



GEODIVERSIDADE E BIODIVERSIDADE AQUÁTICA NO CERRADO: RELAÇÕES E IMPACTOS DE DISTÚRBIOS ANTRÓPICOS

Diego Rodrigues Macedo ¹

Marden Seabra Linares ²

Marcos Callisto ³

Hiolanda Alves Lourenço ⁴

RESUMO

Este estudo investigou a relação entre geodiversidade e biodiversidade aquática em riachos de cinco unidades hidrológicas no bioma Cerrado, com diferentes níveis de distúrbio antrópico. A geodiversidade foi quantificada por meio de dados geoespaciais de relevo, solos, geologia e hidrogeologia. A biodiversidade foi estimada a partir das assembleias de macroinvertebrados bentônicos coletados entre 2010 e 2016, e analisada com base em índices de biodiversidade (riqueza, entropia de Shannon e diversidade de Simpson). Os riachos foram classificados como referência, impactados ou degradados, conforme o Índice de Distúrbio Integrado (IDI). Os resultados demonstraram que a relação positiva entre geodiversidade e biodiversidade é evidente apenas em ambientes com baixa interferência antrópica. Em locais impactados e, especialmente, degradados, essa relação se rompe, indicando que a presença de distúrbios atua como filtro ambiental, reduzindo a influência da heterogeneidade abiótica sobre as comunidades biológicas. Os achados destacam a importância da geodiversidade para a conservação da biodiversidade aquática, mas também mostram que sua eficácia depende do contexto ambiental. Estratégias de gestão devem, portanto, considerar tanto a proteção da geodiversidade quanto a mitigação dos impactos humanos.

Palavras-chave: Geodiversidade, Macroinvertebrados bentônicos, Cerrado, Distúrbio antrópico, Biodiversidade aquática.

RESUMEN

Este estudio investigó la relación entre la geodiversidad y la biodiversidad acuática en arroyos de cinco unidades hidrológicas del bioma Cerrado, bajo distintos niveles de disturbio antrópico. La geodiversidad fue cuantificada mediante datos geoespaciales de relieve, suelos, geología e hidrogeología. La biodiversidad fue estimada a partir de las comunidades de macroinvertebrados bentónicos recolectados entre 2010 y 2016, y analizada con base en índices de biodiversidad (riqueza, entropía de Shannon y diversidad de Simpson). Los arroyos fueron clasificados como de referencia, impactados o degradados, según el Índice de Disturbio Integrado (IDI). Los resultados mostraron que la relación positiva entre geodiversidad y biodiversidad es evidente únicamente en ambientes con baja interferencia antrópica. En sitios impactados y especialmente en degradados, esta relación se rompe, lo que indica que la presencia de disturbios actúa como un filtro ambiental, reduciendo la influencia de la heterogeneidad abiótica sobre las comunidades biológicas. Los hallazgos destacan la importancia de la geodiversidad para la

¹ Professor do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, diegorm@ufmg.br;

² Residente Pós-doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, mslx@hotmail.com;

³ Professor do Departamento de Genética, Ecologia e Evolução da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, mcallisto13@gmail.com;

⁴ Graduanda pelo Curso de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, hiolandalvesl@gmail.com.



conservación de la biodiversidad acuática, pero también demuestran que su eficacia depende del contexto ambiental. Por lo tanto, las estrategias de gestión deben considerar tanto la protección de la geodiversidad como la mitigación de los impactos humanos.

Palabras clave: Geodiversidad, Macroinvertebrados bentónicos, Cerrado, Disturbio antrópico, Biodiversidad acuática.

ABSTRACT

This study investigated the relationship between geodiversity and aquatic biodiversity in streams across five hydrological units within the Cerrado biome, under varying levels of anthropogenic disturbance. Geodiversity was quantified using geospatial data on relief, soils, geology, and hydrogeology. Biodiversity was estimated based on benthic macroinvertebrate assemblages collected between 2010 and 2016 and analyzed using biodiversity indices (richness, Shannon entropy, and Simpson diversity). Streams were classified as reference, impacted, or degraded according to the Integrated Disturbance Index (IDI). The results showed that the positive relationship between geodiversity and biodiversity is evident only in environments with low anthropogenic interference. In impacted and especially in degraded areas, this relationship breaks down, indicating that the presence of disturbances acts as an environmental filter, reducing the influence of abiotic heterogeneity on biological communities. The findings highlight the importance of geodiversity for the conservation of aquatic biodiversity, but also show that its effectiveness depends on the surrounding environmental context. Management strategies should, therefore, consider both the protection of geodiversity and the mitigation of human impacts.

Keywords: Geodiversity, Benthic macroinvertebrates, Cerrado, Anthropogenic disturbance, Aquatic biodiversity.

INTRODUÇÃO

O conceito de geodiversidade é a variedade natural de características geológicas, geomorfológicas e pedológicas e, desde sua primeira menção em 1993 durante a Conferência de Malvern sobre Conservação Geológica e Paisagística, tem atraído atenção (Pereira et al., 2013). Embora as investigações iniciais tenham ocorrido de forma fragmentada, com enfoque restrito à geologia e sem considerar uma abordagem integrada dos componentes abióticos (Cañadas; Flaño, 2007), os avanços recentes possibilitaram a construção de uma perspectiva mais abrangente e multidisciplinar. Nesse sentido, Gray (2004) propôs um conceito ampliado de geodiversidade, ilustrado pela hipótese de um planeta formado exclusivamente por quartzo, onde a ausência de diversidade mineral inviabilizaria não apenas a oferta de recursos, mas também a própria existência humana. Essa concepção evidencia a função estrutural da geodiversidade na manutenção dos serviços ecossistêmicos e da qualidade de vida.

Apesar dos avanços conceituais e das evidências sobre a importância da geodiversidade, sua quantificação permanece um desafio, sobretudo pela ausência de métodos padronizados e pela predominância de critérios geológicos e geomorfológicos (Cañadas; Flaño, 2007). Estudos mais recentes ampliam esse escopo, incluindo elementos hidrológicos, pedológicos,



topográficos, minerais e paleontológicos, quando disponíveis (Rong et al., 2022). Todavia, persistem divergências quanto à definição dos elementos a serem considerados e às formas de mensuração. Atualmente, tem-se aplicado o conceito de “georriqueza”, inspirado na riqueza de espécies da biodiversidade, como critério para qualificar a diversidade abiótica (Bétard; Peulvast, 2019).

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo quantificar a geodiversidade em cinco unidades hidrológicas de empreendimentos hidrelétricos no Cerrado e avaliar a relação entre geodiversidade e biodiversidade aquática, bem como essa relação é afetada por distúrbios antrópicos, avaliados através de bioindicadores bentônicos.

METODOLOGIA

Área de Estudo

O estudo foi conduzido em cinco unidades hidrológicas (*sensu* Omernik et al., 2017) em uma área total de 45.000 km²: (i) Nova Ponte; (ii) Volta Grande; (iii) São Simão; (iv) Três Marias; e (v) rio Pandeiros (Figura 1). As unidades hidrológicas de Três Marias (bacia do rio São Francisco), Volta Grande e São Simão (bacia do rio Paraná) foram definidas como áreas potenciais de amostragem dentro de um buffer de 35 km a partir dos limites de cada reservatório. As bacias dos rios Pandeiros e Nova Ponte foram consideradas integralmente para fins de amostragem.

Na área de estudo foram determinados 221 pontos de coleta em riachos de 1^a a 4^a ordem: Três Marias (40 pontos), Volta Grande (40 pontos), São Simão (39 pontos), Nova Ponte (62 pontos) e Pandeiros (40 pontos). Para cada ponto de coleta, foi determinada a sua respectiva sub-bacia hidrográfica, e estas são as unidades de análise neste estudo.

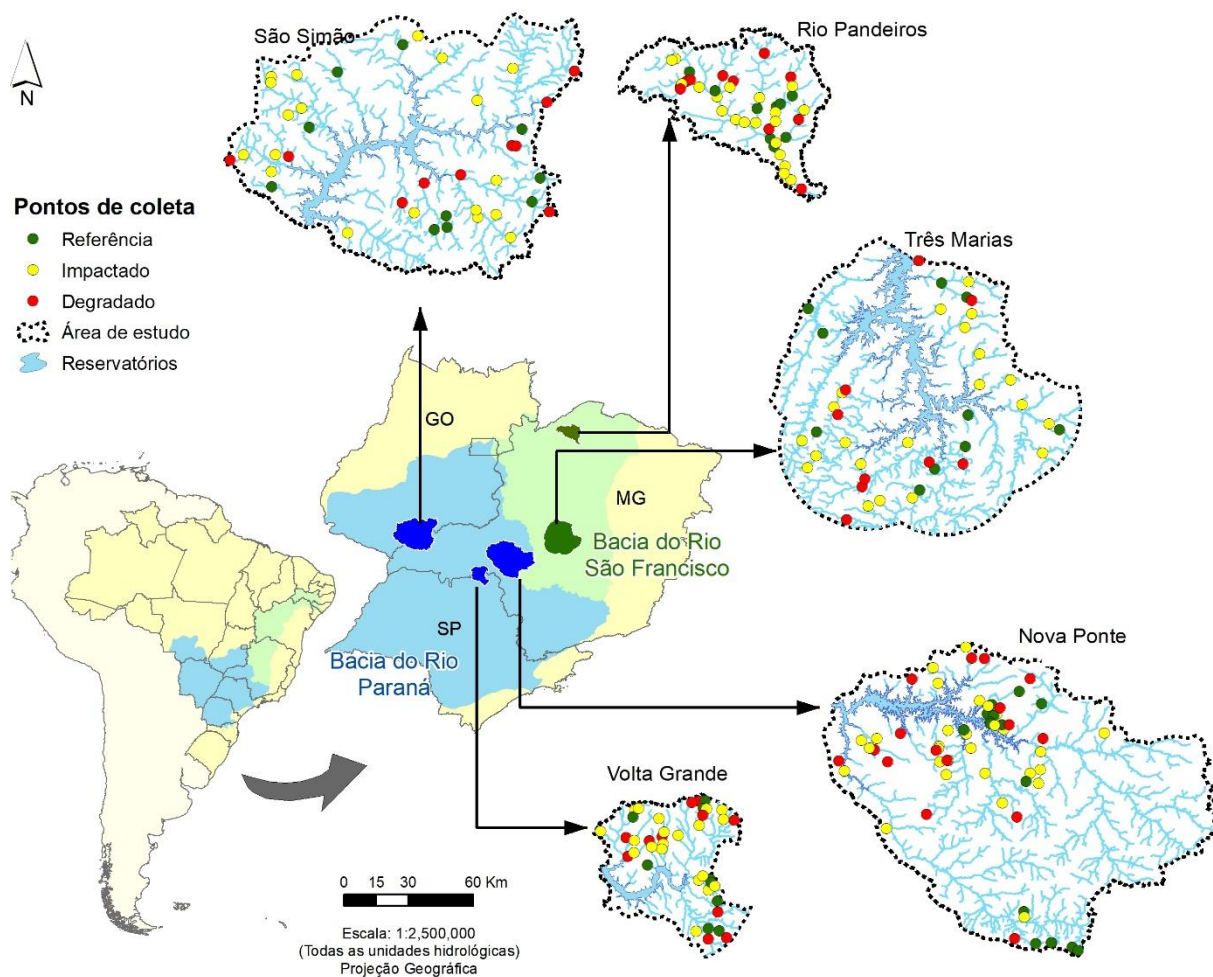


Figura 1. Localização da área de estudos.

Levantamento da Geodiversidade

A geodiversidade foi mensurada a partir das camadas geoespaciais de relevo, solos, geologia e hidrogeologia, conforme a metodologia proposta por Tukiainen et al. (2023). As informações de relevo foram extraídas do mapa de relevo do IBGE, escala 1:250.000 (IBGE, 2023). As informações de solos foram obtidas no mapa do estado de Minas Gerais, escala 1:650.000 (UFV, 2006).

As informações geológicas foram retiradas do mapa de síntese geológica (Ferreira et al., 2017), no qual os litotipos foram simplificados a partir do mapa geológico de Minas Gerais, escala 1:1.000.000 (CPRM, 2008), segundo a resposta similar das rochas aos processos de superfície, como erosão, intemperismo e lixiviação (p. ex.: rochas pelíticas, vulcânicas, carbonáticas, etc.).



As informações hidrogeológicas foram extraídas do mapa hidrogeológico do Brasil, escala 1:1.000.000 (CPRM, 2004). Utilizando o processo de álgebra de mapas, as quatro camadas foram sobrepostas, resultando em uma camada com a combinação dos tipos de geodiversidade. A geodiversidade foi calculada para cada sub-bacia, através do cálculo do Índice de Shannon, utilizando o plugin LecoS (*Landscape Ecology Statistics*) para QGIS. O Índice de Shannon, nesse contexto, mede a diversidade das combinações das classes de relevo, solo, síntese geológica e hidrogeologia nas sub-bacias estudadas.

Levantamento de Biodiversidade

As coletas de sedimento para avaliação da biodiversidade de macroinvertebrados bentônicos foram realizadas entre 2010 e 2016. Cada ponto foi amostrado na estação seca (maio a setembro), utilizando amostras múltiplas com “*kicking net*” (30 cm de abertura, 500 µm de malha). Em laboratório, as amostras foram lavadas, os organismos triados em bandeja e identificados em microscópio estereoscópico, com aumento de 32x.

A identificação foi realizada ao nível de família, exceto para Annelida, Mollusca e Arachnida, com o auxílio de chaves de identificação. Os organismos foram depositados na Coleção de Referência de Macroinvertebrados Bentônicos do ICB-UFMG.

A biodiversidade das assembleias foi estimada utilizando os números de Hill: Riqueza (Hill 0), Índice de Entropia de Shannon (Hill 1) e Índice Inverso de Simpson (Hill 2).

Análise de Dados

Para determinar a relação entre biodiversidade e geodiversidade, inicialmente os riachos foram caracterizados em níveis de conservação, utilizando o Índice de Distúrbio Integrado (IDI; Ligeiro et al., 2013), pois essa relação pode variar de acordo com o grau de distúrbio antrópico (Agra, 2021).

Os riachos com valores de IDI no quartil mais alto foram classificados como degradados; os riachos com valores no quartil mais baixo, como em condições de referência; e os demais, como alterados. Utilizaram-se modelos lineares generalizados (GLM) com análises de *deviance* (teste F) para avaliar se os índices de biodiversidade e geodiversidade apresentavam correlação significativa em cada categoria de distúrbio antrópico.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados evidenciam a importância da heterogeneidade ambiental para a manutenção da biodiversidade (Tabela 1) e o quanto essa relação é afetada pela presença de distúrbios antrópicos (Agra et al., 2021). Neste sentido, nota-se que nos sites de referência é observada uma correlação

Tabela 1. Correlação entre índices de diversidade biológica e geodiversidade nas diferentes categorias de distúrbio. Valores em negrito indicam correlações significativas.

Classificação	Riqueza	Entropia de Shannon	Simpson Inverso
Referência	0.36	0.23	0.31
Impactado	0.23	0.14	0.07
Degradado	-0.04	-0.02	0.01

A análise demonstrou que a riqueza taxonômica de macroinvertebrados bentônicos aumenta em ambientes com maior geodiversidade, mas essa tendência só é observada de forma consistente em áreas classificadas como de referência. Nessas áreas, a heterogeneidade ambiental parece favorecer a presença de um número maior de famílias, enquanto, em locais impactados, essa associação é enfraquecida, e em ambientes degradados, praticamente não se observa correlação. Esses resultados indicam que a geodiversidade contribui para a manutenção da biodiversidade, mas sua influência é limitada pela presença de distúrbios antrópicos (Figura 2).

Da mesma forma, foi identificada uma associação positiva entre a geodiversidade e o índice de Entropia de Shannon em locais com baixa interferência antrópica. Esse índice, que considera tanto a riqueza quanto a equitatividade na distribuição dos organismos, revelou padrões semelhantes aos observados para a riqueza taxonômica. No entanto, essa relação torna-se mais tênue em áreas impactadas e inexistente em ambientes degradados, o que reforça a ideia de que os distúrbios comprometem o papel estruturante da geodiversidade sobre as comunidades biológicas (Figura 3).

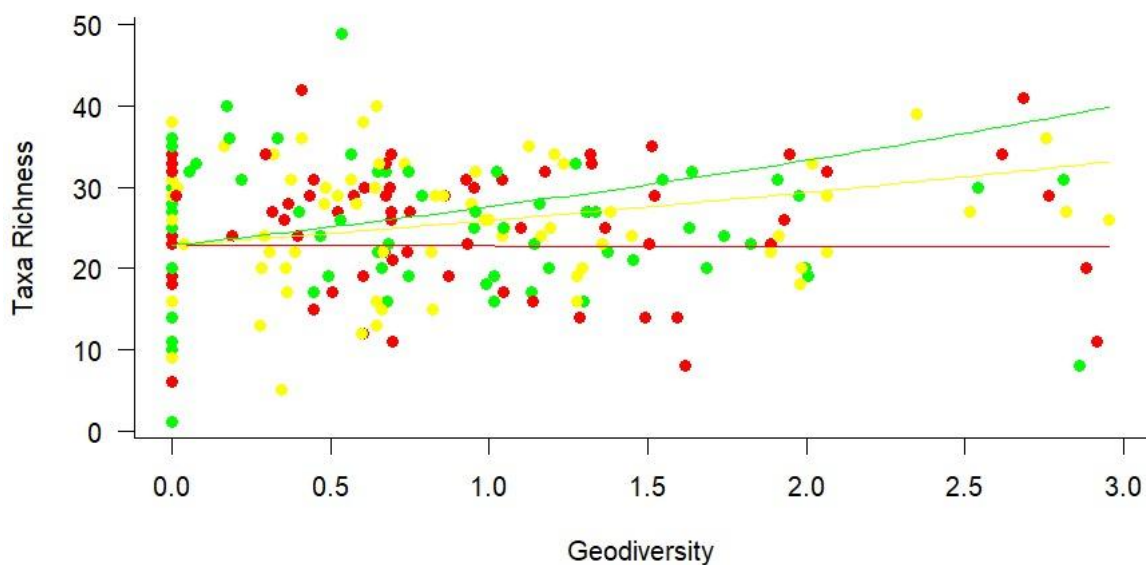


Figura 2. Relações entre Riqueza Taxonômica (*Taxa Richness*) e Geodiversidade (*Geodiversity*), considerando as condições de sites de referência (verde), impactados (amarelo) e degradados (vermelho).

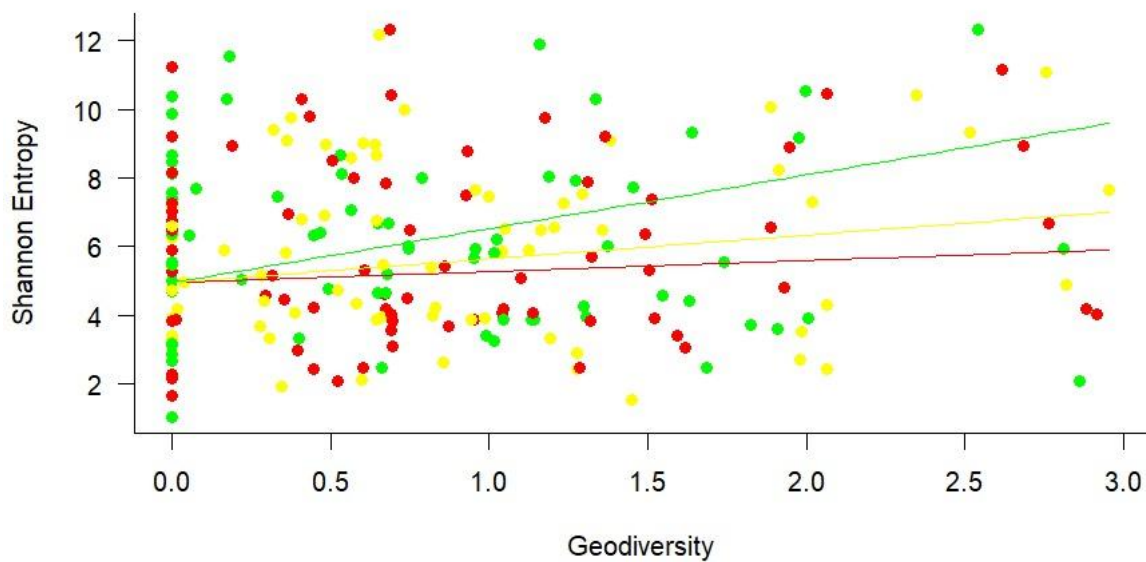


Figura 3. Relações entre o índice de Entropia de Shannon (*Shannon Entropy*) e Geodiversidade (*Geodiversity*), considerando as condições de sites de referência (verde), impactados (amarelo) e degradados (vermelho).

Por fim, verificou-se que a diversidade de Simpson, que atribui maior peso às famílias dominantes, também responde positivamente à geodiversidade, mas apenas em ambientes de referência. A ausência de correlação em locais impactados e degradados sugere que, em tais condições, apenas um número restrito de táxons resistentes consegue se estabelecer, resultando em comunidades biologicamente empobrecidas e desequilibradas (Figura 4).

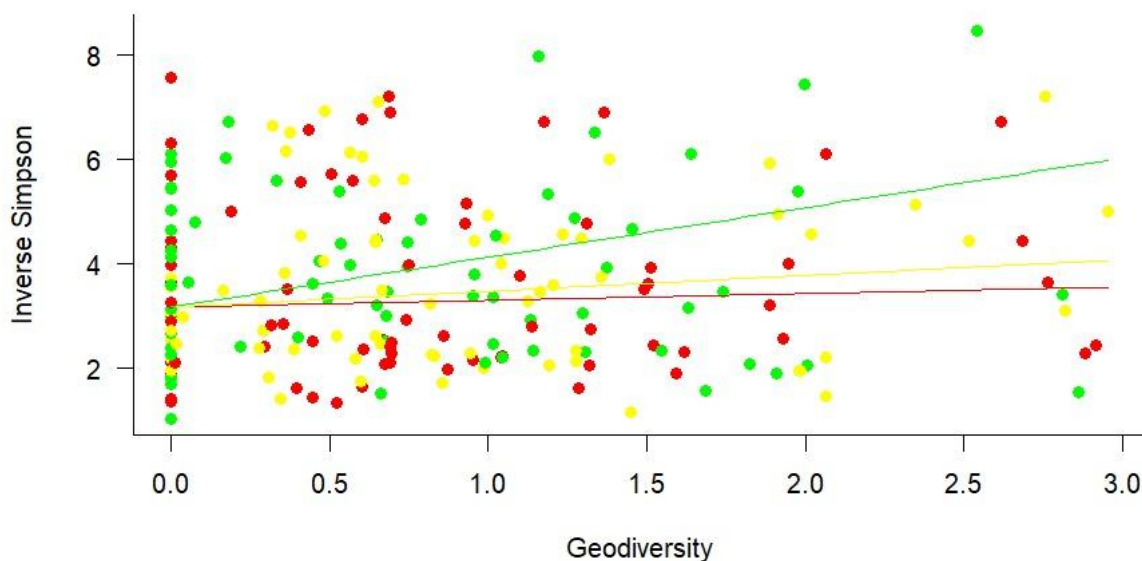


Figura 4. Relações entre o índice de Diversidade de Simpson (*Inverse Simpson*) e Geodiversidade (*Geodiversity*), considerando as condições de sites de referência (verde), impactados (amarelo) e degradados (vermelho).

As assembleias de macroinvertebrados são compostas majoritariamente por organismos que apresentam fases de vida terrestre, sendo, portanto, especialmente sensíveis às condições ambientais nos ecossistemas terrestres localizados nas áreas de drenagem dos ecossistemas lóticos onde habitam, incluindo a heterogeneidade ambiental medida pela geodiversidade (Firmiano et al., 2020).

A presença de distúrbios antrópicos rompe a relação entre heterogeneidade ambiental e biodiversidade, pois funciona como um filtro ambiental que seleciona apenas as espécies capazes de resistir aos efeitos desses distúrbios (Castro et al., 2018). Como, na maioria das vezes, esses organismos resistentes são generalistas, adaptados a uma ampla gama de condições ambientais, não respondem significativamente às variações na heterogeneidade ambiental, tanto em escalas locais quanto regionais (Linares et al., 2025).

Esses resultados reforçam o papel da geodiversidade como um fator-chave para a estruturação das comunidades aquáticas, especialmente em áreas bem conservadas. No entanto,



evidenciam também que a atuação dos distúrbios antrópicos – como alteração do uso do solo, supressão de vegetação ripária, lançamento de efluentes e alteração hidrológica – compromete essa relação positiva (Agra et al., 2021). Assim, mesmo áreas com alta geodiversidade podem apresentar baixa biodiversidade biológica se os impactos humanos não forem mitigados. Tais evidências apontam para a necessidade de integrar a conservação da geodiversidade às políticas de gestão ambiental e restauração ecológica, uma vez que sua eficácia para a conservação da biodiversidade depende diretamente do contexto antrópico em que se insere (Tukiainen et al., 2023).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados evidenciam que a geodiversidade das sub-bacias tem um papel relevante na manutenção da biodiversidade em ecossistemas lóticos, uma vez que representa a heterogeneidade ambiental em escala regional. No entanto, essa relação é afetada pela presença de distúrbios antrópicos, que atuam como filtros ambientais para os organismos aquáticos, limitando sua riqueza e distribuição. Futuros estudos devem investigar quais aspectos da geodiversidade são mais importantes para a manutenção da biodiversidade, como forma de priorizar esforços de conservação.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho recebe financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (Código 001). DRM e MC são bolsistas de Produtividade CNPq (PQ-311002/2023-4 e PQ-304060/2020-8, respectivamente). MSL é bolsista de pós-doutorado do Programa de Apoio à Fixação de Jovens Doutores no Brasil/FAPEMIG (BPD-00021-22). HAL é bolsista PIBIC-CNPq. Colegas do Laboratório de Ecologia de Bentos da UFMG auxiliaram nas coletas de campo e nos trabalhos de laboratório.

REFERÊNCIAS

AGRA, M. P. Relação entre biodiversidade de macroinvertebrados bentônicos e geodiversidade em riachos do Cerrado sob diferentes níveis de distúrbio antrópico. 2021.



BÉTARD, F.; PEULVAST, J-P. Geodiversity hotspots: concept, method and cartographic application for geoconservation purposes at a regional scale. **Environmental Management**, v. 63, p. 822–834, 2019.

CAÑADAS, E. S.; FLAÑO, P. R. Geodiversidad: concepto, evaluación y aplicación territorial. El caso de Tiermes Caracena (Soria). **Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles**, n. 45, 2007.

CASTRO, D.M.P. et al. Land cover disturbance homogenizes aquatic insect functional structure in neotropical savanna streams. **Ecological Indicators**, 2018.

CPRM. **Carta geológica do Brasil ao Milionésimo**. Escala 1:1.000.000. Brasília: CPRM, 2008.

CPRM. **Mapa de Unidades Hidrogeológicas do Brasil**. Escala 1:1.000.000. Brasília: CPRM, 2004.

DIAS, M. C. S. S. et al. Geodiversity Index Map of Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil: Cartography and Quantitative Assessment. **Geoheritage**, v. 1, 2021.

FERREIRA, H. L. M. et al. **Ambientes Aquáticos em Minas Gerais**. Felipe Melo, Ed. - Prodemge, 2017.

GRAY, M. **Geodiversity**: valuing and conserving abiotic nature. England: John Wiley & Sons, 2004. 434 p.

GRAY, M. Geodiversity and Geoconservation: What, Why, and How? **The Geological Society**, London, Special Publications, v. 300, n. 1, p. 247–258, 2008.

IBGE. **Mapa de Unidades de Relevo do Brasil**. Escala 1:250.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

LINARES, M.S. et al. Biodiversity spatial distribution of benthic macroinvertebrate assemblages is influenced by anthropogenic disturbances at multiple spatial extents. **Science of the Total Environment**, v. 960, p.178365, 2025.

PEREIRA, D. I. et al. Geodiversity assessment of Paraná State (Brazil): an innovative approach. **Environmental Management**, v. 52, n. 3, p. 541–552, 2013.

RONG, T. et al. Quantitative Assessment of Spatial Pattern of Geodiversity in the Tibetan Plateau. *Sustainability*, v. 15, 2023. TUKIAINEN, H. et al. Quantifying alpha, beta and gamma geodiversity. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 47, p. 140-151, 2023.

UFV. **Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais**. Escala 1:650.000. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2006.