



Revista Brasileira de **ESPELEOLOGIA**

Edição Especial, V.01 - Nº 15 de 2026
ISSN 2179.4952

EDIÇÃO ESPECIAL

3º Premio
Nacional
de Espeleologia



Michel
Le Bret



Equipe editorial

Claudia Simone da Luz Alves, Jocy Brandão Cruz,
Diego de Medeiros Bento, Julio César Rocha Costa.





Revista Brasileira de
ESPELEOLOGIA

Brasília-DF
2026



Expediente edição especial

Publicada pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – ICMBio/Cecav www.icmbio.gov.br/cecav

Endereço: Parque Nacional de Brasília. Rodovia BR 450, km 8,5 via Epia. Brasília/DF, Brasil. CEP: 70635-800

Telefone: +55 (61) 2028-9792.

Editores

Claudia Simone da Luz Alves

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Brasília, Distrito Federal, Brasil

Jocy Brandão Cruz

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Brasília, Distrito Federal, Brasil

Conselho editorial

Claudia Simone da Luz Alves, ICMBio/CECAV

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Brasília, Distrito Federal, Brasil

Diego de Medeiros Bento, ICMBio/CECAV

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil

Julio César Rocha Costa, ICMBio/CECAV

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil

Coordenação editorial

Javiera de la Fuente C.

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Sustentabilidade - IABS.

Projeto gráfico

Bruno Silva Bastos

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Sustentabilidade - IABS.

Diagramação

Javiera de la Fuente C.

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Sustentabilidade - IABS.

Foto da capa

Lapa do Córrego Santa Rita, APA Nascentes do Rio Vermelho, Buritinópolis, Goiás, Brasil / **Cristiano Ferreira**

Comissão Científica da edição especial

Me. Darcy Jose dos Santos

Analista ambiental do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil

Dr. Enrico Bernard

Professor Associado da Universidade Federal de Pernambuco, Presidente da Sociedade Brasileira para o Estudo de Quirópteros (SBEQ), Recife, Pernambuco, Brasil

Dr. Marcos Antonio Leite do Nascimento

Professor Associado III do Departamento de Geologia da UFRN, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil

Catálogo na Fonte

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

Revista Brasileira de Espeleologia. Edição Especial – 3º Prêmio Nacional de Espeleologia Michel Le Bret / Claudia Simone da Luz Alves e Jocy Brandão Cruz (ed.) – Brasília: ICMBio, 2026.

ISSN 2179.4952 - Online

247 p. ; Il. Color.

1. Espeleologia. 2. Estudos Ambientais. 3. Geomorfologia cárstica. 4. Biologia subterrânea. I. Claudia Simone da Luz Alves II. Jocy Brandão Cruz. III. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio. VI. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – ICMBio/Cecav. V. Título.

CDU: 551.44

A reprodução total ou parcial desta obra é permitida, desde que citada a fonte.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE

Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas

Rodovia BR 450, km 8,5 via Epia – Parque Nacional de Brasília

CEP: 70635-800 - Brasília/DF - Tel: 61 2028-9792

<http://www.icmbio.gov.br/CECAV>

Sumário

6

SOBRE A REVISTA

7

EDITORIAL

8

UM TESOURO ALÉM DO MINÉRIO DE FERRO: RIQUEZA DE FUNGOS EM CAVERNAS E CAVIDADES FERRUGINOSAS NATURAIS NA SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL DE MINAS GERAIS

A TREASURE BEYOND IRON ORE: FUNGAL RICHNESS IN NATURAL FERRUGINOUS CAVES IN THE SOUTHERN ESPINHAÇO MOUNTAIN RANGE, MINAS GERAIS

Ana Flávia Leão; Thiago Oliveira Condé; Fábio Alex Custódio; Soraya de Carvalho Neves; Lucio Mauro Soares Fraga; Olinto Liparini Pereira

39

DAS CAVERNAS À ESCOLA: IMPLEMENTAÇÃO COMPLETA DE UMA PROPOSTA EDUCACIONAL INTERDISCIPLINAR BASEADA NO LUGAR PARA GEOCONSERVAÇÃO E DIVULGAÇÃO ESPELEOLÓGICA

FROM CAVES TO SCHOOL: FULL IMPLEMENTATION OF A PLACE-BASED INTERDISCIPLINARY EDUCATIONAL PROPOSAL FOR GEOCONSERVATION AND SPELEOLOGICAL DISSEMINATION

Daniel De Stefano Menin

70

**PRIORIZAÇÃO ESPACIAL PARA CONSERVAÇÃO DAS ÁREAS
CÁRSTICAS BRASILEIRAS**

SPATIAL PRIORITIZATION FOR THE CONSERVATION OF BRAZILIAN KARST AREAS

Geovana Oliveira da Silva; Rodrigo Antônio Castro Souza; Afonso Kempner; Thairik Mateus Silva Marques; Neucir Szinwelski; Thadeu Sobral-Souza

98

**INCREMENTO DA TUTELA AO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO:
COMPENSAÇÕES POR IMPACTOS ÀS CAVERNAS DE BAIXA
RELEVÂNCIA EM MINASGERAIS**

*INCREASED PROTECTION OF SPELEOLOGICAL HERITAGE: COMPENSATION FOR IMPACTS
ON LOW-RELEVANCE CAVES IN MINAS GERAIS*

Giselle Ribeiro de Oliveira; Clarice Gomes Marotta

130

**QUALIFICAÇÃO ACADÊMICA E PESQUISA CIENTÍFICA EM
ESPELEOLOGIA E TEMAS AFINS: O PAPEL DA UNIVERSIDADE
PARA A EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO SOBRE CAVERNAS E
PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO NO BRASIL (1944-2024)**

*ACADEMIC QUALIFICATION AND SCIENTIFIC RESEARCH IN SPELEOLOGY AND RELATED
TOPICS: THE UNIVERSITY ROLE IN THE EVOLUTION OF KNOWLEDGE ABOUT CAVES AND
SPELEOLOGICAL HERITAGE IN BRAZIL (1944-2024)*

**Luiz Afonso Vaz de Figueiredo; Lucas George Wendt; Arnaldo Antonio da Silva-Junior;
Robson de Almeida Zampaulo**

191

**DIVERSIDADE DE MORCEGOS EM CAVERNAS DE SÃO FÉLIX DO
XINGU, PARÁ: ANÁLISE ESPACIAL E DINÂMICA SAZONAL**

*BAT DIVERSITY IN CAVES IN SÃO FÉLIX DO XINGU, PARÁ: SPATIAL ANALYSIS AND
SEASONAL DYNAMICS*

**Sebastião Maximiano Corrêa Genelhú; Matheus Henrique Simões; Miguel Angelo Cançado Assis;
Mariane Soares Ribeiro; Xavier Prous; William Douglas Carvalho**



APA Morro da Pedreira, Serra do Cipó, Minas Gerais, Brasil
Foto: Maurício Andrade



Sobre a revista

A Revista Brasileira de Espeleologia – RBEsp, ISSN 2179.495, abrange a geologia cárstica, hidrologia, geomorfologia, espeleologia, hidrogeologia, bioespeleologia e a história da ciência espeleológica. A revista, de fluxo contínuo, está disponível em acesso aberto no site do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – ICMBio/Cecav.

Normas editoriais

Acesse: <https://revistaelectronica.icmbio.gov.br/index.php/rebe>

É com grande entusiasmo que apresentamos esta Edição Especial da *Revista Brasileira de Espeleologia*, publicada pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (ICMBio/Cecav) desde 2010. A revista integra as ações previstas no Componente 5 do Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico, direcionado à divulgação e à disseminação do conhecimento científico sobre o patrimônio espeleológico brasileiro e as espécies a ele associadas. Esse esforço visa contribuir, de forma sistemática, para o aprofundamento do conhecimento sobre um dos ecossistemas mais relevantes e pouco conhecidos do país.

Nesta edição, celebramos a excelência científica ao reunir os artigos vencedores do **3º Prêmio Nacional de Espeleologia Michel Le Bret**, contemplando as categorias Ampla Concorrência e Pós-Graduação. A premiação homenageia Michel le Bret, pesquisador cuja atuação visionária foi fundamental para o avanço das técnicas de exploração e mapeamento de cavernas no Brasil. Seu legado inspira novas gerações de estudiosos a desbravar, registrar e proteger os ambientes subterrâneos no Brasil.

Fruto de uma parceria entre o ICMBio/Cecav e a Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE), o prêmio reafirma o compromisso de estimular pesquisas inovadoras sobre cavernas brasileiras, promover a elaboração de inventários qualificados e incentivar o desenvolvimento de soluções técnicas que fortaleçam a conservação dos ambientes cavernícolas. Ao fomentar a pesquisa e o desenvolvimento de soluções técnicas, a iniciativa também contribui para a ampliação do conhecimento aplicado à gestão do patrimônio espeleológico nas unidades de conservação federais administradas pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade.

Convidamos você, leitor, a explorar esta edição especial com curiosidade e entusiasmo espeleológico. Os trabalhos aqui apresentados refletem não apenas o rigor científico, mas também revelam o compromisso dos pesquisadores que se dedicam a compreender e conservar os ambientes subterrâneos em diferentes regiões do país. Que esses trabalhos inspirem novas descobertas e ações em prol das cavernas brasileiras.

Desejamos uma excelente leitura e uma jornada enriquecedora pelo mundo da espeleologia!

Editores-Chefes

Claudia Simone da Luz Alves
Jocy Brandão Cruz

Conselho Editorial

Claudia Simone da Luz Alves
Diego de Medeiros Bento
Julio César Rocha Costa

**UM TESOURO ALÉM DO MINÉRIO DE FERRO:
RIQUEZA DE FUNGOS EM CAVERNAS E
CAVIDADES FERRUGINOSAS NATURAIS NA
SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL DE
MINAS GERAIS**

*A TREASURE BEYOND IRON ORE: FUNGAL RICHNESS
IN NATURAL FERRUGINOUS CAVES IN THE
SOUTHERN ESPINHAÇO MOUNTAIN RANGE,
MINAS GERAIS*

Ana Flávia Leão

Universidade Federal de Viçosa,
Microbiology Department
E-mail: ana.f.leao@ufv.br

Thiago Oliveira Condé

Universidade Federal de Viçosa,
Microbiology Department
E-mail: olliveira.thiago@gmail.com

Fábio Alex Custódio

Universidade Federal de Viçosa,
Department of Plant Pathology
E-mail: fabio.custodio@ufv.br

Soraya de Carvalho Neves

Universidade Federal dos Vales Jequitinhonha e Mucuri,
Institute of Science and Technology
E-mail: soraneves@ict.ufvjm.edu.br

Lucio Mauro Soares Fraga

Universidade Federal dos Vales Jequitinhonha e Mucuri,
Institute of Science and Technology
E-mail: luciofraga@ict.ufvjm.edu.br

Olinto Liparini Pereira

Universidade Federal de Viçosa,
Department of Plant Pathology
E-mail: oliparini@ufv.br

RESUMO

As cavernas, por serem ambientes únicos e com características singulares, abrigam uma elevada diversidade de fungos, incluindo espécies ainda desconhecidas, com potencial para uso biotecnológico. Nos últimos anos, os estudos sobre fungos cavernícolas evidenciaram esses ambientes como uma nova fronteira para a expansão do conhecimento no campo da micologia. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi investigar fungos filamentosos cultiváveis presentes em caverna/cavidades ferruginosas e em uma caverna quartzítica ferruginosa na região entre os municípios de Serro e Conceição do Mato Dentro, na Serra do Espinhaço Meridional, em Minas Gerais. Foram coletadas amostras de esporos presentes no ar, fezes, raízes, rocha, serrapilheira e sedimento/solo para o isolamento de fungos cavernícolas. As coletas foram realizadas em cinco caverna/cavidades ferruginosas presentes na Serra da Ferrugem e na caverna quartzítica ferruginosa Curral de Pedras, ambas em Conceição do Mato Dentro, além de uma coleta em uma cavidade ferruginosa na cidade Alvorada de Minas, distrito de Itapanhoacanga. No total, foram obtidos 887 isolados de fungos provenientes das cavidades ferruginosas amostradas, sendo 274 isolados do solo, 258 do ar, 128 da serrapilheira, 106 de fezes, 70 de rochas e 51 de raízes. Para a identificação dos isolados, foi realizada a extração do DNA genômico total, seguida da amplificação e sequenciamento da região ITS (*Internal Transcribed Spacer*). Os isolados foram identificados ao nível taxonômico de gênero por meio da comparação das sequências de ITS obtidas com a ferramenta *megablast*, utilizando o banco de dados público do GenBank. Foram encontrados quatro filos (*Ascomycota*, *Mucoromycota*, *Basidiomycota* e *Zoopagomycota*), 13 classes, 36 ordens, 70 famí-

ABSTRACT

Caves, being unique environments with singular characteristics, harbor a high diversity of fungi, including species that are still unknown, with potential for biotechnological use. In recent years, studies on cave fungi have highlighted these environments as a new frontier for the expansion of knowledge in the field of mycology. In this context, the objective of this study was to investigate cultivable filamentous fungi present in ferruginous caves and in a ferruginous quartzite cave in the region between the municipalities of Serro and Conceição do Mato Dentro, in the Serra do Espinhaço Meridional, in Minas Gerais. Samples of particles present in the air, animal dung, roots, rock, litter, and sediment/soil were collected for the isolation of cave fungi. The collections were carried out in five ferruginous caves in the Serra da Ferrugem and in the ferruginous quartzite cave Curral de Pedras, both in Conceição do Mato Dentro, in addition to a collection in a ferruginous cave in the city of Alvorada de Minas, district of Itapanhoacanga. In total, 887 fungal isolates were obtained from the sampled ferruginous caves, with 274 isolates from soil, 258 from air, 128 from litter, 106 from animal dung, 70 from rocks, and 51 from roots. To identify the isolates, total genomic DNA was extracted, followed by amplification and sequencing of the ITS (Internal Transcribed Spacer) region. The isolates were identified at the genus taxonomic level by comparing the ITS sequences obtained with the megablast tool, using the public GenBank database. Four phyla (Ascomycota, Mucoromycota, Basidiomycota, and Zoopagomycota), 13 classes, 36 orders, 70 families, and 145 genera were found. The phylum Ascomycota was the most predominant, with the genera Penicillium and Cladosporium being the most frequent in the three locations studied. This study points out that ferruginous caves in the Southern Espinhaço Mountains harbor a high

lias e 145 gêneros. O filo Ascomycota foi o mais predominante, sendo os gêneros *Penicillium* e *Cladosporium* os mais frequentes nas três localidades estudadas. Este estudo aponta que cavidades ferruginosas da Serra do Espinhaço Meridional abrigam uma elevada riqueza de gêneros fúngicos, evidenciando o potencial para a descoberta de novas espécies.

PALAVRAS-CHAVE: Bioespeleologia, cavernas, *Cladosporium*, micologia, taxonomia, *Penicillium*.

INTRODUÇÃO

Estima-se que existam entre 2 e 3 milhões de espécies de fungos no planeta; entretanto, somente cerca de 155 mil espécies estão documentadas (Niskanen *et al.*, 2023). Uma das razões para o limitado conhecimento sobre a diversidade fúngica está relacionada à escassez de estudos em habitats em regiões tropicais, onde essa diversidade ainda é pouco explorada (Hawksworth & Lücking, 2017). Sabe-se, contudo, que a distribuição desses organismos tende a ser maior nos trópicos em relação a regiões de clima temperado, como demonstrado em um estudo sobre a diversidade global de fungos no solo (Tedersoo *et al.*, 2014). Dessa maneira, estudos que contemplem habitats pouco explorados em regiões tropicais, como as cavernas, são fundamentais para preencher as lacunas existentes no inventário global de espécies fúngicas.

Os fungos possuem um papel importante no ecossistema subterrâneo, contribuindo para o biointemperismo de rochas, decomposição da matéria orgânica, transformação do nitrogênio e fósforo, degradação de compostos recalcitrantes e servindo como alimento para a fauna cavernícola (Nováková *et al.*, 2018; Joshi & Chettri, 2019;

wealth of fungal genera, highlighting the potential for the discovery of new species.

KEYWORDS: Biospeleology, caves, *Cladosporium*, mycology, taxonomy, *Penicillium*.

INTRODUCTION

It is estimated that there are between 2 and 3 million species of fungi on the planet; however, only about 155,000 species have been documented (Niskanen et al. 2023). One of the reasons for the limited knowledge about fungal diversity is related to the scarcity of studies in tropical regions habitats, where this diversity is still largely unexplored (Hawksworth & Lücking, 2017). However, it is known that the distribution of these organisms tends to be greater in the tropics than in temperate regions, as demonstrated in a study on the global diversity of fungi in the soil (Tedersoo et al. 2014). Thus, studies that consider little-explored habitats in tropical regions, such as caves, are essential to fill the gaps in the global inventory of fungal species.

*Fungi play an important role in the underground ecosystem, contributing to the bioweathering of rocks, decomposition of organic matter, transformation of nitrogen and phosphorus, degradation of recalcitrant compounds, and serving as food for cave fauna (Nováková et al. 2018; Joshi & Chettri, 2019; Wiseschart & Pootanakit, 2020). Historically, research on fungi in caves has focused on pathogenic species, such as *Histoplasma capsulatum*, which causes histoplasmosis in humans (Rocha-Silva et*

Wiseschart & Pootanakit, 2020). Historicamente, as pesquisas sobre fungos em cavernas eram concentradas em espécies patogênicas, como *Histoplasma capsulatum*, causador da histoplasmose em humanos (Rocha-Silva *et al.*, 2014), e *Pseudogymnoascus destructans*, causador da síndrome do nariz branco em morcegos (Sharma *et al.*, 2019). Contudo, estudos recentes têm buscado explorar a diversidade taxonômica de fungos nos ambientes subterrâneos, contribuindo para um maior entendimento da real biodiversidade fúngica nesses ecossistemas.

Vanderwolf *et al.*, (2013) forneceram uma lista com 1.029 espécies de fungos, divididas em 518 gêneros, documentadas em ambientes subterrâneos no mundo inteiro. Essa lista foi posteriormente atualizada para 1.626 espécies de fungos cavernícolas, classificadas em 644 gêneros, por Zhang *et al.*, (2021). No Brasil, o primeiro relato de fungos filamentosos em cavernas foi realizado por Castrillón *et al.*, (1976), no qual fungos dos gêneros *Aspergillus*, *Penicillium*, *Verticillium*, *Cephalosporium*, *Fusarium*, *Geotrichum*, além do fungo dermatófito *Arthroderma amazonicum*, foram isolados em cavernas da região amazônica. Outros trabalhos focaram em avaliar a qualidade do ar no interior de cavernas, com interesse em identificar espécies fúngicas patogênicas. Taylor *et al.*, (2013) identificaram uma elevada riqueza de espécies fúngicas, incluindo espécies do gênero *Aspergillus*, após o período mais intenso de visita da Gruta Lapa Nova, em Minas Gerais. Além disso, diversos trabalhos relataram a presença de *H. capsulatum* em cavernas brasileiras (Dias *et al.*, 2011; Rocha-Silva *et al.*, 2014; Almeida *et al.*, 2019).

Estudos taxonômicos recentes em cavernas localizadas no bioma da Caatinga revelaram a presença de uma elevada diversidade de fungos, incluindo novas espécies, nos ambientes subterrâneos

al. 2014), and *Pseudogymnoascus destructans*, which causes white-nose syndrome in bats (Sharma *et al.* 2019). However, recent studies have sought to explore the taxonomic diversity of fungi in underground environments, contributing to a greater understanding of the actual fungal biodiversity in these ecosystems.

Vanderwolf *et al.* (2013) provided a list of 1,029 fungal species, divided into 518 genera, documented in underground environments worldwide. This list was later updated to 1,626 species of cave fungi, classified into 644 genera, by Zhang *et al.* (2021). In Brazil, the first report of filamentous fungi in caves was made by Castrillón *et al.* (1976), in which fungi of the *Aspergillus*, *Penicillium*, *Verticillium*, *Cephalosporium*, *Fusarium*, *Geotrichum* genera, in addition to the dermatophyte fungus *Arthroderma amazonicum*, were isolated in caves in the Amazon region. Other studies focused on assessing air quality inside caves, with an interest in identifying pathogenic fungal species. Taylor *et al.* (2013) identified a high diversity of fungal species, including species of the *Aspergillus* genus, after the most intense period of visitation to the Lapa Nova Cave in Minas Gerais. In addition, several studies have reported the presence of *H. capsulatum* in Brazilian caves (Dias *et al.* 2011; Rocha-Silva *et al.* 2014; Almeida *et al.* 2019).

Recent taxonomic studies in caves located in the Caatinga biome have revealed the presence of a high diversity of fungi, including new species in Brazilian underground environments (Cunha *et al.* 2020; Alves *et al.* 2022; Carvalho *et al.* 2022; Pereira *et al.* 2022). In the Meu Rei cave in Pernambuco, a high fungal diversity was recorded in air, guano, and bat samples (Cunha *et al.* 2020). In the Furna do Morcego cave in Alagoas, two new species of the *Cladosporium* genus were described (Pereira *et al.* 2022). Two new species of fungi of the Pleosporales order were also discovered in ectoparasitic bat

brasileiros (Cunha *et al.*, 2020; Alves *et al.*, 2022; Carvalho *et al.*, 2022; Pereira *et al.*, 2022). Na caverna Meu Rei, em Pernambuco, foi registrada uma grande diversidade fúngica em amostras de ar, guano e morcegos (Cunha *et al.*, 2020). Na caverna Furna do Morcego, em Alagoas, duas novas espécies do gênero *Cladosporium* foram descritas (Pereira *et al.*, 2022). Duas novas espécies de fungos da ordem *Pleosporales* também foram descobertas em moscas ectoparasitas de morcegos na mesma caverna (Carvalho *et al.*, 2022). Em um estudo sobre a riqueza de fungos presentes na caverna Abrigo Letreiro, em Pernambuco, foram encontradas 41 espécies pertencentes a 17 gêneros do filo *Ascomycota* e dois gêneros do filo *Basidiomycota*, a partir de amostras de ar e sedimento (Alves *et al.*, 2022). Além disso, Alves *et al.*, (2022) relataram a descoberta de um novo gênero e seis novas espécies de fungos nessa mesma caverna.

De acordo com o Anuário Estatístico do Patrimônio Espeleológico Brasileiro, o estado de Minas Gerais possui 12.911 cavernas cadastradas, o que corresponde a 49,57% do total de cavernas conhecidas no Brasil (Ministério do Meio Ambiente, 2025). Diante desse amplo patrimônio espeleológico, estudos recentes revelaram novas descobertas sobre fungos em cavernas da Serra do Espinhaço Meridional no estado de Minas Gerais. Um novo gênero e quatro novas espécies de fungos da família *Chaetomiaceae* foram descobertos em três cavernas localizadas nas cidades de Diamantina e Monjolos (Condé *et al.*, 2023). O novo gênero *Parahumicola* (nova espécie = *P. guana*) foi encontrado em guano de morcego na Gruta Monte Cristo. As novas espécies *Pseudohumicola alba* e *Ps. lutea* foram encontradas em amostras do ar da Gruta Velha Nova, enquanto *Chaetomium meridionalense* foi isolado de serrapilheira da Gruta da Extração e da Gruta Velha Nova (Condé *et al.*, 2023). Duas

flies in the same cave (Carvalho et al. 2022). In a study on the richness of fungi present in the Abrigo Letreiro cave in Pernambuco, 41 species belonging to 17 genera of the Ascomycota phylum and two genera of the Basidiomycota phylum were found from air and sediment samples (Alves et al. 2022). In addition, Alves et al. (2022) reported the discovery of a new genus and six new species of fungi in the same cave.

According to the Statistical Yearbook of Brazilian Speleological Heritage, the state of Minas Gerais has 12,911 registered caves, which corresponds to 49.57% of the total number of known caves in Brazil (Ministério do Meio Ambiente, 2025). Given this extensive speleological heritage, recent studies have revealed new discoveries about cave fungi in the Southern Espinhaço Range in the state of Minas Gerais. A new genus and four new species of fungi from the Chaetomiaceae family were discovered in three caves located in the cities of Diamantina and Monjolos (Condé et al. 2023). The new genus Parahumicola (new species = P. guana) was found in bat guano in the Monte Cristo Cave. The new species Pseudohumicola alba and Ps. lutea were found in air samples from Gruta Velha Nova, while Chaetomium meridionalense was isolated from leaf litter in Extração and Velha Nova caves (Condé et al. 2023). Two new species of the Cladosporium (C. diamantinense and C. speluncae) genus were described from air and soil samples in Monte Cristo Cave (Dutra et al. 2023). In addition, the new species Amphichorda monjolensis was isolated after exposing a culture medium in a Petri dish left in the cave atmosphere to collect fungal spores in suspension, which had been visited by a cave cricket that possibly carried the conidia of A. monjolensis (Leão et al. 2024).

Thus, considering the high diversity of fungi found in Brazilian caves, the objective of this study was to

novas espécies do gênero *Cladosporium* (*C. diamantinense* e *C. speluncae*) foram descritas a partir de amostras do ar e do solo na Gruta Monte Cristo (Dutra *et al.*, 2023). Além disso, a nova espécie *Amphichorda monjolensis* foi isolada após a exposição de meio de cultura em uma placa de Petri deixada na atmosfera da caverna para a coleta de esporos fúngicos em suspensão, e que fora visitada por um grilo de caverna que possivelmente veiculou os conídios de *A. monjolensis* (Leão *et al.*, 2024).

Assim, considerando a elevada diversidade de fungos que as cavernas brasileiras abrigam, o objetivo desse trabalho foi investigar a riqueza de fungos filamentosos cultiváveis em amostras coletadas em caverna e cavidades ferruginosas e em uma caverna quartizítica ferruginosa (sobreposta por itabirito – formação ferrífera) na região entre os municípios de Serro e Conceição do Mato Dentro, na Serra do Espinhaço Meridional, em Minas Gerais.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi realizado em uma caverna e cavidades ferruginosas e em uma caverna quartizítica ferruginosa, localizadas na Serra do Espinhaço Meridional, entre os municípios de Conceição do Mato Dentro e Serro (Figuras 1 e 2). Uma expedição de coleta foi realizada com a duração de cinco dias, entre os dias 25 de setembro e 1 de outubro, no ano de 2022, no qual foram visitadas as cavernas e cavidades listadas na Tabela 1. Na cidade de Alvorada de Minas, distrito de Itapanhoacanga, foi realizada uma coleta em cavidade ferruginosa (18°46'39.0"S 43°25'51.4"W). Já em Conceição do Mato Dentro, foram realizadas coletas na caverna Curral de Pedras (18°46'47.1"S 43°31'12.4"W),

investigate the richness of cultivable filamentous fungi in samples collected in ferruginous caves and in a ferruginous quartzite cave (overlaid by itabirite – ferruginous formation) in the region between the municipalities of Serro and Conceição do Mato Dentro, in the Southern Espinhaço Mountains, in Minas Gerais.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The study was conducted in ferruginous caves and in a ferruginous quartzite cave, located in the Southern Espinhaço Mountains, between the municipalities of Conceição do Mato Dentro and Serro (Figures 1 and 2). A five-day collection expedition was carried out between September 25 and October 1, 2022, during which the caves listed in Table 1 were visited. In the city of Alvorada de Minas, district of Itapanhoacanga, a collection was made in a ferruginous cave (18°46'39.0"S 43°25'51.4"W). In Conceição do Mato Dentro, collections were made in the Curral de Pedras cave (18°46'47.1"S 43°31'12.4"W) and in caves located in Serra da Ferrugem (18°59'54.2"S 43°23'58.6"W). The area of ferricrete canga is list-

e em caverna/cavidades localizadas na Serra da Ferrugem (18°59'54.2"S 43°23'58.6"W), área de canga ferruginosa tombada pelo patrimônio histórico-cultural do município e transformada em monumento natural visando a preservação de sua paisagem (Dias & Madeira Filho, 2020).

Coleta de amostras

Foram coletadas amostras de partículas em suspensão no ar, fezes de animais, raízes, rochas, sedimento e serrapilheira ao longo das cavernas/cavidades. Na caverna Curral de Pedras, a partir da entrada da caverna, cada ponto amostral foi localizado a 20 m de distância do ponto anterior. Nas demais caverna/cavidades, devido à falta de desenvolvimento horizontal das mesmas, foi realizada a coleta em apenas um ponto situado em seu interior.

Amostras de partículas de ar foram coletadas pelo método de sedimentação de Koch (Kuzmina *et al.*, 2012). Em cada ponto amostral, foram expostas à atmosfera da caverna/cavidade três placas de Petri, contendo os meios de cultivo: batata-dextrose ágar suplementado com cloranfenicol (2 mg/L) (BDA+), dicloran-rosa bengala-cloranfenicol ágar (DRBC) e dicloran glicerol ágar (DG18) por 15 min. Cerca de 10 g de sedimento foram coletados em uma profundidade de 1–5 cm após a remoção de 1 cm da camada superficial do solo em cada ponto amostral. As amostras de rochas foram coletadas a partir de esfregaços feitos com *swabs* estéreis em locais onde havia aparente colonização fúngica. Quando presente, amostras de raízes, serrapilheira e fezes foram coletadas no interior das cavernas. Todas as amostras foram acondicionadas a 4 °C em caixas térmicas e posteriormente transportadas para o laboratório onde foi realizado o isolamento dos fungos cavernícolas.

ed as a historical and cultural heritage site by the municipality and was transformed into a natural monument aiming to preserve its landscape (Dias & Madeira Filho, 2020).

Sample collection

Samples of airborne particles, animal dung, roots, rocks, sediment, and leaf litter were collected throughout the caves. In the Curral de Pedras cave, starting at the cave entrance, each sampling point was located 20 m away from the previous point. In the other caves, due to their lack of horizontal development, collection was carried out at only one point located inside them.

Air particle samples were collected using the Koch sedimentation method (Kuzmina et al. 2012). At each sampling point, three Petri dishes containing the following culture media were exposed to the cave atmosphere: potato dextrose agar supplemented with chloramphenicol (2 mg/L) (PDA+), dichloran-rose bengal-chloramphenicol agar (DRBC), and dichloran glycerol agar (DG18) for 15 min. Approximately 10 g of sediment was collected at a depth of 1–5 cm after removing 1 cm of the topsoil layer at each sampling point. Rock samples were collected from smears made with sterile swabs in places where there was apparent fungal colonization. When present, samples of roots, litter, and feces were collected inside the caves. All samples were stored at 4 °C in thermal boxes and subsequently transported to the laboratory where the cave fungi were isolated.

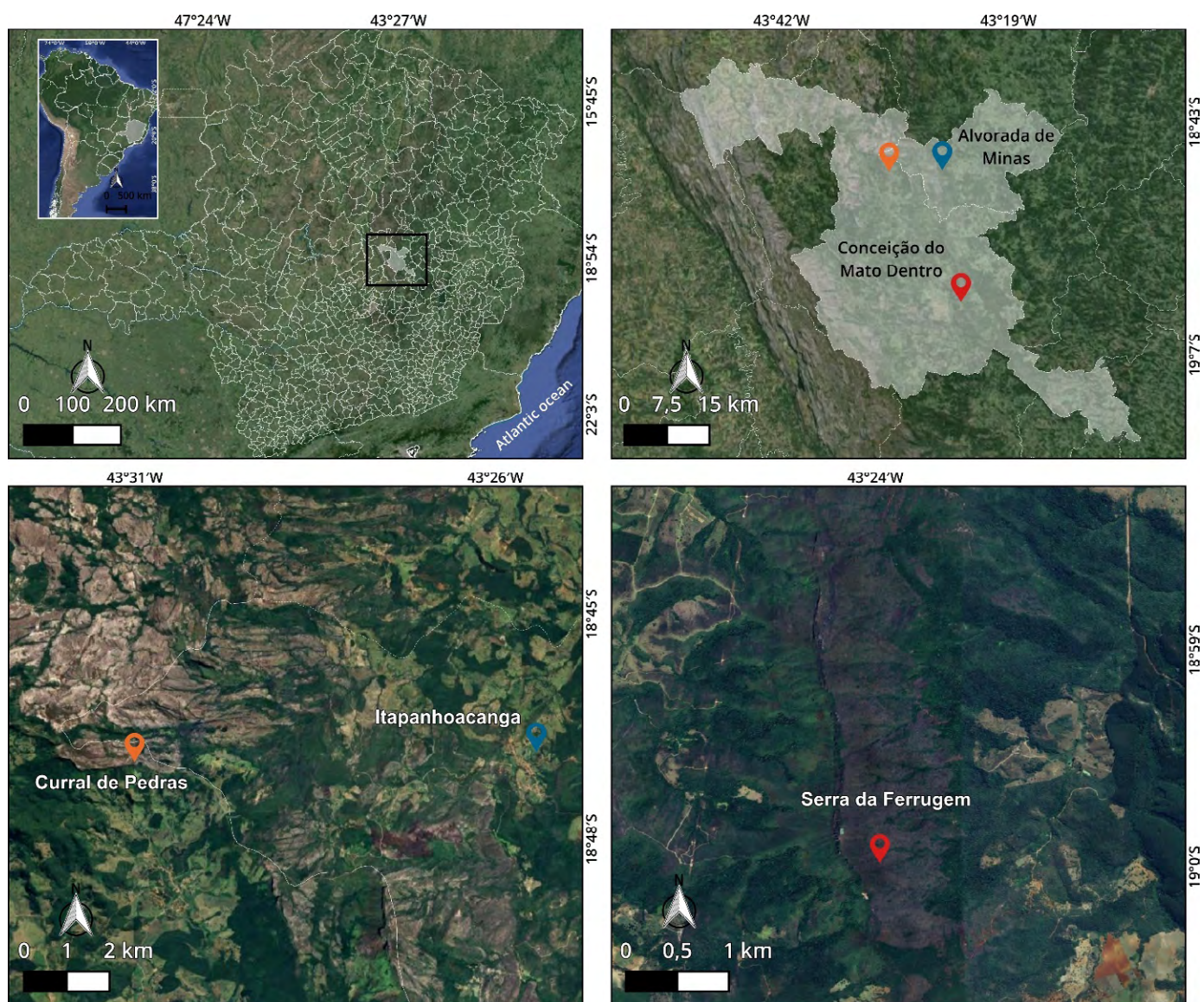


Figura 1 – Mapa de localização das cavernas amostradas. Fonte: Sistemas de Coordenadas Geográficas (SIRGAS 2000), IBGE, 2022.

Figure 1 – Location map of the sampled caves. Source: Geographic Coordinate Systems (SIRGAS 2000), IBGE, 2022.



Figura 2 – Cavernas e cavidades ferruginosas e caverna quartzítica ferruginosa amostradas na Serra do Espinhaço Meridional; a) Caverna Curral de Pedras; b) Placas de Petri com meio de cultivo expostas à atmosfera da Caverna Curral de Pedras; c–d) Colonização fúngica aparente na parede da cavidade ferruginosa amostrada em Itapanhoacanga; e) Paisagem formada por canga na Serra da Ferrugem; f–j) Cavidades amostradas na Serra da Ferrugem.

Figure 2 – Ferruginous caves and ferruginous quartzite cave sampled in the Southern Espinhaço Mountain Range; a) Curral de Pedras Cave; b) Petri dishes with culture medium exposed to the atmosphere of the Curral de Pedras Cave; c–d) Apparent fungal colonization on the wall of the ferruginous cave sampled in Itapanhoacanga; e) Landscape formed by canga in the Serra da Ferrugem; f–j) Caves sampled in the Serra da Ferrugem.

Tabela 1 – Descrição das cavernas e cavidades onde ocorreram as coletas. (Ar – ar; SE – serrapilheira; RO – rocha; SO – solo; FE – fezes, RA – raiz).

Identificação das cavernas	Localidade	Descrição da caverna	Quantidade de amostras
Caverna de Itapanhoacanga	Distrito de Itapanhoacanga, município de Alvorada de Minas	Cavidade em cobertura laterítica sob rochas ferruginosas, caracterizada por abatimentos de bloco com desenvolvimento de até 2,5 m. Localizada na encosta lateral da drenagem circundada por mata ciliar. Não se observou a presença de animais no local.	3 AR 1 SE 6 RO 1 SO

Identificação das cavernas	Localidade	Descrição da caverna	Quantidade de amostras
Caverna Curral de Pedras	Distrito de Santo Antônio do Norte, município de Conceição do Mato Dentro	A caverna ocorre em rocha quartzítica, sobreposta por rochas ferruginosas (itabiritos), se desenvolveu acompanhando o eixo de um dobramento e parte em direção ao contato/ foliação principal das litologias. O conduto principal tem 70 m de desenvolvimento e o conduto lateral possui 60 m de extensão. É uma caverna de importância histórica utilizada por tropeiros para acampamento na Estrada Real. É um local turístico e apresenta bastante antropização e presença de animais domesticados.	27 AR 3 SE 5 RO 7 SO 3 FE
CSF 0804		Cavidade com 1,80 m de desenvolvimento, localizada na encosta vertente da Serra da Ferrugem, em brechas ferruginosas, sobrepostas ao itabirito (coberturas cenozóicas). A vegetação principal é o campo rupestre de altitude, a presença de serrapilheira é extensa, bem com muitos insetos (abelhas, vespas e marimbondos) no entorno e dentro da cavidade. Não foram observados morcegos no momento da coleta.	3 AR 1 SE 2 RO 1 SO
CMN 16	Serra da Ferrugem, município de Conceição do Mato Dentro	Caverna em brecha ferruginosa e laterita desenvolvimento de até 10 m, porém o acesso é limitado após os primeiros 5 m do conduto. Observa-se grande quantidade de blocos abatidos e formas de precipitação química no teto (espeleotemas). Presença de morcegos, aranhas e insetos como abelhas e marimbondos dentro da caverna.	12 AR 1 SE 2 RO 1 SO 2 RA
CFS 0600		Cavidade com desenvolvimento de até 2 m de profundidade, pouca vegetação ao redor e presença de muitas aranhas. Situação geológica similar a anterior (brecha ferruginosa e abatimento de blocos).	3 AR 1 SE 2 RO 1 RA
CFS 0386		Cavidade com desenvolvimento de até 2,5 m. Mesma situação geológica das outras, brechas ferruginosas e abatimento de blocos, vegetação agressiva e abundante (bromélias, cactus, arbusto muitos espinhosos, "unha de gato", etc).	1 SE
CFS 0388		Cavidade em laterita ferruginosa com desenvolvimento de até 2,5 m no conduto principal, caracterizada pelo abatimento de blocos presença de vegetação expressiva.	1 SE 1 SO

Table 1 – Description of the caves where the collections took place. (AP – airborne particles; LL – leaf litter; RO – rock; SO – soil; AD – animal dung, RT – root).

Caves identification	Location	Cave description	Number of samples
Itaponhacanga cave	Itaponhacanga District, municipality of Alvorada de Minas	Cave in lateritic cover under ferruginous rocks, characterized by block collapses with development of up to 2.5 m. Located on the side slope of the drainage surrounded by gallery forest. No animals were observed at the site.	3 AP 1 LL 6 RO 1 SO
Curral de Pedras cave	District of Santo Antônio do Norte, municipality of Conceição do Mato Dentro	The cave occurs in quartzite rock, overlaid by ferruginous rocks (itabirites), and developed along the axis of a fold, extending toward the main contact/ foliation of the lithologies. The main conduit is 70 m long and the side conduit is 60 m long. It is a cave of historical importance used by tropeiros (muleteers) for camping on the Estrada Real (Royal Road). It is a tourist site and shows considerable anthropization and the presence of domesticated animals.	27 AP 3 LL 5 RO 7 SO 3 AD
CSF 0804		A 1.80 m long cave located on the slope of Serra da Ferrugem, in ferruginous breccias, superimposed on itabirito (Cenozoic coverings). The main vegetation is high-altitude rocky terrain, with extensive leaf litter and many insects (bees, wasps, and hornets) in the surrounding area and inside the cave. No bats were observed at the time of collection.	3 AP 1 LL 2 RO 1 SO
CMN 16	Serra da Ferrugem, municipality of Conceição do Mato Dentro	Cave in ferruginous breccia and laterite up to 10 m long, but access is limited after the first 5 m of the conduit. There are a large number of fallen blocks and chemical precipitation formations on the ceiling (speleothems). Bats, spiders, and insects such as bees and hornets were present inside the cave.	12 AP 1 LL 2 RO 1 SO 2 RT
CFS 0600		Cave of up to 2 m long, little vegetation around it, and many spiders. Geological situation similar to the previous one (ferruginous breccia and fallen blocks).	3 AP 1 LL 2 RO 1 RT
CFS 0386		Cave of up to 2.5 m long. Same geological conditions as the others, ferruginous breccias and fallen blocks, aggressive and abundant vegetation (bromeliads, cacti, very thorny shrubs, “unha de gato”, etc).	1 LL
CFS 0388		Cave in ferruginous laterite up to 2.5 m long in the main passage, characterized by the fallen blocks and the presence of significant vegetation.	1 LL 1 SO

Isolamento de fungos de cavernas ferruginosas

Os fungos presentes nas amostras de fezes, sedimentos e rochas foram isolados por meio do método de diluição seriada em placa (Zhang *et al.*, 2017). Resumidamente, 1 g de cada amostra foi diluído em 9 mL de água esterilizada em tubos de ensaio estéreis. As diluições subsequentes foram preparadas pipetando-se 1 mL da suspensão da diluição de maior concentração para tubos contendo 9 mL de água destilada estéril. As suspensões obtidas foram homogeneizadas em um agitador vórtex e diluídas em diferentes concentrações (10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} e 10^{-5}). Cem microlitros de cada diluição foram plaqueados através do método de espalhamento em superfície em placas de Petri contendo os meios de cultura BDA⁺, DRBC e DG18, em duplicata.

Os fungos presentes no interior das raízes (endofíticos) foram isolados por meio do método de diluição por extinção (Collado *et al.*, 2007; Leite *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2024). Amostras de raízes foram lavadas em água corrente, submergidas em 300 mL de álcool 70% e Tween 80 por 1 min, seguidas de imersão em 300 mL de hipoclorito de sódio (2,5%) por 5 min e, por fim, em 300 mL de NaCl (0,85%) por 2 min. Após a desinfestação superficial, as amostras foram fragmentadas em liquidificador com solução de NaCl (0,85%) por 1 min. As partículas resultantes foram filtradas em uma série de peneiras com tamanho de malha de 500, 212 e 106 μm . As partículas de raízes retidas nas peneiras de malha de 212 e 106 μm foram ressuspensas e transferidas para um tubo Falcon contendo 20 mL de solução de NaCl (0,85%), sendo centrifugadas 7000 $\times$ g por 5 min. O sobrenadante foi descartado, e 20 mL de carboximetilcelulose (CMC 0,1%) foram adicionados aos tubos do tipo Falcon, que foram novamente centrifugados a 7000 $\times$ g por 15 min. Após o descarte do sobrenadante, foram adiciona-

Isolation of fungi from ferruginous caves

The fungi present in the animal dung, sediment, and rock samples were isolated using the serial dilution plate method (Zhang et al. 2017). Briefly, 1 g of each sample was diluted in 9 mL of sterile water in sterile test tubes. Subsequent dilutions were prepared by pipetting 1 mL of the highest concentration dilution suspension into tubes containing 9 mL of sterile distilled water. The suspensions obtained were homogenized in a vortex mixer and diluted to different concentrations (10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , and 10^{-5}). One hundred microliters of each dilution were plated using the surface spreading method in Petri dishes containing PDA⁺, DRBC, and DG18 culture media, in duplicate.

The fungi present inside the roots (endophytic) were isolated using the dilution by extinction method (Collado et al. 2007; Leite et al. 2013; Oliveira et al. 2024). Root samples were washed in running water, submerged in 300 mL of 70% alcohol and Tween 80 for 1 min, followed by immersion in 300 mL of sodium hypochlorite (2.5%) for 5 min and, finally, in 300 mL of NaCl (0.85%) for 2 min. After surface disinfection, the samples were fragmented in a blender with NaCl solution (0.85%) for 1 min. The resulting particles were filtered through a series of sieves with mesh sizes of 500, 212, and 106 μm . The root particles retained in the 212 and 106 μm mesh sieves were resuspended and transferred to a Falcon tube containing 20 mL of NaCl solution (0.85%) and centrifuged at 7000 $\times$ g for 5 min. The supernatant was discarded, and 20 mL of carboxymethylcellulose (CMC 0.1%) was added to the Falcon tubes, which were again centrifuged at 7000 $\times$ g for 15 min. After discarding the supernatant, 20 mL of CMC solution (0.1%) was added. Different dilutions were prepared (1:2, 1:4, 1:8, 1:16, and 1:32), and 150 μL of the suspensions were plated in YMC culture medium.

dos 20 mL da solução de CMC (0,1%). Diferentes diluições foram preparadas (1:2, 1:4, 1:8, 1:16 e 1:32) e 150 µL das suspensões foram plaqueadas em meio de cultivo YMC.

As amostras de serrapilheira foram acondicionadas em sacos de papel Kraft, segundo Leão-Ferreira *et al.*, (2013). No laboratório, as amostras foram submetidas à técnica de lavagem em água corrente, de acordo com Castañeda-Ruiz *et al.*, (2005). Após secagem, as amostras foram incubadas em câmaras-úmidas compostas por caixas de poliestireno contendo papel filtro umedecido com água esterilizada. As amostras foram observadas periodicamente sob microscópio estereoscópico por um período de 30 dias, e estruturas fúngicas reprodutivas foram transferidas para meio de cultura contendo BDA⁺.

Todas as placas foram incubadas a 25 °C por aproximadamente 30 dias. Periodicamente, colônias isoladas foram retiradas e repicadas em novas placas de BDA sem antibiótico. Culturas puras foram obtidas pelo método de ponta de hifa (Tuite, 1969), sendo preservadas em microtubos de 2 mL contendo glicerol a 10% e armazenadas a -20 °C, e em microtubos contendo água destilada esteril, mantidas à temperatura ambiente. Todos os isolados foram armazenados na coleção de fungos cavernícolas do laboratório.

Extração de DNA, amplificação e sequenciamento

O DNA genômico dos isolados fúngicos obtidos foi extraído a partir do micélio crescido em placas de BDA por aproximadamente 7 dias a 25 °C no escuro, utilizando o kit comercial Wizard® Genomic Purification Kit (Promega) e seguindo o protocolo de Pinho *et al.*, (2013). Para identificar os isolados, a região ITS (*internal transcribed spa-*

The leaf litter samples were stored in Kraft paper bags, according to Leão-Ferreira et al. (2013). In the laboratory, the samples were washed in running water, according to Castañeda-Ruiz et al. (2005). After drying, the samples were incubated in humid chambers composed of polystyrene boxes containing filter paper moistened with sterile water. The samples were observed periodically under a stereoscopic microscope for a period of 30 days, and reproductive fungal structures were transferred to a culture medium containing PDA⁺.

All plates were incubated at 25 °C for approximately 30 days. Periodically, isolated colonies were removed and transferred to new PDA plates without antibiotics. Pure cultures were obtained using the hyphal tip method (Tuite, 1969) and preserved in 2 mL microtubes containing 10% glycerol and stored at -20 °C, and in microtubes containing sterile distilled water, kept at room temperature. All isolates were stored in the laboratory's collection of cavernicolous fungi.

DNA extraction, amplification, and sequencing

The genomic DNA of the fungal isolates obtained was extracted from mycelium grown on PDA plates for approximately 7 days at 25 °C in the dark, using the commercial Wizard® Genomic Purification Kit (Promega) and following the protocol of Pinho et al. (2013). To identify the isolates, the ITS region (internal transcribed spacers 1 and 2), in addition

cers 1 e 2), além do gene que codifica a subunidade de 5.8S do rDNA, foram amplificados através dos primers ITS1 (White *et al.*, 1990) e LR6 (Vilgalys & Hester, 1990). As condições de amplificação dos fragmentos de DNA foram: desnaturação inicial do DNA a 94 °C por 120 s, seguido por 35 ciclos de desnaturação a 94 °C por 30 s, anelamento a 49 °C por 30 s, extensão a 72 °C por 120 s, seguidos de uma extensão final a 72 °C por 5 min.

Os resultados da PCR foram visualizados através de eletroforese com gel de agarose 1%. A verificação do tamanho das bandas de DNA e pureza foi realizada em luz ultravioleta. Os produtos de PCR foram enviados para purificação e sequenciamento para a empresa Macrogen Inc., Coreia do Sul (<http://www.macrogen.com>).

Identificação dos isolados por meio da região ITS e análises ecológicas

As sequências de DNA obtidas foram visualizadas e ajustadas, quando necessário, utilizando o software FinchTV v.1.4.0. A identificação dos isolados através de sequências da região ITS foi realizada utilizando a ferramenta *megablast* dentro da plataforma BLAST (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>). As buscas dentro da plataforma BLAST foram restritas às sequências de material tipo (sequências curadas). A identificação dos isolados foi realizada aos níveis taxonômicos de gênero, família, ordem, classe e filo. Isolados foram identificados ao nível de gênero somente quando o seu valor de identidade fosse igual ou superior a 95 % a outro gênero já existente no banco de dados. Isolados que apresentaram valor de identidade inferior a 95 % foram identificados apenas ao nível de família/ordem.

A partir dos dados de identificação dos isolados por ITS, gráficos de abundância relativa de classes

to the gene encoding the 5.8S subunit of rDNA, were amplified using the ITS1 (White et al. 1990) and LR6 (Vilgalys & Hester, 1990) primers. The conditions for amplifying the DNA fragments were initial denaturation of the DNA at 94 °C for 120 s, followed by 35 cycles of denaturation at 94 °C for 30 s, annealing at 49 °C for 30 s, extension at 72 °C for 120 s, followed by a final extension at 72 °C for 5 min.

The PCR results were visualized using 1% agarose gel electrophoresis. The size of the DNA bands and purity were verified under ultraviolet light. The PCR products were sent for purification and sequencing to Macrogen Inc. South Korea (<http://www.macrogen.com>).

Identification of isolates using the ITS region and ecological analyses

The DNA sequences obtained were visualized and adjusted, when necessary, using FinchTV v.1.4.0 software. The identification of isolates using ITS region sequences was performed using the megablast tool within the BLAST platform (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>). Searches within the BLAST platform were restricted to type material sequences (curated sequences). Isolates were identified at the taxonomic levels of genus, family, order, class, and phylum. Isolates were identified at the genus level only when their identity value was equal to or greater than 95% to another genus already existing in the database. Isolates with an identity value of less than 95% were identified only at the family/order level.

Based on the identification data of the isolates by ITS, graphs of relative abundance of fungi classes and genera found in different locations were generated using GraphPad Prism v.7 software. The genera shared by the caves and substrates of the different

e gêneros de fungos encontrados nas diferentes localidades foram gerados através do software GraphPad Prism v.7. Os gêneros compartilhados pelas cavernas e substratos das diferentes localidades foram representados através de um diagrama de Venn usando a ferramenta Venny 2.1 (<https://bioinfogp.cnb.csic.es/tools/venny/index.html>).

Análises macro e micromorfológicas

Isolados de fungos cavernícolas representativos foram selecionados e preparações microscópicas contendo estruturas reprodutivas dos fungos foram confeccionadas entre lâmina e lamínula, utilizando lactoglicerol como meio de montagem. Fotomicrografias foram obtidas com o microscópio Olympus BX53 equipado com a câmera digital Olympus Q-Color5™. Estruturas morfológicas relevantes tais como conídios, conidióforos, células conidiogênicas e outras estruturas de reprodução assexuada, foram examinadas com o auxílio do software Olympus cellSens Dimension 1.9. Além disso, colônias representativas da diversidade macromorfológica foram selecionadas e fotografadas utilizando uma câmera Nikon D3400.

RESULTADOS

Isolados obtidos

No total, foram obtidos 887 isolados de fungos provenientes das cavernas e cavidades ferruginosas da Serra do Espinhaço Meridional, em Minas Gerais. Desse total, 105 isolados foram obtidos na cavidade ferruginosa do distrito de Itapanhoacanga, 421 isolados da caverna Curral de Pedras e 361 isolados provenientes da caverna e cavidades localizadas na Serra da Ferrugem. Ao todo, foram obtidos 274 isolados do solo, 258 do ar, 128 da

locations were represented using a Venn diagram created with the Venny 2.1 tool (<https://bioinfogp.cnb.csic.es/tools/venny/index.html>).

Macro and micromorphological analyses

Isolates of representative cavernous fungi were selected and microscopic preparations containing reproductive structures of the fungi were made between a slide and coverslip, using lactoglycerol as a mounting medium. Photomicrographs were obtained with an Olympus BX53 microscope equipped with an Olympus Q-Color5™ digital camera. Relevant morphological structures such as conidia, conidiophores, conidiogenic cells, and other asexual reproductive structures were examined using Olympus cellSens Dimension 1.9 software. In addition, colonies representative of macromorphological diversity were selected and photographed using a Nikon D3400 camera.

RESULTS

Isolates obtained

A total of 887 fungal isolates were obtained from caves in the Southern Espinhaço Mountains, in Minas Gerais. Of those isolates, 105 were obtained from the ferruginous cave in the district of Itapanhoacanga, 421 isolates from the Curral de Pedras cave, and 361 isolates from the caves located in the Serra da Ferrugem. In total, 274 isolates were obtained from the soil, 258 from the airborne particles, 128 from leaf litter, 106 from animal dung, 70 from rocks, and

serrapilheira, 106 de fezes, 70 de rochas e 51 de raízes. Na cavidade em Itapanhoacanga foram recuperados 46 isolados do solo, 42 de rochas, 10 do ar e 7 de serrapilheira. Na caverna Curra de Pedras foram obtidos 147 isolados do ar, 122 do solo, 106 de fezes, 36 de serrapilheira e 10 de rochas. Nas cavidades e caverna ferruginosas localizadas na Serra da Ferrugem foram obtidos 106 isolados de fungos no solo, 101 no ar, 85 da serrapilheira, 51 de raízes e 18 de rochas.

Identificação dos isolados por sequenciamento da região ITS

O filo *Ascomycota* foi o mais predominante entre os filos encontrados representando 93% (824 isolados) do total de isolados, seguido de *Mucoromycota* 5% (41 isolados), *Basidiomycota* 2% (17 isolados) e *Zoopagomycota* 1% (5 isolados). No filo *Ascomycota* as classes presentes foram *Eurotiomycetes* 40% (355 isolados), *Sordariomycetes* 27,2% (241 isolados), *Dothideomycetes* 22,4% (199 isolados), *Leotiomycetes* 2,4% (21 isolados), *Saccharomycetes* 0,7% (6 isolados) e 0,2% (2 isolados) não puderam ser identificados em nenhuma classe (*incertae sedis*) (Figura 3a). Em *Mucoromycota* as classes encontradas foram *Mucoromycetes* 2,9% (26 isolados), *Umbelopsidomycetes* 1,4% (12 isolados) e *Mortierellomycetes* 0,3% (3 isolados) (Figura 2a). Já em *Basidiomycota* foram encontradas as classes *Agaricomycetes* 1,1% (10 isolados), *Tremellomycetes* 0,7% (6 isolados) e *Exobasidiomycetes* 0,1% (1 isolados). Dentro do filo *Zoopagomycota* foram identificadas duas classes, *Basidiobolomycetes* 0,3% (3 isolados) e *Kickxellomycetes* 0,2% (2 isolados) (Figura 3a).

51 from roots. In the cave in Itapanhoacanga, 46 isolates were recovered from the soil, 42 from rocks, 10 from the airborne particles, and 7 from leaf litter. In the Curral de Pedras cave, 147 isolates were obtained from the airborne particles, 122 from the soil, 106 from animal dung, 36 from leaf litter, and 10 from rocks. In the ferruginous caves located in Serra da Ferrugem, 106 isolates were obtained from the soil, 101 from the airborne particles, 85 from leaf litter, 51 from roots, and 18 from rocks.

Identification of isolates by ITS region sequencing

The *Ascomycota* phylum was the most predominant among the found phyla, representing 93% (824 isolates) of the total isolates, followed by *Mucoromycota* 5% (41 isolates), *Basidiomycota* 2% (17 isolates), and *Zoopagomycota* 1% (5 isolates). In the *Ascomycota* phylum, the present classes were *Eurotiomycetes* 40% (355 isolates), *Sordariomycetes* 27.2% (241 isolates), *Dothideomycetes* 22.4% (199 isolates), *Leotiomycetes* 2.4% (21 isolates), *Saccharomycetes* 0.7% (6 isolates), and 0.2% (2 isolates) could not be identified in any class (*incertae sedis*) (Figure 3a). In *Mucoromycota*, the classes found were *Mucoromycetes* 2.9% (26 isolates), *Umbelopsidomycetes* 1.4% (12 isolates), and *Mortierellomycetes* 0.3% (3 isolates) (Figure 2a). In *Basidiomycota*, the classes *Agaricomycetes* 1.1% (10 isolates), *Tremellomycetes* 0.7% (6 isolates), and *Exobasidiomycetes* 0.1% (1 isolate) were found. Within the *Zoopagomycota* phylum, two classes were identified: *Basidiobolomycetes* 0.3% (3 isolates) and *Kickxellomycetes* 0.2% (2 isolates) (Figure 3a).

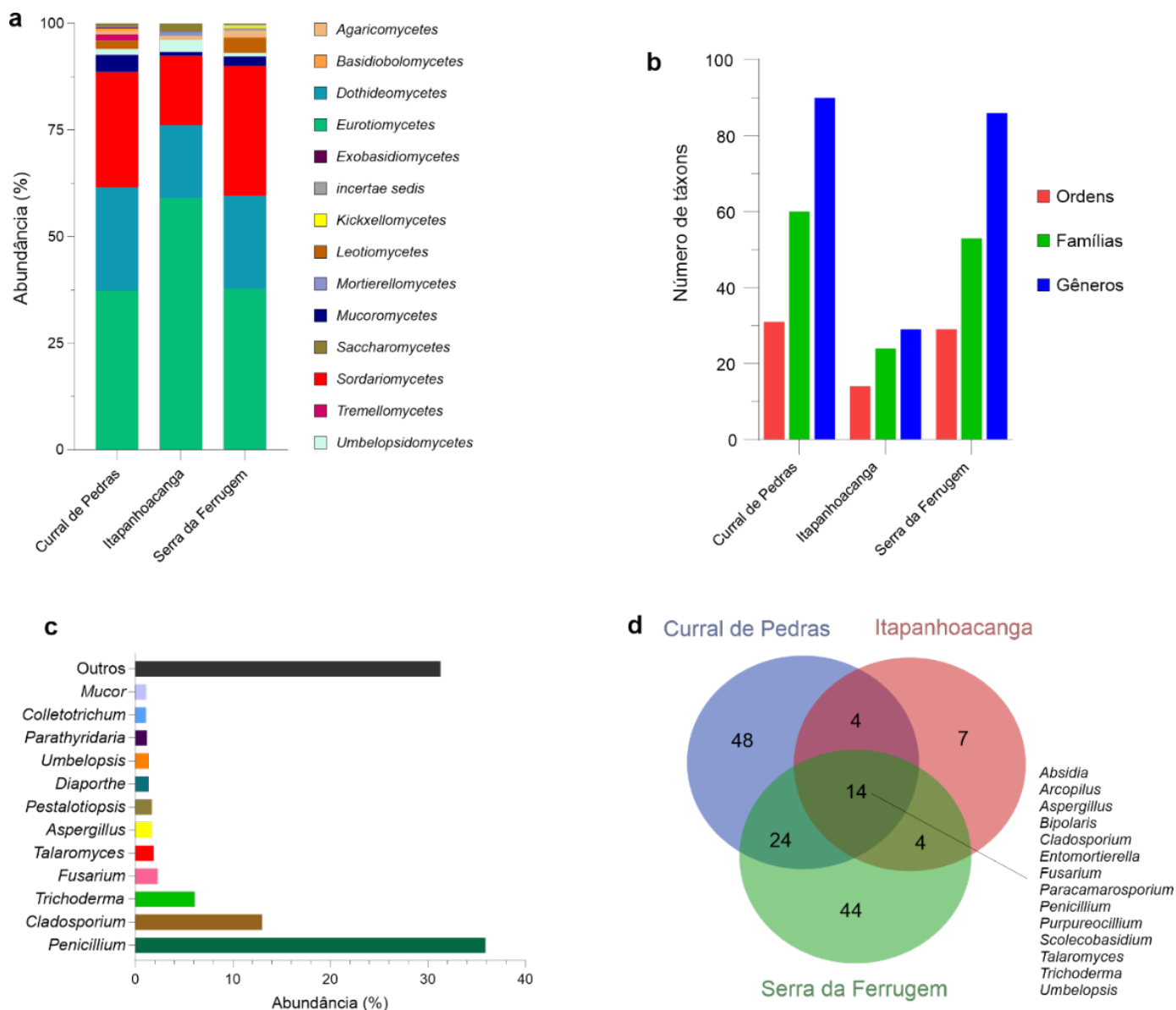


Figura 3 – Representação gráfica da riqueza de fungos de cavernas e cavidades ferruginosas da Serra do Espinhaço Meridional; a) Abundância relativa de classes de fungos encontradas; b) Número de ordens, famílias e gêneros fúngicos encontrados; c) Abundância relativa dos gêneros fúngicos mais encontrados; d) Diagrama de Venn mostrando o número de gêneros encontrados e cada localidade e aqueles compartilhados entre elas.

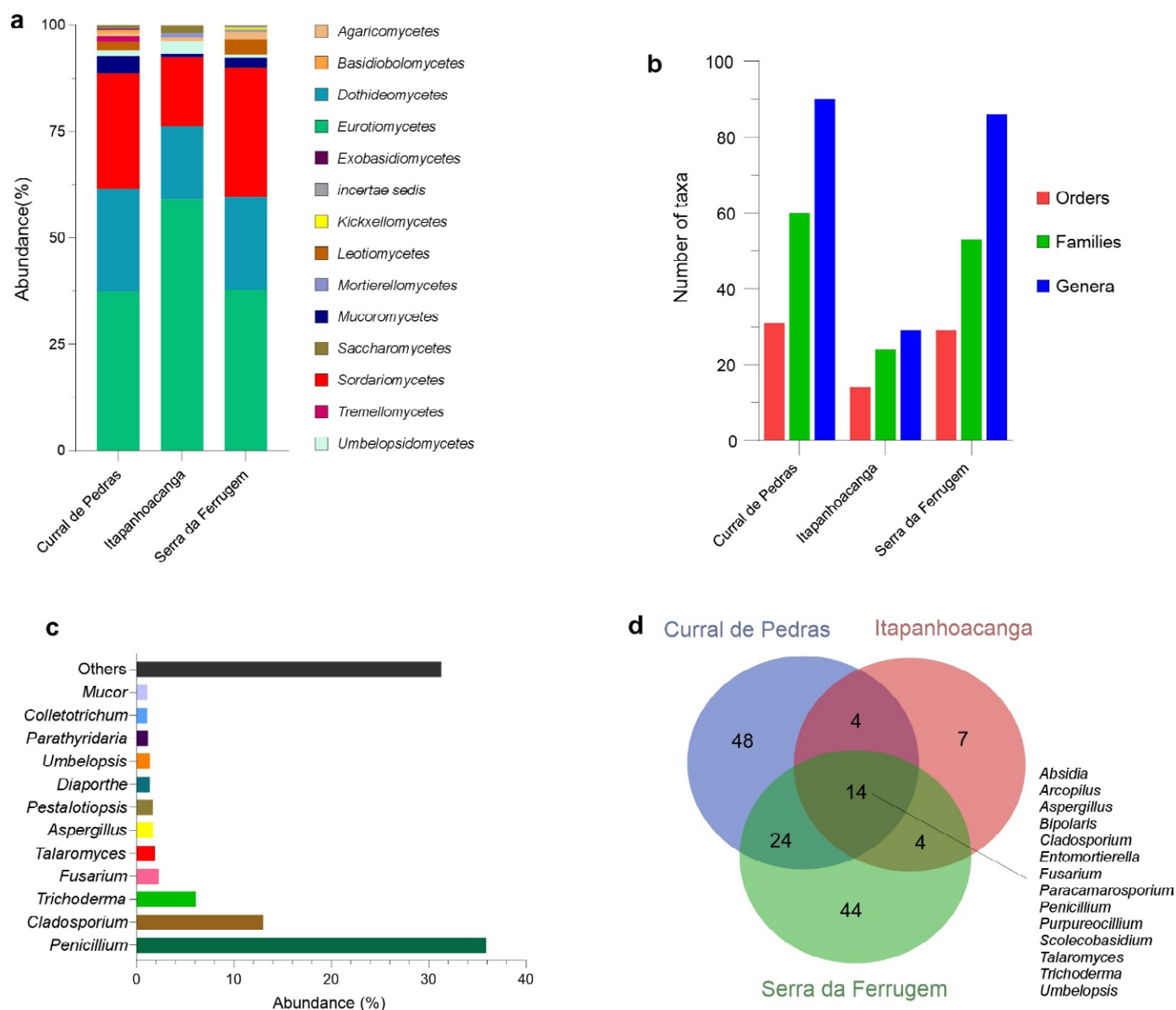


Figure 3 – Graphical representation of the fungal richness in the Southern Espinhaço Mountain Range caves; a) Relative abundance of fungal classes found; b) Number of fungal orders, families, and genera found; c) Relative abundance of the most frequently found fungal genera; d) Venn diagram showing the number of genera found in each location and those shared between them.

Na caverna Curral de Pedras, os 421 isolados foram divididos em 31 ordens, 60 famílias e 90 gêneros (Figura 3b). Na cavidade em Itapanhoacanga os 105 isolados pertencem a 14 ordens, 24 famílias e 29 gêneros (Figura 3b). Por fim, na Serra da Ferrugem, os 361 isolados foram divididos em 29 ordens, 53 famílias e 86 gêneros (Figura 3b). No total, foram encontrados 145 gêneros diferentes sendo os mais abundantes: *Penicillium* 35,9% (318 isolados), *Cladosporium* 13% (115 isolados), *Trichoderma* 6,1% (54 isolados), *Fusarium* 2,3% (20 isolados), *Talaromyces* 1,9% (17 isolados), *Aspergillus* 1,7% (15 isolados), *Pestalotiopsis* 1,7% (15 isolados), *Diaporthe* 1,4% (12 isolados), *Umbelopsis* 1,4% (12 isolados), *Parathyridaria* 1,2% (11 isolados), *Colletotrichum* 1,1% (10 isolados) e *Mucor* 1,1% (10 isolados) (Figura 2c). Outros gêneros encontrados (133 gêneros) correspondem a 31,3% (278 isolados) da abundância total (Figura 3c). Os gêneros *Absidia*, *Arcopilus*, *Aspergillus*, *Bipolaris*, *Cladosporium*, *Entomortierella*, *Fusarium*, *Paracamarosporium*, *Penicillium*, *Purpureocillium*, *Scolecobasidium*, *Talaromyces*, *Trichoderma* e *Umbelopsis* foram isolados nas três localidades amostradas (Figura 2d). Entretanto, somente *Cladosporium* e *Penicillium* foram os gêneros presentes em todos os substratos analisados nas três localidades (Figura 4).

In the Curral de Pedras cave, the 421 isolates were divided into 31 orders, 60 families, and 90 genera (Figure 3b). In the cave in Itapanhoacanga, the 105 isolates belong to 14 orders, 24 families, and 29 genera (Figure 3b). Finally, in Serra da Ferrugem, the 361 isolates were divided into 29 orders, 53 families, and 86 genera (Figure 3b). In total, 145 different genera were found, the most abundant being: Penicillium 35.9% (318 isolates), Cladosporium 13% (115 isolates), Trichoderma 6.1% (54 isolates), Fusarium 2.3% (20 isolates), Talaromyces 1.9% (17 isolates), Aspergillus 1.7% (15 isolates), Pestalotiopsis 1.7% (15 isolates), Diaporthe 1.4% (12 isolates), Umbelopsis 1.4% (12 isolates), Parathyridaria 1.2% (11 isolates), Colletotrichum 1.1% (10 isolates), and Mucor 1.1% (10 isolates) (Figure 2c). Other genera found (133 genera) correspond to 31.3% (278 isolates) of the total abundance (Figure 3c). The Absidia, Arcopilus, Aspergillus, Bipolaris, Cladosporium, Entomortierella, Fusarium, Paracamarosporium, Penicillium, Purpureocillium, Scolecobasidium, Talaromyces, Trichoderma, and Umbelopsis genera were isolated in the three sampled locations (Figure 2d). However, only Cladosporium and Penicillium were the genera present in all substrates analyzed at the three locations (Figure 4).

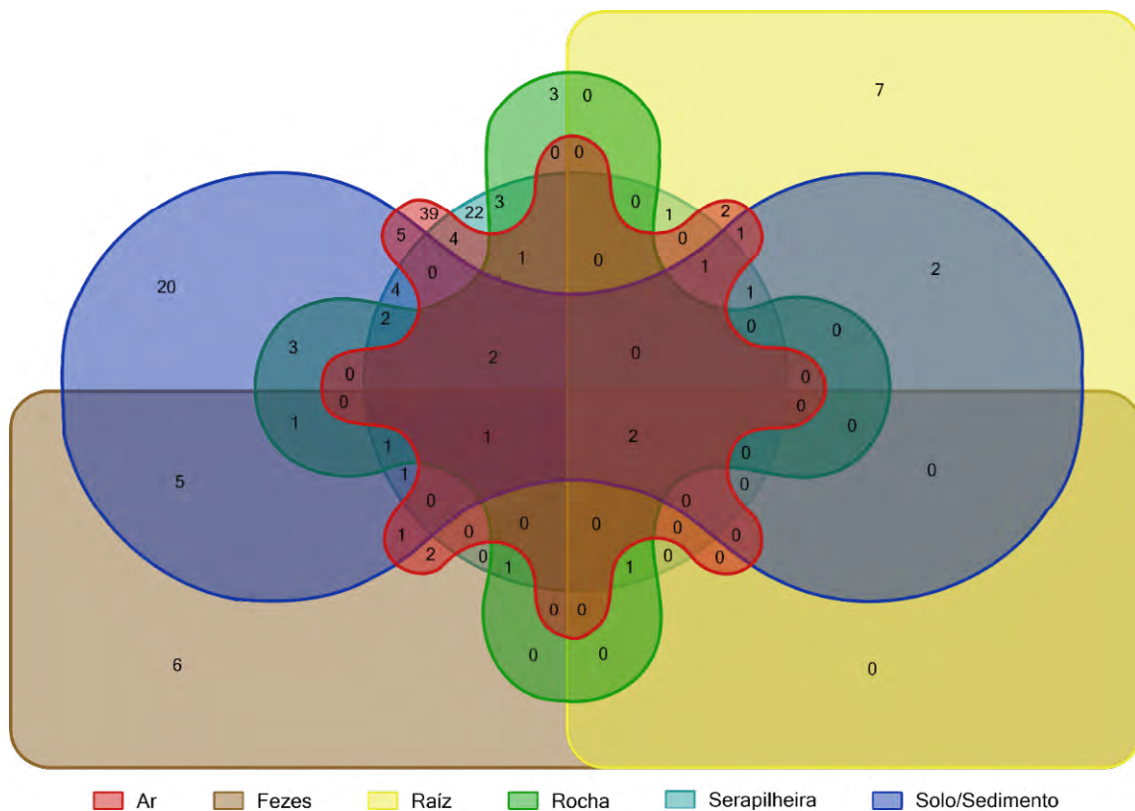


Figura 4 – Diagrama de Venn ilustrando os gêneros compartilhados e exclusivos entre os substratos analisados em todas as localidades.

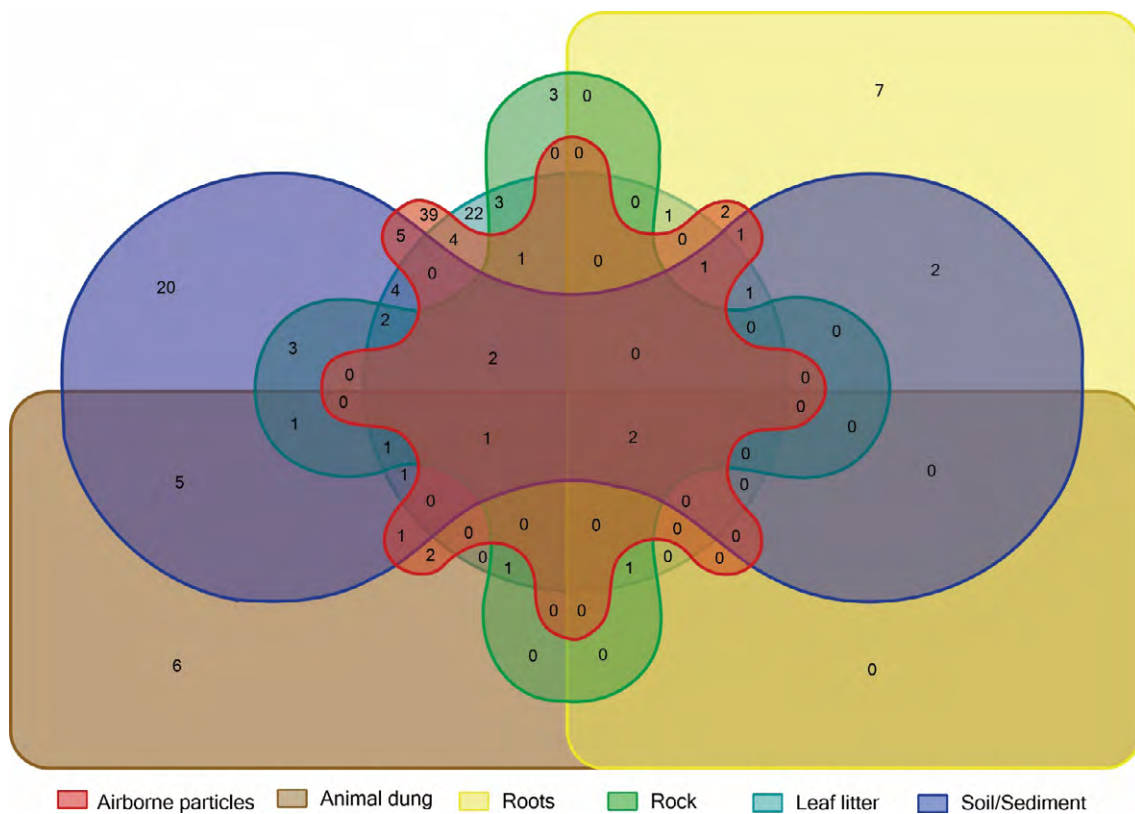


Figure 4 – Venn diagram illustrating the shared and exclusive genera among the analyzed substrates in all locations.

Análises macro e microscópicas

Análises das estruturas macro e microscópicas foram realizadas de isolados representativos de diferentes gêneros (Figura 5 e 6). Esses isolados serão descritos futuramente como novos gêneros e/ou novas espécies em revistas especializadas da área de Micologia. Dentre eles, estão novas espécies nos gêneros *Chloridium*, *Coemansia*, *Cylindromonium*, *Metapochonia* e *Sesquicillium*, além de novos gêneros nas famílias *Clavicipitaceae* e *Cordycipitaceae* e novos relatos para os gêneros *Acremonium*, *Bipolaris*, *Nigrospora* e *Purpureocillium* (Figura 6).

Macroscopic and microscopic analyses

Macroscopic and microscopic analyses were performed on isolates representative of different genera (Figures 5 and 6). These isolates will be described in the future as new genera and/or new species in specialized journals in the field of mycology. Among them are new species in the Chloridium, Coemansia, Cylindromonium, Metapochonia, and Sesquicillium genera, as well as new genera in the Clavicipitaceae and Cordycipitaceae families and new reports for the Acremonium, Bipolaris, Nigrospora, and Purpureocillium genera (Figure 6).

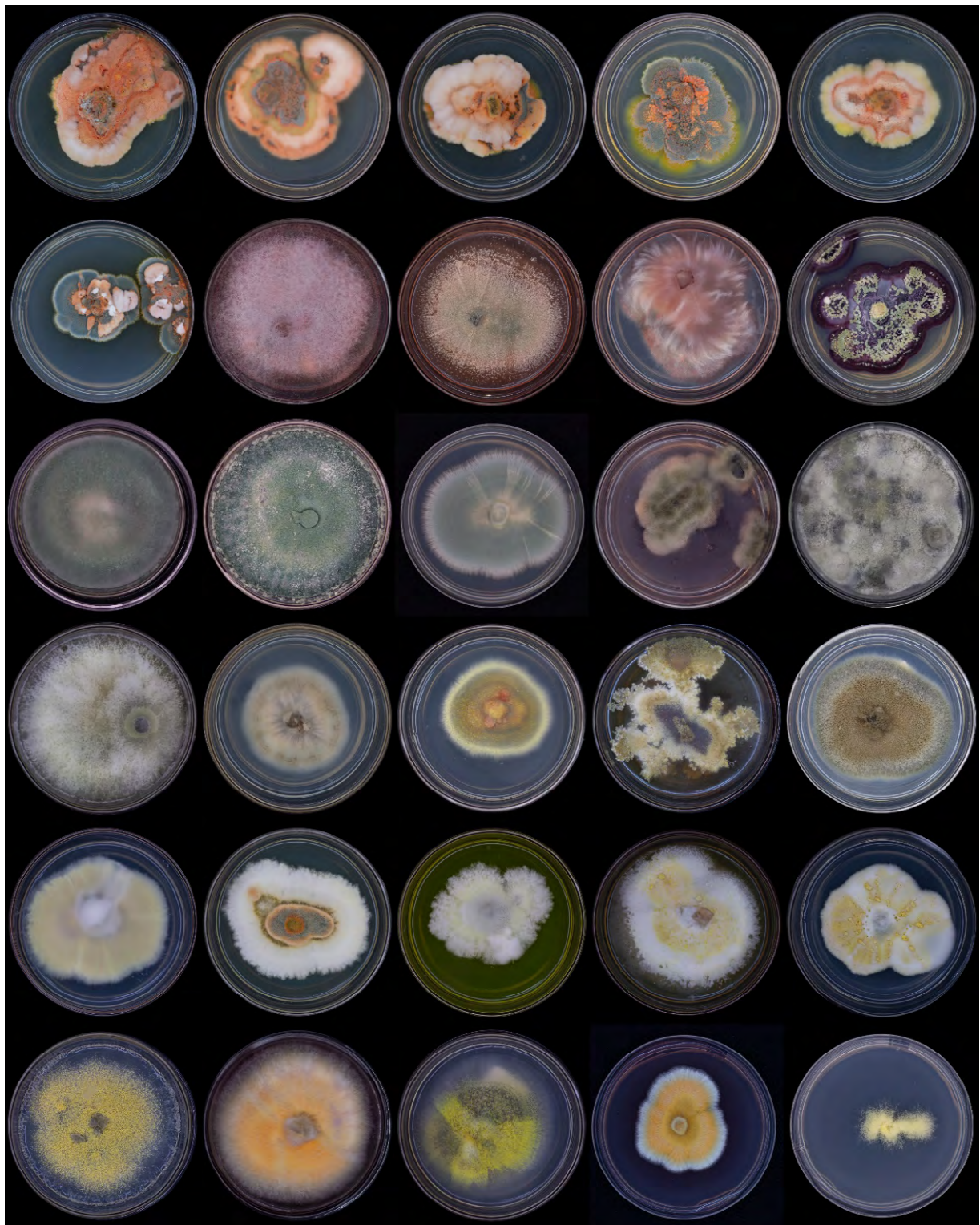


Figura 5 – Morfologia das colônias de representantes dos fungos filamentosos de cavernas e cavidades ferruginosas da Serra do Espinhaço Meridional. Colônias da esquerda para direita, de cima para baixo: *Penicillium*, *Penicillium*, *Penicillium*, *Penicillium*, *Penicillium*, *Penicillium*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Talaromyces*, *Trichoderma*, *Trichoderma*, *Stilbella*, *Parathyridaria*, *Cladosporium*, *Diaporthe*, *Arthrobotryum*, *Talaromyces*, *Cytospora*, *Cladosporium*, *Penicillium*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Arcopilus*, *Talaromyces*, *Arcopilus* e *Coemansia*.

Figure 5 – Morphology of colonies representing filamentous fungi from ferruginous caves in the Southern Espinhaço Range. Colonies from left to right, top to bottom: *Penicillium*, *Penicillium*, *Penicillium*, *Penicillium*, *Penicillium*, *Penicillium*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Talaromyces*, *Trichoderma*, *Trichoderma*, *Stilbella*, *Parathyridaria*, *Cladosporium*, *Diaporthe*, *Arthrobotryum*, *Talaromyces*, *Cytospora*, *Cladosporium*, *Penicillium*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Arcopilus*, *Talaromyces*, *Arcopilus*, and *Coemansia*.

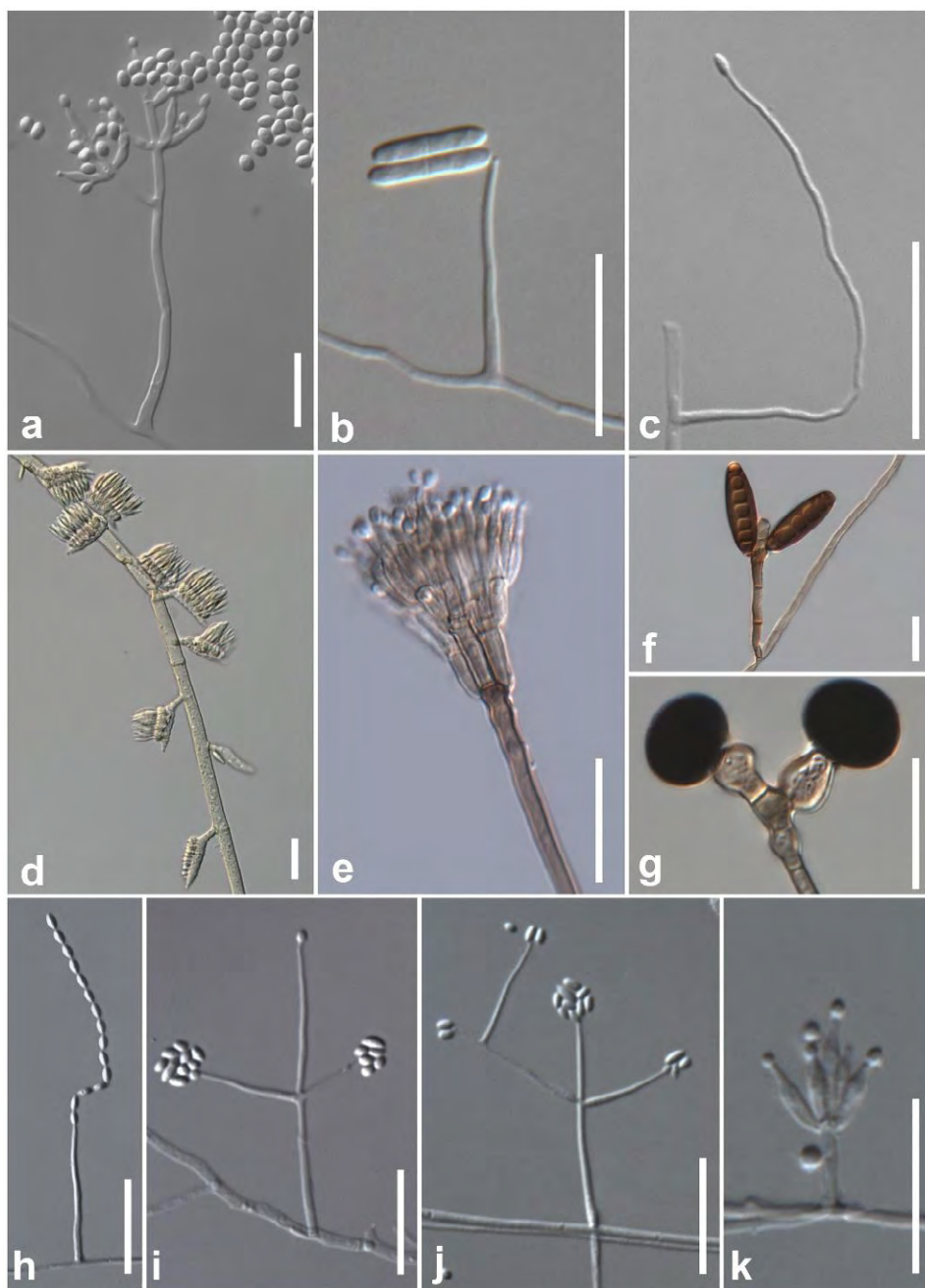


Figura 6 – Estruturas microscópicas de representantes dos fungos filamentosos isolados de cavernas e cavidades ferruginosas da Serra do Espinhaço Meridional. a) Conidióforo e conídios de *Sesquicillium* sp.; b) Conidióforo e conídios de *Cylindromonium* sp.; c) Conidióforo e conídio de um isolado da família *Clavicipitaceae*; d) Esporangióforo de *Coemansia* sp. com esporocládios, pseudofialídes e esporangiósporos; e) Conidióforo e conídios de *Chloridium* sp.; f) Conidióforo e conídios de *Bipolaris* sp.; g) Conidióforo e conídios de *Nigrospora* sp.; h) Conidióforo e conídios em cadeia de *Acremonium* sp.; i) Conidióforo e conídios de *Metapochonia* sp.; j) Conidióforo e conídios de isolado da família *Cordycipitaceae*; k) Conidióforo e conídios de *Purpureocillium* sp. Barras de escala = 20 μm.

Figure 6 – Microscopic structures representatives of filamentous fungi isolated from caves in the Southern Espinhaço Range. a) Conidiophore and conidia of *Sesquicillium* sp.; b) Conidiophore and conidia of *Cylindromonium* sp.; c) Conidiophore and conidia of an isolate from the *Clavicipitaceae* family; d) Sporangiophore of *Coemansia* sp. with sporocladia, pseudofialides, and sporangiospores; e) Conidiophore and conidia of *Chloridium* sp.; f) Conidiophore and conidia of *Bipolaris* sp.; g) Conidiophore and conidia of *Nigrospora* sp.; h) Conidiophore and conidia in a chain of *Acremonium* sp.; i) Conidiophore and conidia of *Metapochonia* sp.; j) Conidiophore and conidia of an isolate from the *Cordycipitaceae* family; k) Conidiophore and conidia of *Purpureocillium* sp. Scale bars = 20 μm.

DISCUSSÃO

Nesse estudo, relatamos a presença de 145 gêneros distintos de fungos em cavernas e cavidades ferruginosas da Serra do Espinhaço Meridional, sendo os gêneros *Penicillium* e *Cladosporium* os mais abundantes nas três localidades. De fato, o gênero *Penicillium* é o mais relatado em cavernas em todo o mundo (Vanderwolf *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2021), incluindo cavernas brasileiras (Alves *et al.*, 2022). Em um estudo sobre fungos presentes em sedimento da caverna ferruginosa RM3 em Nova Lima, Minas Gerais, foram encontrados em maior abundância os gêneros *Aspergillus* e *Penicillium*, especialmente na região semi-fótica da caverna (Taylor *et al.*, 2014). Eles também estiveram entre os mais abundantes em estudos micológicos nas cavernas Abrigo do Letreiro, Rio Grande do Norte e Gruta Meu Rei, Pernambuco, ambas localizadas na Caatinga (Alves *et al.*, 2022; Cunha *et al.*, 2020). Nas cavidades analisadas neste estudo, foi verificada uma elevada abundância de isolados do gênero *Penicillium*, representando 35,9% (318 isolados) do total. Por outro lado, isolados identificados como *Aspergillus* representaram apenas 1,7% (15 isolados) de toda a amostragem. Já o gênero *Cladosporium* foi particularmente abundante em amostras do ar com 70 isolados identificados, corroborando com resultados de Pereira *et al.*, (2022) que encontraram uma elevada riqueza de espécies de *Cladosporium*, incluindo espécies novas, na *bat cave* Furna do Morcego, em Pernambuco. O gênero *Trichoderma* foi o terceiro mais representativo nas amostras coletadas, de forma similar a outros resultados em cavernas na China e Montenegro (Kozlova & Mazina, 2020; Zhang *et al.*, 2021).

Dentro das cavernas, o solo e fezes/guano são substratos que geralmente apresentam uma elevada quantidade de isolados fúngicos (Taylor

DISCUSSION

*In this study, the presence of 145 distinct genera of fungi were reported in the ferruginous caves in the Southern Espinhaço Range, with the *Penicillium* and *Cladosporium* genera being the most abundant in the three locations. In fact, the *Penicillium* genus is the most commonly reported in caves worldwide (Vanderwolf *et al.* 2013; Zhang *et al.* 2021), including Brazilian caves (Alves *et al.* 2022). In a study on fungi present in sediment from the ferruginous cave RM3 in Nova Lima, Minas Gerais, the *Aspergillus* and *Penicillium* genera were found in greater abundance, especially in the semi-photoc region of the cave (Taylor *et al.* 2014). They were also among the most abundant in mycological studies in the Abrigo do Letreiro cave in Rio Grande do Norte and the Gruta Meu Rei cave in Pernambuco, both located in the Caatinga (Alves *et al.* 2022; Cunha *et al.* 2020). In the caves analyzed in this study, a high abundance of isolates of the *Penicillium* genus was found, representing 35.9% (318 isolates) of the total. On the other hand, isolates identified as *Aspergillus* represented only 1.7% (15 isolates) of the entire sample. The genus *Cladosporium* was particularly abundant in airborne particles samples with 70 identified isolates, corroborating the results of Pereira *et al.* (2022), who found a high species richness of *Cladosporium*, including new species, in the Furna do Morcego bat cave in Pernambuco. The *Trichoderma* genus was the third most representative in the collected samples, similar to other results in caves in China and Montenegro (Kozlova & Mazina, 2020; Zhang *et al.* 2021).*

*Inside caves, soil and feces/guano are substrates that generally present a high amount of fungal isolates (Taylor *et al.* 2013; Cunha *et al.* 2020; Kozlova & Mazina, 2020; Zhang *et al.* 2021; Alves *et al.* 2022). In this study, the two substrates accounted for more than 40% of the obtained isolates. Both*

et al. 2013; Cunha et al. 2020; Kozlova & Mazina, 2020; Zhang et al., 2021; Alves et al., 2022). Neste estudo, os dois substratos foram responsáveis por mais de 40% dos isolados obtidos. Ambos possuem elevados teores de matéria orgânica, e a decomposição desse carbono orgânico disponível é fundamental para o crescimento fúngico, e manutenção do ecossistema cavernícola (Adetutu et al., 2011; Biagioli et al., 2024). Aproximadamente 75% dos isolados dos filos *Basidiomycota*, *Mucoromycota* e *Zoopagomycota* vieram dessas amostras (47 isolados do total de 63), demonstrando a preferência de espécies desses filos por substratos mais ricos em material orgânico (Vanderwolf et al., 2013; Zhang et al., 2021). As amostras de fezes foram as únicas que tiveram isolados distribuídos nos quatro filos encontrados neste trabalho (*Ascomycota*, *Basidiomycota*, *Mucoromycota* e *Zoopagomycota*). O guano geralmente é um substrato cavernícola relacionada a fungos patogênicos, como *Histoplasma capsulatum* (Silva et al., 2013; Cunha et al., 2020). Entretanto, também se apresenta como um substrato com potencial para a descoberta de novas espécies e gêneros de fungos, como foi *Parahumicola guana* (novo gênero e espécie) descrito por Condé et al., (2023) em guano de morcego na Gruta Monte Cristo, em Diamantina. As amostras de esporos presentes no ar resultaram na segunda maior quantidade de isolados (258 isolados) dentre os substratos analisados. Aproximadamente 60% dos isolados se agruparam nos gêneros *Cladosporium* e *Penicillium*, sendo também estes os gêneros mais presentes em estudos de fungos anemófilos no interior de cavernas (Zhang et al., 2017; Cunha et al. 2020; Pereira et al., 2022).

A serrapilheira foi o único substrato analisado em que não ocorreu uma prevalência de isolados identificados na ordem *Eurotiales*, no qual está in-

have high levels of organic matter, and the decomposition of this available organic carbon is essential for fungal growth and maintenance of the cave ecosystem (Adetutu et al. 2011; Biagioli et al. 2024). Approximately 75% of the isolates from the *Basidiomycota*, *Mucoromycota*, and *Zoopagomycota* phyla came from these samples (47 isolates out of a total of 63), demonstrating the species from these phyla's preference for substrates richer in organic material (Vanderwolf et al. 2013; Zhang et al. 2021). The feces samples were the only ones that had isolates distributed across the four phyla found in this study (*Ascomycota*, *Basidiomycota*, *Mucoromycota*, and *Zoopagomycota*). Zhang et al. 2021). Guano is generally a cavernicolous substrate related to pathogenic fungi, such as *Histoplasma capsulatum* (Silva et al. 2013; Cunha et al. 2020). However, it also presents itself as a substrate with potential for the discovery of new species and genera of fungi, such as *Parahumicola guana* (new genus and species) described by Condé et al. (2023) in bat guano in the Monte Cristo Cave in Diamantina. The spore samples present in the air resulted in the second largest number of isolates (258 isolates) among the analyzed substrate. Approximately 60% of the isolates were grouped into the *Cladosporium* and *Penicillium* genera, which are also the most prevalent genera in studies of anemophilous fungi inside caves (Zhang et al. 2017; Cunha et al. 2020; Pereira et al. 2022).

The leaf litter was the only substrate analyzed in which there was no prevalence of isolates identified in the *Eurotiales* order, which includes the *Penicillium* genus. The *Hypocreales* order was the most representative, including genera such as *Trichoderma*, *Clonostachys*, *Fusarium*, *Calonectria*, among others. Leaf litter was the substrate with the highest incidence of unique genera among the analyzed substrates, with 39 genera reported only in this

serido o gênero *Penicillium*. A ordem *Hypocreales* foi a mais representativa, incluindo gêneros como *Trichoderma*, *Clonostachys*, *Fusarium*, *Calonectria*, entre outros. A serrapilheira foi o substrato com a maior incidência de gêneros únicos entre os substratos analisados, com 39 gêneros relatados somente nesse substrato. Entre eles estão os gêneros *Beltraniella*, *Castanediella*, *Codinaea*, *Coemansia*, *Melnikomyces*, *Subramaniomyces*, *Vermiculariopsiella*, *Zygosporium*, entre outros, que ainda não haviam sido relatados em ambientes cavernícolas (Vanderwolf et al., 2013; Zhang et al., 2021). O isolamento desses gêneros ocorreu devido à metodologia de isolamento utilizada, na qual uma condição de umidade elevada é criada para que favoreça os fungos e a produção de suas estruturas reprodutivas (Castañeda-Ruiz et al., 2005). A serrapilheira cavernícola também pode ser fonte de novas espécies fúngicas, até o presente momento, a espécie *Chaetomium meridionalense* (Condé et al., 2023) foi a única descrita a partir de amostras de serrapilheira coletadas dentro de cavernas da Serra do Espinhaço Meridional.

Nas raízes, foram encontrados a maior quantidade de gêneros pertencentes ao filo *Basidiomycota*, com 5 registros (*Bjerkandera*, *Fomitopsis*, *Irpex*, *Pseudophlebia* e *Peniophora*). Outros gêneros de *Basidiomycota* já relatados no Brasil incluem *Irpex*, *Rhodotorula*, *Schizophyllum*, *Sympodiomyces*, *Tritirachium*, *Trametes*, dentre outros, em amostras de ar e sedimento em cavernas da Caatinga (Alves et al., 2022; Cunha et al., 2020). Além disso, foi observado a ocorrência de 7 gêneros exclusivos em relação aos outros substratos, incluindo *Hyphodiscus*, *Rhizodermea* e *Selenodriella* que nunca haviam sido relatados em cavernas no mundo todo (Vanderwolf et al., 2013; Zhang et al., 2021).

substrate. Among them are the genera *Beltraniella*, *Castanediella*, *Codinaea*, *Coemansia*, *Melnikomyces*, *Subramaniomyces*, *Vermiculariopsiella*, *Zygosporium*, among others, which had not yet been reported in cave environments (Vanderwolf et al. 2013; Zhang et al. 2021). The isolation of these genera occurred due to the isolation methodology used, in which a condition of high humidity is created to favor fungi and the production of their reproductive structures (Castañeda-Ruiz et al. 2005). Cave litter can also be a source of new fungal species. To this date, *Chaetomium meridionalense* species (Condé et al. 2023) has been the only one described from litter samples collected inside caves in the Southern Espinhaço Range.

The roots contained the largest number of genera belonging to the *Basidiomycota* phylum, with five records (*Bjerkandera*, *Fomitopsis*, *Irpex*, *Pseudophlebia*, and *Peniophora*). Other genera of *Basidiomycota* already reported in Brazil include *Irpex*, *Rhodotorula*, *Schizophyllum*, *Sympodiomyces*, *Tritirachium*, *Trametes*, among others, in airborne particles and sediment samples in caves in the Caatinga (Alves et al. 2022; Cunha et al. 2020). In addition, seven genera exclusive to these substrates were observed, including *Hyphodiscus*, *Rhizodermea*, and *Selenodriella*, which had never been reported in caves worldwide (Vanderwolf et al. 2013; Zhang et al. 2021).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As cavernas são ambientes subterrâneos com características particulares, tais como ausência parcial ou total de luz, alta umidade, temperatura amena e constante, e que abrigam uma grande diversidade de fungos. Apesar da relativa oligotrofia presente nesses ambientes, principalmente devido à ausência de fotossíntese em zonas afóticas, o acúmulo de matéria orgânica alóctone, tais como deposição de fezes de animais, material vegetal em decomposição (serrapilheira) e raízes de plantas, são importantes fontes de carbono para a manutenção desses ecossistemas subterrâneos, onde os fungos desempenham um papel vital na decomposição desses materiais, alimentando níveis tróficos superiores na teia alimentar do ecossistema cavernícola. Neste estudo, identificamos uma elevada diversidade de fungos que irá contribuir para expandir as estimativas desses organismos no nosso planeta. Além disso, evidenciamos que as cavernas e cavidades aqui estudadas são verdadeiros *hotspots* de diversidade fúngica, e que a conservação desses ambientes é de extrema importância para a manutenção da comunidade fúngica presente nesses locais.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho faz parte do projeto "Taxonomia e filogenia molecular de fungos em cavernas ferríferas entre as regiões de Conceição do Mato Dentro e Serro, Minas Gerais" financiado através do Edital de Chamada Pública 01/2021, Inciso XXI da Cláusula Segunda do TCCE nº. 01/2018/ICMBio. O TCCE ICMBio/Vale nº. 01/2018 é um termo de compromisso de compensação espeleológica firmado entre a Vale S.A. e o Instituto Chico Mendes de Conservação para a Biodiversidade (ICMBio),

FINAL REMARKS

Caves are underground environments with particular characteristics, such as partial or total absence of light, high humidity, mild and constant temperature, harboring a wide diversity of fungi. Despite the relative oligotrophy present in these environments, mainly due to the absence of photosynthesis in aphotic zones, the accumulation of allochthonous organic matter, such as animal feces, decomposing plant litter, and plant roots, are important sources of carbon for the maintenance of these underground ecosystems, where fungi play a vital role in the decomposition of these materials, feeding higher trophic levels in the food web of the cave ecosystem. In this study, a high diversity of fungi was identified, what will contribute to expanding estimates of these organisms on our planet. In addition, it was shown that the caves studied here are true hotspots of fungal diversity, and that the conservation of these environments is extremely important for maintaining the fungal community present in these locations.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is part of the project "Taxonomy and molecular phylogeny of fungi in iron-rich caves between the regions of Conceição do Mato Dentro and Serro, Minas Gerais," funded through Public Call 01/2021, Item XXI of Clause Two of TCCE No. 01/2018/ICMBio. The TCCE ICMBio/Vale No. 01/2018 is a speleological compensation agreement signed between Vale S.A. and the Instituto Chico Mendes de Conservação para a Biodiversidade (ICMBio), with operational management carried out by the Instituto Brasile-

com gestão operacional realizada pelo Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS). Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e a Fundação Arthur Bernardes (FUNARBE/FUNARDOC) pelo apoio financeiro.

iro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS). Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES; Financing Code 001), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) and the Fundação Arthur Bernardes (FUNARBE/FUNARDOC) for their financial support.

REFERÊNCIAS / REFERENCES

- ADETUTU, E. M.; THORPE, K.; BOURNE, S.; CAO, X.; SHAHSAVARI, E.; KIRBY, G.; BALL, A. S. Phylogenetic diversity of fungal communities in areas accessible and not accessible to tourists in Naracoorte Caves. *Mycologia*, v. 103, n. 5, p. 959-968, 2011.
- ALMEIDA, M. DE A.; ALMEIDA-SILVA, F.; GUIMARÃES, A. J.; ALMEIDA-PAES, R.; ZANCOPÉ-OLIVEIRA, R. M. The occurrence of histoplasmosis in Brazil: A systematic review. *International Journal of Infectious Diseases*, v. 86, p. 147–156, 2019.
- ALVES, V. C. S.; LIRA, R. A.; LIMA, J. M. S.; BARBOSA, R. N.; BENTO, D. M.; BARBIER, E.; BERNARD, E.; SOUZA-MOTTA, C. M.; BEZERRA, J. D. P. Unravelling the fungal darkness in a tropical cave: richness and the description of one new genus and six new specie. *Fungal Systematics and Evolution*, 2022.
- BIAGIOLI, F.; COLEINE, C.; DELGADO-BAQUERIZO, M.; FENG, Y.; SAIZ-JIMENEZ, C.; SELBMANN, L. Outdoor climate drives diversity patterns of dominant microbial taxa in caves worldwide. *Science of The Total Environment*, v. 906, 167674, 2024.
- CARVALHO, J. L. V. R.; LIMA, J. M. S.; BARBIER, E.; BERNARD, E.; BEZERRA, J. D. P.; SOUZA-MOTTA, C. M. Ticket to ride: fungi from bat ectoparasites in a tropical cave and the description of two new species. *Braz J Microbiol.*, 2022.
- CASTAÑEDA-RUIZ, R. F.; STADLER, M.; SAIKAWA, M.; ITURRIAGA, T.; DECOCK, C.; HEREDIA, G. Microfungi from submerged plant material: *Zelotriadelphia amoena* gen. et sp. nov. and *Vanakripa fasciata* sp. nov. *Mycotaxon*, v. 91, p. 339–345, 2005.
- CASTRILLÓN, A. L.; MORAES, M. A. P.; FURTADO, M. DO S. S. Isolamento de *Microsporium amazonicum* do solo do Estado do Amazonas, Brasil. *Acta Amaz.*, v. 6, p. 487–490, 1976.
- CONDÉ, T. O.; LEÃO, A. F.; DUTRA, Y. L. G.; ROSADO, A. W. C.; NEVES, S. DE C.; FRAGA, L. M. S.; KASUYA, M. C. M.; PEREIRA, O. L. Shedding light on the darkness: a new genus and four new species in the family

Chaetomiaceae from Brazilian neotropical caves revealed by multi-gene phylogenetic analyses. *Mycological Progress*, v. 22, p. 49, 2023.

CUNHA, A. O. B.; BEZERRA, J. D. P.; OLIVEIRA, T. G. L.; BARBIER, E.; BERNARD, E.; MACHADO, A. R.; SOUZA-MOTTA, C. M. Living in the dark: Bat caves as hotspots of fungal diversity. *PLoS ONE*, v. 15, e0243494, 2020.

DIAS, M. A. G.; OLIVEIRA, R. M. Z.; GIUDICE, M. C.; NETTO, H. M.; JORDÃO, L. R.; GRIGORIO, I. M.; ROSA, A. R.; AMORIM, J.; NOSANCHUK, J. D.; TRAVASSOS, L. R.; TABORDA, C. P. Isolation of *Histoplasma capsulatum* from bats in the urban area of São Paulo State, Brazil. *Epidemiol. Infect.*, v.139, p. 1642–1644, 2011.

DIAS, T. H.; MADEIRA FILHO, W. PROJETO MINAS-RIO NO ENTORNO DO MONUMENTO NATURAL SERRA DA FERRUGEM. *CES* 35, 2020.

DUTRA, Y. L. G.; ROSADO, A. W. C.; CONDÉ, T. O.; LEÃO, A. F.; NEVES, S. D. C.; FRAGA, L. M. S.; KASUYA, M. C. M.; PEREIRA, O. L. Two new *Cladosporium* species from a quartzite cave in Brazil. *Braz J Microbiol*, v. 54, p. 3021–3031, 2023.

HAWKSWORTH, D. L.; LÜCKING, R. Fungal Diversity Revisited: 2.2 to 3.8 Million Species. *Microbiol Spectr*, v. 5, 5.4.10, 2017.

JOSHI, S. R.; CHETTRI, U. Fungi in Hypogean Environment: Bioprospection Perspective, in: Satyanarayana, T.; Deshmukh, S.K.; Deshpande, M.V. (Eds.), *Advancing Frontiers in Mycology & Mycotechnology*. Springer Singapore, Singapore, pp. 539–561, 2019.

KOZLOVA, E. V.; MAZINA, S. E. Biodiversity of Fungi in the photic and aphotic zones of Montenegro caves. *Aerobiologia*, v. 36, p. 589–604, 2020.

KUZMINA, L. Y.; GALIMZIANOVA, N. F.; ABDULLIN, S. R.; RYABOVA, A. S. Microbiota of the Kinderlinskaya cave (South Urals, Russia). *Microbiology*, v. 81, p. 251–258, 2012.

LEÃO, A. F.; CONDÉ, T. O.; DUTRA, Y. L. G.; ROSADO, A. W. C.; GRAZZIOTTI, P. H.; DE CARVALHO NEVES, S.; FRAGA, L. M. S.; KASUYA, M. C. M.; PEREIRA, O. L. *Amphichorda monjolensis* sp. nov.; a new fungal species isolated from a Brazilian limestone cave, with an update on acremonium-like species in *Bionectriaceae*. *Braz J Microbiol*, 2024.

LEÃO-FERREIRA, S. M.; PASCHOLATI GUSMÃO, L. F.; CASTAÑEDA RUIZ, R. F. Conidial fungi from the semi-arid Caatinga biome of Brazil. Three new species and new records. *nova_hedwigia*, 96, 479–494, 2013.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Anuário estatístico do patrimônio espeleológico brasileiro*. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, 2025. Disponível em: < <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cavernas/anuario-estatistico-do-patrimonio-espeleologico-brasileiro/cecav-anuario-estatistico-espeleologico-2023-24.pdf> >. Acesso em: 26 jun. 2025.

NISKANEN, T.; LÜCKING, R.; DAHLBERG, A.; GAYA, E.; SUZ, L. M.; MIKRYUKOV, V.; LIIMATAINEN, K.; DRUZHININA, I.; WESTRIP, J. R. S.; MUELLER, G. M.; MARTINS-CUNHA, K.; KIRK, P.; TEDERSOO, L.; ANTO-

NELLI, A. Pushing the Frontiers of Biodiversity Research: Unveiling the Global Diversity, Distribution, and Conservation of Fungi. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, v. 48, p. 149–176, 2023.

NOVÁKOVÁ, A.; KUBÁTOVÁ, A.; SKLENÁŘ, F.; HUBKA, V. Microscopic fungi on cadavers and skeletons from cave and mine environments. *Czech Mycol.*, v. 70, p. 101–121, 2018.

OLIVEIRA, J. A.; CUSTÓDIO, F. A.; PEREIRA, O. L. Cultivable root endophytic fungi associated with *Acrocomia aculeata* and its antagonistic activity against phytopathogenic oomycetes. *Brazilian J Microbiol.*, 2024.

PEREIRA, M. L. S.; CARVALHO, J. L. V. R.; LIMA, J. M. S.; BARBIER, E.; BERNARD, E.; BEZERRA, J. D. P.; SOUZA-MOTTA, C. M. Richness of *Cladosporium* in a tropical bat cave with the description of two new species. *Mycol Progress*, v. 21, p. 345–357, 2022.

PINHO, D. B.; FIRMINO, A. L.; FERREIRA-JUNIOR, W. G.; PEREIRA, O. L. An efficient protocol for DNA extraction from *Meliolales* and the description of *Meliola centellae* sp. nov. *Mycotaxon*, v. 122, p. 333–345, 2013.

ROCHA-SILVA, F.; FIGUEIREDO, S. M.; SILVEIRA, T. T. S.; ASSUNÇÃO, C. B.; CAMPOLINA, S. S.; PENA-BARBOSA, J. P. P.; ROTONDO, A.; CALIGIORNE, R. B. Histoplasmosis outbreak in Tamboril cave—Minas Gerais state, Brazil. *Medical Mycology Case Reports*, v. 4, p. 1–4, 2014.

SHARMA, L.; SOUSA, M.; FARIA, A.S.; NUNES-PEREIRA, M.; CABRAL, J. A.; PHILLIPS, A. J. L.; MARQUES, G.; PAIVA-CARDOSO, M. DAS N. Worldwide recombination in emergent white-nose syndrome pathogen *Pseudogymnoascus destructans* (preprint). *Ecology*, 2019.

SILVA, F. R.; FIGUEIREDO, S. M.; SILVEIRA, T. T. S.; ASSUNÇÃO, C. B.; CAMPOLINA, S. S.; PENA-BARBOSA, J. P. P.; ROTONDO, A.; CALIGIORNE, R. B. Histoplasmosis outbreak in Tamboril cave – Minas Gerais state, Brazil. *Medical Mycology Case Reports*, v. 4, p. 1–4, 2014.

TAYLOR, E.; RESENDE STOIANOFF, M.; LOPES FERREIRA, R. Mycological study for a management plan of a neotropical show cave (Brazil). *IJS*, v. 42, p. 267–277, 2013.

TAYLOR, E. L. S.; FERREIRA, R. L.; CARDOSO, P. G.; STOIANOFF, M. A. D. R. Cave Entrance dependent Spore Dispersion of Filamentous Fungi Isolated from Various Sediments of Iron Ore Cave in Brazil: a colloquy on human threats whilecaving. *AMBIENT SCIENCE*, v. 1, p. 16–28, 2014.

TEDERSOO, L.; BAHRAM, M.; PÖLME, S.; KÖLJALG, U.; YOROU, N. S.; WIJESUNDERA, R.; RUIZ, L. V.; VASCO-PALACIOS, A. M.; THU, P. Q.; SUIJA, A.; SMITH, M. E.; SHARP, C.; SALUVEER, E.; SAITTA, A.; ROSAS, M.; RIIT, T.; RATKOWSKY, D.; PRITSCH, K.; PÖLDMAA, K.; PIEPENBRING, M.; PHOSRI, C.; PETERSON, M.; PARTS, K.; PÄRTEL, K.; OTSING, E.; NOUHRA, E.; NJOUONKOU, A. L.; NILSSON, R. H.; MORGADO, L. N.; MAYOR, J.; MAY, T. W.; MAJUAKIM, L.; LODGE, D. J.; LEE, S. S.; LARSSON, K.-H.; KOHOUT, P.; HOSAKA, K.; HIIESALU, I.; HENKEL, T. W.; HAREND, H.; GUO, L.; GRESLEBIN, A.; GRELET, G.; GEML, J.; GATES, G.; DUNSTAN, W.; DUNK, C.; DRENKHAN, R.; DEARNALEY, J.; DE KESEL, A.; DANG, T.; CHEN, X.; BUEGGER, F.; BREARLEY, F. Q.; BONITO, G.; ANSLAN, S.; ABELL, S.; ABARENKOV, K. Global diversity and geography of soil fungi. *Science*, v. 346, 1256688, 2014.

TUITE, J. Plant pathological methods. Fungi and bacteria. *Burgess Publishing Company*, 1969.

VANDERWOLF, K.; MALLOCH, D.; MCALPINE, D.; FORBES, G. A world review of fungi, yeasts, and slime molds in caves. *IJS*, v. 42, p. 77–96, 2013.

VILGALYS, R.; HESTER, M. Rapid genetic identification and mapping of enzymatically amplified ribosomal DNA from several *Cryptococcus* species. *J Bacteriol*, v. 172, p. 4238–4246, 1990.

WHITE, T.J.; BRUNS, T.; LEE, S.; TAYLOR, J. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. *PCR protocols: a guide to methods and applications*, v. 18, p. 315–322, 1990.

WISESCHART, A.; POOTANAKIT, K. Metagenomic-based approach to a comprehensive understanding of cave microbial diversity, in: De Mandal, S.; Bhatt, P. (Eds.), *Recent Advancements in Microbial Diversity*. *Academic Press*, p. 561–586, 2020.

ZHANG, Z. F.; LIU, F.; ZHOU, X.; LIU, X. Z.; LIU, S. J.; CAI, L. Culturable mycobiota from Karst caves in China, with descriptions of 20 new species. *Persoonia*, v. 39, p. 1–31, 2017.

ZHANG, Z. -F.; ZHOU, S. -Y.; EURWILAICHITR, L.; INGSRISWANG, S.; RAZA, M.; CHEN, Q.; ZHAO, P.; LIU, F.; CAI, L. Culturable mycobiota from Karst caves in China II, with descriptions of 33 new species. *Fungal Diversity*, v. 106, p. 29–136, 2021.

DAS CAVERNAS À ESCOLA: IMPLEMENTAÇÃO COMPLETA DE UMA PROPOSTA EDUCACIONAL INTERDISCIPLINAR BASEADA NO LUGAR PARA GEOCONSERVAÇÃO E DIVULGAÇÃO ESPELEOLÓGICA

FROM CAVES TO SCHOOL: FULL IMPLEMENTATION OF A PLACE-BASED INTERDISCIPLINARY EDUCATIONAL PROPOSAL FOR GEOCONSERVATION AND SPELEOLOGICAL DISSEMINATION

Daniel De Stefano Menin

Universidade de São Paulo (IGc-USP),
Instituto de Geociências
E-mail: danielmenin@gmail.com

RESUMO

Utilizando as cavernas como tema gerador interdisciplinar baseado no lugar, este artigo resume uma pesquisa realizada, em nível de doutorado, no Alto Vale do Ribeira, uma rica província espeleológica localizada no Sudoeste do Brasil, entre os anos de 2020 e 2024. Participaram deste trabalho quatro escolas públicas localizadas próximas às Unidades de Conservação com maior ocorrência de cavernas. Para a realização do projeto foi desenvolvido um inventário espeleológico com um método colaborativo de qualificação de cavernas para usos educativos e de divulgação científica. A partir das informações levantadas, foi possível desenvolver um programa de ensino tendo as cavernas como tema gerador dirigido a professores de educação básica e seus alunos,

ABSTRACT

Using caves as a place-based interdisciplinary theme, this article summarizes research conducted at the doctoral level in the Upper Ribeira Valley, a rich speleological province located in southwestern Brazil, between 2020 and 2024. Four public schools located near the Conservation Units with the highest occurrence of caves participated in this work. To carry out the project, a speleological inventory was developed using a collaborative method of qualifying caves for educational and scientific dissemination purposes. Based on the information gathered, it was possible to develop a teaching program with caves as the main theme, aimed at elementary school teachers and their students, mainly in the 7th, 8th, and 9th grades. The program included teaching materials based on the location, school and experiential activ-

principalmente dos 7º, 8º e 9º anos escolares. O programa contou com materiais pedagógicos baseados no lugar e atividades escolares e vivenciais. Também foram consideradas as conexões entre o tema das cavernas e as diretrizes nacionais curriculares em diferentes áreas do conhecimento. Durante o programa, foram aplicados questionários com o objetivo de levantar dados e avaliar o processo. As conclusões desta pesquisa nos permitem afirmar que as cavernas compreendem um amplo recurso para a ressignificação do conteúdo curricular, transpondo as barreiras entre disciplinas e atribuindo maior significado ao processo de ensino e aprendizagem, além de um fortalecimento dos vínculos dos estudantes e professores com o ambiente a que pertencem.

PALAVRAS-CHAVE: inventário espeleológico, geoconservação, educação ambiental.

INTRODUÇÃO

Durante a expansão industrial, uma visão predominantemente antropocêntrica atribuía à natureza obstáculos que deveriam ser superados em favor do crescimento econômico (Bueno, 2008; McDonough e Braungart, 2010). Somente a partir da década de 1970 — uma data relativamente recente quando comparada à história humana ou geológica — uma consciência ecológica começou a se expandir, com diferentes iniciativas globais alertando sobre os problemas ambientais gerados por um modelo de civilização predatório (Kakazian, 2005; Santangelo e Bramanti, 2006). Nas últimas décadas, discussões mais aprofundadas como, por exemplo, a economia ecológica, o desenvolvimento sustentável e os serviços ecossistêmicos, têm se aproximado de teorias voltadas à educação ambiental e às ecopedagogias, buscando atribuir à

ities. The connections between the caves topic and the national curriculum guidelines in different areas of knowledge were also considered. During the program, questionnaires were administered to collect data and evaluate the process. The results of this research show that caves are a great resource for rethinking the curriculum, breaking down barriers between subjects, and giving more meaning to the teaching and learning process, as well as strengthening the connection between students and teachers and the environment they belong to.

KEYWORDS: *speleological inventory, geoconservation, environmental education.*

INTRODUCTION

During industrial expansion, a predominantly anthropocentric view attributed obstacles to nature that had to be overcome in favor of economic growth (Bueno, 2008; McDonough and Braungart, 2010). Only since the 1970s—a relatively recent date when compared to human or geological history—has ecological awareness begun to expand, with different global initiatives warning about the environmental problems generated by a predatory model of civilization (Kakazian, 2005; Santangelo and Bramanti, 2006). In recent decades, more in-depth discussions, such as ecological economics, sustainable development, and ecosystem services, have converged with theories focused on environmental education and eco-pedagogies, seeking to assign education with the responsibility for change in this direction. These discussions have also broadened the debate on the interaction between the bi-

educação responsabilidades de mudanças neste sentido. Essas discussões também ampliaram o debate sobre a interação entre o meio biótico e o abiótico, promovendo uma visão mais sistêmica e unificada da natureza (Van Ree e Van Beukering, 2016; Igari *et al.*, 2020; Urban *et al.*, 2022; Menin e Bacci, 2023). No entanto, essas discussões são pouco efetivas se não se traduzirem em práticas locais e vivenciadas pela população da região, em especial professores e alunos, que são, em última instância, os verdadeiros agentes de transformação socioambiental (de Moura Carvalho, 2020; Jacobi, 2003; UNESCO, 2005). Embora essas questões sejam consenso entre muitos pesquisadores e os conhecimentos sobre as ciências da Terra estejam associados à solução de boa parte dos problemas ambientais (Stewart e Nield, 2013; David-Chavez e Gavin, 2018), os resultados práticos de políticas públicas voltadas à transformação da sociedade parecem, ainda, muito aquém da evidente urgência em alcançá-los (Orlando, 2024; Monteiro e De Souza, 2024).

O presente artigo resume a pesquisa de doutorado intitulada "Inventário Espeleológico e Proposta Educativa para Geoconservação e Educação Ambiental no Alto do Ribeira", conduzido no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Brasil. Como hipótese, a pesquisa considerou as cavernas como um tema gerador interdisciplinar baseado no lugar, com o potencial de ser trabalhado na educação básica para aumentar o sentimento de pertencimento e a valorização da população à sua região – valorização do lugar –, apropriação de conhecimentos locais e, por fim, contribuir para aprendizagens significativas, buscando maior propósito tanto para quem ensina quanto para quem aprende.

Realizada entre os anos de 2020 e 2024, parte da pesquisa foi desenvolvida durante um perío-

otic and abiotic environments, promoting a more systemic and unified view of nature (Van Ree and Van Beukering, 2016; Igari et al., 2020; Urban et al., 2022; Menin and Bacci, 2023). However, these discussions are ineffective if they are not translated into local practices and experienced by the region's population, especially teachers and students, who are ultimately the true agents of socio-environmental transformation (de Moura Carvalho, 2020; Jacobi, 2003; UNESCO, 2005). Although these issues are agreed upon by many researchers and knowledge of Earth sciences is associated with the solution of many environmental problems (Stewart and Nield, 2013; David-Chavez and Gavin, 2018), the practical results of public policies aimed at transforming society still seem to fall short of the evident urgency of achieving them (Orlando, 2024; Monteiro and De Souza, 2024).

This article summarizes the doctoral research entitled "Speleological Inventory and Educational Proposal for Geoconservation and Environmental Education in Alto do Ribeira," conducted at the Institute of Geosciences of the University of São Paulo, Brazil. As a hypothesis, the research considered caves as a place-based interdisciplinary theme, with the potential to be worked on in basic education to increase the population's sense of belonging and appreciation for their region, appropriation of local knowledge and, finally, contribute to meaningful learning, seeking greater purpose for both teachers and learners.

Conducted between 2020 and 2024, part of the research was developed during a period of pandemic and social isolation; moreover, there was a significant change in the public education policy of São Paulo State precisely during the work in public schools in the region. Despite these challenges, the research objectives were achieved, such as: the inventory creation for the qualification of caves for ed-

do de pandemia e isolamento social; além disso, houve uma significativa mudança na política de ensino público do Estado de São Paulo justamente durante a atuação nas escolas públicas da região. Apesar desses desafios, os objetivos da pesquisa foram alcançados, como: a elaboração de um inventário para qualificação de cavernas para uso educativo e de geoconservação; o desenvolvimento e a aplicação de uma proposta educativa em quatro escolas públicas da região tendo as cavernas como tema interdisciplinar baseado no lugar; a criação e o desenvolvimento de materiais didáticos interdisciplinares, bem como a coleta de dados sobre todo o procedimento realizado e a mensuração dos resultados.

Área de Estudo e Justificativas

A região do Alto Vale do Ribeira (Figura 1) foi escolhida como área da pesquisa por vários motivos: sua reconhecida riqueza espeleológica, a necessidade de envolvimento das comunidades locais nos temas de geoconservação; e a oportunidade de abordar as cavernas como tema gerador transdisciplinar e interdisciplinar no Ensino Fundamental nas escolas da região.

Localizada no sudoeste do estado de São Paulo, a província espeleológica do Alto do Ribeira compreende uma área de 35.772,5 hectares que abriga um mosaico de quatro Unidades de Conservação do meio natural. Três delas, são consideradas distritos espeleológicos: o Parque Estadual Turístico do Alto do Ribeira (PETAR), o Parque Estadual da Caverna do Diabo (PECD) e o Parque Estadual de Intervales (PEI).

educational and geoconservation use; the development and application of an educational proposal in four public schools in the region, using caves as a place-based interdisciplinary theme; the creation and development of interdisciplinary teaching materials, as well as the collection of data on the entire procedure performed and the measurement of results.

Study Area and Justification

The Upper Ribeira Valley region (Figure 1) was chosen as the research area for several reasons: its recognized speleological wealth, the need to involve local communities in geoconservation issues, and the opportunity to address caves as a transdisciplinary and interdisciplinary theme in elementary schools in the region.

Located in the southwest of the state of São Paulo, the Alto do Ribeira speleological province covers an area of 35,772.5 hectares that is home to a mosaic of four natural conservation units. Three of them are considered speleological districts: the Alto do Ribeira State Tourist Park (PETAR), the Caverna do Diabo State Park (PECD), and the Intervales State Park (PEI).

A região se destaca, ainda, por sua biodiversidade, abrigo de cerca de 22% do remanescente da Mata Atlântica brasileira (Mira *et al.*, 2021), além de diferentes atrativos naturais, como rios, cachoeiras e paisagens. Além desses aspectos, questões históricas e sociais também impulsionam as atividades turísticas em diferentes frentes, como o turismo cultural, o educativo e o de base comunitária (Novaes, 2022; da Silva *et al.*, 2021).

Nas esferas globais e nacionais, diversos documentos têm destacado a importância de iniciativas de educação para o desenvolvimento sustentável, como a Agenda 2030 (UNESCO, 2017) e o Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico – PNCPE (Brasil, 2009).

The region also stands out for its biodiversity, containing around 22% of the remaining Brazilian Atlantic Forest (Mira et al., 2021), as well as various natural attractions, such as rivers, waterfalls, and landscapes. In addition to these aspects, historical and social issues also drive tourism activities on different fronts, such as cultural, educational, and community-based tourism (Novaes, 2022; da Silva et al., 2021).

At the global and national levels, several documents have highlighted the importance of education initiatives for sustainable development, such as Agenda 2030 (UNESCO, 2017) and the National Program for the Conservation of Speleological Heritage – PNCPE (Brazil, 2009).

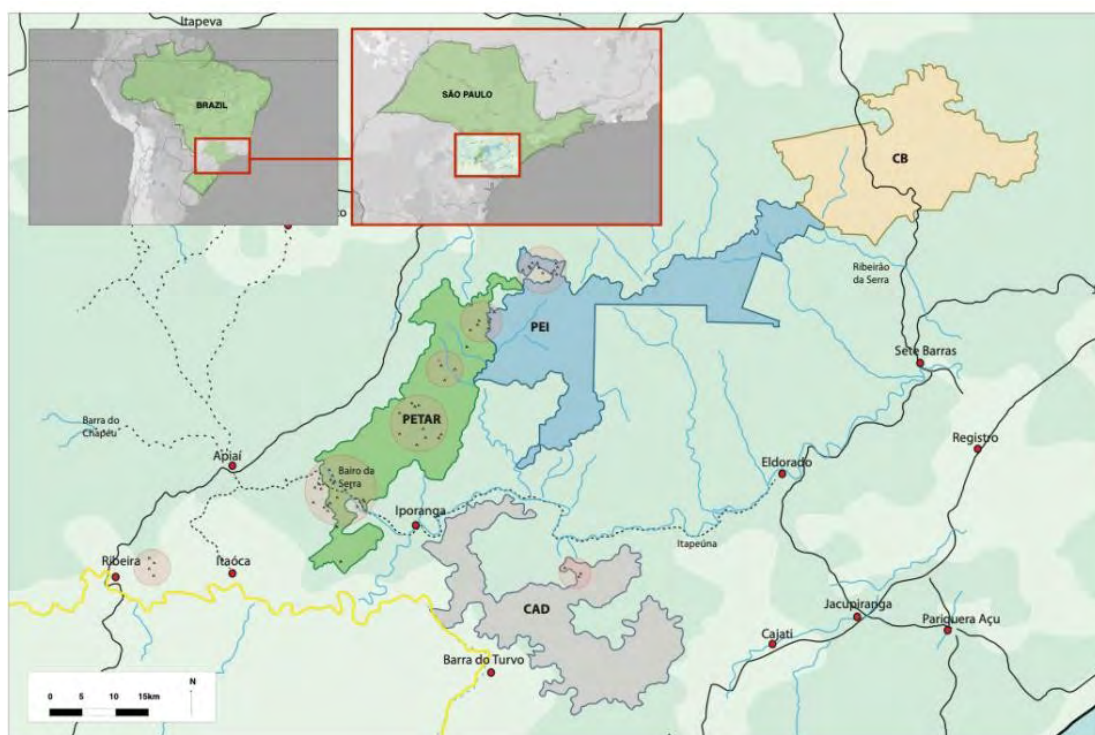


Figura 1 – Mapa regional do Alto do Ribeira. Área desta pesquisa, com o mosaico de Unidades de Conservação e principais cavernas inventariadas no mecanismo de qualificação. Nota: PETAR = Parque Estadual Turístico do Alto do Ribeira; PEI = Parque Estadual de Intervalos; CAD = Parque Estadual Caverna do Diabo; CB = Parque Estadual Carlos Botelho. Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figure 1 – Regional map of Alto do Ribeira. Area of this research, with the mosaic of Conservation Units and main caves inventoried in the qualification mechanism. Note: PETAR = Alto do Ribeira State Tourist Park; PEI = Intervalos State Park; CAD = Caverna do Diabo State Park; CB = Carlos Botelho State Park. Source: Prepared by the author (2022).

Princípios da Geoconservação e cavernas como tema interdisciplinar baseado no lugar

Segundo Stewart e Nield (2013), boa parte dos problemas ambientais poderiam ser minimizados se mais pessoas tivessem conhecimentos básicos sobre as Ciências da Terra. A dissociação entre biodiversidade e geodiversidade decorre da falta de uma visão unificada da dinâmica do planeta, embora a geodiversidade, composta por paisagens, fenômenos e recursos, seja essencial para o surgimento e suporte da vida nela inserida.

Como um recurso não renovável na escala humana, a geodiversidade carrega registros valiosos da história geológica e da evolução da vida, sendo fundamental sua compreensão histórica e científica (Kastens e Manduca, 2012). A escola, por sua vez, que tem o papel de formar cidadãos (Brasil, 1988), poderia usar de maneira mais efetiva os conhecimentos gerados pelas geociências para ampliar a conscientização ambiental e o papel dos indivíduos nesse contexto (Bacci, 2018). Assim, estratégias educativas que conectem comunidades, preservação ambiental e práticas sustentáveis, são essenciais para promover mudanças e corresponsabilidade frente aos desafios ambientais contemporâneos (Jacobi *et al.*, 2018).

Entre essas estratégias destacamos a Educação Baseada no Lugar (Place-Based Education – PBE) e a Interdisciplinaridade como aspectos essenciais e que se interligam entre si na busca de uma melhor conexão e entendimento dos indivíduos com o local onde vivem.

De maneira resumida, a PBE utiliza exemplos locais para facilitar o aprendizado, aproximando o estudante de seu objeto de estudo e promovendo uma conexão significativa com o lugar (Sobel, 2004). Essa abordagem exige a integração entre

Principles of Geoconservation and caves as a place-based interdisciplinary topic

According to Stewart and Nield (2013), many environmental problems could be minimized if more people had basic knowledge of Earth Sciences. The dissociation between biodiversity and geodiversity stems from the lack of a unified view of the planet's dynamics, even though geodiversity, composed of landscapes, phenomena, and resources, is essential for the emergence and support of life on Earth.

As a non-renewable resource on a human scale, geodiversity carries valuable records of geological history and the evolution of life, making its historical and scientific understanding fundamental (Kastens and Manduca, 2012). Schools, which have the role of educating citizens (Brazil, 1988), could more effectively use the knowledge generated by the geosciences to raise environmental awareness and highlight the individual's role in this context (Bacci, 2018). Thus, educational strategies that connect communities, environmental preservation, and sustainable practices are essential to promote change and shared responsibility in the face of contemporary environmental challenges (Jacobi *et al.*, 2018).

Among these strategies, Place-Based Education (PBE) and Interdisciplinarity stand out as essential and interrelated aspects in the quest for a better connection and understanding between individuals and the place where they live.

In summary, PBE uses local examples to facilitate learning, bringing students closer to their study subject and promoting a meaningful connection with the place (Sobel, 2004). This approach requires the integration of scientific and everyday knowledge, transcending traditional disciplinary organization to strengthen the sense of belonging (Woodhouse and Knapp, 2000; Semken, 2005).

saberes científicos e cotidianos, transcendendo a organização disciplinar tradicional para fortalecer o senso de pertencimento (Woodhouse e Knapp, 2000; Semken, 2005).

Documentos como a Agenda 2030 (UNESCO, 2017) e a Base Nacional Comum Curricular (Brasil, 2018) reforçam a interdisciplinaridade e o uso do contexto local no ensino. Contudo, sua aplicação prática ainda é limitada, exigindo maior esforço para conectar conhecimento acadêmico e cotidiano (Fazenda, 2011).

Ao usar cavernas como tema interdisciplinar, pode-se fortalecer o vínculo das pessoas com o lugar em que habitam promover aprendizagens significativas, especialmente em áreas próximas a patrimônios naturais (Compiani, 2015; Semken *et al.*, 2017). O modelo proposto na tese aqui resumida parte dos princípios acima mencionados da Educação Baseada no Lugar, de Interdisciplinaridade e da Geoconservação e usa as cavernas como tema gerador integrando diferentes disciplinas, capacitando professores, e estimulando, de modo mais atrativo, a aprendizagem dos alunos sobre as diversas propriedades e características das cavernas e seu habitat (Menin *et al.*, 2022).

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS DA PESQUISA

A realização da pesquisa foi organizada em quatro principais etapas: revisão da literatura (com a elaboração do inventário), delineamento de uma proposta educativa, seu desenvolvimento nas escolas e coleta e análise dos resultados. Em cada etapa houve a produção de artigos que foram publicados em periódicos nacionais e internacionais. A Figura 2 apresenta a estrutura da pesquisa, destacando suas principais ações e a produção científica publicada. Na figura, os artigos

Documents such as Agenda 2030 (UNESCO, 2017) and the National Common Core Curriculum (Brazil, 2018) reinforce interdisciplinarity and the use of local context in teaching. However, their practical application is still limited, requiring greater effort to connect academic and everyday knowledge (Fazenda, 2011).

By using caves as an interdisciplinary theme, it is possible to strengthen people's connection to the place where they live and promote meaningful learning, especially in areas close to natural heritage sites (Compiani, 2015; Semken et al., 2017). The model proposed in the thesis summarized here is based on the aforementioned principles of Place-Based Education, Interdisciplinarity, and Geoconservation uses caves as a generative theme, integrating different disciplines, training teachers, and stimulating, in a more attractive way, students' learning about the various properties and characteristics of caves and their habitat (Menin et al., 2022).

RESEARCH METHODOLOGICAL PROCEDURES

The research was organized into four main stages: literature review (with the preparation of an inventory), design of an educational proposal, its development in schools, and collection and analysis of results. At each stage, articles were produced and published in national and international journals. Figure 2 shows the structure of the research, highlighting its main actions and published scientific output. In the figure, the articles were numbered chronologically according to their publication and

foram numerados cronologicamente, de acordo com sua publicação, e posicionados com referência às etapas da pesquisa correspondentes.

positioned with reference to the corresponding stages of the research.



Figura 2 – Estrutura da pesquisa apontando as quatro principais etapas realizadas e as referências aos artigos publicados. Nota: PEGI = Proposta Educativa tendo as Cavernas como Tema Interdisciplinar.

Figure 2 – Research structure showing the four main stages carried out and references to published articles. Note: PEGI = Educational Proposal with Caves as an Interdisciplinary Theme.

Etapa 1. Conhecimento

O primeiro passo deste trabalho foi realizar um levantamento dos dados disponíveis sobre as cavernas da região. A pesquisa incluiu artigos técnicos e científicos, bem como bancos de dados públicos (Menin e Bacci, 2022). Como parâmetros de análise qualitativa, foram estabelecidas cinco categorias que agruparam os estudos com características similares. O levantamento concluiu sobre a necessidade de um mecanismo avaliativo específico para cavernas e que pudesse responder de forma clara e objetiva às demandas da inserção da espeleologia como tema interdisciplinar na educação básica. Além de possibilitar a apropriação dos conhecimentos do patrimônio espeleológico por professores e alunos, a ferramenta deveria fornecer insumos necessários para a orientação e o desenvolvimento de traba-

Step 1. Knowledge

The first step in this work was to conduct a survey of available data on caves in the region. The research included technical and scientific articles, as well as public databases (Menin and Bacci, 2022). As parameters for qualitative analysis, five categories were established that grouped studies with similar characteristics. The survey concluded that there was a need for a specific evaluation mechanism for caves that could respond clearly and objectively to the demands of including speleology as an interdisciplinary topic in basic education. In addition to enabling teachers and students to acquire knowledge of speleological heritage, the tool should provide the necessary inputs for the guidance and development of work related to the promotion of this heritage through scientific and speleological dissemination.

lhós relacionados à promoção deste patrimônio a partir da divulgação científica e espeleológica.

Foi então elaborado um método que partiu de algumas perguntas-chave, entre elas, os referentes aos principais critérios que diferenciam as cavernas entre si. Foram avaliadas 14 características diferentes que, por sua vez, alimentaram quatro Valores Espeleológicos e um Alerta de Conservação (Figura 3).

A partir desse método, foram avaliadas 79 cavernas que, de maneira coletiva, alimentaram um banco de dados único. Como conclusão desta etapa, sugere-se o uso do inventário como um recurso para a caracterização e comparação entre cavernas e regiões cársticas pois permite realizar uma série de análises de acordo com diferentes objetivos. Na referida pesquisa, foram úteis para o desenvolvimento das estratégias de viagens de campo para geração de materiais didáticos baseados no lugar, bem como no direcionamento dos conteúdos criados para os materiais educativos.

A method was then developed based on a number of key questions, including those relating to the main criteria that differentiate caves from one another. Fourteen different characteristics were evaluated, which in turn fed into four Speleological Values and one Conservation Warning (Figure 3).

Using this method, 79 caves were evaluated and collectively fed into a single database. As a conclusion to this stage, the use of the inventory as a resource for characterizing and comparing caves and karst regions is suggested, as it allows for a series of analyses to be carried out according to different objectives. In this research, they were useful for developing field trip strategies for generating place-based teaching materials, as well as for directing the content created for educational materials.

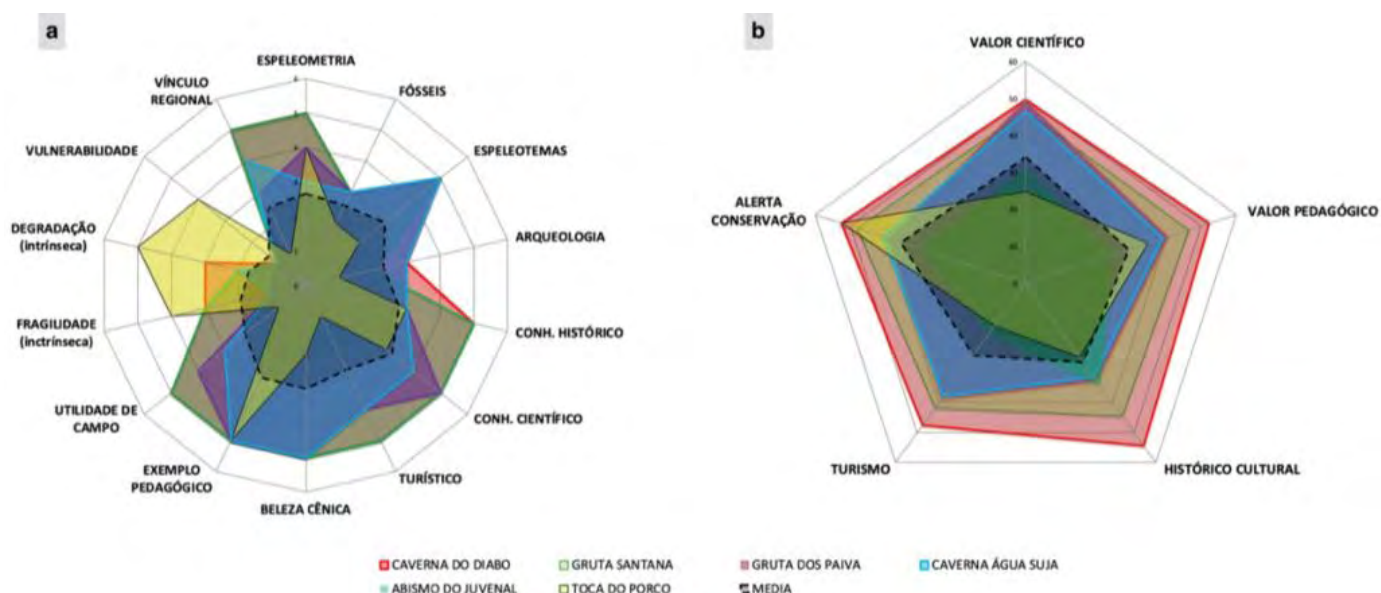


Figura 3 – Gráficos gerados pela qualificação com as médias obtidas para cada caverna em relação aos 14 critérios avaliados (a) e médias ponderadas sobre cada caverna em relação aos Valores Espeleológicos e o Alerta de Conservação (b).

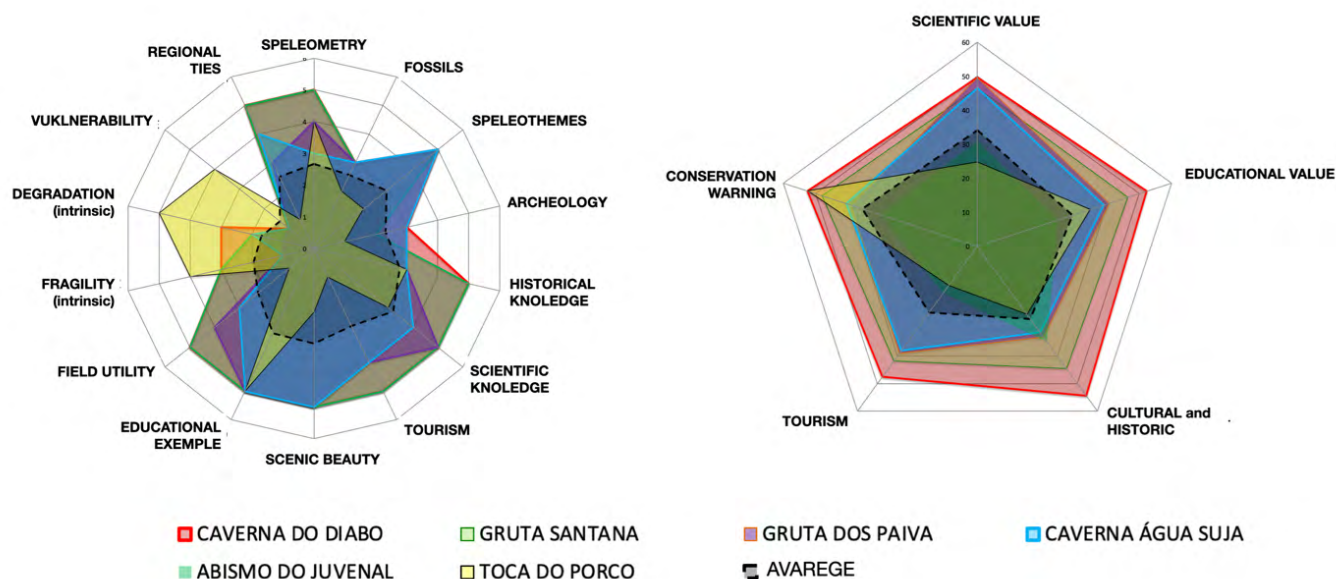


Figure 3 – Graphs generated by the classification with the averages obtained for each cave in relation to the 14 criteria evaluated (a) and weighted averages for each cave in relation to Speleological Values and Conservation Alert (b).

Serviços Espeleossistêmicos

Outra análise realizada com a intenção de fundamentar o estudo e organizar exemplos de divulgação sobre a importância do patrimônio espeleológico foi a aplicação dos princípios dos serviços geossistêmicos para o meio subterrâneo (Menin e Bacci, 2023).

O levantamento dos serviços prestados direta ou indiretamente pelas cavernas ao ser humano aproxima a discussão aos conceitos da Economia Ecológica (Igari *et al.*, 2020), e pode levar a reflexões mais amplas e a uma melhor compreensão por parte de diferentes atores da sociedade sobre a importância do meio cárstico (Van Ree e Van Beukering, 2016; Da Silva *et al.*, 2018; Urban *et al.*, 2022). Nessa direção, este estudo buscou descrever os benefícios que as cavernas exercem neste contexto, de abrigo às primeiras civilizações, à fonte de informações sobre o passado climático e às avançadas pesquisas fármaco industriais no futuro.

Como recurso de análise, o presente trabalho aplicou os conceitos de serviços ecossistêmicos ao

Speleosystemical Services

Another analysis carried out with the intention of supporting the study and organizing examples of dissemination on the importance of speleological heritage was the application of geosystemic service principles to the underground environment (Menin and Bacci, 2023).

The survey of directly or indirectly services provided by caves to humans brings the discussion closer to the concepts of Ecological Economics (Igari *et al.*, 2020). This can lead to broader reflections and a better understanding by different actors in society of the importance of the karst environment (Van Ree and Van Beukering, 2016; Da Silva *et al.*, 2018; Urban *et al.*, 2022). In this sense, this study sought to describe the benefits that caves provide in this context, from shelter for early civilizations to a source of information about the climate of the past and advanced industrial pharmaceutical research in the future.

As an analytical resource, this study applied the concepts of ecosystem services to the karst environ-

meio cárstico utilizando a Caverna do Diabo como exemplo de estudo. Acredita-se que a categorização dos benefícios que as cavernas exercem sobre as populações humanas pode ser um útil recurso em resposta ao desconhecimento do patrimônio espeleológico frente às ameaças que vem sofrendo. No presente trabalho, as informações geradas foram utilizadas em aulas e palestras sobre o tema junto aos professores e alunos participantes da pesquisa.

Etapas 2. Elaboração da Proposta Educativa

A presente proposta (PECI – Proposta Educativa tendo as Cavernas como Tema Interdisciplinar) teve como fundamentos os conceitos da Educação Baseada no Lugar, da Educação Ambiental Crítica, da Geoconservação e da Interdisciplinaridade. Partiu-se do princípio de que a educação assume significados e propósitos diferentes quando é construída de forma colaborativa, unindo diferentes áreas do conhecimento e utilizando exemplos da vida cotidiana (Menin *et al.*, 2022). Levou-se ainda em consideração as orientações da BNCC – Base Nacional Comum Curricular (BRASIL, 2018) de maneira a reforçar as competências e habilidades sugeridas pelo documento.

Para este projeto foram selecionadas 4 unidades escolares da educação básica pública na região, compreendendo municípios próximos aos recintos espeleológicos mais importantes e com acesso às unidades de visitação e cavernas turísticas. Participaram professores de todas as áreas do conhecimento com docência nos anos finais do ensino fundamental. Junto aos professores, foi tomada a decisão de aplicar o projeto ao Ensino Fundamental – Anos Finais, o que abrangeu alunos do 6º ao 9º ano. Os trabalhos nas escolas se deram ao longo do ano de 2023.

ment using the Caverna do Diabo as a case study. It is believed that categorizing the benefits that caves provide to human populations can be a useful resource in response to the lack of knowledge about speleological heritage in the face of the threats it has been suffering. In this study, the information generated was used in classes and lectures on the topic with the teachers and students participating in the research.

Step 2. Preparation of the Educational Proposal

This proposal (PECI – Educational Proposal with Caves as an Interdisciplinary Theme) was based on the concepts of Place-Based Education, Critical Environmental Education, Geoconservation, and Interdisciplinarity. It was based on the principle that education takes on different meanings and purposes when it is constructed collaboratively, bringing together different areas of knowledge and using examples from everyday life (Menin et al., 2022). The guidelines of the National Common Core Curriculum (BNCC) (BRASIL, 2018) were also taken into account in order to reinforce the competencies and skills suggested by the document.

For this project, four public elementary schools in the region were selected, comprising municipalities close to the most important caving sites and with access to visitor centers and tourist caves. Teachers from all areas of knowledge who teach in the final years of elementary school participated. Together with the teachers, the decision was made to apply the project to Elementary School' Final Years, which covered students from 6th to 9th grade. The work in the schools took place throughout the year 2023.

The research analyzed in detail the BNCC competencies for the final years of elementary school (7th, 8th, and 9th grades) and their relationship to the

A pesquisa analisou em detalhes as competências da BNCC para os anos finais do Ensino Fundamental (7º, 8º e 9º anos) e sua relação com o estudo das cavernas, identificando, ao final, 78 competências distribuídas em diferentes áreas do conhecimento e que poderiam ser desenvolvidas por meio da espeleologia.

a. Produção de Materiais Didáticos Baseados no Lugar

Uma vez coletados os dados do mecanismo de qualificação de cavernas, algumas das mais representativas foram selecionadas para a realização de visitas durante os trabalhos de campo (Figura 4).

study of caves, ultimately identifying 78 competencies distributed across different areas of knowledge that could be developed through speleology.

a. Production of Place-Based Teaching Materials

Once the data on cave classification had been collected, some of the most representative caves were selected for visits during the fieldwork (Figure 4).

CAVERNAS ELEITAS PARA CAMPO				
Ranking		TT Índice	Localidade	Pontos de interesse
1	CAVERNA DO DIABO	209	PECD - Eldorado	Cachoeiras, Morfologia, Espeleotemas, Estrutura turística
2	GRUTA SANTANA	184	PETAR - Núcleo Santana	Conduto de rio/ Morfologia, Salões superiores, Espeleotemas, Setor turístico
3	CAVERNA MORRO PRETO	165	PETAR - Núcleo Santana	Aspecto cênico da entrada, salão interior (morfologia e espeleotemas)
4	GRUTA DOS PAIVA	165	PEI - Ribeirão Grande	Conduto de rio, clarabóia, espeleotemas (pérolas)
5	ALAMBARI DE BAIXO	165	PETAR - Bairro da Serra	Aspecto cênico da entrada, salões e conduto de rio (morfologia)
7	CAVERNA ÁGUA SUJA	159	PETAR - Núcleo Santana	Conduto de rio, salão do abatimento, abismo dívida externa
8	GRUTA CASA DE PEDRA	158	PETAR - Núcleo Casa de Pedra	Salão da entrada, morfologia dos condutos e aspectos cênicos
10	FENDÃO	143	PEI - Ribeirão Grande	Aspecto morfológico (fenda e conduto de rio)
15	CAVERNA DESMORONADA	140	PETAR - Núcleo Caboclos	Aspecto cênico e potencial científico
16	GRUTA DO COUTO	139	PETAR - Núcleo Santana	Aspectos cênico e morfológicos
19	GRUTA LABORATÓRIO	136	PETAR - Bairro da Serra	Aspectos cênicos, morfológicos e históricos
21	CAVERNA OURO GROSSO	130	PETAR - Núcleo Ouro Grosso	Exemplos morfológicos, aspectos cênicos e históricos
48	GRURA ESPÍRITO SANTO	108	PETAR - Núcleo Caboclos	Depósitos fossilíferos - Paleontologia

Figura 4 – Lista das 12 cavernas visitadas em campo para geração de materiais didáticos baseados no lugar.

CAVES CHOSEN FOR THE FIELDWORK				
Ranking		TT Index	Location	Points of interest
1	CAVERNA DO DIABO	209	PECD - Eldorado	Waterfalls, Morphology, Speleothems, Tourist infrastructure
2	GRUTA SANTANA	184	PETAR - Núcleo Santana	River channels/Morphology, Upper halls, Speleothems, Tourism sector
3	CAVERNA MORRO PRETO	165	PETAR - Núcleo Santana	Scenic aspect of the entrance, interior hall (morphology and Speleothems)
4	GRUTA DOS PAIVA	165	PEI - Ribeirão Grande	River conduit, skylight, speleothems (pearls)
5	ALAMBARI DE BAIXO	165	PETAR - Bairro da Serra	Scenic aspect of the entrance, halls, and river conduit (morphology)
7	CAVERNA ÁGUA SUJA	159	PETAR - Núcleo Santana	River conduit, fall hall, external debt abyss
8	GRUTA CASA DE PEDRA	158	PETAR - Núcleo Casa de Pedra	Entrance hall, conduit morphology, and scenic aspects
10	FENDÃO	143	PEI - Ribeirão Grande	Morphological aspect (crevice and river channel)
15	CAVERNA DESMORONADA	140	PETAR - Núcleo Caboclos	Scenic aspect and scientific potential
16	GRUTA DO COUTO	139	PETAR - Núcleo Santana	Scenic and morphological aspects
19	GRUTA LABORATÓRIO	136	PETAR - Bairro da Serra	Scenic, morphological, and historical aspects
21	CAVERNA OURO GROSSO	130	PETAR - Núcleo Ouro Grosso	Morphological examples, scenic and historical aspects
48	GRURA ESPÍRITO SANTO	108	PETAR - Núcleo Caboclos	Fossil deposits - Paleontology

Figure 4 – List of the 12 caves visited in the field to generate place-based teaching materials.

As viagens foram realizadas para a verificação *in situ* dos aspectos avaliados coletivamente à distância e, também, para documentação fotográfica dos pontos de interesse como, por exemplo, beleza cênica, morfologia, fósseis, valores históricos, científicos e educativos.

Além do pesquisador, uma equipe de espeleólogos experientes e moradores locais participaram das viagens e dos trabalhos dentro das cavernas. Essa abordagem não apenas incluiu os cientistas nas fotografias, mas também valorizou a presença da comunidade local nas imagens e materiais didáticos produzidos, como ilustra a Figura 5 que também mostra aspectos mapeados pelo inventário de qualificação como os valores cênico, turístico, científico e histórico.

The trips were undertaken to verify in situ the aspects that had been remotely and collectively assessed and also to photograph points of interest such as scenic beauty, morphology, fossils, and historical, scientific, and educational value.

In addition to the researcher, a team of experienced speleologists and local residents participated in the trips and in the work inside the caves. This approach not only included scientists in the photographs, but also valued the presence of the local community in the images and educational materials produced, as illustrated in Figure 5, which also shows aspects mapped by the qualification inventory, such as scenic, tourist, scientific, and historical values.



Figura 5 – Algumas das imagens realizadas durante os trabalhos em campo. À esquerda, o espeleólogo local Eduardo Oliveira em progressão na zona turística da Caverna Água Suja. À direita, Ângela Carla Matos, neta de Joaquim Justino, célebre condutor e espeleólogo local em contemplação na Caverna Santana. Nota.

Figure 5 – Some of the images taken during fieldwork. On the left, local speleologist Eduardo Oliveira advancing in the tourist area of Água Suja Cave. On the right, Ângela Carla Matos, granddaughter of Joaquim Justino, a renowned local guide and speleologist, contemplating Santana Cave.

b. Recursos didáticos

Os recursos didáticos elaborados e disponibilizados a alunos e professores foram produzidos durante o desenvolvimento da tese e tiveram como propósito a linguagem e o formato voltado para a compreensão por um público escolar e leigo. Também se tomou cuidado com a atratividade destes materiais, com apelo visual e uma comunicação autoexplicativa. No total, foram utilizados 16 diferentes recursos didáticos, dentre os quais são destacados alguns deles, como o Painel Interdisciplinar da Caverna do Diabo e os Livretos de caracterização das principais cavernas da região.

O painel foi disponibilizado digitalmente para todas as escolas participantes e impresso para as ocasiões de encontro com os alunos (Figura 6).

b. Teaching resources

The teaching resources developed and made available to students and teachers were produced during the development of the thesis and were designed to be understood by a school and lay audience in terms of language and format. Care was also taken to ensure that these materials were attractive, visually appealing, and self-explanatory. A total of 16 different teaching resources were used, among which some stand out, such as the Interdisciplinary Panel of the Caverna do Diabo and the Booklets characterizing the main caves in the region.

The panel was made available digitally to all participating schools and printed for meetings with students (Figure 6).



Figura 6- Painei Interdisciplinar (à esquerda) e imagens do material impresso em uso nas Escolas. O material em melhor resolução está disponível neste link.

Figure 6 - Interdisciplinary Panel (left) and images of printed material in use in schools. Higher resolution material is available at this link.

O objetivo deste material foi promover a divulgação científica e espeleológica com fins de comunicação e educação. Além do mapa, estão inclusos no painel estudos técnicos e científicos realizados na caverna como, por exemplo, dados do Plano de Manejo Espeleológico, levantamentos de fauna, histórico de explorações, caracterizações geológicas e mapeamentos 3D. Esse modelo de painel apresentou-se como um recurso adequado para organização e divulgação de informações relevantes sobre as cavernas e pode ser replicado para outras cavidades importantes.

Outro destaque são os Livretos sobre as principais cavernas da região (Figura 7). Após a organização do acervo fotográfico, o material foi classificado e agrupado para visualização de cada caverna. O resultado é uma coleção com 10 volumes nos quais se encontram um texto descritivo da pesquisa, explicações sobre a caracterização da caverna, aspectos geológicos, valores espeleológicos e pontos de interesse, bem como o mapa georreferenciando os destaques fotografados e as fotos comentadas. Foram produzidos 10 livretos sendo eles: Caverna do Diabo, Caver-

The purpose of this material was to promote scientific and speleological dissemination for communication and educational purposes. In addition to the map, the panel includes technical and scientific studies carried out in the cave, such as data from the Speleological Management Plan, fauna surveys, exploration history, geological characterizations, and 3D mapping. This panel model proved to be an adequate resource for organizing and disseminating relevant information about caves and can be replicated for other important caves.

Another highlight is the booklets on the main caves in the region (Figure 7). After organizing the photographic collection, the material was classified and grouped for viewing each cave. The result is a collection of 10 volumes containing a descriptive text of the research, explanations about the characterization of the cave, geological aspects, speleological values, and points of interest, as well as a map georeferencing the photographed highlights and the commented photos. Ten booklets were produced, namely: Caverna do Diabo, Santana Cave, Desmoronada Cave, Laboratorio Caves I and II, Morro Preto Cave, Paiva Grotto, Alambari

na Santana, Caverna Desmoronada, Cavernas Laboratório I e II, Caverna Morro Preto, Gruta dos Paiva, Caverna Alambari de Baixo, Caverna Água Suja, Caverna Casa de Pedra e Caverna Fendão.

de Baixo Cave, Água Suja Cave, Casa de Pedra Cave, and Fendão Cave.

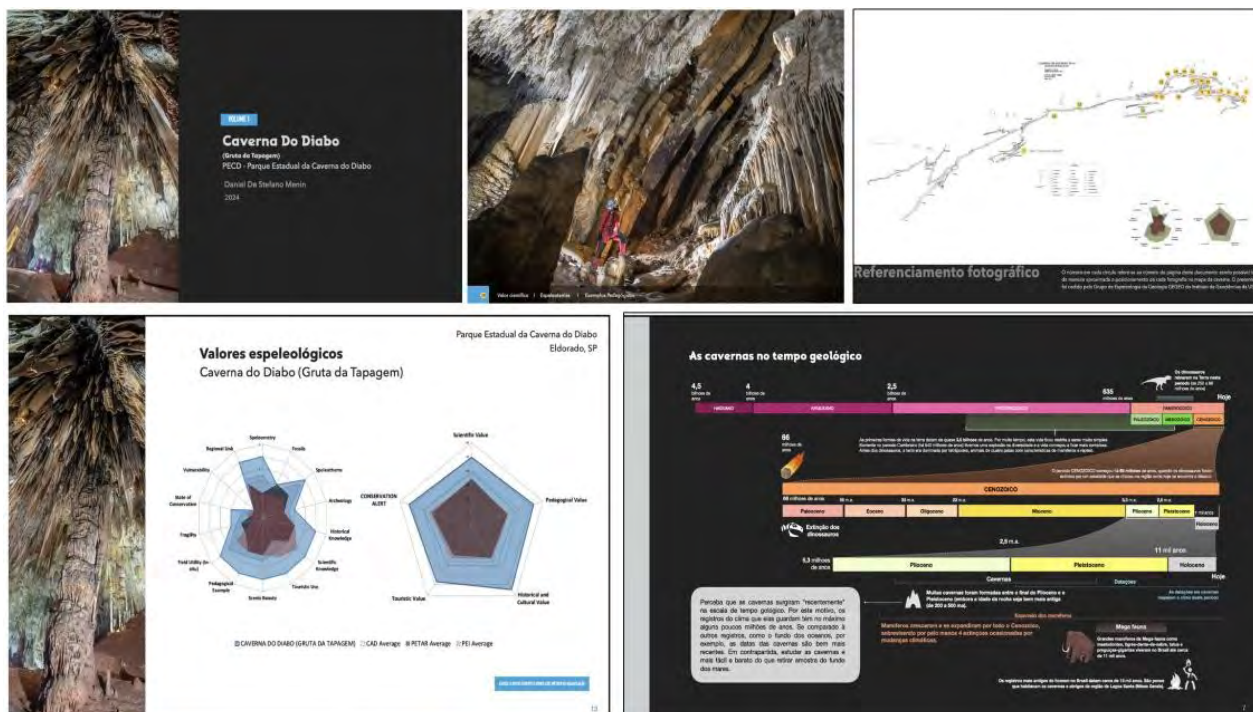


Figura 7 – Exemplos de conteúdo em cada Volume. Na imagem observa-se da esquerda para a direita: a capa de um dos Livretos, uma imagem de ponto de interesse relacionado à geologia, um exemplo de um mapa de caverna com as imagens referenciadas, a caracterização da caverna de acordo com os resultados da Qualificação (abaixo à esquerda), uma contextualização das cavernas no tempo profundo (abaixo à direita). Utilize este link para acessar uma pasta com todos os volumes.

Figure 7 – Examples of content in each volume. The image shows, from left to right: the cover of one of the booklets, an image of a point of interest related to geology, an example of a cave map with the referenced images, the characterization of the cave according to the Qualification results (bottom left), and a contextualization of the caves in deep time (bottom right). Use this link to access a folder with all volumes.

Outro recurso bastante utilizado foi uma coleção com 23 vídeos temáticos para uso em diferentes contextos e áreas de conhecimento. Todo esse material foi apresentado e disponibilizado aos professores e pode ser acessado através de uma pasta para *download* no Google Drive da Universidade de São Paulo.

Another widely used resource was a collection of 23 thematic videos for use in different contexts and areas of knowledge. All of this material was presented and made available to teachers and can be accessed through a folder for download on the University of São Paulo's Google Drive.

c. Aplicação Pedagógica

O diagrama a seguir, na Figura 8, representa o trabalho de intervenção nas escolas desenvolvido em uma ordem cronológica. A proposta educativa segue duas fases principais (sendo a primeira um conjunto de ações junto aos pro-

c. Pedagogical Application

The diagram in Figure 8, represents the intervention work carried out in schools in chronological order. The educational proposal follows two main phases (the first being a set of actions with teachers and the second with students) and is divided into six stages

fessores e a segunda junto aos alunos) e está dividida em seis etapas (Coordenação, Difusão, Imersão, Apresentação, Aprofundamento e Culminância). As etapas são compostas por 14 principais ações organizadas na Figura 8 de (a) à (n).

(Coordination, Dissemination, Immersion, Presentation, Deepening, and Culmination). The stages consist of 14 main actions organized in Figure 8 from (a) to (n).

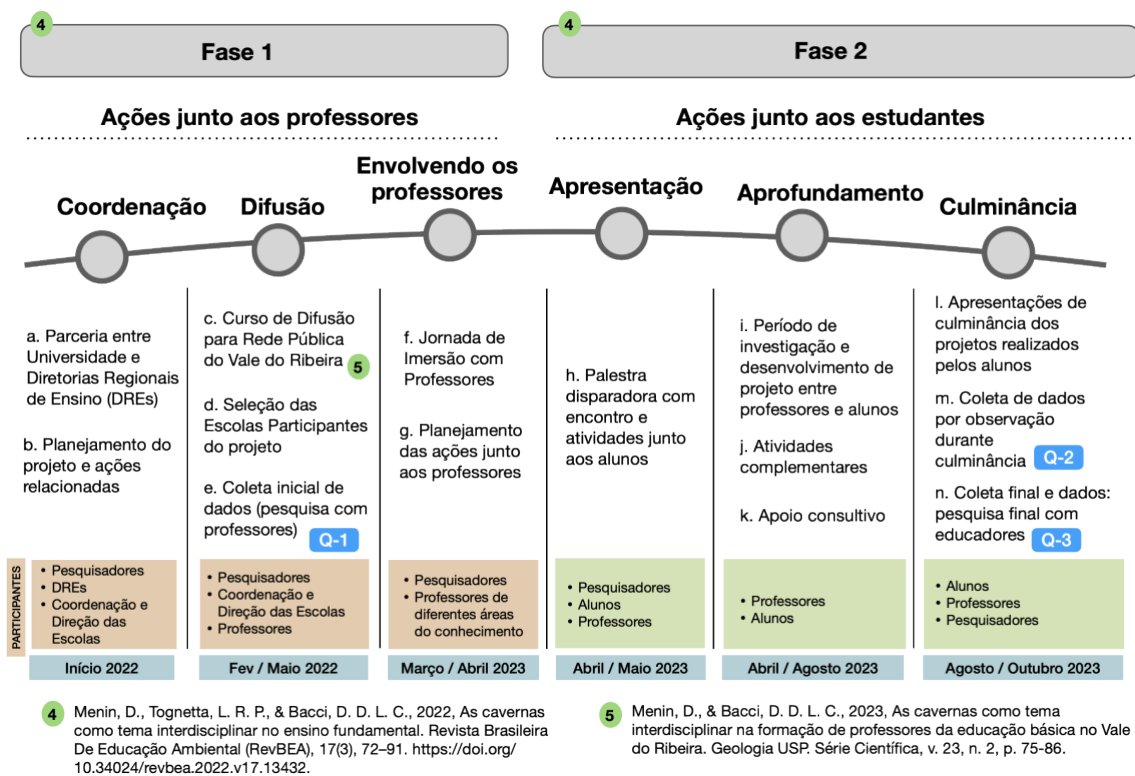


Figura 8 – Fases, etapas e ações de andamento da proposta educativa nas escolas. Os números em verde (4) e (5) correspondem a artigos publicados com detalhamento do trabalho realizado. Abaixo da imagem, caixas coloridas com os atores participantes de cada etapa e os meses e anos em que as ações foram realizadas.

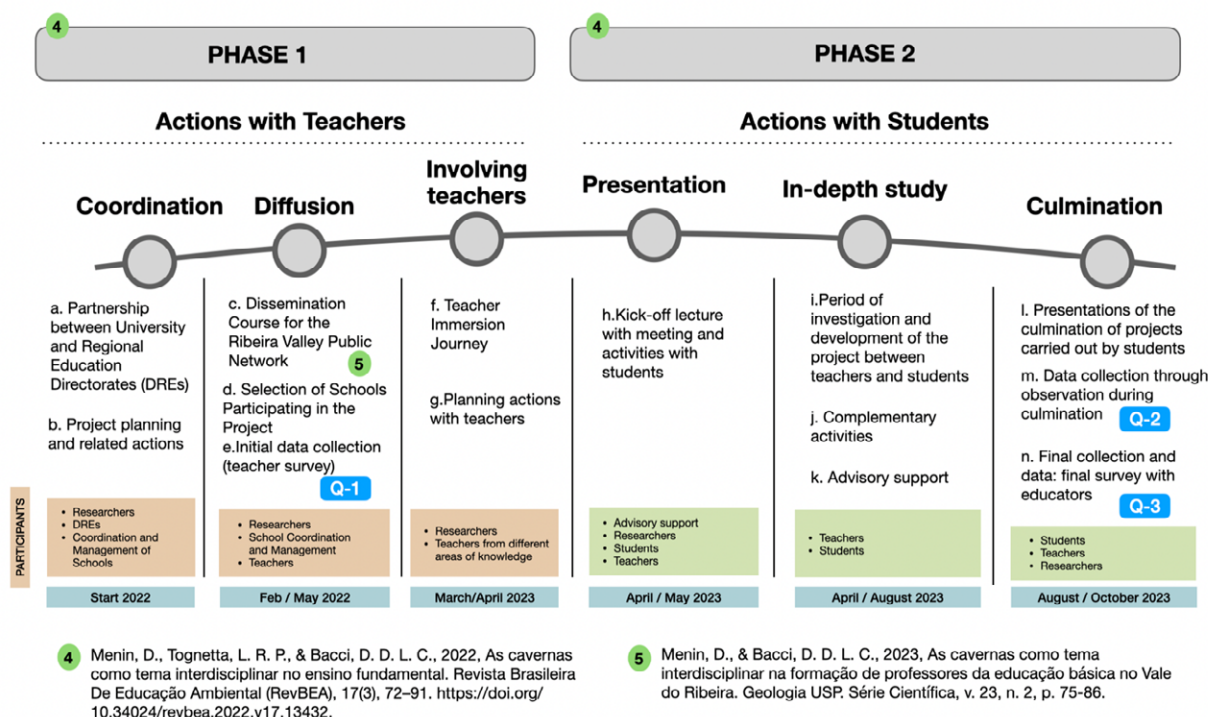


Figure 8 – Phases, stages, and actions of the educational proposal in schools. The numbers in green (4) and (5) correspond to published articles detailing the work carried out. Below the image, colored boxes show the actors participating in each stage and the months and years in which the actions were carried out.

Neste artigo, destacam-se algumas destas ações, como o aprofundamento do tema junto aos professores, as oficinas de encantamento aos alunos e os trabalhos finais de culminância nas escolas.

Planejamento e ações junto aos professores (de (a) a (g))

A exemplo da proposta educativa referência (Menin *et al.*, 2022), a jornada de imersão explorou o tema das cavernas com professores de diferentes áreas do conhecimento em cada escola. Durante os encontros houve momentos de aprofundamento ao tema com o uso de material expositivo, oficinas e trabalhos colaborativos para elaboração de estratégias em cada escola. Na ocasião, os professores puderam compreender melhor a espeleologia, mas também buscar conexões entre o tema e suas disciplinas, bem como intersecções entre as disciplinas tendo as cavernas como tema gerador (Figura 9). Nesta

This article highlights some of these actions, such as exploring the topic in greater depth with teachers, workshops to inspire students, and final projects at schools.

Planning and actions with teachers (from (a) to (g))

*Following the example of the reference educational proposal (Menin *et al.*, 2022), the immersion journey explored the theme of caves with teachers from different areas of knowledge in each school. During the meetings, there were moments of in-depth exploration of the theme using exhibition material, workshops, and collaborative work to develop strategies in each school. On this occasion, teachers were able to better understand speleology, but also seek connections between the theme and their subjects, as well as intersections between subjects with caves as the generating theme (Figure 9). On this occasion, some participants were chosen as “teacher-coordi-*

ocasião, alguns participantes foram escolhidos como “professores-coordenadores” do projeto dentro de cada instituição, de modo que a interlocução com os pesquisadores pudesse ser facilitada ao longo do processo.



Figura 9 – Ocasião presencial de imersão do tema das cavernas junto à professores de diferentes disciplinas



nators” for the project within each institution, so that communication with the researchers could be facilitated throughout the process.

Figure 9 – Face-to-face immersion session on the topic of caves with teachers from different disciplines

Envolvendo e encantando os estudantes (h)

A apresentação do tema das cavernas aos alunos se deu em um encontro entre pesquisador e alunos. Durante a ocasião, realizou-se uma apresentação com exemplos do lugar, um vídeo de divulgação espeleológica (Topografia da Caverna do Diabo) e o estímulo à conversação à medida em que os estudantes manuseavam amostras de espeleotemas, réplicas de fósseis, mapas, livros e equipamentos (Figura 10).



Figura 10 – Ocasiões do encontro de apresentação e encantamento do projeto junto aos alunos.

Engaging and enchanting students (h)

The caves topic was presented to students during a meeting between researchers and students. During the meeting, a presentation was given with examples of the place, a video promoting speleology (Topography of the Caverna do Diabo), and conversation was encouraged as students handled samples of speleothems, fossil replicas, maps, books, and equipment (Figure 10).



Figure 10 – Occasions for presenting and promoting the project to students.

Eventos de Culminância (I)

Em cada escola, foi sugerido que o projeto desenvolvido ao longo do período pudesse culminar em um trabalho construído coletivamente. Apresentações, maquetes, cenografias, painéis e outros recursos foram desenvolvidos pelos alunos com a coordenação dos professores de maneira interdisciplinar para serem apresentados em uma data em comum. Em alguns casos, o evento foi aberto para visitação de pessoas de fora da escola (Figura 11).



Figura 11 – Eventos de culminância realizados nas escolas por alunos e professores ao término do projeto.

Três momentos de coleta de dados foram adotados ao longo da pesquisa. O primeiro, antes do início do projeto com um questionário estruturado enviado aos professores. O segundo, após o projeto através de outro questionário aos mesmos professores participantes do projeto. Por fim, uma coleta de dados foi realizada no evento de culminância por meio de um processo de observação participante.

ANÁLISES DOS RESULTADOS

As análises completas dos resultados com dados e gráficos podem ser encontradas na referida tese (Menin, 2024). A seguir selecionamos alguns destaques para expor os resultados principais neste artigo.

Culmination Events (I)

At each school, it was suggested that the project developed throughout the period could culminate in a collectively constructed work. Presentations, models, sets, panels, and other resources were developed by students with the coordination of teachers in an interdisciplinary manner to be presented on a common date. In some cases, the event was open to visitors from outside the school (Figure 11).



Figure 11 – Culminating events held in schools by students and teachers at the end of the project.

Three data collection moments were adopted throughout the research. The first was before the start of the project, with a structured questionnaire sent to teachers. The second was after the project, through another questionnaire sent to the same teachers who participated in the project. Finally, data collection was carried out at the culminating event through a process of participant observation.

RESULTS ANALYSIS

The complete analysis of the results, including data and graphs, can be found in the aforementioned thesis (Menin, 2024). Below, some highlights have been selected to present the main results in this article.

Ao comparar as realizações deste trabalho com uma estrutura clássica em estratégias de geoconservação (Garcia *et al.*, 2022), constatou-se que ele atua em diferentes etapas como: Diagnóstico, Conservação e Promoção (Figura 12).

O Inventário e o Mecanismo de Qualificação de Cavernas, por exemplo, atuam diretamente na etapa de Diagnóstico, enquanto os dados gerados podem ser utilizados na etapa de Conservação e, por fim, a proposta educativa (PECI) relaciona-se diretamente com a Etapa de Promoção.

When comparing the achievements of this work with a classic framework for geoconservation strategies (Garcia *et al.*, 2022), it was found that it operates in different stages, such as: Diagnosis, Conservation, and Promotion (Figure 12).

The Inventory and Cave Qualification Mechanism, for example, act directly in the Diagnosis stage, while the data generated can be used in the Conservation stage and, finally, the educational proposal (PECI) is directly related to the Promotion stage.

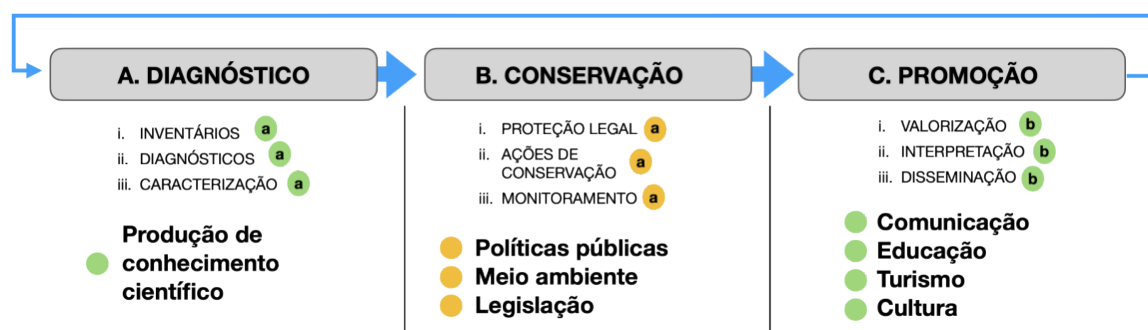


Figura 12 – Estrutura estratégica para geoconservação dividida entre seus três principais módulos e objetivos. Nota: Os círculos em verde indicam as etapas e objetivos diretamente contempladas nesta pesquisa. Já os círculos em laranja, indicam etapas e objetivos indiretamente contemplados. As letras posicionam cada ação a uma realização específica desta pesquisa: a = inventário e método de qualificação de cavernas desenvolvido e as análises possíveis a partir dos dados levantados. b = materiais produzidos, estratégias educativas e de divulgação científica. Fonte: adaptada de Garcia *et al.* (2022).

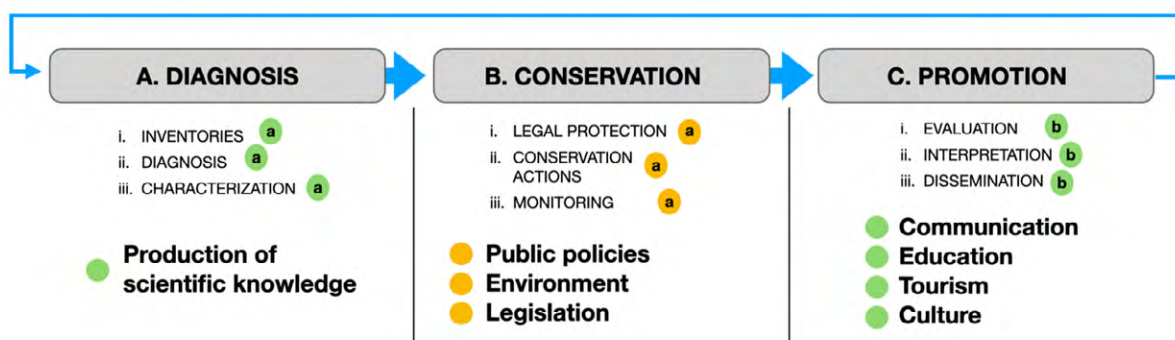


Figure 12 – Strategic framework for geoconservation divided into its three main modules and objectives. Note: The green circles indicate the stages and objectives directly covered in this research. The orange circles indicate stages and objectives indirectly covered. The letters assign each action to a specific achievement of this research: a = inventory and cave qualification method developed and possible analyses based on the data collected. b = materials produced, educational and scientific dissemination strategies. Source: adapted from Garcia *et al.* (2022).

Perfil e Envolvimento dos Professores

Participaram do projeto 41 professores, majoritariamente mulheres (82,9%), com mais de 40 anos

Teacher Profile and Engagement

Forty-one teachers participated in the project, most of whom were women (82.9%), over 40 years old

(56,1%) e ampla experiência na educação básica (61% atuam há mais de 10 anos). Geografia (13%) e Ciências da Natureza (12%) foram as disciplinas mais representadas. A maioria dos professores (65%) esteve ativamente envolvida na intervenção da pesquisa, mas 29% indicaram limitações devido a falta de tempo e de apoio institucional.

Sobre Pertencimento, Educação Baseada no Lugar e Interdisciplinaridade

A comparação entre os conhecimentos dos professores sobre o patrimônio espeleológico regional antes e após o projeto revela uma significativa evolução no entendimento do tema (Figura 13). Uma evolução mais marcante é percebida no que diz respeito ao envolvimento dos alunos sobre as cavernas locais, conforme observado pelos professores. No início do projeto, os professores indicaram que 70% dos alunos demonstravam pouco ou nenhum interesse pelas cavernas da região. No entanto, ao término do projeto, 95% dos alunos, de acordo com os professores, demonstraram um envolvimento médio ou alto com as cavernas locais. Essa evolução evidencia um grande potencial de crescimento no que se refere ao sentimento de pertencimento e reconhecimento do patrimônio espeleológico regional por parte dos alunos.

(56.1%), and had extensive experience in basic education (61% had been teaching for over 10 years). Geography (13%) and Natural Sciences (12%) were the most represented subjects. Most teachers (65%) were actively involved in the research intervention, but 29% indicated limitations due to lack of time and institutional support.

On belonging, place-based education, and interdisciplinarity

A comparison of teachers' knowledge of regional speleological heritage before and after the project reveals a significant evolution in their understanding of the subject (Figure 13). A more striking evolution is seen in terms of students' engagement with local caves, as observed by teachers. At the beginning of the project, teachers indicated that 70% of students showed little or no interest in the region's caves. However, at the end of the project, 95% of students, according to teachers, showed moderate or high engagement with local caves. This evolution shows great potential for growth in terms of students' sense of belonging and recognition of regional speleological heritage.

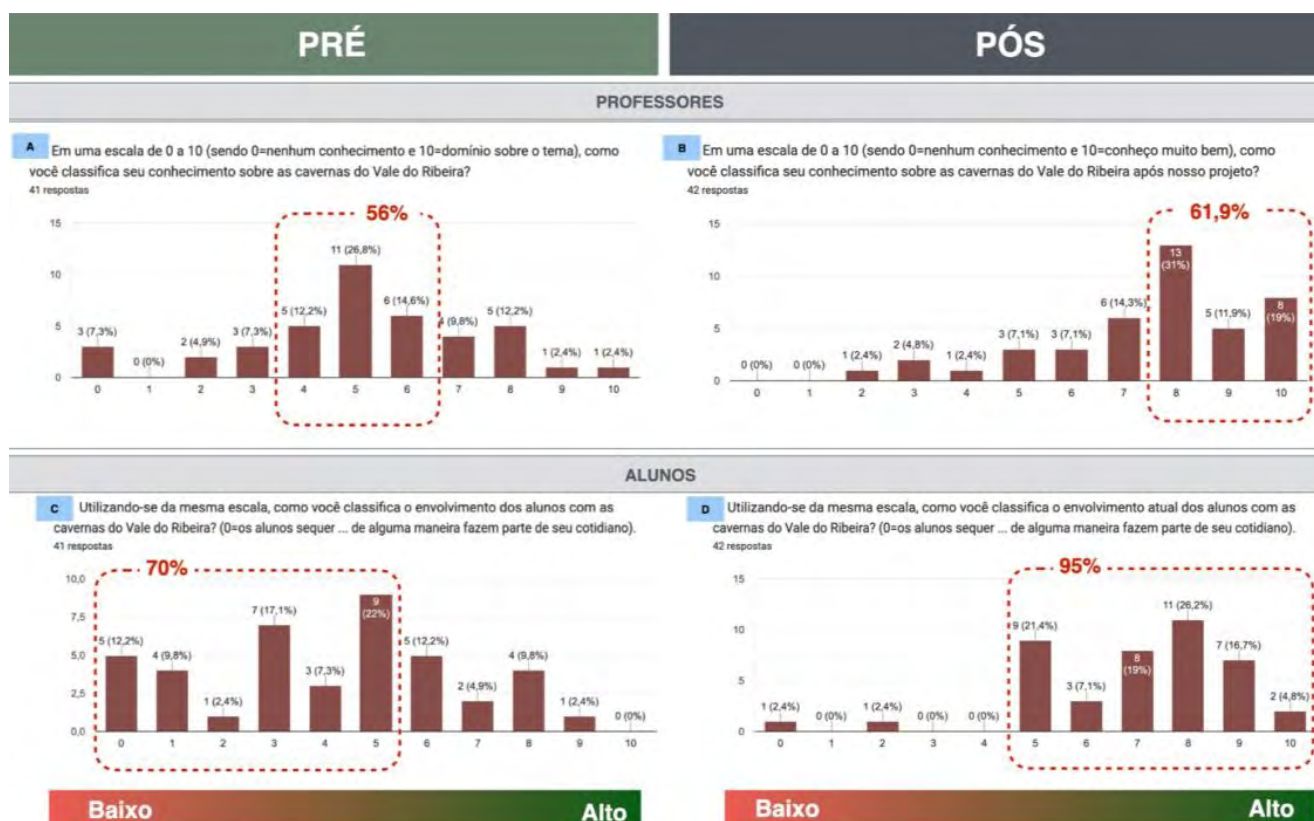


Figura 13 – Evolução do envolvimento e conhecimento dos professores e alunos com o tema das cavernas antes e depois do projeto realizado

Figure 13 – Evolution of teachers' and students' engagement and knowledge of caves before and after the project

Este dado é confirmado quando 80,9% dos alunos, segundo os professores, se apropriaram do tema das cavernas por intermédio dos projetos. Ambos os dados combinados nos sugerem afirmar que o projeto teve altos impactos na divulgação e na apropriação por parte dos alunos sobre a riqueza natural regional, antes pouco conhecida e trabalhada dentro da sala de aula.

Segundo os professores, o projeto ofereceu não somente a oportunidade dos alunos de conhecer o patrimônio regional, mas também de trabalhá-lo de maneira interdisciplinar abordando diferentes áreas do conhecimento e, portanto, compreendendo melhor o tema. Especificamente sobre interdisciplinaridade, a maioria dos professores (95,3%) afirma ter identificado oportunidades de abordar o tema das cavernas em suas disciplinas, bem como criando conexões com outras áreas do conhecimento. O tema também

This data is confirmed when according to teachers, 80.9% of students appropriated the theme of caves through the projects. Both data combined suggest that the project had a high impact on the dissemination and appropriation by students of the region's natural wealth, which was little known previously and rarely addressed in the classroom.

According to teachers, the project not only offered students the opportunity to learn about regional heritage, but also to work on it in an interdisciplinary manner, addressing different areas of knowledge and thus gaining a better understanding of the subject. Specifically regarding interdisciplinarity, most teachers (95.3%) said they had identified opportunities to address the topic of caves in their subjects, as well as creating connections with other areas of knowledge. The topic was also found to be aligned with the BNCC guidelines and the São Paulo Curriculum, based on both teacher evaluations and

mostrou alinhamento com as diretrizes da BNCC e com o Currículo Paulista por meio tanto da avaliação dos professores quanto pela observação dos trabalhos apresentados pelos alunos.

Nos eventos finais de culminância, os alunos utilizaram painéis expositivos, cenários e maquetes para apresentar os trabalhos, abrangendo diferentes disciplinas como História, Matemática, Língua Portuguesa, Educação Física, Geografia e Biologia (Figura 14). Professores destacaram o uso de pesquisas digitais e troca de experiências como principais estratégias de ensino. A observação dos trabalhos apresentados durante os eventos de culminância evidenciou também a forte valorização do contexto local por meio de exemplos regionais utilizados pelos alunos.

observation of the work presented by students.

In the final culminating events, students used exhibition panels, scenarios, and models to present their work, covering different subjects such as History, Mathematics, Portuguese Language, Physical Education, Geography, and Biology (Figure 14). Teachers highlighted the use of digital research and the exchange of experiences as key teaching strategies. Observation of the work presented during the culminating events also highlighted the strong emphasis on the local context through regional examples used by the students.



Figura 14 – Painéis apresentados na EE 4 (Eldorado). Nota: Os conteúdos foram organizados de cima para baixo, da esquerda para a direita: História, Cartografia/Matemática, Geografia física/Geologia, Educação física, Ciências sociais, Língua portuguesa, Turismo, Química/Geoquímica, Arqueologia, Biologia evolutiva, Educação Física, Valorização do local.

Figure 14 – Panels presented at EE 4 (Eldorado). Note: The contents were organized from top to bottom, from left to right: History, Cartography/Mathematics, Physical Geography/Geology, Physical Education, Social Sciences, Portuguese Language, Tourism, Chemistry/Geochemistry, Archaeology, Evolutionary Biology, Physical Education, Local Appreciation.

Do ponto de vista de conteúdo, também foi possível identificar a ampliação dos temas trabalhando no encantamento como variedade de espeleotemas, processos geológicos, conexões entre o ser humano e o meio natural, aspectos sociais e ciências biológicas (Figura 15).

From a content perspective, it was also possible to identify an expansion in the topics covered in the fascination section, such as a variety of speleothems, geological processes, connections between humans and the natural environment, social aspects, and biological sciences (Figure 15).



Figura 15 – À esquerda, um boco com parte das cenografias de cavernas construídas por alunos. À direita, os recursos de maquetes, muito utilizados nas apresentações. (A) e (B) Entradas de cavernas construídas dentro das escolas; (C, D e E) Representação de elementos característicos dentro das cavernas como um sítio arqueológico, espeleotema e um lago com animais troglóbios da região (bagre-cego); (F) Maquete com representação de caverna e vegetação local de Mata Atlântica; (G) Representação da infiltração da água no Epicarste e formação de espeleotemas; (H) Espeleotemas; (I) Representação do Ser Humano convivendo com a caverna nos dias atuais através do Turismo e (J) Expressão da arte de Tangram para apresentação de conteúdos.

Figure 15 – On the left, a model with part of the cave scenery built by students. On the right, models, widely used in presentations. (A) and (B) Cave entrances built inside schools; (C, D, and E) Representation of characteristic elements inside caves, such as an archaeological site, speleothems, and a lake with troglodytic animals from the region (blind catfish); (F) Model representing a cave and local Atlantic Forest vegetation; (G) Representation of water infiltration in the epikarst and formation of speleothems; (H) Speleothems; (I) Representation of humans coexisting with caves today through tourism; and (J) Expression of Tangram art for content presentation.

Os temas Geoconservação e Geodiversidade foram identificados direta ou indiretamente em aproximadamente 60% das observações. Outros temas relacionados a estudos socioambientais ou científicos, direta ou indiretamente ligados à espeleologia, também estiveram presentes em muitos dos trabalhos examinados.

Como principais desafios deste trabalho identificou-se a falta de tempo disponível nas escolas causada por mudanças na agenda e nas diretrizes estaduais de educação como uma barreira significativa para projetos interdisciplinares, incluindo o tema das cavernas, que perdeu espaço no segundo semestre de 2023. Além disso, problemas de comunicação entre professores e mudanças nos vínculos contratuais dificultaram o engajamento com o projeto. O sucesso das ini-

Geoconservation and geodiversity themes were directly or indirectly identified in approximately 60% of the observations. Other themes related to socio-environmental or scientific studies, directly or indirectly linked to speleology, were also present in many of the examined projects.

The main challenges identified in this work were the lack of time available in schools caused by changes in the agenda and state education guidelines, which were a significant barrier to interdisciplinary projects, including caves topic, which lost ground in the second half of 2023. In addition, communication problems between teachers and changes in contractual relationships made it difficult to engage with the project. The success of the initiatives varied according to the leadership of the coordinating teachers, especially when they had a connection with the

ciativas variou conforme a liderança de professores-coordenadores, especialmente quando estes tinham uma ligação com o tema das cavernas. A continuidade do projeto nos anos seguintes depende, portanto, de políticas institucionais ou da atuação de figuras de liderança comprometidas.

CONCLUSÕES

A análise dos dados coletados sobre os professores das escolas participantes do projeto revelou uma equipe docente experiente e diversificada, representativa de diferentes disciplinas e áreas de conhecimento. Embora conceitos como educação baseada no lugar, interdisciplinaridade e temas geradores sejam familiares, não há dados suficientes para confirmar que essas práticas sejam amplamente comuns nas escolas pesquisadas.

No campo da Geoconservação, a estratégia, os métodos adotados, os materiais gerados e a análise dos resultados desta pesquisa evidenciaram que ela se relacionou direta ou indiretamente com todas as etapas e objetivos propostos para a elaboração de estratégias de Geoconservação.

A pesquisa confirmou o potencial interdisciplinar e transversal do tema das cavernas, conforme avaliado pelos professores e demonstrado nos projetos escolares desenvolvidos, especialmente para os 8º e 9º anos do ensino fundamental.

O alinhamento com as habilidades e competências estabelecidas pelas diretrizes nacionais (BNCC) e estaduais (Currículo Paulista) ficou evidente tanto na avaliação dos professores, antes e após o projeto, quanto na comparação dos trabalhos dos alunos com os documentos orientadores.

A análise dos dados coletados antes e depois do projeto, juntamente com a observação dos tra-

topic of caves. The continuity of the project in the following years therefore depends on institutional policies or the actions of committed leaders.

CONCLUSIONS

Analysis of collected data on teachers from schools participating in the project revealed an experienced and diverse teaching staff, representing different disciplines and areas of knowledge. Although concepts such as place-based education, interdisciplinarity, and generative themes are familiar, there is insufficient data to confirm that these practices are widely common in the surveyed schools.

In the field of geoconservation, the strategy, methods adopted, materials generated, and analysis of the results of this research showed that it was directly or indirectly related to all stages and objectives proposed for the development of geoconservation strategies.

The research confirmed the interdisciplinary and cross-cutting potential of the caves topic, as assessed by teachers and demonstrated in the developed school projects, especially for the 8th and 9th grades of elementary school.

Alignment with the skills and competencies established by national (BNCC) and state (Currículo Paulista) guidelines was evident both in the teachers evaluation before and after the project and in the comparison of students' work with the guiding documents.

The data analysis collected before and after the project, together with observation of the students' final work, leads to the conclusion that the devel-

balhos finais dos alunos, permite concluir que a proposta educativa desenvolvida (PECI) teve um impacto significativo na compreensão do tema pelos estudantes e no desenvolvimento de questões regionais relacionadas ao reconhecimento, valorização do lugar e senso de pertencimento. Nesse contexto, a figura do professor-coordenador destacou-se como essencial, reforçando o princípio da educação baseada no lugar, ao utilizar experiências pessoais no reconhecimento e valorização do território na construção de uma cultura de pertencimento (sense of place) entre os alunos.

Os trabalhos finais apresentados mostraram uma ampla utilização de exemplos locais. Esses exemplos integraram não apenas o conhecimento científico associado ao ambiente subterrâneo, mas também questões mais amplas, como mudanças climáticas e aspectos históricos, culturais, sociais e econômicos.

Com base no engajamento e na profundidade demonstrados pelos alunos, é possível concluir que o tema das cavernas pode ser amplamente integrado às disciplinas do currículo escolar, assim como às disciplinas eletivas. Essa integração permite a conexão de saberes, o desenvolvimento da criatividade e a construção de novos conhecimentos pelos estudantes.

A análise do processo e dos resultados dos alunos também sugere que, apesar da falta de recursos em alguns contextos da educação pública, a resiliência e o entusiasmo com o tema foram capazes de superar essas limitações. Os materiais foram adaptados e utilizados de diferentes formas para enriquecer as apresentações, como maquetes, livretos e cenografias.

Considerando as Políticas Nacionais, os Objetivos de Educação Ambiental e as Diretrizes Nacionais

oped educational proposal (PECI) had a significant impact on the students' understanding of the topic and on the development of regional issues related to recognition, appreciation of the place, and sense of belonging. In this context, the role of the teacher-coordinator stood out as essential, reinforcing the principle of place-based education by using personal experiences in recognizing and valuing the territory to build a sense of belonging among students.

The final projects presented showed extensive use of local examples. These examples integrated not only scientific knowledge associated with the underground environment, but also broader issues such as climate change and historical, cultural, social, and economic aspects.

Based on the engagement and depth demonstrated by the students, it can be concluded that the caves topic can be widely integrated into school curriculum subjects, as well as elective subjects. This integration allows students to connect disciplines, develop creativity, and build new knowledge.

Analysis of the process and student results also suggests that, despite the lack of resources in some public education contexts, resilience and enthusiasm for the topic were able to overcome these limitations. The materials were adapted and used in different ways to enrich the presentations, such as models, booklets, and stage sets.

Considering National Policies, Environmental Education Objectives, and National Curriculum Guidelines for Environmental Education, the educational proposal presented reinforces the collective construction of a philosophy of valuing and respecting nature. Through interdisciplinary and cross-cutting approaches, the proposal encourages critical reflection on environmental and local issues, offers continuing education to teachers, and promotes the development of knowledge and skills related to

Curriculares de Educação Ambiental, a proposta educativa apresentada reforça a construção coletiva de uma filosofia de valorização e respeito à natureza. Por meio de abordagens interdisciplinares e transversais, a proposta estimula a reflexão crítica sobre questões ambientais e locais, oferece formação continuada aos docentes e promove o desenvolvimento de conhecimentos e habilidades relacionados a aspectos físicos, psíquicos e sociais. Além disso, respeita a autonomia da dinâmica escolar e dos docentes no desenvolvimento do projeto.

No âmbito da gestão escolar, em todas as unidades foi observado o comprometimento da direção com o projeto e a liberdade de ação dos professores. Nesse contexto, o professor-coordenador desempenha um papel central, não apenas como líder, mas também como agente de planejamento, criação, inspiração e conexão entre sua disciplina e as demais, assumindo um protagonismo na escola.

Embora as análises indiquem um cenário favorável para o uso do tema das cavernas como gerador interdisciplinar em uma educação baseada no lugar, ainda existem desafios. Há um distanciamento entre o potencial teórico, pedagógico e de conteúdo disponível e as questões práticas relacionadas à execução e priorização do tema pelas unidades escolares locais. As contradições do contexto socioeconômico, as limitações estruturais do corpo docente e as diretrizes de ensino aparecem como barreiras à incorporação das cavernas, um patrimônio natural regional, como política contínua de educação baseada no lugar.

Por fim, conclui-se que a proposta educativa possibilita a ressignificação do conteúdo escolar tradicional, conferindo maior significado ao que é aprendido e ensinado. Ao despertar o fascínio

physical, psychological, and social aspects. In addition, it respects the autonomy of school dynamics and teachers in the development of the project.

In terms of school management, all units demonstrated management commitment to the project and freedom of action for teachers. In this context, the coordinating teacher plays a central role, not only as a leader, but also as a planning, creation and inspiration agent as well as being the connection between their subject and others, taking on a central role in the school.

Although analyses indicate a favorable scenario for using the caves topic as an interdisciplinary generator in place-based education, challenges remain. There is a gap between the theoretical, pedagogical, and content potential available and the practical issues related to the implementation and prioritization of the theme by local school units. The contradictions of the socioeconomic context, the structural limitations of the teaching staff, and the teaching guidelines appear as barriers to the incorporation of caves, a regional natural heritage, as a continuous place-based education policy.

Finally, it can be concluded that the educational proposal enables the reinterpretation of traditional school content, giving greater meaning to what is learned and taught. By awakening a fascination with caves and offering opportunities for the practical application of school content in the exploration of a real world of science, adventure, and discovery, students demonstrated greater enthusiasm and engagement in the learning process. This engagement translated into the formulation of conjectures and the practical and democratic construction of new knowledge.

pelas cavernas e oferecer oportunidades de aplicação prática dos conteúdos escolares na exploração de um mundo real de ciência, aventura e descoberta, os alunos demonstraram maior entusiasmo e envolvimento no processo de aprendizagem. Esse engajamento se traduziu na formulação de conjecturas e na construção prática e democrática de novos conhecimentos.

REFERÊNCIAS / REFERENCES

BACCI, D.C., 2018, Educação para Geoconservação. IN: SANTOS, V.M.N, JACOBI, P.R. *Educação, Ambiente e Aprendizagem Social: reflexões e possibilidades à geoconservação e sustentabilidade*: Curitiba, CRV.

BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil*. Brasília: Presidência da República, 1988. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Portaria Nº 358, de 30 de setembro de 2009*. Brasília, DF, 2009. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/orientacoes-e-procedimentos/legislacoes/pelo> (acessado Março 2024).

BRASIL. Ministério da Educação. *Base Nacional Comum Curricular*. Brasília: Ministério da Educação, 2018. Disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518-versaofinal_silva.pdf (acessado outubro 2022).

BUENO, S. L. D. S., SHIMIZU, R. M., MORAES, J. C. B., 2016, A remarkable anomuran: the taxon *Aegla* Leach, 1820, in Taxonomic remarks, distribution, biology, diversity and conservation. A global overview of the conservation of freshwater decapod crustaceans, p. 23-64.

COMPIANI, M. Por uma pedagogia crítica do lugar/ambiente no ensino de Geociências e na Educação Ambiental. In: BACCI, D. C. (org.). *Geociências e Educação Ambiental*: Curitiba, Ponto Vital, 2015.

DA SILVA, M. L. N., MANSUR, K. L., DO NASCIMENTO, M. A. L., 2018, Serviços ecossistêmicos da natureza e sua aplicação nos estudos da geodiversidade: uma revisão. In: *Anuário do Instituto de Geociências, IGeo/UFRJ*, v. 4,1 no. 2, p. 699-709. Disponível em: https://doi.org/10.11137/2018_2_699_709

DAVID-CHAVEZ, D. M., GAVIN, M. C. A global assessment of Indigenous community engagement in climate research. *Environmental Research Letters*, v. 13, nº. 12, p. 123005, 2018.

DE MOURA CARVALHO, I. C. A pesquisa em educação ambiental: perspectivas e enfrentamentos. *Pesquisa em Educação Ambiental*, v. 15, no. 1, p. 39-50, 2020.

FAZENDA, I.C.A. *Didática e interdisciplinaridade*. 13 ed. Campinas: Papirus, 2011.

- GARCIA, M. G. M., NASCIMENTO, M. A. L., MANSUR, K. L., & PEREIRA, R. G. F. A. Geoconservation strategies framework in Brazil: Current status from the analysis of representative case studies. *Environmental Science & Policy*, v. 128, p. 194–207, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.11.006>.
- JACOBI, P. Educação ambiental, cidadania e sustentabilidade: *Cadernos de pesquisa*, v. 118, p. 189-205, 2003.
- KAKAZIAN, T. *Haverá a idade das coisas leves* [tradução de E. R. R. Heneault]: São Paulo, Editora Senac, 2005.
- KASTENS, K.A., MANDUCA, C.A. *Earth and Mind II - a synthesis of research on thinking and learning in the Geosciences*. Special Paper 486. Boulder: The Geological Society of America, 2012.
- MCDONOUGH, W., BRAUNGART, M. *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. Nova York: North point press, 2010.
- MENIN, D. D. S., BACCI, D. D. L. C. Serviços Espeleossistêmicos: como caracterizar as cavernas sobre o ponto de vista da Economia Ecológica e dos Serviços Geossistêmicos? *Geologia USP, Série Científica*, v. 23, no. 3, p. 121-139, 2023.
- MENIN, D. S., BACCI, D. C. Qualification of Caves for Educational Use and Scientific Dissemination: a Methodological Proposal. *Geoheritage*, v. 15, no. 1, p. 29, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12371-023-00789-x>.
- MENIN, D. S., BACCI, D. C. Avaliação de inventários e mecanismos de qualificação de cavernas pela perspectiva do uso educativo e da divulgação científica. *Geologia USP, Série Científica*, v. 22, no. 3, p. 3-17, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v22-184311>.
- MENIN, D. S., TOGNETTA, L. R. P., BACCI, D. C. As cavernas como tema interdisciplinar no ensino fundamental: *Revista Brasileira De Educação Ambiental RevBEA*, v. 17, no. 3, p. 72-91, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.34024/revbea.2022.v17.13432>.
- MENIN, D. S. D. Cavernas, Educação e Comunicação Científica: Uma proposta metodológica. *Boletim Eletrônico da Sociedade Brasileira de Espeleologia*, São Paulo n. 425, p. 36-39, 2021. Disponível em: https://www.cavernas.org.br/sbe_noticias/sbe-noticias-425/.
- MENIN, D.S., TOGNETTA, L.R.P. Dizem que toda caverna é assim..., *Literatura infanto-juvenil*. Americana, SP: Adonis, 2019.
- MIRA, L. F., MARINHO, M. de A., LOBO, H. A. S. Monitoria ambiental e suas contribuições na gestão dos Parques Estaduais Caverna do Diabo, Ilha do Cardoso e Turístico do Alto Ribeira (Vale do Ribeira, SP). *Revista Brasileira De Ecoturismo (RBEcotur)*, v. 14, n. 5, 2021.
- MONTEIRO, C. V. A., DE SOUZA, L. A. S. Educação Ambiental: uma abordagem acerca da desinformação política e ambiental. *Agroamazon*, v. 3, no. 1, p. 267-279, 2024.

NOVAES, H. T. *Entidades de apoio e comunidades quilombolas: análise sobre o circuito quilombola de turismo comunitário do Vale do Ribeira*. São Paulo: Editora Oficina Universitária, 2022.

ORLANDO, R. S. Entre avanços e retrocessos: a trajetória da Política Nacional de Educação Ambiental: *Revista Brasileira de Educação Ambiental RevBEA*, v. 19, no. 3, p. 476-494, 2024.

SANTANGELO, G., BRAMANTI, L. September, Ecology through time, an overview. *Rivista Di Biologia Biology Forum*, v. 99, no. 3, p. 395, . set2006

SEMKEN, S., WARD, E. G., MOOSAVI, S., CHINN, P. W. U. Place-based education in geoscience: theory, research, practice, and assessment. *Journal of Geoscience Education*, v. 65, 542- 562, 2017. Disponível em: <https://eric.ed.gov/?id=EJ1161333>. Acesso em: abril. 2022.

SEMKEN, S., FREEMAN, C. B. Sense of place in the practice and assessment of place based science teaching. *Science Education*, v. 92, no. 6, p. 1042-1057, 2008.

SEMKEN, S. Sense of place and place-based introductory geoscience teaching for American Indian and Alaska Native undergraduates. *Journal of Geoscience Education*, v. 53, n. 2, p. 149-157, 2005.

SOBEL, D., 2004, Place-based education: Connecting classrooms and communities. *Education for meaning and social justice*, v. 17, n. 3, p. 63-64, 2004.

STEWART, I. S., NIELD, T. Earth stories: context and narrative in the communication of popular geoscience. *Proceedings of the Geologists' Association*, v. 124, n. 4, p. 699-712, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2012.08.008>.

UNESCO. *United Nations Decade of Education for Sustainable Development 2004-2005. Draft International Implementation Scheme*. NewYork.: Escritório da UNESCO no Brasil, 2005.

UNESCO. *Educação para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: Objetivos de Aprendizagem*: Brasília, UNESCO, 2017.

URBAN, J., RADWANER-BAK, B., Margielewski, W. Geoheritage Concept in a Context of Abiotic Ecosystem Services (Geosystem Services) – How to Argue the Geoconservation Better? *Geoheritage*, v. 14, n. 2, p. 1-15, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00688-7>.

VAN REE, C. C. D. F., VAN BEUKERING, P. J. H. Geosystem services: A concept in support of sustainable development of the subsurface: Ecosystem Services, v. 20, p. 30-36, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.06.004>.

WOODHOUSE, J. L., KNAPP, C. E. Place-based curriculum and instruction: Outdoor and environmental education approaches. *Clearinghouse on Rural Education and Small Schools*, Appalachia Educational Laboratory, 2000.

SPATIAL PRIORITIZATION FOR THE CONSERVATION OF BRAZILIAN KARST AREAS

SPATIAL PRIORITIZATION FOR THE CONSERVATION OF BRAZILIAN KARST AREAS

Geovana Oliveira da Silva

Federal University of Mato Grosso, Cuiabá campus
E-mail: gioverapb045@outlook.com

Rodrigo Antônio Castro Souza

Federal University of Lavras
Federal University of Mato Grosso
E-mail: rodrigodesouzaac@gmail.com

Afonso Kempner

Federal University of Mato Grosso, Cuiabá campus
E-mail: afonso.hk@gmail.com

Thairik Mateus Silva Marques

Federal University of Mato Grosso, Cuiabá campus
E-mail: thairiksilvamarques@gmail.com

Neucir Szinwelski

State University of Western Paraná (Unioeste)
E-mail: neucirufv@gmail.com

Thadeu Sobral-Souza

Federal University of Mato Grosso, Cuiabá campus
E-mail: thadeusobral@gmail.com

RESUMO

As áreas cársticas brasileiras são regiões de alto valor biológico, geológico e humano que exercem provisão de serviços ecossistêmicos, como os aquíferos e os minerais. Apesar da existência de leis ambientais, as áreas cársticas ainda são pouco estudadas e pouco protegidas no Brasil. Este trabalho propõe uma priorização espacial para conservação destas áreas com base em indi-

ABSTRACT

Brazilian karst areas are regions of high biological, geological, and human value that provide ecosystem services, such as aquifers and minerals. Despite the existence of environmental laws, karst areas are still poorly studied and poorly protected in Brazil. This study proposes a spatial prioritization for the conservation of these areas based on indicators of anthropogenic impact, the network of conserva-

cadores de impacto antrópico, da rede de unidades de conservação e da cobertura de vegetação natural. Os resultados demonstram que grande parte das regiões cársticas brasileiras estão sob forte impacto antrópico, com baixa cobertura de vegetação natural e pouco protegidas pela legislação. Destacamos a necessidade de inclusão de “manchas” cársticas em políticas públicas, principalmente na criação unidades de conservação, além de reforçar que o uso sustentável dos recursos nessas regiões, mesmo que altamente exploradas, é a única solução viável para garantir a continuidade de atividades econômicas, a existência de ecossistemas saudáveis e a manutenção dos serviços ecossistêmicos.

PALAVRAS-CHAVE: patrimônio espeleológico, espeleologia, impacto antrópico, priorização espacial, conservação.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento socioeconômico alavancou a qualidade de vida humana em algumas regiões do planeta (Roe & Elliott, 2019). No entanto, o crescimento econômico desenfreado, aliado ao uso insustentável dos recursos naturais e à degradação ambiental têm ultrapassado os limites ecológicos do planeta e causado diversos cenários catastróficos ao redor do mundo, principalmente nas regiões subdesenvolvidas (Zalasiewicz *et al.*, 2024). Essa crise antropogênica tem colocado a vida na Terra em perigo (Jaureguiberry *et al.*, 2022), devido a sexta extinção em massa, reconhecida por apresentar taxas de extinção estimadas até 1.000 vezes maiores do que as naturais (Dirzo *et al.*, 2014; Ceballos *et al.*, 2015; Roe & Elliott, 2019). Esse processo ameaça todos os ecossistemas naturais, incluindo as regiões ainda pouco exploradas pelo ser humano, como os fundos oceânicos, áreas de

tion units, and natural vegetation cover. The results show that most Brazilian karst regions are under strong anthropogenic impact, with low natural vegetation cover and little protection by legislation. The need to include karst “spots” in public policies, especially in the creation of conservation units was highlighted. In addition, it is reinforced that the sustainable use of resources in these regions, even if highly exploited, is the only viable solution to ensure the continuity of economic activities, the existence of healthy ecosystems, and the maintenance of ecosystem services.

KEYWORDS: *speleological heritage, speleology, anthropic impact, spatial prioritization, conservation.*

INTRODUCTION

*Socioeconomic development has improved the quality of human life in some regions of the planet (Roe & Elliott, 2019). However, unbridled economic growth, coupled with the unsustainable use of natural resources and environmental degradation, has exceeded the planet’s ecological limits and caused several catastrophic scenarios around the world, especially in underdeveloped regions (Zalasiewicz *et al.*, 2024). This anthropogenic crisis has endangered life on Earth (Jaureguiberry *et al.*, 2022) due to the sixth mass extinction, recognized for having extinction rates estimated to be up to 1,000 times higher than natural rates (Dirzo *et al.*, 2014; Ceballos *et al.*, 2015; Roe & Elliott, 2019). This process threatens all natural ecosystems, including regions still largely unexplored by humans, such as the ocean floor, high-altitude areas, and natural underground environments. In addition, this threat also compromises*

grande altitude e ambientes naturais subterrâneos. Além disso, tal ameaça compromete também a provisão dos serviços ecossistêmicos essenciais ao bem-estar humano (Roe & Elliott, 2019).

A quantificação dos efeitos da pressão antrópica sobre os ambientes naturais é fundamental e urgente. Uma das formas de representá-los é por meio da pegada humana (*human footprint*, em inglês). O *human footprint* (HFP) é um índice global da pressão antrópica sobre as áreas terrestres do planeta que é atualizado anualmente (i.e., 1993 - 2022) e combina diferentes ameaças antrópicas, incluindo ambientes construídos, densidade populacional humana, incidência luminosa noturna, terras de cultivo, pastagens, estradas, ferrovias e vias navegáveis (Sanderson *et al.*, 2002; Venter *et al.*, 2016; Mu *et al.*, 2022). O HFP indica que, globalmente, 64,6 milhões de km² possuem alto grau de antropização (Pimm *et al.*, 2018) e que cerca de dois milhões de km² de ambientes naturais foram impactados nos últimos anos. Por outro lado, apenas 17,9 milhões de km² do planeta estão priorizados como áreas protegidas. Além da pequena proporção de áreas protegidas, que são disformes espacialmente (Oliveira *et al.*, 2017), a distribuição espacial é diretamente influenciada pelo grau de priorização da área, por questões históricas, políticas e sociais (Sobral-Souza *et al.*, 2018).

No Brasil, as áreas protegidas, conhecidas como Unidades de Conservação (UCs), são áreas naturais protegidas por lei que podem variar no grau de exploração de seus recursos naturais ou ser protegida integralmente, a depender da sua categoria. As UCs são fundamentais para a conservação da biodiversidade e para a manutenção dos serviços ecossistêmicos indispensáveis para o bem-estar humano (Sodhi & Ehrlich, 2010) frente ao Antropoceno. Porém, a rede de UCs brasileiras não conseguem abranger e proteger toda a biodiversidade,

the provision of ecosystem services essential to human well-being (Roe & Elliott, 2019).

Quantifying the effects of anthropogenic pressure on natural environments is essential and urgent. One way to represent these effects is through the human footprint. The human footprint (HFP) is a global index of anthropogenic pressure on the planet's land areas that is updated annually (i.e., 1993 - 2022) and combines different anthropogenic threats, including built environments, human population density, nighttime light incidence, cropland, pasture, roads, railways, and waterways (Sanderson et al., 2002; Venter et al., 2016; Mu et al., 2022). The HFP indicates that, globally, 64.6 million km² have a high degree of anthropization (Pimm et al., 2018) and that about two million km² of natural environments have been impacted in recent years. On the other hand, only 17.9 million km² of the planet are prioritized as protected areas. In addition to the small proportion of protected areas, which are spatially uneven (Oliveira et al., 2017), spatial distribution is directly influenced by the prioritization degree of the area, due to historical, political, and social issues (Sobral-Souza et al., 2018).

In Brazil, protected areas, known as Conservation Units (UCs), are natural areas protected by law that may vary in the degree of exploitation of their natural resources or be fully protected, depending on their category. UCs are fundamental for the conservation of biodiversity and for the maintenance of ecosystem services that are indispensable for human well-being (Sodhi & Ehrlich, 2010) in the face of the Anthropocene. However, the Brazilian network of CUs is unable to cover and protect all biodiversity, especially endangered species (Gutierrez & Duivenvoorden, 2010; Oliveira et al., 2017). Historically, the first Brazilian CUs were located near impacted regions with high population density in coastal areas. Population migration to the west—based on

em especial as espécies ameaçadas (Gutierrez & Duivenvoorden, 2010; Oliveira *et al.*, 2017). Historicamente, as primeiras UCs brasileiras estavam localizadas próximas às regiões impactadas e com alta densidade populacional, nas zonas litorâneas. A migração populacional para o oeste – baseada na política de marcha ao oeste – aumentou o impacto no Brasil central e ressaltou a necessidade de instaurar UCs nas regiões interioranas. Nessa conformidade histórica, as UCs brasileiras não são espacialmente uniformes e os poucos remanescentes naturais que se tornaram legalmente protegidos, em forma de UC, são pequenos e desconectados entre si (Dean, 1996), exceto na Amazônia brasileira (Soares-Filho *et al.*, 2023).

As mudanças da dinâmica do uso e cobertura da terra devido a exploração humana tem causado impactos negativos na biodiversidade, na atmosfera e nos aquíferos (Carvalho *et al.*, 2010; Konzen *et al.*, 2024). Na paisagem, as atividades econômicas mudam a estrutura espacial e a quantidade de vegetação nativa, transformando os ecossistemas naturais em mosaicos de fragmentos rodeados por matrizes de plantio ou solos desprovidos de vegetação, como é o caso de zonas de mineração (Wilson *et al.*, 2016). Nos últimos 38 anos, estima-se que o Brasil perdeu 33% da sua área nativa, sendo a maior perda localizada em propriedades particulares para criação de cultivo e pastagens (Belandi, 2022; Sinimbú, 2024; MapBiomias, 2024). Além das atividades agropecuárias, no Brasil, a mineração também é uma das atividades causadoras de perda da biodiversidade por perda de habitat, além de ser uma atividade conflituosa em relação a interesses políticos e terras indígenas (Sonter *et al.*, 2017; Prasniewski *et al.*, 2024). Visto a perda acelerada de sistemas naturais por consequência do aumento da exploração de recursos naturais pelas demandas po-

the westward march policy—increased the impact on central Brazil and highlighted the need to establish conservation units in inland regions. In line with this historical pattern, Brazilian conservation areas are not spatially uniform, and the few remaining natural areas that have become legally protected as conservation areas are small and disconnected from each other (Dean, 1996), except in the Brazilian Amazon (Soares-Filho et al., 2023).

Changes in land use and land cover dynamics due to human exploitation have had negative impacts on biodiversity, the atmosphere, and aquifers (Carvalho et al., 2010; Konzen et al., 2024). Economic activities change the spatial structure and amount of native vegetation in the landscape, transforming natural ecosystems into mosaics of fragments surrounded by crop matrices or vegetation-devoid soils, as is the case in mining areas (Wilson et al., 2016). Over the last 38 years, it is estimated that Brazil has lost 33% of its native area, with the greatest loss occurring on private properties for crop cultivation and pasture (Belandi, 2022; Sinimbú, 2024; MapBiomias, 2024). In addition to agricultural activities, mining in Brazil is also one of the activities causing biodiversity loss due to habitat loss, as well as being a conflictual activity in relation to political interests and indigenous lands (Sonter et al., 2017; Prasniewski et al., 2024). Given the accelerated loss of natural systems as a result of increased exploitation of natural resources due to population demands, methods for quantifying natural remnants are essential for actions aimed at spatial prioritization for biodiversity conservation and maintenance of ecosystem services. As a result, natural areas that are not yet protected and are under strong human pressure become a key factor in the allocation of financial resources and public policy discussions.

Karst areas are home to ecosystems with high biological, geological and human value, including

pulacionais, torna-se imprescindível métodos de quantificação de remanescentes naturais para ações que visem a priorização espacial para conservação da biodiversidade e manutenção dos serviços ecossistêmicos. Com isso, áreas naturais ainda não protegidas e que estão sob forte pressão humana se tornam uma peça chave para alocação de recursos financeiros e discussões de políticas públicas.

As áreas cársticas são regiões que abrigam ecossistemas com alto valor biológico, geológico e também humano, incluindo aspectos culturais, arqueológicos e recursos naturais como água potável (Ford & Williams, 2007; Stankovic, 2023; IUCN, 2024). Regiões cársticas possuem ambientes subterrâneos vulneráveis a qualquer alteração ao seu entorno (Cerkvenik, 2016; Qi et al., 2019; Ribeiro & Zorn, 2021). Conservar essas áreas garante não só a proteção desses ambientes como também os ecossistemas superficiais associados, além de cumprir com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, voltados as metas 6 e 15 (Água Limpa e Saneamento e Vida na Terra, respectivamente) da agenda de 2030 das Nações Unidas (UNDP, 2018; IUCN, 2024).

Nesse sentido, considerando que (i) as atividades antrópicas geram impactos na biodiversidade, que (ii) no Brasil, as atividades relacionadas a mineração geram um conhecimento espacial desigual em relação aos ambientes subterrâneos e, que (iii) são necessárias diferentes estratégias para a conservação das áreas cársticas, sua biodiversidade e seus serviços ecossistêmicos correlatos, este trabalho objetiva: associar a distribuição geográfica conhecida das áreas cársticas brasileiras à intensidade dos impactos antrópicos (HFP), a rede de Unidades de Conservação nacional e a proporção de vegetação nativa, para, a partir disso, construir um mapa de priorização espacial de conservação das áreas cársticas brasileiras.

cultural and archaeological aspects and natural resources such as drinking water (Ford & Williams, 2007; Stankovic, 2023; IUCN, 2024). Karst regions have underground environments that are vulnerable to any alteration to their surroundings (Cerkvenik, 2016; Qi et al., 2019; Ribeiro & Zorn, 2021). Conserving these areas guarantees not only the protection of these environments, but also the associated surface ecosystems, as well as complying with the Sustainable Development Goals, aimed at targets 6 and 15 (Clean Water and Sanitation and Life on Land, respectively) of the United Nations' 2030 agenda (UNDP, 2018; IUCN, 2024).

In this sense, considering that: (i) anthropogenic activities generate impacts on biodiversity. That (ii) in Brazil, mining-related activities generate unequal spatial knowledge in relation to underground environments; that (iii) different strategies are needed for the conservation of karst areas, their biodiversity and their related ecosystem services. This work aims to associate the known geographical distribution of Brazilian karst areas with the intensity of anthropogenic impacts (HFP), the network of national Conservation Units and the proportion of native vegetation, in order to build a spatial prioritization map for the conservation of Brazilian karst areas. On this map, karst areas will be prioritized into eight categories, ranging from areas with a high proportion of native vegetation, a low degree of anthropization and a low percentage of protected areas, to karst areas that could be used for mining - areas that currently have a high anthropogenic impact, with a low proportion of natural vegetation and a low percentage of protected areas. Based on the proposed prioritization, the conservation or land use strategies that should be used for each of the categories will be discussed, aiming at striking a balance between providing ecosystem services and maintaining socio-economic development (Figure 1).

Neste mapa, as áreas cársticas serão priorizadas em oito categorias indo desde áreas com elevada proporção de vegetação nativa, com baixo grau de antropização e baixa porcentagem de UCs, até áreas cársticas que podem ser utilizadas para mineração - áreas que atualmente possuem alto impacto antrópico, com baixa proporção de vegetação natural e com baixa porcentagem de áreas protegidas. A partir da priorização proposta, iremos discutir as estratégias de conservação, ou do uso do solo, que devem ser usadas para cada uma das categorias, visando o equilíbrio entre a provisão dos serviços ecossistêmicos e a manutenção do desenvolvimento socioeconômico (Figura 1).

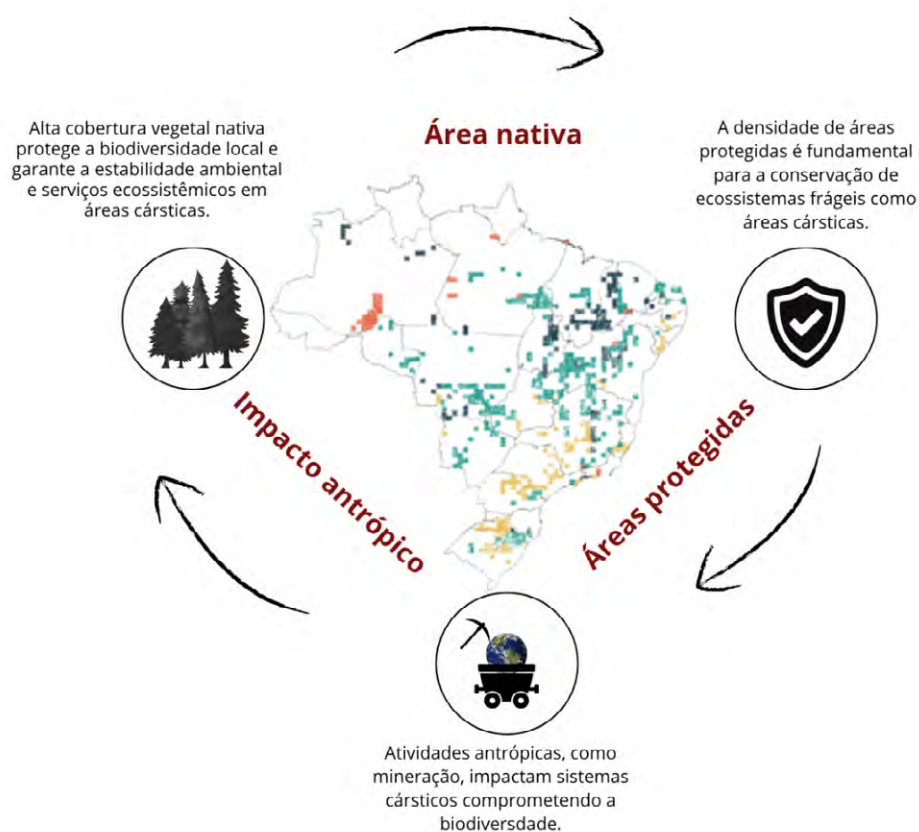


Figura 1- Esquemática para criação da priorização espacial para manchas cársticas brasileiras.

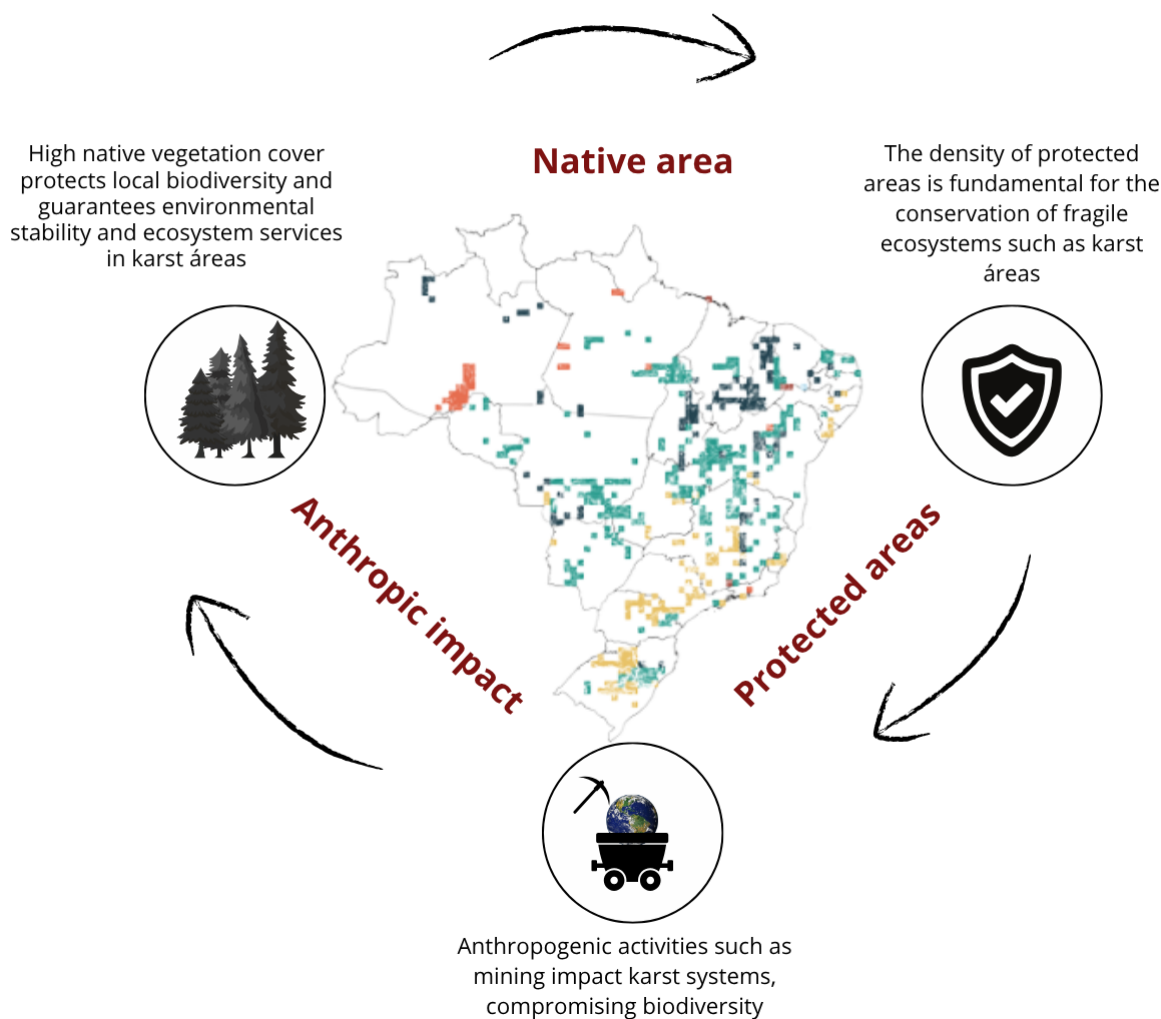


Figure 1- Schematic for creating the spatial prioritization for Brazilian karst areas.

METODOLOGIA

Preditores Antropogênicos e de Conservação das áreas cársticas

Para construir o mapa de priorização espacial para conservação das áreas cársticas brasileiras tomamos por base o mapa brasileiro de potencialidade de ocorrência de cavernas proposto pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas - ICMBIO/CECAV (ICMBioa, 2024). A partir deste, cada mancha cárstica (i.e., fragmento cárstico isolado) foi separada em ambiente GIS (Qgis versão 3.28.3) para que fosse criado o ín-

METHODOLOGY

Anthropogenic and conservation predictors of karst areas

To build the spatial prioritization map for the conservation of Brazilian karst areas, the Brazilian map of potential cave occurrences proposed by the National Cave Research and Conservation Centre - ICMBIO/CECAV was used (ICMBioa, 2024). Based on this, each karst spot (i.e. isolated karst fragment) was separated in a GIS environment (Qgis version 3.28.3) so that the prioritization index could be created for each of these areas separately. As predictor

dice de priorização para cada uma dessas áreas separadamente. Como variáveis preditoras para a priorização utilizamos (i) o índice de pegada humana (*human footprint*), (ii) a proporção de vegetação natural na área cárstica e (iii) a proporção da área cárstica que é protegida por UCs.

O índice de pegada antrópica - *human footprint* (HFP) - sumariza o grau de antropização de uma determinada área combinando oito variáveis de pressão humana: construções humanas, densidade populacional, luzes noturnas, agricultura, pastagem, estradas, ferrovias e vias navegáveis. Os mapas de HFP possuem 1 km² de resolução espacial (Venter *et al.*, 2016; Mu *et al.*, 2022, disponível em: <https://figshare.com/articles/figure/An_annual_global_terrestrial_Human_Footprint_dataset_from_2000_to_2018/16571064>), e estão atualizadas anualmente entre o período de 1993 até 2022. Como as áreas cársticas possuem área maior que 1 km², nós realizamos a estatística espacial *zonal* como forma de obter o valor médio de HFP para cada área cárstica do território brasileiro para o ano de 2022. Os valores de HFP variam de 0 a 50. Valores próximos a 0 demonstram áreas com baixo nível de antropização, enquanto valores próximos a 50 demonstram áreas extremamente impactadas.

A proporção de vegetação natural de cada mancha cárstica foi obtida a partir dos mapas de cobertura e uso de solo disponíveis na plataforma MapBiomas (Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>), com resolução de 1 km² e correspondente a configuração do uso e cobertura solo do ano de 2022. Como esse mapa categoriza o uso da terra em quatro níveis e os divide em categorias desde área nativa até a plantações, selecionamos os níveis que correspondem a todos remanescentes naturais de vegetação do Brasil, incluindo desde forma-

variables for prioritization (i) the human footprint index, (ii) the proportion of natural vegetation in the karst area and (iii) the proportion of the karst area that is protected by UCs was used.

The anthropic footprint index—human footprint (HFP)—summarizes the anthropization degree of a given area by combining eight variables of human pressure: human constructions, population density, night lights, agriculture, pasture, roads, railways, and waterways. HFP maps have a spatial resolution of 1 km² (Venter et al., 2016; Mu et al., 2022, available at: <https://figshare.com/articles/figure/An_annual_global_terrestrial_Human_Footprint_dataset_from_2000_to_2018/16571064>), and are updated annually between 1993 and 2022. As the karst areas are larger than 1 km², zonal spatial statistics was performed in order to obtain the average HFP value for each karst area in Brazil for the year 2022. HFP values range from 0 to 50. Values close to 0 show areas with a low level of anthropization, while values close to 50 show extremely impacted areas.

The proportion of natural vegetation in each karst area was obtained from the land cover and land use maps available on the MapBiomas platform (<https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>), with a resolution of 1 km² and corresponding to the land use and land cover configuration for the year 2022. As this map categorizes land use into four levels and divides them into categories from native area to plantations, the levels that correspond to all of Brazil's natural remnants of vegetation was selected, including everything from forest formations to rocky outcrops. Next, the map of Brazil's natural vegetation remnants was cut out for karst areas only. Subsequently, for each karst area, the percentage of native vegetation was calculated by dividing the total number of cells with natural remnants by the total number of cells that each karst area has. The

ções florestais até afloramentos rochosos. Em seguida, cortamos o mapa de remanescentes de vegetação natural do Brasil somente para as áreas cársticas. Posteriormente, para cada área cárstica, calculamos a porcentagem de vegetação nativa dividindo o número total de células com remanescente natural pelo número total de células que cada área cárstica possui. Os valores de proporção de vegetação nativa variam de 0 a 1 onde, valores próximos a 1 indicam áreas cársticas com elevada cobertura de vegetação natural enquanto valores próximos a 0 indicam manchas cársticas com alta antropização - baixa cobertura de vegetação natural.

A proporção de área protegidas em cada áreas cárstica foi baseada no mapa das unidades de conservação do Brasil disponíveis pelo Ministério do Meio Ambiente (disponível em <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/noticias/ultimas-noticias/mapa-com-todas-as-unidades-de-conservacao-federais-disponivel-em-varios-formatos>). Inicialmente, selecionamos as áreas conservadas com intersecção com cada área cárstica, considerando todas as categorias de UC (de proteção integral e uso sustentável). Em seguida, calculamos a proporção de área protegida dentro da área cárstica (AP) ($AP = \text{total de área protegida na área cárstica} / \text{área total da área cárstica}$) obtendo assim valores entre 0 e 1. Valores próximos a 1 indicam que a maior parte da área cárstica é protegida por UCs, enquanto valores próximos a 0 indicam baixa sobreposição entre UC e área cárstica avaliada.

Limiares de Priorização das Áreas Cársticas

Para construir o mapa de priorização espacial para a conservação das áreas cársticas brasilei-

native vegetation proportion values range from 0 to 1, where values close to 1 indicate karst areas with high natural vegetation cover, while values close to 0 indicate karst patches with high anthropization - low natural vegetation cover.

The proportion of protected areas in each karst area was based on Brazil's conservation units map available from the Ministry of the Environment (available at <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/noticias/ultimas-noticias/mapa-com-todas-as-unidades-de-conservacao-federais-disponivel-em-varios-formatos>). Initially, the conserved areas that intersected with each karst area was selected, taking into account all categories of CU (full protection and sustainable use). Then the proportion of protected area within the karst area was calculated ($PA = \text{total protected area in the karst area} / \text{total area of the karst area}$), thus obtaining values between 0 and 1. Values close to 1 indicate that most of the karst area is protected by CUs, while values close to 0 indicate low overlap between the UC and the evaluated karst area.

Prioritization Thresholds for Karst Areas

To construct the spatial prioritization map for the conservation of Brazilian karst areas, each predic-

ras, transformamos cada preditor em um raster com resolução de 0.5 graus (~50 km x 50 km). Em seguida, nós aplicamos limites de cortes para classificá-las. Para o impacto antrópico, consideramos o limite de 0.3, com base na classe “pressão muito alta” criada por Venter *et al.* (2016). Para a proporção de área considerada como altamente protegida escolhemos o limiar de 0.5, maior que o acordo estabelecido pelos países de proteger pelo menos 30% do seu território (UNEP, 2020). Aqui, consideramos o mesmo limite para cada célula procurando garantir o funcionamento do ecossistema e conectividade, porém, com mais rigor. O limiar de 0.75 de cobertura de vegetação natural se baseia em um consenso dado a partir de thresholds calculados por Chen *et al.* (2019) para porção de vegetação necessária para impedir processos de erosão de solo, e Locke & Winter (2024) para manter qualidade da água.

A partir dos limiares estabelecidos classificamos cada preditor em: pegada antrópica nas áreas cársticas (alta – acima de 50% e baixa – abaixo de 50%); proporção de conservação nas áreas cársticas (alta – acima de 50%, e baixo - abaixo de 50%); proporção de vegetação natural nas áreas cársticas (alta – acima de 75% e baixa – abaixo de 75%). Em seguida, os três preditores foram sobrepostos para criar categorias de prioridade de conservação (Tabela 1).

tor was transformed into a raster with a 0.5 degrees resolution (~50 km x 50 km). Then cut-off limits were applied to classify them. For anthropogenic impact, a threshold of 0.3 was considered, based on the “very high pressure” class created by Venter et al. (2016). For the proportion of area considered highly protected, a threshold of 0.5 was chosen, which is higher than the agreement established by countries to protect at least 30% of their territory (UNEP, 2020). Here, the same limit for each cell was considered, seeking to ensure ecosystem functioning and connectivity, but with greater rigor. The threshold of 0.75 for natural vegetation cover is based on a consensus derived from thresholds calculated by Chen et al. (2019) for the amount of vegetation needed to prevent soil erosion processes, and Locke & Winter (2024) for maintaining water quality.

Based on the established thresholds, each predictor was classified as follows: anthropic footprint in karst areas (high – above 30% and low – below 30%); proportion of conservation in karst areas (high – above 50%, and low – below 50%); proportion of natural vegetation in karst areas (high – above 75% and low – below 75%). Next, the three predictors were superimposed to create conservation priority categories (Table 1).

Tabela 1- Categorias de priorização para conservação das áreas cársticas brasileiras.

Categoria	Significado
1	Baixa pegada antrópica, alta proporção de vegetação natural e baixa proporção de área protegida.
2	Alta pegada antrópica, alta proporção de vegetação natural e baixa proporção de área protegida.
3	Alta pegada antrópica, alta proporção de vegetação natural e alta proporção de área protegida.
4	Baixa pegada antrópica, baixa proporção de vegetação natural e baixa proporção de área protegida.
5	Alta pegada antrópica, baixa proporção de vegetação natural e baixa proporção de área protegida.
6	Alta pegada antrópica, baixa proporção de vegetação natural e alta proporção de área protegida.
7	Baixa pegada antrópica, alta proporção de vegetação natural e alta proporção de área protegida.
8	Baixa pegada antrópica, baixa proporção de vegetação natural e alta proporção de área protegida.

Table 1- Prioritization categories for the conservation of Brazilian karst areas.

Category	Meaning
1	<i>Low human footprint, high proportion of natural vegetation and low proportion of protected area.</i>
2	<i>High human footprint, high proportion of natural vegetation and low proportion of protected area.</i>
3	<i>High human footprint, high proportion of natural vegetation and high proportion of protected area.</i>
4	<i>Low human footprint, low proportion of natural vegetation and low proportion of protected area.</i>
5	<i>High human footprint, low proportion of natural vegetation and low proportion of protected area.</i>
6	<i>High human footprint, low proportion of natural vegetation and high proportion of protected area.</i>
7	<i>Low human footprint, high proportion of natural vegetation and high proportion of protected area.</i>
8	<i>Low human footprint, low proportion of natural vegetation and high proportion of protected area.</i>

RESULTADOS

O modelo de priorização espacial para conservação das áreas cársticas brasileiras gerou áreas prioritárias para sete - das oito - categorias (Tabela 2) (Figura 2). A categoria (1) - áreas com baixa pegada antrópica, alta proporção de vegetação natural e baixa proporção de área protegida - apresentou regiões cársticas principalmente no Nordeste e Norte do Brasil, mas com algumas áreas isoladas em diferentes Estados, incluindo Amazonas, Pará, Mato Grosso, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Bahia, Minas Gerais, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Já a categoria (2) - Alta pegada antrópica, alta proporção de vegetação natural e baixa proporção de área protegida, domina as áreas cársticas no Piauí, mas também aparece na Bahia, Minas Gerais e na divisa de Pernambuco e Paraíba. A categoria (3) - Alta pegada antrópica, alta proporção de vegetação natural e alta proporção de área protegida - não apresentou região cárstica correspondente. A categoria (4) - baixa pegada antrópica, baixa proporção de vegetação natural e baixa proporção de área protegida - abrange as regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil, distribuída nos estados de Rondônia, Pará, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Rio Grande do Norte, Bahia, Minas Gerais, São Paulo e Paraná. A categoria (5) - Alta pegada antrópica, baixa proporção de vegetação natural e baixa proporção de área protegida - foi a mais abundante e apresentou regiões principalmente no Sul, Sudeste, Centro Oeste e Nordeste, distribuída nos estados de Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Bahia, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Rio Grande do Norte, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Pará e Tocantins. A

RESULTS

The spatial prioritization model for the conservation of Brazilian karst areas generated priority areas for seven - of the eight - categories (Table 2) (Figure 2). Category (1) - areas with a low human footprint, a high proportion of natural vegetation and a low proportion of protected area - showed karst regions mainly in the northeast and north of Brazil, but with some isolated areas in different states, including Amazonas, Pará, Mato Grosso, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Bahia, Minas Gerais, Santa Catarina and Rio Grande do Sul. Category (2) - High human footprint, high proportion of natural vegetation and low proportion of protected area, dominates the karst areas in Piauí, but also appears in Bahia, Minas Gerais and on the border between Pernambuco and Paraíba. Category (3) - High human footprint, high proportion of natural vegetation and high proportion of protected area - had no corresponding karst region. Category (4) - low human footprint, low proportion of natural vegetation and low proportion of protected area - covers the North, Northeast, Center-west, Southeast and South regions of Brazil, distributed in the states of Rondônia, Pará, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Rio Grande do Norte, Bahia, Minas Gerais, São Paulo and Paraná. Category (5) - High human footprint, low proportion of natural vegetation and low proportion of protected area - was the most abundant and featured regions mainly in the South, Southeast, Midwest and Northeast, distributed in the states of Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Bahia, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Rio Grande do Norte, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Pará and Tocantins. Category (6) - High human footprint, low proportion of natural vegetation and high proportion of protected area

categoria (6) - Alta pegada antrópica, baixa proporção de vegetação natural e alta proporção de área protegida - apresenta localidades no Piauí, Ceará, Pernambuco e Minas Gerais. A categoria (7) - Baixa pegada antrópica, alta proporção de vegetação natural e alta proporção de área protegida - está presente principalmente na região Norte, distribuída nos estados do Pará, Amazonas, Rondônia e Amapá, Rio de Janeiro e Bahia. A categoria (8) - Baixa pegada antrópica, baixa proporção de vegetação natural e alta proporção de área protegida - possui pouca representatividade nas áreas cársticas, aparecendo na divisa do Pará com Maranhão.

- has locations in Piauí, Ceará, Pernambuco and Minas Gerais. Category (7) - Low human footprint, high proportion of natural vegetation and high proportion of protected area - is mainly present in the North, distributed in the states of Pará, Amazonas, Rondônia and Amapá, Rio de Janeiro and Bahia. Category (8) - Low anthropogenic footprint, low proportion of natural vegetation and high proportion of protected area - has little representation in karst areas, appearing on the border between Pará and Maranhão.

Tabela 2- Distribuição das oito categorias de priorização espacial para regiões cársticas brasileiras.

Categoria	Regiões de ocorrência
1	Amazonas, Pará, Mato Grosso, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Bahia, Minas Gerais, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.
2	Piauí, Bahia, Minas Gerais, Pernambuco e Paraíba.
3	Sem correspondência
4	Rondônia, Pará, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Rio Grande do Norte, Bahia, Minas Gerais, São Paulo e Paraná.
5	Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Bahia, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Rio Grande do Norte, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Pará e Tocantins.
6	Piauí, Ceará, Pernambuco e Minas Gerais.
7	Pará, Amazonas, Rondônia, Amapá, Rio de Janeiro e Bahia.
8	Pará e Maranhão.

Table 2- Distribution of the eight spatial prioritization categories for Brazilian karst regions.

Category	Regions of occurrence
1	Amazonas, Pará, Mato Grosso, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Bahia, Minas Gerais, Santa Catarina and Rio Grande do Sul.
2	Piauí, Bahia, Minas Gerais, Pernambuco and Paraíba.
3	No correspondence
4	Rondônia, Pará, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Rio Grande do Norte, Bahia, Minas Gerais, São Paulo and Paraná.
5	Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Bahia, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Rio Grande do Norte, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Pará and Tocantins.
6	Piauí, Ceará, Pernambuco and Minas Gerais.
7	Pará, Amazonas, Rondônia, Amapá, Rio de Janeiro and Bahia.
8	Pará and Maranhão.

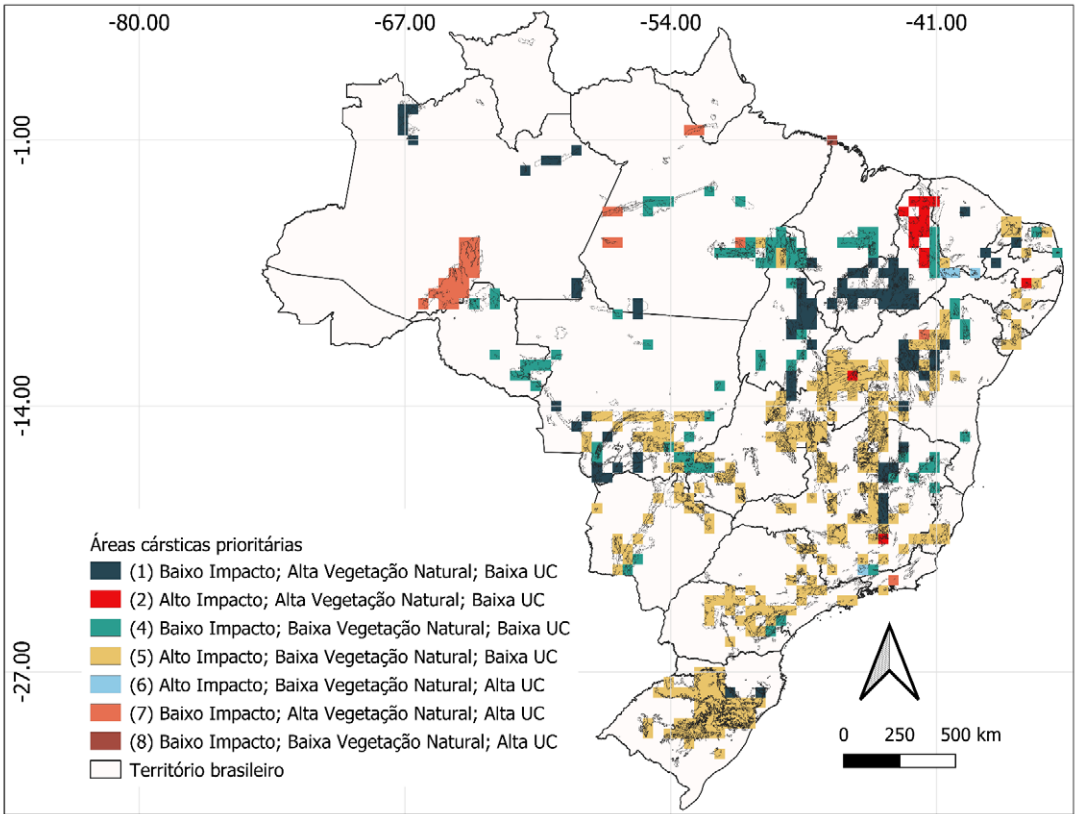


Figura 2- Mapa de priorização espacial para áreas cársticas brasileiras.

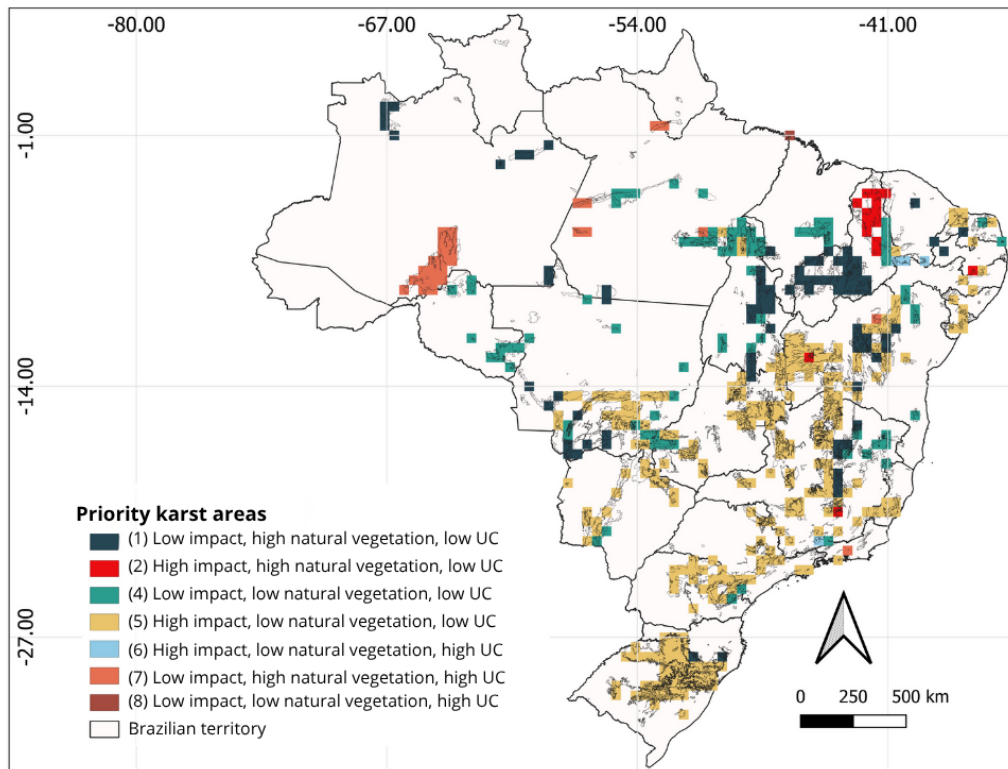


Figure 2- Spatial prioritization map for Brazilian karst areas.

DISCUSSÃO

A abordagem de priorização de áreas cársticas para conservação, em macroescala, proporciona entender como está configurada espacialmente a relação entre impacto, preservação e proteção das áreas cársticas brasileiras. Os resultados demonstram que, com base nos limites aqui utilizados, o Brasil possui a maioria das manchas cársticas com alto índice de impacto antrópico, com baixa porcentagem de remanescentes de vegetação natural e poucas regiões protegidas, indicado pela categoria 5. Poucas são as áreas que possuem áreas cársticas com baixo impacto, com alta porcentagem de vegetação natural e protegida, indicado pela categoria 7. Tais resultados indicam claramente o alto grau de impacto antrópico sobre áreas cársticas brasileiras e destacam a necessidade de discutir e instaurar novas medidas estratégicas de conservação, como forma de salvaguardar os seus serviços ecossistêmicos, garan-

DISCUSSION

The macro-scale approach to prioritizing karst areas for conservation provides an understanding of how the relationship between impact, preservation and protection of Brazilian karst areas is spatially configured. The results show that, based on the limits used here, most of Brazil's karst areas have a high level of anthropogenic impact, with a low percentage of remnants of natural vegetation and few protected areas, as indicated by category 5. Few karst areas have low impact, with a high percentage of natural and protected vegetation, indicated by category 7. These results clearly indicate the high degree of anthropogenic impact on Brazilian karst areas and highlight the need to discuss and implement new strategic conservation measures, as a way of safeguarding their ecosystem services, guaranteeing water security (one of the goals of the 2030 agenda and the United Nations for the sustainable development of the planet) and the quality

tir a segurança hídrica (uma das metas da agenda 2030 e das nações unidas para o desenvolvimento sustentável do planeta) e a qualidade de vida humana. Abaixo discutimos as principais estratégias de conservação que podem ser adotadas para cada uma das categorias aqui propostas.

O Status de Conservação das Áreas Cársticas do Brasil

Os resultados indicam a existência de poucas manchas cársticas, espacialmente isoladas, como o caso da categoria 1, que indica áreas com baixo impacto antrópico, alta porcentagem de remanescente naturais e baixa proporção de UCs cobrindo seu território (Figura 2, verde escuro). Essas manchas estão majoritariamente localizadas na região norte do Brasil, no bioma Amazônico, além disso algumas estão localizadas nas zonas de transição entre Amazônia e Caatinga, e Amazônia e Cerrado. Politicamente essas manchas devem ser priorizadas para a criação de novas UCs e/ou aumentar a extensão territorial daquelas que já existem. Como ainda possuem elevada porcentagem de vegetação nativa e baixo impacto antrópico, essas áreas promovem serviços ecossistêmicos que, tanto em escala local, quanto em escala regional, são responsáveis por manter a qualidade de vida humana. Ressaltamos ainda que priorizar toda a mancha cárstica como estratégia de conservação, inclusive para instauração de novas UCs, auxilia a manter a biodiversidade intacta e salvaguardar as possíveis cavidades subterrâneas ainda desconhecidas, e o provimento de seus serviços ecossistêmicos. Outra estratégia de priorização para conservação das áreas cársticas é o processo de restauração. Quanto a categoria 2, que mostra regiões altamente impactadas, com pouca área protegida, mas com alta proporção de vegetação natural,

of human life. Below the main conservation strategies that can be adopted for each of the categories proposed here is discuss.

The Conservation Status of Brazil's Karst Areas

The results indicate the existence of few karstic spots, spatially isolated, as in the case of category 1, which indicates areas with low anthropic impact, a high percentage of natural remnants, and a low proportion of conservation units covering their territory (Figure 2, dark green). These patches are mainly located in northern Brazil, in the Amazon biome, and some are located in the transition zones between the Amazon and Caatinga, and the Amazon and Cerrado. Politically, these patches should be prioritized for the creation of new conservation units and/or to increase the territorial extension of existing ones. As they still have a high percentage of native vegetation and low anthropic impact, these areas promote ecosystem services that are responsible for maintaining human quality of life, both locally and regionally. The prioritizing of the entire karst area as a conservation strategy is also emphasized, including for the establishment of new conservation units, which helps to keep biodiversity intact and safeguard possible unknown underground caves and the provision of their ecosystem services. Another prioritization strategy for the conservation of karst areas is the restoration process. As for category 2, which shows highly impacted regions with little protected area but a high proportion of natural vegetation, very present in the state of Piauí, the sustainable use of the region's resources is recommend (Figure 2 - red). Spatial prioritization divided the state into

muito presente no estado do Piauí, indicamos o uso sustentável dos recursos da região (Figura 2 - vermelho). A priorização espacial dividiu o estado em duas categorias principais, o norte com a (4) e o sul com a (1). O Piauí possui vasta quantidade de solo cárstico, com destaque para o Alto Vale do Rio Piauí, inserido no Parque Nacional Serra da Capivara, que possui valor arqueológico, paleontológico e indicadores paleoambientais (La Salvia & Simões, 1997). Contudo, a região tem enfrentado mudanças na cobertura do solo e aumento do crescimento populacional, resultando principalmente na perda de vegetação e formação de solos impermeáveis (Lima *et al.*, 2021; Peret, 2021). Tais fatores podem ser problemáticos tanto para as áreas que não estão protegidas, no norte, quanto para o sul do estado com terras protegidas, mas que podem se tornar apenas um fragmento isolado afetado pela poluição.

A categoria 4, indica áreas com baixo impacto antrópico, com pouca porcentagem de UC e com pouca vegetação nativa (Figura 2, verde claro). Essas áreas, são normalmente dominadas por atividades de produção de commodities agrícolas. Dessa forma, a restauração da vegetação natural, de forma ativa ou passiva, é a estratégia primordial para que as manchas cársticas se mantenham preservadas para o provimento de serviços ecossistêmicos. É claro que a estratégia de restauração dessas áreas deve priorizar também medidas sustentáveis tanto para restaurar as áreas impactadas quanto para manter as atividades de produção das commodities. As medidas de restauração devem priorizar novas estratégias sustentáveis de produção de commodities principalmente voltadas para a segurança hídrica da agricultura, uma das principais ameaças atuais da produção das commodities agrícolas (Li *et al.*, 2023). Assim sendo, restaurar essas manchas cársticas, e manter

two main categories, the north with four (4) and the south with one (1). Piauí has a vast amount of karstic soil, especially in the Upper Piauí River Valley, located in the Serra da Capivara National Park, which has archaeological and paleontological value and paleoenvironmental indicators (La Salvia & Simões, 1997). However, the region has faced changes in land cover and increased population growth, resulting mainly in vegetation loss and the formation of impermeable soils (Lima et al., 2021; Peret, 2021). These factors can be problematic for unprotected areas in the north and for the south of the state with protected lands, which may become isolated fragments affected by pollution.

Category 4 indicates areas with low anthropic impact, with a low percentage of conservation units and little native vegetation (Figure 2, light green). These areas are usually dominated by agricultural commodity production activities. Therefore, the restoration of natural vegetation, either actively or passively, is the primary strategy for preserving karst areas to provide ecosystem services. Of course, the restoration strategy for these areas must also prioritize sustainable measures to restore impacted areas and maintain commodity production. Restoration measures should prioritize new sustainable commodity production strategies focused primarily on water security in agriculture, one of the main current threats to agricultural commodity production (Li et al., 2023). Therefore, restoring these karstic areas and maintaining their protection will help both to protect biodiversity and yet unknown underground caves, and to maintain natural resources that will aid agricultural production, thereby maintaining the region's socioeconomic development in a sustainable manner.

Most of the karstic areas located in the Cerrado, Atlantic Forest, Pampa, and Caatinga biomes are classified as category 5, indicating a high level of

a sua proteção, irá auxiliar tanto na proteção da biodiversidade e de cavidades subterrâneas ainda desconhecidas, quanto na manutenção de recursos naturais que irão auxiliar a produção agrícola, mantendo o desenvolvimento socioeconômico da região de forma sustentável.

Grande parte das manchas cársticas localizadas nos biomas Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Caatinga estão classificadas na categoria 5, indicando um elevado nível de impacto antrópico, baixa cobertura de vegetação natural e pouco território protegido (Figura 2, amarelo). Esse padrão reflete a atual situação de regiões em que o desenvolvimento de atividades econômicas de exploração tem carga política e histórica, ou seja, ao longo da história do país foram afetadas pela devastação da vegetação somado pela falta de leis ambientais mais rigorosas (Ribeiro *et al.*, 2021; Marques, 2022; Capoane & Fushimi, 2024; Costa *et al.*, 2024). Nossa recomendação é a criação de estratégias que visam o desenvolvimento sustentável garantindo a continuidade das atividades e também a manutenção dos recursos naturais que essas áreas ainda oferecem. O desenvolvimento sustentável além de sinalizar uma bandeira verde apresentada para empreendimentos e países que têm exigências em ações “verdes”, também permite o contínuo crescimento econômico sem impactar a qualidade de vida, devido ao colapso de ecossistemas impactados (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; UN, 2023).

O sul do estado do Ceará foi o local que apresentou a categoria 6 de maneira representativa, indicando, um elevado nível de impacto antrópico, baixa cobertura de vegetação natural e alta proporção de terra protegida (Figura 2, azul claro). Nesse local, há uma área de proteção ambiental, a APA da Chapada do Araripe, próxima a fragmentos de vegetação, cercado por terras ocupadas

anthropic impact, low natural vegetation cover, and little protected territory (Figure 2, yellow). This pattern reflects the current situation in regions where the development of economic exploitation activities has political and historical significance, i.e., throughout the country's history, they have been affected by the devastation of vegetation coupled with the lack of stricter environmental laws (Ribeiro et al., 2021; Marques, 2022; Capoane & Fushimi, 2024; Costa et al., 2024). It is recommended to create strategies aimed at sustainable development, ensuring the continuity of activities and the maintenance of the natural resources that these areas still offer. Sustainable development not only signals a green flag for enterprises and countries that have requirements for “green” actions, but also allows for continued economic growth without affecting quality of life due to the collapse of impacted ecosystems (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; UN, 2023).

The southern part of Ceará state was the location that presented category 6 in a representative manner, indicating a high level of anthropic impact, low natural vegetation cover, and a high proportion of protected land (Figure 2, light blue). In this location, there is an environmental protection area, the Chapada do Araripe APA, close to fragments of vegetation, surrounded by agricultural and livestock activities land (MapBiomas, 2022). This scenario is representative of what Brazil currently looks like, with a protected area surrounded by land used for economic production. Caution is suggested in this location, and potential regions like it, in addition to legislation aimed at stricter enforcement in order to avoid impacts such as pollution of the APA. Areas of the Amazon biome are classified in category 7, which indicates that they are protected and, consequently, have little anthropic impact and high native area coverage (Figure 2, crimson

pela atividade agropecuária (MapBiomas, 2022). Esse cenário representa bem o que o Brasil transpõe atualmente, uma área de proteção circundada por terras direcionadas à produção econômica. Sugerimos nesse local, e potenciais regiões como essa, cautela e uma legislação voltada para fiscalização mais rigorosa a fim de evitar impactos como poluição da APA. Áreas do bioma amazônico estão classificadas na categoria 7, o que indica que estão protegidas, e consequentemente possuem pouco impacto antrópico e alta cobertura de área nativa (Figura 2, vermelho carmesim). A Amazônia possui maior visibilidade por parte da comunidade internacional, recebendo fundos de organizações voltadas para conservação, diferente de outros biomas como o Cerrado, por exemplo. Apesar da visibilidade, a Amazônia sofre com problemas de desmatamento (WWF, 2022). Para essa categoria priorizamos novamente ações de fiscalização ambiental. A mesma recomendação é dada para as áreas classificadas na categoria 8 (Figura 2, vermelho cornalina), cuja qual apresenta boa parte do carste protegido e completamente isolada no norte do país.

Conservação x Áreas Cársticas

No Brasil, o Decreto 99.556/1990 foi o primeiro que de fato trouxe indiretamente o carste em pauta a fim de garantir a integridade física e ecológica das cavidades naturais subterrâneas (Brasil, 1990), a partir de então outras leis, juntamente com a criação do CECAV, garantiram maior especificidade em como as cavernas que estão inseridas no carste devem ser protegidas. Atualmente, a proteção do carste está indiretamente atrelada com o grau de relevância da caverna inserida no mesmo, que é medida através de parâmetros ligados a estudos biológicos, geológicos, culturais, entre outros (Brasil, 2009; Brasil, 2022). Entretanto, a depender do

red). The Amazon has greater visibility from the international community, receiving funds from conservation-oriented organizations, unlike other biomes such as the Cerrado, for example. Despite its visibility, the Amazon suffers from deforestation problems (WWF, 2022). For this category, environmental enforcement actions are again a priority. The same recommendation is given for areas classified in category 8 (Figure 2, carnelian red), which presents a large part of the protected karst and is completely isolated in the north of the country.

Conservation x Karst Areas

In Brazil, Decree 99.556/1990 was the first to indirectly bring karst onto the agenda in order to ensure the physical and ecological integrity of natural underground caves (Brazil, 1990). Since then, other laws, together with the creation of CECAV, have ensured greater specificity in how caves that are part of karst should be protected. Currently, the protection of karst is indirectly linked to the degree of relevance of the cave within it, which is measured through parameters related to biological, geological, and cultural studies, among others (Brazil, 2009; Brazil, 2022). Nevertheless, depending on the classified degree of the caves, whether high, medium, or low, the

grau classificado das cavernas, seja alto, médio e baixo, a legislação permite que a caverna possa sofrer impactos ambientais irreversíveis, isso significa que apenas as o carste com cavidades com grau de relevância máximo não podem sofrer alterações irreversíveis de fato (Brasil, 2008; Donato *et al.*, 2018). Porém, existe uma brecha no conhecimento espeleológico de distribuição das cavernas, que é mais forte próximo de zonas de mineração e centros urbanos, e também depende da fiscalização efetiva para que as cavernas sejam cadastradas e protegidas. Por conta disso, nós reforçamos que estudos de priorização de conservação das áreas cársticas, e não somente das cavidades subterrâneas, são mais eficientes para conservação da biodiversidade, da vegetação nativa, e dos serviços ecossistêmicos correlatos. Essa conservação, e manutenção dos serviços ecossistêmicos das áreas cársticas, irá trazer valor aos produtos e auxiliará tanto na melhoria das atividades econômicas quanto na qualidade de vida humana.

Recentemente a discussão de estratégias de uso sustentável de áreas cársticas tem vindo à tona, principalmente como forma de mitigar o impacto antrópico nesses ambientes (Pamardhi-Utomo, 2020). Contudo, poucas abordagens indicam como e para que as áreas cársticas devem ser priorizadas (Fattorini *et al.*, 2022; Oliveira & Ferreira 2024). No Brasil, foram criados índices de priorização de cavernas por Simões *et al.* (2014), Souza-Silva *et al.* (2015) e Nitzu *et al.* (2018) considerando principalmente a biodiversidade registrada em cavidades subterrâneas, sendo estes comparados por Rabelo *et al.* (2018). Tais índices de priorização são essenciais para instaurar a criação de UCs, porém eles consideram apenas a localização da caverna e seu entorno, sem expandir para toda mancha cárstica que pode abrigar cavernas ainda desconhecidas. Além disso,

legislation allows the cave to suffer irreversible environmental impacts, which means that only karst with caves with the highest degree of relevance cannot suffer irreversible changes (Brazil, 2008; Donato et al., 2018). However, there is a gap in speleological knowledge of cave distribution, which is stronger near mining areas and urban centers, and depends on effective enforcement for caves to be registered and protected. Due to this fact, it is emphasized that studies prioritizing the conservation of karst areas, and not just underground caves, are more efficient for the conservation of biodiversity, native vegetation, and related ecosystem services. This conservation and maintenance of ecosystem services in karst areas will add value to products and help improve both economic activities and human quality of life.

Recently, the discussion of strategies for the sustainable use of karst areas has come to the fore, mainly as a way to mitigate anthropogenic impact on these environments (Pamardhi-Utomo, 2020). However, few approaches indicate how and why karst areas should be prioritized (Fattorini et al., 2022; Oliveira & Ferreira 2024). In Brazil, cave prioritization indices were created by Simões et al. (2014), Souza-Silva et al. (2015), and Nitzu et al. (2018), mainly considering the biodiversity recorded in underground caves, which were compared by Rabelo et al. (2018). Such prioritization indices are essential for establishing the creation of conservation units, but they only consider the location of the cave and its surroundings, without expanding to the entire karst area that may harbor yet unknown caves. Furthermore, to prioritize a cave, Souza et al. (2021) showed that it is necessary to combine different ecological metrics, rather than just one index that refers only to endemic subterranean species. In this sense, the prioritization of karst areas, considering all the coverage that these environments encompass, opens up a new approach to prioritization that can even be combined

para priorizar uma caverna, Souza *et al.* (2021) mostraram que é preciso combinar diferentes métricas ecológicas, ao invés de apenas um índice que remete a apenas espécies subterrâneas endêmicas. Nesse sentido, a priorização das áreas cársticas, considerando toda cobertura que esses ambientes abrangem, abre uma nova abordagem de priorização que pode inclusive ser combinada com as estratégias baseadas em cavidades subterrâneas já conhecidas, a fim de estabelecer soluções mais efetivas, complementares e inovadoras para a proteção do patrimônio espeleológico brasileiro em larga escala espacial.

No Brasil, a criação de Unidades de Conservação segue as instruções do Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC) (BRASIL, 2000). Cerca de 49% das UC's estão no domínio amazônico, enquanto os domínios do Cerrado e Mata Atlântica só possuem 10% de seu território protegido (Vieira *et al.*, 2019; Lamounier *et al.*, 2024). A maior parte das regiões cársticas estão na região central e nordeste do país. Criar UCs é importante para garantir a conservação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos. Porém, a determinação de como e onde a UC vai ser criada é decisão política e o apelo econômico normalmente pesa mais do que atributos ecológicos. Theulen & Sessegholo (2001) discutem sobre a eficiência das UCs e demonstram que a eficiência será maior com a inclusão também a diversidade espeleológica, ao invés de lidar com esses ecossistemas de forma separada, já que o mundo subterrâneo é dependente da superfície (Mammola & Leroy, 2018).

No Brasil, a proteção do patrimônio espeleológico é dada pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV) e pelo Plano de Ação Nacional para Conservação do Patrimônio Espeleológico Brasileiro (PAN) (ICMBiob, 2024). Desde o surgimento destes órgãos específicos

with strategies based on already known caves, in order to establish more effective, complementary, and innovative solutions for the protection of Brazilian speleological heritage on a large spatial scale.

In Brazil, the creation of Conservation Units follows the instructions of the National System of Nature Conservation Units (SNUC) (BRAZIL, 2000). About 49% of UCs are in the Amazon region, while only 10% of the Cerrado and Atlantic Forest regions are protected (Vieira et al., 2019; Lamounier et al., 2024). Most karst regions are located in the central and northeastern parts of the country. Creating conservation units is important to ensure the conservation of biodiversity and ecosystem services. However, determining how and where a conservation unit will be created is a political decision, and economic appeal usually outweighs ecological attributes. Theulen & Sessegholo (2001) discuss the efficiency of conservation units and demonstrate that efficiency will be greater if speleological diversity is also included, rather than dealing with these ecosystems separately, since the underground world is dependent on the surface (Mammola & Leroy, 2018).

In Brazil, the protection of speleological heritage is provided by the National Center for Cave Research and Conservation (CECAV) and the National Action Plan for the Conservation of Brazilian Speleological Heritage (PAN) (ICMBiob, 2024). Since the emergence of these specific protection agencies, data on the Brazilian speleological situation has been made available, allowing for transparent monitoring of the status of underground environments. CECAV, for example, provides specialized literature, maps with the distribution and classification of karst soil in Brazil, and data on the distribution of already cataloged caves. In addition, there has been a push to reallocate financial resources to projects in these ecosystems, such as the Speleological Project Management System – Pró-Espeleo, as well as calls for

de proteção, tem havido a disponibilização de dados a respeito da situação espeleológica brasileira, permitindo o acompanhamento transparente do status dos ambientes subterrâneos. O CECAV por exemplo disponibiliza literatura especializada, mapas com a distribuição e classificação do solo cárstico no Brasil e dados de distribuição de cavernas já catalogadas. Além disso, há o fomento de realocação de recursos financeiros para projetos nesses ecossistemas, como o Sistema de Gestão de Projetos Espeleológicos – Pró-Espeleo, bem como chamadas de termos de compensação espeleológica ao longo dos últimos anos. Contudo, mesmo com esses esforços, dados oriundos de consultorias, e de levantamentos espeleológicos atrelados à outorga de mineração, não são publicamente disponíveis, ou quando são, têm difícil acesso e não estão integrados em uma única fonte. Dessa forma, a disponibilização gratuita de dados espeleológicos de forma aberta e de fácil acesso são prioritárias para que medidas de priorização de conservação da biodiversidade, e da manutenção de serviços ecossistêmicos, sejam produzidas e revistas ao longo do tempo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de priorização espacial é uma ferramenta precisa e rápida para ações de conservação em políticas públicas tanto para fins de preservação quanto para exploração, combinando o custo e a efetividade em táticas de preservação de habitats. Neste trabalho, propomos a distribuição de prioridades e a inclusão das manchas cársticas nas decisões políticas e ambientais do Brasil. A preservação dessas áreas gera segurança hídrica - um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável proposto pela Unesco, na Agenda 2030 - tanto para a produção de commodities e desenvolvimento econômico quanto para o bem-estar humano.

speleological compensation terms over the last few years. However, even with these efforts, data from consultancies and speleological surveys linked to mining concessions are not publicly available, or when they are, they are difficult to access and are not integrated into a single source. Therefore, the free availability of speleological data in an open and easily accessible form is a priority so that measures to prioritize biodiversity conservation and the maintenance of ecosystem services can be produced and reviewed over time.

FINAL REMARKS

The use of spatial prioritization is an accurate and rapid tool for conservation actions in public policies, both for preservation and exploitation purposes, combining cost and effectiveness in habitat preservation tactics. In this work, priority distribution and the inclusion of karst areas in Brazil's political and environmental decisions are recommended. The preservation of these areas generates water security—one of the Sustainable Development Goals proposed by UNESCO in its 2030 Agenda—both for commodity production and economic development and for human well-being.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Cecav e IABS pelo suporte financeiro através da bolsa de mestrado – TCCE 1/2022 N° 031/2024 (TCCE ICMBio/Vale III: compensação espeleológica). Aos membros do Laboratório de Macroecologia e Conservação da Biodiversidade (MacrEco) da Universidade de Mato Grosso pela contribuição intelectual a este trabalho.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Cecav and IABS for their financial support through the master's scholarship – TCCE 1/2022 No. 031/2024 (TCCE ICMBio/Vale III: speleological compensation). To the members of the Laboratory of Macroecology and Biodiversity Conservation (MacrEco) at the University of Mato Grosso for their intellectual contribution to this work.

REFERÊNCIAS / REFERENCES

BELANDI, C. *Between 2000 and 2020, agricultural area grew 230 thousand km², natural vegetation reduced 513 thousand km² in Brazil*. IBGE. 2022. disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/en/agencia-news/2184-news-agency/news/35174-between-2000-and-2020-agricultural-area-grew-230-thousand-km-natural-vegetation-reduced-513-thousand-km-in-brazil>. Acesso em: 12 dez. 2024.

BRASIL. Decreto no 99.556, de 1 de outubro de 1990. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional, e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, p. 18836. 2 out. 1990.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, p. 1. 19 jul. 2000.

BRASIL. Decreto nº 6.640, de 7 de novembro de 2008. Dá nova redação aos arts. 1º, 2º, 3º, 4º e 5º e acrescenta os arts. 5-A e 5-B ao Decreto no 99.556, de 1º de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, p. 8. 10 nov. 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instrução Normativa nº 02, de 20 de agosto de 2009. Institui a metodologia de classificação do grau de relevância de cavidades naturais subterrâneas. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, n. 160, p. 68-69, 21 ago. 2009.

BRASIL. Decreto nº 10.935, de 12 de janeiro de 2022. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 12 de janeiro de 2022.

CAPOANE, V.; FUSHIMI, M. Devastation of the cerrado of mato grosso do sul and the advance of arenization in the pardo river watershed. *Discover Environment*, v.2, n. 1, p.111, 2024.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R. D.; CERRI, C. E. P. (2010). Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 277-290, 2010.

CEBALLOS, G.; EHRLICH, P. R.; BARNOSKY, A. D.; GARCÍA, A.; PRINGLE, R. M.; PALMER, T. M. Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science advances*, v. 1, n. 5, 2015.

CERKVENIK, R. Impacts of visitors on cave's physical environment. *Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas*. v. 9, n. 1, 2016.

CHEN, J.; XIAO, H.; LI, Z.; LIU, C.; WANG, D.; WANG, L.; TANG, C. (2019). Threshold effects of vegetation coverage on soil erosion control in small watersheds of the red soil hilly region in China. *Ecological Engineering*, v. 132, p. 109-114, 2019.

COSTA, D. P.; LENTINI, C. A.; CUNHA LIMA, A. T.; DUVERGER, S. G.; VASCONCELOS, R. N.; HERRMANN, S. M.; FERREIRA-FERREIRA, J.; OLIVEIRA, M.; DA SILVA BARBOSA, L.; CORDEIRO, C. L.; SANTOS, N. A. All Deforestation Matters: Deforestation Alert System for the Caatinga Biome in South America's Tropical Dry Forest. *Sustainability*, v. 16, n. 20, p. 9006, 2024.

DEAN, W. *A Ferro e fogo: a história e a devastação da Mata Atlântica brasileira*. São Paulo: Companhia das Letras, 1996. 484p.

DIRZO, R.; YOUNG, H. S.; GALETTI, M.; CEBALLOS, G.; ISAAC, N. J.; COLLEN, B. Defaunation in the Anthropocene. *Science*, v. 345, n. 6195, p. 401-406, 2014.

DONATO, C. R.; Oliveira, A. G.; MACEDO, H. S.; DONATO, R. R.; SILVA, M. R. *Protegendo as cavernas do Brasil*. Brasília: ICMBio, 2018.

ELLIS, E. C.; RAMANKUTTY, N. Putting people in the map: anthropogenic biomes of the world. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 6, n. 8, p. 439-447, 2008.

FATTORINI, S.; FIASCA, B.; DI LORENZO, T.; DI CICCIO, M.; GALASSI, D. M. A new protocol for assessing the conservation priority of groundwater dependent ecosystems. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, v. 30, n. 8, p. 1483-1504, 2020.

FORD D. C.; WILLIAMS P. W. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons, Chichester: 2007. 562p.

GUTIÉRREZ, J. A.; DUIVENVOORDEN. J. F. Can we expect to protect threatened species in protected areas? A case study of the genus *Pinus* in Mexico. *Revista mexicana de biodiversidad*, v. 81, n. 3, p. 875-882, 2010.

ICMBioa. *Áreas de ocorrência de cavernas no Brasil*. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cavernas/publicacoes/Area%20de%20Ocorrencia%20de%20Cavernas>. Acesso em: 27 nov. 2024.

ICMBiob. *Plano de ação nacional para conservação do patrimônio espeleológico brasileiro*. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/pan/pan-cavernas-do-brasil>. Acesso em: 11 dez. 2024.

IUCN. *IUCN WCPA Caves and Karst Working Group*. 2024. Disponível em: <https://iucn.org/our-union/commissions/group/iucn-wcpa-geoheritage-specialist-group/iucn-wcpa-caves-and-karst>. Acesso em: 12 dez. 2024.

JAUREGUIBERRY, P.; TITEUX, N.; WIEMERS, M.; BOWLER, D. E.; COSCIEME, L.; GOLDEN, A.S.; GUERRA, C. A.; JACOB, U.; TAKAHASHI, Y.; SETTELE, J.; DÍAZ, S. The direct drivers of recent global anthropogenic biodiversity loss. *Science advances*, v. 8, n. 45, 2022.

KONZEN, I. S. GAMBOA, A.; GAIDA, W.; ROSA, G. M.; FLACH, K. A.; BONES, U. A.; BREUNIG, F. N.; MENDONÇA, A. M.; MAHNKE, M. R.; MACIEL, D. H. Impact of anthropogenic activities and land use on water quality: an analysis in microbasins in Rio Grande Do Sul, Brazil. *Hygeia*, v. 20, 2024.

LAMOUNIER, W. L.; DOS SANTOS, J. S.; RODRIGUES, E. L.; DRUMOND, M. A. Defining priority areas for conservation based on multispecies functional connectivity. *Biological Conservation*, v. 290, 2024.

LA SALVIA, E. S.; SIMÕES, P. R. G. A área cárstica do Alto Vale do Rio Piauí, São Raymundo Nonato e Coronel José Dias/pi: uma visão preliminar. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia. 24., 1997, Ouro Preto. *Anais...* Ouro Preto: SEB, 1997, Campinas: SBE, p.109-112, 2017.

LI, X.; ZHANG, Y.; MA, N.; ZHANG, X.; TIAN, J.; ZHANG, L.; MCVICAR, T. R.; WANG, E.; XU, J. Increased grain crop production intensifies the water crisis in Northern China. *Earth's Future*, v. 11, n. 9, 2023.

LIMA, S. M. S. A.; LOPES, W. G. R.; FAÇANHA, A. C. Alterações na cobertura do solo em Teresina, Piauí, Brasil. *Sociedade e Natureza*, v. 33, p. e58922, 2021.

LOCKE, K. A.; WINTER, K. Estimating thresholds of natural vegetation for the protection of water quality in south African catchments. *Science of The Total Environment*, p.173924, 2024.

MAMMOLA, S.; LEROY, B. Applying species distribution models to caves and other subterranean habitats. *Ecography*, v. 41, n. 7, p. 1194-1208, 2018.

MAPBIOMAS. *MapBiomas launches unprecedented platform that for the first time assesses degradation in all Brazilian biomes*. 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/en/2024/07/05/ate-25-da-vegetacao-nativa-do-brasil-pode-estar-degradada/>. Acesso em: 10 dez. 2024.

MARQUES, L. Brazil, 200 years of devastation: What will remain of the country after 2022? *Estudos Avançados*, v. 36, p. 169-184, 2022.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005.

MU, H.; LI, X.; WEN, Y.; HUANG, J.; DU, P.; SU, W.; MIAO, S.; GENG, M. A global record of annual terrestrial Human Footprint dataset from 2000 to 2018. *Scientific Data*, v. 9, n. 1, p.176, 2022.

NITZU, E.; VLAICU, M.; GIURGINCA, A.; MELEG, I. N.; POPA, I.; NAE, A.; BABA, Ș. Assessing preservation priorities of caves and karst areas using the frequency of endemic cave-dwelling species. *International Journal of Speleology*, v. 47, n. 1, p. 43-52, 2018.

OLIVEIRA, U.; SOARES-FILHO, B. S.; PAGLIA, A. P.; BRESCOVIT, A. D.; DE CARVALHO, C. J.; SILVA, D. P.; REZENDE, D. T.; LEITE, F. S. F.; BATISTA, J. A. N.; BARBOSA, J. P. P. P.; STEHMANN, J. R. Biodiversity conservation gaps in the Brazilian protected areas. *Scientific reports*, v. 7, n. 1, p. 9141, 2017.

OLIVEIRA, M. P.; FERREIRA, R. L. Extending beyond individual caves: a graph theory approach broadening conservation priorities in Amazon iron ore caves. *PeerJ*, v. 12, p. e16877, 2024.

PAMARDHI-UTOMO, R. A strategy for the sustainable development of the karst area in Wonogiri. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 447, n. 1. IOP Publishing, 2020.

PERET, E. *IBGE releases Changes in Land Use and Cover by state between 2000 and 2018*. IBGE. 2021. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/en/agencia-news/2184-news-agency/news/30325-ibge-releases-changes-in-land-use-and-cover-by-state-between-2000-and-2018>. Acesso em: 21 dez. 2024.

PRASNIEWSKI, V. M.; GONZALEZ-DAZA, W.; ALVARENGA, G. D. V.; SANTOS-SILVA, L.; TEIXIDO, A. L.; IZZO, T. J. Economic, environmental and social threats of a mining exploration proposal on indigenous lands of Brazil. *Acta Amazonica*, v. 54, n. 2, 2024.

PIMM, S. L.; JENKINS, C. N.; LI, B. V. How to protect half of Earth to ensure it protects sufficient biodiversity. *Science advances*, v. 4, n. 8, 2018.

QI, X.; ZHANG, C.; WANG, K. Comparing remote sensing methods for monitoring karst rocky desertification at sub-pixel scales in a highly heterogeneous karst region. *Scientific reports*, v. 9, n. 1, p. 13368, 2019.

RABELO, L. M.; SOUZA-SILVA, M.; FERREIRA, R. L. Priority caves for biodiversity conservation in a key karst area of Brazil: comparing the applicability of cave conservation indices. *Biodivers Conserv*, v. 27, p. 2097–2129, 2018.

RIBEIRO, D.; ZORN, M. Sustainability and Slovenian karst landscapes: Evaluation of a low karst plain. *Sustainability*, v. 13, n. 4, p. 1655, 2021.

RIBEIRO, S.; MOREIRA, L. F.; OVERBECK, G. E.; MALTCHIK, L. Protected Areas of the Pampa biome presented land use incompatible with conservation purposes. *Journal of Land Use Science*, v. 16, n. 3, p. 260-272, 2021.

ROE, D. S. N.; ELLIOTT, J. *Biodiversity loss is a development issue: a rapid review of evidence*. London: IIED Issue Paper. IIED, 2019.

SANDERSON, E. W.; JAITEH, M.; LEVY, M. A.; REDFORD, K. H.; WANNEBO, A. V.; WOOLMER, G. The human footprint and the last of the wild: the human footprint is a global map of human influence on the land surface, which suggests that human beings are stewards of nature, whether we like it or not. *BioScience*, v. 52, n. 10, p. 891-904, 2002.

SIMÕES, M. H.; SOUZA-SILVA, M.; FERREIRA, R. L. Cave invertebrates in Northwestern Minas Gerais state, Brazil: endemism, threats and conservation priorities. *Acta Carsologica*, v. 43, p. 159–174, 2014.

SINIMBÚ, F. *Brazil has lost 33% of its natural areas 1985–2023*. Agência Brasil. 2024. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/en/geral/noticia/2024-08/brazil-has-lost-33-its-natural-areas-1985-2023>. Acesso em: 12 dez. 2024.

SOARES-FILHO, B. S.; OLIVEIRA, U.; FERREIRA, M. N.; MARQUES, F. F. C.; DE OLIVEIRA, A. R.; SILVA, F. R.; BÖRNER, J. Contribution of the Amazon protected areas program to forest conservation. *Biological Conservation*, v. 279, p. 109928, 2023.

SODHI, N. S.; EHRLICH, P. R. *Conservation biology for all*. Oxford: Oxford university press, 2010.

SONTER, L. J.; HERRERA, D.; BARRETT, D. J.; GALFORD, G. L.; MORAN, C. J.; SOARES-FILHO, B. S. Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature communications*, v. 8, n. 1, p. 1013, 2017.

SOUZA-SILVA, M.; MARTINS R. P.; FERREIRA, R. L. Cave conservation priority index to adopt a rapid protection strategy: a case study in Brazilian Atlantic Rain Forest. *Environ Manage*, v. 55, p. 279–295, 2015.

SOUZA, M. F. V. R.; ALVARENGA, D. A.; SOUZA-SILVA, M.; FERREIRA, R. L. Do different relevance attributes indicate the same conservation priorities? A case study in caves of southeastern Brazil. *International Journal of Speleology*, v. 50, n. 3, p. 223-238, 2021.

STANKOVIĆ, M. V. Biodiversity in Karst Landscapes: Introduction to the Special Issue. *Diversity*, v. 15, n. 3, p. 408, 2023.

UN. *Sustainable Development Goals: 15 Life and Land*. 2023. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/biodiversity/>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SOBRAL-SOUZA, T.; VANCINE, M. H.; RIBEIRO, M. C.; LIMA-RIBEIRO, M. S.; Efficiency of protected areas in Amazon and Atlantic Forest conservation: A spatio-temporal view. *Acta Oecologica*, v. 87, p. 1-7, 2018.

THEULEN, V.; SESSEGOLO, G. C. Estratégias para conservação das cavernas brasileiras. *SPELEO BRAZIL*, v. 2001, p. 268-271, 2001.

UNDP. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. 2018. Disponível em: <https://www.undp.org/ukraine/publications/transforming-our-world-2030-agenda-sustainable-development>. Acesso em: 15 dez. 2024.

UNEP. *Leaders' pledge for nature: United to reverse biodiversity loss by 2030 for sustainable development*. 2020. Disponível em: www.leaderspledgefornature.org. Acesso em: 26 nov. 2024.

VENTER, O.; SANDERSON, E. W.; MAGRACH, A.; ALLAN, J. R.; BEHER, J.; JONES, K. R.; POSSINGHAM, H. P.; LAURANCE, W. F.; WOOD, P.; FEKETE, B. M.; LEVY, M. A. Global terrestrial Human Footprint maps for 1993 and 2009. *Scientific data*, v. 3, n. 1, p. 1-10, 2016.

VIEIRA, R. R.; PRESSEY, R. L.; LOYOLA, R. The residual nature of protected areas in Brazil. *Biological Conservation*, v. 233, p. 152-161, 2019.

WILSON, M. C.; CHEN, X. Y.; CORLETT, R. T.; DIDHAM, R. K.; DING, P.; HOLT, R. D.; HOLYOAK, M.; HU, G.;

HUGHES, A. C.; JIANG, L.; LAURANCE, W. F. Habitat fragmentation and biodiversity conservation: key findings and future challenges. *Landscape Ecology*, v. 31, p.219-227, 2016.

WWF. *Deforestation in the Amazon remains at high levels, with a rate of 11,568 km² in 2022*. 2022. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?84261/Deforestation-in-the-Amazon-remains-at-high-levels-with-a-rate-of-11568-km2-in-2022>. Acesso em: 20 dez. 2024.

ZALASIEWICZ, J.; ADENEY THOMAS, J.; WATERS, C. N.; TURNER, S.; HEAD, M. J. The meaning of the Anthropocene: why it matters even without a formal geological definition. *Nature*, v. 632, n. 8027, p. 980-984, 2024.

INCREMENTO DA TUTELA AO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO: COMPENSAÇÕES POR IMPACTOS ÀS CAVERNAS DE BAIXA RELEVÂNCIA EM MINAS GERAIS

INCREASED PROTECTION OF SPELEOLOGICAL HERITAGE: COMPENSATION FOR IMPACTS ON LOW-RELEVANCE CAVES IN MINAS GERAIS

Giselle Ribeiro de Oliveira

Ministério Público de Minas Gerais
E-mail: giselleribeiro@mpmg.mp.br

Clarice Gomes Marotta

Ministério Público de Minas Gerais
E-mail: clamarotta@gmail.com

RESUMO

O artigo analisa o arcabouço jurídico relacionado à proteção do patrimônio espeleológico no Brasil e, em especial, em Minas Gerais, com foco em responder à questão sobre a viabilidade de compensação por impactos a cavernas classificadas como de baixa relevância. A pesquisa realizou revisão bibliográfica e adotou métodos descritivos e analíticos, envolvendo a revisão de legislação ambiental e cultural, incluindo a Constituição Federal e Estadual, bem como decretos e instruções normativas. A conclusão alcançada aponta que, embora a legislação atual permita impactos irreversíveis em cavidades de baixa relevância sem exigir compensação ambiental espeleológica, é juridicamente viável exigir compensações culturais. Tais compensações se baseiam em normas estaduais e no reconhecimento das cavernas como patrimônio cultural, incluindo a

ABSTRACT

The article analyzes the legal framework related to the protection of speleological heritage in Brazil and, in particular, in Minas Gerais. It focuses on answering the question of the feasibility of compensation for impacts on caves classified as low relevance. The research conducted a literature review and adopted descriptive and analytical methods, involving a review of environmental and cultural legislation, including the Federal and State Constitutions, as well as decrees and normative instructions. The conclusion reached points out that, although current legislation allows irreversible impacts on low relevance caves without requiring speleological environmental compensation, it is legally feasible to require cultural compensation. Such compensation is based on state regulations and the recognition of caves as cultural heritage, including the requirement for prior cultural impact studies (EPIC/REPIC).

exigência de estudos prévios de impacto cultural (EPIC/REPIC). O artigo reforça a necessidade de o gestor alinhar esses mecanismos aos princípios da reparação integral e da responsabilidade intergeracional, assegurando a preservação do patrimônio para gerações futuras.

PALAVRAS-CHAVE: cavernas, patrimônio espeleológico, licenciamento ambiental, patrimônio cultural, compensação

INTRODUÇÃO

À primeira vista, pode-se pensar em cavernas como ambientes inóspitos, escuros e pouco convidativos. No entanto, possuem grande importância nos planos simbólico, ambiental, religioso, arqueológico, paleontológico, turístico e desportivo.

De fato, a humanidade interage com cavernas e abrigos subterrâneos desde o Paleolítico (Idade da Pedra Lascada), época em que serviam como moradia e proteção contra predadores e intempéries, além de serem locais de sepultamento e ritos religiosos; o Homem de Neandertal, espécie humana extinta, é conhecido como homem das cavernas, o que demonstra sua intensa dependência do ambiente subterrâneo. A caverna faz parte do imaginário humano, encontrando-se representada nas mais variadas formas de arte (pinturas, literatura, cinema etc.) como símbolo do desconhecido, do oculto e da jornada do herói em busca de autoconhecimento. Não raras vezes, encontra-se também associada ao útero materno. Descer às profundezas da terra significa dirigir-se para dentro e ir cada vez mais fundo, rumo a um mundo desconhecido, externo ou interno, ao passo que sair da caverna normalmente encontra-se associado ao nascimento e à iluminação. Nesse último sentido, na alegoria da caverna, Platão se utiliza desta como metáfora representativa do estado de

The article reinforces the need for managers to align these mechanisms with the full reparation and intergenerational responsibility principles, ensuring the preservation of heritage for future generations.

KEYWORDS: *caves, speleological heritage, environmental licensing, cultural heritage, compensation*

INTRODUCTION

At first glance, caves may seem like inhospitable, dark, and uninviting environments. However, they are of great importance in symbolic, environmental, religious, archaeological, paleontological, touristic, and sporting aspects.

Humanity has interacted with caves and underground shelters since the Paleolithic (Stone Age), when they served as dwellings and protection against predators and bad weather, as well as places for burial and religious rites. Neanderthals, an extinct human species, are known as cavemen, which demonstrates their intense dependence on the underground environment. Caves are part of the human imagination and are represented in various forms of art (paintings, literature, cinema, etc.) as a symbol of the unknown, the occult, and the hero's journey in search of self-knowledge. It is also often associated with the maternal womb. Descending into the depths of the earth means going inward and deeper and deeper into an unknown world, external or internal, while leaving the cave is usually associated with birth and enlightenment. In this latter sense, in the allegory of the cave, Plato uses it as a metaphor representing the state of ignorance, contrary to the light of philosophical knowledge. From a religious point of view, caves were and still are used as places of worship by many different re-

ignorância, contrário à luz do conhecimento filosófico. Do ponto de vista religioso, as cavernas foram e ainda são utilizadas como locais de culto ao sagrado, pelas mais diversas religiões. Além disso, relacionam-se com a história do Cristianismo, em razão de Maria e Jesus terem se ocultado em grutas na tentativa de fugir de Herodes. Para a arqueologia, as cavernas são extremamente importantes, justamente por constituírem testemunho de épocas passadas e da forma como as comunidades então viviam, a partir de artefatos, ossadas e pinturas rupestres encontradas nesses locais após milhões de anos. Da mesma forma que seres humanos, os bichos também buscavam abrigo nas cavernas, o que faz com que sejam alvo de especial atenção por parte da paleontologia, que procura por ossadas e outras partes de animais e plantas, além de eventuais marcas deixadas. As cavernas são, ainda, testemunhos de paleoclima, contendo evidências das diversas eras geológicas. Além disso, são buscadas para fins de visitação turística e práticas desportivas, que podem envolver até mesmo desbravamento dos ambientes, ganhando feições científicas, com eventual filiação a clubes de espeleologia, como a Sociedade Brasileira de Espeleologia e o Grupo Pierre Martin de Espeleologia. Há ainda a importância ambiental das cavernas, como ecossistemas/geossistemas complexos e irrepetíveis, formados ao longo de milhões de anos, dotados de organismos endêmicos especialmente adaptados para a vida nesses ambientes, além de aquíferos subterrâneos e vegetação de cobertura associada, tudo dependente de interações físico-químicas específicas e de um equilíbrio dinâmico e frágil.

Diante dessa múltipla importância, mostra-se fundamental a defesa do patrimônio espeleológico.

O objetivo geral deste artigo é compreender as normas nacionais, assim como a norma estadu-

ligions. In addition, they are related to the history of Christianity, because Mary and Jesus hid in caves in an attempt to escape Herod. For archaeology, caves are extremely important, precisely because they bear witness to past eras and the way communities lived at that time, based on artifacts, bones, and cave paintings found in these places after millions of years. Like humans, animals also sought shelter in caves, which makes them the focus of special attention from paleontology, which searches for bones and other parts of animals and plants, as well as any marks left behind. Caves are also paleoclimate testimonies, containing evidence of various geological eras. Furthermore, they are sought after for tourism and sports, which may even involve exploring the environments, taking on scientific features, with possible affiliation with speleology clubs, such as the Brazilian Speleological Society and the Pierre Martin Speleology Group. There is also the environmental importance of caves as complex and unique ecosystems/geosystems, formed over millions of years, endowed with endemic organisms specially adapted to these environments, as well as underground aquifers and associated vegetation cover, all dependent on specific physical-chemical interactions and a dynamic and fragile balance.

Given its multiple importance, it is essential to protect speleological heritage.

The overall objective of this article is to understand the national and Minas Gerais state standards, which constitute the microsystem for the protection of speleological heritage. This was done in order to verify what legal possibilities are available to the speleological heritage manager for impacts compensation on natural underground caves, especially for low relevance caves. The hypothesis developed is based on the premise of the necessary critical articulation and paradigmatic reflection centered on emancipation and ecological-cultural value, accord-

al mineira, que constituem o microssistema de proteção ao patrimônio espeleológico, para verificar quais possibilidades jurídicas estão disponíveis ao gestor de patrimônio espeleológico para a compensação por impactos a cavidades naturais subterrâneas, especialmente se há possibilidade de compensação por impactos em cavidades de baixa relevância. A hipótese desenvolvida se alinha à premissa da necessária articulação crítica e reflexão paradigmática centrada na emancipação e tomada de valor ecológico-cultural, segundo a qual a proteção do meio ambiente em sentido lato não pode ser antevista como obstáculo, mas sim reconhecida como pressuposto para o desenvolvimento sustentável ou ambientalmente equilibrado. Labora-se também com textos normativos, sob crivos críticos e de interconexões, a fim de se alcançar a maximização de potenciais propositivos e performativos com maior eficácia. É realizado vasto levantamento bibliográfico, sendo esta etapa importante para adquirir o conhecimento teórico sobre o tema investigado. A pesquisa documental é exploratória da literatura nacional, em estudo descritivo e analítico.

PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO NA LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

No Brasil, a preservação de cavernas e feições espeleológicas é regida por um microssistema normativo (Oliveira, 2024). Este item analisa o arcabouço legal que aborda especificamente o tema.

As primeiras diretrizes protetivas remontam à década de 1980, quando a Resolução CONAMA nº 009/1986 criou uma Comissão Especial dedicada à preservação do Patrimônio Espeleológico. Esse esforço culminou na elaboração do Programa Nacional de Proteção ao Patrimônio Espeleológico, implementado pela Resolução CONAMA nº

ing to which the protection of the environment in a broad sense cannot be seen as an obstacle, but rather recognized as a prerequisite for sustainable or environmentally balanced development. Normative texts were also evaluated, under critical and interconnection criteria, in order to achieve the maximization of propositional and performance potentials with greater effectiveness. An extensive bibliographic survey was carried out, which is an important step in acquiring theoretical knowledge on the subject under investigation. The documentary research is exploratory of national literature, in a descriptive and analytical study.

SPELEOLOGICAL HERITAGE IN ENVIRONMENTAL LEGISLATION

In Brazil, caves and speleological features preservation is governed by a regulatory microsystem (Oliveira, 2024). This item analyzes the legal framework that specifically addresses this issue.

The first protective guidelines date back to the 1980s, when CONAMA Resolution No. 009/1986 created a Special Commission dedicated to the preservation of Speleological Heritage. This effort culminated in the development of the National Program for the Protection of Speleological Heritage, implemented by CONAMA Resolution No. 005/1987. This program

005/1987. Este programa estabeleceu fundamentos para a proteção espeleológica, incluindo a definição de critérios técnicos e diretrizes de uso, a obrigatoriedade de estudos de impacto ambiental (EIA) para empreendimentos potencialmente danosos e o cadastramento sistemático do patrimônio espeleológico nacional. Também foram introduzidas medidas como a inclusão de troglóbios na lista de espécies ameaçadas e a previsão de regulamentação específica para sítios arqueológicos, depósitos fossilíferos e cavernas (Brasil, 1987b). A Resolução CONAMA nº 004/1987 consolidou a visão de que o “Patrimônio Espeleológico Nacional é considerado patrimônio natural e, como tal, sítio ecológico de relevância cultural” (Brasil, 1987a, art. 3º), conferindo-lhe status de proteção que perdura até os dias atuais.

Com a promulgação da Constituição Federal de 1988, esse sistema foi reforçado. O art. 20, inciso X, reconheceu as cavidades naturais subterrâneas como bens da União. A inclusão constitucional das cavernas como bens da União evidencia o interesse público nacional na sua conservação e preservação. No tocante à proteção como importantes bens naturais, o art. 225 da Constituição Federal, ao assegurar o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, estabelece diretrizes fundamentais para sua proteção, como a exigência de Estudos de Impacto Ambiental (EIAs) para atividades de significativo impacto, bem como a criação de áreas especialmente protegidas, visando a garantir a integridade de seus atributos (Brasil, 1988). Em consonância com esse preceito constitucional, o patrimônio espeleológico é objeto de proteção na Lei nº 9.985/2000, que institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC); a legislação reforça o compromisso com a preservação ambiental ao estabelecer, no art. 4º, inciso VII, como um dos objetivos do SNUC,

established the foundations for speleological conservation, including the definition of technical criteria and guidelines for use, the mandatory requirement for environmental impact studies (EIA) for potentially harmful projects, and the systematic registration of national speleological heritage. Measures such as the inclusion of troglobites in the list of endangered species and the provision of specific regulations for archaeological sites, fossil deposits, and caves were also introduced (Brazil, 1987b). CONAMA Resolution No. 004/1987 consolidated the view that “National Speleological Heritage is considered natural heritage and, as such, an ecological site of cultural relevance” (Brazil, 1987a, art. 3), granting it a safeguard that remains to this day.

With the enactment of the Federal Constitution of 1988, this system was reinforced. Article 20, item X, recognized natural underground caves as federal property. The constitutional inclusion of caves as federal property highlights the national public interest in their conservation and preservation. Article 225 of the Federal Constitution, ensures the right to an ecologically balanced environment, and establishes fundamental guidelines for their protection as important natural assets, such as the requirement for Environmental Impact Assessments (EIAs) for activities with significant impact, as well as the creation of specially protected areas, aiming to guarantee the integrity of their attributes (Brazil, 1988). In line with this constitutional precept, speleological heritage is protected by Law No. 9,985/2000, which established the National System of Conservation Units (SNUC). The legislation reinforces the commitment to environmental preservation by establishing, in Article 4, item VII, as one of the objectives of the SNUC, the protection of “relevant characteristics of a geological, geomorphological, speleological, archaeological, paleontological, and cultural nature” (Brazil, 2000), integrating spe-

a proteção de “características relevantes de natureza geológica, geomorfológica, espeleológica, arqueológica, paleontológica e cultural” (Brasil, 2000), integrando os bens espeleológicos ao escopo da conservação ambiental no país.

Posteriormente, a Portaria IBAMA nº 887/1990 introduziu normas protetivas abrangentes, restringindo atividades que pudessem ameaçar o patrimônio espeleológico. Determinou a realização de diagnósticos técnicos, a criação de um Sistema Nacional de Informações Espeleológicas e a necessidade de autorização prévia para intervenções potencialmente prejudiciais. Outras disposições incluem a previsão de área de influência mínima de 250 metros em torno das cavernas e a suspensão de usos inadequados em caso de risco de degradação (IBAMA, 1990).

O Decreto nº 99.556/1990 reforçou o regime jurídico ao estabelecer que a utilização de cavidades naturais subterrâneas deve ocorrer dentro de condições que assegurem sua integridade física e equilíbrio ecológico. O decreto também instituiu que todas as cavidades são parte do patrimônio cultural brasileiro, conforme o artigo 1º de sua redação original, que determinava sua preservação para estudos técnico-científicos, atividades culturais, turísticas, recreativas e educativas (Brasil, 1990). Entre as determinações protetivas citadas, a limitação do uso das cavidades naturais subterrâneas exclusivamente para estudos técnico-científicos revelou-se particularmente desafiadora, visto que a impossibilidade de impactos negativos irreversíveis em cavernas muitas vezes limitava ou inviabilizava empreendimentos econômicos – especialmente aqueles de grande porte e interesse público, como obras de infraestrutura e mineração – em áreas onde houvesse patrimônio espeleológico.

leological assets into the scope of environmental conservation in the country.

Subsequently, IBAMA Ordinance No. 887/1990 introduced comprehensive protective standards, restricting activities that could threaten speleological heritage. It mandated technical assessments, the creation of a National Speleological Information System, and the requirement of prior authorization for potentially harmful interventions. Other regulations include a minimum buffer zone of 250 meters around caves and the suspension of inappropriate uses in case of risk of degradation (IBAMA, 1990).

Decree No. 99,556/1990 reinforced the legal framework by establishing that the use of natural underground caves must occur under conditions that ensure their physical integrity and ecological balance. The decree also established that all caves are part of Brazilian cultural heritage, according to Article 1 of its original wording, which determined their preservation for technical and scientific studies, cultural, touristic, recreational, and educational activities (Brazil, 1990). Among the protective measures cited, the restriction of cave use exclusively for technical and scientific studies proved particularly challenging, since the impossibility of irreversible negative impacts on caves often limited or made economic ventures in areas with speleological heritage unfeasible, especially large scale and public interest ones, such as infrastructure and mining projects.

As a result of pressure from economic sectors (Souza, 2012), there have been significant changes in the conservationist regulatory framework.

In this context, CONAMA Resolution No. 347/2004 sought to regulate the issue of speleological heritage in the environmental licensing process, requiring that projects or activities potentially harmful to speleological heritage or its area of influence obtain prior authorization from the competent environ-

Em decorrência de pressões exercidas por setores econômicos (Souza, 2012), houve importantes alterações no arcabouço normativo conservacionista.

Nesse contexto, a Resolução CONAMA nº 347/2004 buscou regular a questão do patrimônio espeleológico no processo de licenciamento ambiental, exigindo que empreendimentos ou atividades com potencial de degradação do patrimônio espeleológico ou de sua área de influência obtivessem prévia licença do órgão ambiental competente (art. 4º). No entanto, o art. 2º, inciso II, introduziu o conceito de cavidade natural subterrânea relevante, dependente da existência de atributos ecológicos, ambientais, cênicos, científicos, culturais ou socioeconômicos. Esse marco normativo estabeleceu que apenas cavidades com “significativos atributos” seriam consideradas relevantes para fins de proteção. (Brasil, 2004).

Posteriormente, o Decreto nº 6.640/2008 modificou o Decreto nº 99.556/1990, promovendo alterações que flexibilizaram a proteção das cavernas. Introduziu-se uma classificação hierárquica para as cavidades, definindo graus de relevância – máximo, alto, médio e baixo – baseados em atributos como valor ecológico, biológico, geológico, hidrológico e histórico-cultural (Brasil, 1990, art. 2º). Cavidades de relevância máxima continuaram a gozar de proteção integral contra impactos negativos irreversíveis, enquanto aquelas classificadas com grau de relevância alto, médio ou baixo passaram a poder ser impactadas de forma irreversível, mediante licenciamento ambiental (Brasil, 2008, art. 4º).

Em 2022, nova legislação revogou o Decreto nº 99.556/1990, substituindo-o por um regime ainda mais permissivo. As mudanças trazidas pelo Decreto nº 10.935/2022 incluem: a permissão de impactos irreversíveis mesmo em cavidades de máxima relevância; a exclusão de atributos que anterior-

mental agency (Article 4). However, Art. 2, item II, introduced the concept of relevant caves, depending on the existence of ecological, environmental, scenic, scientific, cultural, or socioeconomic attributes. This regulatory framework established that only caves with “significant attributes” would be considered relevant for protection. (Brazil, 2004).

Subsequently, Decree No. 6,640/2008 amended Decree No. 99,556/1990, introducing changes that made cave protection more flexible. A hierarchical classification was introduced, defining degrees of relevance—maximum, high, medium, and low—based on attributes such as ecological, biological, geological, hydrological, and historical-cultural value (Brazil, 1990, Art. 2). Caves of maximum relevance continued to enjoy full protection against irreversible negative impacts, while those classified as high, medium, or low relevance could now be permanently affected, provided environmental licensing was obtained (Brazil, 2008, art. 4).

In 2022, new legislation repealed Decree No. 99,556/1990, replacing it with an even more permissive regime. The changes brought about by Decree No. 10,935/2022 include: permission for irreversible impacts even in caves of maximum relevance; the exclusion of attributes that previously led to the classification of maximum relevance; the possibility of interventions in areas of influence without restrictions; and the concentration of decision-making powers in political bodies, such as the Ministries of Mines and Energy and Infrastructure (Marotta; Oliveira, 2022). Decree No. 10,935/2022 had some of its provisions partially suspended by a preliminary injunction granted in ADPF No. 935/2022, filed by the Rede Sustentabilidade party, which argues that the decree is incompatible with fundamental principles of the Constitution. The preliminary injunction suspended the articles that authorized irreversible impacts on maximum relevance caves and their ar-

mente induziam à classificação de relevância máxima; a possibilidade de intervenções em áreas de influência sem restrições; e a concentração de poderes decisórios em instâncias políticas, como os Ministérios de Minas e Energia e de Infraestrutura (Marotta; Oliveira, 2022). O Decreto nº 10.935/2022 teve dispositivos parcialmente suspensos por medida liminar concedida na ADPF nº 935/2022, ajuizada pelo partido Rede Sustentabilidade, que argumenta a incompatibilidade do decreto com preceitos fundamentais da Constituição. A liminar suspendeu os artigos que autorizavam impactos irreversíveis em cavidades de máxima relevância e suas áreas de influência, mas o decreto permanece em vigor em relação aos demais dispositivos.

Apesar das controvérsias, o Decreto nº 10.935/2022 mantém a determinação de que as cavidades naturais subterrâneas “deverão ser protegidas, de modo a permitir a realização de estudos e de pesquisas de ordem técnico-científica e atividades de cunho espeleológico, étnico-cultural, turístico, recreativo e educativo” (Brasil, 2022, art. 1º, caput). Além disso, conserva o regime de classificação de relevância das cavernas e determina que atividades potencialmente degradadoras das cavidades só podem ser realizadas mediante licenciamento ambiental prévio, com autorização expressa e compensação espeleológica adequada, dispensadas medidas e ações para assegurar a preservação de outras cavernas em caso de cavidades de baixa relevância (Brasil, 2022, art. 3º, caput).

Em Minas Gerais, as cavidades naturais subterrâneas também são consideradas como relevante patrimônio ambiental do Estado (art. 214, §7º, da Constituição Estadual).

A Instrução de Serviço SISEMA n.º 08/2017 (Revisão 1), da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – SEMAD, dispõe

as of influence, but the decree remains in force in relation to the other dispositions.

Despite the controversies, Decree No. 10,935/2022 maintains the determination that natural underground caves “shall be protected in order to allow for technical and scientific studies and research, as well as speleological, ethnic-cultural, touristic, recreational, and educational activities” (Brazil, 2022, art. 1, caput). In addition, it maintains the classification system for the relevance of caves and determines that potentially harmful activities may only be carried out with prior environmental licensing, with express authorization and adequate speleological compensation, and exempts measures and actions to ensure the preservation of low relevance caves (Brazil, 2022, art. 3, caput).

In Minas Gerais, caves are also considered to be an important part of the state’s environmental heritage (Article 214, Paragraph 7, of the State Constitution).

SISEMA Service Instruction No. 08/2017 (Revision 1), issued by the State Secretariat for the Environment and Sustainable Development (SEMAD), sets the environmental licensing procedures for projects that are effectively or potentially harmful to caves, with the environmental agency responsible for conducting the licensing process in a manner that takes into account the speleological heritage involved (Minas Gerais, 2018, p. 4). Regarding the definitions provided by the Instruction, the concept of irreversible negative impact stands out, as “anthropic intervention in a natural underground cave or its area of influence, which implies its total suppression or partial alteration that cannot be mitigated in the cave ecosystem, compromising its integrity and preservation” (Minas Gerais, 2018, p. 9/10).

Considering that the Brazilian regulatory system currently allows for the destruction of this valuable heritage, it is important to determine what com-

sobre os procedimentos de licenciamento ambiental de empreendimentos efetiva ou potencialmente capazes de causar impactos sobre cavidades naturais subterrâneas, cabendo ao órgão ambiental conduzir o licenciamento de forma a levar em consideração o patrimônio espeleológico envolvido (Minas Gerais, 2018, p. 4). Quanto às definições trazidas pela IS, destaca-se o conceito de impacto negativo irreversível, como “intervenção antrópica em cavidade natural subterrânea ou em sua área de influência, que implique na sua supressão total ou em alteração parcial não mitigável do ecossistema cavernícola, com o comprometimento de sua integridade e preservação” (Minas Gerais, 2018, p. 9/10).

Considerando que o sistema normativo brasileiro permite atualmente a supressão deste importante patrimônio, mostra-se relevante verificar quais medidas compensatórias podem e devem ser exigidas para tanto.

Compensação Ambiental

A compensação ambiental pode ser prévia (cobrada nos processos de autorização ambiental) ou posterior à realização de uma atividade degradadora do meio ambiente (no âmbito da responsabilidade civil ambiental).

A diferenciação entre impacto e dano é fundamental para se identificar o regime aplicável, se da compensação por impactos negativos (princípio do poluidor-pagador) ou da responsabilidade civil por danos ambientais (princípio da responsabilidade ecológica).

Impacto ambiental é definido na ISO 14.001:2015, item 3.2.4, como “modificação no meio ambiente, tanto adversa como benéfica, total ou parcialmente resultante dos aspectos ambientais de uma or-

persatory measures can and should be required to enable this.

Environmental Compensation

Environmental compensation can be prior (charged in environmental authorization processes) or subsequent to the performance of an environmentally damaging activity (within the scope of civil environmental liability).

The distinction between impact and damage is fundamental to identify the applicable regime, whether compensation for negative impacts (polluter pays principle) or civil liability for environmental damage (ecological liability principle).

Environmental impact is defined in ISO 14.001:2015, item 3.2.4, as “a change in the environment, whether adverse or beneficial, resulting wholly or partly from an organization’s environmental aspects” (ABNT, 2015). Therefore, it is sufficient for a human

ganização” (ABNT, 2015). Portanto, basta que uma atividade humana altere as propriedades do ambiente, de forma positiva ou negativa, afetando os critérios previstos nos incisos, para ser considerada como impactante. Este conceito foi positivado na Resolução CONAMA n.º 01/86, em seu art. 1º, que define impacto ambiental como qualquer alteração nas propriedades físicas, químicas ou biológicas do meio ambiente, causada por atividades humanas que interfira significativamente na saúde, segurança e bem-estar da população, nas atividades sociais e econômicas, na biota, nas condições estéticas e sanitárias, ou na qualidade dos recursos ambientais disponíveis (Brasil, 1986).

Por outro lado, o dano ambiental é construção jurídica distinta, pois, apesar de também ser fato que importa em efeitos concretos modificadores da natureza, possui o diferencial de ser considerado inadmissível pelo direito ou ilícito¹.

Em Minas Gerais, esta diferenciação encontra-se expressamente positivada no Decreto Estadual nº 47.041/2016, que dispõe sobre os critérios para a compensação e a indenização dos impactos e danos causados em cavidades naturais subterrâneas existentes no território do Estado (art. 1º, parágrafo único e art. 7º, §1º).

A compensação ambiental pelos impactos ao meio ambiente é instituto que busca restaurar o equilíbrio ambiental perdido pela realização de atividades poluidoras/degradadoras permitidas pelo direito.

Neste sentido, “antes de se perguntar se os danos ambientais são compensáveis, é preciso pergun-

activity to alter the properties of the environment, either positively or negatively, affecting the criteria set forth in the items, to be considered impactful. This concept was established in CONAMA Resolution No. 01/86, in its Article 1. It defines environmental impact as any change in the physical, chemical, or biological properties of the environment caused by human activities that significantly interferes with the health, safety, and well-being of the population, social and economic activities, biota, aesthetic and sanitary conditions, or the quality of available environmental resources (Brazil, 1986).

On the other hand, environmental damage is a distinct legal construct because, although it also involves concrete effects that modify nature, it has the distinction of being considered inadmissible by law or illicit.¹.

In Minas Gerais, this differentiation is expressly stated in State Decree No. 47,041/2016, which establishes the criteria for compensation and indemnification for impacts and damages caused to caves existing in the state's territory (Article 1, sole paragraph, and Article 7, §1).

Environmental compensation for impacts on the environment is an instrument that seeks to restore the environmental balance lost through polluting/degrading activities permitted by law.

In this sense, “before asking whether environmental damage is compensable, we must ask whether environmental damage is permissible in light of everyone’s right to a healthy quality of life and an ecologically balanced environment” (Machado, 2018, p. 93). If the impacts are permissible by law, before

1 Annelise Monteiro Steigleder faz interessante reflexão ao mencionar que a moldura jurídica do conceito de dano ambiental depende da corrente ético-filosófica adotada pelo legislador/aplicador do Direito: “o dano jurídico, apesar de ter na sua gênese o pressuposto fático, deriva de uma valoração operada pelo Direito” (Steigleder, 2011, p. 21).

1 Annelise Monteiro Steigleder makes an interesting observation when she mentions that the legal framework of the concept of environmental damage depends on the ethical-philosophical current adopted by the legislator/enforcer of the law: “legal damage, despite having a factual assumption at its origin, derives from an assessment made by the law” (Steigleder, 2011, p. 21).

tar se os danos ambientais são admissíveis diante do direito de todos à sadia qualidade de vida e ao meio ambiente ecologicamente equilibrado” (Machado, 2018, p. 93). Se os impactos são admissíveis pelo direito, antes que aconteçam, o Estado exige do empreendedor uma contrapartida pela implementação de atividade que tem o potencial de causar prejuízos ao meio ambiente. Trata-se de instrumento amparado no princípio da precaução que não se presta para autorizar pura e simplesmente a prática de danos ambientais, mas para restaurar o equilíbrio do meio ambiente afetado pela implantação do empreendimento permitido e ainda para estimular o investimento em medidas preventivas e mitigatórias. De acordo com Paulo Affonso Leme Machado, “a compensação ambiental é uma das formas de se implementar o princípio do usuário-pagador, antecipando possíveis cobranças por danos ambientais” (Machado, 2018, p. 92). Com isso, “a compensação insere a variante ambiental no planejamento econômico, fazendo com que as empresas possam mensurar os custos totais na fase de formulação do projeto de um empreendimento” (Machado, 2018, p. 92), sendo que a conclusão de um cálculo de compensação ambiental pode conduzir à conclusão de inviabilidade da atividade.

A compensação por impactos ao meio ambiente foi disciplinada no Direito brasileiro na Lei n.º 9.985/2000, conhecida como Lei do SNUC – Sistema Nacional de Unidades de Conservação, em seu art. 36:

[...] Nos casos de licenciamento ambiental de empreendimentos de significativo impacto ambiental, assim considerado pelo órgão ambiental competente, com fundamento em estudo de impacto ambiental e respectivo relatório – EIA/RIMA, o empreendedor é obrigado a apoiar a implanta-

they occur, the State requires the entrepreneur to provide compensation for the implementation of an activity that has the potential to cause damage to the environment. This is based on the precautionary principle that does not simply authorize the practice of environmental damage, but rather restores the balance of the environment affected by the implementation of the permitted project and also encourages investment in preventive and mitigating measures. According to Paulo Affonso Leme Machado, “environmental compensation is one of the ways to implement the user-pays principle, anticipating possible charges for environmental damage” (Machado, 2018, p. 92). As a result, “compensation inserts the environmental variable into economic planning, enabling companies to measure the total costs in the project formulation phase of an enterprise” (Machado, 2018, p. 92), and the completion of an environmental compensation calculation may lead to the conclusion that the activity is not feasible.

Compensation for environmental impacts was regulated in Brazilian law in Law No. 9,985/2000, known as the SNUC Law – National System of Conservation Units, in its Article 36:

[...] In cases of environmental licensing for projects with significant environmental impact, as determined by the competent environmental agency based on an environmental impact study and respective report (EIA/RIMA), the developer is required to support the implementation and maintenance of a conservation unit of the Integral Protection Group, in accordance with the provisions of this article and the regulations of this law [...] (Brazil, 2000).

According to §1 of the aforementioned provision, compensation under the SNUC Law “cannot be less than 0.5 percent of the total costs estimated for the

ção e manutenção de unidade de conservação do Grupo de Proteção Integral, de acordo com o disposto neste artigo e no regulamento desta lei [...] (Brasil, 2000).

De acordo com o §1º do referido dispositivo, a compensação da Lei do SNUC “não pode ser inferior a meio por cento dos custos totais previstos para a implantação do empreendimento, sendo o percentual fixado pelo órgão ambiental licenciador, de acordo com o grau de impacto causado pelo empreendimento” (Brasil, 2000).

Além da compensação ambiental genérica, a legislação brasileira prevê uma série de compensações por impactos negativos irreversíveis em bens específicos, com regramentos próprios. É interessante observar a lógica que acompanha as compensações ambientais específicas: a) são exigíveis sem prejuízo de outras formas de compensação; b) áreas que já são protegidas com base em outro fundamento não devem ser utilizadas; c) buscam ampliar a proteção ambiental para certas categorias de bens que, por sua destacada importância, merecem consideração especial. A título de exemplo, citam-se (a) a Compensação Florestal por Intervenção no Bioma Mata Atlântica, prevista na Lei nº 11.428/2006 e regulamentada na Deliberação Normativa nº 73/2004; (b) a Compensação Florestal Minerária, prevista na Lei Estadual nº 20.922/2013; (c) a Compensação Florestal pela Supressão de Espécies Protegidas por Lei e/ou Ameaçadas de Extinção; (d) a Compensação por Intervenção em Área de Preservação Permanente - APP².

2 Não se pode deixar de destacar que as referidas normas podem, de alguma forma, contribuir para a tutela indireta das cavidades naturais subterrâneas, como é o caso da vedação ao corte e supressão de vegetação primária ou secundária nos estágios avançado e médio de regeneração do Bioma Mata Atlântica, considerando-se que o órgão ambiental mineiro reconheceu a canga como passível da mencionada proteção (Chiodi, 2013).

implementation of the project, with the percentage being set by the environmental licensing agency, according to the degree of impact caused by the project” (Brazil, 2000).

In addition to generic environmental compensation, Brazilian legislation foresees a series of compensations for irreversible negative impacts on specific assets, with their own rules. It is interesting to note the logic behind specific environmental compensation: a) it is enforceable without prejudice to other forms of compensation; b) areas that are already protected on other grounds should not be used; c) it seeks to extend environmental protection to certain categories of assets that, due to their outstanding importance, deserve special consideration. Examples include (a) Forest Compensation for Intervention in the Atlantic Forest Biome, provided for in Law No. 11,428/2006 and regulated in Normative Resolution No. 73/2004; (b) Mining Forest Compensation, provided for in State Law No. 20,922/2013; (c) Forest Compensation for the Removal of Species Protected by Law and/or Threatened with Extinction; (d) Compensation for Intervention in Permanent Preservation Areas - APP².

2 It should be noted that these regulations may, in some way, contribute to the indirect protection of caves, as is the case with the prohibition of cutting and removal of primary or secondary vegetation in the advanced and medium stages of regeneration of the Atlantic Forest Biome, considering that the environmental agency of Minas Gerais recognized the canga as eligible for the aforementioned protection (Chiodi, 2013).

Especificamente no regime jurídico que rege o patrimônio espeleológico, como visto, o legislador alterou a concepção da tutela jurídica das cavidades, abandonando a ideia de proteção integral e possibilitou impactos negativos reversíveis ou irreversíveis³ em cavidades de máxima, alta, média e baixa relevâncias⁴.

O que diferencia as permissões legais de impactos negativos irreversíveis em cavidades, quando possíveis, é justamente a necessidade ou não de compensação ambiental espeleológica e a sua modalidade, de acordo com a regulamentação do art. 5º do Decreto 10.935/22, a qual prevê, em síntese, que para impactos ambientais irreversíveis em as cavidades de relevância a alta, como medida compensatória, o empreendedor deverá preservar cavidades-testemunho⁵ ou adotar medidas de compensatórias mais vantajosas definidas em comum acordo com o ICMBio; para as cavidades de média relevância, o órgão ambiental licenciador determinará medidas compensatórias e financiamento de ações que contribuam para a conservação e o uso adequado do patrimônio espeleológico brasileiro; lado outro, no caso de impactos em cavernas de baixa relevância, não se exige do empreendedor a adoção de medidas e ações para assegurar a preservação de outras cavidades naturais subterrâneas.

3 De acordo com o art. 5º da Resolução CONAMA nº 347/04, “na análise do grau de impacto, o órgão licenciador considerará, entre outros aspectos, a intensidade, a temporalidade, a reversibilidade e a sinergia dos referidos impactos” (Brasil, 2004). Isso porque interessa saber se os impactos são graves ou não, se perduram no tempo, se são reversíveis e se, aliados a outros impactos, terão seus efeitos potencializados.

4 O regime estabelecido pelo Decreto 10.935/22 só foi arrefecido pela decisão proferida pelo STF em antecipação de tutela na ADPF 935, a qual ripristinou o Decreto nº 6.640/2008 no tocante a proteção das cavidades de máxima contra impactos negativos irreversíveis

5 Segundo o artigo 4º, §§1º e 2º, do Decreto 10.935/22, considera-se cavidade testemunho aquela objeto de medidas e ações para assegurar a preservação de cavernas com atributos ambientais similares àquela que sofreu impacto e, preferencialmente, com grau de relevância máximo e de mesma litologia.

Specifically, in the legal regime governing speleological heritage, the legislator changed the concept of legal protection of caves, abandoning the idea of comprehensive protection and allowing for reversible or irreversible negative impacts on caves of maximum, high, medium, and low relevance.³

What differentiates legal authorizations for irreversible negative impacts on caves, when possible, is precisely the need or lack thereof for speleological environmental compensation and its modality. In accordance with the Article 5 of Decree 10.935/22, which states that as a compensatory measure for the irreversible environmental impacts on high relevance caves, the entrepreneur must preserve testimony-caves⁴ or adopt more advantageous compensatory measures defined in agreement with ICMBio. For caves of medium relevance, the environmental licensing agency will determine compensatory measures and financing of actions that contribute to the conservation and proper use of Brazilian speleological heritage. On the other hand, in the case of impacts on low relevance caves, the entrepreneur is not required to adopt measures and actions to ensure the preservation of other natural underground caves.

Following the same metric, in Minas Gerais, the IS 08/2017 stipulates that speleological compensation “aims to protect and perpetuate speleological heritage in light of irreversible negative impacts caused to caves classified as high or medium relevance” (Minas Gerais, 2018, p. 18). It is interesting to note that the IS 08/217 stipulates that the

3 The regime established by Decree 10.935/22 was only reduced by the decision handed down by the STF in anticipation of relief in ADPF 935, which reinstated Decree No. 6.640/2008 with regard to the protection of maximum relevance caves against irreversible negative impacts.

4 According to Article 4, §§1 and 2, of Decree 10.935/22, a testimony-cave is considered to be one that is subject to measures and actions to ensure the preservation of caves with environmental attributes similar to those that have been impacted and, preferably, with the highest degree of relevance and the same lithology

Seguindo a mesma métrica, em Minas Gerais, a IS 08/2017 prevê que a compensação espeleológica “objetiva a proteção e a perpetuação do patrimônio espeleológico em função de impactos negativos irreversíveis ocasionados em cavidades naturais subterrâneas classificadas com grau de relevância alto ou médio” (Minas Gerais, 2018, p. 18). É interessante notar que a IS 08/217 prevê que a medida compensatória deverá constar de Termo de Compromisso de Compensação Espeleológica – TCCE assinado entre empreendedor e órgão ambiental, que é condição para a concessão da licença; se não houver o cumprimento do TCCE, eventual impacto às cavidades será considerado dano (saindo, portanto, da esfera de licitude). No caso de cavidades naturais subterrâneas classificadas como de baixa relevância, o empreendedor não tem sido obrigado a adotar compensação espeleológica.

O espaço de dúvida que remanesce é se seria possível outro tipo de compensação em casos de impactos negativos irreversíveis em cavidades naturais subterrâneas, especialmente para aquelas classificadas como de baixa relevância.

PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO E LEGISLAÇÃO CULTURAL

Para abordar a possibilidade ou não de compensação por impactos em cavidades naturais subterrâneas de baixa relevância, parte-se da premissa de que o Decreto n.º 10.935/2022 apenas deixa de exigir do empreendedor a adoção de medidas e ações para assegurar a preservação de outras cavidades naturais subterrâneas. Não há qualquer dispositivo que inviabiliza a possibilidade de outros tipos de compensação.

Analisa-se, então, as especificidades da proteção ao meio ambiente cultural, passando por seus princípios e também pelas regras referentes à

compensatory measure must be included in a Speleological Compensation Commitment Agreement (TCCE) signed between the entrepreneur and the environmental agency, which is a condition for the granting of the license. If the TCCE is not complied with, any impact on the caves will be considered damage (and therefore outside the sphere of legality). In the case of caves classified as low relevance, the entrepreneur has not been required to adopt speleological compensation.

The remaining question is whether another type of compensation would be possible in cases of irreversible negative impacts on natural underground caves, especially for those classified as low relevance.

SPELEOLOGICAL HERITAGE AND CULTURAL LEGISLATION

To address the issue of whether or not compensation should be provided for impacts on low relevance caves, it was started from the premise that Decree No. 10,935/2022 only exempts developers from adopting measures and actions to ensure the preservation of other caves. There is no provision that precludes the possibility of other types of compensation.

The specifics of cultural environment protection were analyzed, covering its principles and rules regarding compensation for impact on cultural heritage, in order to ultimately discuss whether this type of compensation is appropriate for speleological heritage.

compensação pelo impacto ao patrimônio cultural, para, ao final, discutir se cabível este tipo de compensação para o patrimônio espeleológico.

Especificidades da proteção ao meio ambiente cultural

O meio ambiente cultural tem ganhado destaque, a partir da percepção de que a história de uma comunidade, representada por bens materiais e/ou imateriais e construída ao longo de gerações, constitui a identidade daquele corpo social, possibilitando aos indivíduos a sensação de pertencimento, autorreconhecimento e integração.

A Constituição Federal de 1988 demarcou o conceito de patrimônio cultural, passando a salvarguardar os bens de natureza material e imaterial, individualmente ou em conjunto, que se referem à identidade, à ação e à memória dos diferentes grupos que compõem a Nação brasileira, no já citado art. 216. A Constituição promoveu a inclusão do patrimônio espeleológico como parte do patrimônio cultural brasileiro, quando portadoras de valores como histórico, paisagístico, artístico, arqueológico, paleontológico, ecológico e científico (Brasil, 1988, art. 216, inciso V) (Oliveira, 2024).

A previsão do patrimônio espeleológico como sítio ecológico de relevância cultural encontra-se inclusive expressa no art. 3º da Resolução CONAMA 004/87.

A Constituição do Estado de Minas Gerais foi mais expressa ao prever, em seu art. 208, que os sítios de valor espeleológico se incluem no patrimônio cultural mineiro.

De fato, como já abordado, dentre outros atributos, as cavidades podem conservar informações da vida pretérita, através dos sítios fossilíferos e arqueológicos, possibilitando o conhecimento de

Specificities of cultural environment protection

The cultural environment has gained prominence, based on the perception that the history of a community, represented by tangible and/or intangible assets and built up over generations, constitutes the identity of that social body, giving individuals a sense of belonging, self-recognition, and integration.

The 1988 Federal Constitution in the aforementioned Article 216, defined the concept of cultural heritage. It safeguards tangible and intangible assets, individually or collectively, that refer to the identity, actions, and memory of the different groups that make up the Brazilian nation. The Constitution promotes the inclusion of speleological heritage as part of Brazilian cultural heritage, when it carries historical, scenic, artistic, archaeological, paleontological, ecological, and scientific value (Brazil, 1988, Article 216, item V) (Oliveira, 2024).

The classification of speleological heritage as an ecological site of cultural significance is also expressed in Article 3 of CONAMA Resolution 004/87.

The Minas Gerais State Constitution was more explicit in stipulating, in Article 208, that sites of speleological value are included in the State's cultural heritage.

In fact, as already mentioned, caves can preserve information about past life through paleontological and archaeological sites, enabling knowledge about fossil animal and plant species, as well as cultural studies of past peoples. Furthermore, they can serve as an important source of economically viable activity, such as tourism, sports, and leisure, in addition to other types of social manifestations, including religious ones.

espécies de animais e vegetais fósseis, bem como o estudo cultural dos povos do passado; ademais, podem exercer o papel de importante fonte de atividade economicamente viável, tais como o turismo, esporte e lazer, além de outros tipos de manifestações sociais, inclusive religiosas.

Diante do fato de que a degradação ou desaparecimento de um bem do patrimônio cultural e natural constitui empobrecimento nefasto do patrimônio de todos os povos – conforme defende o preâmbulo da Convenção para a Proteção do Patrimônio Mundial Cultural e Natural da UNESCO, de 1972 –, nossa Carta Magna prossegue, estabelecendo que a preservação, conservação e manutenção dos bens pertencentes ao patrimônio cultural não é mera faculdade, e sim uma imposição de ordem pública e interesse social em prol do bem coletivo (parágrafo 1º, do art. 216).

A CR/88, em seu artigo 23, incisos II e IV, estipulou a competência material comum entre União, estados e distrito federal para a proteção especial ao patrimônio cultural. Em sintonia com esta previsão, a Constituição do Estado de Minas Gerais, em seu artigo 11, impôs a sua preservação ao Poder Público, em colaboração com a comunidade, e, caso seja necessária, a repressão ao dano e/ou ameaça que recaiam sobre o referido patrimônio.

Os municípios não foram esquecidos, pois receberam a incumbência, no artigo 30, inciso IX, da CR/88, de “promover a proteção do patrimônio histórico-cultural local, observada a legislação e a ação fiscalizadora federal e estadual”. Para além da promoção do patrimônio cultural, deve ser objetivo prioritário do município, de acordo com o art. 166, inciso V, da CR/88, “estimular e difundir o ensino e a cultura, proteger o patrimônio cultural e histórico e o meio ambiente e combater a poluição” (Brasil, 1988).

As stated in the preamble to the 1972 UNESCO Convention Concerning the Protection of the World Cultural and Natural Heritage, the degradation or disappearance of cultural and natural heritage constitutes a harmful impoverishment of the heritage of all people. Given that, Brazilian Constitution goes on to establish that the preservation, conservation, and maintenance of cultural heritage assets is not merely an option, but rather a requirement of public order and social interest for the collective good (paragraph 1, art. 216).

CR/88, in its Article 23, items II and IV, stipulated the common material jurisdiction between the Union, states, and federal district for the special protection of cultural heritage. In line with this provision, Article 11 of the Constitution of Minas Gerais State imposed its preservation on the government, in collaboration with the community, and, if necessary, the repression of damage and/or threats to said heritage.

Municipalities have not been forgotten, as they were tasked, in Article 30, item IX, of CR/88, with “promoting the protection of local historical and cultural heritage, in accordance with federal and state legislation and oversight.” In addition to promoting cultural heritage, according to Article 166, item V, of CR/88, it should be a priority objective of the municipality to “stimulate and disseminate education and culture, protect cultural and historical heritage and the environment, and fight pollution” (Brazil, 1988).

The Minas Gerais State Constitution stipulates:

Art. 207 - The Government guarantees everyone the full exercise of cultural rights, for which it will encourage, value, and disseminate the cultural manifestations of the community of Minas Gerais, mainly through:

[...]

VI - adopting measures to prevent the eva-

A Constituição do Estado de Minas Gerais prevê:

Art. 207 - O Poder Público garante a todos o pleno exercício dos direitos culturais, para o que incentivará, valorizará e difundirá as manifestações culturais da comunidade mineira, mediante, sobretudo:

[...]

VI - adoção de ação impeditiva da evasão, destruição e descaracterização de obras de arte e de outros bens de valor histórico, científico, artístico e cultural (Minas Gerais, 1989).

Assim, é dever do Poder Público proteger o patrimônio cultural, dentre o qual se insere, repese-se, o patrimônio espeleológico.

A Lei de Política Cultural do Estado de Minas Gerais - Lei Estadual 11.726/94 reforça esse dever no art. 2º, ao prever que “a política cultural do Estado compreende o conjunto de ações desenvolvidas pelo poder público na área cultural e tem como objetivos: [...] III - proteger os bens que constituem o patrimônio cultural mineiro” (Minas Gerais, 1994). Especificamente estabelece:

Art. 13 - Os bens e sítios arqueológicos, as cavidades naturais subterrâneas e os depósitos fossilíferos sujeitam-se à guarda e proteção do Estado, que as exercerá em colaboração com a comunidade.

§ 1º - O dever de proteção estende-se às áreas de entorno, até o limite necessário à preservação do equilíbrio ambiental, dos ecossistemas e do fluxo das águas e à manutenção da harmonia da paisagem local.

[...]

§ 3º - O Estado dará proteção especial às

sion, destruction, and decharacterization of works of art and other assets of historical, scientific, artistic, and cultural value (Minas Gerais, 1989).

Thus, it is the duty of the government to protect cultural heritage, which includes speleological heritage.

The Cultural Policy Law of Minas Gerais (State Law 11.726/94) reinforces this duty in Article 2, by stipulating that “the cultural policy of the State comprises the set of actions developed by the public authorities in the cultural area and has the following objectives: [...] III - to protect the assets that constitute the cultural heritage of Minas Gerais” (Minas Gerais, 1994). Specifically, it establishes:

Art. 13 - Archaeological assets and sites, natural underground caves, and fossil deposits are subject to the custody and protection of the State, which shall exercise such custody and protection in collaboration with the community.

§ 1 - The duty of protection extends to surrounding areas, to the extent necessary to preserve the environmental balance, ecosystems, and water flow, and to maintain the harmony of the local landscape.

[...]

§ 3 - The State shall provide special protection to karst areas, for which it shall maintain specific and updated records and cartographic registers, intended to guide their preservation (Minas Gerais, 1994).

Therefore, there is no doubt that the cultural environment—which includes speleological heritage—receives special treatment in Brazilian law, imposing on the government, in collaboration with society, the duty to protect cultural assets, as well as the respon-

áreas cársticas, das quais manterá cadastro e registro cartográfico específicos e atualizados, destinados a orientar a sua preservação (Minas Gerais, 1994).

Dessa forma, não há dúvida de que o meio ambiente cultural – no qual se inclui o patrimônio espeleológico – possui tratamento especial no ordenamento jurídico brasileiro, impondo ao Poder Público, em colaboração com a sociedade, o dever de proteger os bens culturais, bem como a responsabilidade de transmiti-los, em condições adequadas, às gerações futuras.

Considerando que o sistema de tutela do patrimônio cultural incide sobre as cavidades naturais subterrâneas como integrantes do patrimônio espeleológico brasileiro – e, em especial, do mineiro –, é indubitável que os bens merecem uma especial consideração. No caso de cavidades que possuam atributos que as caracterizem como de máxima relevância, as normativas ambientais atualmente vigentes já determinam sua conservação ao impedir impactos negativos irreversíveis. Tratando-se de cavidades que possuam atributos que as caracterizem como de relevância alta ou média, a legislação ambiental determina a compensação, seja *in natura*, seja através de medidas compensatórias diversas, como ações que contribuam para a conservação do patrimônio espeleológico.

No tocante às cavidades naturais que não possuam atributos aptos classificá-las como de máxima, alta ou média relevância, embora a legislação referente ao meio ambiente natural dispense a adoção de medidas e ações para preservação de outras cavernas, isso não as desconstitui enquanto objeto de guarda e proteção do Estado de Minas Gerais como bens culturais. Assim, perde-se a camada de tutela ambiental *stricto sensu*,

sibility to pass them on, in appropriate conditions, to future generations.

Considering that, the cultural heritage protection system focuses on caves as part of Brazil's speleological heritage, particularly that of Minas Gerais, it is clear that these assets deserve special consideration. In the case of caves that have attributes that characterize them as being of maximum relevance, current environmental regulations already determine their conservation by preventing irreversible negative impacts. In the case of caves that have attributes that characterize them as being of high or medium relevance, environmental legislation requires compensation, either of the caves themselves or through various compensatory measures, such as actions that contribute to the conservation of speleological heritage.

*With regard to caves that do not have attributes that classify them as being of maximum, high, or medium relevance, although legislation relating to the natural environment does not require the adoption of measures and actions for the preservation of other caves, this does not invalidate them as objects of custody and protection as cultural assets by Minas Gerais State. Therefore, the layer of environmental protection *stricto sensu* is lost, but the protection provided for caves as part of the speleological and, therefore, cultural heritage remains intact.*

The conclusion regarding the applicability of cultural compensation for irreversible negative impacts on caves classified as low relevance is also supported by environmental principles and rules regarding impacts on cultural heritage in Minas Gerais.

mas mantém-se intacta a tutela prevista para as cavernas enquanto integrantes do patrimônio espeleológico e, portanto, cultural.

A conclusão quanto à aplicabilidade da compensação cultural para impactos negativos irreversíveis em cavidades naturais subterrâneas classificadas como de baixa relevância encontra amparo, ainda, em princípios ambientais e nas regras referentes a impactos ao patrimônio cultural em Minas Gerais.

Princípios e regras aplicáveis à compensação por impactos ao patrimônio cultural

As cavidades naturais subterrâneas não são bens estáticos. Pelo contrário, o rico ecossistema que sustentam se desenvolve ao longo de milhões de anos, em sinergia entre seus elementos bióticos e abióticos; desta feita, uma caverna que hoje é classificada como de baixa relevância, no tempo certo geológico, pode guardar espécie de troglóbio raro ou mesmo um atributo de destacada relevância histórico-cultural ou religiosa. Como ambiente em evolução, deve ser tutelado em todas as suas potencialidades, e não apenas a partir de uma fotografia de sua situação atual. Assim, as autorizações para realização de impactos nesses bens devem ser cuidadosamente sopesadas, uma vez que trazem consequências não apenas para estas, como para as gerações futuras que se verão privadas desses bens. A necessidade de compensação, portanto, tem respaldo no *Princípio Da Responsabilidade Intergeracional*, consagrado no artigo 225 da Constituição Federal de 1988, que estabelece o dever de preservar a qualidade ambiental para as gerações futuras. Esse princípio está vinculado à solidariedade intergeracional, que também aparece na Convenção da UNESCO de 1972, ao reafirmar

Principles and rules applicable to compensation for impacts on cultural heritage

Caves are not static assets. On the contrary, the rich ecosystem they sustain develops over millions of years, in synergy between their biotic and abiotic elements; thus, a cave that is currently classified as of low relevance, at the right geological time, may harbor rare troglobitic species or even an attribute of outstanding historical, cultural, or religious relevance. As an evolving environment, it must be protected in all its potential, and not just based on a snapshot of its current situation. Thus, authorizations to impact these assets must be carefully weighed, as they have consequences not only for them, but also for future generations who will be deprived of these assets. The need for compensation, therefore, is supported by the Principle of Intergenerational Responsibility, established in Article 225 of the Federal Constitution of 1988, which establishes the duty to preserve environmental quality for future generations. This principle is linked to intergenerational solidarity, which also appears in the 1972 UNESCO Convention, reaffirming the obligation of States to protect and transmit cultural and natural heritage to future generations, making maximum use of their resources or, if necessary, resorting to

a obrigação dos Estados de proteger e transmitir o patrimônio cultural e natural às gerações futuras, utilizando ao máximo seus recursos ou, se necessário, recorrendo à cooperação internacional. A Conferência Rio 92 complementa esse entendimento, integrando o desenvolvimento sustentável ao princípio, ao prever que o direito ao desenvolvimento deve atender tanto às necessidades atuais quanto às futuras, sem comprometer a proteção ambiental. De forma similar, a Declaração sobre Responsabilidades das Gerações Presentes para as Futuras Gerações (1997) reforça a cautela necessária na condução de grandes projetos, considerando suas consequências para as gerações vindouras. Desse princípio pode-se extrair que, uma vez que a atual geração estabeleceu a possibilidade de até mesmo de supressão de cavernas de baixa relevância, deverá, ao menos, exigir que esse impacto seja compensado por meio de medidas de conservação do patrimônio cultural remanescente para as próximas gerações.

Outro princípio que pode nortear a necessidade de compensação por quaisquer impactos a bens culturais é o *Princípio da Reparação Integral*, que busca garantir a restauração das condições ambientais ao estado original, sempre que possível, e a compensação adequada quando a reparação completa não for viável. A Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/81) estabelece no art. 4º, inciso VII, que “visará à imposição, ao poluidor e ao predador, da obrigação de recuperar e/ou indenizar os danos causados” (Brasil, 1981). Pelo princípio em questão, em razão da indisponibilidade do interesse público na manutenção do meio ambiente ecologicamente equilibrado, essencial à sadia qualidade de vida, todos os efeitos adversos provenientes da conduta lesiva ao meio ambiente devem ser objeto de reparação. Com base no referido princípio, admite-se a imposição simultânea e cumulativa de obrigações

international cooperation. The Rio 92 Conference complements this understanding by integrating sustainable development into the principle, providing that the right to development must meet both current and future needs without compromising environmental protection. Similarly, the Declaration on the Responsibilities of Present Generations to Future Generations (1997) reinforces the caution needed in conducting large projects, considering their consequences for future generations. From this principle, it can be inferred that, since the current generation has established the possibility of even suppressing caves of low relevance, it should at least require that this impact be compensated for through measures to conserve the remaining cultural heritage for future generations.

Another principle that can guide the compensation need for any impacts on cultural property is the Principle of Full Restoration, which seeks to ensure the reparation of environmental conditions to their original state, whenever possible, and adequate compensation when full repair is not feasible. The National Environmental Policy (Law No. 6,938/81) establishes in Article 4, item VII, that “it shall aim to impose on polluters and predators the obligation to recover and/or compensate for the caused damage” (Brazil, 1981). According to this principle, due to the unavailability of public interest in maintaining an ecologically balanced environment, which is essential to a healthy quality of life, all adverse effects resulting from harmful conduct to the environment must be subject to repair. Based on this principle, the simultaneous and cumulative imposition of obligations to do, not to do, and to compensate is allowed, and all necessary measures must be taken to ensure that the environment is fully repaired, always focusing on the priority of restoration or in natura recovery. The possibility of combining in natura reparation with compensation recognizes the fact

de fazer, de não fazer e de indenizar, devendo-se tomar todas as medidas necessárias para que o meio ambiente seja integralmente reparado, sempre com foco na prioridade da restauração ou recuperação *in natura*. A possibilidade de se cumular a reparação *in natura* com a indenização reconhece o fato de que, mesmo sendo viável a restauração do meio ambiente degradado, dificilmente se obtém o retorno ao *status quo ante*. A proteção ambiental funciona a partir de escalonamento de ações que devem ser adotadas para garantir a integridade do bem tutelado. Primeiramente, deve-se preocupar com a prevenção/ precaução, para que impactos/ danos/ ameaças não ocorram. Ultrapassada essa fase, entram em cena as medidas de mitigação e controle, que visam a reduzir o prejuízo ambiental causado. O dano ocorrido a despeito das etapas anteriores deve ser restaurado/ recuperado *in natura*. Caso não seja possível, somente então caberia falar em compensação. Então, caso ocasionados danos às cavidades naturais subterrâneas e verificada a inviabilidade de sua reparação natural e integral, o degradador deve ser compelido a promover compensação ambiental, mediante compensação ecológica ou indenização pecuniária.

Essa lógica é claramente aplicada na responsabilidade civil, após a ocorrência do dano, mas deve ser lembrada também no momento da análise dos possíveis impactos do empreendimento, quando do licenciamento ambiental; afinal, o que diferencia o impacto do dano nesse caso é apenas a sua legitimação pelo Estado, o que não impede que, na prática, os efeitos prejudiciais venham a se concretizar. Assim, todo esse mecanismo deve funcionar atendendo à lógica da reparação integral, ainda que não tenha ainda ocorrido o dano. Caso não seja operacionalizado o reequilíbrio ambiental – interrompido a partir da intervenção antrópica em bem natural/ cultural –, por meio da imposição

that, even if it is feasible to restore the degraded environment, it is difficult to return to the status quo ante. Environmental protection works by staggering actions that must be taken to ensure the integrity of the protected asset. First, prevention/precaution must be a concern, so that impacts/damage/threats do not occur. Once this phase is over, mitigation and control measures come into play, aimed at reducing the environmental damage caused. Damage that has occurred despite the previous steps must be restored/recovered in natura. If this is not possible, only then would compensation be appropriate. Therefore, if damage has been caused to caves and it has been verified that natural and complete repair is not feasible, the polluter must be compelled to provide environmental compensation, either through ecological compensation or through monetary compensation.

This logic is clearly applied in civil liability after damage has occurred, but it must also be borne in mind when analyzing the project's possible impacts during the environmental licensing process. After all, what differentiates the impact of the damage in this case is only its legitimization by the State, which does not prevent the harmful effects from materializing. Therefore, this entire mechanism must function according to the logic of full reparation, even if the damage has not yet occurred. If environmental rebalancing – interrupted by anthropic intervention in natural/cultural assets – is not operationalized through the imposition of sufficient measures to compensate for the privatization of environmental resources to the detriment of their fair enjoyment by society, the principle in question will not have been met. Thus, speleological compensation can be understood as a practical application of the principle of full reparation in the context of caves and speleological environments protection, since, when it is impossible to mitigate the impacts, speleological

de medidas suficientes para compensar a privatização dos recursos ambientais em detrimento da sua justa fruição pela sociedade, o princípio em questão não terá sido atendido. Assim, a compensação espeleológica pode ser entendida como forma de aplicação prática do princípio da reparação integral no contexto da proteção de cavernas e ambientes espeleológicos, visto que, quando é impossível mitigar os impactos, recorre-se à compensação espeleológica, que é uma medida subsidiária para atender à obrigação de reparação integral.

Já o *Princípio do Poluidor-Pagador* tem o condão de impor ao empreendedor a obrigação de se responsabilizar por toda degradação ambiental que ocasionar, arcando com todos os custos decorrentes da atividade impactante do meio ambiente. Trata-se de “instrumento econômico de política ambiental empregado pelos estados para estabelecer de que modo os custos ambientais serão distribuídos entre os atores econômicos” (Sampaio; Wold; Nardy, 2003, p. 24). Nesse caso, os custos podem ser de prevenção, controle e reparação, sendo que os dois primeiros possibilitam a cobrança prévia, no âmbito do licenciamento ambiental, por exemplo, enquanto o último exige que o dano efetivamente ocorra, estando associado à responsabilidade civil⁶. O Princípio do Poluidor-Pagador possui, portanto, zona cinzenta de interligação com o princípio responsabilidade, que dita que todo aquele que causar prejuízo a outrem é obrigado a repará-lo, sendo o princípio da responsabilidade ecológica sua feição conhecida no campo dos danos ao meio ambiente. O citado princípio determina a obrigação de que aquele que faz uso de recursos ambientais, considerados como bens de uso comum do povo e, portanto, pertencentes à coletividade, impactando-os, deve compensar a sociedade, que

compensation is used as a subsidiary measure to meet the obligation of full reparation.

The Polluter Pays Principle, on the other hand, imposes on entrepreneurs the obligation to take responsibility for any environmental degradation they cause, bearing all costs arising from activities that impact the environment. It is an “economic instrument of environmental policy used by states to establish how environmental costs will be distributed among economic actors” (Sampaio; Wold; Nardy, 2003, p. 24). In this case, the costs may be for prevention, control, and repair, with the first two allowing for prior collection, within the scope of environmental licensing, for example, while the latter requires that the damage actually occur, being associated with civil liability⁵. The Polluter Pays Principle therefore has a gray area of interconnection with the principle of responsibility, which dictates that anyone who causes damage to others is obliged to repair it, the principle of ecological responsibility being its known feature in the field of environmental damage. This principle establishes the obligation that anyone who uses environmental resources and impacts them, must compensate society, since they are considered to be common goods belonging to the people and the community that were lost due to the individual claims of polluters, focused on their profitable activities. It is worth emphasizing that this is not an authorization to pollute, but a mechanism that allows the State to charge individuals for the environmental costs of the enterprise, which would otherwise be passed on to the community. Thus, those who, in order to carry out economic activities, impact caves must pay society for the loss of this heritage. This requirement may even induce entrepreneurs to seek alternative locations that do not affect caves classi-

⁶ Ainda se pode pensar nos custos do Estado para divulgar e estimular o cumprimento da legislação ambiental (Sampaio et al, 2003, p. 75).

⁵ One can also consider the costs to the State of disseminating and encouraging compliance with environmental legislation (Sampaio et al, 2003, p. 75).

perde parte de seu direito pela reivindicação individual do poluidor, voltada ao atendimento de sua atividade lucrativa. Vale frisar que não se trata de autorização para poluir, mas de mecanismo que permite ao Estado cobrar dos particulares os custos ambientais do empreendimento, que, de outra maneira, seriam repassados à coletividade. Desta forma, aquele que, para exercer a atividade econômica, impactar cavidades naturais, deve pagar à sociedade pela perda desse patrimônio. Tal exigência pode, inclusive, induzir o empreendedor a buscar alternativas locacionais que não impactem cavidades classificadas como de baixa relevância, permitindo à sociedade usufruir desse patrimônio.

No tocante às regras referentes à matéria de compensação por impactos ao patrimônio cultural, como visto, em Minas Gerais, o meio ambiente cultural é tutelado por regime próprio, para além do regime de proteção do meio ambiente natural, existindo verdadeiro “feixe de direitos fundamentais culturais [que] impõe ao Estado o dever de desenvolver políticas públicas ligadas à preservação das identidades locais, regionais e nacionais e promover a educação, imprescindível para o acesso à cultura” (Gomes, 2013, p. 18).

Nesse sentido, a realização de obra que tenha efeito real ou potencial sobre área ou bem identificados pelo Estado como portadores de interesse cultural, além de se sujeitar à elaboração de EIA/RIMA, demanda também o Estudo Prévio de Impacto Cultural (EPIC) e respectivo Relatório de Impacto ao Patrimônio Cultural (RIPC), a serem apresentados ao órgão de proteção cultural para obter anuência a qual será juntada no processo de licenciamento ambiental⁷. É o que determina a Lei nº 11.726, de 30 de dezembro de 1994, que

fixed as low relevance, allowing society to enjoy this heritage.

With regard to the rules concerning compensation for impacts on cultural heritage, as seen in Minas Gerais, the cultural environment is protected by its own regime in addition to the natural environment protection regime. There is a true “set of fundamental cultural rights [that] imposes on the State the duty to develop public policies linked to the preservation of local, regional, and national identities and to promote education, which is essential for culture access” (Gomes, 2013, p. 18).

In this sense, the execution of works that have a real or potential effect on areas or assets identified by the State as being of cultural interest, are subject not only to an EIA/RIMA, but also requires a Preliminary Cultural Impact Study (EPIC) and a respective Cultural Heritage Impact Report (RIPC). All this studies and reports must be submitted to the cultural protection agency for approval, and are included in the environmental licensing process⁶. This is determined by Law No. 11,726, of December 30, 1994, which provides for the cultural policy of the State of Minas Gerais, in its Article 10. In compliance with §1 of this provision, combined with Article 83-A of the same law, the State Council for Cultural Heritage (CONEP) issued Normative Resolution No. 07/2014, which regulates the procedure to be adopted and lists the developments, works, and projects, as well as the territorial spaces to which the discipline applies.

Among the areas where EPIC/REPIC must be carried out are karst areas or areas with high or very high speleological potential, as well as areas of archaeological and paleontological interest (CONEP, 2014).

⁷ A exigência de manifestação do referido Instituto encontra-se prevista no art. 27 da Lei 21.972/2016. A norma citada foi regulamentada pelo Decreto Estadual nº 47.383/2018.

⁶ The requirement for a statement from the aforementioned Institute is provided for in Article 27 of Law 21,972/2016. The aforementioned rule was regulated by State Decree No. 47,383/2018.

dispõe sobre a política cultural do Estado de Minas Gerais, em seu art. 10. Em atendimento ao §1º deste dispositivo, combinado com artigo 83-A da mesma lei, o Conselho Estadual do Patrimônio Cultural - CONEP editou a Deliberação Normativa n.º 07/2014, que regulamenta o procedimento a ser adotado e lista os empreendimentos, obras e projetos, bem como os espaços territoriais a que se aplica a disciplina.

Dentre as áreas onde obrigatoriamente deve ser realizado o EPIC/REPIC estão justamente as áreas cársticas ou de potencial espeleológico alto ou muito alto, bem como áreas de interesse arqueológico e paleontológico (CONEP, 2014).

Após formalizar o pedido de licenciamento ambiental no órgão competente, o empreendedor que se enquadre nas hipóteses previstas na DN deve também apresentar ao IEPHA⁸ o pedido de avaliação dos impactos ao patrimônio cultural. O estudo a ser elaborado para instruir a avaliação é o EPIC/REPIC cujo conteúdo deve ser amplo, abrangendo a caracterização detalhada do projeto, considerando sua localização e concepção, para atestar sua viabilidade e determinar os requisitos e condicionantes necessários nas fases subsequentes; a definição e diagnóstico das áreas diretamente afetadas (ADA), de influência direta (AID) e de influência indireta (AII), bem como a demonstração da compatibilidade do empreendimento com a legislação federal, estadual e municipal referente ao patrimônio cultural; a identificação de bens materiais e imateriais que representem referências à identidade, memória e ação dos diferentes grupos da sociedade brasileira, mesmo que ainda não sejam reconhecidos formalmente como patrimônio cultural; a análise dos impactos

After formalizing the environmental licensing application with the competent authority, entrepreneurs who fall under the provisions of the DN must also submit an application for assessment of the impacts on cultural heritage to the IEPHA⁷. The EPIC/REPIC is the study prepared to inform the assessment. Its content must be comprehensive, covering a detailed characterization of the project, considering its location and design, to attest to its feasibility and determine the requirements and conditions necessary in subsequent phases. It should also contain the definition and diagnosis of the areas directly affected (ADA), directly influenced (AID), and indirectly influenced (AII), as well as a demonstration of the project's compatibility with federal, state, and municipal legislation regarding cultural heritage. In addition, it must identify the tangible and intangible assets that represent references to the identity, memory, and actions of different groups in Brazilian society, even if they are not yet formally recognized as cultural heritage. Furthermore, it should present the analysis of potential impacts on cultural heritage present in the project's areas of influence, resulting from its implementation or operation, also it must contemplate the development of a safeguarding program for the affected cultural heritage, including prevention, mitigation, and compensation actions, as well as heritage education projects, with clear schedules for implementation and monitoring. Finally, it requires that the technical managers responsible for the studies be identified, ensuring qualification and accountability in the processes.

Throughout the impact assessment, both in the preparation of studies and in their analysis, the guidelines established in Article 3 of DN CONEP 07/2014 must be observed, namely: sustainable

8 Pelo previsto no art. 5º da DN CONEP 07/2014, compete ao Instituto Estadual de Patrimônio Histórico e Artístico (IEPHA/MG) a análise do Estudo Prévio de Impacto Cultural (EPIC) e a aprovação do respectivo Relatório de Impacto no Patrimônio Cultural (RIPC).

7 In accordance with Article 5 of DN CONEP 07/2014, the State Institute of Historical and Artistic Heritage (IEPHA/MG) is responsible for analyzing the Preliminary Cultural Impact Study (EPIC) and approving the respective Cultural Heritage Impact Report (RIPC).

potenciais no patrimônio cultural presente nas áreas de influência do projeto, decorrentes de sua implantação ou operação; a elaboração de um programa de salvaguarda para o patrimônio cultural afetado, incluindo ações de prevenção, mitigação e compensação, além de projetos de educação patrimonial, com cronogramas claros para execução e monitoramento e, por fim, exige que sejam identificados os responsáveis técnicos pelos estudos realizados, garantindo a qualificação e a responsabilidade nos processos.

Em toda a avaliação de impactos - elaboração dos estudos e, igualmente, na sua análise - devem ser observadas as diretrizes estabelecidas no artigo 3º da DN CONEP 07/2014, quais sejam: desenvolvimento sustentável, prioridade para ações de prevenção, conservação *in situ* do patrimônio cultural, percepção do caráter finito e não renovável dos bens culturais, bem como de sua natureza difusa. Além disso, o dispositivo impõe como diretriz o “efetivo cumprimento das medidas de prevenção, mitigação e compensação” (CONEP, 2014).

Ao final da análise do EPIC/ RIPC, o Instituto Estadual de Proteção ao Patrimônio Histórico e Artístico – IEPHA concederá ou não a anuência ao empreendimento, com ou sem estabelecimento de medidas condicionantes ou mitigadoras (art. 8º, inciso V), consideradas como de relevante valor social e cultural (art. 10). Dentre as medidas condicionantes, podem estar previstas compensações pelos impactos ao patrimônio cultural.

Dessa forma, o bem natural que também seja bem cultural recebe, além da salvaguarda ambiental, a cultural, lembrando-se que, na aplicação, incidem as normas mais protetivas ao meio ambiente envolvido.

development, priority for preventive actions, in situ conservation of cultural heritage, awareness of the finite and non-renewable nature of cultural assets, as well as their diffuse nature. In addition, the provision imposes as a guideline the “effective compliance with prevention, mitigation, and compensation measures” (CONEP, 2014).

At the end of the EPIC/RIPC analysis, the State Institute for the Protection of Historical and Artistic Heritage (IEPHA) will grant or deny approval for the project, with or without establishing conditional or mitigating measures (Article 8, item V), considered to be of significant social and cultural value (Article 10). Among the conditional measures, compensation for cultural heritage impacts may be provided.

Thus, natural assets that are also cultural assets receive not only environmental protection but also cultural protection, bearing in mind that, in practice, the most protective standards for the environment apply.

Discussão: possibilidade de compensação por impactos negativos irreversíveis em cavidades naturais subterrâneas de baixa relevância ambiental

Busca-se, a partir do substrato teórico levantado até então, responder à questão proposta no presente trabalho: se o Direito contém elementos que permitam a compensação cultural por impactos negativos irreversíveis em cavidades naturais subterrâneas, inclusive de baixa relevância em Minas Gerais.

No caso das cavidades de baixa relevância espeleológica, não há controvérsia sobre a incidência, nesse caso, da compensação ambiental prevista pelo art. 36 da Lei do SNUC. Tampouco se questiona a impossibilidade de compensação ambiental espeleológica *in natura* já que o Decreto 10.935/22 expressamente o dispensa.

No entanto, percebe-se a existência de compensação específica (para o patrimônio cultural) que pode atender ao anseio de reequilibrar de alguma forma o patrimônio espeleológico afetado.

Como também se analisou, a CR/88 busca a reparação integral de toda degradação do meio ambiente, além de prever a obrigação do poluidor de bens ambientais de ressarcir a sociedade pela privatização da fruição dos bens coletivos com vistas a atender interesses econômicos próprios. Ainda, é importante ter em mente a mudança de modo de pensamento determinada pela CR/88 e pelos documentos internacionais - tais como as Declarações de Estocolmo (Princípio 2) e Rio 92 (Princípio 3) - que amparam o Princípio da Solidariedade entre Gerações, segundo o qual não se deve permitir irrestritamente a destruição do meio ambiente natural

Discussion: compensation possibility for irreversible negative impacts on low environmental relevance caves

Based on the theoretical framework outlined above, this paper seeks to answer the question posed herein: does the law contain elements that allow for cultural compensation for irreversible negative impacts on caves, including those of low relevance in Minas Gerais?

In the case of low speleological relevance caves, there is no controversy regarding the applicability of the environmental compensation provided for in Article 36 of the SNUC Law. Nor is there any question as to the impossibility of speleological environmental compensation in natura, since Decree 10.935/22 expressly exempts it.

However, there is evidence of specific compensation (for cultural heritage) that may satisfy the desire to somehow rebalance the affected speleological heritage.

As also analyzed, CR/88 seeks full reparation for all environmental degradation, in addition to establishing the obligation of polluters of environmental assets to compensate society for the privatization of collective assets to serve their own economic interests. Furthermore, it is important to bear in mind the mentality shift brought about by CR/88 and international documents, such as the Stockholm Declaration (Principle 2) and Rio 92 (Principle 3). These documents support the Principle of Solidarity between Generations, according to which the destruction of the natural or cultural environment should not be

ou cultural sob pena de comprometer-se os interesses das gerações futuras⁹.

Assim, mesmo que uma leitura apressada do texto do Decreto 10.935/2022 pareça conduzir ao entendimento de que são permitidos os impactos negativos irreversíveis em cavidades naturais subterrâneas de baixa relevância espeleológica, sem a exigência de qualquer compensação por esse fato específico¹⁰, não é isso que se extrai da interpretação sistêmica do ordenamento jurídico brasileiro, especialmente em Minas Gerais, com o regramento próprio estadual. Afinal, o fato de uma cavidade natural ter sido classificada como de baixa relevância espeleológica para fins da legislação ambiental não significa que não tenha relevância enquanto patrimônio cultural.

Como visto, existe amplo arcabouço jurídico prevendo o patrimônio espeleológico como patrimônio cultural (Constituição Federal, art. 216, V; Constituição do Estado de Minas Gerais, art. 208, V).

A Lei de Política Cultural do Estado de Minas Gerais possui seção relativa especificamente ao patrimônio espeleológico e determina que “os bens e sítios arqueológicos, as cavidades naturais subterrâneas e os depósitos fossilíferos sujeitam-se à guarda e proteção do Estado, que as exercerá em colaboração com a sociedade” (Minas Gerais, 1994); a referida lei impõe ainda que “a exploração econômica de qualquer natureza, bem como a realização de obra de infraestrutura

allowed without restriction, under risk of compromising the interests of future generations⁸.

Thus, even though a hasty reading of Decree 10.935/2022 seems to lead to the understanding that irreversible negative impacts on low relevance caves are permitted, without the requirement of any compensation for this specific fact⁹. This is not what can be inferred from a systemic interpretation of the Brazilian legal system, especially in Minas Gerais, with its own state regulations. After all, the fact that a cave has been classified as of low speleological relevance for the purposes of environmental legislation does not mean that it is not relevant as cultural heritage.

As seen, there is a broad legal framework that recognizes speleological heritage as cultural heritage (Federal Constitution, Art. 216, V; Constitution of the State of Minas Gerais, Art. 208, V).

The Minas Gerais State Cultural Policy Law has a section specifically related to speleological heritage and determines that “archaeological assets and sites, natural underground caves, and fossil deposits are subject to the custody and protection of the State, which shall exercise them in collaboration with society” (Minas Gerais, 1994). The law also stipulates that “economic exploitation of any kind, as well as infrastructure works and construction in areas identified as being of archaeological, speleological, or paleontological interest, are subject to a prior cultural impact study (...)” (Minas Gerais, 1994).

9 Segundo Naves e Silva (2014, p. 365/366), [...] “o ideal de justiça é projetado no futuro. O resguardo dos interesses das gerações futuras, através da indução jurídica da solidariedade, reflete a conformação do Direito com a Ética e proporciona a proteção dos direitos fundamentais na linha do tempo. Assim, qualquer conduta atual – pública ou privada –, especialmente aquelas voltadas para a intervenção no meio ambiente, deve se conformar com este princípio.”

10 Viu-se que a opção legislativa exercida em uma determinada lei não passa de opção política amparada pelo viés ideológico momentâneo prevalente no momento de elaboração da norma, não podendo prevalecer sobre a coerência do sistema jurídico como um todo.

8 According to Naves & Silva (2014, p. 365/366), [...] “the ideal of justice is projected into the future. The safeguarding of the interests of future generations, through the legal induction of solidarity, reflects the conformation of Law with Ethics and enables the protection of fundamental rights over time. Thus, any current conduct—public or private—especially those aimed at intervening in the environment, must comply with this principle.”

9 It has been seen that the legislative option exercised in a given law is nothing more than a political option supported by the ideological bias prevailing at the time the rule was drafted, thus, it cannot prevail over the coherence of the legal system as a whole.

e a construção em área identificada como de interesse arqueológico, espeleológico ou paleontológico dependem da realização de estudo prévio de impacto cultural (...)” (Minas Gerais, 1994).

A DN CONEP que regulamenta o EPIC/REPIC reafirma a necessidade desses estudos nas áreas de potencial espeleológico. A mesma norma prevê que a análise do procedimento em Minas Gerais fica a cargo do Instituto Estadual de Patrimônio Histórico e Artístico de Minas Gerais – IEPHA, que deve dar ou não a anuência ao empreendimento que cause impacto ao patrimônio cultural, no bojo do processo de licenciamento, além de prever medidas preventivas, mitigadoras e compensatórias relativas ao patrimônio cultural (art. 5º da DN CONEP n.º 07/2014).

Desta feita, conclui-se que em Minas Gerais é cabível a compensação cultural por impactos negativos irreversíveis em cavidades naturais subterrâneas, inclusive para aquelas classificadas como de baixa relevância espeleológica, independentemente da incidência da compensação ambiental prevista no art. 36 da Lei do SNUC.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ordenamento jurídico brasileiro atualmente permite que sejam causados impactos negativos irreversíveis em cavidades de alta, média e baixa relevância, desde que autorizados em licenciamento ambiental. A opção legislativa, contudo, é bem marcada no tempo. Foi fruto de alteração promovida pela Resolução CONAMA n.º 347/2004 e reafirmada pelo Decreto 6.640/2008, e reafirmada pelo Decreto 10.935/22, com modulações dadas pelo STF na ADPF 935, que mudaram o regime anteriormente vigente de proteção integral a todas as cavidades naturais subterrâneas, imbuída de cunho marcadamente antropocêntrico e utilitarista.

DN CONEP, which regulates EPIC/REPIC, reaffirms the need for these studies in areas with speleological potential. The same standard stipulates that the procedure analysis in Minas Gerais is the responsibility of the IEPHA, which must give or withhold consent to projects that impact cultural heritage, as part of the licensing process, in addition to providing for preventive, mitigating, and compensatory measures related to cultural heritage (Article 5 of DN CONEP No. 07/2014).

In this case, it is concluded that in Minas Gerais, cultural compensation is applicable for irreversible negative impacts on natural underground caves, including those classified as having low speleological relevance, regardless of the incidence of environmental compensation established in Article 36 of the SNUC Law.

FINAL REMARKS

The Brazilian legal system currently allows irreversible negative impacts on high, medium, and low-relevance caves, provided they are authorized in environmental licensing. The legislative option, however, is well marked in time. It was the result of an amendment promoted by CONAMA Resolution No. 347/2004, reaffirmed by Decree 6,640/2008, and reiterated by Decree 10,935/22, with modifications made by the STF in ADPF 935, which changed the previously existing regime of full protection for all caves, with a markedly anthropocentric and utilitarian character.

Para permitir os impactos às cavidades naturais subterrâneas de alta e média relevância, a norma exige compensação espeleológica. No entanto, no caso das cavidades naturais subterrâneas de baixa relevância, a lei dispensa expressamente a preservação de outras cavidades, ficando esses bens aparentemente desacobertados pelo manto da proteção jurídica.

O trabalho se propôs a responder à seguinte questão: o direito contém elementos que permitam a compensação cultural por impactos negativos irreversíveis em cavidades naturais subterrâneas, especialmente as de baixa relevância em Minas Gerais?

Com o objetivo de verificar se seria possível compensação pelos impactos negativos irreversíveis provocados por atividade ou obra em cavidades, sobretudo para as de baixa relevância, foi necessário então incursionar no tema da compensação ambiental. A compensação ambiental é gênero que engloba, além da compensação ambiental prevista no art. 36 da Lei do SNUC, diversas outras compensações específicas, dentre as quais se inclui a compensação espeleológica.

A conclusão foi alcançada a partir da compreensão de que o patrimônio espeleológico é, além de componente do meio ambiente natural, bem que constitui o meio ambiente cultural, expressamente protegido também pelas Constituições Federal e Estadual de Minas Gerais, Lei Estadual n.º 11.726/1994 e DN CONEP n.º 07/2014. Ainda, amparada pela interpretação sistemática dos princípios da reparação integral e do poluidor-pagador, aliado ao princípio da solidariedade intergeracional, bem como a partir da conscientização de que eventual opção legislativa apenas espelha opção política amparada pelo viés ideológico momentâneo prevalente no momento de

To allow impacts on natural underground caves of high and medium relevance, the standard requires speleological compensation. However, in the case of low relevance caves, the law expressly exempts the preservation of other caves, leaving these assets apparently uncovered by the mantle of legal protection.

The study sought to answer the following question: does the law contain elements that allow for cultural compensation for irreversible negative impacts on caves, especially those of low relevance in Minas Gerais?

In order to verify whether it would be possible to compensate for the irreversible negative impacts caused by activities or projects in caves, especially those of low relevance, it was necessary to explore the topic of environmental compensation. Environmental compensation is a category that encompasses, in addition to the environmental compensation foreseen in Article 36 of the SNUC Law, several other specific types of compensation, including speleological compensation.

This conclusion was reached based on the understanding that speleological heritage is not only a component of the natural environment, but also constitutes the cultural environment, which is expressly protected by the Federal and State Constitutions of Minas Gerais, State Law No. 11,726/1994, and DN CONEP No. 07/2014. Furthermore, supported by the systematic interpretation of the full reparation and polluter pays principles, combined with the intergenerational solidarity principle, as well as the awareness that any legislative option only reflects a political decision supported by the ideological bias prevailing at the time, and should be read in accordance with the whole legal system.

Based on a systematic reading of the regulations addressed in this paper, it is understood that it is

elaboração da norma, devendo ser lida em consonância com o sistema jurídico como um todo.

A partir da leitura sistemática das normas abordadas no presente trabalho, entende-se que é possível que o órgão de proteção ao patrimônio cultural, no procedimento de anuência que instrui o processo de licenciamento, exija compensação cultural por impactos ao patrimônio espeleológico. Notadamente no tocante às cavidades classificadas como de baixa relevância, justamente por não ser possível a compensação espeleológica, a possibilidade de compensação cultural mostra-se ainda mais relevante.

possible for the cultural heritage protection agency, in the consent procedure that guides the licensing process, to require cultural compensation for impacts on speleological heritage. Notably, with regard to caves classified as low relevance, precisely because speleological compensation is not possible, the possibility of cultural compensation is even more relevant.

REFERÊNCIAS / REFERENCES

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR ISO 14.001: 2015, de 5 de fevereiro de 2015*. USP, 2017. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4249065/mod_folder/content/0/NBRISO14001.pdf?forcedownload=1. Acesso em: 12 fev. 2019.

BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil (1988)*. Brasília: Senado Federal, Centro Gráfico, 1988.

BRASIL. *Decreto Federal nº 10.935, de 12 de janeiro de 2022*. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso em: 7 fev. 2022.

BRASIL. *Decreto Federal nº 99.556, de 1 de outubro de 1990 com alterações dadas pelo Decreto Federal 6640 de 7 de novembro de 2008*. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso em: 7 fev. 2022.

BRASIL. *Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981*. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso em: 21 jan. 2019.

BRASIL. *Lei nº 9.985, de 22 de fevereiro de 2000*. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso em: 21 jan. 2019.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução nº 1, de 23 de janeiro de 1986*. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso em: 21 jan. 2019.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução nº 4*, de 18 de junho de 1987a. Declara diversas unidades de Conservação Como Sítios Ecológicos de Relevância Cultural para os efeitos da Lei Sarney. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso em: 7 fev. 2022.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução nº 5*, de 06 de agosto de 1987b. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso em: 7 fev. 2022.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução nº 347*, de 10 de setembro de 2004. Dispõe sobre a proteção do patrimônio espeleológico. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br>. Acesso em: 7 fev. 2022.

CHIODI, C. K. A aplicação do regime jurídico de proteção da mata atlântica aos campos ferruginosos. In: ALMEIDA, et al. *Patrimônio Cultural*. Coleção Ministério Público e direitos fundamentais. Belo Horizonte: Del Rey, 2013, p. 253-278.

GOMES, E. X.. O patrimônio cultural como direito fundamental. In: ALMEIDA et al (coord.). *Patrimônio Cultural*. Coleção Ministério Público e direitos fundamentais. Belo Horizonte: Del Rey, 2013, p. 01-26.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. Portaria 887, de 15 de junho de 1990. Promove a realização de diagnóstico da situação do patrimônio espeleológico nacional, através de levantamento e análise de dados, identificando áreas críticas e definindo ações e instrumentos necessários para a sua devida proteção e uso adequado. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br>. Acesso em: 20 mar. 2024.

MACHADO, P. A. L. *Direito ambiental brasileiro*. 26. ed. São Paulo: Malheiros, 2018. 1083p.

MAROTTA, C. G.; OLIVEIRA, G. R. A desproteção ao patrimônio espeleológico trazida pelo decreto 10.935/2022: a possibilidade de impactos negativos irreversíveis em cavidades naturais de máxima relevância. In: MOMOLI, R. S. et al. (orgs.). *Congresso Brasileiro de Espeleologia*, 36, 2022. Anais eletrônicos [...], p.431-435. Brasília; Campinas: SBE, 2022.

MINAS GERAIS. *Constituição (1989)*. *Constituição do Estado de Minas Gerais*. 5 out. 1989. 33. ed. Belo Horizonte: Assembleia Legislativa do Estado de Minas Gerais, 2024. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br>. Acesso em: 20 mar. 2024.

MINAS GERAIS. *Lei Estadual nº 11.726*, de 30 de dezembro de 1994. Dispõe sobre a política cultural do Estado de Minas Gerais. Disponível em: <https://www.almg.gov.br>. Acesso em: 19 mar. 2024.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual do Patrimônio Cultural – CONEP. Deliberação Normativa 007, de 3 de dezembro de 2014. Estabelece normas para a realização de estudos de impacto no patrimônio cultural no Estado de Minas Gerais. Disponível em: <http://www.iepha.mg.gov.br>. Acesso: 9 fev. 2019.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável - SEMAD. Instrução de Serviço SISEMA 08 de 2017, revisão 01. Disponível em: <https://liferay.meioambiente.mg.gov.br/instrucao-de-servico-sisema>. Acesso em: 31 dez. 2024.

NAVES, B. T. de O.; SILVA, M. V. Organismos geneticamente modificados sob a perspectiva da tutela das gerações futuras. *Veredas do Direito*, Belo Horizonte, v. 11, n. 22, p. 355-380, jul./dez. 2014. Disponível em: <http://www.domhelder.edu.br/revista/index.php/veredas/article/view/473/428>. Acesso em: 9 fev. 2019.

OLIVEIRA, G. R. Conservação de cavidades naturais subterrâneas enquanto patrimônio cultural brasileiro: escrutinando o posicionamento do IPHAN a partir do estudo do caso da Paleotoca situada na Serra do Gandarela/MG. *Dissertação* (mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais – Escola de Arquitetura. Belo Horizonte, 2024. 198f.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. *Declaração da Conferência de ONU no Ambiente Humano*, Estocolmo, 5-16 de junho de 1972. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/agenda21/_arquivos/estocolmo.doc. Acesso em: 9 fev. 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. *Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento*, Rio de Janeiro, 3-14 de junho de 1992-a. Disponível em: < <http://www.meioambiente.pr.gov.br>. Acesso em: 9 fev. 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. *Convenção sobre Diversidade Biológica - CDB*, Rio de Janeiro, 3-14 de junho de 1992-b. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br>. Acesso em: 9 fev. 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E CULTURA – UNESCO. *Convenção para a proteção do patrimônio mundial, cultural e natural*, Paris, 17-21 de novembro de 1972. Disponível em: <https://whc.unesco.org>. Acesso em: 12 fev. 2019.

SAMPAIO, J. A. L.; WOLD, C; NARDY, A. Princípio de direito ambiental na dimensão internacional e comparada. Belo Horizonte: Del Rey, 2003. 164p.

SOUZA, A. A. Tutela do patrimônio ambiental espeleológico no direito material brasileiro, 2012. *Dissertação* (Mestrado em Direito) - Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <https://tede.pucsp.br/handle/handle/5964>. Acesso em: 18 fev. 2024.

STEIGLEDER, A. M. *Responsabilidade civil ambiental: as dimensões do dano ambiental no Direito brasileiro*. 2. ed. Porto Alegre: Livraria do Advogado, 2011. 277p.

QUALIFICAÇÃO ACADÊMICA E PESQUISA CIENTÍFICA EM ESPELEOLOGIA E TEMAS AFINS: O PAPEL DA UNIVERSIDADE PARA A EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO SOBRE CAVERNAS E PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO NO BRASIL (1944-2024)

ACADEMIC QUALIFICATION AND SCIENTIFIC RESEARCH IN SPELEOLOGY AND RELATED TOPICS: THE UNIVERSITY ROLE IN THE EVOLUTION OF KNOWLEDGE ABOUT CAVES AND SPELEOLOGICAL HERITAGE IN BRAZIL (1944-2024)

Luiz Afonso Vaz de Figueiredo

Programa de Pós-Graduação em Ecoturismo e Conservação
UNIRIO/SHE-SBE/GESMAR
E-mail: lafonso.figueiredo@gmail.com

Lucas George Wendt

Programa de Pós-Graduação em
Museologia e Patrimônio -PPGMusPa
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS
E-mail: lucas.george.wendt@gmail.com

Arnaldo Antonio da Silva-Junior

SEDUC-SP/GESMAR
E-mail: arnald.jr@hotmail.com

Robson de Almeida Zampaulo

GESMAR/Observatório Espeleológico
E-mail: rzampaulo@yahoo.com.br

RESUMO

O objetivo do artigo foi analisar a evolução histórica da produção científica vinculada à qualificação acadêmica em Espeleologia e temas relacionados e o papel da universidade no Brasil neste campo

ABSTRACT

The objective of this article was to analyze the historical evolution of scientific production linked to academic qualifications in speleology and related topics, and the role of Brazilian universities in

do conhecimento. Partiu-se de uma Base de Dados (BD-ESPELEO), promovida pelo Projeto História da Espeleologia Brasileira (PROHEB), vinculado à Seção de História da Espeleologia (SHE) da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE). Os aspectos cientométricos foram destacados, sendo avaliada, de forma retrospectiva, as tendências dos últimos 80 anos (1944-2024). Realizou-se um exercício de genealogia acadêmica, indicando fluxos formativos em Espeleologia no país e a constituição de pólos formadores nas universidades brasileiras, disseminando pesquisas sobre cavernas e a paisagem cárstica brasileira. Apenas foram considerados os estudos acadêmicos em seu formato original, sendo os materiais recolhidos nos principais buscadores eletrônicos de dados científicos e nas bibliotecas universitárias (BDTD/IBICT, CV-LATTES, Dedalus/USP, entre outros). Os resultados demonstram evolução significativa na produção de estudos espeleológicos de caráter acadêmico (trabalhos de graduação, especialização, mestrado, doutorado, entre outros). Observa-se os resultados para os períodos comparados, 1) 1944-2015, contendo 512 documentos e 2) 2015-2024, indicando a geração 619 documentos novos, totalizando 1.131 investigações acadêmicas, o que demonstra que em apenas dez anos houve um incremento notável na produção científica, sendo que o período anterior abrangia pouco mais de 70 anos. Verificou-se um significativo aumento da produção universitária e a busca pela qualificação acadêmica, contribuindo para a ampliação do conhecimento sobre cavernas brasileiras, principalmente nas áreas de Ciências da Vida (CV) e Ciências da Terra (CT). Esses avanços na produção derivam da criação de laboratórios de investigação e núcleos de pesquisa científica, além da necessidade de profissionais especializados em ambientes cársticos para cumprir a legislação ambiental brasileira e fortalecimento da comunidade

this field of knowledge. The starting point was a database (BD-ESPELEO), promoted by the Brazilian Speleology History Project (PROHEB), linked to the Speleology History Section (SHE) of the Brazilian Speleology Society (SBE). Scientometric aspects were highlighted, with a retrospective evaluation of trends over the last 80 years (1944-2024). An academic genealogy exercise was carried out, indicating training flows in Speleology in the country and the establishment of training centers in Brazilian universities, disseminating research on caves and the Brazilian karst landscape. Only academic studies in their original format were considered, with materials collected from the main electronic scientific data search engines and university libraries (BDTD/IBICT, CV-LATTES, Dedalus/USP, among others). The results show significant progress in the production of academic speleological studies (undergraduate, specialization, master's, doctoral, among others). The results for the compared periods are as follows: 1) 1944-2015, containing 512 documents, and 2) 2015-2024, indicating the generation of 619 new documents, totaling 1,131 academic investigations, which demonstrates that in just ten years there was a notable increase in scientific production, whereas the previous period covered just over 70 years. There has been a significant increase in university production and the pursuit of academic qualifications, contributing to the expansion of knowledge about Brazilian caves, mainly in the areas of Life Sciences (LS) and Earth Sciences (ES). These advances in production stem from the creation of research laboratories and scientific research centers, in addition to the need for professionals specialized in karst environments to comply with Brazilian environmental legislation and strengthen the national speleological community. Universities and their professors/researchers have been fundamental, achieving considerable advances, especially when associated with speleo-

espeleológica nacional. As universidades e seus docentes/pesquisadores foram fundamentais, conseguindo consideráveis avanços, principalmente, quando associados aos grupos espeleológicos, aprofundando conhecimentos científicos e proteção das cavernas brasileiras.

PALAVRAS-CHAVE: Patrimônio espeleológico, base de dados, produção acadêmica, processos formativos, cientometria, genealogia acadêmica.

INTRODUÇÃO

A Espeleologia como estudo das cavernas é um campo do conhecimento científico relativamente novo. Somente a partir do final do século XIX ela foi se estruturando como tema específico do conhecimento, sendo que os trabalhos e as ações de articulação e/ou investigações feitas por alguns europeus foram fundamentais nesse sentido. Entre eles, destacam-se: o tcheco-austriaco Adolf Schmidl (1802-1863), geógrafo e escritor de viagens; o sérvio Jovan Cvijić (1865-1927), geógrafo e carstólogo, e, notadamente, o francês Édouard-Alfred Martel (1859-1938). Ressalta-se que apesar de Martel não ter sido um cientista, visto que era um advogado de formação e profissão, sempre foi um autodidata e fervoroso entusiasta no assunto, além disso, ele tinha diversos contatos nos meios científicos, levando-o a se aproximar das sociedades científica da época e a publicar sobre o assunto. Posteriormente, ele ajudou a fundar a Société de Spéléologie de France, tornando-se um dos editores da revista *La Nature*, prestigioso periódico francês de divulgação e popularização científica. O tema das cavernas ainda não tinha um espaço próprio na pesquisa científica, por isso, foram feitas inúmeras tentativas de acolhimento em várias outras áreas, arqueologia, geologia, geografia, paleontologia, todavia, não se conseguia

logical groups, deepening scientific knowledge and protection of Brazilian caves.

KEYWORDS: *Speleological heritage, database, academic production, training process, scientometrics, academic genealogy.*

INTRODUCTION

*Speleology, the study of caves, is a relatively new field of scientific knowledge. It was only at the end of the 19th century that it began to take shape as a specific field of knowledge, with the work and coordination and/or research carried out by a number of Europeans playing a fundamental role in this regard. Among them, the following stand out: the Czech-Austrian Adolf Schmidl (1802-1863), geographer and travel writer; Serbian Jovan Cvijić (1865-1927), geographer and karstologist Frenchman Édouard-Alfred Martel (1859-1938). It should be noted that although Martel was not a scientist, as he was a lawyer by training and profession, he was a self-taught fervent enthusiast on the subject. In addition, he had several contacts in scientific circles, which led him to become involved with the scientific societies of the time and to publish on the subject. He later helped found the Société de Spéléologie de France, becoming one of the editors of *La Nature*, a prestigious French journal for scientific dissemination and popularization. The subject of caves did not yet have its own place in scientific research, so numerous attempts were made to accommodate it in various other areas, such as archaeology, geology, geography, and paleontology. However, it did not achieve the prominence it deserved, which led to initiatives to consolidate the field as a specific area*

o destaque merecido, por isso surgiram iniciativas para consolidar o campo como área específica (Shaw, 1978; 1992; Schut, 2006a; 2006b; Figueiredo, 2010; Mattes, 2013; 2015).

A tese de doutorado de Cvijić, defendida na Universidade de Viena em 1893, *Das Karstphänomen: Versuch einer Morphologischen Monographie* [O fenômeno cárstico: tentativa de uma monografia morfológica], já traduzido no Brasil, é reconhecida como precursora das pesquisas acadêmicas dedicadas exclusivamente às cavernas e ao carste, destacando a região do carste clássico no Mar Adriático, Península Balcânica. (Cvijić, 2017; Travassos, 2017; Mattes, 2024).

A Espeleologia em âmbito mundial vem se consolidando como uma ciência de enfoque pluri e interdisciplinar, saindo do ponto de vista meramente esportivo-exploratório e de atividade de aventura, apesar de serem fundamentais para a execução de boa parte da pesquisa científica, constituindo-se como uma área do conhecimento científico, considerando todas as suas especificidades conceituais, sendo que o seu crescimento começa a ser destacado a partir dos anos 1960-1970. (Schut, 2006b; Mattes, 2015). No Brasil a temática das cavernas e das áreas cársticas como assunto investigativo ganha força na comunidade científica a partir de meados dos anos 1980 e tem seu aumento destacado a partir dos anos 1990 e 2000. (Figueiredo *et al.*, 2022).

Evidencia-se que existe um longo caminho no processo de formação de cientistas afinados com uma área que está se estabelecendo e que se sintam preocupados com a disseminação desse conhecimento. No entanto, para que se estabeleça como ciência é preciso investir na capacitação de pessoas que possam multiplicar experiências.

of science (Shaw, 1978; 1992; Schut, 2006a; 2006b; Figueiredo, 2010; Mattes, 2013; 2015).

Cvijić's doctoral thesis, defended at the University of Vienna in 1893, Das Karstphänomen: Versuch einer Morphologischen Monographie [The Karst Phenomenon: An Attempt at a Morphological Monograph], already translated in Brazil, is recognized as a precursor to academic research dedicated exclusively to caves and karst, highlighting the region of classic karst in the Adriatic Sea, Balkan Peninsula. (Cvijić, 2017; Travassos, 2017; Mattes, 2024).

Speleology has been consolidating itself worldwide as a multi- and interdisciplinary science, moving away from a purely sporting-exploratory and adventure activity perspective, despite these being fundamental to the execution of much scientific research. It has established itself as an area of scientific knowledge, considering all its conceptual specificities, with its growth beginning to be highlighted from the 1960s and 1970s onwards (Schut, 2006b; Mattes, 2015). In Brazil, the theme of caves and karst areas as a subject of investigation gained momentum in the scientific community in the mid-1980s and saw a notable increase in the 1990s and 2000s. (Figueiredo et al., 2022).

It is clear that there is a long way to go in the process of training scientists who are attuned to an emerging field and who are concerned with disseminating this knowledge. However, for it to establish itself as a science, it is necessary to invest in training people who can multiply experiences.

Science is a practice of generating and progressively accumulating knowledge that evolves over time. An evidently human characteristic is the ability to engage in interrelated activities that culminate in the accumulation of information about natural and social phenomena. This progress, which in-

A ciência é uma prática de geração e acumulação progressiva de conhecimento que evolui ao longo do tempo. Uma característica evidentemente humana é a capacidade de se envolver em atividades inter-relacionadas que culminam na acumulação de informações sobre fenômenos naturais e sociais. Esse progresso, que envolve a acumulação de conhecimento de geração em geração, foi possibilitado pela evolução da linguagem, seguida pelo surgimento da escrita e, finalmente, pela impressão de documentos que permitem o registro de informações para o futuro. (WENDT, 2024).

volves the accumulation of knowledge from generation to generation, was made possible by the evolution of language, followed by the emergence of writing and, finally, by the printing of documents that allow information to be recorded for the future. (WENDT, 2024).

Cada nova pesquisa começa quando um acadêmico, em processo formativo, elege um tema ou é designado para um deles; necessita, ainda, de alguém para a orientação do trabalho, uma metodologia investigativa para alcançar os objetivos propostos e tempo disponível para executar essa tarefa. Esse processo de auto-crescimento conduz à iniciação ou ao aprofundamento da formação para a pesquisa científica em suas diversas etapas. Algumas pessoas realizam essas atividades como obrigações acadêmicas, rito de passagem ou mesmo por necessidade profissional ou pessoal. Desafortunadamente, são poucos os que seguem a carreira como pesquisadores científicos¹ ou como professores-investigadores nas universidades, seja por falta de incentivos ou por outras preferências pessoais. Sem embargo, esse percurso é primordial para o fortalecimento de uma área de conhecimento e sua evolução como comunidade científica de forma coesa e

Each new research project begins when a student, in the process of training, chooses a topic or is assigned one; they also need someone to supervise their work, a research methodology to achieve the proposed objectives, and available time to carry out this task. This process of self-growth leads to the initiation or deepening of scientific research training in its various stages. Some people carry out these activities as academic obligations, rites of passage, or even out of professional or personal necessity. Unfortunately, few pursue careers as scientific researchers or as professor-researchers at universities, either due to a lack of incentives or other personal preferences. Nevertheless, this path is essential for strengthening an area of knowledge and its evolution as a cohesive and organic scientific community. For this reason, it is worth highlighting the commitment of funding sources, whether governmental or private, to stimulate the advancement of scientific knowledge in order to strengthen speleological research.

To achieve this prominent status as a producer of scientific knowledge in a given field, the commitment of universities, research institutes, laboratories, and research centers is essential. Another fundamental step is to disseminate research and its resulting products, whether at conferences, in dialogue with peers, or in journals and other spaces for the dissemination of science. All this accumulated knowledge is indispensable for understanding a subject such as karst landscapes and phenomena associated with caves, as well as being essential for the management and protection of speleological heritage.

¹ Nota da autoria: Consideram-se fundamentais as questões de igualdade de gênero na ciência e na sociedade como um todo, buscando uma forma mais justa e igualitária de valorização das pessoas. Porém, com o propósito de manter a fluidez do texto, optamos pelo uso do padrão da língua portuguesa, assim, sempre que mencionamos algum coletivo, estamos falando de todas as pessoas, indistintamente.

orgânica. Por esse motivo cabe destacar o compromisso de fontes para o financiamento, governamentais ou da iniciativa privada, estimulando o avanço do conhecimento científico, para o fortalecimento da pesquisa espeleológica.

Para alcançar essa condição de destaque como produtora de conhecimento científico em dado campo é essencial o compromisso das universidades, dos institutos de pesquisas, dos laboratórios e núcleos investigativos. Outro passo fundamental é difundir as investigações e seus produtos decorrentes, seja em congressos, dialogando com seus pares, ou em periódicos e outros espaços de difusão da ciência. Todo esse conhecimento acumulado é indispensável para o entendimento de um assunto, como a paisagem cárstica e os fenômenos associados com as cavernas, além de ser imprescindível para a gestão e proteção do patrimônio espeleológico.

Sendo assim, o presente estudo procura retratar o estado do conhecimento sobre cavernas e sítios espeleológicos a partir das atividades para a produção e análise de uma Base de Dados em Espeleologia e Temas Afins (BD-ESPELEO). Este trabalho é um desdobramento das ações do Projeto História da Espeleologia Brasileira (PROHEB), vinculado à Seção de História da Espeleologia (SHE) da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE), cujo levantamento está sendo realizado desde os anos 1990.

Estudos anteriores que se pautavam na revisão bibliográfica de trabalhos acadêmicos e na estruturação de um catálogo de informações sobre produção científica em espeleologia e assuntos correlatos foram utilizados como base de apoio e fontes iniciais (Zílio & Sánchez, 1979; Sánchez, 1986; Trajano, 1992; Figueiredo *et al.*, 1997; Figueiredo *et al.*, 2003; Figueiredo *et al.*, 2005; Figueiredo *et al.*, 2017, Figueiredo *et al.*, 2022, Zampaulo &

Therefore, this study seeks to portray the state of knowledge about caves and speleological sites based on activities for the production and analysis of a Database on Speleology and Related Topics (BD-ESPELEO). This work is an offshoot of the actions of the History of Brazilian Speleology Project (PROHEB), linked to the Speleology History Section (SHE) of the Brazilian Speleology Society (SBE), whose survey has been conducted since the 1990s.

Previous studies based on academic literature review and the creation of an information catalog on scientific production in speleology and related subjects were used as a basis and initial sources (Zílio & Sánchez, 1979; Sánchez, 1986; Trajano, 1992; Figueiredo et al., 1997; Figueiredo et al., 2003; Figueiredo et al., 2005; Figueiredo et al., 2017, Figueiredo et al., 2022, Zampaulo & Prous, 2022). Some of these studies conducted broader inventories in terms of the type of publications or data sources, while others focused exclusively on original academic production, i.e., unpublished documents used exclusively for the purposes of course completion or academic qualification, or even as reports for funding sources of scientific and technological projects. Figueiredo et al. (2005) already pointed out that "Scientific production is an indicator of the evolution of a field of knowledge and allows us to evaluate the role of the university in academic qualification and professional training." This is the emphasis highlighted in this article.

The study approaches scientometrics, also known as science metrics (Vanti, 2001; Silva & Bianchi, 2001; Parra et al., 2019), recognized in the field of Information Science and Library Science. It arises from the intersection between scientific documentation analysis, bibliometrics, the sociology of science, and the social history of science, aiming to measure and evaluate scientific production in a given area of knowledge. To achieve this purpose, several quan-

Prous, 2022). Alguns destes trabalhos realizaram inventários de caráter mais amplo, quanto a tipologia das publicações ou das fontes dos dados, os demais concentraram-se exclusivamente na produção acadêmica original, ou seja, documentos ainda não publicados, utilizados exclusivamente para fins de conclusão de curso ou qualificação acadêmica, ou mesmo como relatório para fontes de financiamento de projetos científicos e tecnológicos. Figueiredo *et al.* (2005) já destacavam que “A produção científica é um indicador de evolução de um campo do saber e permite avaliar o papel da universidade na qualificação acadêmica e na formação profissional”. Essa é a ênfase que se pretende destacar no presente artigo.

O estudo se aproxima da *cientometria*, também denominada *cienciometria* (Vanti, 2001; Silva & Bianchi, 2001; Parra *et al.*, 2019), reconhecida na área de Ciência da Informação e de Biblioteconomia como surgida pelo cruzamento entre a análise de documentação científica, a bibliometria, a sociologia da ciência e a história social da ciência, visando medir e avaliar a produção científica em uma determinada área do conhecimento. Para alcançar esse propósito são investigados diversos indicadores quantitativos de produtividade acadêmica (Macias-Chapula, 1998; Spinak, 1998; Vanti, 2011; Parra *et al.*, 2019). Pode, ainda, ampliar as reflexões se associado a uma perspectiva qualitativa, possibilitando abordar a produção social da ciência, de modo a revelar tendências, temáticas, teorias, produtividade, destaques, lacunas, inclusive, sendo capaz de auxiliar na avaliação dos processos formativos, da postura impulsionadora dos pesquisadores-docentes e das instituições de pesquisa, permitindo compreender como se realiza a qualificação universitária, podendo ocorrer em âmbito temporal, temático, espacial, seja em sua abrangência regional, nacional ou internacio-

titative indicators of academic productivity are investigated (Macias-Chapula, 1998; Spinak, 1998; Vanti, 2011; Parra et al., 2019). It can also broaden reflections if associated with a qualitative perspective, making it possible to address the social production of science, in order to reveal trends, themes, theories, productivity, highlights, and gaps. In addition, it is able to assist in the evaluation of training processes, the driving force of researcher-teachers and research institutions, allowing us to understand how university qualification is carried out, which can occur in a temporal, thematic, or spatial context, whether regional, national, or international in scope. The study conducted by Wendt (2024) provides elements for understanding this type of data processing on scientific production based on the theme of paleontology.

It is often observed that initial academic work, such as final course projects, master's theses, doctoral theses, and other documents produced at universities—that is, material that has not yet been published and has only been presented to a select group of people—is not highlighted in databases for scientometric research. This is partly due to an overvaluation of articles published in scientific journals as the main indicator of scientific development. However, this type of contribution is essential for understanding the participation of universities and research institutes and, above all, senior researchers in the training of new scientific researchers, the dissemination of knowledge, the structuring of training centers, and the establishment of collaborative research networks.

Another aspect portrayed in the research was related to academic genealogy, as it allowed the identification of academic training flows, centers of excellence in scientific production, and leading scientists who can generate an academic legacy, aiming at the consolidation of an area of knowledge. (David

nal. O estudo realizado por Wendt (2024), fornece elementos para a compreensão desse tipo de tratamento de dados sobre produção científica a partir do tema paleontologia.

Observa-se, na maioria das vezes, que a produção acadêmica inicial, como os trabalhos de conclusão de curso, as dissertações de mestrado, as teses de doutorado e outros documentos produzidos na universidade, ou melhor, aquele material que ainda não foi publicado e que foi apresentado apenas para um grupo seleto de pessoas, não é destacada nas bases de dados para pesquisas cientométricas, em parte se deve a uma supervalorização da produção de artigos para periódicos científicos, como sendo o principal indicador de desenvolvimento científico. No entanto, esse tipo de contribuição é primordial para entender a participação das universidades e dos institutos de pesquisa e, principalmente, dos pesquisadores seniores na formação de novos investigadores científicos, na disseminação do conhecimento, na estruturação de polos formativos e na constituição de redes colaborativas de pesquisa.

Outro aspecto retratado na pesquisa foi relativo à genealogia acadêmica, por permitir identificar os fluxos formativos acadêmicos, os centros de excelência de produção científica e os principais cientistas que podem gerar uma herança acadêmica, visando a consolidação de uma área de conhecimento. (David & Hayden, 2012; Moreira *et al.*, 2016; 2018; Damasceno *et al.*, 2017; 2019; Castanha, 2019; 2023). Esses autores reforçam que a evolução do conhecimento científico é dependente das interações que ocorrem entre os acadêmicos, em seus vários estágios de maturidade científica, gerando transferência de experiências, conceitos, metodologias e competência para continuidade. Cumpre fazer uma ressalva, pois a maior parte destes estudos visam um enfoque eminen-

& Hayden, 2012; Moreira *et al.*, 2016; 2018; Damasceno *et al.*, 2017; 2019; Castanha, 2019; 2023). *These authors emphasize that the evolution of scientific knowledge depends on the interactions that occur between academics at various stages of scientific maturity, generating the transfer of experiences, concepts, methodologies, and skills for continuity. It is important to note that most of these studies take an eminently quantitative approach to these flows, with the generation of graphs, use of productivity indicators, etc. However, this article prioritizes qualitative aspects, performing only a few exploratory exercises on the subject.*

*In Brazil, the subject has been gaining prominence and has led to the creation of electronic spaces aimed at automatically generating genealogical data based on academic curricula obtained from the Lattes Platform. Among them is the Acácia Platform, developed by a team of researchers from the Federal University of ABC (UFABC) (Damasceno *et al.*, 2017; 2019), which generates various metrics and tables on a researcher's trajectory in the advisor-advisee relationship, in their descendants and ancestors. There is also ScienceTree, developed by researchers in the field of Computer Science at UFPR, which generated algorithms that allow the production of academic genealogical trees. (COTA *et al.*, 2021).*

temente quantitativo desses fluxos, com a geração de grafos, utilização de indicadores de produtividade, etc., porém, no presente artigo priorizou-se os aspectos qualitativos, realizando apenas alguns exercícios exploratórios sobre o assunto.

No Brasil o assunto vem ganhando destaque e motivou a criação de espaços em meios eletrônicos objetivando a geração automática de dados genealógicos baseados nos próprios currículos acadêmicos obtidos na Plataforma Lattes. Entre eles temos a *Plataforma Acácia*, elaborada por equipe de pesquisadores da Universidade Federal do ABC (UFABC) (Damasceno *et al.*, 2017; 2019), gerando diversas métricas e tabelas sobre a trajetória de um pesquisador na relação orientador-orientado, em suas descendências e ascendências. Existe também o *ScienceTree* (Árvore da Ciência), desenvolvida por pesquisadores da área de Ciências da Computação da UFPR, que gerou algoritmos que permitem produzir árvores genealógicas acadêmicas. (COTA *et al.*, 2021).

OBJETIVOS

O objetivo da presente pesquisa foi elaborar e analisar as informações disponibilizadas em um catálogo sobre a produção acadêmica organizada na Base de Dados em Espeleologia e temas afins (BD-ESPELEO), contendo investigações realizadas no Brasil, ou relacionadas ao país, entre 1944-2024. Busca-se demonstrar o papel da universidade para a formação de pessoal qualificado e para a criação de redes colaborativas. E também analisar as tendências temáticas, a participação de gênero, a evolução espacial e temporal e a genealogia acadêmica, reconhecendo a produção social do conhecimento científico sobre cavernas e patrimônio espeleológico ao longo de 80 anos.

OBJECTIVES

The objective of this research was to compile and analyze the information available in a catalog of academic publications organized in the Speleology and Related Topics Database (BD-ESPELEO), containing research conducted in Brazil or related to the country between 1944 and 2024. The aim is to demonstrate the role of the university in training qualified personnel and creating collaborative networks. It also seeks to analyze thematic trends, gender participation, spatial and temporal evolution, and academic genealogy, recognizing the social production of scientific knowledge about caves and speleological heritage over a period of 80 years.

METODOLOGIA

Estruturação do corpus de pesquisa: fontes de dados e características do levantamento

O catálogo de trabalhos acadêmicos (teses, dissertações, monografias, entre outros) para a área de espeleologia e temas correlatos foi produzido a partir da Base de Dados em Espeleologia e Temas Afins (BD-ESPELEO), disponibilizada nos Anais do 28º. e 34º. Congresso Brasileiro de Espeleologia (CBE-SBE) (Figueiredo *et al.*, 2005; Figueiredo *et al.*, 2017). Esse trabalho de catalogação foi complementado por meio da busca de informações nas principais bibliotecas, acessos eletrônicos e repositórios institucionais das universidades brasileiras (SIBi-Dedalus/USP; Pergamum/UFGM; SBU-Acervus/UNICAMP; Athena-C@tedra/UNESP; SISBIN/UFOP; Pergamum/UnB, UFRN, entre outros). Os dados foram ampliados com o uso de buscadores nacionais de ciência e tecnologia, Plataforma Lattes (CV-LATTES/CNPq), BDTD/IBICT, SCIELO, além do Google Acadêmico.

Também foram utilizados materiais apresentados nas referências dos próprios trabalhos acadêmicos ou em periódicos nacionais relacionados à área de espeleologia, tais como *Espeleo-Tema* e *Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas* (SBE) e a *Revista Brasileira de Espeleologia* (CECAV/ICMBio), além de outros relacionados com temas similares. Artigos publicados em Anais de eventos de Espeleologia foram outro tipo de fonte de dados, como o Congresso Brasileiro de Espeleologia (SBE), ou outros com espaço aberto para a temática das cavernas e sítios espeleológicos. Com a ampliação do acesso aos documentos científicos por meios eletrônicos, isso facilitou a expansão do estudo realizado e favoreceu a sua melhor sistematização.

METHODOLOGY

Structure of the research corpus: data sources and survey characteristics

The catalog of academic studies (theses, dissertations, monographs, among others) in the field of speleology was produced from the Speleology and Related Topics Database (BD-ESPELEO), available in the Proceedings of the 28th and 34th Brazilian Speleology Congress (CBE-SBE) (Figueiredo et al., 2005; Figueiredo et al., 2017). This cataloging work was complemented by searching for information in the main libraries, electronic accesses, and institutional repositories of Brazilian universities (SIBi-Dedalus/USP; Pergamum/UFGM; SBU-Acervus/UNICAMP; Athena-C@tedra/UNESP; SISBIN/UFOP; Pergamum/UnB, UFRN, among others). The data were expanded using national science and technology search engines, the Lattes Platform (CV-LATTES/CNPq), BDTD/IBICT, SCIELO, and Google Scholar.

Materials presented in the references of the academic studies themselves or in national journals related to the field of speleology were also used, such as Espeleo-Tema and Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas (SBE) and Revista Brasileira de Espeleologia (CECAV/ICMBio), in addition to others related to similar topics. Articles published in the proceedings of speleology events were another type of data source, such as the Brazilian Speleology Congress, or others with space dedicated to the theme of caves and speleological sites. The increase of access to scientific documents through electronic means, facilitated the expansion of the study and favored its better systematization.

It should be noted that the study is descriptive and qualitative-quantitative in nature, and it is important to highlight that this survey is exploratory in

Deve-se ressaltar que o estudo é de caráter descritivo e quali-quantitativo, sendo necessário destacar que o presente levantamento é de natureza exploratória, representando um recorte que se relaciona com a temporalidade em que a pesquisa foi realizada, devido a intensa dinâmica dos processos produtivos na academia e nos centros de excelência. A abrangência temporal da pesquisa é 1944-2024, totalizando 80 anos de produção científica sobre a espeleologia e as cavernas no Brasil. Essas informações foram comparadas aos resultados obtidos por Figueiredo *et al.* (2017), que abrangia em torno de 70 anos. A listagem de trabalhos acadêmicos preparada seguiu as normas da ABNT, NBR 6023/2018 e consta do Apêndice A, podendo ser acessada por meio eletrônico.

Na busca de dados empreendida foram destacados os trabalhos acadêmicos realizados em universidades ou instituições de pesquisa brasileiras, contudo, incluindo aqueles oriundos de instituições estrangeiras, porém afinados com temáticas relacionadas ao Brasil. Para fins investigativos, optou-se por concentrar a discussão apenas nos trabalhos acadêmicos, como teses e monografias acadêmicas, em seu modo original, incorporadas na listagem de produção científica sobre cavernas e temáticas afins da espeleologia, não acrescentando os desdobramentos dessas pesquisas, como publicações em congressos, periódicos ou livros. Esse caminho foi escolhido devido ao foco voltado para o envolvimento das instituições formadoras visando a qualificação acadêmica e dos responsáveis pelo processo formativo, além disso, esse material complementar estaria fora do escopo da corrente investigação, algo que pode ser intencionado no futuro.

Apesar do foco principal serem os estudos realizados sobre cavernas, entende-se que as investigações espeleológicas e em ambientes subterrâ-

nature, representing a snapshot related to the time frame in which the research was conducted, due to the intense dynamics of production processes in academia and centers of excellence. The temporal scope of the research is 1944-2024, totaling 80 years of scientific production on speleology and caves in Brazil. This information was compared to the results obtained by Figueiredo et al. (2017), which covered around 70 years. The list of academic studies prepared followed the standards of ABNT, NBR 6023/2018 and is included in Appendix A, which can be accessed electronically.

In the search for data, academic research carried out at Brazilian universities or research institutions were highlighted, however, those from foreign institutions with topics related to Brazil were also included. For investigative purposes, the focus of the discussion was only on academic studies, such as theses and academic monographs, in their original form, incorporated into the list of scientific production on caves and related speleology topics, without adding the developments of those researches, such as publications in conferences, journals, or books. This path was chosen due to the focus on the involvement of educational institutions aimed at academic qualification and those responsible for the educational process. Furthermore, this complementary material would be outside the scope of the current investigation, something that may be intended in the future.

Although the main focus is on studies conducted on caves, it is understood that speleological and underground investigations would not be reasonable or advisable if they were disconnected from aspects of their surroundings, the karst landscape, and other related topics. It was decided to conduct a more comprehensive investigation of topics related to speleology, such as geology, biology, geography, tourism, archaeology, anthropology, history, educa-

neos não seriam razoáveis, nem recomendáveis, se acontecessem desconectadas dos aspectos do seu entorno, a paisagem cárstica e outros temas relacionados. Optou-se por realizar uma investigação mais abrangente de temas afins à Espeleologia, tais como: Geologia, Biologia, Geografia, Turismo, Arqueologia, Antropologia, História, Educação, Ciências Ambientais, Química, Direitos, Políticas Públicas, entre outros, desde que a temática das cavernas e do ambiente ao redor de sítios espeleológicos estivessem em destaque.

Busca e classificação dos documentos

Os documentos foram classificados e cadastrados em três grandes áreas agrupadas, a partir da classificação original do CNPq: a) *Ciências da Vida-CV* (Ciências Agrárias, Biológicas e da Saúde); b) *Ciências da Terra-CT* (Ciências da Terra, Exatas e Engenharias); c) *Ciências Humanas-CH* (Ciências Humanas, Ciências Sociais Aplicadas e outras com ênfase em Humanidades). A classificação dos trabalhos acadêmicos não foi feita exclusivamente pela área de concentração da pesquisa, mas pela proximidade ou foco temático principal, verificada por indicadores de palavras-chave ou pela ênfase metodológica utilizada. Alguns trabalhos poderiam ter sido classificados em mais de uma das grandes áreas agrupadas (CV, CT, CH), entretanto, optou-se por classificar pela temática principal. Assim, trabalhos de paleontologia foram geralmente classificados como da área Ciências da Vida (CV), quando o enfoque era mais biológico, exemplo: taxonomia, anatomia, mesmo sendo realizados em um programa de Geociências, enquanto os de arqueologia foram principalmente cadastrados nas Ciências Humanas (CH), por sua relação com a antropologia ou a pré-história, ou nas CV, quando o enfoque era mais biológico, genético.

tion, environmental sciences, chemistry, law, public policy, among others, provided that the theme of caves and the environment surrounding speleological sites were highlighted.

Research and classification of documents

The documents were classified and registered in three broad areas, based on the original CNPq classification: a) Life Sciences-LS (Agricultural, Biological, and Health Sciences); b) Earth Sciences-ES (Earth Sciences, Exact Sciences, and Engineering); c) Humanities-HS (Humanities, Applied Social Sciences, and others with an emphasis on Humanities). The classification of academic papers was not based exclusively on the area of research concentration, but on proximity or main thematic focus, verified by keyword indicators or the methodological emphasis used. Some studies could have been classified in more than one of the major grouped areas (LS, ES, HS), however, it was decided to classify them by main theme. Thus, paleontology studies were generally classified as Life Sciences (LS) when the focus was more biological, e.g., taxonomy, anatomy, even though they were carried out in a Geosciences program, while those in archaeology were mainly classified in the Humanities (HS) due to their relationship with anthropology or prehistory, or in LS when the focus was more biological or genetic. Research aimed at scientific dissemination and sociocultural aspects, carried out in both LS and Earth Sciences (ES), was considered in the HS due to its educational, social, or even tourist focus.

Pesquisas visando a divulgação científica, aspectos socioculturais, realizadas tanto nas CV, quanto nas Ciências da Terra (CT), foram consideradas nas CH, devido ao enfoque educativo, social ou mesmo turístico.

Os seguintes termos ligados ao tema foram utilizados nos buscadores: *caverna, gruta, carste, cárstico, cárstica, carstificação, cavernícola, cavidades naturais, espeleologia, espeleoturismo, abrigo sob rocha, pintura rupestre, lapíás, troglóbios*, entre outros, ou aqueles ligados às paisagens cársticas brasileiras e localidades onde estão concentradas cavernas (sítios espeleológicos), como exemplos: Chapada Diamantina (BA), Iraquara (BA), São Desidério (BA), São Domingos ou Parque Estadual de Terra Ronca-PETeR (GO), Vale do Peruaçu (MG), Lagoa Santa (MG), Pedro Leopoldo (MG), Cordisburgo (MG), Pains (MG), Bonito (MS), Serra da Bodoquena (MS), Chapada dos Guimarães (MT), Serra da Capivara (PI), Vale do Ribeira ou Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira-PETAR (SP), Caverna do Diabo (SP).

Parâmetros de análise e tratamento dos dados

Utilizaram-se como parâmetros de análise dos trabalhos acadêmicos os tópicos abaixo relacionados, porém, em alguns casos foram feitas discussões com variáveis compostas, visando o cruzamento de informações para a melhor valorização e entendimento dos dados.

- a) aspectos históricos.** Apresentando uma visão geral sobre os temas dos 3 agrupamentos de grandes áreas e destacando exemplos dos estudos mais antigos.
- b) distribuição quanto ao gênero.** Separados pelos agrupamentos de áreas do

The following terms related to the topic were used in search engines: cave, grotto, karst, karstic, karstification, caveman, natural cavities, speleology, caving tourism, rock shelter, cave painting, lapiaz, troglobites, among others, or those related to Brazilian karst landscapes and locations where caves (speleological sites), such as: Chapada Diamantina (BA), Iraquara (BA), São Desidério (BA), São Domingos or Terra Ronca State Park-PETeR (GO), Vale do Peruaçu (MG), Lagoa Santa (MG), Pedro Leopoldo (MG), Cordisburgo (MG), Pains (MG), Bonito (MS), Serra da Bodoquena (MS), Chapada dos Guimarães (MT), Serra da Capivara (PI), Vale do Ribeira or Alto Ribeira Tourist State Park-PETAR (SP), Caverna do Diabo (SP).

Data analysis and processing parameters

The topics listed below were used as parameters for analyzing academic papers. However, in some cases, discussions were held using composite variables, with a view to cross-referencing information for better assessment and understanding of the data.

- a) Historical aspects.** Presenting an overview of the themes of the three major areas and highlighting examples from older studies.
- b) Gender distribution.** Separated by knowledge area groupings, with a view to enhancing the participation of researchers.

conhecimento, visando valorizar a participação de pesquisadores/as.

c) distribuição temporal (anual e por décadas). Indicando o desenvolvimento cronológico das pesquisas, a fim de evidenciar a evolução do conhecimento no assunto por áreas (CV, CT, CH).

d) distribuição espacial por estados da federação e regiões geográficas. Indicando os estados e regiões onde foram produzidos, defendidos ou apresentados os trabalhos acadêmicos. Optou-se por usar o recurso do Python para geração de um mapa contendo a densidade de produção por estados federativos.

e) nível acadêmico. Os trabalhos foram classificados em tese de livre-docência (LD), tese para o concurso de professor catedrático ou concurso professor titular (CP), pós-doutorado (PD), doutorado (DR), mestrado (ME), monografias de especialização (ESP) e trabalhos de graduação, classificados em: Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC), relatórios de Iniciação Científica (IC) e Trabalhos de disciplinas ou de outra natureza (TD). Permitindo verificar desdobramentos acadêmicos das pesquisas realizadas e o nível de profundidade alcançado.

f) áreas de conhecimentos e temáticas. Classificados quanto aos agrupamentos de grandes áreas de conhecimento (CV, CT, CH) e também por áreas de concentração das pesquisas.

g) Semântica acadêmica (Palavras-chave). Foi realizado um mapeamento das palavras mais utilizadas, reforçando o

c) Temporal distribution (annual and by decades). Indicating the chronological development of research in order to highlight the evolution of knowledge on the subject by area (LS, ES, HS).

d) Spatial distribution by states of the federation and geographic regions. Indicating the states and regions where the academic studies were produced, defended, or presented. Python was used to generate a map showing the density of production by states.

e) Academic level. The studies were classified as theses for associate professorship (AP), theses for full professorship or tenured professorship (FP), postdoctoral theses (PD), doctoral theses (DR), master's theses (MS), specialization monographs (SPC), and undergraduate theses, classified as: Course Completion Papers (CCP), Scientific Initiation reports (SI), and Coursework or other types of work (TD). This allowed for verification of the academic developments of the research conducted and the level of depth achieved.

f) Areas of knowledge and themes. Classified according to broad areas of knowledge (LS, ES, HS) and also by areas of research concentration.

g) Academic semantics (keywords). The most frequently used words were mapped, reinforcing the semantic universe of research produced on speleology and related topics. A word cloud was created, providing an overview.

h) Academic institutions (identifying the university or institution where the re-

universo semântico das pesquisas produzidas sobre espeleologia e temas correlatos. Elaborou-se uma nuvem de palavras, obtendo um panorama geral.

h) instituições acadêmicas (identificando a universidade ou instituição em que foi desenvolvida a pesquisa, além de destacar o papel de criação de pólos regionais e núcleos investigativos).

i) Genealogia acadêmica e a participação de pesquisadores/orientadores. Mapeamento dos pesquisadores que possuem um papel histórico para evolução desse campo do conhecimento, destacando os que mais têm contribuído diretamente para a Espeleologia, por sua fecundidade acadêmica e capacidade de geração de descendência científica, além de aspectos da genealogia acadêmica. Realizou-se alguns exercícios utilizando plataformas genealógicas, como o *ScienceTree* (Árvore da Ciência), Plataforma Acácia, além de uma nuvem de inter-relação entre orientadores-orientados.

O material obtido foi analisado segundo a frequência simples e frequência relativa a partir de planilhas e gráficos gerados no programa Excel. O Banco de Dados envolveu o período entre 1944 e 2024, fornecendo um *corpus* de pesquisa contendo 1.131 trabalhos acadêmicos.

Os dados foram dispostos em uma planilha no Google Planilhas. Uma vez organizados, ocorreu um processo de higienização dos dados, que levou em conta o estabelecimento de padrões para preenchimento das informações e completude da maior quantidade de células possível. As colunas que a base de dados contemplou são as seguintes: Categoria do trabalho; Autor; Entrada original do

search was conducted, as well as highlighting the role of creating regional hubs and research centers).

i) Academic genealogy and the participation of researchers/advisors. *Mapping of researchers who have played a historical role in the evolution of this field of knowledge, highlighting those who have contributed most directly to speleology, due to their academic productivity and ability to generate scientific descendants, in addition to aspects of academic genealogy. Some exercises were carried out using genealogical platforms, such as ScienceTree, Plataforma Acácia, and a cloud of interrelationships between advisors and advisees.*

The material obtained was analyzed according to simple frequency and relative frequency using spreadsheets and graphs generated in Excel. The database covered the period between 1944 and 2024, providing a research corpus containing 1,131 academic papers.

The data was arranged in a spreadsheet in Google Sheets. Once organized, a data cleansing process took place, which took into account the establishment of standards for filling in the information and completing as many cells as possible. The columns included in the database are as follows: Work category; Author; Original document entry (for comparison between lists); Gender (only the first author, in the case of collective work, identified by name); Work title; Year of work; Decade of work; Type of work; Level of work; Course (specification); Course (broad field); Name of institution; Acronym of institution; Type of institution; Brazilian state of institution; Brazilian region of institution; Advisor; Co-advisor; and a complementary field for Comments.

documento (para fins de comparação entre as listas); Gênero (apenas o primeiro autor, quando em trabalho coletivo, identificado a partir do nome); Título do trabalho; Ano do trabalho; Década do trabalho; Tipo de trabalho; Nível do trabalho; Curso (em especificação); Curso (em área ampliada); Nome da instituição; Sigla da instituição; Tipo de instituição; Estado do Brasil da instituição; Região do Brasil da instituição; Orientação; Coorientação; e um campo complementar para Observações.

O processo de trabalho com os dados na planilha foi desenvolvido entre outubro e dezembro de 2024, a partir de uma base criada em 1997 e alimentada ao longo do tempo. Os dados foram considerados integralizados em 31 de dezembro de 2024 e, a partir disso, foram geradas as respectivas visualizações. A maior parte das visualizações foi gerada com os recursos próprios do Google Planilhas, por meio da geração de gráficos simples, levando em conta a frequência de distribuição dos dados/informações; e gráficos compostos, gerados por meio de tabelas dinâmicas. Em alguns casos foram levadas em consideração mais de uma variável ao mesmo tempo.

A única visualização de gráfico que não foi gerada com auxílio do Google Planilhas foi a de distribuição dos trabalhos por Unidade da Federação do Brasil (em forma de mapa), processo que foi executado por meio de script em *Python* no Google Colab.

As redes de relação entre os orientados e os orientadores foi gerada com o auxílio do software *Gephi*, específico para a análise de redes de relação entre atores em um determinado conjunto de dados.

As palavras-chave foram geradas a partir dos títulos. Primeiramente foram removidas as *stopwords*, são palavras que não adicionam valor semântico importante à análise, como preposi-

The process of working with the data in the spreadsheet was developed between October and December 2024, based on a database created in 1997 and updated over time. The data was considered complete on December 31, 2024, and the respective visualizations were generated from that point on. Most of the visualizations were generated using Google Sheets' own resources, through the generation of simple graphs, taking into account the frequency of distribution of data/information; and composite graphs, generated using pivot tables. In some cases, more than one variable was taken into account at the same time.

The only graph visualization that was not generated with the help of Google Sheets was the distribution of studies by Brazilian state (in map form), a process that was performed using a Python script in Google Colab.

The networks of relationships between supervisors and supervisees were generated using Gephi software, which is specifically designed for analyzing networks of relationships between actors in a given data set.

The keywords were generated from the titles. First, stop words were removed. These are words that do not add significant semantic value to the analysis, such as prepositions, articles, conjunctions, and pronouns. Examples include "the," "a," "of," "and," "that," "one," etc. Next, non-alphabetic characters, such as punctuation (commas, periods, exclamation points, etc.), which generally have no value for content analysis, were removed. We chose not to perform lowercasing (converting text to lowercase to ensure that words with differences in uppercase and lowercase letters are understood in the same way), lemmatization (reducing words to their base forms - root or stem), and removal of numbers. From there, the data was separated into columns in

ções, artigos, conjunções e pronomes. Exemplos incluem "o", "a", "de", "e", "que", "um", etc. Na sequência foram removidos os caracteres não alfabéticos, como pontuação (vírgulas, pontos, exclamações, etc.), que geralmente não tem valor para a análise de conteúdo. Optou-se por não realizar o *lowercasing* (conversão do texto para minúsculas para garantir que palavras com diferenças de maiúsculas e minúsculas sejam entendidas da mesma forma), a lematização (redução das palavras às suas formas base - raiz ou leme) e a remoção dos números. A partir disso, os dados foram separados em colunas na planilha para o estabelecimento das relações entre as palavras e a geração da respectiva rede de correlações, e também foram ordenadas em forma de lista para a geração da nuvem de palavras-chave.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aspectos históricos da pesquisa em espeleologia

A tese de doutorado de Crodowaldo Pavan (1944), sob a orientação do Prof. Dr. André Dreyfus, realizada no Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo (USP), é considerada pioneira para a temática espeleológica. O estudo está relacionado com bagres-cegos das cavernas do Alto Vale do Ribeira (SP), envolvendo questões relativas à evolução e fisiologia animal, incluindo estudos sobre genética, assunto que seria a base para a consolidação desse respeitado pesquisador científico no meio acadêmico. Por isso essa pesquisa é também considerada a primeira em genética evolutiva animal.

Pavan foi prestigiado como professor emérito da USP e da UNICAMP, também foi presidente do CNPq, Conselheiro da FAPESP, presidente da

the spreadsheet to establish relationships between words and generate the respective correlation network, and was also sorted into a list to generate the keyword cloud.

RESULTS AND DISCUSSION

Historical aspects of speleological research

Crodowaldo Pavan's (1944) doctoral thesis, supervised by Prof. Dr. André Dreyfus and carried out at the Institute of Biosciences of the University of São Paulo (USP), is considered pioneering in the field of speleology. The study is related to blind catfish in the caves of the Upper Ribeira Valley (SP), involving issues related to animal evolution and physiology, including studies on genetics, a subject that would be the basis for the consolidation of this respected scientific researcher in the academic world. For this reason, this research is also considered the first in animal evolutionary genetics.

Pavan was honored as professor emeritus at USP and UNICAMP, and was also president of CNPq, advisor to FAPESP, president of the Brazilian Society for the Advancement of Science (SBPC), member of the

Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC), membro da Academia Brasileira de Ciências (ABC), entre outras distinções e participações. A versão do estudo sobre os peixes de cavernas é mais conhecida por uma publicação feita em um Boletim de Biologia Geral da FFCL-USP de 1945, assim corrigimos um histórico erro de informação, sobre a data oficial da sua tese (Pavan, 1944; 1945), conforme está em seu Curriculum *Lattes* e artigos publicados em sua memória (Pavan & Barros, 2009; Perondini, 2010, Silveira, 2010). (Figura 1).

Brazilian Academy of Sciences (ABC), among other distinctions and participations. The version of the study on cave fish is best known for a publication in a 1945 FFCL-USP General Biology Bulletin, so we have corrected a historical error regarding the official date of his thesis (Pavan, 1944; 1945), as stated in his *Lattes Curriculum* and articles published in his memory (Pavan & Barros, 2009; Perondini, 2010, Silveira, 2010). (Figure 1).

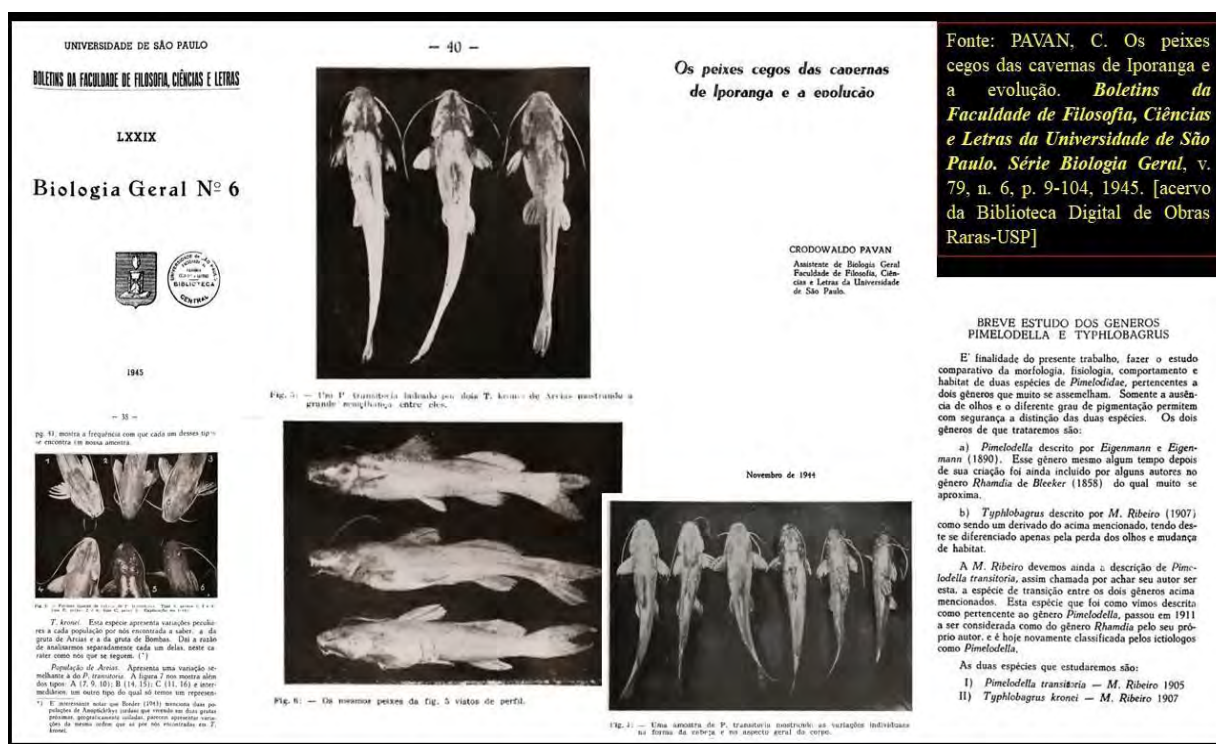


Figura 1 - Partes da tese de Crodowaldo Pavan (1944) publicada em Boletim de 1945. Fonte: Fotomontagem de Luiz Afonso V. Figueiredo a partir de versão da Biblioteca Digital de Obras Raras-USP.

Figure 1 - Parts of Crodowaldo Pavan's thesis (1944) published in the 1945 Bulletin. Source: Photomontage by Luiz Afonso V. Figueiredo based on a version from the USP Digital Library of Rare Studies.

Na paleontologia salienta-se a tese de livre-docência de Fausto Luiz de Souza-Cunha (1960), sobre um gênero extinto de cavalo da América do Sul encontrado na Lapa Mortuária em Lagoa Santa (MG), realizado a partir de material conservado no Museu Nacional do Rio de Janeiro. Em seguida, os trabalhos de mestrado de Cástor Car-

In paleontology, is highlighted the thesis of Fausto Luiz de Souza-Cunha (1960) on an extinct genus of South American horse found in Lapa Mortuária in Lagoa Santa (MG), based on material preserved in the National Museum of Rio de Janeiro. Next, the master's thesis by Cástor Cartelle-Guerra (1978), investigating the bones of a giant sloth found in a

telle-Guerra (1978), investigando ossada de uma preguiça-gigante encontrada em uma caverna do Norte da Bahia e o estudo sobre porcos selvagens do Pleistoceno encontrados em cavernas de Minas Gerais, realizado por José Silvio Fonseca (1979). Ambas pesquisas foram orientadas pelo Dr. Carlos de Paula-Couto, prestigiado paleontólogo brasileiro, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Cartelle continua contribuindo com estudos acerca de grandes mamíferos do Pleistoceno até hoje, com destaque para os achados em cavidades naturais. Aposentado, o autor é atualmente o curador da Coleção de Paleontologia do Museu da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-Minas) de Ciências Naturais.

As Ciências da Vida tiveram contribuições diversas à essa história do conhecimento científico sobre as cavernas. Na área de saúde foi realizado o mestrado de Manoel Paulino de Souza (1979) sobre criadouros de insetos flebotomíneos na gruta da Lapinha no município de Lagoa Santa (MG) pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Outro aporte da área foi o mestrado de Eleonora Trajano (1981), pelo Instituto de Biociências da USP, sobre distribuição de morcegos cavernícolas no Vale do Ribeira (SP). Essa autora foi pioneira nos estudos de bioespeleologia, ou biologia subterrânea, e contribuiu sobremaneira para a formação de pesquisadores sobre o assunto.

Com relação às Ciências da Terra destacam-se importantes documentos acadêmicos de caráter histórico. Tais como os relacionados com geomorfologia de Alisson Pereira Guimarães (1953) sobre a paisagem física do Rio das Velhas em Minas Gerais e o estudo realizado por Elzio Fonseca Dolabela (1958), reforçando o conceito de regiões cársticas, ambos estudos foram produzidos como tese para a cátedra de Geografia Física da

cave in northern Bahia, and the study on wild pigs from the Pleistocene found in caves in Minas Gerais, conducted by José Silvio Fonseca (1979). Dr. Carlos de Paula-Couto, a renowned Brazilian paleontologist at the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), supervised both studies. Cartelle continues to contribute to studies on large Pleistocene mammals to this day, with an emphasis on findings in natural caves. Now retired, the author is currently the curator of the Paleontology Collection at the Museum of Natural Sciences of the Pontifical Catholic University of Minas Gerais (PUC-Minas).

Life sciences have made various contributions to the history of caves scientific knowledge. In the field of health, Manoel Paulino de Souza (1979) completed a master's degree at the Federal University of Minas Gerais (UFMG) on breeding sites for sand flies in the Lapinha cave in the municipality of Lagoa Santa (MG). Another contribution in this area was Eleonora Trajano's master's thesis (1981), from the Institute of Biosciences at USP, on the distribution of cave-dwelling bats in the Ribeira Valley (SP). This author was a pioneer in the study of biospeleology, or underground biology, and contributed greatly to the training of researchers on the subject.

With regard to Earth Sciences, important academic documents of a historical nature stand out. These include those related to geomorphology by Alisson Pereira Guimarães (1953) on the physical landscape of the Rio das Velhas in Minas Gerais and the study conducted by Elzio Fonseca Dolabela (1958), reinforcing the concept of karst regions. Both studies were produced as theses for the chair of Physical Geography at the former University of Minas Gerais, later transformed into the Federal University of Minas Gerais (UFMG). Also in Minas Gerais, Heinz Charles Kohler should be mentioned, since the 1970s he has contributed to research and training of researchers in karst geomorphology and karstol-

antiga Universidade de Minas Gerais, posteriormente transformada na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Ainda em Minas Gerais, deve-se realçar Heinz Charles Kohler, que desde os anos 1970 contribuiu para a pesquisa e formação de pesquisadores em geomorfologia cárstica e carstologia na UFMG e posteriormente na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-Minas) (Kohler, 1989; Travassos, 2010).

Um conjunto de estudos geológicos em áreas cársticas foi produzido nos anos 1970 na Universidade Federal da Bahia (UFBA), associados ao calcário Bambuí, realizados em Irecê e Morro do Chapéu (BA). Essas pesquisas salientaram a questão das águas subterrâneas, indicadores químicos, uso de traçadores, reconhecimento geofísico e estudos sobre solos e pedogênese regional (Santos, 1976; Cabral, 1978; Gomes, 1978; Marinho, 1978; Nou, 1978; Siqueira, 1978).

A Universidade de São Paulo (USP) também colaborou para a construção dessa história de pesquisa em Ciências da Terra. Destacam-se os trabalhos de doutorado de Aldebani Braz da Silva (1984), sobre aquíferos cársticos do norte de Minas e de Ari Medeiros Guerra (1986) sobre processos de carstificação e hidrogeologia do norte da Bahia. É importante mencionar as contribuições de Ivo Karmann (1981, 1982, 1987, 1994, 2016), que desde a graduação realizou investigações em geoespeleologia e geologia de terrenos cársticos, entre outros temas afins, formando diversos pesquisadores que estudam cavernas no Brasil, desde o final dos anos 1980.

Com relação ao enfoque das Humanidades e suas interfaces interdisciplinares, destacam-se os trabalhos da área de Arqueologia. Nesse contexto é necessário ressaltar as atividades realizadas pela missão franco-brasileira e o estímulo

ogy at UFMG and later at the Pontifical Catholic University of Minas Gerais (PUC-Minas) (Kohler, 1989; Travassos, 2010).

A series of geological studies in karst areas was produced in the 1970s at the Federal University of Bahia (UFBA), associated with Bambuí limestone, carried out in Irecê and Morro do Chapéu (BA). This research highlighted the issue of groundwater, chemical indicators, the use of tracers, geophysical reconnaissance, and studies on soils and regional pedogenesis (Santos, 1976; Cabral, 1978; Gomes, 1978; Marinho, 1978; Nou, 1978; Siqueira, 1978).

The University of São Paulo (USP) also contributed to the development of Earth Sciences research. Noteworthy are the doctoral theses of Aldebani Braz da Silva (1984) on karst aquifers in northern Minas Gerais and Ari Medeiros Guerra (1986) on karstification processes and hydrogeology in northern Bahia. It is important to mention the contributions of Ivo Karmann (1981, 1982, 1987, 1994, 2016), who, since graduating, has conducted research in geospeleology and karst geology, among other related topics, training several researchers who have been studying caves in Brazil since the late 1980s.

With regard to the focus on the humanities and their interdisciplinary interfaces, the work in the field of archaeology stands out. In this context, it is necessary to highlight the activities carried out by the Franco-Brazilian mission and the encouragement for some Brazilian women to obtain degrees in France, which was fundamental for the expansion of research in Brazil, with emphasis on the contributions of Dr. Annette Laming-Emperaire and the guidance of Dr. André Leroi-Gourhan from the Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne. As a result, a generation of researchers was formed between 1960 and 1970. Among the examples of studies conducted during this period is the doctoral thesis by Maria da

para que algumas brasileiras fossem se titular na França, isso foi fundamental para a ampliação das pesquisas no Brasil, com destaque para as contribuições da Dra. Annette Laming-Emperaire e orientação de estudos do Dr. André Leroi-Gourhan da Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne. Com isso, uma geração de investigadores foi formada entre os anos 1960-1970. Entre os exemplos de estudos realizados nesse período, menciona-se a tese de doutorado de Maria da Conceição Beltrão (1969), sobre a pré-história do Rio de Janeiro, que foi uma ampla pesquisa estadual, destacando diversos abrigos sob rocha e grutas do território carioca, por isso foi posteriormente publicada em livro (Beltrão, 1978).

Seguindo por esse caminho aberto, duas pesquisadoras devem ser mencionadas, Niède Guidon (1975) e Silvia Maranca (1979), ambas estudando pinturas rupestres de São Raimundo Nonato no Piauí e contribuindo com a formação das novas gerações de arqueólogos. Niède Guidon merece um destaque ainda maior por dedicar toda sua vida para a pesquisa na Serra da Capivara, gerando informações fundamentais para os estudos em arqueologia e pela criação da Fundação Museu do Homem Americano (FUMDHAM) e do Parque Nacional da Serra da Capivara, com vistas à proteção e divulgação daquela marcante área no sertão nordestino. (Duarte, 2015).

Outras contribuições para a qualificação acadêmica em arqueologia, com destaque para estudos em cavidades naturais subterrâneas, são decorrentes dos trabalhos do Prof. Dr. André Prous (UFMG), também oriundo da missão franco-brasileira, sobre arqueologia pré-histórica e arte rupestre, do Prof. Dr. Ulpiano Toledo Bezerra de Menezes, na área de antropologia social e arqueologia (FFLCH-USP) e do Prof. Dr. Walter Alves Neves, na área de antropologia biológica e evolu-

Conceição Beltrão (1969) on the prehistory of Rio de Janeiro, which was a comprehensive state-wide study highlighting various rock shelters and caves in the Rio de Janeiro territory, and was later published as a book (Beltrão, 1978).

Following this path, two researchers deserve special mention: Niède Guidon (1975) and Silvia Maranca (1979) both of whom studied the cave paintings of São Raimundo Nonato in Piauí and contributed to the training of new generations of archaeologists. Niède Guidon deserves even greater recognition for dedicating her entire life to research in Serra da Capivara, generating fundamental information for archaeological studies and for creating the American Man Museum Foundation (FUMDHAM) and the Serra da Capivara National Park, with the aim of protecting and promoting this remarkable area in the northeastern hinterland. (Duarte, 2015).

Other contributions to academic qualifications in archaeology, with emphasis on studies of natural underground caves, stem from the work of Prof. Dr. André Prous (UFMG), also from the Franco-Brazilian mission, on prehistoric archaeology and rock art. In addition, Prof. Dr. Ulpiano Toledo Bezerra de Menezes, in the field of social anthropology and archaeology (FFLCH-USP), and Prof. Dr. Walter Alves Neves, in the field of biological anthropology and human evolution at the Institute of Biosciences at USP, creating new generations of researchers.

Among studies in the field of tourism, planning, and environmental management on the relationship with communities surrounding karst areas and environmental education, the study by Clayton Ferreira Lino (1976) stands out. Although it was an undergraduate thesis, it was an in-depth investigation in two volumes, in which he proposed a cave tour itinerary entitled Vale do Ribeira: Alternativa Turismo (Ribeira Valley: Alternative Tourism). Later,

ção humana pelo Instituto de Biociências da USP, criando novas gerações de pesquisadores.

Entre os estudos da área de turismo, planejamento e gestão ambiental, sobre a relação com comunidades do entorno de áreas cársticas, educação ambiental, destaca-se o estudo de Clayton Ferreira Lino (1976), que apesar de ser um trabalho de graduação, foi uma investigação aprofundada, em dois volumes, no qual propunha o roteiro das cavernas, intitulado *Vale do Ribeira: Alternativa Turismo*. Posteriormente, o próprio Lino (1978) realizou um estudo de especialização sobre planejamento urbano e proteção do patrimônio cultural, também no Alto Ribeira (SP), reforçando a relação entre patrimônio natural e cultural, mediados pelo turismo. Lino foi fundador e diretor da Fundação SOS Mata Atlântica e responsável pela implementação da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, tendo sido presidente do seu Conselho Nacional por vários anos.

As produções acadêmicas de pós-graduação sobre esses temas só foram consolidadas a partir do anos 2000 (Camargo, 2000; Figueiredo, 2000; Marra, 2000; Silveira, 2001; Bonduki, 2002; Lobo, 2004; 2007, 2011). Heros Lobo é considerado um dos autores que tem mais contribuído para o desenvolvimento de estudos sobre a temática do turismo em cavernas no Brasil, tendo sido responsável pela criação da Seção de Espeleoturismo (SeTur/SBE). (Figura 2).

Lino himself (1978) conducted a specialization study on urban planning and cultural heritage protection in Alto Ribeira (SP), reinforcing the relationship between natural and cultural heritage, mediated by tourism. Lino was the founder and director of the SOS Mata Atlântica Foundation and responsible for the implementation of the Atlantic Forest Biosphere Reserve, having been president of its National Council for several years.

Postgraduate academic research on these topics only began to consolidate in the 2000s (Camargo, 2000; Figueiredo, 2000; Marra, 2000; Silveira, 2001; Bonduki, 2002; Lobo, 2004; 2007, 2011). Heros Lobo is considered one of the authors who has contributed most to the development of studies on the theme of cave tourism in Brazil, having been responsible for the creation of the Speleotourism Section (SeTur/SBE). (Figure 2).



Figura 2 - O pesquisador-espeleólogo em monitoramento climático no PETAR (Heros Lobo e colaboradores). Fonte: Luiz Afonso V. Figueiredo (2010)

Figure 2 - The researcher-speleologist monitoring climate change at PETAR (Heros Lobo and colleagues). Source: Luiz Afonso V. Figueiredo (2010)

Sem desconsiderar o significativo conjunto de pessoas atuantes em espeleologia e na temática das cavernas, cumpre destacar a participação de ativos espeleólogos brasileiros, Clayton Lino, Eleonora Trajano e Ivo Karmann, que iniciaram suas atividades durante os anos 1970 em cavernas pela mesma entidade, Centro Excursionista Universitário (CEU), ligado à Universidade de São Paulo (USP). Cada um a seu modo, continuam trazendo até hoje, durante mais de 50 anos de atividades ininterruptas, importantes contribuições para a proteção e o conhecimento sobre o patrimônio espeleológico brasileiro, destacando o Vale do Ribeira em São Paulo, e também em âmbito nacional e internacional.

Perfil das pesquisas quanto ao gênero

As questões de gênero são fundamentais para serem compreendidas e valorizadas, visando a construção de uma sociedade mais justa e igualitária. Não é diferente essa problemática no campo da ciência, onde a postura machista perdura até os dias atuais, infelizmente. Esse processo é uma

Without disregarding the significant group of people active in speleology and cave-related topics, it is worth highlighting the participation of active Brazilian speleologists Clayton Lino, Eleonora Trajano, and Ivo Karmann, who began their caves activities in the 1970s through the same entity, the University Excursionist Center (CEU), linked to the University of São Paulo (USP). Each in their own way, they continue to make important contributions to the protection and knowledge of Brazilian speleological heritage, with emphasis in the Ribeira Valley in São Paulo but also nationally and internationally for over 50 years of uninterrupted activity.

Research profile regarding gender

It is fundamental to understand and value gender issues in order to build a more just and equal society. This is no different in the field of science, where sexist attitudes unfortunately persist to this day. This process is a relentless pursuit, and the struggle and organization of women to gain more spaces

busca incessante e pode se ver nitidamente a luta e organização das mulheres para conquistarem seus espaços com mais igualdade. No entanto, deve-se ressaltar os esforços masculinos daqueles que também acreditam nessa justa igualdade.

Na espeleologia, tema da pesquisa, isso é igualmente observado, principalmente para as atividades que implicam em horas de trabalho de campo em áreas de difícil acesso, muitas vezes inóspitas, além das cavernas propriamente ditas que possuem suas próprias dificuldades. Aqui o conhecimento científico caminha junto com as habilidades técnicas de progressão e exploração, além do condicionamento físico necessário para aguentar horas em rios frios, escaladas, rastejamentos, áreas lamacentas ou com muito pó, condições bastante adversas para o trabalho, tornando-o muitas vezes penoso. Apesar do preconceito predominar muitas vezes, na verdade isso não depende de gênero, porque é uma dificuldade que todos nós iremos passar e será necessária a superação. Quando acoplado à realização dos estudos científicos, o grau de dificuldade pode se ampliar.

No estudo foram identificados um total de 495 pesquisadores que realizaram os 1.131 trabalhos acadêmicos. Portanto, há que levar em consideração que diversos trabalhos podem ter sido realizados pela mesma pessoa. Na distribuição do total geral dos trabalhos acadêmicos em espeleologia a distribuição está praticamente em equilíbrio entre gêneros, com 53,1 % para homens e 45,5 % para mulheres. Deve-se ressaltar que havia documentos em que não foram possíveis encontrar essa informação e alguns que foram realizados por mais de uma pessoa. (Gráfico 1).

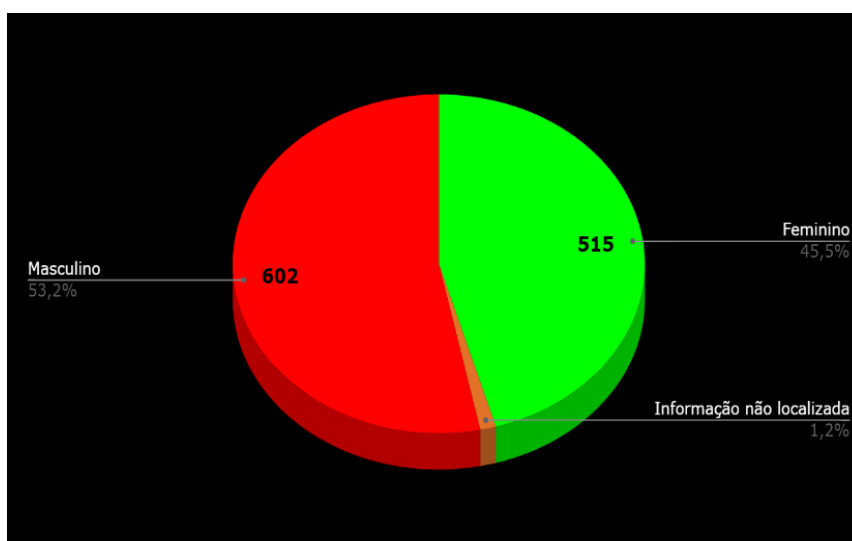
that are equal is clearly visible. However, the efforts of men who also believe in this fair equality should be noted.

In speleology, the subject of this research, this is equally observed, especially for activities that involve hours of fieldwork in areas of difficult access, often inhospitable, besides the caves themselves, which have their own difficulties. Here, scientific knowledge goes hand in hand with technical skills of exploration, in addition to the physical conditioning necessary to endure hours in cold rivers, climbing, crawling, muddy or dusty areas, conditions that are quite adverse for work, often making it painful. Although prejudice often prevails, in reality this does not depend on gender, it is a difficulty that everyone faces and needs to overcome. When coupled with scientific studies, the degree of difficulty can increase.

The study identified a total of 495 researchers who produced 1,131 academic papers. Nevertheless, it should be noted that several papers may have been written by the same person. Considering the total number of academic papers in speleology, the distribution is practically balanced between genders, with 53.1% for men and 45.5% for women. It should be noted that there were documents in which it was not possible to find this information and some that were carried out by more than one person. (Graph 1).

Gráfico 1 - Distribuição por gênero em relação às pesquisas realizadas (Total Geral, n=1.131). Fonte: Autoria própria

Graph 1 - Gender Distribution in relation to the conducted surveys (Total, n=1,131). Source: Own work

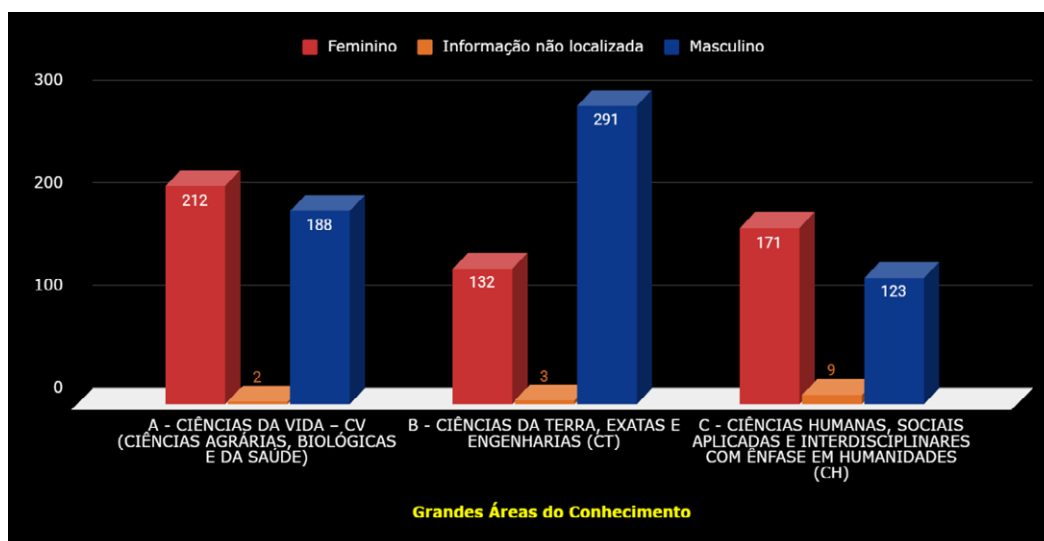


Com relação às grandes áreas agrupadas, observa-se uma evidente diferença na distribuição de gênero para os trabalhos analisados. Sendo que nas Ciências da Vida (CV) e nas Ciências Humanas havia predominância do gênero feminino em mais da metade dos trabalhos, enquanto que nas Ciências da Terra (CT), ocorria o inverso e em maior intensidade. (Gráfico 2). Esse é um fato que lamentavelmente reflete a história da própria procura pelos cursos das áreas mencionadas, incluindo as dificuldades impostas para o acesso ao gênero feminino, relacionadas com preconceitos sociais, o que demonstra que ainda há um enorme obstáculo a ser vencido. Por outro lado, verifica-se que estão ocorrendo avanços, pela visão do total de trabalhos produzidos e a performance das mulheres. Sem dúvida um assunto que merece nossa total atenção, evitando a discriminação e incentivando as espeleólogas e pesquisadoras de cavernas brasileiras a seguirem em frente em suas contribuições.

With regard to the major grouped areas, there is a clear difference in gender distribution for the studies analyzed. In Life Sciences (LS) and Humanities, women predominated in more than half of the researches while in Earth Sciences (ES), the opposite was true and to a greater extent. (Graph 2). This is a fact that unfortunately reflects the history of the demand for courses in the aforementioned areas, including the difficulties imposed on women's access, related to social prejudices, which shows that there is still a huge obstacle to overcome. On the other hand, progress is being made, as can be seen from the total number of studies produced and the performance of women. Undoubtedly, this subject deserves our full attention, avoiding discrimination and encouraging Brazilian female speleologists and cave researchers to continue their contributions.

Gráfico 2 - Distribuição das pesquisas por gênero, grandes áreas agrupadas (Total Geral, n=1.131). Fonte: Autoria própria.

Graph 2 - Distribution of surveys by gender and major areas grouped together (Grand Total, n=1,131). Source: Own work.



Distribuição temporal dos trabalhos acadêmicos (anual e por décadas)

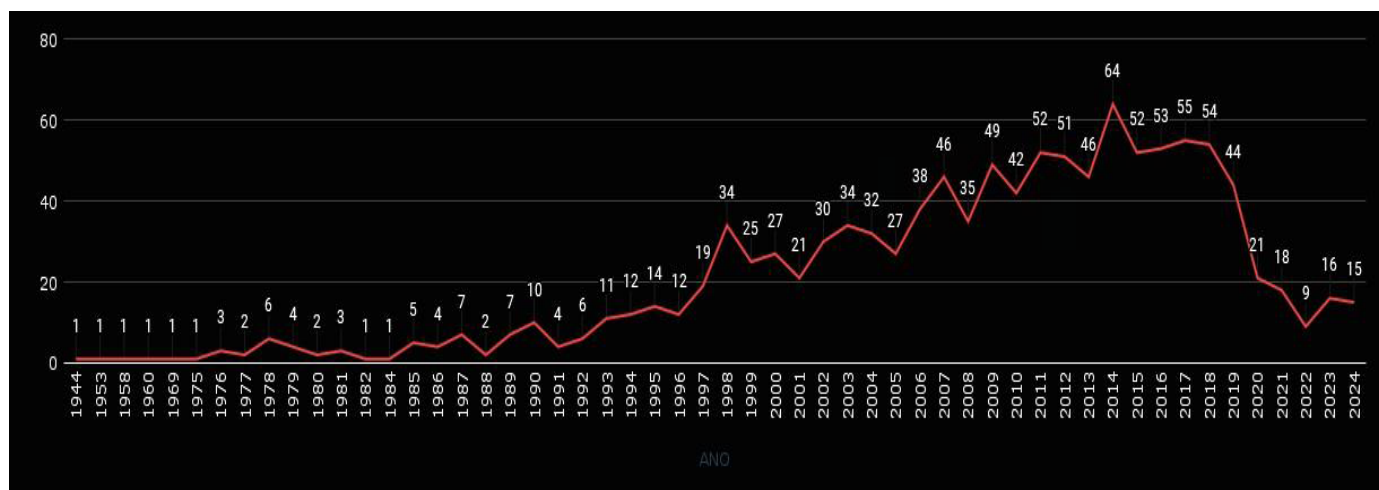
Temporal distribution of academic studies (annual and by decade)

A distribuição temporal da produção acadêmica retrata uma inconfundível evolução dos trabalhos sobre cavernas e paisagem cárstica ao longo das décadas. (Gráfico 3). Sendo que no período inicial, entre 1944 até o ano de 1990, a produção anual foi baixa, com números variando entre 0 e 10 trabalhos por ano, comportamento que reflete o estágio inicial e o surgimento da pesquisa acadêmica na área, além de haver menos pesquisadores envolvidos e menor atenção ao tema. O aumento começa na década de 1990, com um crescimento constante até atingir um pico em 2014, quando foram produzidos 64 trabalhos acadêmicos apenas nesse ano.

The temporal distribution of academic production shows an unmistakable evolution in studies on caves and karst landscapes over the decades. (Graph 3). In the initial period, between 1944 and 1990, annual production was low, with numbers varying between 0 and 10 studies per year, reflecting the early stages and emergence of academic research in the area, as well as fewer researchers involved and less attention to the topic. The increase began in the 1990s, with steady growth until it peaked in 2014, when 64 academic papers were produced in that year alone.

Gráfico 3 - Produção anual em espeleologia, Total Geral dos trabalhos acadêmicos (1994-2024) (n=1.131). Fonte: Autoria própria.

Graph 3 - Annual production in speleology, Total number of academic papers (1994-2024) (n=1,131). Source: Own work.



Esse crescimento pode ser atribuído ao aumento do interesse científico, social e turístico pelas cavernas, além da criação de grupos de espeleologia, maior disponibilidade de programas de pós-graduação e financiamento para pesquisas, ao mesmo tempo que as preocupações ambientais ganhavam destaque em âmbito nacional a partir dos anos 1990, impulsionados pela *Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento*, no Rio de Janeiro, a Rio-92, que em conjunto ajudaram a fortalecer a importância de estudar e proteger as cavernas e os ecossistemas associados. O impacto positivo da legislação ambiental mais protecionista, a consolidação de centros de pesquisa e surgimento de órgãos governamentais relacionados com o tema também contribuíram para essa expansão na produção de trabalhos acadêmicos e realização das atividades formativas.

Após 2014, o Gráfico 3 mostra uma pequena queda na produção, porém, com equilíbrio na quantidade de trabalhos produzidos na ordem de 53 trabalhos por ano até 2018. A partir de 2019, depois de terem sido elaborados 44 trabalhos, a produtividade entre em queda abrupta até 2022, com apenas nove trabalhos realizados naquele

This growth can be attributed to increased scientific, social, and tourist interest in caves, as well as the creation of caving groups, greater availability of graduate programs and research funding. In addition, environmental concerns gained prominence nationally in the 1990s, driven by the United Nations Conference on Environment and Development in Rio de Janeiro, Rio-92, which together helped to strengthen the importance of studying and protecting caves and associated ecosystems. The positive impact of more protectionist environmental legislation, the consolidation of research centers, and the emergence of government agencies related to the topic also contributed to this expansion in the production of academic work and the implementation of training activities.

After 2014, Graph 3 shows a slight decline in production, but with a steady output of around 53 papers per year until 2018. From 2019 onwards, after 44 papers had been produced, productivity fell sharply until 2022, with only nine studies produced in that year, resuming modest growth in 2023, which demonstrates a recovery in scientific production. It is understood that this decline can be explained by factors such as cuts in academic funding, reduced opportunities in research programs, or shifts in aca-

ano, retomando discreto crescimento em 2023, demonstrando recuperação da produção científica. Entende-se que essa queda pode ser explicada por fatores como cortes em financiamentos acadêmicos, redução de oportunidades em programas de pesquisa ou mudanças no foco de interesse acadêmico para outras áreas. Contudo, eventos globais, como a pandemia de COVID-19, é muito provável que tenha interrompido ou dificultado os projetos de pesquisa, principalmente os de campo, afetando diretamente a produção acadêmica no período recente.

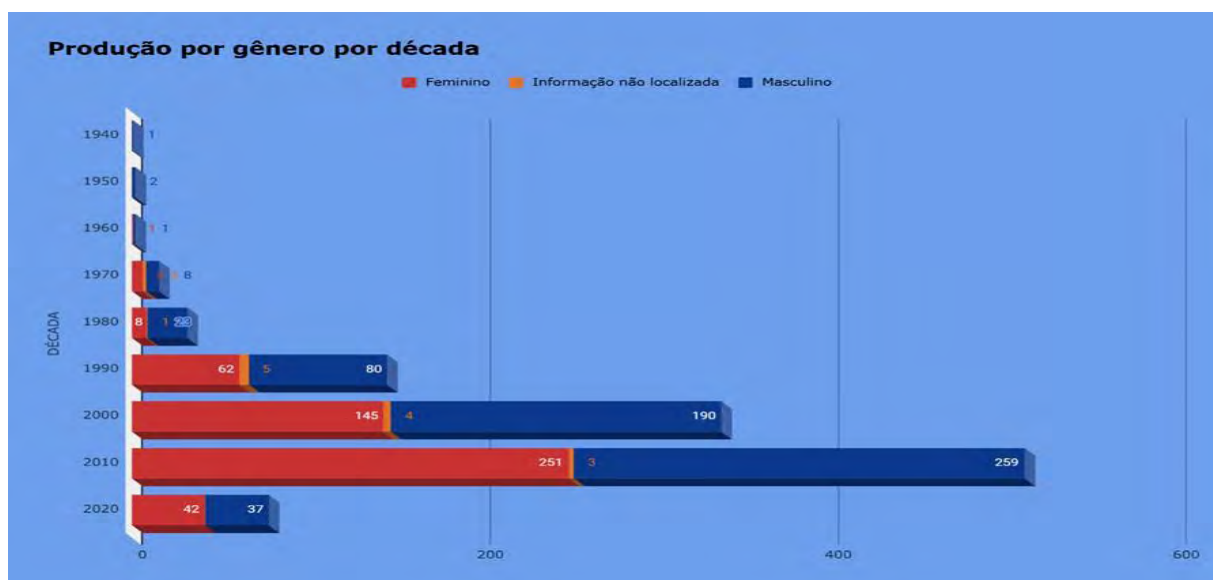
A fim de conectar com o parâmetro de análise anterior, percebe-se no Gráfico 4 que a disparidade na distribuição por gênero vai gradativamente diminuindo ao longo das décadas, sendo que nos anos 2010 entra praticamente em equilíbrio. Deve-se mencionar, com a devida ressalva, pois a década de 2020 estar ainda em sua metade, que a produção feminina ultrapassa a masculina, mesmo que em pequena proporção.

Gráfico 4 - Distribuição das pesquisas por gênero e agrupados por décadas (Total Geral=1.131). Fonte: Autoria própria.

demetic focus to other areas. However, global events, such as the COVID-19 pandemic, are very likely to have interrupted or hampered research projects, especially fieldwork, directly affecting academic production in the recent period.

In order to connect with the previous analysis parameter, it can be seen in Graph 4 that the disparity in gender distribution gradually decreases over the decades, reaching practically equilibrium in the 2010s. It should be mentioned, with due caution, as the 2020s are still only halfway through, that female production exceeds male production by a small margin.

Graph 4 - Gender distribution of surveys grouped by decades (Total=1,131). Source: Own work.



No Gráfico 5, constata-se na distribuição ao longo das décadas, que a partir dos anos 1990 come-

Graph 5 shows the distribution over the decades, revealing that from the 1990s, the number of scientific

ça a ampliar extraordinariamente o número de trabalhos científicos nas universidades, devido à maior disponibilidade de professores orientadores e o surgimento de programas e laboratórios de pesquisa. Apesar das flutuações observadas, identifica-se a predominância das pesquisas em Ciências da Terra e Exatas (Geologia, Geografia Física, Química, entre outras), entre as décadas de 1980 e 1990.

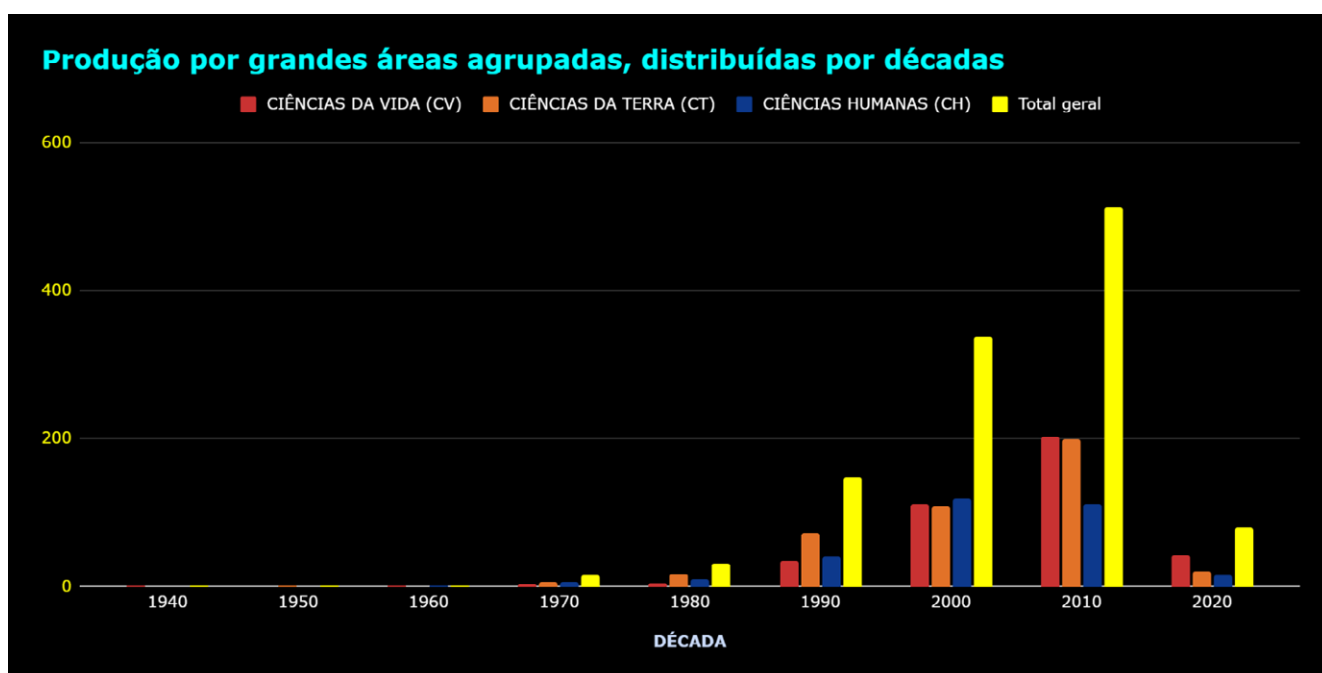
Nos anos 2000 ocorre um impuslo na produção, porém, proporcional nas três grandes áreas do conhecimento. Todavia, nos anos 2010, a realização de pesquisas se avoluma em geral, em destaque para as áreas de Ciências da Vida e de Ciências da Terra, praticamente de forma equilibrada, muito provavelmente devido à criação de novos programas de pós-graduação, núcleos de pesquisa e pela intensa formação de doutores nas temáticas relacionadas com as cavernas. Na década de 2010 ressalta-se, por outro lado, a diminuição da realização de pesquisas nas Ciências Humanas. (Gráfico 5).

papers produced by universities began to increase dramatically, due to the greater availability of supervising professors and the emergence of research programs and laboratories. Despite the fluctuations observed, research in Earth and Exact Sciences (Geology, Physical Geography, Chemistry, among others) predominated between the 1980s and 1990s.

In the 2000s, there was a surge in production, albeit proportional across the three major areas of knowledge. However, in the 2010s, research increased overall, particularly in the areas of Life Sciences and Earth Sciences, in a practically balanced manner, most likely due to the creation of new postgraduate programs, research centers, and the intense training of PhDs in cave related topics. On the other hand, the 2010s saw a decline in research in the humanities (Graph 5).

Gráfico 5 - Distribuição das pesquisas por grandes áreas e agrupadas ao longo das décadas. Fonte: Autoria própria.

Graph 5 - Research distribution by major areas grouped over decades. Source: Own Work



O Gráfico 6, estilo polar, apresenta a produção por década de modo a indicar uma visão consolidada da evolução da produção acadêmica na área de espeleologia ao longo do tempo com base nos dados de 1944 a 2024. Observa-se um crescimento quase contínuo na produção ao longo das décadas, com aumentos significativos a partir de 1990 e atingindo o ápice na década de 2010, onde o número total de trabalhos é substancialmente maior.

Isso reflete o desenvolvimento progressivo da área espeleológica como campo de estudo acadêmico e científico no Brasil, com a consolidação de núcleos investigativos, criação de centros de pesquisa nacionais e maior interesse pelo tema, motivado por questões ambientais, avanços nos eventos sobre cavernas e novos programas de pós-graduação, além da aproximação entre grupos espeleológicos e das universidades.

Na década de 2020, há uma redução na produção em comparação à década anterior, mas esse período ainda está em andamento, além disso, houve o impacto de redução de produção científica na época da pandemia de Covid-19.

Gráfico 6 - Produção acadêmica em espeleologia no Brasil consolidada por décadas (Total Geral). Fonte: Autoria própria.

Graph 6, polar style, shows production by decade in order to provide a consolidated view of the evolution of academic production in the field of speleology over time, based on data from 1944 to 2024. There has been almost continuous growth in production over the decades, with significant increases since 1990, reaching a peak in the 2010s, when the total number of studies was substantially higher.

This reflects the progressive development of speleology as an academic and scientific field of study in Brazil, with the consolidation of research hubs, the creation of national research centers, and greater interest in the subject, motivated by environmental issues, advances in cave events, and new graduate programs, in addition to stronger ties between speleological groups and universities.

In the 2020s, there is a reduction in production compared to the previous decade, but this period is still ongoing. In addition, there was the impact of reduced scientific production during the Covid-19 pandemic.

Graph 6 - Academic production in speleology in Brazil consolidated over decades (Total). Source: Own Work.



Distribuição espacial por estados da federação e regiões geográficas

A região Sudeste aparece de forma evidente como a de maior produção em espeleologia, (69,2%). Só o estado de São Paulo contribui com 35,8% de toda a produção nacional. Isso se deve ao estado ser o berço das atividades espeleológicas, a presença de antigas universidades e extensa disponibilidade professores-pesquisadores relacionados com o assunto. (Gráfico 7, Gráfico 8)

Gráfico 7 - Mapa de distribuição espacial por densidade dos trabalhos realizados nos Estados do Brasil. Fonte: Autoria própria.

Spatial distribution by states and geographic regions

The Southeast region clearly stands out as the region with the highest production in speleology (69.2%). The state of São Paulo alone contributes 35.8% of all national production. This is due to the state being the birthplace of speleological activities, the presence of old universities, and the extensive availability of professors and researchers related to the subject. (Graph 7, Graph 8)

Graph 7 - Map showing the spatial distribution by work density in the Brazilian states. Source: own Work.

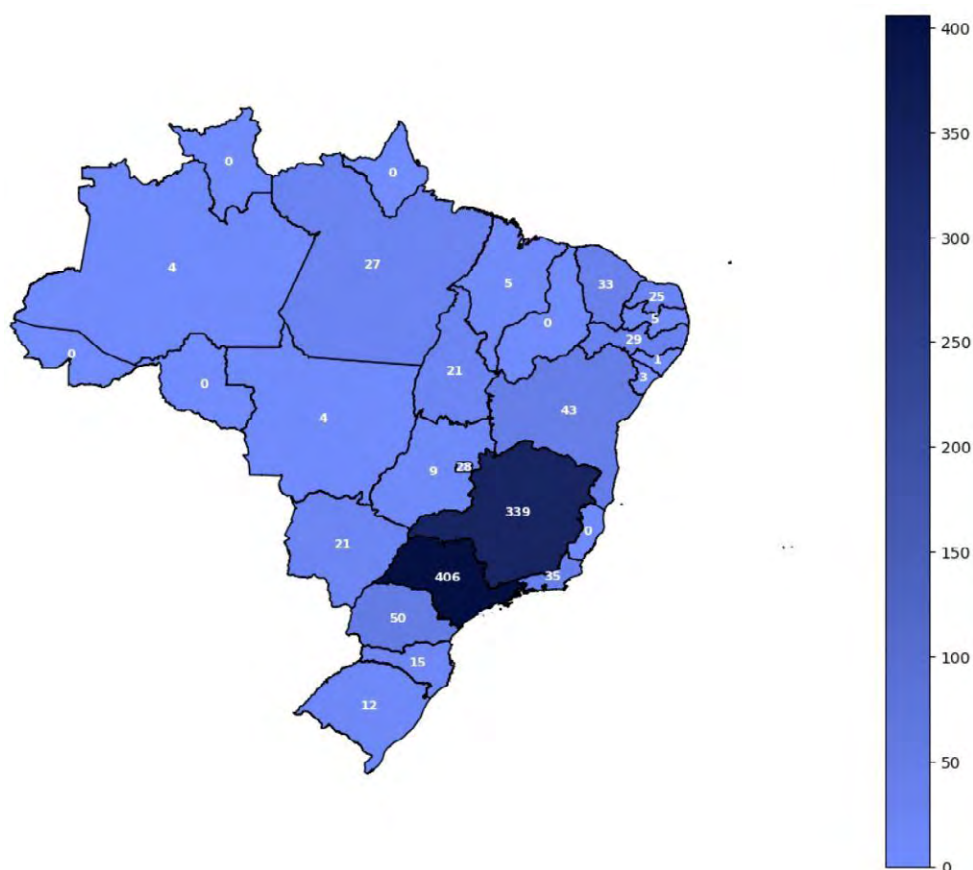
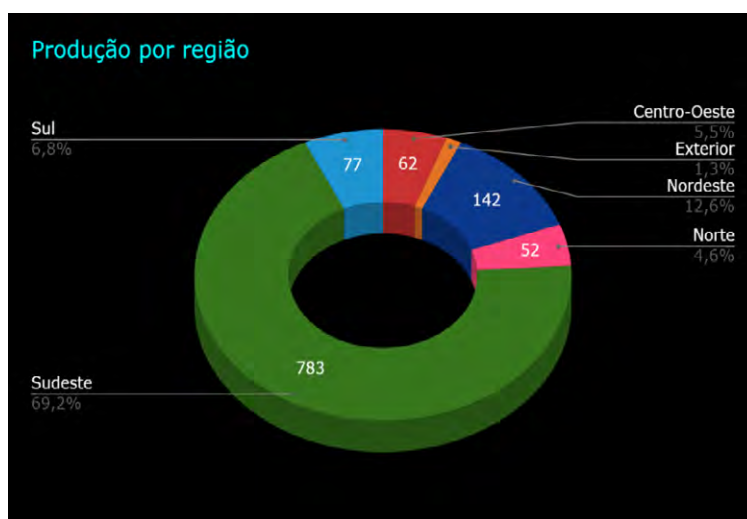


Gráfico 8 - Produção acadêmica espeleológica (distribuição por regiões brasileiras ou outros países). Fonte: Autoria própria.

Graph 8 - Academic speleological production (distribution by Brazilian regions or other countries). Source: Own Work.



Com relação ao destaque de São Paulo, esse dado é um tanto inusitado, visto que as regiões cársticas para investigação científica no estado estão relativamente distantes da Região Metropolitana (RMSP), a mais de 300 km, como é o caso do Alto e Médio Vale do Ribeira, onde existem áreas protegidas que possuem cavernas, Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR) o Parque Estadual da Caverna do Diabo (PECD) e o Parque Estadual de Intervalos (PEI). Mesmo assim, a região vem sendo estudada desde o século XIX, em especial pelos estudos realizados por Ricardo Krone (KRONE, 1898; MARTINS, 2023). Ressalta-se, também, a força da atuação contínua de grupos espeleológicos desde os anos 1960 e presença das universidades desde os anos 1970, em atividades de campo e excursões didáticas, incluindo pesquisas científicas. Algo semelhante ocorre em Minas Gerais, outro estado muito ativo na produção de trabalhos acadêmicos e processos formativos em espeleologia, com história semelhante de pesquisas desde o século XIX, no caso os estudos paleontológicos de Peter Lund (LUND, 1950; LUNA FILHO, 2007). Ressalta-se que esse estado também possui o maior número de cavernas conhecidas, assim como de grupos espeleológicos e está entre os estados com ampla pro-

With regard to São Paulo's prominence, this data is somewhat unusual, given that the karst regions for scientific research in the state are relatively distant from the Metropolitan Region (RMSP), more than 300 km away. This is the case of the Upper and Middle Ribeira Valley, where there are protected areas with caves, the Alto Ribeira Tourist State Park (PETAR), the Devil's Cave State Park (PECD), and the Intervalos State Park (PEI). Even so, the region has been studied since the 19th century, especially through the studies carried out by Ricardo Krone (KRONE, 1898; MARTINS, 2023). It is also worth noting the strength of the continuous work of speleological groups since the 1960s and the presence of universities since the 1970s in field activities and educational excursions, including scientific research. Something similar occurs in Minas Gerais, another state that is very active in the production of academic work and educational processes in speleology, with a similar history of research since the 19th century, in this case the paleontological studies of Peter Lund (LUND, 1950; LUNA FILHO, 2007). It should be noted that this state also has the largest number of known caves, as well as speleological groups, and is among the states with extensive university research on caves and speleological heritage.

dução de pesquisas universitárias sobre cavernas e patrimônio espeleológico.

Outras unidades federativas de maior atividade são Paraná, Bahia, Rio de Janeiro, Ceará, Distrito Federal, Pernambuco e Rio Grande do Norte, explicado pela compatibilidade da existência de Instituições de Ensino Superior (IES) que realizam estudos acadêmicos, a proximidade de áreas relevantes em sítios espeleológicos para as investigações universitárias e extensas áreas de formações geológicas favoráveis para a existência de cavernas e abrigos sob rocha.

Com relação à distribuição da produção acadêmica espeleológica por região e áreas de conhecimento, destaca-se que a região Sudeste predomina em todas as grandes áreas, com maior ênfase nas CV. Outro destaque se deve ao número de trabalhos de CT produzidos na região Nordeste, Sul e Norte do Brasil. Na área de CH aparece um discreto destaque na região Sul e Centro-Oeste.

Nível acadêmico

Em relação ao nível acadêmico observa-se um número expressivo de trabalhos de pós-graduação, sendo no mestrado ($n=462/40,8\%$) seguidos pelos de doutorado ($n=189/16,7\%$). As pesquisas de mestrado possuem destaque para as Ciências da Terra ($n=168/16,6\%$). Os trabalhos de graduação vêm crescendo acentuadamente, correspondendo a boa parte da produção ($n=426/37,7\%$), demonstrando maior interesse pela temática espeleológica para aprofundamento profissional. Esse aumento se justifica pela participação dos graduandos estimulados de forma precoce para investigação de cavernas e assuntos correlacionados, impulsionando a continuidade acadêmica. Isso decorrerá em maior interesse e participação nos cursos em nível de pós-graduação. (Gráfico 9)

Other states with significant activity are Paraná, Bahia, Rio de Janeiro, Ceará, the Federal District, Pernambuco, and Rio Grande do Norte. This is explained by the compatibility of the existence of Higher Education Institutions that conduct academic studies, the proximity of relevant areas in speleological sites for university research, and extensive areas of geological formations favorable to the existence of caves and rock shelters.

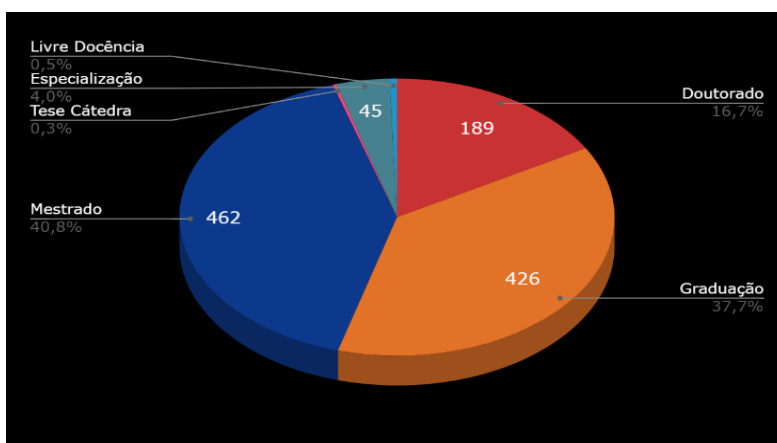
With regard to the distribution of academic speleological production by region and areas of knowledge, it is noteworthy that the Southeast region predominates in all major areas, with greater emphasis on LS. Another highlight is the number of ES studies produced in the Northeast, South, and North regions of Brazil. In the area of HS, there is a slight emphasis on the South and center-west regions.

Academic Level

In terms of academic level, there is a significant number of postgraduate studies, with master's degrees ($n=462/40.8\%$) followed by doctorates ($n=189/16.7\%$). Master's degree research is particularly prominent in Earth Sciences ($n=168/16.6\%$). Undergraduate work has been growing sharply, accounting for a large part of the production ($n=426/37.7\%$), demonstrating greater interest in speleological topics for professional development. This increase is justified by the participation of undergraduate students who are encouraged early on to investigate caves and related subjects, driving academic continuity. This will result in greater interest and participation in postgraduate courses. (Graph 9)

Gráfico 9 - Produção acadêmica espeleológica por nível acadêmico das pesquisas. Fonte: Autoria própria.

Graph 9 - Speleological research production by academic level. Source: Own Work.



Observa-se no Gráfico 10 um acentuado aumento na produção científica em todos os níveis a partir da década de 1990, com destaque para a década de 2010, muito profícua para a pesquisa em espeleologia e sobre cavernas brasileiras, principalmente em nível de mestrado e graduação. Isso demonstra que a espeleologia é uma área de investigação que vem se consolidando no Brasil, contudo, ainda com muito potencial para crescimento e avanços. Ressalta-se que quanto maior for a disponibilidade de programas, vagas e bolsas de pesquisas, maior será o interesse, aumentando o número de doutores, que poderão no futuro abrir novas vagas para a pesquisa científica sobre o assunto.

Entre o final da década de 2010 e a metade da década de 2020 houve um declínio acentuado na produção, que podem estar associados a problemas na política científica e tecnológica e à pandemia Covid-19. O artigo produzido por Marques (2024), corrobora que a situação é semelhante em todas as áreas e em abrangência nacional, com relação aos problemas identificados no começo dos anos 2020, e que será necessário um esforço extra para retomar o crescimento na formação científica no Brasil.

Graph 10 shows a sharp increase in scientific production at all levels since the 1990s, with emphasis on the 2010s, which was very fruitful for research in speleology and Brazilian caves, mainly at the master's and undergraduate levels. This demonstrates that speleology is an area of research that has been consolidating in Brazil, but still has much potential for growth and advancement. It should be noted that the greater the availability of programs, places, and research grants, the greater the interest will be, increasing the number of PhDs, who may in the future open up new opportunities for scientific research on the subject.

Between the late 2010s and mid-2020s, there was a sharp decline in production, which may be associated with problems in science and technology policy and the Covid-19 pandemic. The article produced by Marques (2024) corroborates that the situation is similar nationwide in all areas, in relation to the problems identified in the early 2020s, and that an additional effort will be necessary to resume growth in scientific training in Brazil.

Gráfico 10 - Distribuição dos trabalhos acadêmicos em relação ao nível e às décadas. Fonte: Autoria própria.

Graph 10 - Academic studies distribution by level and decade. Source: Own Work.



Áreas de conhecimentos e temáticas

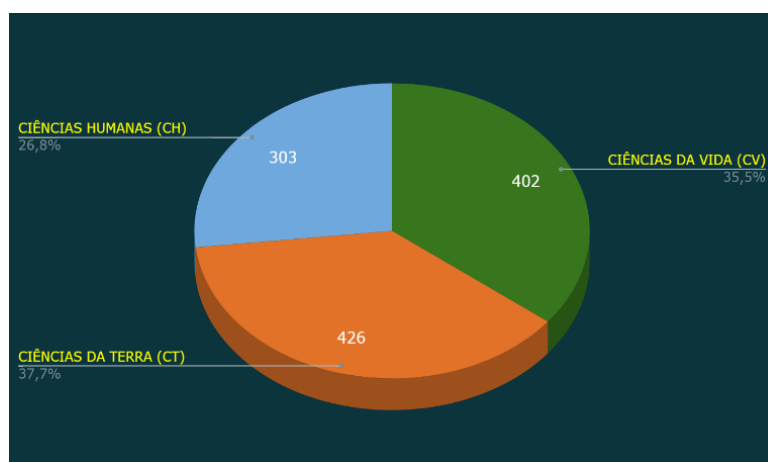
É preciso reconhecer que os trabalhos acadêmicos sobre cavernas foram sendo equilibrados ao longo do tempo, entretanto, sempre com predominância das pesquisas em Ciências da Terra, seguida das Ciências da Vida, tendo em vista que essas áreas recebem incentivos por conta da necessidade de estudos relacionadas com a aplicação da legislação ambiental brasileira.

Areas of knowledge and subjects

It should be recognized that academic work on caves has been balanced over time, but research in Earth Sciences has always predominated, followed by Life Sciences, given that these areas receive incentives due to the requirements of Brazilian environmental legislation.

Gráfico 11 - Distribuição dos trabalhos acadêmicos por décadas em relação às décadas. Fonte: Autoria própria.

Graph 11 - Distribution of academic studies by areas. Source: Own Work.

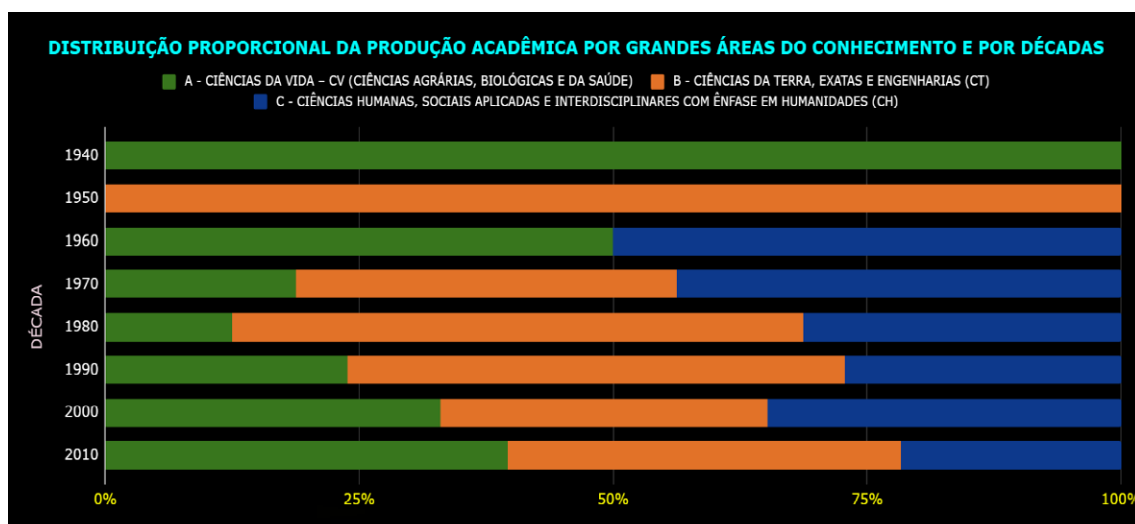


Observa-se no Gráfico 12 que a produção acadêmica por áreas de conhecimento teve uma distribuição de acordo com o momento da escala temporal.

Graph 12 shows that academic production by area of knowledge was distributed according to the moment on the time scale. Until the end of the 1990s,

Até o final da década de 1990 a maior produção estava concentrada na grande área das Ciências da Terra-CT (n=72/49,0%) e havia semelhanças nas áreas das Ciências da Vida-CV e nas Ciências Humanas-CH (n=35/23,8% e n=40/27,2%, respectivamente). Nos anos 2000 observa-se maior equilíbrio entre as áreas, com acréscimo total de aproximadamente uma centena de trabalhos, apresentando aumento na área CV e CH, em detrimento das CT. Já na década de 2010, houve um crescimento expressivo dos trabalhos acadêmicos nas Ciências da Vida (n=203/39,6%) e Ciências da Terra (n=199/38,8%), evidenciando a diminuição gradativa dos trabalhos produzidos nas Ciências Humanas (n=111/21,6%).

Gráfico 12 - Distribuição dos trabalhos acadêmicos por grandes áreas agrupadas em relação às décadas. Fonte: Autoria própria.



most production was concentrated in the broad area of Earth Sciences (ES) (n=72/49.0%), and there were similarities in the areas of Life Sciences (LS) and Humanities (HS) (n=35/23.8% and n=40/27.2%, respectively). In the 2000s, there was greater balance between the areas, with a total increase of approximately one hundred studies, showing an increment in the LS and HS areas, to the detriment of ES. In the 2010s, there was significant growth in academic work in Life Sciences (n=203/39.6%) and Earth Sciences (n=199/38.8%), showing a gradual decrease in studies produced in Humanities (n=111/21.6%).

Graph 12 - Distribution of academic studies by broad areas grouped by decade. Source: Own Work.

Entre os cursos que se destacaram podemos listar, em ordem decrescente: *Biociências* (Zoologia, Ecologia, Botânica, Evolução, Genética, Microbiologia) e *Geociências* (Geologia, Ciências da Terra, Geofísica, Mineralogia, Paleontologia, Geoprocessamento, Geotecnica, etc), com mais da metade dos trabalhos produzidos. Seguidos pelos cursos/programas de Geografia, Turismo e Hospitalidade, Arqueologia, Ciências Humanas e Sociais, Ciências Agrárias, Ciências Ambientais e Sustentabilidade, Educação e Ensino, entre vários outros.

Among the courses that stood out, we can list, in descending order: *Biosciences* (Zoology, Ecology, Botany, Evolution, Genetics, Microbiology) and *Geosciences* (Geology, Earth Sciences, Geophysics, Mineralogy, Paleontology, Geoprocessing, Geotechnics, etc.), with more than half of the papers produced. These were followed by courses/programs in Geography, Tourism and Hospitality, Archaeology, Humanities and Social Sciences, Agricultural Sciences, Environmental Sciences and Sustainability, Education and Teaching, among many others.

Semântica acadêmica (Palavras-chave)

A análise da rede de palavras-chave extraída dos títulos de trabalhos publicados sobre espeleologia no Brasil revela característica da produção científica nessa área. Com 3.759 nós, cada um representando uma palavra-chave única, e 9.149 arestas, que conectam palavras-chave coocorrentes, a rede destaca uma diversidade de termos relacionados aos estudos espeleológicos. O grau médio de 2,434 indica que, em média, cada palavra-chave está associada a aproximadamente 2,4 outras, sugerindo uma interconexão moderada entre os temas abordados. (Figura 3).

A maioria das palavras-chave apresenta poucas conexões, são poucas as que atuam como *hubs* altamente conectados. Esses *hubs* provavelmente representam termos amplamente usados na literatura, como *espeleologia*, *Brasil* e *caverna*, assim como: *caracterização*, *descrição*, *estudo*, *levantamento*, *análise*, indicando ações que servem como pontos centrais para conectar diferentes áreas de pesquisa.

Academic semantics (Keywords)

The analysis of the keyword network extracted from the titles of published studies on speleology in Brazil reveals characteristics of scientific production in this area. With 3,759 nodes, each representing a unique keyword, and 9,149 edges connecting co-occurring keywords, the network highlights a diversity of terms related to speleological studies. The average degree of 2.434 indicates that, on average, each keyword is associated with approximately 2.4 others, suggesting a moderate interconnection between the covered topics. (Figure 3).

Most keywords have few connections, and few act as highly connected hubs. These hubs probably represent terms widely used in the literature, such as speleology, Brazil, and cave, as well as characterization, description, study, survey, and analysis, indicating actions that serve as focal points for connecting different areas of research.

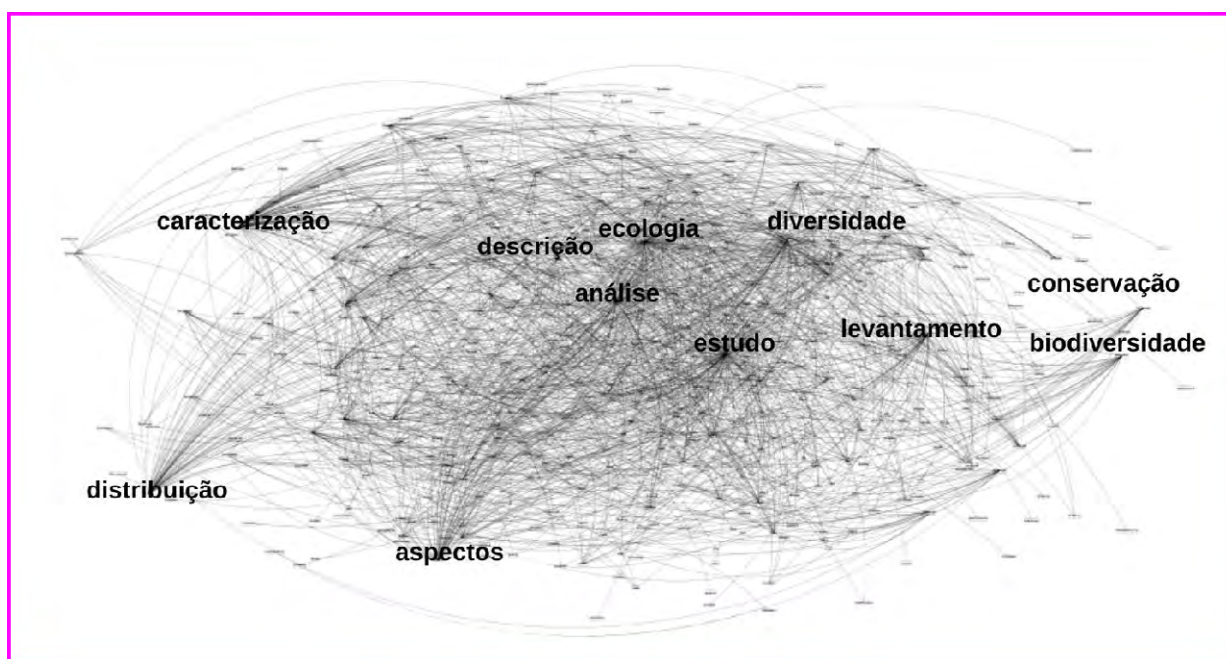


Figura 3 - Rede de palavras-chave gerada a partir dos títulos dos trabalhos acadêmicos. Fonte: Autoria própria.

Figure 3 - Network of keywords generated from the titles of academic papers. Source: Own work.

A análise de modularidade identificou comunidades ou subgrupos de palavras-chave que frequentemente aparecem juntas, o que reflete agrupamentos temáticos. O gráfico de distribuição de tamanho das comunidades mostra que há módulos de tamanhos variados. Algumas comunidades contêm um grande número de palavras-chave, indicando subtemas amplamente estudados, como *biodiversidade*, *geologia*, *conservação ambiental* e *turismo em cavernas*. Por outro lado, as comunidades menores sugerem tópicos mais específicos ou menos explorados.

Esses resultados mostram que a literatura sobre espeleologia no Brasil é diversificada, mas apresenta focos claros em determinados subtemas. A existência de palavras-chave altamente conectadas sugere que há uma certa convergência em torno de tópicos centrais, enquanto a subdivisão em módulos destaca a natureza interdisciplinar e multifacetada das investigações realizadas sobre esse assunto.

A nuvem de palavras gerada (Figura 4), partiu dos títulos de trabalhos em espeleologia no Brasil, indicando os principais temas, regiões de interesse e abordagens da pesquisa nessa área, uma vez que são elementos que aparecem nos títulos. Foram consideradas 11.423 palavras-chave geradas a partir dos títulos. Entre os termos mais destacados, estão as palavras: *gruta*, *cavernas*, *cavidades*, *cavernícolas carste*, *cárstico* e *subterrâneo*, indicando o foco nos estudos sobre ambientes subterrâneos, seu entorno e os organismos que habitam esses ambientes. Termos como *estudo*, *análise*, *caracterização*, *caso*, *avaliação*, *levantamento*, revelam que muitas pesquisas buscam compreender, descrever e analisar aspectos específicos das cavernas e seus sistemas associados, ou estão propondo ações de conservação ambiental, indicado nos termos: *ambiental*, *gestão*, *conservação*, *parque*, *uso*, *patrimônio* e *proposta*.

Modularity analysis identified communities or subgroups of keywords that frequently appear together, reflecting thematic clusters. The community size distribution graph shows that there are modules of varying sizes. Some communities contain a large number of keywords, indicating widely studied subtopics such as biodiversity, geology, environmental conservation, and cave tourism. On the other hand, smaller communities suggest more specific or less explored topics.

These results show that Brazilian speleology literature is diverse, but has clear focuses on certain subtopics. The existence of highly connected keywords suggests that there is a certain convergence around central topics, while the subdivision into modules highlights the interdisciplinary and multifaceted nature of the research carried out on this subject.

The word cloud generated (Figure 4) was based on the speleology papers titles in Brazil, indicating the main themes, regions of interest, and research approaches in this area. A total of 11,423 keywords generated from the titles were considered. Among the most prominent terms are the words: cave, caverns, cavities, cavernous karst, karstic, and subterranean, indicating a focus on studies of subterranean environments, their surroundings, and the organisms that inhabit these environments. Terms such as study, analysis, characterization, case, evaluation, and survey reveal that much research seeks to understand, describe, and analyze specific aspects of caves and their associated systems, or proposes environmental conservation actions, as indicated by the terms: environmental, management, conservation, park, use, heritage, and proposal.

ciplinares na exploração e estudo do contexto e ambiente das cavernas.

Instituições acadêmicas de realização das pesquisas

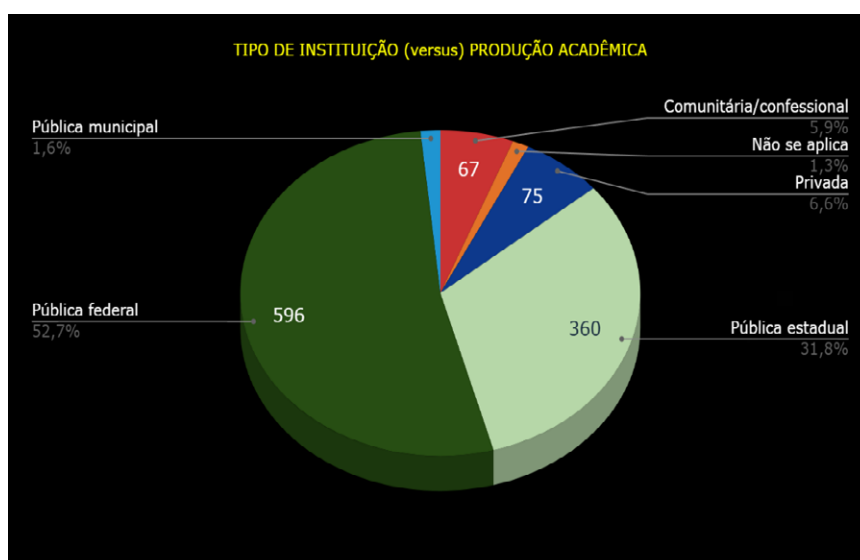
Pode-se observar que a produção acadêmica brasileira em Espeleologia envolve 116 Instituições de Ensino Superior, sendo 39 federais, 18 estaduais, 1 municipal, 10 instituições comunitárias/confessionais, 37 instituições privadas e 11 estrangeiras. Levando em conta o Total Geral dos trabalhos, percebe-se que a contribuição das universidades públicas (federais, estaduais, municipais) é bastante elevada ($n=974/86,1\%$) comparado com a produção das universidades privadas/comunitárias/confessionais ($n=142/12,5\%$). Constaram também 10 instituições do exterior, contribuindo com 15 trabalhos ($1,3\%$), com destaque para a Université de Paris I. (Gráfico 13).

Gráfico 13 - Distribuição das pesquisas por tipologia das instituições acadêmicas (Total geral, $n=1.131$). Fonte: Autoria própria.

Academic Institutions Conducting Research

It can be observed that Brazilian academic production in Speleology involves 116 higher education institutions: 39 federal, 18 state, 1 municipal, 10 community/denominational institutions, 37 private, and 11 foreign. Considering the overall total of studies, it is clear that the contribution of public universities (federal, state, municipal) is quite high ($n=974/86.1\%$) compared to the production of private/community/denominational universities ($n=142/12.5\%$). Ten foreign institutions also contributed 15 papers (1.3%), with the University of Paris I standing out. (Graph 13).

Graph 13 - Distribution of research by type of academic institutions (Overall, $n=1,131$). Source: Own Work.



A partir da década de 1990 os dois principais polos formadores de pesquisadores de temas relacionados com cavernas e assuntos correlatos eram as Universidades de São Paulo (USP) e

Since the 1990s, the two main centers for training researchers on caves and related topics have been the University of São Paulo (USP) and the Federal University of Minas Gerais (UFMG). Even so, USP's

a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mesmo assim, a produção da USP é mais do que o dobro da produção da UFMG para o período selecionado. Por outro lado, observa-se que a produção nessas duas instituições (n=373) é notória para o estabelecimento desta área de pesquisa no país, perfazendo quase a terça parte de todos os trabalhos acadêmicos analisados. (Gráfico 14).

Na década de 2000 em diante, outras instituições tornaram-se protagonistas da produção acadêmica em espeleologia no Brasil, destacando-se a Universidade Federal de Lavras (UFLA) e Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), que juntas com a USP e UFMG, consolidam mais de 50% de toda a produção avaliada (n=525). Tais instituições se destacaram pelas expressivas contribuições na área de Biologia Subterrânea desenvolvidas pelo Centro de Estudos em Biologia Subterrânea (CEBS) da UFLA e pelo Laboratório de Estudos Subterrâneos (LES) da UFSCar.

Deve-se destacar ainda, a produção expressiva da PUC-Minas, UFBA, UFOP, UFC, UFPE, UFRN, UFT, UnB, UFPR, UFPA, UNICAMP, entre outras, espalhando sementes formativas para pesquisa espeleológica por todo o território nacional. (Gráfico 14).

Entre as 24 instituições com produção acima de dez trabalhos acadêmicos, que totalizam a maioria dos trabalhos identificados (n=942), verifica-se que 16 instituições são públicas federais e foram responsáveis 534 trabalhos acadêmicos, além das mencionadas acima estão as UFSC, UFRJ, UFV e UNIRIO. Em seguida destacam-se 6 públicas estaduais (USP, UNICAMP, UNESP, UEPG, UEL e UEMS), que produziram 339 trabalhos porém, deve-se fazer uma ressalva de que 265 desses trabalhos foram produzidos apenas na USP. Entre as instituições comunitárias ou municipais

output is more than double that of UFMG for the selected period. On the other hand, the output of these two institutions (n=373) is notable for the establishment of this research area in the country, accounting for almost a third of all academic papers analyzed. (Graph 14).

From the 2000s onward, other institutions became protagonists of academic production in speleology in Brazil, notably the Federal University of Lavras (UFLA) and the Federal University of São Carlos (UFSCar), which, together with USP and UFMG, consolidate more than 50% of all evaluated production (n=525). These institutions stood out for the significant contributions in the area of Subterranean Biology developed by the Center for Studies in Subterranean Biology (CEBS) at UFLA and the Laboratory of Subterranean Studies (LES) at UFSCar.

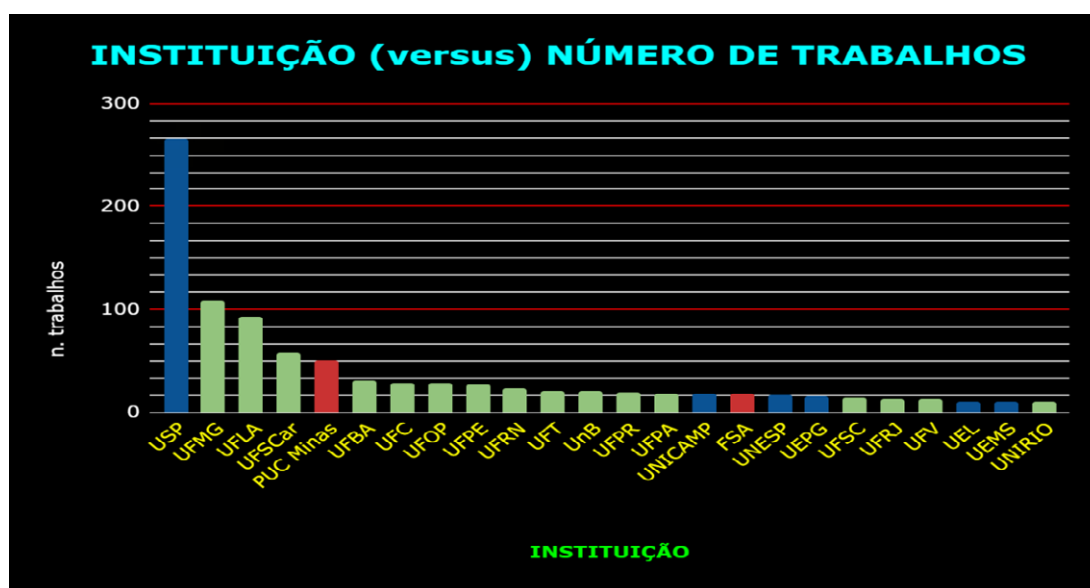
It is also worth highlighting the significant production of PUC-Minas, UFBA, UFOP, UFC, UFPE, UFRN, UFT, UnB, UFPR, UFPA, UNICAMP, among others, spreading formative seeds for speleological research throughout the national territory. (Graph 14).

Among the 24 institutions producing more than ten academic papers, which account for the majority of the identified studies (n=942), 16 are federal public institutions and were responsible for 534 academic papers. In addition to those mentioned above, there are UFSC, UFRJ, UFV, and UNIRIO. Next, six state public institutions stand out (USP, UNICAMP, UNESP, UEPG, UEL, and UEMS), which produced 339 papers. However, it should be noted that 265 of these papers were produced at USP alone. Among the community or municipal institutions, PUC-Minas and Centro Universitário Fundação Santo André (FSA) stand out, responsible for 69 papers. (Graph 14). In addition to this number of academic documents analyzed, the other 189 papers identified were produced at 92 other institutions of various natures, 11 of which were in other countries.

aparecem a PUC-Minas e o Centro Universitário Fundação Santo André (FSA), responsáveis por 69 trabalhos. (Gráfico 14). Afora esse número de documentos acadêmicos analisados, os outros 189 trabalhos identificados foram realizados em outras 92 instituições de natureza diversas, sendo 11 instituições de outros países.

Gráfico 14 - Top das principais universidades com produção acadêmica em espeleologia no país (>10). Fonte: Autoria própria.

Graph 14 - Main universities with academic production in speleology in the country (>10).. Source: Own Work.



Genealogia acadêmica e a participação de pesquisadores/orientadores

Os orientadores científicos são fundamentais para as atividades formativas e para o avanço da qualificação de pessoas visando ampliar a produção científica espeleológica, com o fortalecimento de polos de produção do conhecimento e núcleos de pesquisa. Reconhecemos o papel de todos docentes-investigadores, sem desmerecer ninguém, que dedicaram seu tempo para formar novos cientistas. Porém, é fundamental destacar alguns importantes professores-pesquisadores para a formação de pessoas para realizarem estudos sobre cavernas e temas afins.

Academic genealogy and the participation of researchers/advisors

Scientific advisors are fundamental to training activities and to advancing people's qualifications aiming at expanding scientific speleological production, strengthening knowledge production hubs and research centers. We recognize the role of all teacher-researchers, without detracting from anyone, who have dedicated their time to training new scientists. However, it is essential to highlight some important teacher-researchers for training people to conduct studies on caves and related topics.

From a historical perspective and in terms of their level of production and scientific legacy, it is im-

Do ponto de vista histórico e pelo nível de produção e herança científica transmitida é preciso mencionar os professores-pesquisadores e espeleólogos: *Eleonora Trajano* e *Ivo Karmann*, respectivamente nas áreas de Ciências da Vida e Ciências da Terra. Ambos iniciaram suas atividades espeleológicas no Centro Excursionista Universitário (CEU), além de estudarem e, posteriormente, trabalharem como docentes-pesquisadores na USP, respectivamente em Ciências Biológicas e Geociências. Sendo fundamentais para a formação de uma nova geração de pesquisadores e espeleólogos ligados à atividade científica em âmbito nacional. Ressalta-se que juntos criaram a primeira disciplina acadêmica relacionada com a espeleologia (GGG 400-Espeleologia) em uma universidade brasileira, com ênfase na graduação, formando a primeira turma em 1989. Depois criaram disciplinas específicas de cada assunto de atuação no nível de graduação e pós-graduação.

Nas Figuras 5, 6, 7, 8 encontramos a visualização, mesmo que parcial, para a árvore genealógica acadêmica desses pesquisadores, demonstrando a grande produtividade e herança acadêmica gerada. Para esse fim, utilizou-se a Plataforma *ScienceTree* (Árvore da Ciência) e a Plataforma *Acácia*.

portant to mention the professors, researchers, and speleologists Eleonora Trajano and Ivo Karmann, in the fields of Life Sciences and Earth Sciences, respectively. Both began their speleological activities at the University Excursion Center (CEU), in addition to studying and later working as professors and researchers at USP, respectively in Biological Sciences and Geosciences. They were fundamental to the formation of a new generation of researchers and speleologists linked to scientific activity at the national level. It should be noted that together they created the first academic discipline related to speleology (GGG 400-Speleology) at a Brazilian university, with an emphasis on undergraduate studies, graduating the first class in 1989. They then created specific disciplines for each subject at the undergraduate and graduate levels.

Figures 5, 6, 7, and 8 provide a partial view of the academic family tree of these researchers, demonstrating their high productivity and academic legacy. To this end, the ScienceTree Platform and the Acácia Platform were used.

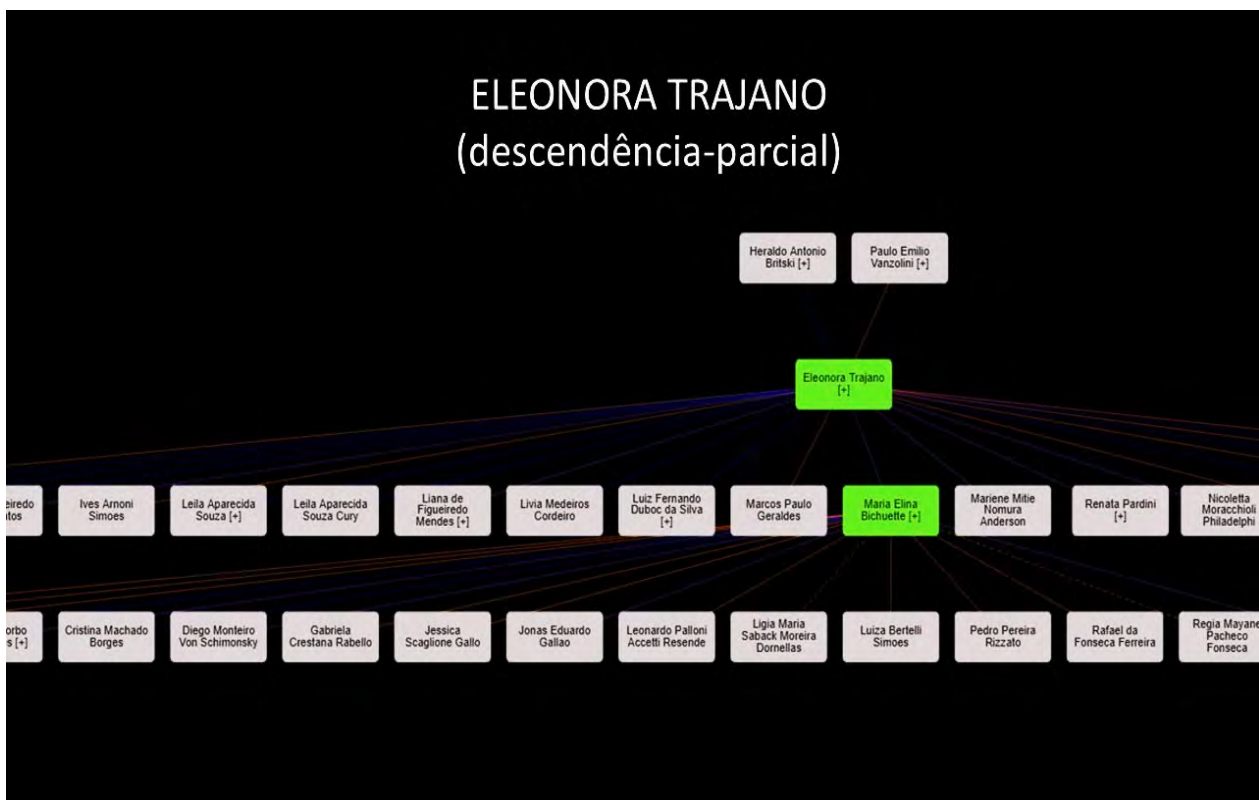


Figura 5 - Árvore genealógica acadêmica de Eleonora TRAJANO (ScienceTree-Parcial). Fonte: Material gerado na Plataforma Árvore da Ciência.

Figure 5 - Academic family tree of Eleonora TRAJANO (ScienceTree-Partial). Source: Material generated on the Science Tree Platform.

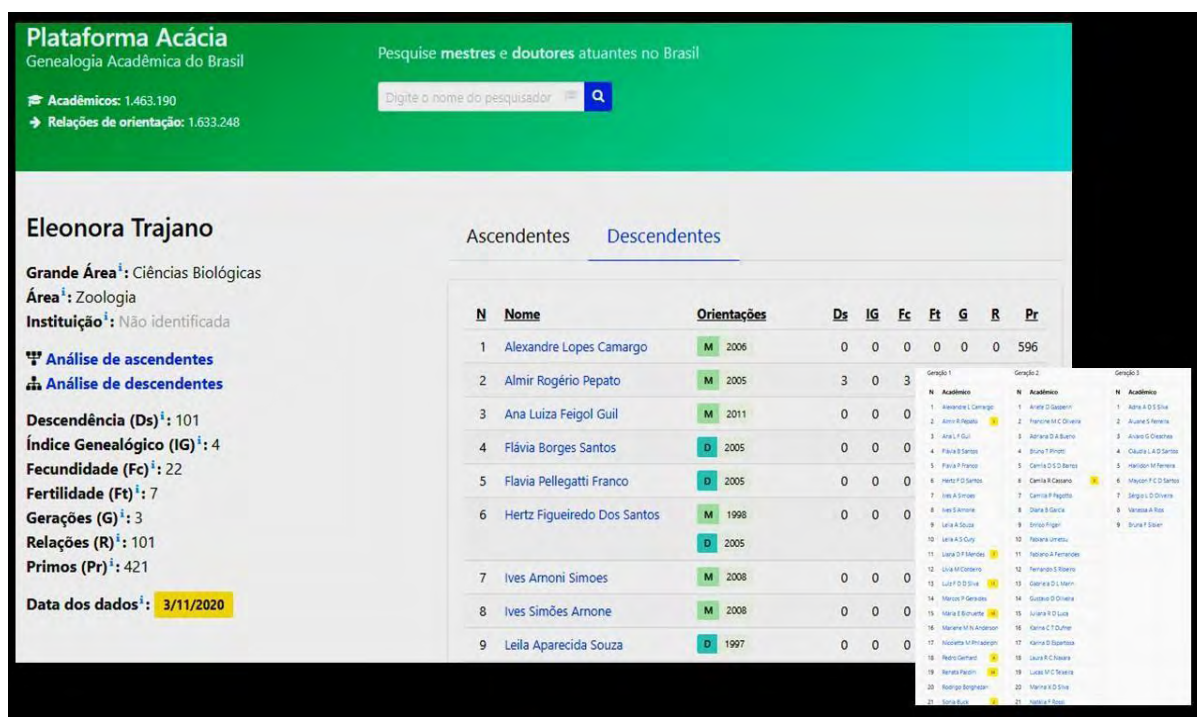


Figura 6 - Árvore genealógica acadêmica de Eleonora TRAJANO (Plataforma Acácia-Parcial). Fonte: Material gerado na Plataforma Acácia.

Figure 6 - Academic family tree of Eleonora TRAJANO (Acacia Platform-Partial). Source: Material generated on the Acacia Platform.

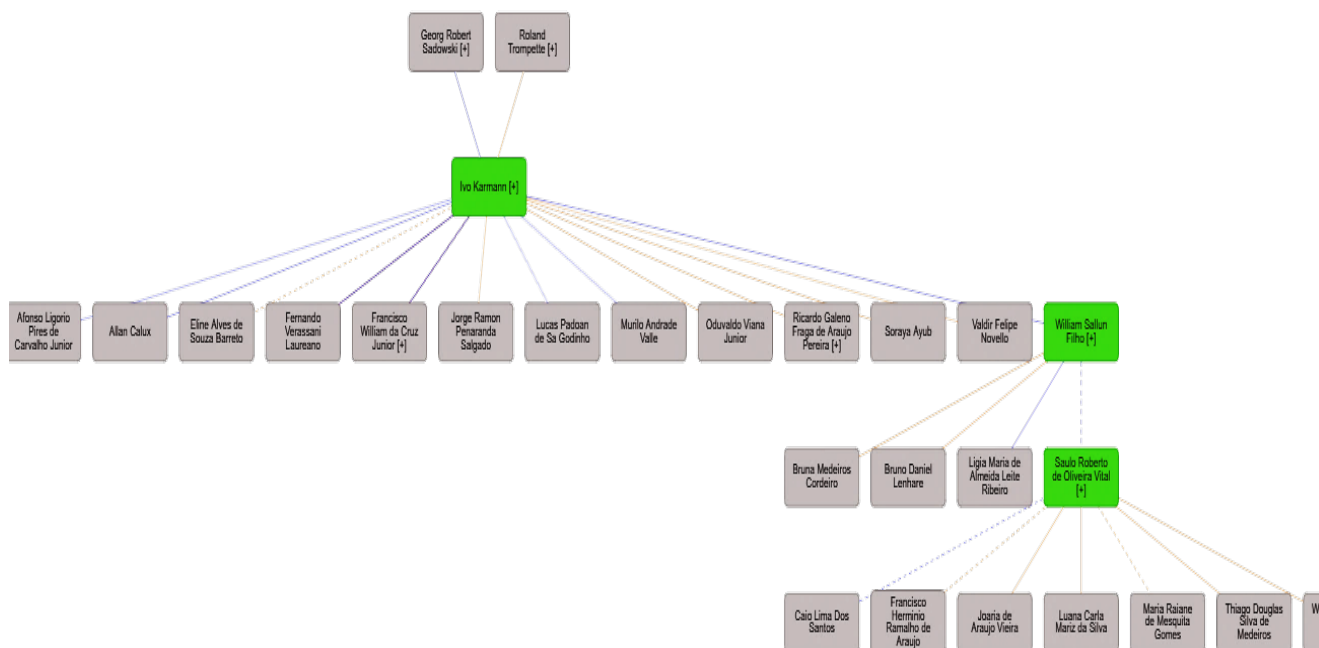


Figura 7 - Árvore genealógica acadêmica de Ivo KARMANN (ScienceTree-parcial). Fonte: Material gerado na Plataforma Árvore da Ciência.

Figure 7 - Academic family tree of Ivo KARMANN (ScienceTree-parcial). Source: Material generated on the Tree of Science Platform.

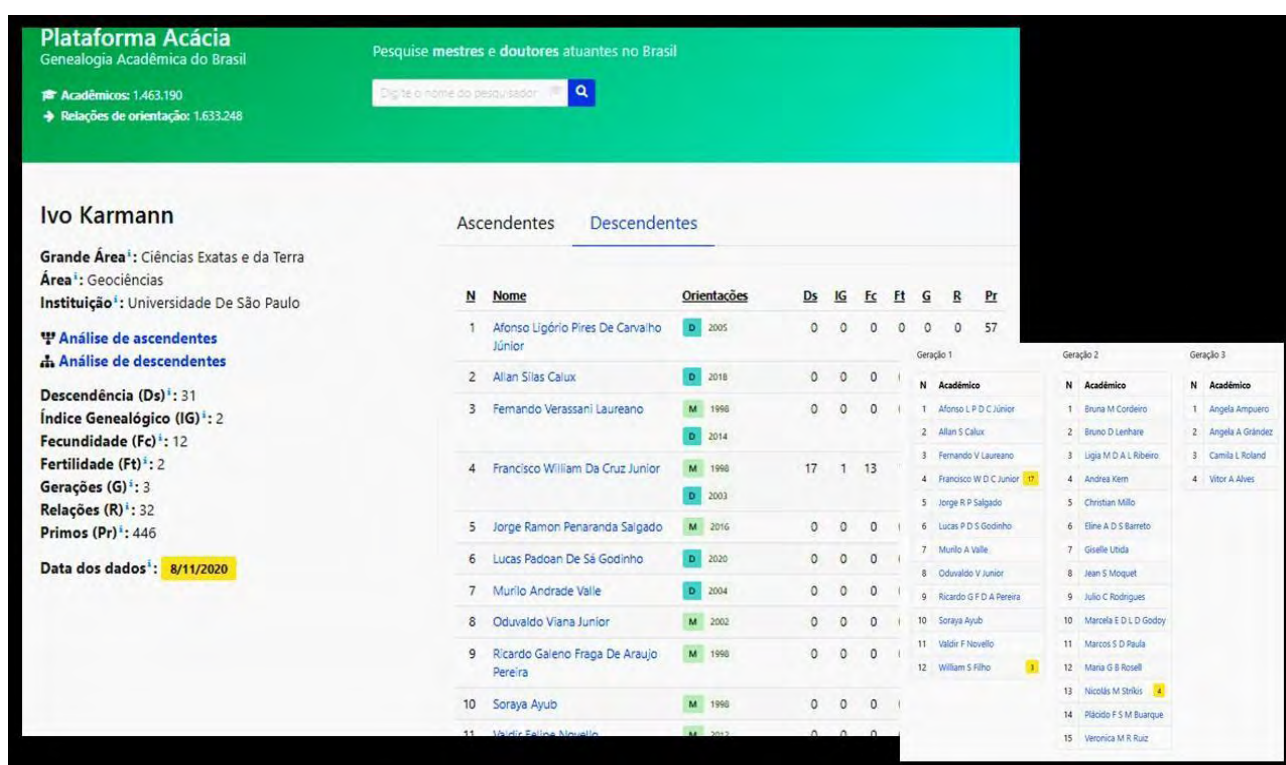


Figura 8 - Árvore genealógica acadêmica de Ivo KARMANN (Plataforma Acácia-Parcial). Fonte: Material gerado na Plataforma Acácia.

Figure 8 - Academic family tree of Ivo KARMANN (Acacia Platform-Parcial). Source: Material generated on the Acacia Platform.

Do ponto de vista geral de orientação de trabalhos científicos, seja graduação, especialização,

From the general perspective of scientific work supervision, whether at the undergraduate, specializa-

mestrado ou doutorado, observa-se um aumento na disponibilidade de mestres e doutores para orientação, conforme o nível do trabalho, a partir dos anos 2000 (vide Gráfico 10).

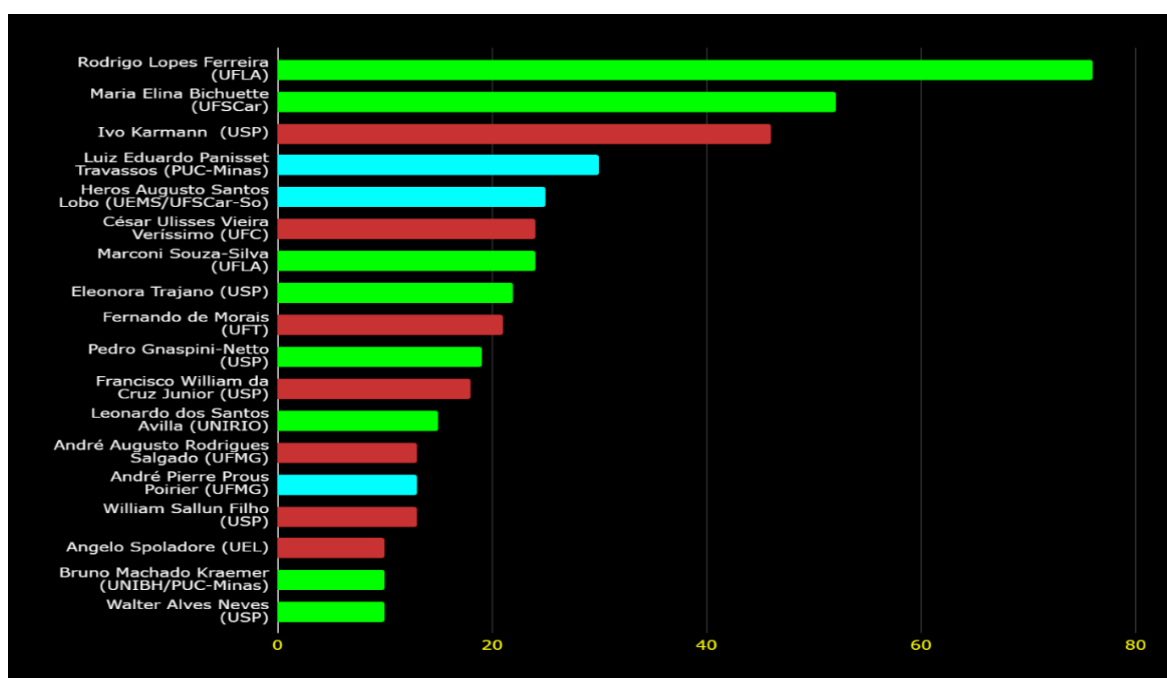
Nas CV deve-se mencionar *Rodrigo Lopes Ferreira* e *Maria Elina Bichuette*, ambos responsáveis pelos principais laboratórios de pesquisa em biologia subterrânea no Brasil (CEBS-UFLA e LES-UFSCar) e pelas maiores produções científica atuais. Continuaram em destaque *Eleonora Trajano* e *Pedro Gnaspini-Netto*, ambos da USP. Surgem em destaque: *Marconi Souza-Silva* (UFLA/UNILAVRAS), *Leonardo S. Avilla* (UNIRIO) e *Bruno Machado Kraemer* (UNIBH/PUC-Minas), sendo que Avilla atua principalmente com paleontologia e Kraemer atua em assuntos gerais das ciências biológicas, mas também tem atuação na paleontologia. Cumpre destacar a orientação de *Walter Alves Neves* (USP), contribuindo sobremaneira para a formação de novos pesquisadores e fortalecendo os estudos que transitam entre as Ciências da Vida e as Ciências Humanas. (Gráfico 15).

Gráfico 15 - Principais orientadores por grandes áreas, ligados à produção acadêmica em espeleologia no país. Legenda: verde=CV; vermelho=CT, azul=CH. Fonte: Autoria própria.

tion, master's, or doctoral level, there has been an increase in the availability of master's and doctoral degree holders for supervision, from the 2000s (see Graph 10).

In the CVs, mention should be made of Rodrigo Lopes Ferreira and Maria Elina Bichuette, both responsible for the main underground biology research laboratories in Brazil (CEBS-UFLA and LES-UFSCar) and for the largest current scientific productions. Eleonora Trajano and Pedro Gnaspini-Netto, both from USP, continued to stand out. Newcomers include: Marconi Souza-Silva (UFLA/UNILAVRAS), Leonardo S. Avilla (UNIRIO), and Bruno Machado Kraemer (UNIBH/PUC-Minas), with Avilla working mainly in paleontology and Kraemer working in general biological sciences, but also active in paleontology. It is worth highlighting the guidance provided by Walter Alves Neves (USP), who has contributed greatly to the training of new researchers and strengthened studies that bridge the life sciences and the humanities. (Graph 15).

Graph 15 - Main advisors by major areas, linked to speleological academic production in the country. Legend: green=LS; red=ES, blue=HS. Source: Own Work.



Conforme Zampaulo e Simões (2022), em artigo sobre a história da pesquisa em Biologia Subterrânea, diversos pesquisadores foram mencionados nos nomes da fauna cavernícola, algumas em perigo ou ameaçadas de extinção, como exemplo mencionam-se: *Charinus eleonora* Baptista & Giupponi, 2003, espécie de amblipígeo em perigo, coletado em Itacarambi (MG), ou o colêmbolo *Acherontides eleonora* Palacios-Vargas & Gnaspini-Netto, 1993, recolhido em Iporanga (SP) e outras espécies denominadas em homenagem a Eleonora Trajano, que muitos anos foi docente e pesquisadora do Instituto de Biociências da USP. Outro exemplo de pesquisadores homenageados é o *Charinus bichuetteae* Giuponi & Miranda, 2016, um amblipígeo coletado em Vitória do Xingu (PA), tendo em vista as contribuições de Maria Elina Bichuette, professora-pesquisadora da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) ou o coleóptero *Ardistomis ferreirai* Balkenohl, Pellegrini & Zampaulo, 2018, coletado em Parauapebas (PA), destacando os trabalhos investigativos de Rodrigo Lopes Ferreira, como professor-pesquisador da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Na área de CT destacam-se Ivo Karmann, Francisco William Cruz Jr e Willian Sallun Filho, todos formados pela USP, sendo que o primeiro autor foi orientador dos demais, estando sua árvore genealógica já na terceira geração acadêmica. (Figuras 7 e 8). Destacam-se também nas CT as contribuições de orientação científica de César Ulisses Vieira Veríssimo (UFC), Luiz Eduardo Panisset Travassos (PUC-Minas), Fernando de Moraes (UFT), André Augusto Rodrigues Salgado (UFMG/UFMG), Angelo Spoladore (UEL). (Gráfico 15).

Nas Ciências Humanas (CH), deve ser mencionado Heros Augusto Santos Lobo (UFSCar-Sorocaba), orientando estudos sobre turismo e gestão ambiental, além das contribuições de Luiz Eduardo

In an article on the history of Underground Biology research by Zampaulo and Simões (2022), several researchers were mentioned in the names of cave fauna, some endangered or threatened with extinction. Such as: Charinus eleonora Baptista & Giupponi, 2003, an endangered species of amblypid, collected in Itacarambi (MG), or the springtail Acherontides eleonora Palacios-Vargas & Gnaspini-Netto, 1993, collected in Iporanga (MG) and other species named in honor of Eleonora Trajano, who was a professor and researcher at the Institute of Biosciences at USP for many years. Another example of researchers honored is Charinus bichuetteae Giuponi & Miranda, 2016, an amblypid collected in Vitória do Xingu (PA), in view of the contributions of Maria Elina Bichuette, professor-researcher at the Federal University of São Carlos (UFSCar), or the beetle Ardistomis ferreirai Balkenohl, Pellegrini & Zampaulo, 2018, collected in Parauapebas (PA), highlighting the investigative work of Rodrigo Lopes Ferreira, as a professor-researcher at the Federal University of Lavras (UFLA).

In the field of ES, Ivo Karmann, Francisco William Cruz Jr, and Willian Sallun Filho stand out, all graduates of USP, with the first author having mentored the others, his family tree now is in its third academic generation. (Figures 7 and 8). Also noteworthy in ES are the contributions of scientific guidance by César Ulisses Vieira Veríssimo (UFC), Luiz Eduardo Panisset Travassos (PUC-Minas), Fernando de Moraes (UFT), André Augusto Rodrigues Salgado (UFMG/UFMG), and Angelo Spoladore (UEL). (Graph 15).

In the Humanities (HS), mention should be made of Heros Augusto Santos Lobo (UFSCar-Sorocaba), who supervises studies on tourism and environmental management, in addition to the contributions of Luiz Eduardo Panisset Travassos, who also focuses on this area, adding the theme of cultural

Panisset Travassos também com esse enfoque, adicionado à temática da espeleologia cultural. Alguns dos autores mencionados (Travassos, Lobo, Veríssimo, Moraes, Spoladore, Kraemer e Neves) trabalham em linhas de pesquisa que transitam pelas humanidades, abrindo espaços interdisciplinares. Com relação à arqueologia com ênfase para a pesquisa em pré-história e história destacam-se as orientações de *André Pierre Prous-Poirier* (UFMG), mais conhecido como André Prous. (Gráfico 15).

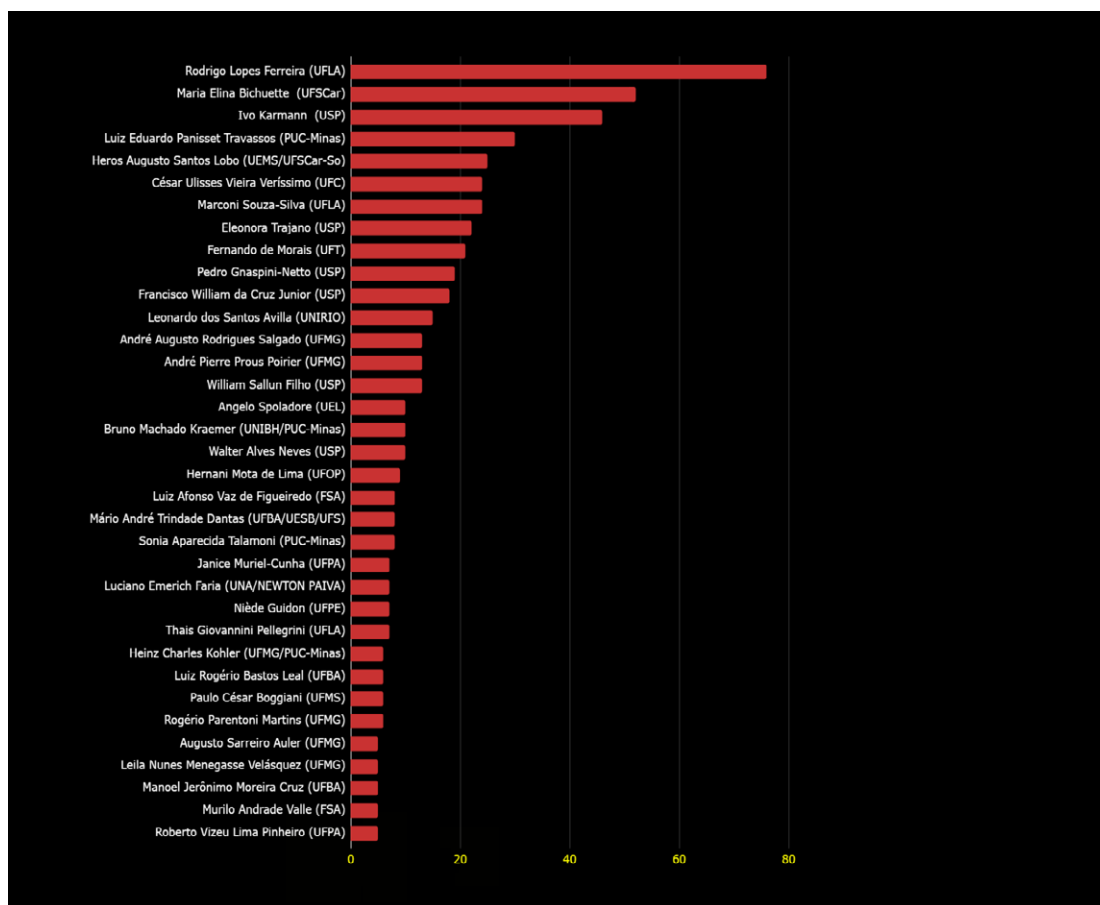
Ressalta-se que somente esses 18 pesquisadores, que orientaram no mínimo 10 trabalhos, representaram a realização de 441 trabalhos de investigação espeleológica, o equivalente a 39,0% de toda a produção analisada. Quando ampliado esse número para os 35 orientadores com produção individual de mais de 5 trabalhos, atinge-se a marca de 551 trabalhos acadêmicos, representando quase a metade da produção. (Gráfico 16). O restante dos 580 trabalhos científicos está distribuído entre centenas dos demais investigadores (n=423).

speleology. Some of the authors mentioned (Travassos, Lobo, Veríssimo, Moraes, Spoladore, Kraemer, and Neves) work in lines of research that span the humanities, opening up interdisciplinary spaces. With regard to archaeology, with an emphasis on research in prehistory and history, the guidance of André Pierre Prous-Poirier (UFMG), better known as André Prous, stands out. (Graph 15).

It should be noted that these 18 researchers alone, who supervised at least 10 other researches, accounted for 441 papers, equivalent to 39.0% of all the output analyzed. When this number is expanded to include the 35 supervisors with individual production of more than 5 studies, the total reaches 551 academic studies, representing almost half of the production. (Graph 16). The remaining 580 scientific studies are distributed among hundreds of other researchers (n=423).

Gráfico 16 - Principais orientadores com produção igual ou acima de 5 trabalhos acadêmicos. Fonte: Autoria própria.

Graph 16 - Leading advisors with five or more academic publications. Source: Own work.



Percebe-se uma elevada produtividade dos pesquisadores da área de Ciências Biológicas, demonstrando o grande investimento das Ciências da Vida no processo de formação e investigação relacionados com a temática, mais centrados nos processos acadêmicos e formativos de novos investigadores. Outro aspecto que pode explicar o expressivo aumento na produção na área é a necessidade dos estudos de biologia subterrânea para os procedimentos de licenciamento ambiental.

A análise da rede de relações entre orientadores e orientados no tema da espeleologia no Brasil revela características de fragmentação e baixa conectividade. Com um total de 1.466 nós (indivíduos) e 1.030 arestas (conexões), a rede é esparsa, apresentando um grau médio de 0,703. Isso

There is a high level of productivity among researchers in the field of Biological Sciences, demonstrating the significant investment made by Life Sciences in research related to this topic and training processes for new researchers. Another aspect that may explain the significant increase in production in this area is the need for underground biology studies for environmental licensing procedures.

The analysis of the network of relationships between advisors and advisees in the field of speleology in Brazil reveals characteristics of fragmentation and low connectivity. With a total of 1,466 nodes (individuals) and 1,030 edges (connections), the network is sparse, with an average degree of 0.703. This indicates that, on average, each individual has less than one direct connection, suggesting that many participants are isolated or have few interactions. In

indica que, em média, cada indivíduo tem menos de uma conexão direta, o que sugere que muitos participantes estão isolados ou possuem poucas interações. Na imagem da Figura 9, as arestas mais espessas revelam atores que possuem conexões mais fortes, como por exemplo, os pesquisadores Eleonora Trajano (USP), Ivo Karmann (USP), Rodrigo Lopes Ferreira (UFLA) e Maria Elina Bichette (UFSCar).

the image in Figure 9, the thicker edges reveal actors who have stronger connections, such as researchers Eleonora Trajano (USP), Ivo Karmann (USP), Rodrigo Lopes Ferreira (UFLA), and Maria Elina Bichette (UFSCar).

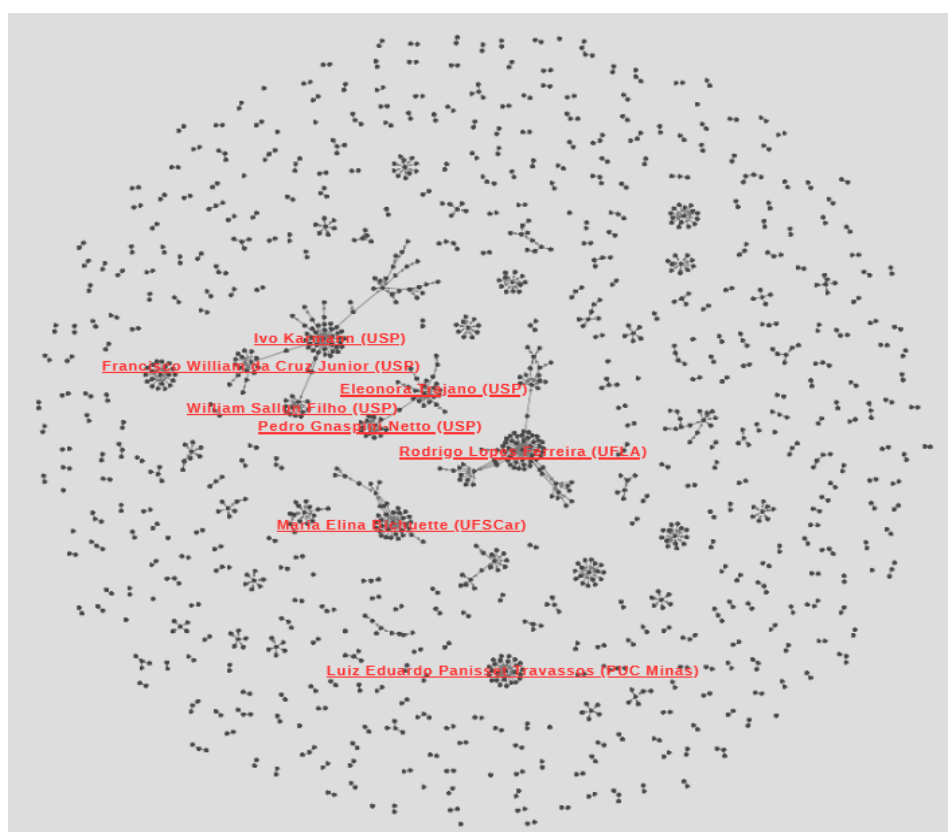


Figura 9 - Rede de relações entre orientadores-orientados. Fonte: Autoria própria.

Figure 9 - Relationship network between advisors and advisees. Source: Own work.

A modularidade da rede, está associada a um número elevado de comunidades (446). Esse valor é considerável, dado o total de nós, e indica que a rede está fragmentada em muitos grupos pequenos, com pouca interação entre as comunidades. A análise do tamanho das comunidades reforça essa observação, mostrando que a maioria dos grupos possui menos de 10 indivíduos, enquanto apenas algumas poucas comunidades maiores se destacam. Isso pode ser um reflexo de um

The modularity of the network is associated with a high number of communities (446). This value is considerable, given the total number of nodes, and indicates that the network is fragmented into many small groups, with little interaction between communities. An analysis of community size reinforces this observation, showing that most groups have fewer than 10 individuals, while only a few larger communities stand out. This may reflect an academic landscape characterized by isolated research groups

cenário acadêmico caracterizado por grupos de pesquisa isolados, focados em temas ou regiões específicas.

A distribuição de grau da rede revela que a maior parte dos nós tem um grau muito baixo, enquanto poucos nós possuem um número significativamente maior de conexões. Isso sugere a presença de orientadores altamente influentes ou ativos, que concentram uma parcela considerável das relações na rede. Essa característica é comum em redes acadêmicas ou sociais, onde algumas figuras centrais desempenham papéis importantes na formação e orientação de novos pesquisadores.

De maneira geral, a rede apresenta um alto grau de fragmentação e descentralização. Isso pode ser interpretado como um reflexo da natureza especializada e regionalizada da pesquisa em espeleologia no Brasil. No entanto, a baixa conectividade também aponta para uma oportunidade de fomentar a formação de coletivos de colaboração entre os diferentes grupos e comunidades, sendo esse um aspecto fundamental para a evolução do conhecimento na área que está se consolidando, como o caso do estudo de caverna e do patrimônio espeleológico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A base de dados ora apresentada, representa um esforço coletivo sobre pesquisas e pesquisadores que desenvolvem estudos em espeleologia e temas afins, propiciando informações para a constituição de uma listagem, desde 1944 até 2024, e permitiu analisar a dinâmica da produção científica relacionada com as cavernas, paisagens cársticas e sítios espeleológicos e outros temas associados, propiciando a análise das dinâmicas cientométricas pertinentes.

focused on specific topics or regions.

The network distribution degree reveals that most nodes have a very low degree, while a few nodes have a significantly higher number of connections. This suggests the presence of highly influential or active advisors, who concentrate a considerable portion of the relationships in the network. This characteristic is common in academic or social networks, where a few central figures play important roles in training and mentoring new researchers.

In general, the network is highly fragmented and decentralized. This can be interpreted as a reflection of the specialized and regionalized nature of speleological research in Brazil. However, low connectivity also points to an opportunity to foster the formation of collaborative collectives between different groups and communities, which is a fundamental aspect for the evolution of knowledge in this consolidating field, as is the case with cave studies and speleological heritage.

FINAL REMARKS

The database presented here represents a collective effort involving research and researchers working in speleology and related fields, providing information for the creation of a list covering the period from 1944 to 2024. It has enabled the analysis of scientific production related to caves, karst landscapes, speleological sites, and other associated topics, facilitating the analysis of relevant scientometric dynamics.

Com isso foi possível observar os caminhos acadêmicos percorridos, o papel das universidades, as tendências gerais de produção científica, as lacunas existentes e os percursos formativos. Por outro lado, ressalta-se a provisoriidade dos dados, devido às limitações do levantamento realizado e dos exercícios métricos propostos. Espera-se que o presente estudo estimule ações colaborativas, visando a ampliação da investigação, obtendo dados mais sistemáticos.

Se faz necessária a constituição de catálogos descritivos dos trabalhos acadêmicos com ampliação dos procedimentos para a busca e catalogação das informações, a análise da produtividade e tendências da pesquisa sobre cavernas e a busca de recursos para mapear a genealogia do processo de formação científica básica e o papel educativo dos institutos e centros de pesquisa universitária.

O estudo demonstra que o CV-LATTES do Ministério da Ciência e Tecnologia continua sendo a mais importante e eficiente fonte de informações, tal como observado no estudo realizado por Nascimento (2005), Figueiredo *et al.* (2005) e Wendt (2024). Isso reforça que os métodos de análise cientométrica permitem uma melhor compreensão da trajetória para a constituição de um campo interdisciplinar do conhecimento, como é o caso da espeleologia.

Os resultados demonstraram acentuada evolução acadêmica sobre o assunto, conforme os dados de Figueiredo *et al.* (2017): a) 1944-2005 (298) e na sua atualização b) 2005-2015 (214), e no estudo atual c) 2015-2024 (619). Ressalta-se que entre o primeiro e o segundo período, que abrange 70 anos e no estudo atual (c) com apenas 10 anos, a quantidade de trabalhos mais do que duplicou. Neste intervalo houve um signifi-

This made it possible to observe the academic paths taken, the role of universities, general trends in scientific production, existing gaps, and training paths. On the other hand, it is important to note the provisional nature of the data, due to the limitations of the survey conducted and the metric exercises proposed. It is hoped that this study will stimulate collaborative actions aimed at expanding the research and obtaining more systematic data.

It is necessary to create descriptive catalogs of academic papers, expanding procedures for finding and cataloging information, analyzing productivity and trends in cave research, and seeking resources to map the genealogy of the basic scientific training process and the educational role of university research institutes and centers.

The study shows that the CV-LATTES of the Ministry of Science and Technology remains the most important and efficient source of information, as observed in the study conducted by Nascimento (2005), Figueiredo et al. (2005), and Wendt (2024). This reinforces that scientometric analysis methods allows a better understanding of the trajectory for the constitution of an interdisciplinary field of knowledge, as is the case with speleology.

The results demonstrated marked academic progress on the subject, according to data from Figueiredo et al. (2017): a) 1944-2005 (298) and in its update b) 2005-2015 (214), and in the current study c) 2015-2024 (619). It should be noted that between the first and second periods, covering 70 years, and in the current study (c) covering only 10 years, the number of papers more than doubled. During this interval, there was significant progress in Brazilian academic production on caves and karst, especially in the areas of Life Sciences and Earth Sciences.

It should also be noted that the provisional nature of the study is due to the speed and dynamics of

cativo avanço na produção acadêmica brasileira sobre cavernas e o carste, em especial na área das Ciências da Vida e das Ciências da Terra.

Observa-se, ainda, que a provisoriedade do estudo realizado é devido à velocidade e às dinâmicas da produção científica na área de espeleologia. De um lado, a todo instante uma nova pesquisa é realizada. Por outro lado, muitos dados demoram para aparecer, seja pelo lançamento tardio dos dados, seja pela dificuldade de acesso de algumas dessas informações, tendo em vista que nem todas instituições tem um repositório de informações ágil e informatizado.

O presente estudo demonstrou a importância da universidade na formação e qualificação de pesquisadores em seus primeiros passos investigativos e sua contribuição para a divulgação científica e aprofundamento dos estudos e o conhecimento sobre o patrimônio espeleológico.

Precisa-se, igualmente, destacar o papel dos grupos de espeleologia, que estimulam os seus membros a procurar aprofundamento teórico-metodológico, sendo que muitos desses grupos criaram relações íntimas com as universidades, promovendo a inter-relação entre exploração, técnica espeleológica e pesquisa científica. No mapeamento produzido em 2023 por Edvard Magalhães (EGB), identifica-se a existência de 75 grupos espeleológicos, entre ativos e inativos, sendo que pelo menos 17 deste grupos possuem relações diretas ou indiretas com universidades. (Figura 10).

scientific production in the field of speleology. On one hand, new research is constantly being carried out. On the other hand, much of the data takes time to appear, either due to the late release of data or the difficulty in accessing some of this information, given that not all institutions have an agile and computerized information repository.

This study demonstrated the importance of universities in training and qualifying researchers in their early investigative steps and their contribution to scientific dissemination and the deepening of studies and knowledge about speleological heritage.

It is also important to highlight the role of caving groups, which encourage their members to seek theoretical and methodological knowledge. Many of these groups have established close relationships with universities, promoting the interrelation between exploration, caving techniques, and scientific research. In the mapping produced in 2023 by Edvard Magalhães (EGB), 75 speleological groups were identified, including both active and inactive groups, with at least 17 of these groups having direct or indirect relationships with universities. (Figure 10).



Figura 10 - Mapa da distribuição dos grupos espeleológicos no Brasil (maio, 2023). Fonte: Edvard Magalhães, atualização em 31 dez. 2024.

Figure 10 - Map showing the distribution of speleological groups in Brazil (May 2023). Source: Edvard Magalhães, updated on December 31, 2024.

Com relação a esse aspecto, deve-se destacar a Sociedade Excursionista e Espeleológica (SEE) e a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), que possuem uma relação desde 1937, portanto, em 2027 a SEE completará 90 anos formando inúmeras gerações de espeleólogos. (Figura 11).

In this regard, it is worth highlighting the Excursionist and Speleological Society (SEE) and the Federal University of Ouro Preto (UFOP), which have had a relationship since 1937. As such, in 2027, the SEE will celebrate its 90th anniversary, having trained countless generations of speleologists. (Figure 11).



Figura 11 - Gerações de espeleólogos e pesquisadores do carste, a SEE/UFOP durante o 24o. CBE (Ouro Preto). Fonte: Luiz Afonso V. Figueiredo (1997)

Figure 11 - Generations of speleologists and karst researchers, SEE/UFOP during the 24th CBE (Ouro Preto). Source: Luiz Afonso V. Figueiredo (1997)

REFERÊNCIAS / REFERENCES

- BELTRÃO, M. C. M. C. *Pré-História do Estado do Rio de Janeiro*. 1969. Tese (Doutorado em Arqueologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1969.
- BELTRÃO, M. C. M. C. *Pré-História do Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: Forense- Universitária, Instituto Estadual do Livro, 1978.
- BONDUKI, M. Í. *A implantação de áreas protegidas e o turismo no Bairro da Serra – Iporanga (SP)*. 2002. 148 f. il. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- CABRAL, F. C. F. *O uso dos isótopos naturais de carbono no estudo das águas subterrâneas do calcário Bambuí: região central da Bahia*. 1978. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1978
- CARTELLE-GUERRA, C. *Sobre um Edentata Milodontidae do Pleistoceno-subrecente da Bahia, Brasil*. 1978. Dissertação (Mestrado em Geociências, área de Paleontologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 1978.
- CASTANHA, R. G. *Acoplamento bibliográfico como proposta metodológica para a mensuração da intensidade das ligações em genealogia acadêmica: a influência teórica de Aldo Barreto na Ciência da Informação*. 2019. 81 f. il. Dissertação (Mestrado em Ciência da Informação) - Programa de Pós- Graduação em Ciência da Informação, Faculdade de Filosofia e Ciências, Universidade Estadual Paulista, Marília-SP, 2019.
- CASTANHA, R. G. *Coeficiente de acoplamento bibliográfico genealógico para mensurar a intensidade da preservação das correntes teórico-metodológicas nas redes de genealogia acadêmica*. 2023. 149 f. : tabs. Tese (Doutorado em Ciência da Informação) - Faculdade de Filosofia e Ciências, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Marília, 2023.
- CVIJLIĆ, J. *Carste: uma monografia geográfica* (1895). Tradução de Luiz Eduardo Panisset Travassos. Revisão de João Henrique Rettore Totaro. Belo Horizonte: PUC-Minas, 2017.
- COTA, J. M. M. C.; LAENDER, A. H. F.; PRATES, Raquel O. *Árvore da Ciência: uma plataforma para exploração da genealogia acadêmica brasileira*. In: SEMINÁRIO INTEGRADO DE SOFTWARE E HARDWARE (SEMISH), 48, 2021, virtual. *Anais...* Porto Alegre: SBC, 2021.
- DAMASCENO, R. J. P., ROSSI, L., MENA-CHALCO, J. P. Identificação do grafo de genealogia acadêmica de pesquisadores: uma abordagem baseada na Plataforma Lattes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE BANCOS DE DADOS-SBBD, 32, 2017, Uberlândia. *Anais...* Uberlândia, MG: 2017.
- DAMASCENO, R. J. P.; ROSSI, L.; MUGNAINI, Rogério, MENA-CHALCO, J. P. The Brazilian academic genealogy: evidence of advisor–advisee relationships through quantitative analysis. *Scientometrics*, [s. l.], v. 119, n. 1, p. 303-333, 2019.

DAVID, S. V.; HAYDEN, B. Y. Neurotree: a collaborative, graphical database of the academic genealogy of neuroscience. *PloS one*, v. 7, i. 10, e46608, 2012.

DOLABELA, E. F. *Estudo de regiões cárnicas*. 367f. il. Tese (Catedrático em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte. 1958.

DUARTE, Cristiane Delfina Santos. *A mulher original: produção de sentidos sobre a arqueóloga Niéde Guidon*. 2015. 241 f. il. color. Dissertação (Mestrado em Divulgação Científica e Cultural) - Laboratório de Estudos Avançados em Jornalismo, Instituto de Estudos da Linguagem, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2015.

FIGUEIREDO, Luiz Afonso Vaz de. *"O 'meio ambiente' prejudicou a gente...": políticas públicas e representações sociais de preservação e desenvolvimento; desvelando a pedagogia de um conflito no Vale do Ribeira (Iporanga-SP)*. 1999. 489 p. + anexos, il. color. Dissertação (Mestrado em Educação, área de Educação, Sociedade e Cultura) - Faculdade de Educação, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2000.

FIGUEIREDO, Luiz Afonso Vaz de. *Cavernas como paisagens racionais e simbólicas: imaginário coletivo, narrativas visuais e representações da paisagem e das práticas espeleológicas*. 2010. 466 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

FIGUEIREDO, Luiz Afonso Vaz de; MARTINS, Carlos Adriano; OLIVEIRA, Rosângela R. Produção técnico-científica em espeleologia: panorama preliminar brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 24, 1997, Ouro Preto. *Anais [...]*. Ouro Preto, MG: SEE/SBE, 1997.

FIGUEIREDO, Luiz Afonso V.; LINO, Clayton F.; MARINHO, Paloma A.; ZAMPAULO, Robson A.; NAVAS, Magali P.; LUZ, Claudia S.; ALLEGRI, Claudia Q. S.; LOPEZ, Ana M. Pesquisa em unidades de conservação e sítios espeleológicos: o PETAR (SP) como exemplo da produção e integração de conhecimentos científicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 27, 2003, Januária. *Anais [...]*. Januária, MG: SBE, 2003. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais27cbe/27cbe_045-051.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2025.

FIGUEIREDO, Luiz Afonso Vaz de; ZAMPAULO, Robson A.; MARINHO, Paloma Alves. Pesquisa científica e qualificação acadêmica em espeleologia e temas afins: desenvolvimento de um catálogo sobre a produção universitária brasileira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 28, 2005, Campinas. *Anais [...]*. Campinas, SP: SBE, 2005. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais28cbe/28cbe_044-065.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2025.

FIGUEIREDO, Luiz Afonso V.; ZAMPAULO, Robson A.; SILVA-JUNIOR, Arnaldo A.. Banco de dados em espeleologia e temas afins (BD-ESPELEO): atualização do catálogo de produção científica (2005- 2015). In: RASTEIRO, M.A.; TEIXEIRASILVA, C.M.; LACERDA, S.G. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 34, 2017. Ouro Preto. *Anais [...]*. Campinas: SBE, 2017. p.101-126. Disponível em: http://www.cavernas.org.br/anais34cbe/34cbe_101-126.pdf. Acesso em: 10 jun. 2025.

FIGUEIREDO, Luiz Afonso V.; SILVA-JUNIOR, Arnaldo A.; ZAMPAULO, Robson A. Scientific research and academic qualification in speleology and related themes: historical aspects and scientific genealogy in Brazil (1945-2020). In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY-ICS, 18, 2022. Savoie-Mont Blanc, France. *Proceedings* [...]. Savoie-Mont Blanc, France: 2022. Disponível em: http://uis-speleo.org/wp-content/uploads/2022/09/ACTES_CONGRES UIS_WEB_VOLUME_2.pdf. Acesso em: 09 mar. 2023.

FONSECA, J. S. *Taiassuídeos do Pleistoceno de cavernas calcárias de Minas Gerais*. 1979. Dissertação (Mestrado em Geociências, área de Paleontologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 1979. Orientador: Carlos de Paula Couto (UFRGS).

GOMES, F. V. M. *Aplicação dos isótopos do urânio como traçadores de água subterrânea do Bambuí – Bahia*. 1978. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1978.

GUERRA, A. M. *Processos de carstificação e hidrogeologia do grupo Bambuí na região de Irecê- Bahia*. 132 f. il. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1986.

GUIMARÃES, A. P. *Paisagem física da bacia do Rio das Velhas*. Tese (Concurso de Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 1953.

GUIDON, N. *Les peintures rupestres de Varzea Grande, Piauí, Brésil*. 1975. Tese (Doutorado em Pré-História) - Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Paris, França, 1975

KARMANN, I. *Estudo multidisciplinar da Caverna dos Ecos, Corumbá de Goiás (GO)*. 1981. Iniciação Científica (Graduação em Geologia) - FAPESP, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, s. d.

KARMANN, I. *Paleontologia do Vale do Ribeira, Exploração II: geologia, arqueologia e paleontologia do Abismo Ponta de Flecha (SP-175), Iporanga-SP*. 1982. 37 f. Iniciação Científica (Graduação em Geologia) - FAPESP, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1982.

KARMANN, I. *O Rio Pardo (proterozóico médio a superior): uma cobertura paraplataformal da margem sudeste do cráton do São Francisco*. 1987. 127 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

KARMANN, I. *Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do Alto Vale do rio Ribeira de Iguape, sudeste do estado de São Paulo*. 1994. 228p. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

KARMANN, I. *Carste e cavernas no Brasil: distribuição, dinâmica atual e registros sedimentares, breve histórico e análise crítica das pesquisas realizadas no âmbito do IGc-USP*. 2016. 253f. il. color. Tese Livre Docência - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

KOHLER, H. C. *Geomorfologia cárstica da região de Lagoa Santa - Minas Gerais*. 1989. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

KRONE, Ricardo. As grutas calcareas de Iporanga. *Rev. Mus. Paulista*, São Paulo: n. 3, p.477-500, 1898.

LINO, C. F. *Vale do Ribeira: alternativa turismo*. Trabalho Graduação (Bacharel em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Mackenzie, São Paulo, 1976.

LINO, Clayton Ferreira. *Iporanga: um plano de desenvolvimento urbano e proteção do patrimônio cultural*. 1978. Monografia (Especialização em Patrimônio Ambiental Urbano) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1978.

LUNA FILHO, Pedro Ernesto de. *Peter Wilhem Lund: o auge das suas investigações científicas e a razão para o término das suas pesquisas*. 2007. Tese (Doutorado em História Social) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

LUND, Peter Wilhelm: *Memórias sobre a paleontologia brasileira*. Revisão e comentários de Carlos de Paula Couto. Rio de Janeiro: INL, 1950. [originais produzidos entre 1884 e 1946].

MACIAS-CHAPULA, C. A. O papel da informetria e da cienciometria e sua perspectiva nacional e internacional. *Ciência da Informação*, Brasília, v. 27, n. 2, 134-140, 1998.

MARANCA, S. *Análise de pinturas rupestres zoomorfas do abrigo Toca da Entrada do Pajauí, estado do Piauí*. 1979. Tese (Doutorado em Arqueologia) – Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 1979.

MARINHO, J. M. L. *Reconhecimento geofísico da região de Irecê-Bahia*. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1978.

MARQUES, Fabrício. A dinâmica da crise dos doutores: programas de pós-graduação amargam perda de interesse e planejam mudanças para responder a novas demandas. *Pesquisa FAPESP*, n. 340, p. 29-33, jun. 2024.

MARTINS, Carlos Eduardo. *Ricardo Krone (1861-1917): Um naturalista no Vale do Ribeira e sua contribuição à Espeleologia e à Arqueologia no Brasil*. 2023. 219 f. il. Tese (Doutorado em Ciências, área de Ensino e História de Ciências da Terra) - Programa de Pós-Graduação em Ensino e História de Ciências da Terra, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. 2023.

MATTES, J. Giving us an identity: the construction of memory in the history of speleology. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 16, 2013, Brno. *Proceedings...* Brno: UIS, 2013. p. 75-80.

MATTES, J. Disciplinary identities and crossing boundaries. The function of history for the academization of speleology in the first half of the 20th century. *Earth Sciences History*, v. 35, n. 2, p. 275-295, 2015.

MATTES, J. Das Karstphänomen revisited: serbian geoscientist Jovan Cvijić and the (inter)nationalization of geomorphological thought. In: CONGRESS OF SLAVIC GEOGRAPHERS AND ETHNOGRAPHERS, 5th, 2024, Belgrade. *Proceedings...* Belgrade, Serbia, 2024. p. 133-138.

MOREIRA, T. H. J.; DIAS, T. M. R.; MOITA, G. F. Uma estratégia baseada em árvores genealógicas científicas para visualização da relação orientador-orientado In: ENCONTRO BRASILEIRO DE BIBLIOMETRIA E CIENTOMETRIA, 5., 2016, São Paulo. *Anais...* São Paulo: USP, 2016.

MOREIRA, T. H. J.; DIAS, T. M. R.; MOITA, G. F.; DIAS, P. M. Árvores genealógicas acadêmicas como estratégia para análises do processo de orientação. *Pesq. Bras. em Ciência Inf. e Bib.*, João Pessoa-PB, v. 13, n. 2, 246-254, 2018.

NASCIMENTO, M. A. R. *Os instrumentos de avaliação da produção científica no campo das ciências humanas e sociais: um estudo de caso da antropologia do Brasil*. Dissertação (Mestrado em Política Científica e Tecnológica) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2005.

NOU, E. A. V. *A pedogênese sobre calcário Bambuí: estudo de uma topossequência – cambisol, cambisol vértico, vertisol. dinâmica dos carbonatos. região de Irecê-BA*. 1978. 138f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, 1978.

PARRA, M. R; COUTINHO, R. X.; PESSANO, E. F. C. Um breve olhar sobre a cienciometria: contribuições para o ensino de ciências. *Contexto e Educação*, Ijuí-RS, a. 34, n. 107, p. 126-141, jan./abr. 2019

PAVAN, C. *Os peixes cegos das cavernas de Iporanga e a evolução*. 1944. 104 p Tese (Doutorado em Fisiologia Animal) - Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1944.

PAVAN, C. Os peixes cegos das cavernas de Iporanga e a evolução. *Boletins da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo*. Série Biologia Geral, v. 79, n. 6, p. 9-104, 1945.

PAVAN, C.; BARROS, F. A. F. *Crodowaldo Pavan: memória de sua trajetória [entrevista]*. Brasília: SEDOC-CNPq, MCT, 2009.

PERONDINI, A. L. P. Crodowaldo Pavan e a genética no Brasil. *Ciência e Cultura*, São Paulo: SBPC, v. 62, n. Esp 2, 2010.

SANCHEZ, L. E. Bibliografia espeleológica brasileira. *Ciência e Cultura*, São Paulo: SBPC, v. 38, n. 5, 927-932, 1986.

SANTOS, S. M. L. dos. *Contribuição à caracterização e classificação de alguns solos desenvolvidos sobre calcário da região de Irecê Xique-Xique-BA*. 1976. 188f. Dissertação (Mestrado em Geociências, área de Pedologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador – BA, 1976.

SCHUT, P.-O. E. A. Martel: the traveller who almost became an academician. *Acta Carsologica*. Ljubjana, Eslovênia: KRI, v. 35, n. 1, p. 149-157, 2006a.

SCHUT, P.-O. Spéléologie et spéléisme: de la science au plein air (1930-1945). *Staps [Revue internationale des sciences du sport et de l'éducation physique]*, v. 74, n. 4, p. 99-115, 2006b.

SHAW, T. R. Adolf Schmidl (1802-1863): the father of modern speleology? *International Journal of Speleology*, n. 10, p. 253-267, 1978.

SHAW, T. R. *History of cave science: the exploration and study of limestone caves, to 1900*. New South (Austrália): The Sydney Speleological Society, 1992.

SILVA, A. B. *Análise morfoestrutural, hidrogeológica, hidroquímica do aquífero cárstico do Jaíba, norte de Minas Gerais*. 1984. 189p. Tese (Doutorado em Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

SILVA, J. A.; BIANCHI, M. L. P. Cientometria: a métrica da ciência. *Paidéia*, v. 11, n. 20, 2001.

SILVEIRA, E. A queda de um dogma. Crodowaldo Pavan: a contribuição à biologia, à política científica e tecnológica e à difusão da ciência. *Pesquisa FAPESP*, n. 168, p. 67-79, fev. 2010.

SIQUEIRA, A. F. *O uso de dados isotópicos e químicos como indicadores de origem das águas e sais dissolvidos no aquífero calcário Bambuí, Irecê, Bahia, Brasil*. 1978. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1978.

SOUZA, M. P. *Estudos preliminares de criadouros de flebotomíneos (diptera: psychodidae), Gruta da Lapinha, município de Lagoa Santa, MG*. 1979. 34f. Dissertação (Mestrado em Parasitologia) – Departamento de Parasitologia, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 1979.

SOUZA-CUNHA F. L. *Sobre o Hippiidion da Lapa Mortuária dos Confins, Lagoa Santa, Minas Gerais*. Tese (Livre-docência em Paleontologia), Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1960.

SPINAK, E. Indicadores cientométricos. *Ciência da Informação*, Brasília, v. 27, n. 2, 141-148, 1998.

TRAJANO, E. *Padrões de distribuições e movimentos de morcegos cavernícolas no Vale do Alto Ribeira de Iguape, São Paulo*. 154 f. Dissertação (Mestrado em Zoologia) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

TRAJANO, E. Cavernícolas brasileiros: uma bibliografia bioespeleológica. *Espeleo-Tema*. São Paulo: SBE, n. 16, 103-108, 1992.

TRAVASSOS, L. E. P. Contribuições científicas do professor dr. Heinz Charles Kohler para a geomorfologia cárstica tropical brasileira. *Sociedade e Natureza*, v. 22, n. 3, p. 625-637, dez. 2010.

TRAVASSOS, L. E. P. A importância de Cvijić para a carstologia mundial: um prefácio para a edição brasileira do “Carste, uma monografia Geográfica”. In: CVJIĆ, J. *Carste: uma monografia geográfica* (1895). Tradução de Luiz Eduardo Panisset Travassos. Revisão de João Henrique Rettore Totaro. Belo Horizonte: PUC-Minas, 2017.

VANTI, Nadia Aurora Peres. *Avaliação de um banco de dissertações e teses da ABA: uma análise cientométrica*. Campinas: PUC, 2001. Dissertação (Mestrado em Ciência da Informação) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas-SP, 2001.

VANTI, Nadia. A cientometria revisitada à luz da expansão da ciência, da tecnologia e da inovação. *Ponto de Acesso*, Salvador, v.5, n.3, p. 05-31, dez. 2011.

WENDT, L. G. *A paleontologia brasileira: uma análise cientométrica a partir do Currículo Lattes*. 2024. 305 f. il. Dissertação (Mestrado em Ciência da Informação) - Programa de Pós-Graduação em Ciência

da Informação, Faculdade de Biblioteconomia e Comunicação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

ZAMPAULO, R. A.; PROUS, X. (org.). *Fauna cavernícola do Brasil*. Belo Horizonte: Rupestre, 2022.

ZAMPAULO, R. A.; SIMÕES, M. H. História e evolução do conhecimento sobre a fauna cavernícola do Brasil. In: ZAMPAULO, R. A.; PROUS, X. (org.). *Fauna cavernícola do Brasil*. Belo Horizonte: Rupestre, 2022.

ZÍLIO, Celso; SÁNCHEZ, Luis Enrique. Bibliografia espeleológica brasileira. *Espeleo-Tema*, São Paulo: SBE, n. 13, p. 42-51, 1979.

APÊNDICE A

CATÁLOGO GERAL E PLANILHA GERAL DE DADOS
DA PESQUISA PARA O BD-ESPELEO ZENODO

Link: <https://zenodo.org/records/16970131>

APPENDIX A

CATÁLOGO GERAL E PLANILHA GERAL DE DADOS DA
PESQUISA PARA O BD-ESPELEO ZENODO

Link: <https://zenodo.org/records/16970131>

DIVERSIDADE DE MORCEGOS EM CAVERNAS DE SÃO FÉLIX DO XINGU, PARÁ: ANÁLISE ESPACIAL E DINÂMICA SAZONAL

BAT DIVERSITY IN CAVES IN SÃO FÉLIX DO XINGU, PARÁ: SPATIAL ANALYSIS AND SEASONAL DYNAMICS

Sebastião Maximiano Corrêa Genelhú

Laboratório de Diversidade e Sistemática de Mamíferos, e
Departamento de Ecologia e Conservação da Universidade
Federal de Lavras, MG, Brasil.

E-mail: sebastiao Genelhum@gmail.com

Matheus Henrique Simões

VALE - Gerência de Espeleologia e Tecnologia Ferrosos, Nova
Lima, MG, Brasil.

E-mail: matheus.simo es@vale.com

Miguel Angelo Cançado Assis

AMPLO Engenharia e Gestão de projetos LTDA.

E-mail: cancado assis@gmail.com

Mariane Soares Ribeiro

VALE - Gerência de Espeleologia e Tecnologia Ferrosos, Nova
Lima, MG, Brasil.

E-mail: mariane.ribeiro@vale.com

Xavier Prous

VALE - Gerência de Espeleologia e Tecnologia Ferrosos, Nova
Lima, MG, Brasil.

E-mail: xavier.prous@vale.com

William Douglas Carvalho

Terrestrial Ecology Group (TEG-UAM) e Centro de Investigación
en Biodiversidad y Cambio Global (CIBC-UAM) da Universidad
Autónoma de Madrid – UAM

Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical (PPG-
BIO) da Universidade Federal do Amapá - UNIFAP

E-mail: william.mustin@uam.es

RESUMO

Morcegos desempenham papéis cruciais nos ecossistemas, com muitas espécies utilizando cavernas como refúgios. A riqueza e composição de suas comunidades são influenciadas por características físicas das cavernas e condições ambientais. Este estudo investigou os fatores que determinam a dissimilaridade entre comunidades de morcegos cavernícolas no município de São Félix do Xingu, Pará, Brasil, questionando se existe variação na composição de espécies entre as estações seca e chuvosa, se a dissimilaridade entre as assembleias está relacionada à distância geográfica e às características das cavernas, e quais características das cavernas explicam a presença e composição das assembleias de morcegos. Foram amostradas 90 cavernas durante as estações seca e chuvosa, identificando 11 espécies em 83 cavernas (93,3% do total). As espécies *Peropteryx kappleri* e *Glossophaga soricina* foram as mais frequentes, e análises confirmaram a influência da sazonalidade na composição das comunidades. A diversidade beta total foi moderada ($\beta_{total} = 0,282$). A análise de múltiplas regressões mostrou que a distância geográfica teve impacto mínimo e estatisticamente não significativo, enquanto o volume das cavernas demonstrou uma influência marginalmente significativa na diferença de riqueza ($p = 0,06$). Modelos de mínimos quadrados generalizados indicaram que cavernas maiores estão associadas a maior riqueza de espécies ($p = 0,02$). A Redundância Parcial (RDAP) e redundância parcial baseada em distâncias (dbRDAP) destacou variáveis como altitude e desenvolvimento horizontal como fatores significativos para a variação na composição de espécies, especialmente durante a estação chuvosa. Os resultados sugerem que a sazonalidade

ABSTRACT

Bats play crucial roles in ecosystems, with many species using caves as refuges. The richness and composition of their communities are influenced by the physical characteristics of caves and environmental conditions. This study investigated the factors that determine the dissimilarity between cave bat communities in the municipality of São Félix do Xingu, Pará, Brazil. It was questioned whether there is variation in species composition between the dry and rainy seasons, whether the dissimilarity between assemblages is related to geographical distance and cave characteristics, and which cave characteristics explain the presence and composition of bat assemblages. Ninety caves were sampled during the dry and rainy seasons, identifying 11 species in 83 caves (93.3% of the total). *Peropteryx kappleri* and *Glossophaga soricina* species were the most frequent, and analyses confirmed the influence of seasonality on community composition. Total beta diversity was moderate ($= 0.282$). Multiple regression analysis showed that geographical distance had a minimal and statistically insignificant impact, while cave volume had a marginally significant influence on species richness ($p = 0.06$). Generalized least squares models indicated that larger caves are associated with greater species richness ($p = 0.02$). Partial redundancy analysis (RDAP) and distance-based partial redundancy analysis (dbRDAP) highlighted variables such as altitude and horizontal development as significant factors for variation in species composition, especially during the rainy season. The results suggest that seasonality and physical characteristics of caves, such as volume, play essential roles in structuring bat communities. This study contributes to a more comprehensive understanding of the ecology of cave metacommunities, highlighting the impor-

dade e características físicas das cavernas, como volume, desempenham papéis essenciais na estruturação das comunidades de morcegos. Este estudo contribui para uma compreensão mais abrangente da ecologia de metacomunidades cavernícolas, ressaltando a importância de múltiplos fatores ambientais e espaciais na conservação destes habitats.

PALAVRAS-CHAVE: Autocorrelação espacial, Diversidade beta, Cavernas, Ecologia de poleiros, Morcegos.

INTRODUÇÃO

A primeira lei da geografia de Tobler (1970) afirma que tudo está relacionado, mas a proximidade intensifica essas relações. Esse princípio fundamenta os conceitos de dependência e autocorrelação espacial, que são cruciais para compreender padrões, fluxos e interações em escalas geográficas variadas (Legendre, 1993; Fortin & Dale, 2014). No estudo de comunidades ecológicas, essas ideias têm sido amplamente empregadas para desvendar padrões de composição de espécies, ajudando a quantificar a influência de fatores como distância geográfica, frequentemente associada a menor similaridade entre comunidades devido a limitações na dispersão das espécies (Nekola & White, 1999; Soininen, 2010).

Dentro desse contexto, os padrões de diversidade beta (β) são uma abordagem poderosa para investigar a variação na composição de espécies entre diferentes locais (Baselga, 2010). A diversidade β reflete dois processos principais: turnover e perda ou ganho de espécies (Carvalho et al., 2013). Enquanto o turnover captura mudanças na identidade das espécies entre locais, a perda ou ganho está associada a diferenças na riqueza de espécies, frequentemente relacionadas a pa-

tance of multiple environmental and spatial factors in the conservation of these habitats.

KEYWORDS: *Spatial autocorrelation, Beta diversity, Caves, Roost ecology, Bats.*

INTRODUCTION

Tobler's first law of geography (1970) states that everything is related, but proximity intensifies these relationships. This principle underpins the concepts of spatial dependence and autocorrelation, which are crucial for understanding patterns, flows, and interactions at various geographic scales (Legendre, 1993; Fortin & Dale, 2014). In the study of ecological communities, these ideas have been widely used to uncover patterns of species composition, helping to quantify the influence of factors such as geographic distance, often associated with lower similarity between communities due to limitations in species dispersal (Nekola & White, 1999; Soininen, 2010).

Within this context, beta diversity (β) patterns are a powerful approach for investigating variation in species composition between different locations (Baselga, 2010). Beta diversity reflects two main processes: turnover and species loss or gain (Carvalho et al., 2013). While turnover captures changes in species identity between sites, loss or gain is associated with differences in species richness, often related to nesting patterns (Atmar & Patterson, 1993; Almeida-Neto et al., 2008). These processes occur in combination in nature, creating complex patterns of dissimilarity between communities (Carvalho et al., 2013; Stevens, 2022).

drões de aninhamento (Atmar & Patterson, 1993; Almeida-Neto et al., 2008). Esses processos ocorrem de forma combinada na natureza, criando padrões complexos de dissimilaridade entre comunidades (Carvalho et al., 2013; Stevens, 2022).

A aplicação desses conceitos em estudos ecológicos é particularmente promissora em grupos que desempenham papéis fundamentais nos ecossistemas, como os morcegos (Kunz et al., 2011). Esses mamíferos, ao combinarem alta mobilidade, diversidade funcional e sensibilidade às mudanças ambientais, tornam-se modelos ideais para investigar padrões de diversidade β em diferentes escalas espaciais e temporais (Kunz et al., 2011; Burgin et al., 2018). Além disso, as comunidades de morcegos que utilizam cavernas como abrigos são moldadas por uma interação complexa de fatores ambientais e estruturais, como temperatura, umidade, área e complexidade das cavernas (Ávila-Flores & Medellín, 2004; Oliveira et al., 2018; Barros et al., 2020).

As características físicas das cavernas, como área e volume, não apenas influenciam a riqueza e abundância das espécies, mas também determinam a oferta de microhabitats e a conectividade entre populações (Brunet & Medellín, 2001; Rodríguez-Durán & Soto-Centeno, 2003; Ávila-Flores & Medellín, 2004; Luo et al., 2013; Bu et al., 2014; Torqueti et al., 2017; Oliveira et al., 2018; Vargas-Mena et al., 2020; Barros et al., 2020, 2023). Essas dinâmicas são moduladas por fatores sazonais que afetam a disponibilidade de recursos e as condições ambientais (Leal & Bernard, 2021; Barros et al., 2023). Apesar de sua relevância, ainda há lacunas significativas no entendimento sobre a ecologia de comunidades cavernícolas de morcegos, especialmente no Brasil, incluindo padrões de uso entre diferentes cavernas e a influência da paisagem do entorno sobre a com-

The application of these concepts in ecological studies is particularly promising in groups that play key roles in ecosystems, such as bats (Kunz et al., 2011). These mammals, combining high mobility, functional diversity, and sensitivity to environmental changes, are ideal models for investigating patterns of β diversity at different spatial and temporal scales (Kunz et al., 2011; Burgin et al., 2018). In addition, bat communities that use caves as shelters are shaped by a complex interaction of environmental and structural factors, such as temperature, humidity, area, and cave complexity (Ávila-Flores & Medellín, 2004; Oliveira et al., 2018; Barros et al., 2020).

The physical characteristics of caves, such as area and volume, not only influence species richness and abundance, but also determine the availability of microhabitats and connectivity between populations (Brunet & Medellín, 2001; Rodríguez-Durán & Soto-Centeno, 2003; Ávila-Flores & Medellín, 2004; Luo et al., 2013; Bu et al., 2014; Torqueti et al., 2017; Oliveira et al., 2018; Vargas-Mena et al., 2020; Barros et al., 2020, 2023). These dynamics are modulated by seasonal factors that affect resource availability and environmental conditions (Leal & Bernard, 2021; Barros et al., 2023). Despite their relevance, there are still significant gaps in the understanding of the cave-dwelling bat communities' ecology, especially in Brazil, including patterns of use among different caves and the influence of the surrounding landscape on the composition of assemblages (Trajano, 1984; Gomes & Uieda, 2004; Vargas-Mena et al., 2020; Barros et al., 2023).

Therefore, this study aims to explore how the physical characteristics of caves and seasonal factors influence the composition and diversity of bats. Our research questions include: (1) Is there variation in species composition between the dry and rainy seasons? (2) Is the dissimilarity between bat

posição das assembleias (Trajano, 1984; Gomes & Uieda, 2004; Vargas-Mena et al., 2020; Barros et al., 2023).

Diante disso, este estudo tem como objetivo explorar como as características físicas das cavernas e fatores sazonais influenciam a composição e a diversidade de morcegos. Nossas questões de pesquisa incluem: (1) Existe variação na composição de espécies entre as estações seca e chuvosa? (2) A dissimilaridade entre as assembleias de morcegos está relacionada com a distância geográfica e as características das cavernas? (3) Quais características das cavernas explicam a presença e a composição das assembleias de morcegos? Prevemos que (i) a composição das assembleias de morcegos varia significativamente entre as estações do ano devido a fatores sazonais; (ii) a dissimilaridade aumenta com a distância entre cavernas, refletindo limitações de dispersão; e que (iii) variáveis das cavernas são determinantes para a ocorrência de diferentes espécies, fornecendo os microhabitats necessários para suas demandas ecológicas e fisiológicas.

METODOLOGIA

Área de estudo

As 90 cavernas estão inseridas na cidade de São Félix do Xingu, entre os povoados da Vila Canaã e Tancredo Neves, este último a cerca de 20 km das cavernas. Localmente a maior parte está inserida na Sub-bacia Igarapé - Araraquara. No entanto, algumas cavernas estão na divisa com a Sub-bacia Igarapé - São Sebastião, todas pertencentes à Bacia Hidrográfica do Rio Xingu. A Unidade de Conservação mais próxima é a Área de Proteção Ambiental Triunfo do Xingu, sendo estadual e

assemblages related to geographical distance and cave characteristics? (3) Which cave characteristics explain the presence and composition of bat assemblages? We predict that (i) the composition of bat assemblages varies significantly between seasons due to seasonal factors; (ii) dissimilarity increases with distance between caves, reflecting dispersal limitations; and that (iii) cave variables are determinants for the occurrence of different species, providing the necessary microhabitats for their ecological and physiological demands.

METHODOLOGY

Study area

The 90 caves are located in the city of São Félix do Xingu, between the villages of Vila Canãa and Tancredo Neves, the latter about 20 km from the caves. Most of them are located in the Igarapé - Araraquara sub-basin. However, some caves are on the border with the Igarapé-São Sebastião sub-basin, which all belong to the Xingu River Basin. The nearest Conservation Unit is the Triunfo do Xingu Environmental Protection Area, which is state-owned and sustainably used (Figure S1 - Supplementary

de uso sustentável (Figura S1 - Material Suplementar). Cada caverna foi georreferenciada utilizando aparelho de GPS, com o qual verificamos e registramos as coordenadas e altitude. Para caracterizar a estrutura física de cada uma das cavernas, medimos o desenvolvimento horizontal máximo e o volume. Dentre as 90 cavernas avaliadas, somente a caverna SFX_0050 não foi aferida, pois havia riscos de desabamento, sendo consequentemente excluída das análises. Todas as medidas foram feitas em metros. Além disso, para cada uma destas cavernas amostradas, criamos um *buffer* de 250 m a partir da coordenada para o cálculo da proporção florestal. Embora a delimitação precisa da área de influência de cavernas demande estudos específicos, o raio de 250 m é uma medida comumente utilizada em estudos espeleológicos, com base na Resolução CONAMA nº 347/2004, servindo como referência inicial. (Brasil, CONAMA, 2004).

A vegetação natural corresponde às regiões de floresta ombrófila densa e aberta, com três grupos de formação, aluvial das terras baixas e submontana, juntamente com áreas de savana arborizada/parque sem florestas de galeria (IBGE, 2006). Na região do estudo o uso de solo é ainda composto por pastagens e vegetação secundária. Em relação ao clima, apresenta clima tropical úmido (Am), com temperatura média anual de 26°C, precipitação anual de aproximadamente 2.400 mm, sendo que o semestre mais chuvoso vai de novembro a abril, e um período seco que vai de maio a setembro (Piló et al., 2015).

Amostragem de quirópteros

As 90 cavernas naturais avaliadas foram amostradas em duas ocasiões, uma na estação chuvosa e outra na seca (Tabela 2 Material suplementar).

Material). Each cave was georeferenced using a GPS device, from which the coordinates and altitude were verified and recorded. To characterize the physical structure of each cave, the maximum horizontal development and volume was measured. Of the 90 evaluated caves, only SFX_0050 cave was not measured, as there was a risk of collapse, and it was therefore excluded from the analysis. All measurements were made in meters. In addition, for each of these sampled caves, a 250 m buffer from the coordinate was created in order to calculate the forest proportion. Although the precise delimitation of the area of influence of caves requires specific studies, the 250 m radius is a measure commonly used in speleological studies, serving as an initial reference based on CONAMA Resolution No. 347/2004. (Brazil, CONAMA, 2004).

The natural vegetation corresponds to regions of dense and open rainforest, with three formation groups: alluvial lowlands and submontane, together with areas of wooded savanna/park without gallery forests (IBGE, 2006). In the study region, land use also includes pastures and secondary vegetation. In terms of climate, it has a humid tropical climate (Am), with an average annual temperature of 26°C and annual precipitation of approximately 2,400 mm. The rainiest season is from November to April, and the dry season is from May to September (Piló et al., 2015).

Chiroptera sampling

The 90 natural caves evaluated were sampled on two occasions, one during the rainy season and the other during the dry season (Table 2 Supplemen-

Somente em sete (SFX_0013, SFX_0023, SFX_0032, SFX_0046, SFX_0050, SFX_0051, SFX_0062 e SFX_0079) não foram encontradas quaisquer evidências de ocupação por morcegos. Na estação chuvosa, a amostragem ocorreu entre os meses de janeiro e março de 2018, e na estação seca em julho do mesmo ano, com exceção da caverna SFX_0071, amostrada em maio de 2019. Os procedimentos foram realizados com autorização emitida pelo IBAMA (ABIO N°885/2017).

O uso diurno das cavernas por morcegos foi verificado por meio de vistorias completas em cada caverna, período em que os animais permanecem em seus abrigos. A captura dos morcegos foi realizada com puçás e redes-de-neblina, seguindo as diretrizes do Guia da *American Society of Mammalogists* para o uso de mamíferos silvestres em pesquisas (Sikes et al., 2016). Os animais capturados tiveram as medidas biométricas aferidas (massa corporal, com dinamômetro de precisão de 0,1 g, e comprimento do antebraço, com paquímetro de precisão de 0,01 mm), peso e condição reprodutiva (testículos evidentes/inativos em machos; fêmea inativa, gestante ou lactante em fêmeas). A classificação em guildas alimentares seguiu Kalko et al. (1996), e a identificação das espécies foi baseada em Díaz et al. (2016). O status de conservação das espécies foi consultado nas listas de espécies ameaçadas de extinção estadual (COEMA, 2007), nacional (MMA, 2018) e global (IUCN, 2019). As cavernas foram classificadas de acordo com a riqueza de espécies, variando de baixa (1-3 espécies), média (4-6 espécies), alta (7-9 espécies), e elevada (≥ 10 espécies), e as espécies foram classificadas como essencialmente cavernícolas, cavernícola oportunista ou não cavernícolas, conforme proposto por Guimarães & Ferreira (2014).

tary material). Only in seven (SFX_0013, SFX_0023, SFX_0032, SFX_0046, SFX_0050, SFX_0051, SFX_0062, and SFX_0079) was no evidence of bat occupation found. Sampling during the rainy season took place between January and March 2018, and during the dry season in July of the same year, with the exception of cave SFX_0071, which was sampled in May 2019. The procedures were carried out with authorization issued by IBAMA (ABIO No. 885/2017).

The daytime use of caves by bats was verified through complete inspections of each cave, during which time the animals remain in their shelters. The bats were captured using hand nets and mist nets, following the guidelines of the American Society of Mammalogists' Guide for the Use of Wild Mammals in Research (Sikes et al., 2016). The captured animals had their biometric measurements taken (body mass, with a dynamometer accurate to 0.1 g, and forearm length, with a caliper accurate to 0.01 mm), weight, and reproductive status (evident/inactive testicles in males; inactive, pregnant, or lactating in females). Classification into feeding guilds followed Kalko et al. (1996), and species identification was based on Díaz et al. (2016). The conservation status of the species was consulted in the lists of endangered species at the state (COEMA, 2007), national (MMA, 2018), and global (IUCN, 2019) levels. Caves were classified according to species richness, ranging from low (1-3 species), medium (4-6 species), high (7-9 species), and elevated (≥ 10 species), and the species were classified as essentially cave-dwelling, opportunistic cave-dwelling, or non-cave-dwelling, as proposed by Guimarães & Ferreira (2014).

Análise da diversidade β

Para analisar a diversidade β , empregamos a abordagem de particionamento proposta por Podani & Schmera (2011), utilizando as funções *beta* e *beta.multi* do pacote “BAT” (Cardoso et al., 2024). A função *beta* foi utilizada para calcular a diversidade β par a par, decompondo a dissimilaridade entre cada par de sítios em componentes de turnover e diferença de riqueza. A função *beta.multi* foi utilizada para calcular a diversidade β entre múltiplos sítios simultaneamente, calculando a média e a variância das comparações par a par. Em ambos os casos, a diversidade β foi calculada com base no índice de dissimilaridade de Jaccard. A diversidade β mede a diferença na composição de espécies, variando de 0 a 1, em que o valor 0 indica maior similaridade na composição de espécies, e o valor 1 indica que as assembleias são completamente diferentes. A diversidade β também pode ser dividida em turnover, quando uma espécie substitui outra em uma assembleia, e diferença de riqueza, quando uma assembleia perde espécies em relação a outra (Baselga, 2010; Cardoso et al., 2014).

Análise de dados

Primeiramente, calculamos a riqueza total de espécies para todas as cavernas combinadas e, em seguida, a riqueza por caverna (Tabela S1). Para responder à nossa primeira questão, comparamos a composição de morcegos entre as estações seca e chuvosa utilizando a Análise de Variância Multivariada Permutacional (PERMANOVA) (Anderson, 2001). Esse método, implementado no pacote ‘PERMANOVA’ (Vicente-Gonzalez & Vicente-Villardón, 2021), baseia-se na partição da soma de quadrados da matriz de dissimilaridade entre os grupos, com 9.999 permutações restri-

β diversity analysis

To analyze β diversity, the partitioning approach proposed by Podani & Schmera (2011), employing the beta and beta.multi functions from the “BAT” package (Cardoso et al., 2024) was used. The beta function was used to calculate pair-wise β diversity, decomposing the dissimilarity between each pair of sites into turnover and richness difference components. The beta.multi function was used to calculate β diversity between multiple sites simultaneously, calculating the mean and variance of pair-wise comparisons. In both cases, β diversity was calculated based on the Jaccard dissimilarity index. β diversity measures the difference in species composition, ranging from 0 to 1, where 0 indicates greater similarity in species composition, and 1 indicates that the assemblages are completely different. β diversity can also be divided into turnover, when one species replaces another in an assembly, and difference in richness, when one assembly loses species in relation to another (Baselga, 2010; Cardoso et al., 2014).

Data Analysis

First, the total species richness for all caves combined and then the richness per cave were calculated (Table S1). To answer the first question, the bat composition between the dry and rainy seasons was compared using Permutation Multivariate Analysis of Variance (PERMANOVA) (Anderson, 2001). This method, implemented in the ‘PERMANOVA’ package (Vicente-Gonzalez & Vicente-Villardón, 2021), is based on partitioning the sum of squares of the dissimilarity matrix between groups, with 9,999 restricted permutations ($\alpha = 0.05$). To verify the homogeneity of dispersion between groups, the PERMDISP2

tas ($\alpha = 0,05$). Para verificar a homogeneidade da dispersão entre os grupos, aplicamos o teste PERMDISP2 (Anderson, 2006) usando o pacote 'vegan' (Oksanen et al., 2020).

Para responder à segunda questão, que investiga a influência da distância geográfica, e das características das cavernas sobre a dissimilaridade entre comunidades de morcegos, aplicamos a Regressão Múltipla em Matrizes de Distância (MRM) no pacote 'ecodist' (Goslee & Urban, 2023). A matriz de distância geográfica foi gerada com base nas coordenadas das cavernas, utilizando uma matriz euclidiana normalizada como variável explicativa. Como variáveis resposta, relacionadas à dissimilaridade entre comunidades, consideramos três componentes da diversidade beta: diversidade beta total (β_{total}), turnover (β_{repl_total}) e diferença de riqueza (β_{rich_total}). As métricas foram calculadas com base na composição de espécies entre as cavernas. As variáveis preditoras incluíram distância geográfica, altitude, volume e desenvolvimento horizontal das cavernas. Os modelos MRM foram ajustados separadamente para cada métrica de diversidade beta, adotando método linear e 1.000 permutações para determinar a significância estatística. Adicionalmente, conduzimos análises de autocorrelação espacial nos resíduos dos modelos utilizando o índice I de Moran, garantindo a robustez das inferências ao descartar efeitos espaciais não modelados.

Para investigar a relação entre a composição e riqueza de espécies de morcegos, características das cavernas (altitude, desenvolvimento horizontal e volume) e sazonalidade, aplicamos análises de redundância parcial (RDAP) e redundância parcial baseada em distâncias (dbRDAP) aos dados, considerando as estações seca e chuvosa separadamente e em conjunto. As análises

test (Anderson, 2006) using the 'vegan' package was applied (Oksanen et al., 2020).

To answer the second question, which investigates the influence of geographical distance and cave characteristics on the dissimilarity between bat communities, the Multiple Regression on Distance Matrices (MRM) in the 'ecodist' package was applied (Goslee & Urban, 2023). The geographic distance matrix was generated based on cave coordinates, using a normalized Euclidean matrix as the explanatory variable. As response variables related to dissimilarity between communities, three components of beta diversity were considered: total beta diversity (β_{total}), turnover (β_{repl_total}), and difference in richness (β_{rich_total}). The metrics were calculated based on the species composition between caves. The predictor variables included geographic distance, altitude, volume, and horizontal development of the caves. The MRM models were adjusted separately for each beta diversity metric, adopting a linear method and 1,000 permutations to determine statistical significance. Additionally, spatial autocorrelation analyses were conducted on the model residuals using Moran's I index, ensuring the robustness of the inferences by discarding unmodeled spatial effects.

To investigate the relationship between bat species composition and richness, cave characteristics (altitude, horizontal development, and volume), and seasonality, partial redundancy analysis (RDAP) and distance-based partial redundancy analysis (dbRDAP) were applied to the data, considering the dry and rainy seasons separately and together. The analyses were conducted with the 'vegan' package, using a dissimilarity matrix transformed by the Hellinger function and including a matrix of spatial eigenvectors generated by PCNM as a covariate to control for spatial dependence (Table S4) (Borcard et al., 2011). The significance of the spatial axes was assessed using Moran's I test (adespatial pack-

foram conduzidas com o pacote 'vegan', utilizando uma matriz de dissimilaridade transformada pela função de Hellinger e incluindo uma matriz de autovetores espaciais gerados por PCNM como covariável para controlar a dependência espacial (Tabela S4) (Borcard et al., 2011). A significância dos eixos espaciais foi avaliada pelo teste I de Moran (pacote "adespatial"; Dray et al., 2024). A influência das características das cavernas na riqueza de espécies foi investigada por modelos de mínimos quadrados generalizados (GLS; pacote "nlme"; Pinheiro et al., 2023), incorporando latitude e longitude para controlar a autocorrelação espacial. A ausência de autocorrelação espacial nos resíduos dos modelos GLS foi verificada pelo índice I de Moran, com $p > 0,05$ para os modelos globais e para cada estação separadamente (seca: $p = 0,32$; chuvosa: $p = 0,72$), indicando que a estrutura espacial dos dados foi adequadamente considerada.

Para todos os modelos, a proporção de floresta no entorno das cavernas foi incluída como uma covariável, reconhecendo a influência positiva da cobertura florestal na diversidade de morcegos (Estrada & Coates-Estrada, 2002; Carvalho et al., 2023a). Assim, nós conseguimos controlar seus efeitos, garantindo que o foco principal da análise permaneça nas variáveis intrínsecas às cavernas, como seu volume, desenvolvimento horizontal e altitude. Todas as análises neste estudo foram conduzidas no ambiente R (R Core Team, 2024). As figuras foram feitas utilizando os pacotes 'ggplot2' (Wickham, 2016), 'ggord' (Beck, 2024) e 'ggrepel' (Slowikowski, 2024).

RESULTADOS

Em 83 das 90 cavernas amostradas (93,3%), foram registradas 11 espécies de morcegos, distri-

age; Dray et al., 2024). The influence of cave characteristics on species richness was investigated using generalized least squares (GLS; "nlme" package; Pinheiro et al., 2023), incorporating latitude and longitude to control for spatial autocorrelation. The absence of spatial autocorrelation in the residuals of the GLS models was verified by Moran's I index, with $p > 0.05$ for the global models and for each season separately (dry: $p = 0.32$; rainy: $p = 0.72$), indicating that the spatial structure of the data was adequately considered.

For all models, the proportion of forest surrounding the caves was included as a covariate, recognizing the positive influence of forest cover on bat diversity (Estrada & Coates-Estrada, 2002; Carvalho et al., 2023a). Thus, it was possible to control its effects, ensuring that the main focus of the analysis remained on caves intrinsic variables, such as their volume, horizontal development, and altitude. All analyses in this study were conducted in the R environment (R Core Team, 2024). The figures were made using the packages 'ggplot2' (Wickham, 2016), 'ggord' (Beck, 2024), and 'ggrepel' (Slowikowski, 2024).

RESULTS

In 83 of the 90 sampled caves (93.3%), 11 bat species were recorded, distributed across two families:

buídas em duas famílias: Phyllostomidae (nove espécies) e Emballonuridae (duas espécies) (Tabela 1). As espécies com maior frequência de ocorrência foram *Peropteryx kappleri* (71 cavernas, 78,8%) e *Glossophaaga soricina* (49 cavernas). Outras espécies registradas foram: *Carollia* sp. (40 cavernas), *Micronycteris microtis* (nove cavernas), *Diphylla ecaudata* (cinco cavernas) e *Trachops cirrhosus* (duas cavernas). Quatro espécies foram registradas em apenas uma caverna: *Anoura geoffroyi*, *Desmodus rotundus*, *Lonchorhina aurita* e *Saccopteryx* sp. As cavernas com maior riqueza de espécies foram SFX_0078 (seis espécies) e SFX_0002 e SFX_0014 (cinco espécies cada). Onze das 90 cavernas apresentaram riqueza média de espécies (4-6 espécies). Quanto à classificação sobre o uso de cavernas, quatro das 11 espécies foram consideradas essencialmente cavernícolas e seis oportunistas. Embora *Carollia brevicauda* e *Micronycteris microtis* não possuam uma classificação específica, utilizamos a de seus congêneres, *Carollia perspicillata*, *M. megalotis* e *M. minuta* classificadas como oportunistas. No que se refere ao status de conservação, *Lonchorhina aurita* é classificada como “vulnerável” na lista Nacional (MMA, 2018), mas foi reclassificada como “quase ameaçada” (NT) na avaliação nacional mais recente realizada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), publicada em 2023 na plataforma do Sistema de Avaliação do Risco de Extinção da Biodiversidade (SALVE) (Bernard et al., 2023).

Phyllostomidae (nine species) and Emballonuridae (two species) (Table 1). The most frequently occurring species were Peropteryx kappleri (71 caves, 78.8%) and Glossophaaga soricina (49 caves). Other species recorded were: Carollia sp. (40 caves), Micronycteris microtis (nine caves), Diphylla ecaudata (five caves), and Trachops cirrhosus (two caves). Four species were recorded in only one cave: Anoura geoffroyi, Desmodus rotundus, Lonchorhina aurita, and Saccopteryx sp. The caves with the greatest species richness were SFX_0078 (six species), SFX_0002 and SFX_0014 (five species each). Eleven of the 90 caves had average species richness (4-6 species). Regarding the classification of cave use, four of the 11 species were considered essentially cave-dwelling and six opportunistic. Although Carollia brevicauda and Micronycteris microtis do not have a specific classification, that of their congeners was used, Carollia perspicillata, M. megalotis, and M. minuta, classified as opportunistic. Regarding conservation status, Lonchorhina aurita is classified as “vulnerable” on the national list (MMA, 2018), but was reclassified as “near threatened” (NT) in the most recent national assessment conducted by the Chico Mendes Institute for Biodiversity Conservation (ICMBio), published in 2023 on the Biodiversity Extinction Risk Assessment System (SALVE) platform (Bernard et al., 2023).

Tabela 1 - Lista de espécies registradas durante diagnóstico de quirópteros em cavernas no município de São Félix do Xingu, Pará. As espécies estão classificadas quanto ao hábito alimentar (Kalko et al., 1996), uso das cavernas (Guimarães & Ferreira, 2014) e categoria de ameaça conforme as listas estadual (COEMA, 2007), nacional (MMA, 2018) e mundial (IUCN, 2019) de espécies ameaçadas de extinção. Legenda: Essencialmente cavernícola (EC), cavernícola oportunista (CO), não cavernícola (NC), PP = pouco preocupante, NA = não ameaçada, VU = vulnerável.

Táxon	Guilda	Nº cavernas	Uso	Categoria de Ameaça		
				Estadual	Nacional	Mundial
Família Emballonuridae						
<i>Peropteryx kappleri</i>	Insetívoro	71	EC	NA	NA	PP
<i>Saccopteryx sp.</i>	Insetívoro	1	NC	NA	NA	NA
Família Phyllostomidae						
Subfamília Carolliinae						
<i>Carollia brevicauda</i>	Frugívoro	12	CO	NA	NA	PP
<i>Carollia perspicillata</i>	Frugívoro	37	CO	NA	NA	PP
Subfamília Desmodontinae						
<i>Desmodus rotundus</i>	Hematófago	1	CO	NA	NA	PP
<i>Diphylla ecaudata</i>	Hematófago	5	EC	NA	NA	PP
Subfamília Glossophaginae						
<i>Glossophaga soricina</i>	Nectarívoro	49	EC	NA	NA	PP
<i>Anoura geoffroyi</i>	Nectarívoro	1	CO	NA	NA	PP
Subfamília Lonchorhininae						
<i>Lonchorhina aurita</i>	Insetívoro	1	EC	NA	VU	PP
Subfamília Micronycterinae						
<i>Micronycteris microtis</i>	Insetívoro	9	CO	NA	NA	PP
Subfamília Phyllostominae						
<i>Trachops cirrhosus</i>	Carnívoro	2	CO	NA	NA	PP

Table 1 - List of species recorded during the bats diagnosis in the municipality of São Félix do Xingu caves, Pará. The species are classified according to feeding habits (Kalko et al., 1996), cave use (Guimarães & Ferreira, 2014), and threat category according to state (COEMA, 2007), national (MMA, 2018), and global (IUCN, 2019) lists of endangered species. Legend: Essentially cave-dwelling (EC), opportunistic cave-dwelling (CO), non-cave-dwelling (NC), LC = least concern, NT = near threatened, VU = vulnerable.

Taxon	Guild	Number of caves	Use	Threat category		
				State	National	Global
Emballonuridae family						
Peropteryx kappleri	Insectivore	71	EC	NA	NA	PP
Saccopteryx sp.	Insectivore	1	NC	NA	NA	NA
Phyllostomidae family						
Carolliinae subfamily						
Carollia brevicauda	Frugivorous	12	CO	NA	NA	PP
Carollia perspicillata	Frugivorous	37	CO	NA	NA	PP
Desmodontinae subfamily						
Desmodus rotundus	Hemophagous	1	CO	NA	NA	PP
Diphylla ecaudata	Hemophagous	5	EC	NA	NA	PP
Glossophaginae subfamily						
Glossophaga soricina	Nectarivore	49	EC	NA	NA	PP
Anoura geoffroyi	Nectarivore	1	CO	NA	NA	PP
Lonchorhininae subfamily						
Lonchorhina aurita	Insectivore	1	EC	NA	VU	PP
Micronycterinae subfamily						
Micronycteris microtis	Insectivore	9	CO	NA	NA	PP
Phyllostominae subfamily						
Trachops cirrhosus	Carnivore	2	CO	NA	NA	PP

A análise PERMANOVA indicou diferenças sazonais significativas entre as estações seca e chuvosa ($F = 3,93$ e $p < 0,01$). No entanto, a análise PERMDISP2 não revelou diferenças na dispersão entre os grupos ($F = 0,12$ e $p = 0,72$), sugerindo que a variação observada entre as estações não

The PERMANOVA indicated significant seasonal differences between the dry and rainy seasons ($F = 3.93$ and $p < 0.01$). However, PERMDISP2 analysis revealed no differences in dispersion between groups ($F = 0.12$ and $p = 0.72$), suggesting that the variation observed between seasons cannot be at-

pode ser atribuída a diferenças na dispersão das amostras (Figura S4).

A análise da diversidade beta entre as cavernas ($\beta_{total} = 0,56$) demonstrou que a variação na composição de espécies é impulsionada principalmente por diferenças na riqueza ($\beta_{rich_total} = 0,36$) em relação ao turnover ($\beta_{repl_total} = 0,20$). A modelagem entre a diferença de riqueza e as características das cavernas evidenciou que quanto maior a diferença entre o volume das cavernas, maior a diferença de riqueza de morcegos entre elas ($p = 0,06$), ou seja, há perda de espécies, embora esse efeito seja fraco (R^2 do modelo = 0,03 – Tabela 2). A análise de Redundância Parcial (RDAP) mostrou que as variáveis ambientais, como altitude ($p = 0,03$) e DH ($p = 0,01$), contribuem significativamente para a variação na composição das espécies. A RDAP explicou 4,51% da variação total na composição das espécies (R^2 do modelo RDAP = 0,04) (Figura 1). A análise dbRDAP corroborou esses resultados, indicando associação significativa entre essas variáveis e a estrutura das assembleias. A RDAP para a estação chuvosa revelou que as variáveis ambientais mais significativas para a variação na composição das espécies foram a altitude ($F = 3,09$, $p = 0,02$) e o DH ($F = 2,94$, $p = 0,02$). A dbRDAP para esse mesmo período confirmou a influência dessas variáveis (Tabelas S6 e S7).

tributed to differences in sample dispersion (Figure S4).

The beta diversity analysis between caves ($\beta_{total} = 0.56$) showed that variation in species composition is mainly driven by differences in richness ($\beta_{rich_total} = 0.36$) rather than turnover ($\beta_{repl_total} = 0.20$). Modeling the difference in richness and cave characteristics showed that the greater the difference in cave volume, the greater the difference in bat richness between them ($p = 0.06$), i.e., there is a loss of species, although this effect is weak (model $R^2 = 0.03$ – Table 2). Partial Redundancy Analysis (PRA) showed that environmental variables such as altitude ($p = 0.03$) and DH ($p = 0.01$) contribute significantly to the variation in species composition. RDAP explained 4.51% of the total variation in species composition (R^2 of the RDAP model = 0.04) (Figure 1). The dbRDAP analysis corroborated these results, indicating a significant association between these variables and the structure of the assemblages. The RDAP for the rainy season revealed that the most significant environmental variables for variation in species composition were altitude ($F = 3.09$, $p = 0.02$) and DH ($F = 2.94$, $p = 0.02$). The dbRDAP for this same period confirmed the influence of these variables (Tables S6 and S7).

Tabela 2 - Resultados do modelo estatístico Regressão Múltipla em Matrizes de Distância avaliando os efeitos de variáveis ambientais (distância, altitude, desenvolvimento horizontal - DH e volume) sobre diferenças na riqueza (*Brich_total*) de morcegos em cavernas. Os coeficientes representam a direção e magnitude dos efeitos de cada variável, enquanto os valores de p indicam o nível de significância estatística. Apenas o volume apresentou uma tendência marginalmente significativa ($p = 0,06$), sugerindo sua importância potencial na determinação da riqueza de espécies.

	Coefficientes	p
Intercept	3.021222e-01	0.99
Distância	-2.072426e-08	0.55
Altitude	1.811858e-04	0.15
DH	5.649088e-04	0.28
Volume	1.114461e-04	0.06

Table 2 - Results of the Multiple Regression statistical model in Distance Matrices evaluating the effects of environmental variables (distance, altitude, horizontal development - DH, and volume) on differences in bat richness (*Brich_total*) in caves. The coefficients represent the direction and magnitude of the effects of each variable, while the p values indicate the level of statistical significance. Only volume showed a marginally significant trend ($p = 0.06$), suggesting its potential importance in determining species richness.

	Coefficients	p
Intercept	3.021222e-01	0.99
Distancy	-2.072426e-08	0.55
Altitude	1.811858e-04	0.15
DH	5.649088e-04	0.28
Volume	1.114461e-04	0.06

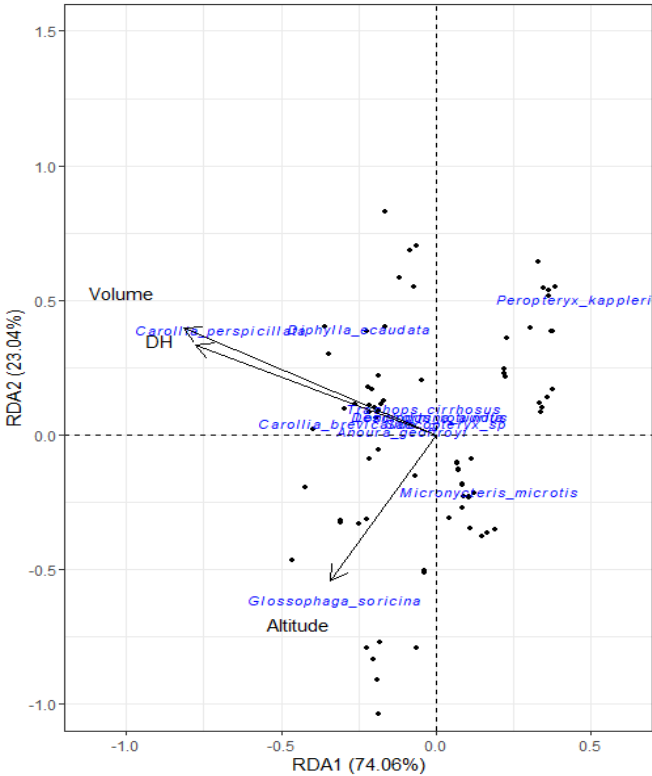


Figura 1 - Análise de Redundância (RDAp) mostrando a relação entre variáveis ambientais (volume, desenvolvimento horizontal - DH, altitude) e a composição de espécies de morcegos em cavernas de São Félix do Xingu, Pará. As setas indicam a direção e a magnitude da correlação das variáveis ambientais com os eixos da RDAp. Cada ponto preto representa uma caverna, enquanto os nomes das espécies representam sua associação com os gradientes ambientais. O eixo RDA1 explica 74,06% da variância e o eixo RDA2, 23,04%, indicando que o volume das cavernas e o DH são fatores importantes na determinação da composição das espécies.

Figure 1 - Partial redundancy analysis (RDAp) showing the relationship between environmental variables (volume, horizontal development – DH, altitude) and the composition of bat species in São Félix do Xingu caves, Pará. The arrows indicate the direction and magnitude of the correlation of environmental variables with the RDAp axes. Each black dot represents a cave, while the species names represent their association with environmental gradients. The RDA1 axis explains 74.06% of the variance and the RDA2 axis explains 23.04%, indicating that cave volume and DH are important factors in determining species composition.

Os resultados da análise de mínimos quadrados generalizados (GLS) para a riqueza das comunidades de morcegos indicou que quanto maior o volume das cavernas maior será a riqueza de espécies de morcegos ($p = 0,02$) (Tabela 3). As demais variáveis não influenciaram a riqueza de espécies. Ao analisar os dados separadamente por estação, na estação seca, somente o volume das cavernas influenciou a riqueza de espécies ($p < 0,01$), onde cavernas maiores apresentaram maior riqueza (Figura 2). Já na estação chuvosa, somente o volume das cavernas influenciou positivamente a riqueza de espécies, mas este efeito foi marginalmente significativo ($p = 0,07$) (Tabela S8).

Tabela 3 - Resultados das análises de Mínimos Quadrados Generalizados (GLS) para avaliar a relação entre variáveis ambientais (altitude, desenvolvimento horizontal - DH e volume das cavernas) e a riqueza de espécies de morcegos em São Félix do Xingu. São apresentados os coeficientes (Coef.), erros padrão (S. erro), valores do teste t, e valores de probabilidade (p). Valores de p significativos ($\alpha=0,05$) estão destacados. Os resultados indicam as variáveis que mais contribuem para explicar a variação na riqueza.

	Coef.	S. erro	t	p
Intercept	-2.14	1.57	-1.36	0.17
Altitude	0.37	0.24	1.53	0.12
DH	0.09	0.07	1.13	0.25
Volume	0.11	0.04	2.37	0.02

The results of the generalized least squares (GLS) analysis for bat community richness indicated that the larger the volume of the caves, the greater the bat species richness ($p = 0.02$) (Table 3). The other variables did not influence species richness. When analyzing the data separately by season, in the dry season, only cave volume influenced species richness ($p < 0.01$), with larger caves presenting greater richness (Figure 2). In the rainy season, only cave volume positively influenced species richness, but this effect was marginally significant ($p = 0.07$) (Table S8).

Table 3 - Results of Generalized Least Squares (GLS) analyses to evaluate the relationship between environmental variables (altitude, horizontal development - DH, and cave volume) and bat species richness in São Félix do Xingu. The coefficients (Coef.), standard errors (S. error), t-test values, and probability values (p) are presented. Significant p values ($\alpha=0.05$) are highlighted. The results indicate the variables that contribute most to explaining the variation in richness.

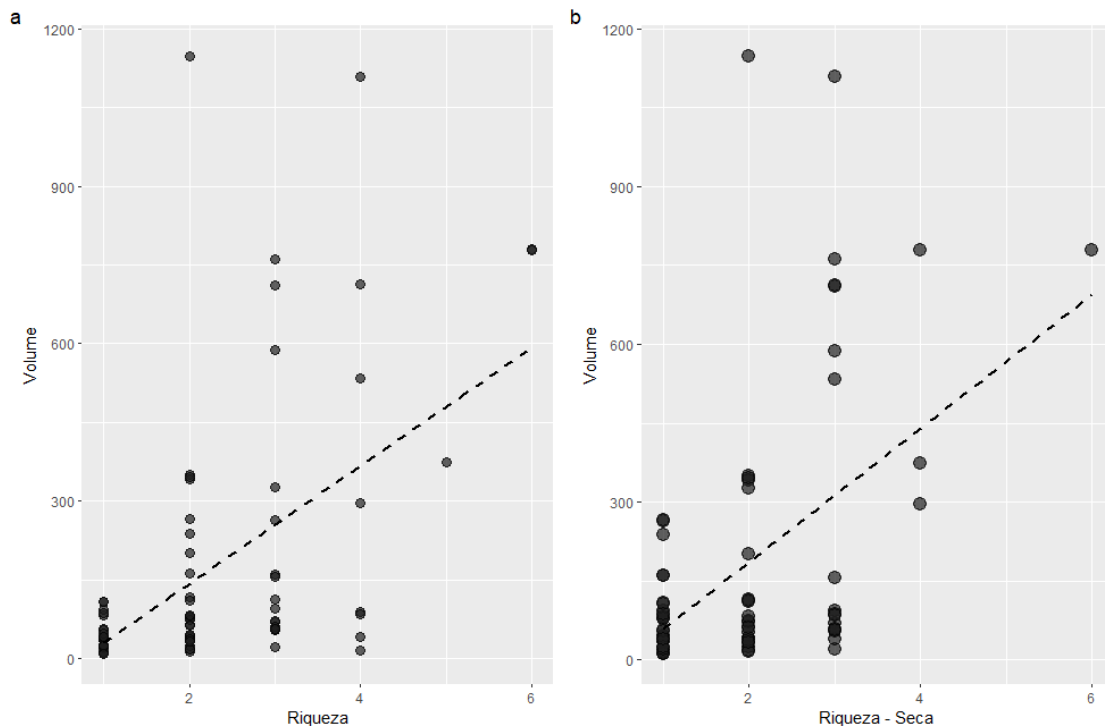


Figura 2 - Relação entre o volume das cavernas e a riqueza de espécies de morcegos em São Félix do Xingu, Pará. (a) Riqueza total de espécies ao longo do ano; (b) Riqueza de espécies durante a estação seca. Os resultados mostram uma tendência de maior riqueza de espécies em cavernas de maior volume.

Figure 2 - Relationship between cave volume and bat species richness in São Félix do Xingu, Pará. (a) Total species richness throughout the year; (b) Species richness during the dry season. The results show a trend toward greater species richness in larger caves.

DISCUSSÃO

Este estudo investigou os preditores da riqueza e dissimilaridade entre assembleias de morcegos cavernícolas em São Félix do Xingu, estado do Pará, sudeste da Amazônia brasileira. Através de uma abordagem multianalítica para as diversidades α e β , nós encontramos mudanças significativas na composição das assembleias entre as estações seca e chuvosa, corroborando nossa hipótese. Embora esperássemos que a dissimilaridade aumentasse com a distância entre as cavernas, os resultados indicaram um padrão contrastante, sugerindo que as assembleias de morcegos das cavernas analisadas são homogêneas. Entretanto, nós também encontramos que altitude e desenvolvimento horizontal desempenham um papel fundamental para determinar diferenças na composição de espécies entre as

DISCUSSION

This study investigated predictors of richness and dissimilarity among cave bat assemblages in São Félix do Xingu, Pará state, southeastern Brazilian Amazon. Using a multi-analytical approach for α and β diversities, significant changes in the composition of assemblages between the dry and rainy seasons were found, corroborating the initial hypothesis. Although dissimilarity was expected to increase with distance between caves, the results indicated a contrasting pattern, suggesting that the bat assemblages of the caves analyzed are homogeneous. However, it was also found that altitude and horizontal development play a key role in determining differences in species composition between assemblages, especially during the rainy season, confirming the influence of climatic conditions on communities. In addition, caves with greater volume

assembleias, principalmente durante a estação chuvosa, confirmando a influência de condições climáticas sobre as comunidades. Além disso, cavernas que apresentam maior volume também apresentam maior riqueza de espécies, com o aumento na diferença de volume entre cavernas sendo um preditor da perda de espécies.

Composição de espécies e sazonalidade

Em São Félix do Xingu, *Peropteryx kappleri* foi a espécie mais abundante nas cavernas estudadas, embora a família Phyllostomidae tenha apresentado a maior representatividade, corroborando outros levantamentos de quirópteros realizados nos Neotrópicos (Bredt et al., 1999; Sampaio et al., 2003; Faria et al., 2006; Vargas-Mena et al., 2020). A baixa riqueza observada na maioria das cavernas pode estar associada à degradação do habitat no entorno, resultante do desmatamento e da expansão agropecuária, o que pode estar levando espécies oportunistas a utilizarem mais intensamente esses ambientes (Barros et al., 2020). Embora voltado a invertebrados, estudo realizado por Fraga et al. (2023) mostra que pressões antrópicas podem simplificar comunidades subterrâneas, um padrão que, embora não diretamente testado para morcegos, levanta hipóteses relevantes sobre seus possíveis efeitos também nesse grupo.

As variações sazonais nas assembleias de morcegos, observadas através da análise PERMANOVA, indicaram que as flutuações climáticas entre as estações seca e chuvosa impactam a composição das espécies, principalmente devido a mudanças na disponibilidade de recursos, como alimento e água (Bobrowiec et al., 2014; Carvalho et al., 2023b; Genelhú et al., 2023). Os resultados da PERMDISP2 não mostraram a existência de dife-

also have greater species richness, with the increase in volume difference between caves being a predictor of species loss.

Species composition and seasonality

In São Félix do Xingu, Peropteryx kappleri was the most abundant species in the studied caves, although the Phyllostomidae family was the most representative, corroborating other surveys of bats conducted in the Neotropics (Bredt et al., 1999; Sampaio et al., 2003; Faria et al., 2006; Vargas-Mena et al., 2020). The low species richness observed in most caves may be associated with habitat degradation in the surrounding area, resulting from deforestation and agricultural expansion, which may be leading opportunistic species to use these environments more intensively (Barros et al., 2020). Although focused on invertebrates, a study by Fraga et al. (2023) shows that anthropogenic pressures can simplify underground communities, a pattern that, although not directly tested for bats, raises relevant hypotheses about its possible effects on this group as well.

Seasonal variations in bat assemblages, observed through PERMANOVA analysis, indicated that climatic fluctuations between the dry and rainy seasons affect species composition, mainly due to changes in resource availability, such as food and water (Bobrowiec et al., 2014; Carvalho et al., 2023b; Genelhú et al., 2023). The PERMDISP2 results showed no differences in dispersion between assemblages, suggesting that the observed changes are not attributed to variations in the internal variability of communities (Anderson, 2006).

renças na dispersão entre as assembleias, sugerindo que as mudanças observadas não são atribuídas a variações na variabilidade interna das comunidades (Anderson, 2006).

O papel da paisagem degradada ao redor das cavernas não pode ser subestimado. A perda de habitat, associada ao desmatamento e à pecuária, pode ter alterado a disponibilidade de abrigos alternativos, forçando as espécies a utilizar mais intensamente as cavernas, especialmente durante certas épocas do ano (Barros et al., 2020; Vargas-Mena et al., 2020). Entretanto, a ocorrência de apenas um indivíduo de *Desmodus rotundus* nas cavernas que estudamos contradiz estudos anteriores que associam essa espécie a paisagens fragmentadas e agrícolas (Campanhã & Fowler, 1993; Barros et al., 2020; Vargas-Mena et al., 2020; Genelhú et al., 2023). Também em nossa área de estudo, a ausência de espécies nectarívoras (*Lionycteris spurrelli*, por exemplo) e do *Furipterus horrens*, que são comumente registradas em cavernas de áreas preservadas (Genelhú et al., 2022; Monteiro et al., 2023), pode indicar uma maior sensibilidade dessas espécies às alterações ambientais do entorno, especialmente em contextos de elevada pressão antrópica.

Características ambientais das cavernas e estrutura das assembleias de morcegos

A análise da diversidade beta total revelou que a diferença na riqueza de espécies desempenhou o papel mais importante na variação entre as comunidades de morcegos nas cavernas. Isso contrasta com estudos que apontam o turnover como o principal componente da diversidade beta em habitats heterogêneos (Fortin & Dale, 2005; Baselga, 2010). Nossos resultados sugerem que a variação na riqueza observada entre as cavernas pode ser

*The role of the degraded landscape surrounding the caves cannot be underestimated. Habitat loss, associated with deforestation and livestock farming, may have altered the availability of alternative shelters, forcing species to use caves more intensively, especially during certain times of the year (Barros et al., 2020; Vargas-Mena et al., 2020). However, the occurrence of only one individual of *Desmodus rotundus* in the studied caves contradicts previous studies that associate this species with fragmented and agricultural landscapes (Campanhã & Fowler, 1993; Barros et al., 2020; Vargas-Mena et al., 2020; Genelhú et al., 2023). Also in the study area, the absence of nectarivorous species (*Lionycteris spurrelli*, for example) and *Furipterus horrens*, which are commonly recorded in caves in preserved areas (Genelhú et al., 2022; Monteiro et al., 2023), may indicate these species greater sensitivity to environmental changes in their surroundings, especially in contexts of high anthropic pressure.*

Environmental characteristics of caves and structure of bat assemblages

The analysis of total beta diversity revealed that the difference in species richness played the most important role in the variation between bat communities in caves. This contrasts with studies that point to turnover as the main component of beta diversity in heterogeneous habitats (Fortin & Dale, 2005; Baselga, 2010). Results suggest that the richness variation observed between caves can be explained by differences in available resources and specific en-

explicada por diferenças nos recursos disponíveis e nas condições ambientais específicas de cada caverna, como área, volume e desenvolvimento horizontal. Esse padrão já foi observado em outros estudos em ambientes cavernícolas e em habitats fragmentados, onde a heterogeneidade ambiental influencia diretamente o número de espécies presentes (Ávila-Flores & Medellín, 2004; Torqueti et al., 2017; Oliveira et al., 2018; Barros et al., 2020; Vargas-Mena et al., 2020).

A análise de múltiplas regressões revelou que a distância geográfica entre as cavernas teve influência limitada na variação da diversidade beta. Embora estudos prévios tenham associado maior dissimilaridade em distâncias geográficas maiores (Nekola & White, 1999; Soininen, 2010), o alcance relativamente curto entre as cavernas estudadas, combinado com a homogeneidade ambiental regional, pode explicar a baixa influência da distância. Em escalas maiores, onde as cavernas estão separadas por dezenas ou centenas de quilômetros, a distância geográfica tende a desempenhar um papel mais expressivo na estruturação das comunidades (Lomolino, 2001; Kraft et al., 2015).

As variáveis altitude, DH e volume das cavernas destacaram-se como fatores determinantes na composição e riqueza de espécies de morcegos. O DH e o volume estão relacionados ao tamanho e à complexidade estrutural das cavernas, que influenciam as condições microclimáticas e a estabilidade de microhabitats essenciais para os morcegos (Barros et al., 2020), especialmente em períodos de condições ambientais extremas (Carvalho et al., 2011). Cavernas maiores e mais complexas frequentemente oferecem zonas internas protegidas de variações climáticas externas, proporcionando constância de umidade e temperatura (Barros et al., 2020; Vargas-Mena et al., 2020; Badino, 2010). Essas condições fa-

vironmental conditions in each cave, such as area, volume, and horizontal development. This pattern has already been observed in other studies in cave environments and fragmented habitats, where environmental heterogeneity directly influences the number of species present (Ávila-Flores & Medellín, 2004; Torqueti et al., 2017; Oliveira et al., 2018; Barros et al., 2020; Vargas-Mena et al., 2020).

Multiple regression analysis revealed that the geographical distance between caves had a limited influence on beta diversity variation. Although previous studies have associated greater dissimilarity with greater geographic distances (Nekola & White, 1999; Soininen, 2010), the relatively short distance between the studied caves, combined with regional environmental homogeneity, may explain the low influence of distance. On larger scales, where tens or hundreds of kilometers separate caves, geographic distance tends to play a more significant role in community structure (Lomolino, 2001; Kraft et al., 2015).

The variables altitude, DH, and cave volume stood out as determining factors in the composition and richness of bat species. DH and volume are related to the size and structural complexity of caves, which influence microclimatic conditions and the stability of microhabitats essential for bats (Barros et al., 2020), especially during periods of extreme environmental conditions (Carvalho et al., 2011). Larger and more complex caves often offer internal zones protected from external climatic variations, providing constant humidity and temperature (Barros et al., 2020; Vargas-Mena et al., 2020; Badino, 2010). These conditions favor reproduction, allowing colonies to establish themselves in safer and more stable environments (Kunz, 1982). In addition, the diversity of microhabitats in large caves helps explain their greater species richness, reinforcing the importance of these characteristics for the structuring of com-

vorecem a reprodução, permitindo que colônias se estabeleçam em ambientes mais seguros e estáveis (Kunz, 1982). Além disso, a diversidade de microhabitats em cavernas volumosas ajuda a explicar sua maior riqueza de espécies, reforçando a importância dessas características para a estruturação das comunidades ao longo do ano. Os modelos estatísticos utilizados corroboraram que o volume exerce uma influência significativa, principalmente na estação seca, mas com efeitos consistentes ao longo do ano.

Implicações para a conservação

Este estudo destaca a importância das cavernas de São Félix do Xingu, estado do Pará, na preservação das comunidades de morcegos em uma paisagem severamente impactada pelo desmatamento. Cavernas maiores, devido à sua capacidade de abrigar maior riqueza de espécies e oferecer microhabitats estáveis, devem ser priorizadas em estratégias de conservação. Além disso, as cavernas menores são importantes por atuarem como pontos de passagem ("stepping stones") que facilitam o movimento dos morcegos entre cavernas maiores, especialmente para espécies que formam colônias menores ou têm menor capacidade de dispersão.

Embora este estudo tenha focado na análise das características físicas das cavernas e sua relação com a diversidade de morcegos, os resultados reforçam a necessidade de proteger tanto as cavernas individualmente quanto as áreas ao redor que mantêm sua funcionalidade ecológica. Em cenários de fragmentação extrema, como o de São Félix do Xingu, a perda de conectividade entre cavernas pode amplificar o risco de extinção local de espécies. Portanto, estratégias de manejo eficazes devem incluir não apenas a proteção das cavernas, mas também a conservação de

munities throughout the year. The statistical models used corroborated that volume has a significant influence, especially in the dry season, but with consistent effects throughout the year.

Implications for conservation

This study highlights the importance of the São Félix do Xingu caves, in the state of Pará, for the preservation of bat communities in a landscape severely impacted by deforestation. Larger caves, due to their capacity to harbor greater species richness and offer stable microhabitats, should be prioritized in conservation strategies. In addition, smaller caves are important because they act as stepping stones that facilitate the movement of bats between larger caves, especially for species that form smaller colonies or have a lower dispersal capacity.

Although this study focused on analyzing the physical characteristics of caves and their relationship with bat diversity, the results reinforce the need to protect both individual caves and the surrounding areas that maintain their ecological functionality. In scenarios of extreme fragmentation, such as that of São Félix do Xingu, the loss of connectivity between caves can amplify the risk of local species extinction. Therefore, effective management strategies should include not only the protection of caves, but also the conservation of corridors and adjacent natural areas that support the movement and long-term viability of bat populations.

corredores e áreas naturais adjacentes que sustentam a movimentação e a viabilidade a longo prazo das populações de morcegos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à VALE S.A. e à Ativo Ambiental pelo financiamento desta pesquisa. Expressamos nossa gratidão a Flávia Evangelista, Juliana Macaron e Leandro Maciel pelo apoio, incluindo a cessão de informações, mapas e fotografias. Nossos agradecimentos a todos os membros da equipe da Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos da Vale pelo incentivo contínuo ao desenvolvimento de pesquisas em prol do uso sustentável dos recursos naturais em áreas com cavernas. Nosso reconhecimento se estende a todos os colegas de campo e de escritório pela valiosa contribuição. SMCG agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida (processo 88887.805181/2023-00). WDC recebeu uma “Ayuda para contratos Ramón y Cajal (RYC) 2023” {RYC-2023-045231-I}, financiado pelo MCIU/AEI/<https://doi.org/10.13039/501100011033> e pelo FSE+.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank VALE S.A. and Ativo Ambiental for funding this research. We express our gratitude to Flávia Evangelista, Juliana Macaron, and Leandro Maciel for their support, including the provision of information, maps, and photographs. Our thanks to all members of Vale's Speleology and Ferrous Technology Management team for their continued encouragement of research into the sustainable use of natural resources in areas with caves. Our appreciation extends to all field and office colleagues for their valuable contributions. SMCG thanks the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for the grant awarded (process 88887.805181/2023-00). WDC received an “Ayuda para contratos Ramón y Cajal (RYC) 2023” {RYC2023-045231-I}, funded by MCIU/AEI/<https://doi.org/10.13039/501100011033>, and FSE+.

REFERÊNCIAS / REFERENCES

- ALMEIDA-NETO, M.; GUIMARÃES, P.; GUIMARÃES, P. R.; LOYOLA, R. D.; ULRICH, W. A consistent metric for nestedness analysis in ecological systems: reconciling concept and measurement. *Oikos*, v. 117, n. 8, p. 1227-1239, 2008.
- ANDERSON, M. J. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology*, v. 26, n. 1, p. 32-46, 2001.
- ANDERSON, M. J. Distance-based tests for homogeneity of multivariate dispersions. *Biometrics*, v. 62, n. 1, p. 245-253, 2006.
- ATMAR, W.; PATTERSON, B. D. The measure of order and disorder in the distribution of species in fragmented habitat. *Oecologia*, v. 96, n. 3, p. 373-382, 1993.

ÁVILA-FLORES, R.; MEDELLÍN, R. A. Ecological, taxonomic, and physiological correlates of cave use by Mexican Bats. *Journal of Mammalogy*, v. 85, n. 4, p. 675-687, 2004.

BADINO, G. Underground meteorology-“What’s the weather underground?”. *Acta Carsologica*, v. 39, n. 3, p. 427-448, 2010.

BARROS, J. S.; BERNARD, E.; FERREIRA, R. L. Ecological preferences of neotropical cave bats in roost site selection and their implications for conservation. *Basic and Applied Ecology*, v. 45, n. 1, p. 31-41, 2020.

BARROS, J. S.; BERNARD, E. Species richness, occurrence and rarity of bats in Brazilian caves. *Austral Ecology*, v. 48, n. 8, p. 2144-2170, 2023.

BASELGA, A. Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*, v. 19, n. 1, p. 134-143, 2010.

BECK, M. *ggord: Ordination Plots with ggplot2*. R package version 1.1.8. 2024. Disponível em: <https://fawda123.github.io/ggord/>. Acesso em: 10 de dez. 2024.

BERNARD, E.; GAMA, A. R.; GOMES, A. M. E.; SANTOS, C. L. C.; FISCHER, E. A.; SCHMIDT, E. J. C.; ANDRADE, F. A. G.; FALCÃO, F. C.; GARBINO, G. S. T.; MENA, J. C. V.; LUZ, J. L.; TREVELIN, L. C.; AGUIAR, L.; PEREIRA, M. J. V. C. R.; DELGADO, M.; ZORTÉA, M.; ROCHA, P. A.; BOBROWIEC, P. E. D.; NOVAES, R. L. M.; TAVARES, V. C.; CARVALHO, W. D.; UIEDA, W. *Lonchorhina aurita* Tomes, 1863. Sistema de Avaliação do Risco de Extinção da Biodiversidade – SALVE. ICMBio. 2023. Acesso em: 06 jul. 2025.

BOBROWIEC, P. E. D.; ROSA, L. D. S.; GAZARINI, J.; HAUGAASEN, T. Phyllostomid bat assemblage structure in Amazonian flooded and unflooded forests. *Biotropica*, v. 46, n. 3, p. 312-321, 2014.

BORCARD, D.; GILLET, F.; LEGENDRE, P. *Numerical ecology with R*. New York, Springer, 306p, 2011.

BRASIL. *Resolução CONAMA N° 347/2004, de 10 de setembro de 2004*. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/stories/downloads/Legislacao/Res_CONAMA_347_2004.pdf. Acesso em: 10 dez. 2024.

BREDT, A.; UIEDA, W.; MAGALHÃES, E. D. Morcegos cavernícolas da região do Distrito Federal, centro-oeste do Brasil (Mammalia, Chiroptera). *Revista Brasileira de Zoologia*, v. 16, n. 3, p. 731-770, 1999.

BRUNET, A. K.; MEDELLIN, R. A. The species-area relationship in bat assemblages of tropical caves. *Journal of Mammalogy*, v. 82, n. 4, p. 1114-1122, 2001.

BU, Y.; WANG, Y.; ZHANG, C.; LIU, W.; ZHOU, H.; YU, Y.; NIU, H. Geographical distribution, roost selection, and conservation state of cave-dwelling bats in China. *Mammalia*, vol. 79, n. 4, pp. 409-417, 2015.

BURGIN, C. J.; COLELLA, J. P.; KAHN, P. L.; UPHAM, N. S. How many species of mammals are there? *Journal of Mammalogy*, v. 99, n. 1, p. 1-14, 2018.

CAMPANHA, R. A. D. C.; FOWLER, H. G. Roosting assemblages of bats in arenitic caves in remnant fragments of Atlantic Forest in southeastern Brazil. *Biotropica*, v. 25, n. 3, p. 362-365, 1993.

CARDOSO, P.; RIGAL, F.; CARVALHO, J. C.; FORTELIUS, M.; BORGES, P. A. V.; PODANI, J.; SCHMERA, D. Partitioning taxon, phylogenetic and functional beta diversity into replacement and richness difference components. *Journal of Biogeography*, v. 41, n. 4, p. 749-761, 2014.

CARDOSO, P.; RIGAL, F.; BORGES, P. A. V. *BAT: Biodiversity Assessment Tools*. R package version 2.7, 2024. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=BAT>. Acesso em: 10 de dez. de 2024.

CARVALHO, J. C.; CARDOSO, P.; BORGES, P. A. V.; SCHMERA, D.; PODANI, J. Measuring fractions of beta diversity and their relationships to nestedness: a theoretical and empirical comparison of novel approaches. *Oikos*, v. 122, n. 6, p. 825-834, 2013.

CARVALHO, W. D.; ROSALINO, L. M.; XAVIER, B. S.; CASTRO, I. J.; HILÁRIO, R.; MARQUES, T. M.; TOLEDO, J. J.; VIEIRA, M. V.; PALMEIRIM, J. M.; MUSTIN, K. The relative importance of forest cover and patch-level drivers for phyllostomid bat communities in the Amazonian savannas. *Landscape Ecology*, v. 38, p. 117-130, 2023a.

CARVALHO, W. D.; FLUCK, I. E.; DE CASTRO, I. J.; HILÁRIO, R. R.; MARTINS, A. C. M.; DE TOLEDO, J. J.; DA SILVA XAVIER, B.; DAMBROS, C.; BOBROWIEC, P. E. D. Elevation drives taxonomic, functional and phylogenetic β -diversity of phyllostomid bats in the Amazon biome. *Journal of Biogeography*, v. 50, n. 1, p. 70-85, 2023b.

CARVALHO, W. D.; FREITAS, L. N.; FREITAS, G. P.; LUZ, J. L.; COSTA, L. M.; ESBÉRARD, C. E. L. Efeito da chuva na captura de morcegos em uma ilha da costa sul do Rio de Janeiro, Brasil. *Chiroptera Neotropical*, vol. 17, n. 1, p. 808-816, 2011.

CONSELHO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE (COEMA). (2007, 24 de outubro). *Resolução nº 54, de 24 de outubro de 2007: Lista das espécies ameaçadas de extinção do Pará*. [Resolução]. Belém, PA: Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Pará (SEMAS). Disponível em: <https://www.semas.pa.gov.br/legislacao/files/pdf/375.pdf>. Acesso em: 10 de dez. de 2024.

DÍAZ, M. M.; SOLARI, S.; AGUIRRE, L. F.; AGUIAR, L. M. S.; BARQUEZ, R. B. 2016. Clave de identificación de los murciélagos de Sudamérica. Publicación Especial nº 2, PCMA (Programa de Conservación de Murciélagos de Argentina), Argentina, 160 p., 2016.

DRAY, S.; PÉLISSIER, R.; JOMBART, T.; THIOULOUSE, J. *adespatial: Multivariate multiscale spatial analysis*. R package version 0.3-13, 2024. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=adespatial>. Acesso em: 10 de dez. de 2024.

ESTRADA, A.; COATES-ESTRADA, R. Bats in continuous forest, forest fragments and in an agricultural mosaic habitat at Los Tuxtlas, Mexico. *Biological Conservation*, v. 103, n. 3, p. 237-245, 2002.

FARIA, D.; SOARES-SANTOS, B.; SAMPAIO, E. Bats from the Atlantic rainforest of southern Bahia, Brazil. *Biota Neotropica*, v. 6, n. 2, 2006.

FORTIN, M. J., & DALE, M. R. T. *Spatial Analysis: A Guide for Ecologists*, 2.ed. Cambridge University Press, 438p., 2014.

- FRAGA, R.; TAVARES, V.; SIMÕES, M. H.; PROUS, X.; GIROLAMO-NETO, C.; BRANDI, I. V.; OLIVEIRA, G.; TREVELIN, L. C. Caves as wildlife refuges in degraded landscapes in the Brazilian Amazon. *Scientific Reports*, v. 13 n. 6055, 2023.
- GENELHÚ, S. M. C.; LAURINDO, R. DE S.; TAHARA, A. S.; OLIVEIRA, L. L.; GREGORIN, R. Seasonal dietary niche changes in Neotropical bats. *Journal of Tropical Ecology*, v. 39, n. e35, 2023.
- GENELHÚ, S. M. C.; SIMÕES, M. H.; ASSIS, M. A. C.; RIBEIRO, M. S.; PROUS, X. First report of albinism in a lactating female of the chestnut long-tongued bat *Lionycteris spurrelli* Thomas, 1913 (Chiroptera, Phyllostomidae). *Mammalia*, v. 86, n. 3, p. 257-260. 2022.
- GOMES, M. N.; UIEDA, W. Abrigos diurnos, composição de colônias, dimorfismo sexual e reprodução do morcego hematófago *Desmodus rotundus* (E. Geoffroy) (Chiroptera, Phyllostomidae) no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia*, v. 21, n. 3, p. 629-638, 2004.
- GOSLEE, S. C.; URBAN, D. L. *ecodist: Dissimilarity-based functions for ecological analysis*. R package version 2.1.3. 2023. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=ecodist>. Acesso em: 10 dez. 2024.
- GUIMARÃES, M. M.; FERREIRA, R. L. Morcegos cavernícolas do Brasil: novos registros e desafios para conservação. *Revista Brasileira de Espeleologia*, v. 2 n. 4, p. 1-33, 2015.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Manual técnico da vegetação brasileira* (2a ed.). Rio de Janeiro. 2012. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=263011>. Acesso em: 10 dez. 2024.
- INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE (IUCN). *The IUCN Red List of Threatened Species*. Version 2019-3. 2019. Disponível em: www.iucnredlist.org. Acesso em: 28 out. de 2024.
- KALKO, E. K. V.; HANDLEY, C. O., JR.; HANDLEY, D. Organization, diversity and long-term dynamics of a Neotropical bat community. In: CODY, M. L.; SMALLWOOD, J. A. (Ed.) *Long-term studies of vertebrate communities*. San Diego, Academic, cap. 16, p. 503-553, 1996.
- KRAFT, N. J. B.; ADLER, P. B.; GODOY, O.; JAMES, E. C.; FULLER, S.; LEVINE, J. M. Community assembly, coexistence and the environmental filtering metaphor. *Functional Ecology*, v. 29, n. 5, p. 592-599, 2015.
- KUNZ, T. H. Roosting ecology. In: KUNZ, T. H (Ed.). *Ecology of bats*. Plenum Press. New York & London, cap. 1, p. 1-55, 1982.
- KUNZ, T. H.; TORREZ, E. B.; BAUER, D.; LOBOVA, T.; FLEMING, T. H. Ecosystem services provided by bats. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1223, n. 1, p. 1-38, 2011.
- LEAL, E. S. B.; BERNARD, E. Mobility of bats between caves: ecological aspects and implications for conservation and environmental licensing activities in Brazil. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, v. 58, n. 2, p. 373-383, 2021.
- LEGENDRE, P. Spatial autocorrelation: trouble or new paradigm? *Ecology*, v. 74, n. 6, p. 1659-1673, 1993.

LOMOLINO, M. V. Elevation gradients of species richness: historical and prospective views. *Global Ecology and Biogeography*, v. 10, n. 1, p. 3-13, 2001.

LUO, J.; JIANG, T.; LU, G.; WANG, L.; WANG, J.; FENG, J. Bat conservation in China: should protection of subterranean habitats be a priority? *Oryx*, v. 47, n. 4, p. 526-531, 2013.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). *Lista Nacional Oficial de Espécies da Fauna Ameaçadas de Extinção*. Publicado no Diário Oficial da União nº 200, de 18 de outubro de 2018. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/publicacoes-diversas/livro_vermelho_2018_vol1.pdf. Acesso em: 28 de outubro de 2024.

MONTEIRO, J. C. S.; OLIVEIRA, A. C. M.; ANDRADE, F. A. G.; SOUSA, L. S.; LIMA, R. S.; REIS, S. M. C.; SOUZA, C. A. C.; COSTA, Â. G. T. New record of *Furipterus horrens* (Cuvier, 1828) (Chiroptera, Furipteridae) in eastern Brazilian Amazonia. *Check List*, v. 20, n. 1, p. 29-39, 2023.

NEKOLA, J. C.; WHITE, P. S. The distance decay of similarity in biogeography and ecology. *Journal of Biogeography*, v. 26, n. 5, p. 1013-1023, 1999.

OKSANEN, J.; BLANCHET, F. G.; KINDT, R.; LEGENDRE, P.; MINCHIN, P. R.; O'HARA, R. B.; SIMPSON, G. L.; SOLYMOS, P.; STEVENS, M. H. H.; WAGNER, H. *vegan: Community Ecology Package* (Version 2.5-7). 2020. Available from: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>. Acesso em: 28 out. de 2024.

OLIVEIRA, H. F. M.; OPREA, M.; DIAS, R. I. Distributional patterns, and ecological determinants of bat occurrence inside caves: A broad scale meta-analysis. *Diversity*, v. 10, n. 3, p. 49, 2018.

PILÓ, L.B.; AULER, A.S.; MARTINS, F. Carajás National Forest: Iron ore plateaus and caves in southeastern Amazon. In: VIEIRA, B.C.; SALGADO, A.R.; SANTOS, L.J.C. (Ed.). *Landscapes and Landforms of Brazil*. Springer, Dordrecht, cap. 25, p.273-283, 2015.

PINHEIRO, J.; BATES, D.; DEBROY, S.; SARKAR, D.; R CORE TEAM. *nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models*. R package version 3.1-162, 2023. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>. Acesso em: 28 out. 2024.

PODANI, J.; SCHMERA, D. A new conceptual and methodological framework for exploring and explaining pattern in presence-absence data. *Oikos*, v. 120, n. 11, p. 1625-1638, 2011.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. *R: a language and environment for statistical computing*. Vienna: R foundation for statistical computing, 2024. Disponível em: <<https://www.Rproject.org/>>. Acesso: 2 nov. 2024.

RODRÍGUEZ-DURÁN, A.; SOTO-CENTENO, J. A. Temperature selection by tropical bats roosting in caves. *Journal of Thermal Biology*, v. 28, n. 6, p. 465-468, 2003.

SAMPAIO, E. M.; KALKO, E. K. V.; BERNARD, E.; RODRIGUEZ-HERRERA, B.; HANDLEY, C. O. A biodiversity assessment of bats (Chiroptera) in lowland rain forest of Central Amazonia, including methodological and statistical considerations. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, v. 38, n. 1, p. 17-31, 2003.

SIKES, R. S., GANNON, W. L., & THE ANIMAL CARE AND USE COMMITTEE OF THE AMERICAN SOCIETY OF MAMMALOGISTS. Guidelines of the American Society of Mammalogists for the use of wild mammals in research and education. *Journal of Mammalogy*, v. 97, n. 3, p. 663-688, 2016.

SLOWIKOWSKI, K. *ggrepel: Repel Overlapping Text Labels in ggplot2*. R package version 0.9.3, 2023. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=ggrepel>. Acesso em: 28 out. 2024.

SOININEN, J. Species turnover along abiotic and biotic gradients: Patterns in space equal patterns in time? *BioScience*, v. 60, n. 6, p. 433-439, 2010.

STEVENS, R. D. Broad-scale gradients of resource utilization by phyllostomid bats in Atlantic Forest: patterns of dietary overlap, turnover and the efficacy of ecomorphological approaches. *Oecologia*, v. 198, n. 3, p. 785-799, 2022.

TOBLER, W.R. A Computer Model Simulation of Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography*, v. 46, n. sup1, p. 234-240, 1970.

TORQUETTI, C. G.; SILVA, M. X.; TALAMONI S. Differences between caves with and without bats in a Brazilian karst habitat. *Zoologia*, v. 34, p. 1-7, 2017.

TRAJANO, E. Ecologia de populações de morcegos cavernícolas em uma região cárstica do sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia*, v. 2 n. 5, p. 255-320, 1984.

VARGAS-MENA, J. C.; CORDERO-SCHMIDT, E.; RODRIGUEZ-HERRERA, B.; MEDELLÍN, R. A.; BENTO, D. D. M.; VENTICINQUE, E. M. Inside or out? Cave size and landscape effects on cave-roosting bat assemblages in Brazilian Caatinga caves. *Journal of Mammalogy*, v. 101, n. 2, p. 464-475, 2020.

VICENTE-GONZALEZ, L.; VICENTE-VILLARDON, J.L. PERMANOVA: Multivariate Analysis of Variance Based on Distances and Permutations. R package version 0.2.0. 2021. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=PERMANOVA>. Acesso em: 2 nov. 2024.

WICKHAM, H. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. New York: Springer-Verlag New York, 2016.

MATERIAL SUPLEMENTAR

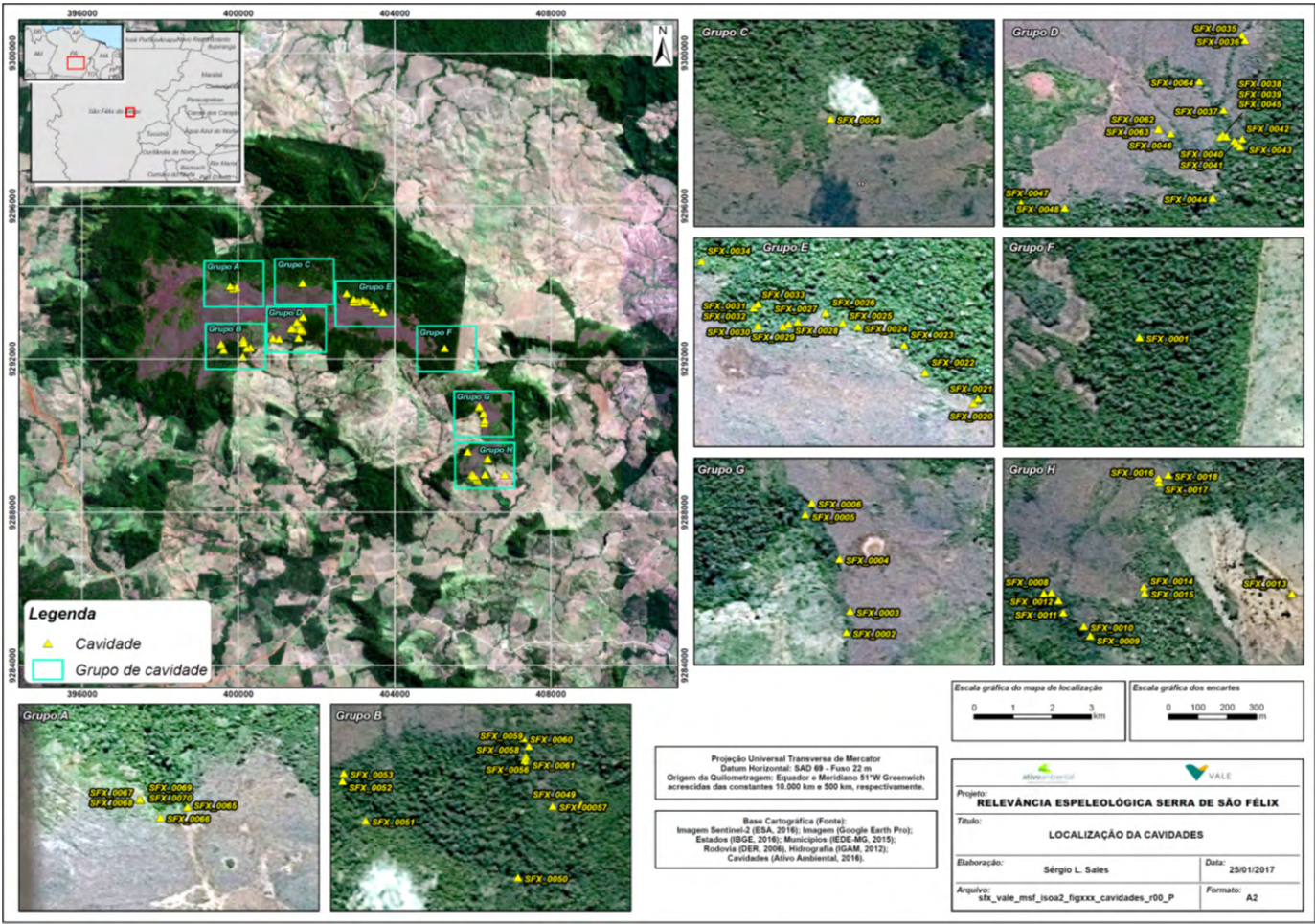


Figura S1 - Mapa com a localização da área de estudo e cavernas amostradas no município de São Félix do Xingu, Pará.



Figura S2 - Busca ativa por quirópteros nas cavernas.

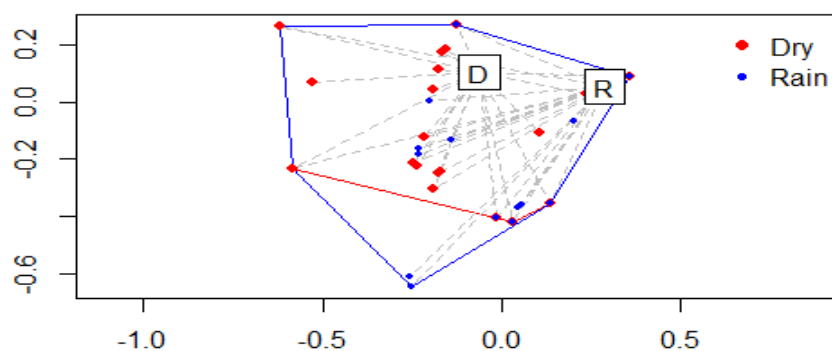


Figura S3 - Resultados do teste de homogeneidade da dispersão (PERMDISP2) para a composição de comunidades de morcegos entre as estações seca (Dry) e chuvosa (Rain). Os pontos representam as comunidades de morcegos em cada estação, conectados ao centróide correspondente, indicando a dispersão multivariada. Os polígonos delimitam a variação entre os grupos, enquanto as letras "D" e "R" destacam os centróides das estações seca e chuvosa, respectivamente.

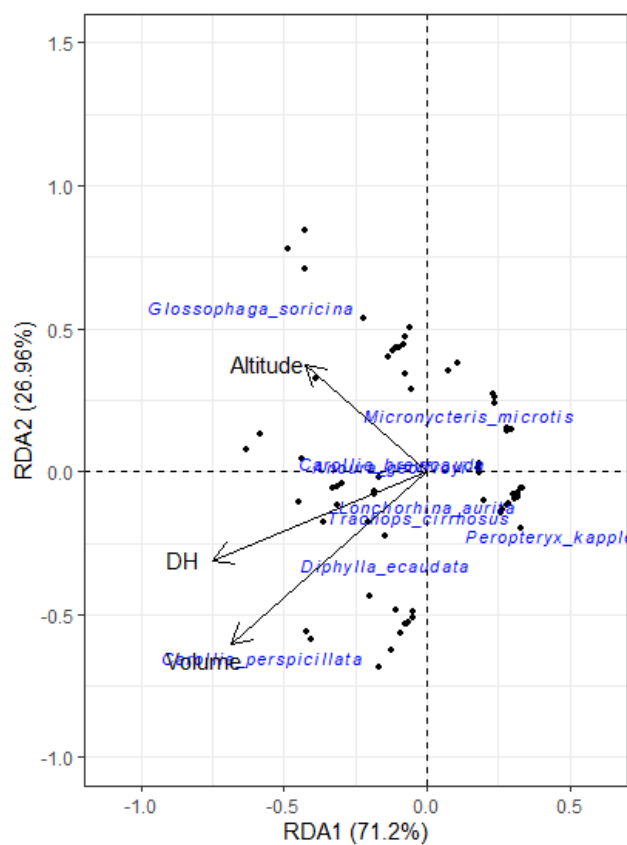


Figura S4 - Análise de Redundância (RDAP) mostrando a relação entre variáveis ambientais (volume, DH, altitude) e a composição de espécies de morcegos em cavernas de São Félix do Xingu para a estação chuvosa. As setas indicam a direção e a magnitude da correlação das variáveis ambientais com os eixos da RDAP. Cada ponto preto representa uma caverna, enquanto os nomes das espécies representam sua associação com os gradientes ambientais. O eixo RDA1 explica 71,2% da variância e o eixo RDA2, 26,96%.

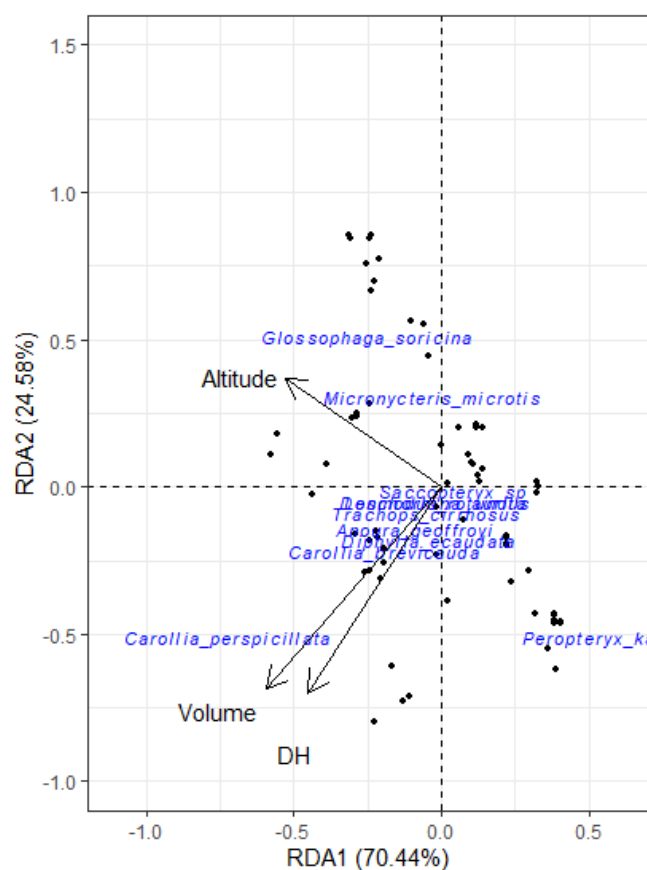


Figura S5 - Análise de Redundância (RDAP) mostrando a relação entre variáveis ambientais (volume, DH, altitude) e a composição de espécies de morcegos em cavernas de São Félix do Xingu para a estação seca. As setas indicam a direção e a magnitude da correlação das variáveis ambientais com os eixos da RDAP. Cada ponto preto representa uma caverna, enquanto os nomes das espécies representam sua associação com os gradientes ambientais. O eixo RDA1 explica 70.442% da variância e o eixo RDA2, 24,58.

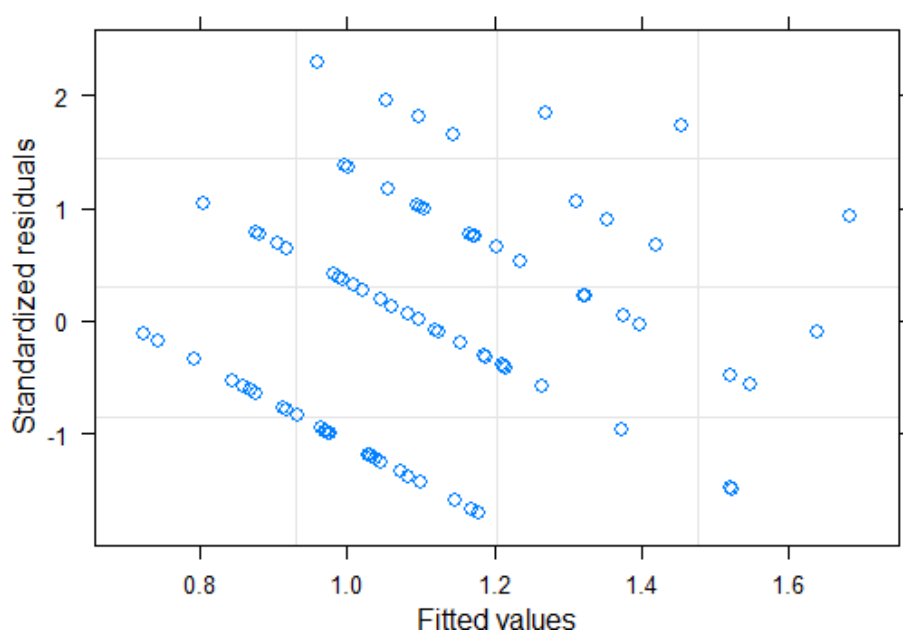


Figura S6 - Resíduos padronizados em função dos valores ajustados do modelo linear generalizado (GLS) utilizado para prever a riqueza de morcegos em função de variáveis ambientais e espaciais em São Félix do Xingu. O modelo incluiu as variáveis log-transformadas de floresta, altitude, desenvolvimento horizontal (DH) e volume, com uma estrutura de correlação espacial especificada como função das coordenadas (latitude e longitude). O método de máxima verossimilhança restrita (REML) foi utilizado para estimar os parâmetros.

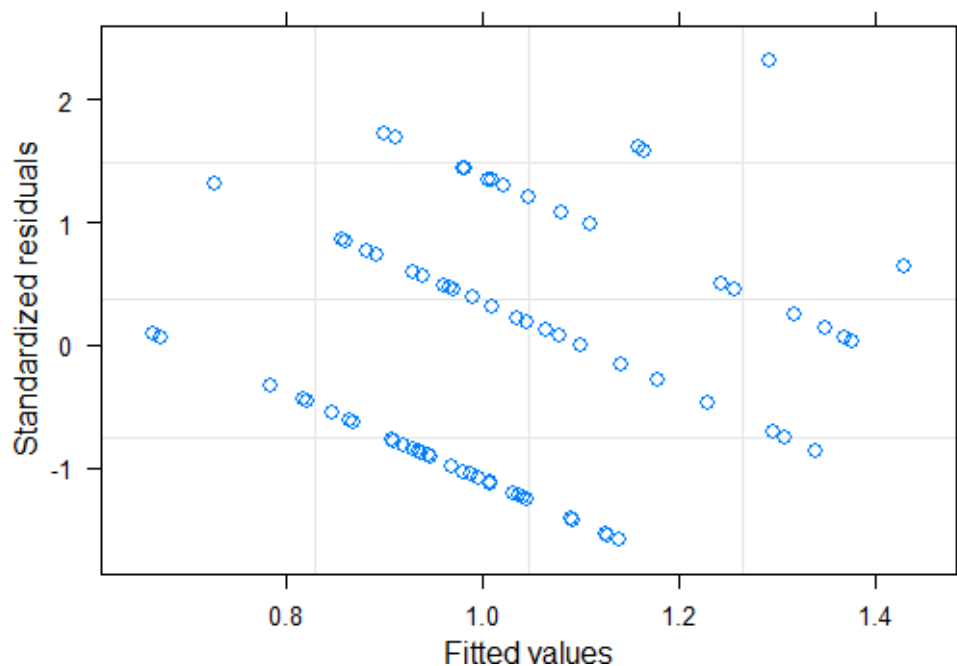


Figura S7 - Resíduos padronizados em função dos valores ajustados do modelo linear generalizado (GLS) utilizado para prever a riqueza de morcegos para a estação seca, em função de variáveis ambientais e espaciais em São Félix do Xingu. O modelo incluiu as variáveis log-transformadas de floresta, altitude, desenvolvimento horizontal (DH) e volume, com uma estrutura de correlação espacial especificada como função das coordenadas (latitude e longitude). O método de máxima verossimilhança restrita (REML) foi utilizado para estimar os parâmetros.

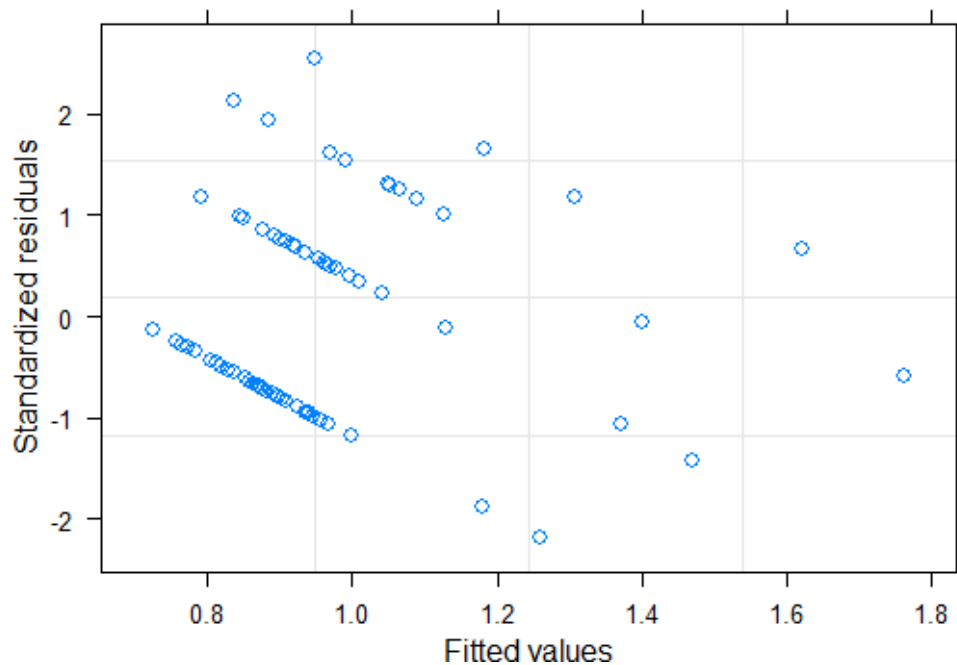


Figura S8 - Resíduos padronizados em função dos valores ajustados do modelo linear generalizado (GLS) utilizado para prever a riqueza de morcegos para a estação chuvosa, em função de variáveis ambientais e espaciais em São Félix do Xingu. O modelo incluiu as variáveis log-transformadas de floresta, altitude, desenvolvimento horizontal (DH) e volume, com uma estrutura de correlação espacial especificada como função das coordenadas (latitude e longitude). O método de máxima verossimilhança restrita (REML) foi utilizado para estimar os parâmetros.

Tabela S1 - Cavernas alvo do estudo localizadas no município de São Félix do Xingu, MG.

Nome	Datum SAD 69		Altitude	PH	Disnível	Area	Volume	Riqueza		
	Coord_E	Coord_N						Chuva	Seca	Total
SFX_0001	406286	9290293	622	67	3,12	183	351	1	2	2
SFX_0002	406294	9290326	637	145	9,66	384	780	5	4	6
SFX_0003	406305	9290401	625	23,26	2,54	61,01	64	2	2	2
SFX_0004	406269	9290583	615	14	1,38	25	21	2	3	3
SFX_0005	406153	9290738	641	12,92	2,09	29,29	38	1	1	1
SFX_0006	406176	9290779	621	13,8	2,34	27,2	40	2	3	4
SFX_0007	405973	9288985	507	12,1	4,34	36,55	82	1	1	1
SFX_0008	405997	9288987	502	58,8	3,61	218,9	588	1	3	3
SFX_0009	406130	9288836	478	13,6	1,47	16,24	13	2	1	2
SFX_0010	406108	9288870	486	29,5	2,95	77,3	78	1	1	2
SFX_0011	406039	9288918	469	8,89	1,6	13,6	11	0	1	1
SFX_0012	406022	9288959	502	17,78	1,52	15,04	17	0	2	2
SFX_0013	406819	9288683	320	20	1,15	32	20	0	0	0
SFX_0014	406314	9289007	472	37,5	5,54	154	373	3	4	5
SFX_0015	406316	9288986	453	17,5	2,29	35,5	34	1	0	1
SFX_0016	406367	9289369	523	66	7,76	186	342	2	2	2
SFX_0017	406364	9289385	525	12	1,51	33	41	1	2	2
SFX_0018	406396	9289397	505	20	2,63	83,5	202	2	2	2
SFX_0019	405874	9289583	582	10,5	0,98	40	41	1	2	2
SFX_0020	403685	9293221	649	26,5	1,21	50,01	39	1	1	1
SFX_0021	403703	9293236	650	21	1,22	35	24	2	2	2
SFX_0022	403523	9293329	651	9,5	1,71	17	18	2	2	2
SFX_0023	403453	9293425	659	9	2,09	17	18	0	0	0
SFX_0024	403297	9293491	645	10,5	1,95	60	94	1	3	3
SFX_0025	403247	9293505	641	40	5,18	148	533	3	3	5
SFX_0026	403188	9293540	642	14,5	1,74	22	22	1	0	1
SFX_0027	403093	9293508	652	16	6,27	47	93	1	1	1
SFX_0028	403063	9293503	661	27	1,28	49	70	1	3	3
SFX_0029	403043	9293493	651	29	1,46	82	81	2	1	2
SFX_0030	402960	9293496	639	15	3,35	36	38	1	1	1
SFX_0031	402943	9293559	628	11	4,57	30	43	2	1	2
SFX_0032	402945	9293559	632	10,5	1,37	29	29	0	0	0
SFX_0033	402960	9293572	610	15	4,7	60	56	3	3	3
SFX_0034	402768	9293723	657	14	1,72	32	23	1	1	1
SFX_0035	401647	9293124	583	53	3,36	104	160	3	1	3

	Datum SAD 69							Riqueza		
Nome	Coord_E	Coord_N	Altitude	PH	Disnível	Area	Volume	Chuva	Seca	Total
SFX_0036	401658	9293106	606	27	2,06	68	71	2	2	3
SFX_0037	401581	9292867	558	28	3,35	74	53	2	2	3
SFX_0038	401578	9292782	541	16	1,33	83	161	2	1	2
SFX_0039	401569	9292774	540	56	4,19	171	263	3	1	3
SFX_0040	401618	9292760	536	16	2,56	48	79	2	1	2
SFX_0041	401625	9292750	529	9	1,11	37	74	1	2	2
SFX_0042	401644	9292766	530	42	5,03	123	108	1	1	1
SFX_0043	401636	9292739	539	30	5,98	55	82	1	2	2
SFX_0044	401541	9292563	519	16	2,33	35	55	1	3	3
SFX_0045	401590	9292775	541	25	3,84	56	116	1	2	2
SFX_0046	401403	9292786	559	11	1,57	30,3	25	0	0	0
SFX_0047	400892	9292553	613	30	2,16	46	60	2	3	3
SFX_0048	401040	9292534	605	16,5	0,72	18	16	4	1	4
SFX_0049	400312	9292303	526	9	2,05	36	34	1	2	2
SFX_0050	400111	9292064	451	Não topografada				0	0	0
SFX_0051	399624	9292249	514	10	0,59	25	19	0	0	0
SFX_0052	399550	9292379	565	16	1,69	62	111	2	2	2
SFX_0053	399554	9292404	551	38	5,28	86	155	3	3	3
SFX_0054	401649	9293987	740	10	0,76	27	20	0	1	1
SFX_0055	401527	9293994	718	29	4,76	143	327	3	2	3
SFX_0056	400134	9292457	568	23	3,4	45	62	1	2	2
SFX_0057	400220	9292297	522	111,5	16,33	664	1148	2	2	2
SFX_0058	400132	9292447	562	12	3,67	23	35	1	1	1
SFX_0059	400143	9292491	583	30,5	2,79	74	112	2	2	3
SFX_0060	400126	9292518	585	21	3,07	65	88	1	3	4
SFX_0061	400135	9292434	575	18	1,56	42	46	2	1	2
SFX_0062	401361	9292804	573	8	1,46	16	12	0	0	0
SFX_0063	401360	9292802	565	11	1,11	16	13	1	1	1
SFX_0064	401500	9292967	568	12	1,92	20	41	1	1	1
SFX_0065	399948	9293879	642	15,5	3,07	61,5	56	2	3	3
SFX_0066	399855	9293842	635	8	1,08	34	37	1	2	2
SFX_0067	399789	9293904	639	15	1,68	18	35	1	1	1
SFX_0068	399784	9293906	644	8	1,6	15	11	1	1	1
SFX_0069	399706	9292475	557	24	1,4	56	57	3	1	1
SFX_0070	406692	9290002	620	78	7,85	408	711	1	3	3
SFX_0071	411904	9295964	560	9,5	2,46	22	21	1	1	1
SFX_0072	406715	9290004	609	63	9,54	413	761	2	2	3

Datum SAD 69								Riqueza		
Nome	Coord_E	Coord_N	Altitude	PH	Disnível	Area	Volume	Chuva	Seca	Total
SFX_0073	406737	9289955	585	192	25,1	697	1109	4	3	4
SFX_0074	406757	9289910	563	10	1,47	19	25	1	1	1
SFX_0075	406779	9289886	538	20	5,5	55	85	3	3	4
SFX_0076	406501	9289518	541	28	1,62	76	107	1	1	1
SFX_0077	406942	9289522	519	13	0,79	48	54	1	1	1
SFX_0078	406252	9289091	506	69,5	6	377	779	4	6	6
SFX_0079	413056	9295220	509	19	3,86	30	30	1	0	0
SFX_0080	413283	9295064	468	13	2,65	52	87	1	1	1
SFX_0081	413180	9295073	484	46	6,52	140	297	3	4	4
SFX_0082	413220	9295037	467	7	1,03	15	33	1	2	2
SFX_0083	413260	9295027	471	15	3,5	100	346	1	2	2
SFX_0084	413289	9295004	444	35,5	4,65	126	238	2	1	2
SFX_0085	413380	9294880	416	10	1,99	21	23	1	0	1
SFX_0086	413387	9294870	424	8	2,48	31	47	1	0	1
SFX_0087	413292	9294973	443	42,5	1,9	166	713	4	3	4
SFX_0088	413259	9294717	442	70	5,08	207	265	2	1	2
SFX_0089	413212	9294616	410	14	2,62	26	40	1	1	1
SFX_0090	413270	9295077	463	8,5	0,66	13	8	1	0	1

Tabela S2 - Datas de amostragem, nas estações chuvosa e seca, referentes ao diagnóstico de quirópteros em cavidades naturais localizadas no município de São Félix do Xingu, MG.

Cavidade	Data		Cavidade	Data		Cavidade	Data	
	Chuva	Seca		Chuva	Seca		Chuva	Seca
SFX_0001	01/03/18	25/07/18	SFX_0031	02/03/18	11/07/18	SFX_0061	29/01/18	20/07/18
SFX_0002	03/02/18	25/07/18	SFX_0032	02/03/18	11/07/18	SFX_0062	24/02/18	12/07/18
SFX_0003	01/03/18	24/07/18	SFX_0033	02/03/18	11/07/18	SFX_0063	24/02/18	12/07/18
SFX_0004	16/01/18	24/07/18	SFX_0034	30/01/18	18/07/18	SFX_0064	18/01/18	12/07/18
SFX_0005	16/01/18	24/07/18	SFX_0035	18/01/18	19/07/18	SFX_0065	17/01/18	17/07/18
SFX_0006	16/01/18	24/07/18	SFX_0036	18/01/18	19/07/18	SFX_0066	17/01/18	17/07/18
SFX_0007	03/03/18	21/07/18	SFX_0037	27/02/18	19/07/18	SFX_0067	17/01/18	17/07/18
SFX_0008	03/03/18	21/07/18	SFX_0038	27/02/18	12/07/18	SFX_0068	17/01/18	17/07/18
SFX_0009	21/02/18	21/07/18	SFX_0039	27/02/18	19/07/18	SFX_0069	24/02/18	17/07/18
SFX_0010	21/02/18	21/07/18	SFX_0040	26/02/18	12/07/18	SFX_0070	28/02/18	16/07/18
SFX_0011	21/02/18	21/07/18	SFX_0041	26/02/18	12/07/18	SFX_0071	25/01/18	21/05/19
SFX_0012	21/02/18	20/07/18	SFX_0042	26/02/18	12/07/18	SFX_0072	22/02/18	23/07/18
SFX_0013	23/02/18	23/07/18	SFX_0043	26/02/18	12/07/18	SFX_0073	28/02/18	23/07/18

SFX_0014	23/02/18	10/07/18	SFX_0044	26/02/18	12/07/18	SFX_0074	22/02/18	23/07/18
SFX_0015	23/02/18	10/07/18	SFX_0045	27/02/18	19/07/18	SFX_0075	22/02/18	21/07/18
SFX_0016	02/02/18	16/07/18	SFX_0046	24/02/18	12/07/18	SFX_0076	05/03/18	16/07/18
SFX_0017	02/02/18	16/07/18	SFX_0047	03/03/18	27/07/18	SFX_0077	05/03/18	10/07/18
SFX_0018	02/02/18	16/07/18	SFX_0048	03/03/18	27/07/18	SFX_0078	23/02/18	10/07/18
SFX_0019	05/03/18	16/07/18	SFX_0049	26/01/18	20/07/18	SFX_0079	23/01/18	31/07/18
SFX_0020	01/02/18	30/07/18	SFX_0050	26/01/18	23/07/18	SFX_0080	23/01/18	31/07/18
SFX_0021	01/02/18	30/07/18	SFX_0051	20/01/18	17/07/18	SFX_0081	25/01/18	31/07/18
SFX_0022	01/02/18	30/07/18	SFX_0052	20/01/18	17/07/18	SFX_0082	24/01/18	31/07/18
SFX_0023	01/02/18	18/07/18	SFX_0053	20/01/18	17/07/18	SFX_0083	24/01/18	31/07/18
SFX_0024	02/03/18	18/07/18	SFX_0054	19/01/18	11/07/18	SFX_0084	25/01/18	31/07/18
SFX_0025	02/03/18	18/07/18	SFX_0055	19/01/18	11/07/18	SFX_0085	24/01/18	31/07/18
SFX_0026	02/03/18	18/07/18	SFX_0056	29/01/18	20/07/18	SFX_0086	24/01/18	31/07/18
SFX_0027	30/01/18	18/07/18	SFX_0057	26/01/18	20/07/18	SFX_0087	23/01/18	31/07/18
SFX_0028	30/01/18	18/07/18	SFX_0058	29/01/18	20/07/18	SFX_0088	24/01/18	31/07/18
SFX_0029	30/01/18	18/07/18	SFX_0059	29/01/18	20/07/18	SFX_0089	24/01/18	31/07/18
SFX_0030	30/01/18	11/07/18	SFX_0060	29/01/18	20/07/18	SFX_0090	23/01/18	31/07/18

Tabela S3 - Resultados do modelo estatístico Regressão Múltipla em Matrizes de Distância avaliando os efeitos de variáveis ambientais (distância, altitude, Desenvolvimento Horizontal e volume) sobre a dissimilaridade entre comunidades de morcegos em cavernas. Os coeficientes representam a direção e magnitude dos efeitos de cada variável, enquanto os valores de p indicam o nível de significância estatística.

<i>β_{total}</i> (R2 = 0,0073; pval 0,663)		
	Coefficient	<i>p</i>
Intercept	5,291803e-01	0,91
Distância	1,380e-08	0,75
Altitude	2,652462e-04	0,18
DH	-6,958690e-05	0,93
Volume	7,341765e-05	0,49
<i>β_{repl_total}</i> (R2 = 0,0109, pval = 0,467)		
	Coefficient	<i>P</i>
Intercept	2,270581e-01	0,24
Distância	3,498806e-08	0,50
Altitude	8,406041e-05	0,71
DH	-6,344957e-04	0,50
Volume	-3,802850e-05	0,76

<i>Brich_total</i> (R2 = 0,036, pval = 0,002)		
	Coefficient	p
Intercept	3,021222e-01	0,99
Distância	-2,072426e-08	0,55
Altitude	1,811858e-04	0,15
DH	5,649088e-04	0,28
Volume	1,114461e-04	0,06

Tabela S4 - Matriz de autovetores espaciais gerados por PCNM e utilizados como covariável para controlar a dependência espacial

Cavidade	PCNM1	PCNM3	PCNM4	PCNM5
SFX_0001	-0,14936	8,37E-06	9,73E-07	-0,07831
SFX_0002	-0,14936	8,38E-06	9,66E-07	-0,07516
SFX_0003	-0,14936	8,40E-06	9,49E-07	-0,06799
SFX_0004	-0,14936	8,45E-06	9,06E-07	-0,05056
SFX_0005	-0,14936	8,50E-06	8,66E-07	-0,03566
SFX_0006	-0,14936	8,51E-06	8,55E-07	-0,03176
SFX_0007	-0,14936	7,97E-06	1,14E-06	-0,2032
SFX_0008	-0,14936	7,97E-06	1,14E-06	-0,20302
SFX_0009	-0,14936	7,92E-06	1,15E-06	-0,21756
SFX_0010	-0,14936	7,93E-06	1,15E-06	-0,21429
SFX_0011	-0,14936	7,95E-06	1,15E-06	-0,20965
SFX_0012	-0,14936	7,96E-06	1,14E-06	-0,20572
SFX_0014	-0,14936	7,97E-06	1,14E-06	-0,20132
SFX_0015	-0,14936	7,97E-06	1,14E-06	-0,20333
SFX_0016	-0,14936	8,09E-06	1,12E-06	-0,16673
SFX_0017	-0,14936	8,09E-06	1,11E-06	-0,1652
SFX_0018	-0,1474	-0,0002	1,28E-06	2,16E-09
SFX_0019	-0,14936	8,16E-06	1,09E-06	-0,14594
SFX_0020	-0,14936	9,09E-06	-1,91E-07	0,203449
SFX_0021	-0,14936	9,10E-06	-1,99E-07	0,204871
SFX_0022	-0,14936	9,11E-06	-2,55E-07	0,213884
SFX_0024	-0,14936	9,15E-06	-3,53E-07	0,229531
SFX_0025	-0,14936	9,15E-06	-3,62E-07	0,230903
SFX_0026	-0,14936	9,16E-06	-3,84E-07	0,23429
SFX_0027	-0,14936	9,15E-06	-3,65E-07	0,231289
SFX_0028	-0,14936	9,15E-06	-3,62E-07	0,230831

Cavidade	PCNM1	PCNM3	PCNM4	PCNM5
SFX_0029	-0,14936	9,15E-06	-3,56E-07	0,229888
SFX_0030	-0,14936	9,15E-06	-3,58E-07	0,230228
SFX_0031	-0,14936	9,16E-06	-3,97E-07	0,236266
SFX_0033	0,081758	0,043214	-0,07612	-8,80E-07
SFX_0034	0,081758	0,047806	-0,09173	-9,45E-07
SFX_0035	0,081757	0,07978	-0,05161	-8,24E-07
SFX_0036	0,081757	0,079549	-0,04989	-8,17E-07
SFX_0037	0,081757	0,082435	-0,02959	-7,41E-07
SFX_0038	0,081757	0,082811	-0,02209	-7,13E-07
SFX_0039	0,081757	0,083079	-0,02149	-7,11E-07
SFX_0040	0,081757	0,081822	-0,01968	-7,03E-07
SFX_0041	0,081757	0,08167	-0,01871	-6,99E-07
SFX_0042	0,081757	0,081107	-0,01991	-7,03E-07
SFX_0043	0,081757	0,081415	-0,01761	-6,94E-07
SFX_0044	0,081757	0,084561	-0,0031	-6,41E-07
SFX_0045	0,081757	0,082516	-0,02133	-7,10E-07
SFX_0047	0,081757	0,101898	-0,00974	-6,76E-07
SFX_0048	0,081757	0,098019	-0,00634	-6,61E-07
SFX_0049	0,081757	0,118232	0,005704	-6,22E-07
SFX_0052	0,078068	-2,95E-07	2,09E-11	1,85E-05
SFX_0053	0,081756	0,138089	-0,01204	-6,92E-07
SFX_0054	0,081757	0,076719	-0,1281	-1,11E-06
SFX_0055	0,081757	0,079947	-0,13014	-1,12E-06
SFX_0056	0,081757	0,122441	-0,01001	-6,83E-07
SFX_0057	0,081757	0,120706	0,005169	-6,24E-07
SFX_0058	0,081757	0,122529	-0,00915	-6,80E-07
SFX_0059	0,081757	0,122083	-0,01292	-6,95E-07
SFX_0060	0,081757	0,122442	-0,01551	-7,05E-07
SFX_0061	0,081757	0,122495	-0,00796	-6,75E-07
SFX_0063	0,081757	0,088553	-0,02639	-7,33E-07
SFX_0064	0,081757	0,084246	-0,0394	-7,80E-07
SFX_0065	0,081756	0,122444	-0,13824	-1,17E-06
SFX_0066	0,081756	0,125052	-0,13604	-1,16E-06
SFX_0067	0,081756	0,126596	-0,1423	-1,18E-06
SFX_0068	0,081756	0,126722	-0,14253	-1,19E-06
SFX_0069	0,081756	0,133789	-0,01657	-7,10E-07

Cavidade	PCNM1	PCNM3	PCNM4	PCNM5
SFX_0070	0,081757	-0,04384	0,283648	7,25E-07
SFX_0071	0,081754	-0,20357	-0,18453	-5,52E-07
SFX_0072	0,081757	-0,04446	0,283737	7,27E-07
SFX_0073	0,081757	-0,04488	0,288336	7,47E-07
SFX_0074	0,081757	-0,04525	0,292558	7,66E-07
SFX_0075	0,081757	-0,04575	0,29494	7,77E-07
SFX_0076	0,081757	-0,03706	0,324345	8,82E-07
SFX_0077	0,081757	-0,04883	0,329101	9,31E-07
SFX_0078	0,081757	-0,02893	0,359317	1,01E-06
SFX_0080	0,081753	-0,2372	-0,08875	-3,20E-08
SFX_0081	0,081753	-0,23448	-0,09074	-5,34E-08
SFX_0082	0,081753	-0,23542	-0,08709	-3,48E-08
SFX_0083	0,081753	-0,23645	-0,08574	-2,44E-08
SFX_0084	0,081753	-0,23715	-0,08336	-1,19E-08
SFX_0085	0,081753	-0,23914	-0,07131	4,40E-08
SFX_0086	0,081753	-0,23929	-0,07035	4,84E-08
SFX_0087	0,081753	-0,23712	-0,08058	-1,51E-09
SFX_0088	0,081753	-0,23535	-0,05827	7,41E-08
SFX_0089	0,081753	-0,23374	-0,04986	9,80E-08
SFX_0090	0,081753	-0,23689	-0,09005	-3,84E-08

Tabela S5 - Valores do Fator de Inflação da Variância (VIF) para as variáveis ambientais e espaciais utilizadas nas análises de Redundância Parcial (RDAp) em diferentes cenários: análise geral (RDAp - Geral), durante a estação chuvosa (RDAp - Chuva) e durante a estação seca (RDAp - Seca). Os valores de VIF indicam o grau de colinearidade entre as variáveis explicativas, sendo que valores acima de 5 sugerem possível multicolinearidade. As variáveis incluem componentes principais de matriz de distância (PCNM1, PCNM3, PCNM4, PCNM5), altitude, desenvolvimento horizontal (DH) e volume das cavernas.

	PCNM1	PCNM3	PCNM4	PCNM5	Altitude	DH	Volume
RDAp – Geral	1,110771	1,789282	1,177923	1,644285	2,486652	4,138644	4,240463
RDAp - chuva	1,165024	1,863688	1,168451	1,665263	2,677870	4,097495	4,176438
RDAp - seca	1,116811	1,608929	1,167616	1,576358	2,190868	4,056383	4,213863

Tabela S6 - Resultados das análises de Redundância Parcial (RDAP) realizadas para investigar a contribuição das variáveis ambientais (Altitude, Desenvolvimento Horizontal - DH e Volume das cavernas) na composição das comunidades de morcegos em São Félix do Xingu, considerando os cenários geral, estação chuvosa e estação seca. Os valores ajustados de R² indicam a proporção da variância explicada após ajuste pelos graus de liberdade. Para cada variável, são apresentados os graus de liberdade (Df), a variância explicada, o valor do teste F e o valor de probabilidade Pr(>F). Valores de p significativos ($\alpha=0,05$) estão indicados por asteriscos (*). Os resíduos representam a variância não explicada pelo modelo.

RDAP geral R² = 0,046				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,012	2,564	0,032 *
DH	1	0,015	3,387	0,014 *
Volume	1	0,004	0,904	0,476
Residual	74	0,347		
RDAP chuva R² = 0,052				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,016	3,109	0,027 *
DH	1	0,015	2,962	0,027 *
Volume	1	0,005	1,056	0,354
Residual	70	0,362		
RDAP seca R² = 0,041				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,016	3,132	0,016 *
DH	1	0,009	1,780	0,122
Volume	1	0,007	1,358	0,248
Residual	69	0,370		

Tabela S7 - Resultados das análises de Redundância Baseada em Distância Parcial (dbRDAP) realizadas para avaliar a influência das variáveis ambientais (Altitude, Desenvolvimento Horizontal - DH e Volume das cavernas) na composição das comunidades de morcegos em São Félix do Xingu, considerando os cenários geral, estação chuvosa e estação seca. Os valores ajustados de R² indicam a proporção da variância explicada após ajuste pelos graus de liberdade. Para cada variável, são apresentados os graus de liberdade (Df), a variância explicada, o valor do teste F e o valor de probabilidade Pr(>F). Valores de p significativos ($\alpha=0,05$) estão destacados com um asterisco (*) ou dois (**) para indicar significância mais forte. Os resíduos representam a variância não explicada pelo modelo.

dbRDAP geral R² = 0,077				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,501	2,465	0,048 *
DH	1	0,882	4,341	0,002 **
Volume	1	0,223	1,097	0,362
Residual	74	15,04		

dbRDAP chuva R2 = 0,068				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,656	3,104	0,035 *
DH	1	0,887	4,198	0,005 **
Volume	1	0,244	1,156	0,304
Residual	70	14,791		
dbRDAP seca R2 = 0,052				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,660	3,037	0,016 *
DH	1	0,470	2,166	0,076
Volume	1	0,4217	1,940	0,102
Residual	69	14,995		

Tabela S8 - Resultados das análises de Mínimos Quadrados Generalizados (GLS) para avaliar a relação entre variáveis ambientais (Altitude, Desenvolvimento Horizontal - DH e Volume das cavernas) e a riqueza de espécies de morcegos em São Félix do Xingu, considerando os cenários geral, estação chuvosa e estação seca. São apresentados os coeficientes (Coeff.), erros padrão (S, erro.), valores do teste t, e valores de probabilidade (p). Valores de p significativos ($\alpha=0,05$) estão destacados. Os resultados indicam as variáveis que mais contribuem para explicar a variação na riqueza em cada cenário analisado.

Geral				
	Coeff.	S, erro.	t	p
Intercept	-2,14	1,57	-1,36	0,17
Altitude	0,37	0,24	1,53	0,12
DH	0,09	0,07	1,13	0,25
Volume	0,11	0,04	2,37	0,02
Seca				
	Coeff.	S, erro.	t	p
Intercept	-2,098	1,7372	-1,2077	0,23
Altitude	0,3888	0,2703	1,4384	0,15
DH	-0,0532	0,0812	-0,6552	0,51
Volume	0,1621	0,0503	3,2236	0,001
Chuva				
	Coeff.	S, erro.	t	p
Intercept	0,53008	0,2528	2,0967	0,03
Altitude	0,00070	0,00045	1,5536	0,12
DH	0,00215	0,0019	1,1191	0,26
Volume	0,00042	0,00023	1,8205	0,07

SUPPLEMENTARY MATERIAL

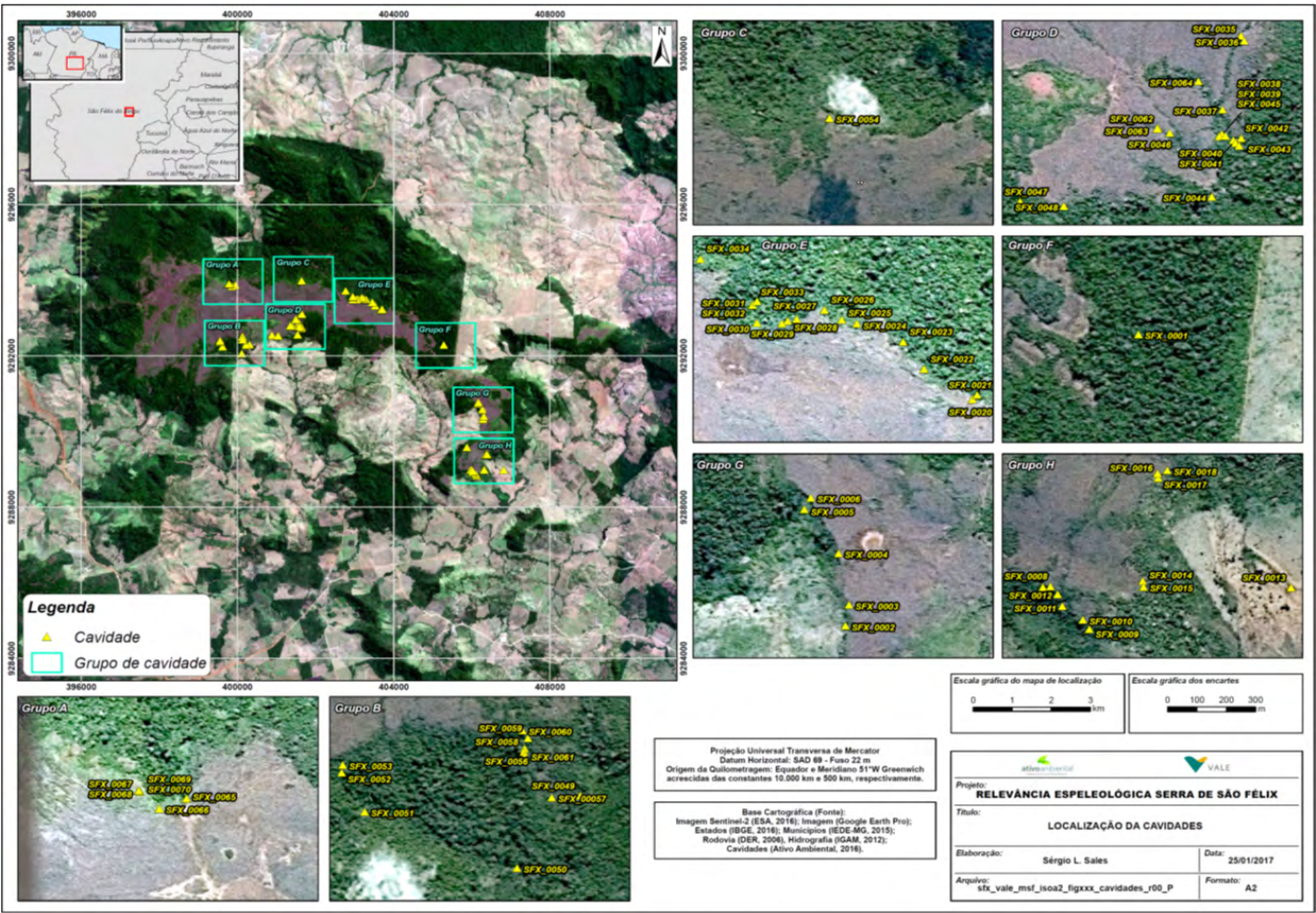


Figure S1 - Map showing the location of the study area and sampled caves in the municipality of São Félix do Xingu, Pará.



Figure S2 - Active search for bats in caves.

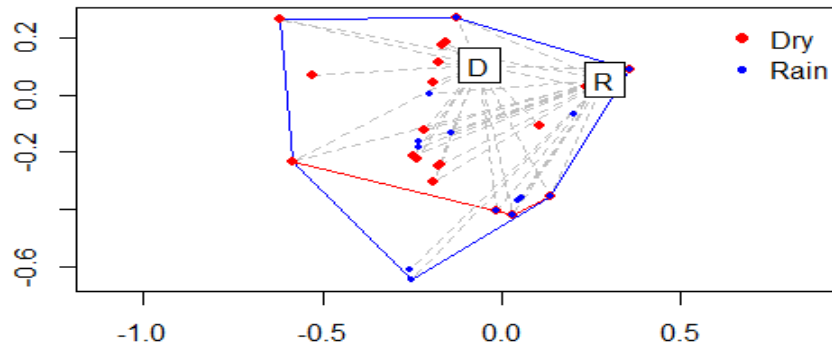


Figure S3 - Results of the dispersion homogeneity test (PERMDISP2) for the composition of bat communities between the dry (Dry) and rainy (Rain) seasons. The points represent the bat communities in each season, connected to the corresponding centroid, indicating multivariate dispersion. The polygons delimit the variation between groups, while the letters "D" and "R" highlight the centroids of the dry and rainy seasons, respectively.

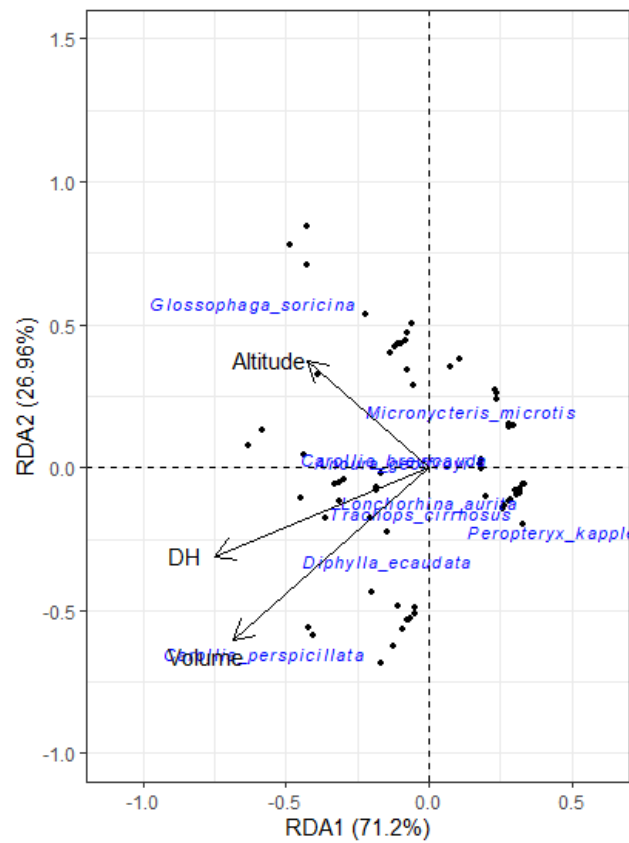


Figure S4 - Redundancy Analysis (RDAP) showing the relationship between environmental variables (volume, DH, altitude) and the composition of bat species in São Félix do Xingu caves during the rainy season. The arrows indicate the direction and magnitude of the correlation of environmental variables with the RDAP axes. Each black dot represents a cave, while the species names represent their association with environmental gradients. The RDA1 axis explains 71.2% of the variance and the RDA2 axis explains 26.96%.

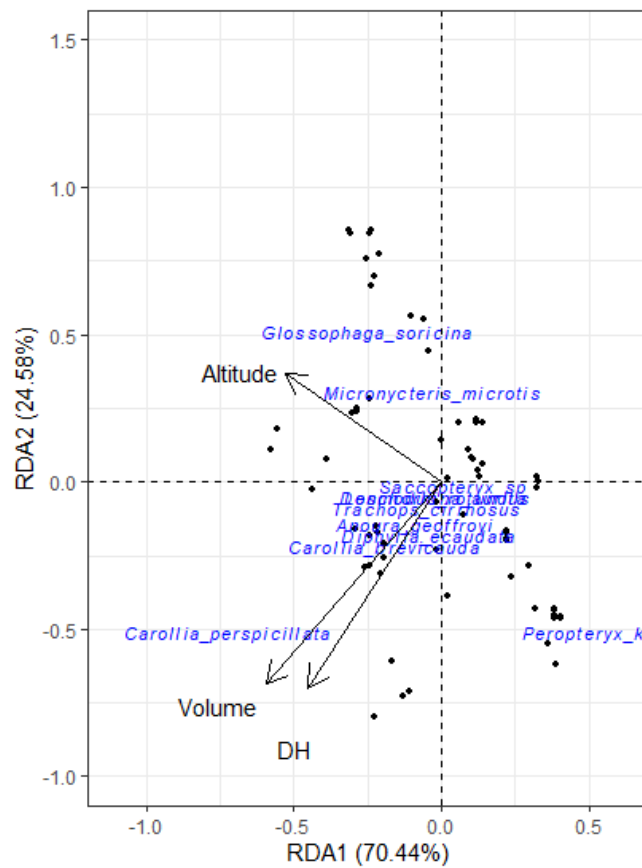


Figure S5 - Redundancy Analysis (RDA) showing the relationship between environmental variables (volume, DH, altitude) and the composition of bat species in São Félix do Xingu caves during the dry season. The arrows indicate the direction and magnitude of the correlation of environmental variables with the RDA axes. Each black dot represents a cave, while the species names represent their association with environmental gradients. The RDA1 axis explains 70.442% of the variance and the RDA2 axis explains 24.58%.

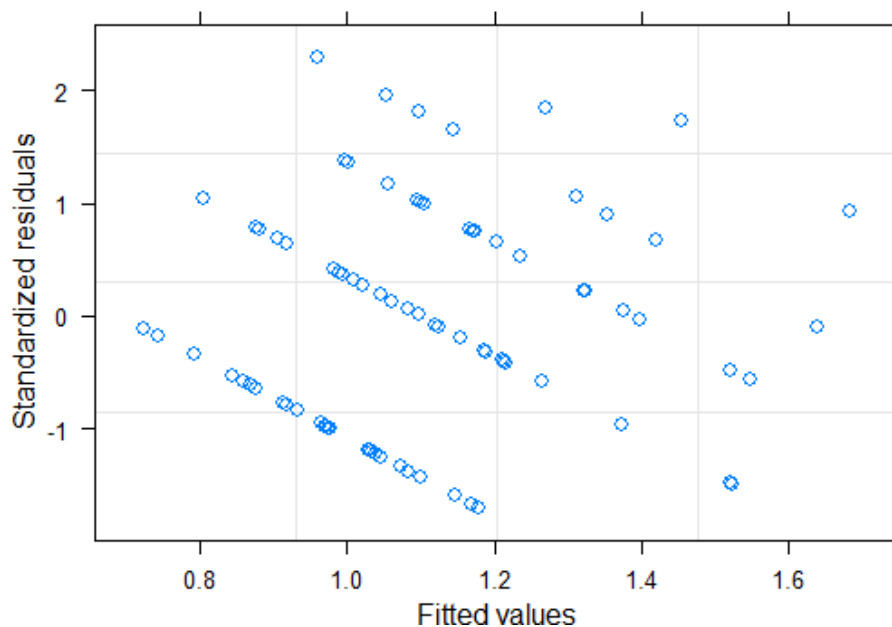


Figure S6 - Standardized residuals as a function of the adjusted values of the generalized linear model (GLS) used to predict bat richness as a function of environmental and spatial variables in São Félix do Xingu. The model included log-transformed variables of forest, altitude, horizontal development (DH), and volume, with a spatial correlation structure specified as a function of coordinates (latitude and longitude). The restricted maximum likelihood (REML) method was used to estimate the parameters.

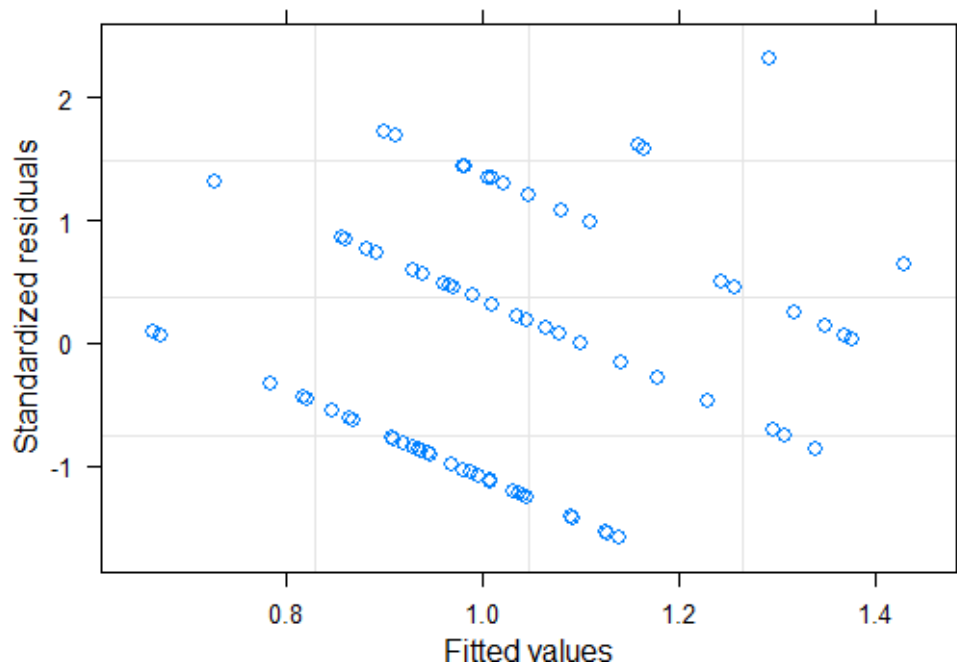


Figure S7 - Standardized residuals as a function of the adjusted values of the generalized linear model (GLS) used to predict bat richness for the dry season, as a function of environmental and spatial variables in São Félix do Xingu. The model included log-transformed variables of forest, altitude, horizontal development (DH), and volume, with a spatial correlation structure specified as a function of coordinates (latitude and longitude). The restricted maximum likelihood (REML) method was used to estimate the parameters.

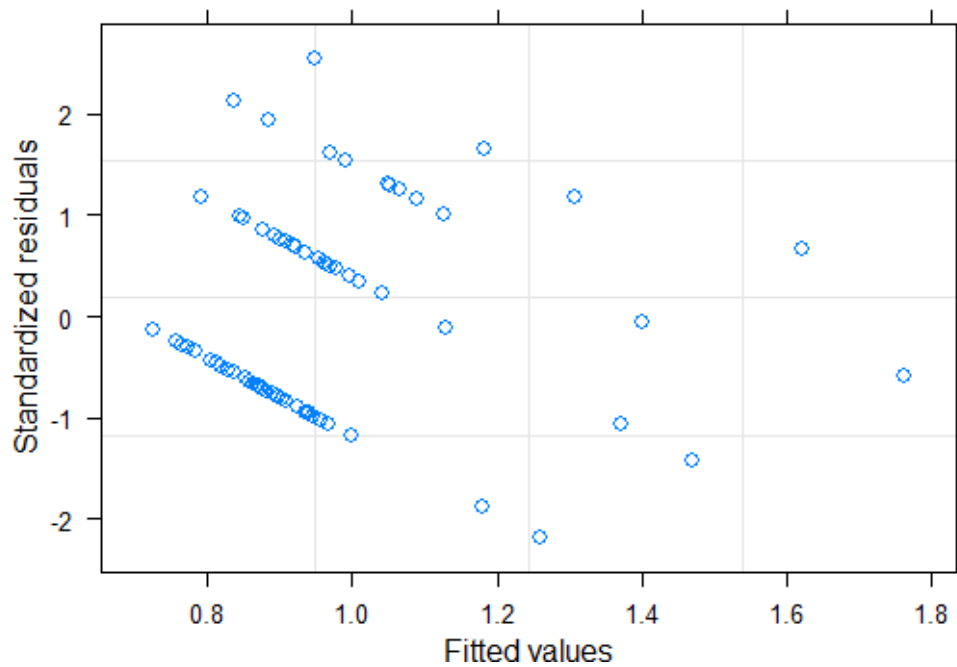


Figure S8 - Standardized residuals as a function of the adjusted values of the generalized linear model (GLS) used to predict bat richness for the rainy season, as a function of environmental and spatial variables in São Félix do Xingu. The model included log-transformed variables of forest, altitude, horizontal development (DH), and volume, with a spatial correlation structure specified as a coordinates function (latitude and longitude). The restricted maximum likelihood (REML) method was used to estimate the parameters.

Table S1 - Target caves located in the municipality of São Félix do Xingu, PA.

Name	Datum SAD 69		Altitude	HD	Level difference	Area	Volume	Richness		
	Coord_E	Coord_N						Rainy	Dry	Total
SFX_0001	406286	9290293	622	67	3,12	183	351	1	2	2
SFX_0002	406294	9290326	637	145	9,66	384	780	5	4	6
SFX_0003	406305	9290401	625	23,26	2,54	61,01	64	2	2	2
SFX_0004	406269	9290583	615	14	1,38	25	21	2	3	3
SFX_0005	406153	9290738	641	12,92	2,09	29,29	38	1	1	1
SFX_0006	406176	9290779	621	13,8	2,34	27,2	40	2	3	4
SFX_0007	405973	9288985	507	12,1	4,34	36,55	82	1	1	1
SFX_0008	405997	9288987	502	58,8	3,61	218,9	588	1	3	3
SFX_0009	406130	9288836	478	13,6	1,47	16,24	13	2	1	2
SFX_0010	406108	9288870	486	29,5	2,95	77,3	78	1	1	2
SFX_0011	406039	9288918	469	8,89	1,6	13,6	11	0	1	1
SFX_0012	406022	9288959	502	17,78	1,52	15,04	17	0	2	2
SFX_0013	406819	9288683	320	20	1,15	32	20	0	0	0
SFX_0014	406314	9289007	472	37,5	5,54	154	373	3	4	5
SFX_0015	406316	9288986	453	17,5	2,29	35,5	34	1	0	1
SFX_0016	406367	9289369	523	66	7,76	186	342	2	2	2
SFX_0017	406364	9289385	525	12	1,51	33	41	1	2	2
SFX_0018	406396	9289397	505	20	2,63	83,5	202	2	2	2
SFX_0019	405874	9289583	582	10,5	0,98	40	41	1	2	2
SFX_0020	403685	9293221	649	26,5	1,21	50,01	39	1	1	1
SFX_0021	403703	9293236	650	21	1,22	35	24	2	2	2
SFX_0022	403523	9293329	651	9,5	1,71	17	18	2	2	2
SFX_0023	403453	9293425	659	9	2,09	17	18	0	0	0
SFX_0024	403297	9293491	645	10,5	1,95	60	94	1	3	3
SFX_0025	403247	9293505	641	40	5,18	148	533	3	3	5
SFX_0026	403188	9293540	642	14,5	1,74	22	22	1	0	1
SFX_0027	403093	9293508	652	16	6,27	47	93	1	1	1
SFX_0028	403063	9293503	661	27	1,28	49	70	1	3	3
SFX_0029	403043	9293493	651	29	1,46	82	81	2	1	2
SFX_0030	402960	9293496	639	15	3,35	36	38	1	1	1
SFX_0031	402943	9293559	628	11	4,57	30	43	2	1	2
SFX_0032	402945	9293559	632	10,5	1,37	29	29	0	0	0
SFX_0033	402960	9293572	610	15	4,7	60	56	3	3	3
SFX_0034	402768	9293723	657	14	1,72	32	23	1	1	1
SFX_0035	401647	9293124	583	53	3,36	104	160	3	1	3

	Datum SAD 69							Richness		
Name	Coord_E	Coord_N	Altitude	HD	Level difference	Area	Volume	Rainy	Dry	Total
SFX_0036	401658	9293106	606	27	2,06	68	71	2	2	3
SFX_0037	401581	9292867	558	28	3,35	74	53	2	2	3
SFX_0038	401578	9292782	541	16	1,33	83	161	2	1	2
SFX_0039	401569	9292774	540	56	4,19	171	263	3	1	3
SFX_0040	401618	9292760	536	16	2,56	48	79	2	1	2
SFX_0041	401625	9292750	529	9	1,11	37	74	1	2	2
SFX_0042	401644	9292766	530	42	5,03	123	108	1	1	1
SFX_0043	401636	9292739	539	30	5,98	55	82	1	2	2
SFX_0044	401541	9292563	519	16	2,33	35	55	1	3	3
SFX_0045	401590	9292775	541	25	3,84	56	116	1	2	2
SFX_0046	401403	9292786	559	11	1,57	30,3	25	0	0	0
SFX_0047	400892	9292553	613	30	2,16	46	60	2	3	3
SFX_0048	401040	9292534	605	16,5	0,72	18	16	4	1	4
SFX_0049	400312	9292303	526	9	2,05	36	34	1	2	2
SFX_0050	400111	9292064	451		Not mapped			0	0	0
SFX_0051	399624	9292249	514	10	0,59	25	19	0	0	0
SFX_0052	399550	9292379	565	16	1,69	62	111	2	2	2
SFX_0053	399554	9292404	551	38	5,28	86	155	3	3	3
SFX_0054	401649	9293987	740	10	0,76	27	20	0	1	1
SFX_0055	401527	9293994	718	29	4,76	143	327	3	2	3
SFX_0056	400134	9292457	568	23	3,4	45	62	1	2	2
SFX_0057	400220	9292297	522	111,5	16,33	664	1148	2	2	2
SFX_0058	400132	9292447	562	12	3,67	23	35	1	1	1
SFX_0059	400143	9292491	583	30,5	2,79	74	112	2	2	3
SFX_0060	400126	9292518	585	21	3,07	65	88	1	3	4
SFX_0061	400135	9292434	575	18	1,56	42	46	2	1	2
SFX_0062	401361	9292804	573	8	1,46	16	12	0	0	0
SFX_0063	401360	9292802	565	11	1,11	16	13	1	1	1
SFX_0064	401500	9292967	568	12	1,92	20	41	1	1	1
SFX_0065	399948	9293879	642	15,5	3,07	61,5	56	2	3	3
SFX_0066	399855	9293842	635	8	1,08	34	37	1	2	2
SFX_0067	399789	9293904	639	15	1,68	18	35	1	1	1
SFX_0068	399784	9293906	644	8	1,6	15	11	1	1	1
SFX_0069	399706	9292475	557	24	1,4	56	57	3	1	1
SFX_0070	406692	9290002	620	78	7,85	408	711	1	3	3
SFX_0071	411904	9295964	560	9,5	2,46	22	21	1	1	1

Name	Datum SAD 69		Altitude	HD	Level difference	Area	Volume	Richness		
	Coord_E	Coord_N						Rainy	Dry	Total
SFX_0072	406715	9290004	609	63	9,54	413	761	2	2	3
SFX_0073	406737	9289955	585	192	25,1	697	1109	4	3	4
SFX_0074	406757	9289910	563	10	1,47	19	25	1	1	1
SFX_0075	406779	9289886	538	20	5,5	55	85	3	3	4
SFX_0076	406501	9289518	541	28	1,62	76	107	1	1	1
SFX_0077	406942	9289522	519	13	0,79	48	54	1	1	1
SFX_0078	406252	9289091	506	69,5	6	377	779	4	6	6
SFX_0079	413056	9295220	509	19	3,86	30	30	1	0	0
SFX_0080	413283	9295064	468	13	2,65	52	87	1	1	1
SFX_0081	413180	9295073	484	46	6,52	140	297	3	4	4
SFX_0082	413220	9295037	467	7	1,03	15	33	1	2	2
SFX_0083	413260	9295027	471	15	3,5	100	346	1	2	2
SFX_0084	413289	9295004	444	35,5	4,65	126	238	2	1	2
SFX_0085	413380	9294880	416	10	1,99	21	23	1	0	1
SFX_0086	413387	9294870	424	8	2,48	31	47	1	0	1
SFX_0087	413292	9294973	443	42,5	1,9	166	713	4	3	4
SFX_0088	413259	9294717	442	70	5,08	207	265	2	1	2
SFX_0089	413212	9294616	410	14	2,62	26	40	1	1	1
SFX_0090	413270	9295077	463	8,5	0,66	13	8	1	0	1

Table S2 - Sampling dates, during the rainy and dry seasons, for the diagnosis of bats in natural caves located in the municipality of São Félix do Xingu, PA.

Cave	Date		Cave	Date		Cave	Date	
	Rainy	Dy		Rainy	Dy		Rainy	Dy
SFX_0001	01/03/18	25/07/18	SFX_0031	02/03/18	11/07/18	SFX_0061	29/01/18	20/07/18
SFX_0002	03/02/18	25/07/18	SFX_0032	02/03/18	11/07/18	SFX_0062	24/02/18	12/07/18
SFX_0003	01/03/18	24/07/18	SFX_0033	02/03/18	11/07/18	SFX_0063	24/02/18	12/07/18
SFX_0004	16/01/18	24/07/18	SFX_0034	30/01/18	18/07/18	SFX_0064	18/01/18	12/07/18
SFX_0005	16/01/18	24/07/18	SFX_0035	18/01/18	19/07/18	SFX_0065	17/01/18	17/07/18
SFX_0006	16/01/18	24/07/18	SFX_0036	18/01/18	19/07/18	SFX_0066	17/01/18	17/07/18
SFX_0007	03/03/18	21/07/18	SFX_0037	27/02/18	19/07/18	SFX_0067	17/01/18	17/07/18
SFX_0008	03/03/18	21/07/18	SFX_0038	27/02/18	12/07/18	SFX_0068	17/01/18	17/07/18
SFX_0009	21/02/18	21/07/18	SFX_0039	27/02/18	19/07/18	SFX_0069	24/02/18	17/07/18
SFX_0010	21/02/18	21/07/18	SFX_0040	26/02/18	12/07/18	SFX_0070	28/02/18	16/07/18
SFX_0011	21/02/18	21/07/18	SFX_0041	26/02/18	12/07/18	SFX_0071	25/01/18	21/05/19

SFX_0012	21/02/18	20/07/18	SFX_0042	26/02/18	12/07/18	SFX_0072	22/02/18	23/07/18
SFX_0013	23/02/18	23/07/18	SFX_0043	26/02/18	12/07/18	SFX_0073	28/02/18	23/07/18
SFX_0014	23/02/18	10/07/18	SFX_0044	26/02/18	12/07/18	SFX_0074	22/02/18	23/07/18
SFX_0015	23/02/18	10/07/18	SFX_0045	27/02/18	19/07/18	SFX_0075	22/02/18	21/07/18
SFX_0016	02/02/18	16/07/18	SFX_0046	24/02/18	12/07/18	SFX_0076	05/03/18	16/07/18
SFX_0017	02/02/18	16/07/18	SFX_0047	03/03/18	27/07/18	SFX_0077	05/03/18	10/07/18
SFX_0018	02/02/18	16/07/18	SFX_0048	03/03/18	27/07/18	SFX_0078	23/02/18	10/07/18
SFX_0019	05/03/18	16/07/18	SFX_0049	26/01/18	20/07/18	SFX_0079	23/01/18	31/07/18
SFX_0020	01/02/18	30/07/18	SFX_0050	26/01/18	23/07/18	SFX_0080	23/01/18	31/07/18
SFX_0021	01/02/18	30/07/18	SFX_0051	20/01/18	17/07/18	SFX_0081	25/01/18	31/07/18
SFX_0022	01/02/18	30/07/18	SFX_0052	20/01/18	17/07/18	SFX_0082	24/01/18	31/07/18
SFX_0023	01/02/18	18/07/18	SFX_0053	20/01/18	17/07/18	SFX_0083	24/01/18	31/07/18
SFX_0024	02/03/18	18/07/18	SFX_0054	19/01/18	11/07/18	SFX_0084	25/01/18	31/07/18
SFX_0025	02/03/18	18/07/18	SFX_0055	19/01/18	11/07/18	SFX_0085	24/01/18	31/07/18
SFX_0026	02/03/18	18/07/18	SFX_0056	29/01/18	20/07/18	SFX_0086	24/01/18	31/07/18
SFX_0027	30/01/18	18/07/18	SFX_0057	26/01/18	20/07/18	SFX_0087	23/01/18	31/07/18
SFX_0028	30/01/18	18/07/18	SFX_0058	29/01/18	20/07/18	SFX_0088	24/01/18	31/07/18
SFX_0029	30/01/18	18/07/18	SFX_0059	29/01/18	20/07/18	SFX_0089	24/01/18	31/07/18
SFX_0030	30/01/18	11/07/18	SFX_0060	29/01/18	20/07/18	SFX_0090	23/01/18	31/07/18

Table S3 - Results of the Multiple Regression statistical model in Distance Matrices evaluating the effects of environmental variables (distance, altitude, Horizontal Development, and volume) on the dissimilarity between bat communities in caves. The coefficients represent the direction and magnitude of the effects of each variable, while the p values indicate the level of statistical significance.

β_{total} ($R^2 = 0,0073$; $pval$ 0,663)		
	Coefficient	p
Intercept	5,291803e-01	0,91
Distance	1,380e-08	0,75
Altitude	2,652462e-04	0,18
HD	-6,958690e-05	0,93
Volume	7,341765e-05	0,49
β_{repl_total} ($R^2 = 0,0109$, $pval = 0,467$)		
	Coefficient	P
Intercept	2,270581e-01	0,24
Distance	3,498806e-08	0,50
Altitude	8,406041e-05	0,71
HD	-6,344957e-04	0,50
Volume	-3,802850e-05	0,76

<i>Brich_total</i> ($R^2 = 0,036$, $pval = 0,002$)		
	Coefficient	p
<i>Intercept</i>	3,021222e-01	0,99
<i>Distance</i>	-2,072426e-08	0,55
<i>Altitude</i>	1,811858e-04	0,15
<i>HD</i>	5,649088e-04	0,28
<i>Volume</i>	1,114461e-04	0,06

Table S4 - Matrix of spatial eigenvectors generated by PCNM and used as covariates to control spatial dependence.

Cavidade	PCNM1	PCNM3	PCNM4	PCNM5
SFX_0001	-0,14936	8,37E-06	9,73E-07	-0,07831
SFX_0002	-0,14936	8,38E-06	9,66E-07	-0,07516
SFX_0003	-0,14936	8,40E-06	9,49E-07	-0,06799
SFX_0004	-0,14936	8,45E-06	9,06E-07	-0,05056
SFX_0005	-0,14936	8,50E-06	8,66E-07	-0,03566
SFX_0006	-0,14936	8,51E-06	8,55E-07	-0,03176
SFX_0007	-0,14936	7,97E-06	1,14E-06	-0,2032
SFX_0008	-0,14936	7,97E-06	1,14E-06	-0,20302
SFX_0009	-0,14936	7,92E-06	1,15E-06	-0,21756
SFX_0010	-0,14936	7,93E-06	1,15E-06	-0,21429
SFX_0011	-0,14936	7,95E-06	1,15E-06	-0,20965
SFX_0012	-0,14936	7,96E-06	1,14E-06	-0,20572
SFX_0014	-0,14936	7,97E-06	1,14E-06	-0,20132
SFX_0015	-0,14936	7,97E-06	1,14E-06	-0,20333
SFX_0016	-0,14936	8,09E-06	1,12E-06	-0,16673
SFX_0017	-0,14936	8,09E-06	1,11E-06	-0,1652
SFX_0018	-0,1474	-0,0002	1,28E-06	2,16E-09
SFX_0019	-0,14936	8,16E-06	1,09E-06	-0,14594
SFX_0020	-0,14936	9,09E-06	-1,91E-07	0,203449
SFX_0021	-0,14936	9,10E-06	-1,99E-07	0,204871
SFX_0022	-0,14936	9,11E-06	-2,55E-07	0,213884
SFX_0024	-0,14936	9,15E-06	-3,53E-07	0,229531
SFX_0025	-0,14936	9,15E-06	-3,62E-07	0,230903
SFX_0026	-0,14936	9,16E-06	-3,84E-07	0,23429
SFX_0027	-0,14936	9,15E-06	-3,65E-07	0,231289
SFX_0028	-0,14936	9,15E-06	-3,62E-07	0,230831

Cavidade	PCNM1	PCNM3	PCNM4	PCNM5
SFX_0029	-0,14936	9,15E-06	-3,56E-07	0,229888
SFX_0030	-0,14936	9,15E-06	-3,58E-07	0,230228
SFX_0031	-0,14936	9,16E-06	-3,97E-07	0,236266
SFX_0033	0,081758	0,043214	-0,07612	-8,80E-07
SFX_0034	0,081758	0,047806	-0,09173	-9,45E-07
SFX_0035	0,081757	0,07978	-0,05161	-8,24E-07
SFX_0036	0,081757	0,079549	-0,04989	-8,17E-07
SFX_0037	0,081757	0,082435	-0,02959	-7,41E-07
SFX_0038	0,081757	0,082811	-0,02209	-7,13E-07
SFX_0039	0,081757	0,083079	-0,02149	-7,11E-07
SFX_0040	0,081757	0,081822	-0,01968	-7,03E-07
SFX_0041	0,081757	0,08167	-0,01871	-6,99E-07
SFX_0042	0,081757	0,081107	-0,01991	-7,03E-07
SFX_0043	0,081757	0,081415	-0,01761	-6,94E-07
SFX_0044	0,081757	0,084561	-0,0031	-6,41E-07
SFX_0045	0,081757	0,082516	-0,02133	-7,10E-07
SFX_0047	0,081757	0,101898	-0,00974	-6,76E-07
SFX_0048	0,081757	0,098019	-0,00634	-6,61E-07
SFX_0049	0,081757	0,118232	0,005704	-6,22E-07
SFX_0052	0,078068	-2,95E-07	2,09E-11	1,85E-05
SFX_0053	0,081756	0,138089	-0,01204	-6,92E-07
SFX_0054	0,081757	0,076719	-0,1281	-1,11E-06
SFX_0055	0,081757	0,079947	-0,13014	-1,12E-06
SFX_0056	0,081757	0,122441	-0,01001	-6,83E-07
SFX_0057	0,081757	0,120706	0,005169	-6,24E-07
SFX_0058	0,081757	0,122529	-0,00915	-6,80E-07
SFX_0059	0,081757	0,122083	-0,01292	-6,95E-07
SFX_0060	0,081757	0,122442	-0,01551	-7,05E-07
SFX_0061	0,081757	0,122495	-0,00796	-6,75E-07
SFX_0063	0,081757	0,088553	-0,02639	-7,33E-07
SFX_0064	0,081757	0,084246	-0,0394	-7,80E-07
SFX_0065	0,081756	0,122444	-0,13824	-1,17E-06
SFX_0066	0,081756	0,125052	-0,13604	-1,16E-06
SFX_0067	0,081756	0,126596	-0,1423	-1,18E-06
SFX_0068	0,081756	0,126722	-0,14253	-1,19E-06
SFX_0069	0,081756	0,133789	-0,01657	-7,10E-07

Cavidade	PCNM1	PCNM3	PCNM4	PCNM5
SFX_0070	0,081757	-0,04384	0,283648	7,25E-07
SFX_0071	0,081754	-0,20357	-0,18453	-5,52E-07
SFX_0072	0,081757	-0,04446	0,283737	7,27E-07
SFX_0073	0,081757	-0,04488	0,288336	7,47E-07
SFX_0074	0,081757	-0,04525	0,292558	7,66E-07
SFX_0075	0,081757	-0,04575	0,29494	7,77E-07
SFX_0076	0,081757	-0,03706	0,324345	8,82E-07
SFX_0077	0,081757	-0,04883	0,329101	9,31E-07
SFX_0078	0,081757	-0,02893	0,359317	1,01E-06
SFX_0080	0,081753	-0,2372	-0,08875	-3,20E-08
SFX_0081	0,081753	-0,23448	-0,09074	-5,34E-08
SFX_0082	0,081753	-0,23542	-0,08709	-3,48E-08
SFX_0083	0,081753	-0,23645	-0,08574	-2,44E-08
SFX_0084	0,081753	-0,23715	-0,08336	-1,19E-08
SFX_0085	0,081753	-0,23914	-0,07131	4,40E-08
SFX_0086	0,081753	-0,23929	-0,07035	4,84E-08
SFX_0087	0,081753	-0,23712	-0,08058	-1,51E-09
SFX_0088	0,081753	-0,23535	-0,05827	7,41E-08
SFX_0089	0,081753	-0,23374	-0,04986	9,80E-08
SFX_0090	0,081753	-0,23689	-0,09005	-3,84E-08

Table S5 - Variance Inflation Factor (VIF) values for the environmental and spatial variables used in the Partial Redundancy Analysis (RDAP) in different scenarios: general analysis (RDAP - General), during the rainy season (RDAP - Rainy), and during the dry season (RDAP - Dry). VIF values indicate the degree of collinearity between explanatory variables, with values above 5 suggesting possible multicollinearity. The variables include principal components of distance matrix (PCNM1, PCNM3, PCNM4, PCNM5), altitude, horizontal development (HD), and cave volume.

	PCNM1	PCNM3	PCNM4	PCNM5	Altitude	HD	Volume
RDAP – General	1,110771	1,789282	1,177923	1,644285	2,486652	4,138644	4,240463
RDAP – rainy	1,165024	1,863688	1,168451	1,665263	2,677870	4,097495	4,176438
RDAP - dry	1,116811	1,608929	1,167616	1,576358	2,190868	4,056383	4,213863

Table S6 - Results of Partial Redundancy Analysis (RDAP) performed to investigate the contribution of environmental variables (Altitude, Horizontal Development - HD, and Cave Volume) to the composition of bat communities in São Félix do Xingu, considering the general, rainy season, and dry season scenarios. The adjusted R² values indicate the proportion of variance explained after adjustment for degrees of freedom. For each variable, the degrees of freedom (Df), explained variance, F-test value, and probability value Pr(>F) are presented. Significant p-values ($\alpha=0.05$) are indicated by asterisks (*). Residuals represent the variance not explained by the model.

RDAP general R² = 0,046				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,012	2,564	0,032 *
HD	1	0,015	3,387	0,014 *
Volume	1	0,004	0,904	0,476
Residual	74	0,347		
RDAP rainy R² = 0,052				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,016	3,109	0,027 *
HD	1	0,015	2,962	0,027 *
Volume	1	0,005	1,056	0,354
Residual	70	0,362		
RDAP dry R² = 0,041				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,016	3,132	0,016 *
HD	1	0,009	1,780	0,122
Volume	1	0,007	1,358	0,248
Residual	69	0,370		

Table S7 - Results of Partial Distance-Based Redundancy Analysis (dbRDAP) performed to assess the influence of environmental variables (Altitude, Horizontal Development - HD, and Cave Volume) on the composition of bat communities in São Félix do Xingu, considering the general, rainy season, and dry season scenarios. The adjusted R² values indicate the proportion of variance explained after adjustment for degrees of freedom. For each variable, the degrees of freedom (Df), explained variance, F-test value, and probability value Pr(>F) are presented. Significant p-values ($\alpha=0.05$) are highlighted with one asterisk (*) or two (***) to indicate stronger significance. Residuals represent the variance not explained by the model.

dbRDAP general R² = 0,077				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,501	2,465	0,048 *
HD	1	0,882	4,341	0,002 ***
Volume	1	0,223	1,097	0,362
Residual	74	15,04		

dbRDAp rainy R2 = 0,068				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,656	3,104	0,035 *
HD	1	0,887	4,198	0,005 **
Volume	1	0,244	1,156	0,304
Residual	70	14,791		
dbRDAp dry R2 = 0,052				
	Df	Variance	F	Pr(>F)
Altitude	1	0,660	3,037	0,016 *
HD	1	0,470	2,166	0,076
Volume	1	0,4217	1,940	0,102
Residual	69	14,995		

Table S8 - Results of Generalized Least Squares (GLS) analyses to evaluate the relationship between environmental variables (Altitude, Horizontal Development - HD, and Cave Volume) and bat species richness in São Félix do Xingu, considering the general, rainy season, and dry season scenarios. The coefficients (Coeff.), standard errors (S, error.), t-test values, and probability values (p) are presented. Significant p values ($\alpha=0.05$) are highlighted. The results indicate the variables that most contribute to explaining the richness variation in each analyzed scenario.

General				
	Coeff.	S, erro.	t	p
Intercept	-2,14	1,57	-1,36	0,17
Altitude	0,37	0,24	1,53	0,12
HD	0,09	0,07	1,13	0,25
Volume	0,11	0,04	2,37	0,02
Dry				
	Coeff.	S, erro.	t	p
Intercept	-2,098	1,7372	-1,2077	0,23
Altitude	0,3888	0,2703	1,4384	0,15
HD	-0,0532	0,0812	-0,6552	0,51
Volume	0,1621	0,0503	3,2236	0,001
Rainy				
	Coeff.	S, erro.	t	p
Intercept	0,53008	0,2528	2,0967	0,03
Altitude	0,00070	0,00045	1,5536	0,12
HD	0,00215	0,0019	1,1191	0,26
Volume	0,00042	0,00023	1,8205	0,07

RB Esp

Revista Brasileira de
ESPELEOLOGIA