência, incluindo populações tradicionais, comunidades quilombolas e agricultores familiares. Essas populações têm um papel fundamental na conservação ambiental, uma vez que suas práticas culturais e produtivas estão historicamente associadas ao uso sustentável dos recursos naturais. No entanto, a vulnerabilidade dessas comunidades às mudanças climáticas é acentuada por desafios como a degradação ambiental, o desmatamento, a expansão urbana desordenada e a falta de políticas públicas eficazes para mitigar os impactos do aquecimento global, o que justifica a escolha da RBSE como área focal deste estudo.

A análise da vulnerabilidade climática nos municípios pertencentes à RBSE é essencial para compreender os impactos ambientais e socioeconômicos que afetam as comunidades agrícolas locais. A avaliação desses impactos permite identificar os principais desafios enfrentados pela população e pelos ecossistemas da região, além de subsidiar a formulação de políticas públicas e estratégias de adaptação que minimizem os riscos associados às mudanças do clima. Estudos indicam que áreas protegidas, como as Reservas da Biosfera, podem funcionar como amortecedores dos impactos climáticos, reduzindo os efeitos da desertificação, da perda de biodiversidade e da degradação do solo (UNESCO, 2016). Dessa forma, compreender o grau de vulnerabilidade das comunidades agrícolas localizadas na RBSE é um passo essencial para a construção de um planejamento territorial sustentável e resiliente.

Assim, este estudo busca contribuir para o desenvolvimento de abordagens sustentáveis que garantam a resiliência ambiental e o bem-estar das comunidades na Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço. Ao considerar os diferentes fatores que influenciam a vulnerabilidade climática, espera-se fornecer subsídios para a implementação de políticas públicas que promovam não apenas a conservação da biodiversidade, mas também a inclusão social e o fortalecimento econômico das populações locais. Assim, a RBSE pode continuar desempenhando seu papel estratégico na proteção ambiental e na promoção do desenvolvimento sustentável no Brasil.

2. Materiais e Métodos

2.1 Área de Estudo

A Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço (RBSE), reconhecida pela UNESCO em 2005, abrange uma área de aproximadamente 10.218.895 hectares, distribuída por 172 municípios no estado de Minas Gerais. Esta região é notável por sua diversidade biológica e importância ecológica, englobando três dos principais biomas brasileiros: Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica. Destaca-se ainda pela presença dos campos rupestres, uma vegetação singular

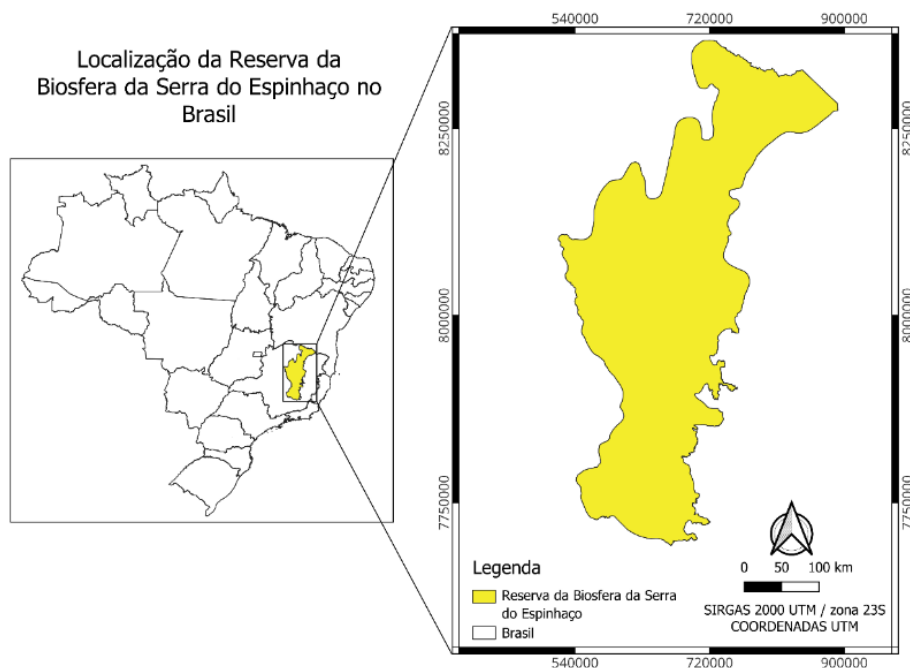
que se desenvolve em solos pedregosos ou arenosos em áreas elevadas, formando um mosaico de comunidades vegetais adaptadas a condições ambientais específicas (RBRB, 2025).

A Serra do Espinhaço desempenha um papel fundamental como produtora de água, alimentando importantes bacias hidrográficas que deságuam no Oceano Atlântico. Além de sua relevância ecológica, a região possui um rico patrimônio cultural e histórico, evidenciado por cidades como Ouro Preto e Diamantina, que refletem a trajetória de ocupação e desenvolvimento de Minas Gerais (Ministério do Turismo, 2022).

A biodiversidade da RBSE é expressiva, com estimativas indicando a existência de 2.000 a 3.000 espécies vegetais nos campos rupestres, das quais aproximadamente 30% são endêmicas. Além disso, cerca de 350 espécies estão ameaçadas de extinção. Essa riqueza biológica, aliada à fragilidade dos ecossistemas locais, ressalta a importância de estratégias de conservação e manejo sustentável na região. As atividades econômicas na RBSE são diversificadas, incluindo exploração mineral, pecuária extensiva, agricultura de subsistência e extrativismo vegetal. O turismo, tanto ecológico quanto cultural e histórico, tem se consolidado como uma importante fonte de renda, impulsionado pelo significativo patrimônio natural e cultural da região.

Diante dessas características, a RBSE representa uma área de estudo fundamental para compreender as interações entre biodiversidade, recursos hídricos e atividades humanas, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à conservação ambiental e ao desenvolvimento sustentável. A figura 1 abaixo apresenta a localização da RBSE ao longo da extensão territorial brasileira.

Figura 1 – Localização da Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço



Fonte: Elaboração própria

2.2 Vulnerabilidade às mudanças climáticas

A presente pesquisa adota uma abordagem baseada em índices para avaliar a vulnerabilidade dos municípios pertencentes a RBSE, focalizando três dimensões centrais: suscetibilidade, capacidade de enfrentamento e capacidade adaptativa (Birkmann et al., 2022). Essa metodologia é amplamente aplicada em análises ambientais e socioeconômicas, por sua

eficácia em representar contextos complexos de maneira sintética e comparável (Dos Santos et al., 2024).

O cálculo do Índice de Vulnerabilidade (*iv*) foi fundamentado no modelo proposto por Welle e Birkmann (2015), que considera a média ponderada dos componentes citados. A fórmula adotada nesta pesquisa está expressa da seguinte forma:

$$iv = \frac{[S+(1-CE)+(1-CA)]}{3} \quad (1)$$

em que: S representa a suscetibilidade dos municípios; CE refere-se à capacidade de enfrentamento; CA corresponde à capacidade de adaptação.

Para estruturar os indicadores que compõem o índice, foram selecionadas variáveis relacionadas a aspectos socioeconômicos, ambientais e demográficos que influenciam diretamente a realidade dos estabelecimentos agropecuários localizados nos municípios da RBSE.

Com o intuito de viabilizar a comparação entre os diferentes indicadores, todas as variáveis foram ponderadas e normalizadas, assumindo valores adimensionais em uma escala de 0 a 1. Esse processo de padronização seguiu os critérios estabelecidos por Welle e Birkmann (2015), com complementações metodológicas conforme discutido em Dos Santos et al. (2023). As variáveis utilizadas na composição dos índices estão descritas na tabela 1 abaixo:

Tabela – 1 Variáveis utilizadas nos indicadores de vulnerabilidade

Suscetibilidade	Agricultura Familiar	Armazenamento
Água potável	PIB per capita	Desenvolvimento Humano
Esgoto tratado	Desigualdade de renda	Capacidade adaptativa
Eletricidade	Capacidade de enfrentamento	Alfabetismo
Irrigação	Assistência técnica	Escolaridade do cônjuge
Queimada	Associação	Ensino Superior
Veículos	Seguro rural	Representação política
Residência	Proprietário	Recursos hídricos
Subsistência	Financiamento	Práticas conservacionistas
Dependência da renda	Pluriatividade	Vegetação Natural
Gênero	Diversificação	Fertilizantes

Fonte: Elaboração própria com base em Dos Santos et al., (2023).

2.3 Análise espacial da vulnerabilidade

A análise espacial do Índice de Vulnerabilidade foi conduzida com o objetivo de identificar padrões de autocorrelação espacial e clusters estatisticamente significativos entre os municípios que compõem a área de estudo. Para isso, foram utilizadas duas técnicas estatísticas amplamente empregadas na geografia quantitativa: o Índice de Moran Global e a Análise Local de Indicadores de Associação Espacial (LISA). Inicialmente, foi calculado o Índice de Moran Global (I), que permite verificar a existência de autocorrelação espacial entre os valores do *iv* nos municípios analisados. O índice varia de -1 a +1, sendo que valores positivos indicam agrupamentos espaciais de valores semelhantes (alta-alta ou baixa-baixa), valores negativos indicam associação entre valores dissimilares (alta-baixa ou baixa-alta) e valores próximos de zero sugerem distribuição aleatória dos dados no espaço (Hoque et al., 2019). A estatística foi calculada utilizando-se uma matriz de vizinhança do tipo "rainha" (*queen contiguity*), que considera como vizinhos os municípios que compartilham limites geográficos por vértice ou lado.

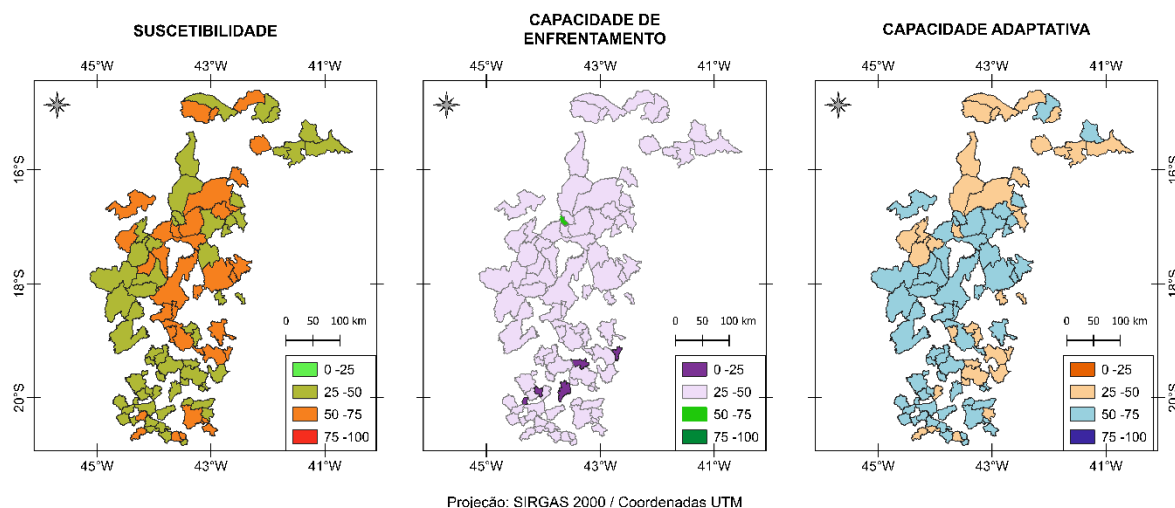
Em um segundo momento, foi aplicada a Análise LISA (*Local Indicators of Spatial Association*), que permite a detecção de agrupamentos locais e a identificação de municípios com valores de *iv* significativamente diferentes dos seus vizinhos. A estatística LISA proporciona uma avaliação local da autocorrelação espacial, permitindo mapear a formação de quatro tipos principais de clusters: Alto-Alto (*hotspots*): municípios com altos valores de vulnerabilidade cercados por municípios também altamente vulneráveis; Baixo-Baixo (*coldspots*): municípios com baixos níveis de vulnerabilidade em regiões com municípios similares; Alto-Baixo: municípios com alta vulnerabilidade cercados por áreas de baixa vulnerabilidade; Baixo-Alto: municípios com baixa vulnerabilidade inseridos em contextos vizinhos de alta vulnerabilidade (Hoque *et al.*, 2019; Dos Santos *et al.*, 2023).

3. Resultados e Discussão

3.1 Análise dos indicadores e da vulnerabilidade

A figura 2 abaixo apresentam os valores dos indicadores de vulnerabilidade para os municípios da Reserva da Biosfera Serra do Espinhaço.

Figura 2 – Indicadores de Vulnerabilidade



Fonte: Elaboração própria

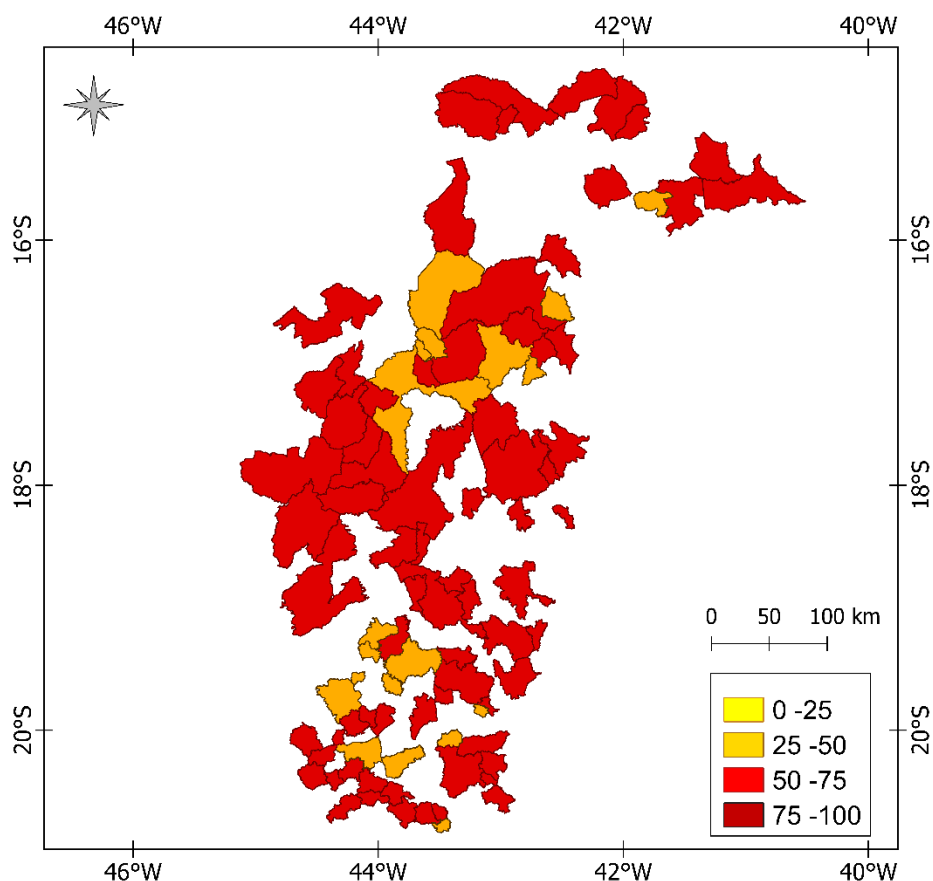
Os valores dos indicadores de vulnerabilidade apresentados variam significativamente entre os municípios analisados. A suscetibilidade apresenta uma média de aproximadamente 48,35, com o menor valor registrado em Lagoa Santa (36,76) e o maior em Bocaiúva (57,94), indicando variações nos fatores de exposição e risco. Já a capacidade de enfrentamento tem uma média em torno de 36,36, com valores oscilando entre Itambé do Mato Dentro (23,61) e Glaucilândia (60,88), refletindo diferentes níveis de infraestrutura e resiliência local. Por fim, a capacidade adaptativa tem uma média de 52,84, com mínimo de Engenheiro Navarro (39,74) e máximo de Botumirim (73,85), demonstrando que alguns municípios possuem melhores condições para se ajustar às mudanças e desafios ambientais. A análise geral evidencia uma disparidade significativa nos indicadores de vulnerabilidade, com alguns municípios apresentando alta suscetibilidade e baixa capacidade de resposta, tornando-se mais vulneráveis a impactos ambientais e socioeconômicos.

A média de suscetibilidade às mudanças climáticas encontrada neste estudo revela um nível moderado de exposição e risco climático entre os municípios analisados, com oscilações significativas que vão de 36,76 (Lagoa Santa) a 57,94 (Bocaiúva). Esses resultados se aproximam dos valores identificados por Alves *et al.* (2020), que, ao aplicarem um Índice de

Vulnerabilidade aos impactos das mudanças climáticas no Semiárido brasileiro, encontraram valores de suscetibilidade variando entre 40 e 60, a depender dos indicadores ambientais e socioeconômicos considerados. Da mesma forma, o estudo de Marengo et al. (2017) identificou faixas de suscetibilidade elevadas em áreas com forte pressão antrópica e infraestrutura precária, reforçando a relação entre fragilidade ambiental e dinâmica territorial. A média observada neste trabalho também é coerente com os achados de Nascimento et al. (2019), que apontaram níveis médios de suscetibilidade na ordem de 47,2 em regiões com baixa cobertura vegetal e alta variabilidade climática. Para Dos Santos et al. (2023), a suscetibilidade, capacidade de enfrentamento e capacidade adaptativa dos municípios brasileiros foram de 48%, 35% e 51%, respectivamente. As implicações desses resultados são significativas: municípios com alta suscetibilidade e baixa capacidade de enfrentamento, como Bocaiúva, configuram cenários de vulnerabilidade crítica, onde os impactos das mudanças climáticas tendem a ser mais severos e desiguais, exigindo políticas públicas focadas em adaptação, infraestrutura e redução de riscos socioambientais.

Em se tratando do índice de vulnerabilidade, a Figura 3 abaixo apresenta a distribuição ao longo da reserva.

Figura 3 - Índice de Vulnerabilidade da RBSE



Projeção: SIRGAS 2000 / Coordenadas UTM

Fonte: Elaboração própria

Os resultados da análise do Índice de Vulnerabilidade indicam uma variação considerável entre os municípios analisados. O município com menor vulnerabilidade foi Botumirim (43,89), enquanto o mais vulnerável foi Joanésia (62,13). A média dos valores foi de 53,05, com uma mediana de 53,12, sugerindo uma distribuição relativamente equilibrada. O

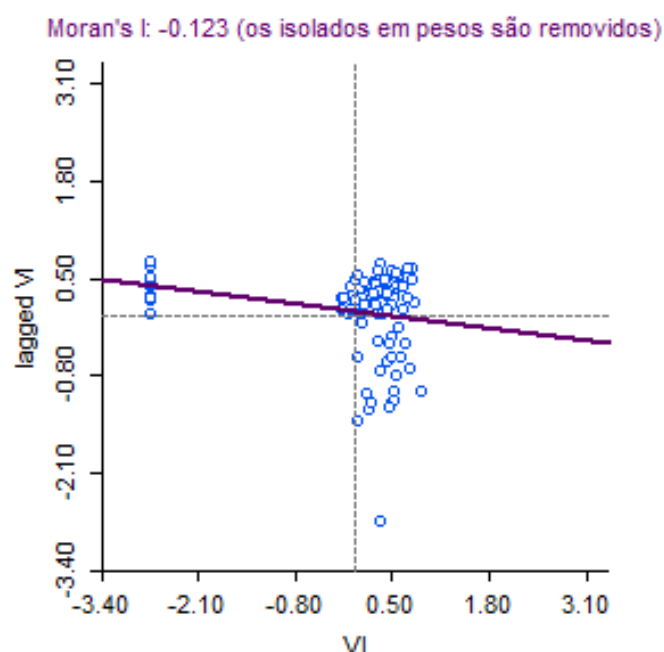
desvio padrão de 3,97 aponta para uma dispersão moderada dos índices entre os municípios, indicando que alguns, como Congonhas do Norte (60,30), Itambé do Mato Dentro (60,50) e Encruzilhada (59,89), apresentam vulnerabilidades significativamente superiores à média, enquanto outros, como Glaucilândia (44,10), Juramento (44,67) e Capim Branco (45,30), possuem menores riscos associados às mudanças climáticas.

A média de vulnerabilidade climática encontrada neste estudo (53,05), com variação entre 43,89 (Botumirim) e 62,13 (Joanésia), reflete um padrão compatível com os resultados observados em análises recentes sobre a vulnerabilidade de municípios brasileiros. De acordo com Lapola et al. (2022), que avaliaram a vulnerabilidade de municípios brasileiros utilizando indicadores socioeconômicos, ambientais e climáticos, os índices variam frequentemente entre 45 e 65 pontos, especialmente em regiões caracterizadas por desigualdade social, dependência de atividades agropecuárias e infraestrutura limitada — fatores presentes em muitos municípios analisados neste estudo. A dispersão moderada (desvio padrão de 3,97) sugere que, apesar da média relativamente estável, há municípios com vulnerabilidades significativamente superior à média, como Joanésia e Itambé do Mato Dentro. Esses resultados corroboram o mapeamento realizado pelo PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS - P BMC (2022), que aponta o interior de Minas Gerais como uma área com vulnerabilidade intermediária a alta, devido à exposição a eventos climáticos extremos e à limitada capacidade institucional para enfrentá-los. A literatura destaca que índices nessa faixa indicam a necessidade urgente de políticas públicas voltadas à redução da exposição e ampliação da capacidade adaptativa, sobretudo nos municípios com vulnerabilidade acima de 60, os quais tendem a apresentar maior risco de impactos socioeconômicos frente às mudanças climáticas (Nobre et al., 2019; IPCC, 2022). A heterogeneidade observada entre os municípios reforça a importância de abordagens territoriais específicas para o enfrentamento da crise climática.

3.2 Análise espacial da vulnerabilidade

As figuras 4 e 5 abaixo apresentam os resultados referentes a análise espacial da vulnerabilidade. A figura 4 apresenta o Índice de Moran e a figura 5 a análise LISA.

Figura 4 - Análise espacial da Vulnerabilidade – Índice de Moran



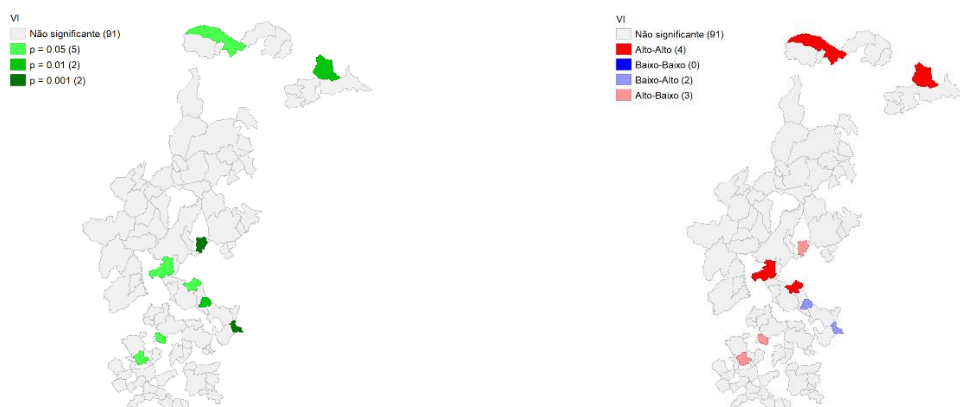
Fonte: Elaboração própria

A análise de autocorrelação espacial do Índice de Vulnerabilidade (*iv*) nos municípios pertencentes à Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço revelou um valor do Índice de Moran igual a -0,123. Este resultado indica uma fraca autocorrelação espacial negativa, o que sugere que municípios com altos níveis de vulnerabilidade tendem a estar próximos de municípios com baixos níveis de vulnerabilidade, e vice-versa. Entretanto, a magnitude do valor negativo é baixa, apontando para uma tendência de dispersão pouco expressiva. O diagrama de dispersão de Moran corrobora esse padrão, evidenciando uma distribuição espacial heterogênea do índice de vulnerabilidade na região. A ausência de agrupamentos espaciais definidos revela que não há uma concentração geográfica clara de municípios mais ou menos vulneráveis, o que pode ser reflexo das distintas condições socioeconômicas, ambientais e de exposição aos riscos climáticos ao longo da Reserva da Biosfera.

Além disso, é importante destacar que municípios considerados isolados na matriz de vizinhança foram removidos da análise, conforme indicado na legenda do gráfico ("os isolados em pesos são removidos"). Isso é um procedimento comum para evitar distorções no cálculo da autocorrelação espacial, sobretudo em regiões com grandes variações na densidade de municípios. Em termos práticos, esses resultados indicam que a vulnerabilidade climática não segue um padrão espacial uniforme dentro da Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço. Diante disso, políticas públicas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas devem considerar as especificidades locais, dado que municípios vizinhos podem apresentar perfis bastante distintos de vulnerabilidade. A abordagem territorial deve, portanto, ser articulada, mas com ênfase em estratégias diferenciadas conforme a realidade de cada município.

A fraca autocorrelação espacial negativa observada na Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço indica uma distribuição espacial heterogênea e dispersa da vulnerabilidade, sem formação de clusters significativos. Esse padrão está alinhado com os achados de Andrade et al. (2021) e Mendonça et al. (2022), que demonstram que, em regiões ambientalmente complexas, como a Serra do Espinhaço, fatores como infraestrutura precária, desigualdade social e diferentes graus de governança ambiental contribuem para uma variabilidade significativa nos indicadores de vulnerabilidade entre os municípios. A ausência de agrupamentos espaciais consistentes reforça a necessidade de políticas públicas descentralizadas e sensíveis ao contexto local, como defendido por Torres et al. (2020), que argumentam que estratégias homogêneas de adaptação climática tendem a ser ineficazes em regiões com dinâmicas socioambientais tão diversas. O estudo de Mendonça et al. (2022), ao analisar municípios do Cerrado mineiro, também observou autocorrelação espacial fraca ou inexistente do índice de vulnerabilidade, destacando que políticas homogêneas não são eficazes em territórios com dinâmicas locais tão distintas. A ausência de agrupamentos espaciais definidos na presente análise reforça a necessidade de abordagens políticas territorializadas e multiescalares, que considerem os fatores contextuais locais — como infraestrutura, governança ambiental e condições socioeconômicas — como elementos centrais na formulação de estratégias de adaptação climática. Assim, a formulação de políticas públicas deve evitar generalizações e priorizar ações específicas, respeitando as assimetrias locais dentro de áreas ecologicamente sensíveis como a Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço.

Figura 5 - Análise espacial da Vulnerabilidade – Análise LISA



Fonte: Elaboração própria. Nota: Análise espacial mostrando o padrão de distribuição de vulnerabilidade na área de estudo: Esquerda: mapa de significância LISA; Direita: mapa de cluster LISA. As áreas de cor vermelha e azul escuros no mapa indicam ‘pontos quentes’ e ‘pontos frios’ de distribuição de vulnerabilidade, respectivamente.

A análise LISA (*Local Indicators of Spatial Association*) permitiu identificar padrões locais de autocorrelação espacial do *iv* entre os municípios que compõem a Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço. O mapa de significância estatística (à esquerda) indica que, embora a maioria dos municípios não apresente autocorrelação espacial significativa (91), foi possível identificar 11 municípios com associações estatisticamente significativas, considerando diferentes níveis de p-valor: cinco municípios com $p \leq 0,05$, dois com $p \leq 0,01$ e dois com $p \leq 0,001$ (Figura 5).

O mapa de agrupamentos (à direita) evidencia os tipos de autocorrelação espacial significativa observada. Foram identificados quatro municípios na categoria Alto-Alto — Espinosa, Cândido Sales, Gouveia e Alvorada de Minas — os quais apresentam altos níveis de vulnerabilidade climática e estão cercados por vizinhos igualmente vulneráveis. Essa configuração indica a presença de microconcentrações territoriais de alta vulnerabilidade, que devem ser priorizadas nas estratégias de adaptação e mitigação climática por concentrarem riscos sociais e ambientais relevantes.

Além disso, foram identificados dois municípios na categoria Baixo-Alto — Carmésia e Ipatinga — nos quais baixos níveis de vulnerabilidade se destacam em meio a vizinhos com alta vulnerabilidade. Esse padrão pode indicar zonas de resiliência localizadas em regiões mais fragilizadas, o que sinaliza potencial para o compartilhamento de boas práticas ou políticas públicas eficazes. Por outro lado, Felício dos Santos, Lagoa Santa e Betim foram classificados como Alto-Baixo, o que significa que, embora sejam altamente vulneráveis, estão inseridos em contextos vizinhos menos vulneráveis. Essa condição pode indicar situações pontuais de fragilidade em áreas com maior capacidade adaptativa regional, exigindo intervenções específicas.

A análise LISA evidenciou padrões locais de autocorrelação espacial da vulnerabilidade entre os municípios da Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço, destacando a importância de se considerar as heterogeneidades territoriais nos estudos sobre vulnerabilidade climática. Apesar da baixa autocorrelação global observada — conforme indicado pelo Índice de Moran, foram identificados agrupamentos locais estatisticamente significativos, com destaque para os municípios classificados como Alto-Alto, como Espinosa, Cândido Sales, Gouveia e Alvorada de Minas. Esses municípios apresentam elevados níveis de vulnerabilidade cercados por vizinhos igualmente vulneráveis, configurando microterritórios de risco climático acentuado que demandam atenção prioritária nas estratégias de adaptação e mitigação. Resultados

semelhantes foram encontrados por Brito et al. (2022) no Semiárido brasileiro, onde o uso de estatística espacial revelou “ilhas de alta vulnerabilidade” em meio a contextos regionais variados. Além disso, Silva et al. (2021) enfatizam que a identificação de clusters espaciais é essencial para o direcionamento eficiente de políticas públicas, evitando soluções generalistas que desconsideram desigualdades intrarregionais. Por outro lado, municípios classificados como Baixo-Alto, como Carmésia e Ipatinga, se destacam por apresentar baixa vulnerabilidade em meio a vizinhos altamente vulneráveis — um cenário que pode representar núcleos de resiliência local, conforme discutido por Oliveira e Santos (2020), com potencial para disseminação de práticas adaptativas eficazes. Já os municípios Alto-Baixo, como Betim e Felício dos Santos, evidenciam fragilidades pontuais dentro de contextos regionalmente mais estruturados, o que reforça a necessidade de abordagens multiescalares e territorialmente sensíveis. Em consonância com Nascimento et al. (2023), os resultados desta análise espacial reforçam a importância de um planejamento climático diferenciado, que articule dados geoespaciais com estratégias de intervenção local e regional, visando à promoção de uma resiliência climática mais equitativa e eficaz.

Enfim, os resultados evidenciam um quadro complexo e heterogêneo de vulnerabilidade climática entre os municípios da Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço, marcado por disparidades significativas nos indicadores de suscetibilidade, capacidade de enfrentamento e capacidade adaptativa. A média moderada do Índice de Vulnerabilidade (53,05), associada a uma dispersão relativamente baixa, sugere a coexistência de contextos territoriais com riscos e capacidades contrastantes. A análise espacial corrobora essa heterogeneidade, revelando tanto microterritórios de vulnerabilidade crítica (como os municípios classificados como Alto-Alto) quanto núcleos pontuais de resiliência (Baixo-Alto), além de casos isolados de fragilidade (Alto-Baixo). A fraca autocorrelação espacial global e a presença de agrupamentos locais reforçam a necessidade de políticas públicas multiescalares e territorialmente orientadas, que considerem as especificidades de cada município no planejamento das ações de adaptação climática. Esses achados contribuem para o avanço da literatura ao demonstrar, com base em evidências empíricas e análise geoespacial, que abordagens generalistas tendem a obscurecer desigualdades locais relevantes, comprometendo a eficácia das intervenções. Assim, recomenda-se o fortalecimento da governança local e a formulação de estratégias diferenciadas, baseadas em diagnósticos territoriais precisos, como forma de promover uma resiliência climática mais justa e efetiva nos territórios da Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço.

4. Considerações finais

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam a complexidade e a heterogeneidade da vulnerabilidade climática na Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço (RBSE), destacando as disparidades territoriais entre os municípios que a compõem. A análise dos indicadores de suscetibilidade, capacidade de enfrentamento e capacidade adaptativa demonstrou que, embora a média geral de vulnerabilidade climática (53,05) aponte para um nível intermediário de risco, há municípios com condições significativamente mais críticas, como Joanésia e Itambé do Mato Dentro, que demandam atenção prioritária nas estratégias de adaptação.

A ausência de uma autocorrelação espacial forte entre os municípios sugere que os níveis de vulnerabilidade não seguem um padrão geográfico homogêneo, reforçando a importância de abordagens territorializadas. A identificação de microterritórios com altos índices de vulnerabilidade (Alto-Alto), como Espinosa, Cândido Sales, Gouveia e Alvorada de Minas, indica áreas onde os riscos climáticos tendem a se agravar de forma concentrada, exigindo intervenções urgentes e coordenadas. Por outro lado, a presença de municípios classificados como Baixo-Alto e Alto-Baixo revela zonas de resiliência e fragilidade pontuais,

respectivamente, que devem ser considerados na formulação de políticas públicas multiescalares e sensíveis às dinâmicas locais.

A RBSE, ao reunir biodiversidade singular e comunidades tradicionais com forte conexão com os ecossistemas locais, constitui um território estratégico para o desenvolvimento de ações sustentáveis e inovadoras no enfrentamento das mudanças climáticas. No entanto, os dados aqui apresentados reforçam a necessidade de políticas públicas integradas que combinem conservação ambiental com inclusão social, fortalecimento institucional e melhoria das infraestruturas locais.

Conclui-se que o enfrentamento da vulnerabilidade climática na RBSE requer uma abordagem sistêmica e diferenciada, que considere os múltiplos fatores que influenciam a exposição, a sensibilidade e a capacidade de resposta das comunidades locais. O mapeamento espacial da vulnerabilidade climática contribui não apenas para a compreensão dos riscos socioambientais, mas também para a definição de prioridades territoriais e o fortalecimento da resiliência climática regional. Espera-se que os resultados deste estudo subsidiem a formulação de políticas públicas mais eficazes, capazes de promover justiça climática, conservação da biodiversidade e desenvolvimento sustentável nos territórios que compõem a Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço.

Referências

ALVES, F. L., SOUZA, E. B., & SANTOS, L. A. R. Análise da vulnerabilidade às mudanças climáticas no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Climatologia*, 26, 1–17. 2020

ANDRADE, D. C.; NASCIMENTO, E. M.; LIMA, L. H. O. Vulnerabilidade socioambiental e adaptação climática em áreas protegidas: o caso da Serra do Espinhaço, MG. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, v. 23, n. 2, p. 339–358, 2021.

BIRKMANN, JOERN et al. Understanding human vulnerability to climate change: A global perspective on index validation for adaptation planning. *Science of the Total Environment*, v. 803, p. 150065, 2022.

BRITO, M. M., CUNHA, A. P. M. A., & ZERI, M. Identificação de áreas prioritárias para adaptação climática no Semiárido brasileiro com uso de análise espacial. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(1), 33–51. 2022.

DRUMMOND, J. A. et al. (2009). *Mata Atlântica: Uma História do Paradoxo*. Editora FGV.

DOS SANTOS, E. A. et al. Climate change in Brazilian agriculture: vulnerability and adaptation assessment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 20, n. 10, p. 10713–10730, 2023.

GIULIETTI, A. M. et al. Espinhaço Range region, eastern Brazil. In: Mittermeier, R. et al. (Eds.) *Hotspots: Earth's Biologically Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions*. 2000

HOQUE, M.Z.; CUI, S.; XU, L.; ISLAM, I.; TANG, J.; DING, S. Assessing Agricultural Livelihood Vulnerability to Climate Change in Coastal Bangladesh. *Environmental Research and Public Health*, v.16(22), 2019. <https://doi.org/10.3390/ijerph16224552>

IPCC - 2022. Sixth Assessment Report – Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution. Cambridge University Press.

IPCC - 2023: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

KOTZ, M.; WENZ, L.; STECHEMESSER, A.; KALKUHL, M.; LEVERMANN, A. Day-to-day temperature variability reduces economic growth. *Nature Climate Change*, v.11, n.4, p.319–325, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00985-5>

LAPOLA, D. M., et al. Climate risk and adaptation in Brazil: an integrative assessment across sectors and regions. *Nature Climate Change*, 12(5), 401–410. 2022

MAHMOUD, H. Barriers to gauging built environment climate vulnerability. *Nature Climate Change*, v.10, p.482–485, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0742-z>

MARENGO, J. A., TORRES, R. R., & ALVES, L. M. Mudanças climáticas e extremos climáticos no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(3), 387–397. 2017.

MENDONÇA, F. A.; OLIVEIRA, M. A.; SOUSA, M. F. Análise da vulnerabilidade socioambiental no Cerrado mineiro: uma abordagem espaço-temporal. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 3, p. 1252–1271, 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA (2021). Áreas prioritárias para conservação da biodiversidade. Disponível em: <https://www.gov.br/mma> . Acesso em: abril de 2025.

MINISTÉRIO DO TURISMO – 2022. Conheça 23 Patrimônios da Humanidade que ficam no Brasil. Brasília, DF: Ministério do Turismo, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/turismo/pt-br/assuntos/noticias/patrimonios-da-humanidade-no-brasil-23-lugares-que-todo-mundo-deveria-conhecer>. Acesso em: 6 abr. 2025.

NASCIMENTO, S. S., FERREIRA, N. J., & ANDRADE, A. M. Indicadores de vulnerabilidade ambiental e climática em municípios do Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12(6), 2075–2090. 2019.

NASCIMENTO, L. M., CARDOSO, A. S., & LIMA, M. R. Mapeamento da vulnerabilidade climática no Brasil: uma abordagem multiescalar para políticas públicas. *Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 58, 85–108. 2023.

NOBRE, C. A., MARENGO, J. A., & SAMPAIO, G. Climate change risks in Brazil. *Brazilian Journal of Climate*, 1(1), 5–19. 2019.

OLIVEIRA, R. S., & SANTOS, A. F. Resiliência climática e gestão territorial: uma abordagem geoespacial. *Cadernos de Geografia*, 30(60), 192–210. 2020.

PBMC – PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (2022). Relatório Especial: Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas no Brasil.

REDE BRASILEIRA DE RESERVAS DA BIOSFERA - 2025. Página inicial. Disponível em: <https://reservasdabiosfera.org.br/>. Acesso em: 6 abr. 2025.

SILVA, J. R., RIBEIRO, H., & LAPOLA, D. M. Spatial analysis of climate vulnerability in Brazil: guiding adaptation at the municipal level. *Sustainability*, 13(12), 6815. 2021.

SILVEIRA, FERNANDO AO et al. Ecology and evolution of plant diversity in the endangered campo rupestre: a neglected conservation priority. *Plant and soil*, v. 403, p. 129-152, 2016.

TORRES, R. R.; FERREIRA, J. C.; BARROS, P. L. Políticas públicas de adaptação às mudanças climáticas no Brasil: desafios e oportunidades em escalas subnacionais. *Revista de Administração Pública*, v. 54, n. 4, p. 918–937, 2020.

UNESCO - 2005. Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço. Disponível em: <https://en.unesco.org/biosphere/lac/serra-do-espinhaco>

UNESCO - 2016. Biosphere Reserves: Learning Sites for Sustainable Development. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000245621> Acesso em: 6 abr. 2025

UNESCO - 2023. UNESCO designates 11 new biosphere reserves. Paris: UNESCO, 2023. Disponível em: <https://www.unesco.org/en/articles/unesco-designates-11-new-biosphere-reserves-1?hub=66369>. Acesso em: 6 abr. 2025.

WELLE, TORSTEN; BIRKMANN, JOERN. The world risk index—an approach to assess risk and vulnerability on a global scale. *Journal of Extreme Events*, v. 2, n. 01, p. 1550003, 2015.