

Relatório Final

Estudos da paisagem, da geodiversidade e propostas de geoconservação do Geossistema Ferruginoso Carajás, PA

Edital de Chamada Pública nº 01/2021 –
Compensação Espeleológica, no contexto do TCCE
ICMBio-Vale

Abril de 2024

**ESTUDOS DA PAISAGEM, DA
GEODIVERSIDADE E PROPOSTAS DE
GEOCONSERVAÇÃO DO GEOSISTEMA
FERRUGINOSO CARAJÁS, PA**

**Relatório de Resultados da Pesquisa e Produtos
Associados**

SUMÁRIO

1.	APRESENTAÇÃO	10
1.1.	INTRODUÇÃO.....	10
1.2.	ATIVIDADES PLANEJADAS E DESENVOLVIDAS	14
1.3.	METODOLOGIA.....	18
1.4.	RESULTADOS PLANEJADOS ALCAÇADOS E RESULTADOS DERIVADOS	19
1.5.	PRINCIPAIS DESAFIOS ENCONTRADOS, DISCUSSÃO, CONCLUSÃO.....	25
1.6.	EQUIPE.....	29
2.	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA SOBRE A FLONA CARAJÁS: ABORDAGEM SOBRE ESTUDOS AMBIENTAIS EM GEOSSISTEMAS FERRUGINOSOS E SUA RELAÇÃO COM A GEODIVERSIDADE TEMAS CORRELATOS	32
2.1.	INTRODUÇÃO.....	32
2.2.	MÉTODOS.....	35
2.3.	RESULTADOS	36
2.4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
3.	DINÂMICA DA PAISAGEM DE CARAJÁS: USO DE MÉTRICAS PARA CARACTERIZAR A ESTRUTURA E A CONFIGURAÇÃO DA PAISAGEM	44
3.1.	INTRODUÇÃO.....	44
3.2.	MÉTODOS.....	45
3.3.	RESULTADOS	46
3.4.	DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	47
3.5.	DADOS SUPLEMENTARES.....	49
4.	IMPORTÂNCIA DA CONSERVAÇÃO DA GEODIVERSIDADE EM GEOSSISTEMA FERRUGINOSO A PARTIR DA ANÁLISE DA PAISAGEM NO ENTORNO DE “BAT CAVES”	50
4.1.	INTRODUÇÃO.....	50
4.2.	MÉTODOS.....	55
4.2.1.	Área de estudo	55
4.2.2.	Composição da paisagem	56
4.3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
5.	POTENCIAL DE USO PÚBLICO E CAPACIDADE DE CARGA PROVISÓRIA PARA ROTEIROS ESPELEOTURÍSTICOS NA FLORESTA NACIONAL DE CARAJÁS-PA.....	65
5.1.	INTRODUÇÃO.....	65

5.2.	ETAPAS E PROCEDIMENTOS DA PESQUISA	66
5.3.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA	71
5.4.	RESULTADOS	72
5.5.	DISCUSSÃO.....	76
5.6.	CONCLUSÕES.....	80
6.	POTENCIAL DE PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS DA GEODIVERSIDADE NA FLONA CARAJÁS.....	82
6.1.	INTRODUÇÃO.....	82
6.2.	ÁREA DE ESTUDO	85
6.3.	MÉTODOS.....	86
6.4.	RESULTADOS	89
6.5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
7.	EXPLORANDO ESTRATÉGIAS DE GEOCONSERVAÇÃO NO GEOSSISTEMA FERRUGINOSO CARAJÁS PARA DIFERENTES CONTEXTOS E OBJETIVOS	96
7.1.	INTRODUÇÃO.....	96
7.2.	ÁREA DE ESTUDO	100
7.3.	MÉTODOS.....	102
7.4.	RESULTADOS	106
7.4.1.	Paleotoca (S11-07)	107
7.4.2.	Vale da Lua (N4WS-0067).....	108
7.4.3.	Guarita (N1_0004)	110
7.4.4.	Mapinguari (N1_0002).....	112
7.4.5.	Caverna da Dolina (N1_0096)	114
7.4.6.	Caverna N3_023.....	116
7.5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	117
8.	ANÁLISE GEOAMBIENTAL APLICADA ÀS AÇÕES EDUCATIVAS NAS CAVIDADES DA SERRA DE CARAJÁS.....	120
8.1.	INTRODUÇÃO.....	120
8.2.	A FORMAÇÃO DAS CAVERNAS E A SUA IMPORTÂNCIA COMO GEOPATRIMÔNIO.....	122
8.3.	METODOLOGIA.....	123
8.4.	RESULTADOS	124
8.4.1.	Relação das variáveis geoambientais com as cavidades	124
8.4.2.	Temas educativos no contexto analisado	131
8.4.3.	Abordagens educativas no contexto analisado	133
8.5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	134

9.	A IMPORTÂNCIA DA PERSPECTIVA GEOÉTICA NA PROTEÇÃO DO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO EM CONTEXTO DE MINERAÇÃO	136
9.1.	INTRODUÇÃO.....	136
9.2.	PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO EM GEOSISTEMAS FERRUGINOSOS.....	139
9.3.	MINERAÇÃO EM GEOSISTEMAS FERRUGINOSOS.....	141
9.4.	PLANO DE PESQUISA GEOSISTEMAS FERRUGINOSOS DA FLORESTA NACIONAL DE CARAJÁS E O PLANO NACIONAL DE MINERAÇÃO.....	143
9.4.1.	Patrimônio espeleológico, mineração e políticas públicas.....	143
9.4.2.	Plano Nacional de Mineração – 2030	144
9.4.3.	Plano de Pesquisa Geossistema Ferruginoso da Floresta Nacional de Carajás.....	147
9.5.	GEOÉTICA, PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO E MINERAÇÃO	151
9.5.1.	A abordagem geoética no contexto da mineração.....	151
9.5.2.	A abordagem geoética no contexto do patrimônio espeleológico.....	155
9.6.	GEOÉTICA, PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO, MINERAÇÃO E POLÍTICAS PÚBLICAS INTEGRADAS.....	156
9.7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	159
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	160
1.	APRESENTAÇÃO.....	161
2.	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA SOBRE A FLONA CARAJÁS: ABORDAGEM SOBRE ESTUDOS AMBIENTAIS EM GEOSISTEMAS FERRUGINOSOS E SUA RELAÇÃO COM A GEODIVERSIDADE TEMAS CORRELATOS	165
3.	DINÂMICA DA PAISAGEM DE CARAJÁS: USO DE MÉTRICAS PARA CARACTERIZAR A ESTRUTURA E A CONFIGURAÇÃO DA PAISAGEM	168
4.	IMPORTÂNCIA DA CONSERVAÇÃO DA GEODIVERSIDADE EM GEOSISTEMA FERRUGINOSO A PARTIR DA ANÁLISE DA PAISAGEM NO ENTORNO DE “BAT CAVES”	170
5.	ANÁLISES DE POTENCIAL DE USO E CAPACIDADE DE CARGA PROVISÓRIA PARA ROTEIROS ESPELEOTURÍSTICOS NA FLORESTA NACIONAL DE CARAJÁS-PA	174
6.	POTENCIAL DE PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS DA GEODIVERSIDADE NA FLONA CARAJÁS	178
7.	EXPLORANDO ESTRATÉGIAS DE GEOCONSERVAÇÃO NO GEOSISTEMA FERRUGINOSO CARAJÁS PARA DIFERENTES CONTEXTOS E OBJETIVOS	181
8.	ANÁLISE GEOAMBIENTAL APLICADA À AÇÕES EDUCATIVAS NAS CAVIDADES DA SERRA DE CARAJÁS	185

9.	A IMPORTÂNCIA DA PERSPECTIVA GEOÉTICA NA PROTEÇÃO DO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO EM CONTEXTO DE MINERAÇÃO	187
----	--	-----

PARTE 1

RELATÓRIO
TÉCNICO

1. APRESENTAÇÃO

Úrsula de Azevedo Ruchkys
Luiz Eduardo Panisset Travassos
Paulo de Tarso Amorim Castro
Heros Santos Lobo
Leonardo Christian Rocha
Sonia Carvalho Ribeiro

1.1. INTRODUÇÃO

Este documento apresenta os Resultados Finais do Projeto **Estudos da paisagem, da geodiversidade e propostas de geoconservação do Geossistema Ferruginoso de Carajás, PA** – aprovado pelo Edital de Chamada Pública nº 01/2021 - Compensação Espeleológica, no contexto do TCCE ICMBIO-Vale. Para o desenvolvimento do projeto foi celebrado um Convênio entre a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS) formalizado como uma associação privada, sem fins lucrativos, certificada como Organização da Sociedade Civil de Interesse Público (OSCIP), em 2003. A disponibilização do recurso foi feita por meio de Edital de Chamada Pública com recursos de Medidas de Compensação Espeleológica (EDITAL DE CHAMADA PÚBLICA Nº 01/2021 -Item XXI da Cláusula Segunda do TCCE nº 1/2018/ICMBio).

O projeto foi elaborado por uma equipe coordenada por docente da UFMG, com a participação direta de professores da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas, da Universidade Federal de São João Del Rey (UFSJ), da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), da Univesidade Federal de São Carlos (UFSCar). Além destes, a equipe técnica do Projeto incluiu também alunos de iniciação científica contratados pelo projeto da UFSCar (graduação em turismo), UFSJ (graduação em geografia), UFMG (graduação em geografia), além da colaboração de alunos de iniciação científica voluntária da UFMG.

A equipe ainda contou com a colaboração de pesquisadores do CECAV, uma vez que parte desse projeto de pesquisa tem aspectos comuns com o projeto **Valores da geodiversidade em Parques Nacionais considerado sua contribuição na conservação e valorização do patrimônio espeleológico** bem como com o apoio insitucional durante as etapas de campo da equipe ligada ao ICMBio em Paraubebas. Destaca-se, também, o apoio de uma doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFMG e de

um membro do Ministério Público de Minas Gerais.

A geodiversidade e seus temas correlatos - geopatrimônio, geoconservação e geoturismo - é um ramo dentro das geociências que tem tido um grande crescimento no Brasil e no mundo nos últimos anos em especial, a partir dos anos 2000. No Brasil, de acordo com Ruchkys *et al.* (2017), o pioneirismo nesse campo de pesquisa, com a defesa das primeiras teses e dissertações, se deve a Medeiros (2003–mestrado); Barreto (2007–mestrado); Ruchkys (2007–doutorado); Moreira (2008–doutorado); Castro (2009–mestrado); Mansur (2010–doutorado). Pode-se dizer que esses pesquisadores inauguraram a temática no país e são considerados referências nessa área de pesquisa.

Mais recentemente, na América Latina, essas temáticas vêm sendo estudadas na perspectiva da geoética (Pinheiro, 2018; Consuegra *et al.*, 2018; Valenzuela e Benado, 2018; Castro *et al.*, 2018; Ruchkys *et al.*, 2019). A geoética trata da ética relacionada às consequências sociais, econômicas, ambientais e culturais da pesquisa e da prática geocientífica, fornecendo um ponto de interseção entre geociências, sociologia e filosofia (Bosi *et al.*, 2008; Peppoloni e Di Capua, 2012). As principais preocupações da geoética são o desenvolvimento sustentável no uso de recursos naturais; a gestão adequada de riscos; a comunicação geocientífica e aspectos legais; museologia e a proteção planetária e do geopatrimônio (Druguet *et al.*, 2013).

O pensamento geoético aprimora o desenvolvimento das dimensões social e cultural das geociências, podendo auxiliar a orientar sociedade em sua escolha de comportamento responsável em relação ao planeta Terra, tanto os seus componentes bióticos (por exemplo, biodiversidade) e abióticos (por exemplo, geodiversidade), que estão intrinsecamente ligados (Peppoloni e Di Capua 2012; Peppoloni *et al.*, 2019).

O termo geodiversidade tem na década de 1990 o início de seu desenvolvimento. Na literatura internacional, a geodiversidade tem sido aplicada com maior ênfase aos estudos de geoconservação para proteção do patrimônio natural e mais recentemente para o planejamento territorial (por exemplo, Sharples, 1993, 2002; Duff, 1994; Gray, 2004, 2005, 2011; Brilha, 2005, 2015; Carcavilla Urqui, 2006; Bruschi, 2007; Benito-Calvo *et al.*, 2009; Crofts, 2014).

Baseado nos conceitos e aplicações internacionais, o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) define a geodiversidade como “o estudo da natureza abiótica (meio físico) constituída por uma variedade de ambientes, fenômenos e processos geológicos que dão origem às paisagens, rochas, minerais, fósseis, solos, águas e outros depósitos superficiais que propiciam o desenvolvimento da vida na Terra, tendo como valores intrínsecos a

cultura, o estético, o econômico, o científico, o educativo e o turístico” (Silva *et al.*, 2008).

Conceitos como geodiversidade, geopatrimônio e geoconservação trazem não apenas elementos científicos, mas também culturais, inclusive intangíveis. Estes conceitos, seu aprimoramento e sua promoção representam um recurso importante para fortalecer o relacionamento e sentido de pertencimento da população ao planeta Terra. Geodiversidade, geopatrimônio e geoconservação são expressões práticas de uma abordagem geoética do planeta, reconhecendo sua importância como um meio de restaurar conexão interna entre os seres humanos e o Sistema Terra. Dentre os valores atribuídos à geodiversidade, os educacionais e de pesquisa constituem-se como os mais importantes (Gray, 2004). Embora o conceito de geodiversidade exista há mais de 20 anos, a maioria de métodos de avaliação é aplicada para avaliação de geoconservação ou para uso turístico. Ainda se observa uma deficiência de métodos que poderiam ser usados para avaliação do potencial educacional da geodiversidade.

O ano de 2016 representou um marco histórico no desenvolvimento da geodiversidade e dos conceitos a ela associados – geopatrimônio, geoconservação e geoturismo – pelo estabelecimento de uma Comissão Internacional de Geopatrimônio da União Internacional das Ciências Geológicas (IUGS) durante o 35º Congresso Geológico Internacional na Cidade do Cabo. A interação das Ciências da Terra com a sociedade é fundamental, uma vez que tanto os materiais como os processos geológicos têm importância para as atividades humanas incluindo, os valores científico, cultural e educacional. A abordagem patrimonial dos aspectos geológicos implica na necessidade do desenvolvimento de princípios que garantam a salvaguarda dos aspectos, feições e processos destacáveis para práticas educacionais e turísticas (Santos *et al.*, 2021). Além disto, emerge a necessidade de uma análise patrimonial para o uso de geomateriais como recurso para o usufruto de diversas maneiras pelas gerações futuras; a RENCA, Reserva Nacional do Cobre, estava entre um dos exemplos deste tipo de patrimônio.

A geoconservação enfatiza a importância da integração entre as componentes ambientais, econômicas, sociais, político-administrativas e legais. Tais componentes são responsáveis por cenários normalmente concorrentes entre si, e que, em geral, são confrontados e combinados na tentativa de encontrar um ponto de equilíbrio entre o uso e a conservação dos elementos da geodiversidade.

O impacto das atividades econômicas, em especial a mineração, que ocorrem em áreas de significativa geodiversidade tem sido um dos pontos de partida de muitas

investigações no meio acadêmico. A mineração afeta profundamente em sistemas significativos e frágeis como os geossistemas ferruginosos (Carmo *et al.*, 2012; Auler *et al.*, 2014; Carmo e Kamino, 2015; Ruchkys, 2015; Ruchkys e Machado, 2015; Gomes *et al.*, 2019). A conservação de elementos significativos da geodiversidade nesses geossistemas, principalmente aqueles que caracterizam o geopatrimônio de maneira geral e em particular patrimônio espeleológico, sente, no presente, a necessidade do desenvolvimento de estudo e métodos que sejam compatíveis com o atual estado da arte. No Brasil os geossistemas ferruginosos são expressivos, ocorrendo nos estados de Minas Gerais, Bahia, Mato Grosso do Sul e Pará.

No Estado do Pará, o Geossistema Ferruginoso ocorre, em parte, inserido na área da Floresta Nacional de Carajás (Flona Carajás), conforme Figura 1. Trata-se de uma unidade de conservação federal, com 391.263,04 hectares, que se insere no bioma da Amazônia.

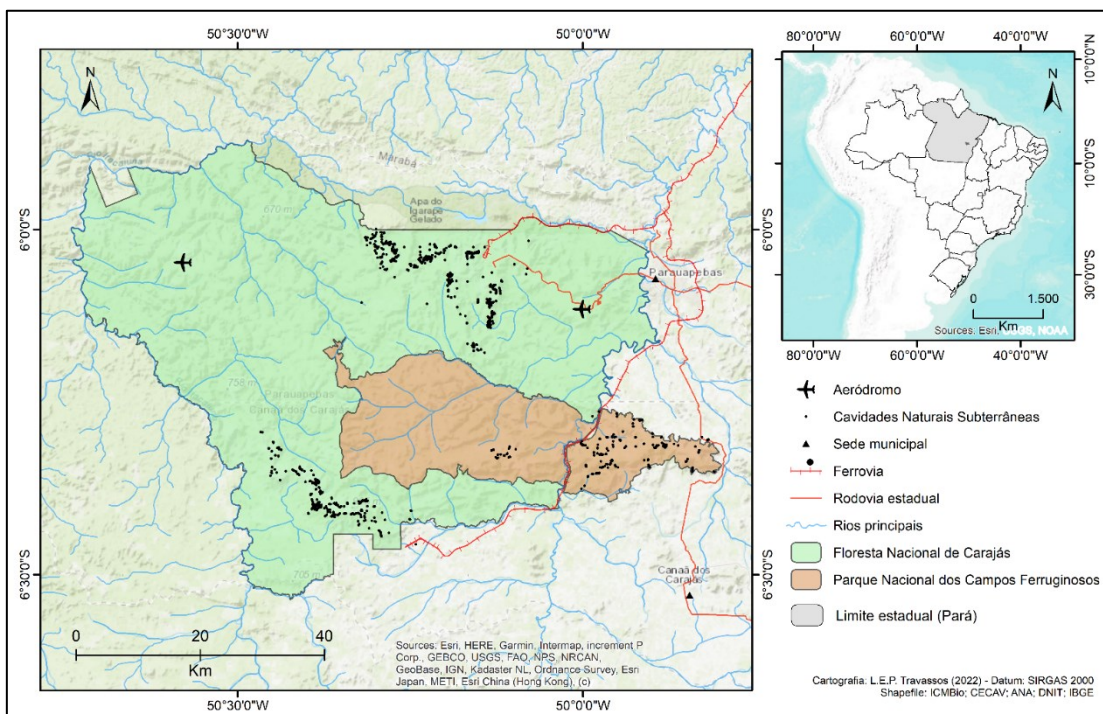


Figura 1: Localização da área de estudo.

O atual Plano de Manejo dessa unidade de conservação destaca a necessidade de conservação dos geossistemas ferruginosos, caracterizados por um número significativo de cavidades naturais subterrâneas que se desenvolvem em formações ferríferas bandadas, coberturas de canga detrítica ou no contato entre as duas. Em consonância com o Plano de Manejo da Floresta Nacional de Carajás (ICMBIO, 2016) o Plano de Pesquisa

Geossistemas Ferruginosos da Floresta Nacional de Carajás (ICMBIO, 2017) destaca a necessidade de: promover o uso múltiplo dos recursos naturais por meio de arranjos produtivos locais que objetivem o manejo e aproveitamento econômico da floresta; a pesquisa científica; a educação ambiental e turismo sustentável, contribuindo com o desenvolvimento ambiental e socioeconômico da região. Dentre os alvos de conservação selecionados estão as cavidades naturais subterrâneas com grau de relevância máximo – valor determinado pela análise de atributos geológicos, biológicos, hidrológicos, paleontológicos, histórico-culturais, socioeconômicos e cênicos das cavidades de uma mesma litologia.

O projeto se inseriu na Linha Temática associada ao Plano de Pesquisa Geossistemas Ferruginosos da Floresta Nacional de Carajás e na Área 3 Manejo do Patrimônio Espeleológico em Rochas Ferruginosas.

Deste modo, cumpre ressaltar o sentido crítico dos estudos desenvolvidos, qual seja, uma abordagem da realidade do Geossistema Ferruginoso de Carajás voltada para a compreensão da totalidade relacionada a temas da geodiversidade, geoconservação, geoturismo, geoética e paisagem. Assim, para além dos estudos analíticos, parciais e operativos, dos vários aspectos abordados, busca-se uma visão holística.

1.2. ATIVIDADES PLANEJADAS E DESENVOLVIDAS

- a) Abordagem geoética: pesquisa e análise bibliográfica para indicação e recomendações de uma abordagem geoética no contexto dos geossistemas ferruginosos. Planejada e desenvolvida.
- b) Levantamento dos sítios da geodiversidade e das cavidades de máxima relevância: pesquisa bibliográfica. Planejada e desenvolvida.
- c) Levantamento dos sítios da geodiversidade e das cavidades de máxima relevância: entrevistas com especialistas. Planejada e parcialmente desenvolvida: durante a realização da primeira campanha de campo foram realizadas consultas aos técnicos do CECAV e ao pessoal envolvido com atividades didáticas e educativas na Flona e no Parque buscando identificar os sítios de maior interesse para esse tipo de uso (Figura 2).
- d) Levantamento de sítios da geodiversidade e das cavidades de máxima relevância: Primeira etapa de campanha de campo. Planejada e desenvolvida. Cabe destacar que o ICMBio tem uma planilha com as cavidades de máxima relevância resultado dos trabalhos de licenciamento ambiental para as atividades de mineração (Figura 2).



Figura 2: Durante a primeira campanha de campo foram realizadas consultas aos técnicos do CEVAV e ao pessoal que trabalha nas Unidades de Conservação (Flona Carajás e Parque Nacional Campos Ferruginosos) sobre os sítios da geodiversidade e patrimônio espeleológico de interesse para o desenvolvimento do projeto uma vez que a área é extensa e de difícil acesso. Essa etapa de campo foi realizada totalmente de forma guiada pelos técnicos do CECAV e pessoas que trabalham nas unidades de conservação.

- e) Definição das áreas mínimas de sítios da geodiversidade, incluindo o patrimônio espeleológico. Planejada e desenvolvida na análise dos sítios selecionados e na análise geral geoambiental.
- f) Avaliação qualitativa de sítios da geodiversidade e do patrimônio espeleológico. Planejada e desenvolvida.

- g) Estudo capacidade de carga espeleotúristica preliminar para eventuais roteiros de interesse. Segunda campanha de campo. Planejada e desenvolvida. (Figura 3).



Figura 3: Panorama da paisagem cujas cavernas Guarita e Mapiguari estão inseridas, FLONA Carajás.

- h) Análise do risco de degradação de sítios da geodiversidade e do patrimônio espeleológico. Planejada e desenvolvida para os sítios selecionados (*Bat Caves*, sítios para geoconservação e estudos de capacidade de carga para roteiros turísticos (Figura 4a, 4b, 4c).

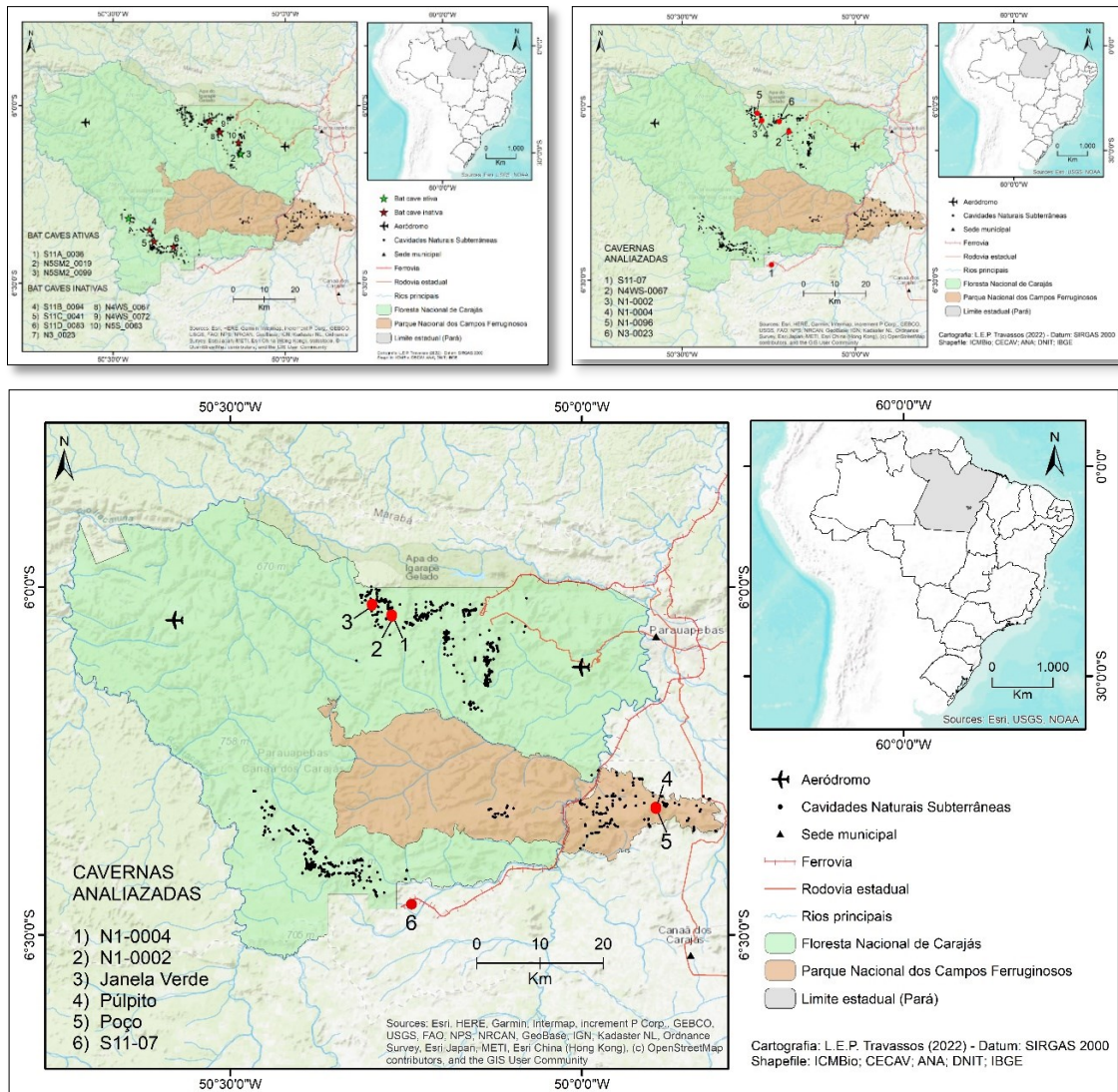


Figura 4: Mapa de localização das cavernas analisadas: a) *Bat Caves* na área de estudo; b) cavernas analisadas para geoconservação; c) cavernas analisadas para estudos de capacidade de carga e roteiros turísticos na área de estudo.

- i) Dinâmica da Paisagem de Carajás e análise da fragmentação da paisagem no entorno das cavernas subterrâneas. Planejada e desenvolvida para os sítios selecionados (*Bat Caves*).
- j) Realização de etapa extra de campanha de campo com a participação dos técnicos do CECAV, Darcy dos Santos e Mauro Gomes e do Professor Luiz Eduardo Panisset Travassos para proposição de roteiros turísticos dos sítios da geodiversidade e do patrimônio espeleológico com mais alto potencial didático e turístico. Planejada e parcialmente desenvolvida. Parte do produto dessa abordagem é produto comum com o projeto **Valores da geodiversidade em Parques Nacionais considerado sua contribuição na conservação e valorização do patrimônio espeleológico**. Cabe destacar que foram realizadas duas campanhas extras de campo para auxiliar na confecção dos produtos educativos previstos no projeto acima mencionado (Figura 5).

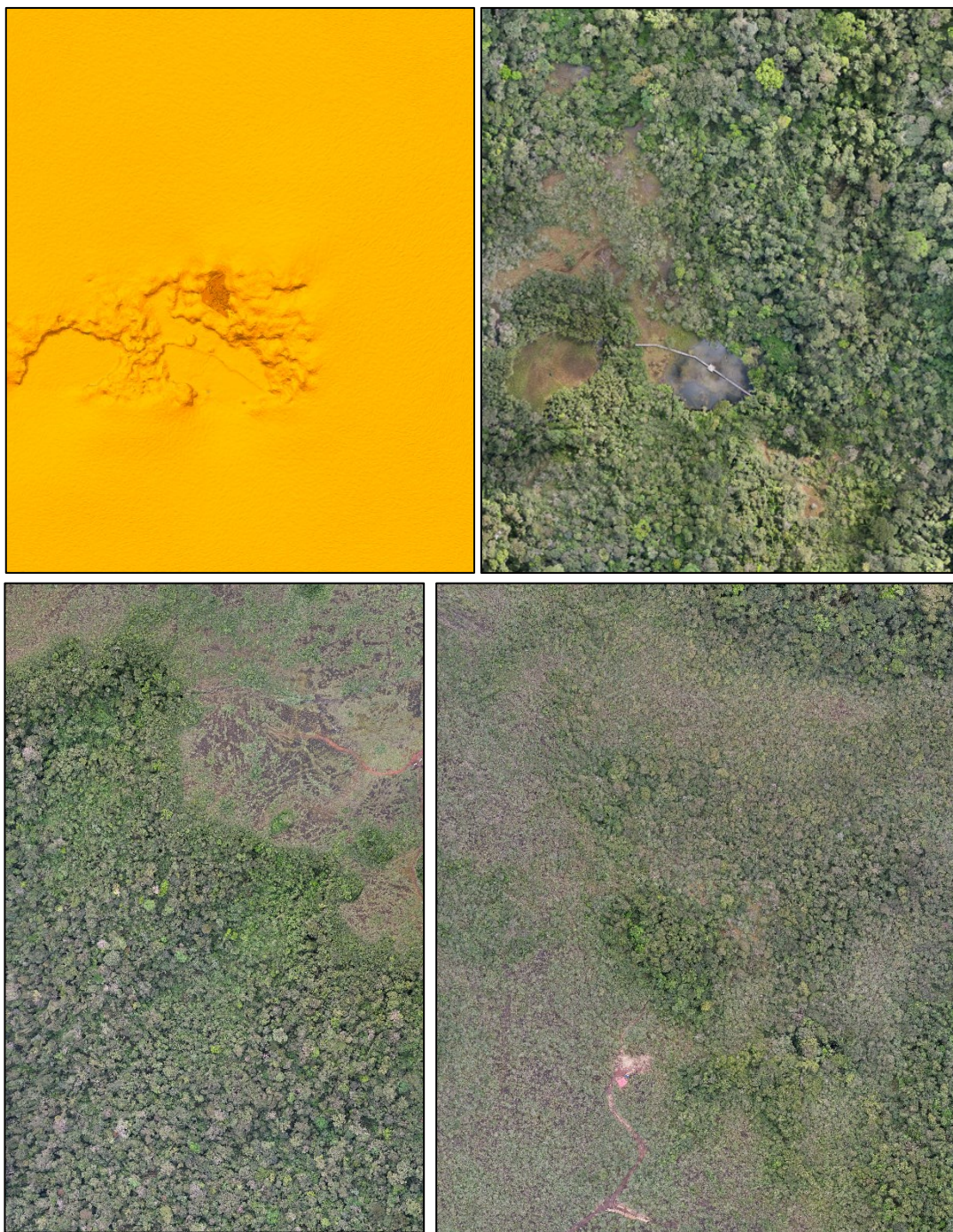


Figura 5: Modelos 3d e ortofotos em estado bruto que serão refinados em momento oportuno.

k) Proposição de estratégia integrada de geoconservação. Planejada e desenvolvida.

1.3. METODOLOGIA

Para além dos estudos analíticos, parciais e operativos, dos vários aspectos abordados, busca-se uma visão holística. Nessa introdução é metodologia geral do projeto é apresentada de maneira simplificada, o detalhamento de cada parte é apresentado nos

resultados entregues na forma de artigos científicos que compõem esse relatório.

- a) Análise bibliométrica: i) Definição dos termos de busca e Coleta de dados; ii) Processamento dos dados com uso de ferramentas de análise bibliométrica *Litstudy* e *Bibliometrix*; iii) Análises dos resultados.
- b) Uso de metricas para caracterizar estrutura e configuração da paisagem de Carajás: i) Trabalho de campo; ii) Utilização de ferramentas computacionais em sistemas de informação geográfica (SIG); Análise dos resultados.
- c) Análise da composição da paisagem para *Bat Caves*: i) Seleção e confecção de mapas de uso e cobertura da terra (anos de 1985 e 2021); ii) Realização de trabalho de campo; iii) Análise da composição da paisagem para *Bat Caves* considerando perda de área de forrageamento; iv) Análises dos resultados.
- d) Potencial de uso recreativo e capacidade de carga de sítios selecionados: i) Avaliação qualitativa e descritiva dos possíveis roteiros; ii) Indicação do estado atual e grau de intervenção, além das possibilidades de uso; iii) Realização de trabalho de campo e preenchimento de fichas de campo; iv) Classificação do grau de conservação; v) Análise do potencial espeleoturístico.
- e) Potencial de serviços ecossistêmicos da geodiversidade: i) Reconhecimento e classificação dos serviços ecossistêmicos (SE) fornecidos pela geodiversidade; ii) Contagem de ocorrências de cada tipo de serviço de geodiversidade; iii) Análise dos resultados.
- f) Estratégias de geoconservação: i) Trabalho de campo; ii) Seleção das cavidades; iii) Avaliação das cavernas considerando os seguintes propósitos: pesquisa científica e monitoramento contínuo, uso didático, aproveitamento turístico, contribuição para a educação global em geociências. Para cada critério, foram atribuídas notas de 1 (Insatisfatório ou Não Avaliado) a 5 (Excelente); iv) Análise dos resultados.
- g) Análise geoambiental para atividades educativas: i) elaboração dos mapas de análise; ii) caracterização geoambiental no contexto das cavidades; iii) propostas de temas geoeducativos e abordagens.
- h) Abordagem geoética: i) Análise do Plano Nacional de Mineração 2030; ii) Análise do Plano de Pesquisa no Geossistema Ferruginosos de Carajás; iii) Identificação de convergência e divergência entre esses dois instrumentos de políticas públicas; iv) Análise dos resultados.

1.4. RESULTADOS PLANEJADOS ALCAÇADOS E RESULTADOS DERIVADOS

Foram, a princípio definidos seis produtos que se complementam, além da difusão dos resultados da pesquisa por meio de publicações de artigos em revistas especializadas:

- (1) Listagem e caracterização dos sítios da geodiversidade e das cavidades naturais

subterrâneas que podem ser usadas com fins turísticos e educativos; **(2)** Quantificação de sítios da geodiversidade e das cavidades naturais subterrâneas e seu potencial didático e educativo; **(3)** Avaliação do risco de degradação de sítios selecionados; **(4)** Indicação de roteiros turísticos; **(5)** Recomendações de como melhorar políticas com base em princípios geoéticos; **(6)** Listagem de possíveis políticas que podem embasar a implementação de cenários desejáveis com ganhos para a geoconservação de Geossistemas Ferruginosos com base em princípios geoéticos. Por motivos inerentes da pesquisa alguns produtos, originalmente propostos, foram readequados buscando uma integração maior entre as temáticas abordadas. Mas acreditamos que todos os resultados esperados associados aos produtos foram alcançados.

A necessidade de buscar um grau ainda maior de integração e transdisciplinaridade levou à junção de produtos previstos em artigos unificados assim apresentados nesse relatório: **(1)** Apresentação: que traz uma introdução ao tema e aos objetivos do projeto, a apresentação das atividades desenvolvidas e planejadas, a metodologia geral da pesquisa, os resultados, os produtos, a discussão com os principais desafios encontrados; **(2)** Análise bibliométrica sobre a Flona Carajás: abordagem sobre os estudos ambientais e sua relação com a geodiversidade e temas correlatos – esse artigo, considerando as bases consultadas, mostra como as pesquisas desenvolvidas na Flona Carajás são prioritariamente direcionadas para os recursos da biodiversidade o que demonstra uma lacuna na produção do conhecimento científico produzido. Ele é parte integrante dos produtos 5 e 6; **(3)** Dinâmica da Paisagem de Carajás: Uso de métricas para caracterizar estrutura e configuração da paisagem – esse artigo aborda os aspectos gerais da dinâmica da paisagem de Carajás para 3 anos 1985, 2019 e 2021, parte integrante do produto 5; **(4)** Importância da conservação da geodiversidade em geossistema ferruginoso a partir da análise da paisagem no entorno de “*Bat Caves*” – esse artigo aborda como a geoconservação da paisagem no entorno de *Bat Caves* é importante para a manutenção de serviços ecossistêmicos em geossistemas ferruginosos. Esse artigo é parte integrante dos produtos 1, 3, 5 e 6.; **(5)** Análise de potencial de uso de capacidade de carga provisória para roteiros espeleoturísticos na Floresta Nacional de Carajás – o artigo apresenta um estudo de capacidade de carga para roteiros de visitação em cavernas da Flona, algumas j a utilizadas pela unidade de conserva o com esse propósito,   parte integrante dos produtos 1, 3 e 4; **(6)** Potencial de presta o de serviços ecossistêmicos da geodiversidade na Flona Carajas: o artigo utiliza as diferentes zonas do plano de manejo da Flona Carajas para mapear o potencial de serviços ecossistêmico por zona. Esse artigo   parte

integrante dos produtos: 1,2,5 e 6; **(7)** Avaliação da geodiversidade associada a cavernas no Geossistema Ferruginosos Carajás e seu potencial para geoconservação – de maneira inédita o artigo propõem uma quantificação de cavernas selecionadas considerando diferentes propósitos de geoconservação. Ele é parte integrante dos produtos 5 e 6; **(8)** Análise geoambiental aplicada à ações educativas nas cavidades da Serra de Carajás – o artigo faz uma análise das características do meio físico da área de estudo e propõem sua integração em atividades educativas especialmente relacionadas ao contexto do patrimônio espeleológico – é parte integrante dos produtos 1,3 e 4; **(9)** A importância da perspectiva geoética na proteção do patrimônio espeleológico em contexto de mineração – esse artigo traz uma análise comparativa entre o Plano Nacional de Mineração-2030 e o Plano de Pesquisa no Geossistema Ferruginoso de Carajás, buscando identificar áreas de convergência e divergência, visa ainda fornecer insights que promovam discussões fundamentadas em geoética, é parte integrante dos produtos 5 e 6; **(10)** Finalmente, a cartilha educativa sobre a Floresta Nacional de Carajás, destaca-se pela sua significativa contribuição para a conservação e valorização do patrimônio espeleológico. Este produto é resultado da sinergia entre esse projeto e o projeto **Valores da geodiversidade em Parques Nacionais considerado sua contribuição na conservação e valorização do patrimônio espeleológico**, refletindo a importância conjunta de suas abordagens na promoção da conscientização e preservação ambiental relacionada às cavernas, se refere aos produtos 1,2 e 4. A cartilha será apresentada oportunamente com o relatório do projeto acima mencionado, não sendo incorporada nesse relatório.

Cada artigo aborda um conjunto de temas destinado à integração dos conceitos de geodiversidade, geoconservação, geoética, geoturismo, paisagem e geossistemas ferruginosos na região da Floresta Nacional de Carajás. A geodiversidade presente na Floresta Nacional de Carajás se revela como o elemento preponderante para a compreensão das paisagens desse geossistema ferruginoso dessa região. Reconhecer e valorizar essa abordagem torna-se uma proposta inovadora na gestão desse ecossistema rico e complexo.

A perspectiva da geoconservação na área emerge como um eixo adicional de extrema relevância, com o potencial de reformular os paradigmas contemporâneos relativos à conservação e ao uso sustentável dos recursos naturais. Integrar uma abordagem de geoconservação na gestão da Floresta Nacional de Carajás não apenas contribui para a preservação efetiva desse ecossistema singular, mas também proporciona benefícios duradouros para as comunidades locais e para as gerações futuras. Além disso,

o geoturismo e o espeleoturismo na região podem ter impactos positivos, especialmente em um cenário onde as atividades extrativas e conservacionistas coexistem. Essa dualidade cria uma dinâmica única, onde os visitantes têm a oportunidade de explorar a riqueza natural da região, ao mesmo tempo em que testemunham esforços de preservação e sustentabilidade, especialmente em relação ao patrimônio espeleológico.

Por fim, a geoética assume um papel de extrema importância ao assegurar o acesso equitativo e democrático aos serviços e recursos naturais da região. Sua relevância transcende os limites legais, visando proporcionar ao setor da mineração uma abordagem que vai além das simples conformidades jurídicas. Nesse contexto, a geoética atua como um guia ético, promovendo práticas responsáveis que consideram não apenas os interesses econômicos, mas também os impactos sociais e ambientais.

Acreditamos que os resultados apresentados aqui marcam o início de um processo de planejamento que almejamos tenha impacto positivo na região da Flona de Carajás, no Pará. Esses resultados representam um conjunto de abordagens e ações derivadas de uma pesquisa abrangente conduzida por especialistas de diversas áreas ao longo de aproximadamente 15 meses. As instituições de pesquisa envolvidas neste processo aspiram ter contribuído de maneira abrangente e efetiva para aprimorar o manejo da Flona de Carajás. Estamos confiantes de que este trabalho não apenas forneça insights valiosos, mas também possa servir como um catalisador para iniciativas futuras no contexto da geodiversidade e temas correlatos para regiões mineradoras com rico patrimônio ambiental.

É importante ressaltar que, embora os produtos (1) Listagem e caracterização dos sítios da geodiversidade e das cavidades naturais subterrâneas que podem ser utilizados com fins turísticos e educativos e (6) Listagem de possíveis políticas que podem fundamentar a implementação de cenários desejáveis com benefícios para a geoconservação de Geossistemas Ferruginosos com base em princípios geoéticos, já tenham sido abordados nos artigos previamente mencionados, consideramos relevante apresentar aqui essas duas listagens.

Os sítios específicos incluídos nas análises que podem ser explorados com fins turísticos e educativos são: Guarita (N1_0004); Mapinguari (N1_0002); Janela Verde; Púlpito; Poço; Paleotoca (S11-07); Vale da Lua (N4WS_0067); Caverna da Dolina (N1_0096); N3_023; *Bat Caves ativas* (S11A_0036, N5SM2_0019, N5SM2_0099); *Bat Caves inativas* (S11B_0094, S11C_0041, S11D_0083, N3_0023, N4WS_0067, N4WS_0072, N5S_0063).

A formulação de políticas públicas no Brasil tem sido objeto de estudos recentes e se configura como um campo interdisciplinar fundamental para análises robustas. As políticas públicas representam um conjunto de iniciativas que visam avaliar e promover o desenvolvimento de atividades de cunho social. Tais iniciativas podem surgir tanto das esferas governamentais, buscando alcançar a população de maneira descendente (*Top-down*), quanto da própria sociedade, exercendo pressão ascendente sobre o governo (*Bottom-up*), conforme proposto por Sundström (2019).

As cavidades naturais subterrâneas, por representarem um patrimônio de valor inestimável, foram legalmente designadas como bens da União, conforme estipulado no artigo 20, X da Constituição Federal. Portanto, é responsabilidade da União proteger esses recursos, implementando medidas efetivas para sua preservação, ao mesmo tempo em que promove um desenvolvimento econômico sustentável nessas áreas. Essa ampliação do conceito de Patrimônio Cultural é explicitada na Seção II, artigo 216º da Constituição de 1988, que define o patrimônio cultural brasileiro como, nos quais se incluem:

- I. as formas de expressão;
- II. os modos de criar, fazer e viver;
- III. as criações científicas, artísticas e tecnológicas;
- IV. as obras, objetos, documentos, edificações e demais espaços destinados às manifestações artístico- culturais;
- V. os conjuntos urbanos e sítios de valor histórico, paisagístico, artístico, arqueológico, paleontológico, ecológico e científico.

Dado o seu status como patrimônio tanto natural quanto cultural, as cavernas ocupam uma posição única e significativa que justifica sua inclusão em políticas públicas voltadas para ambas as categorias de patrimônio. Essas formações subterrâneas não apenas abrigam uma rica biodiversidade e características geodiversas únicas, mas também contêm vestígios históricos e culturais que remontam a períodos ancestrais. Listamos a seguir algumas dessas políticas:

- a) Política de Patrimônio Cultural Material: Consolidada pelo Iphan, a Política de Patrimônio Cultural Material (PPCM) foi instituída pela Portaria Nº 375, de 19 de setembro de 2018. Esta normativa serve de guia para ações e processos de identificação, reconhecimento, proteção, normatização, autorização, licenciamento, fiscalização, monitoramento, conservação, interpretação, promoção, difusão e educação patrimonial relacionados à dimensão material do Patrimônio Cultural Brasileiro (<http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/1837>).
- b) Tombamento: Os monumentos, sítios e paisagens naturais são protegidos pelo tombamento, uma ferramenta essencial para a preservação do patrimônio natural. Este processo envolve restrições parciais ao uso e usufruto do bem e é resultado de um

rigoroso procedimento administrativo, caracterizado por sua abordagem técnica. Seu desfecho almeja a inscrição do bem no Livro de Tombo, especialmente no «Livro de Tombo Arqueológico, Etnográfico e Paisagístico» (Saddy; Avzaradel, 2018).

- c) Decreto Lei 4.146 de 04/03/1942: Dispõe sobre a proteção de depósitos fossilíferos: Artigo 1º – Os depósitos fossilíferos são propriedade da Nação, e, como tais, a extração de espécimes fósseis depende de autorização prévia e fiscalização do Departamento Nacional da Produção Mineral, do Ministério da Agricultura. § único – Independem desta autorização e fiscalização as explorações de depósitos fossilíferos feitas por museus nacionais e estaduais, e estabelecimentos congêneres, devendo, neste caso, haver prévia comunicação ao Departamento Nacional de Produção Mineral.
- d) Criação de Unidades de Conservação: O conceito de Unidade de Conservação é delineado pelo art. 2º da Lei n.º 9.985, de 18 de julho de 2000, que estabelece o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. Ele define as unidades como espaços territoriais e seus recursos ambientais, incluindo águas jurisdicionais, que possuem características naturais relevantes. Estas são legalmente estabelecidas pelo Poder Público, com o propósito de conservação e limites bem definidos, sendo submetidas a um regime especial de administração que inclui garantias apropriadas de proteção (Saddy; Avzaradel, 2018).
- e) Uma outra categoria de espaços protegidos é a Área de Preservação Permanente (APP), que é definida pelo art. 3º, inc. II, do Novo Código Florestal (Lei 12.651, de 25 de maio de 2012). De acordo com esta legislação, a APP é caracterizada como uma área protegida, independentemente de estar coberta por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, além de facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas.
- f) A Instrução Normativa do ICMBio nº 30/2012 estabelece diretrizes para a compensação espeleológica, delineando uma ordem de prioridade conforme descrito nos artigos 4º e seus incisos. São eles: I - Criação de Reserva Particular do Patrimônio Natural, em área de propriedade do empreendedor, que tenha como objetivo principal a proteção do patrimônio espeleológico; II - Criação de unidade de conservação de proteção integral com o objetivo principal de proteger o patrimônio espeleológico, incluindo a elaboração dos estudos necessários, bem como a aquisição e a doação ao Instituto Chico Mendes das propriedades localizadas na área proposta para a unidade; III - Regularização fundiária e demarcação de áreas de ocorrência do patrimônio espeleológico em unidades de conservação.
- g) Programa Nacional de Conservação ao Patrimônio Espeleológico: constituído em 2009, o programa tem como desenvolver uma estratégia nacional de conservação e uso sustentável do patrimônio espeleológico brasileiro. Entre suas diretrizes gerais estão: valorizar o patrimônio espeleológico; integrar ações setoriais, por meio da descentralização de ações, do fortalecimento da ação governamental, do estabelecimento de parcerias e envolvimento dos setores interessados na implementação do programa; promover uma abordagem ecossistêmica para a gestão do patrimônio espeleológico, avaliando problemas, identificando soluções e propondo medidas adequadas de conservação, uso sustentável e recuperação dos

recursos da geodiversidade. (<https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/patrimonio-espeleologico-em-pauta-1/icmbio-cecav-lanca-pro-espeleo>).

- h) O Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (ICMBio/Cecav) lançou em 06/01/2023 o Sistema de Gestão de Projetos Espeleológicos - Pró-Espeleo. A plataforma foi desenvolvida, no âmbito do Programa Nacional de Conservação ao Patrimônio Espeleológico, para que pesquisadores submetam seus projetos e ações a serem selecionados pelo centro de pesquisa, compondo, assim, um banco de projetos. O Pró-Espeleo visa ampliar parcerias, apresentar ideias, apoiar pesquisas e acompanhar resultados, além de dar transparência à destinação dos recursos provenientes da compensação espeleológica (<https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/patrimonio-espeleologico-em-pauta-1/icmbio-cecav-lanca-pro-espeleo>).

1.5. PRINCIPAIS DESAFIOS ENCONTRADOS, DISCUSSÃO, CONCLUSÃO

O projeto de pesquisa se concentrou na Linha Temática do Plano de Pesquisa Geossistemas Ferruginosos da Floresta Nacional de Carajás e na Área 3 Manejo do Patrimônio Espeleológico em Rochas Ferruginosas. Destacamos a importância crítica dos estudos desenvolvidos para a compreensão da totalidade do Geossistema Ferruginoso de Carajás, incluindo geodiversidade, geoconservação, geoturismo, geotética e paisagem.

A Floresta Nacional de Carajás é um ecossistema ferruginoso de grande relevância mundial, abrigando biodiversidade e enfrentando desafios relacionados à mineração, que podem afetar irreversivelmente sua paisagem e valores associados. A análise bibliométrica destacou a necessidade de uma abordagem mais ampla no desenvolvimento de pesquisas científicas, considerando a geodiversidade e temas afins na Flona. A maior parte dos investimentos em pesquisa ainda se concentra nos valores da biodiversidade.

Propomos uma agenda de pesquisa focada na geodiversidade da Flona Carajás, destacando seu potencial emergente para garantir a funcionalidade dos ecossistemas, especialmente em geossistemas sensíveis como os ferruginosos. A análise da evolução das áreas circundantes às *Bat Caves* revelou a importância crítica da conservação da geodiversidade. As mudanças na paisagem têm implicações significativas para o meio ambiente, especialmente para a ecologia dos morcegos que habitam essas cavernas.

Os resultados obtidos revelam que a zona de manejo de mineração emerge como uma área de destaque, apresentando um potencial consideravelmente elevado para uma variedade de serviços ecossistêmicos da geodiversidade, incluindo serviços culturais, de regulação e de suporte. Esse destaque está diretamente relacionado à presença

significativa de cavernas e lagoas de altitude, que desempenham papéis cruciais na regulação dos ecossistemas locais. No entanto, é importante reconhecer que os resultados obtidos devem ser interpretados com cautela, uma vez que podem ser considerados preliminares devido a algumas limitações. Primeiramente, a disponibilidade de dados pode variar entre as diferentes zonas da unidade de conservação, o que pode afetar a precisão e abrangência das análises realizadas. Além disso, é importante considerar a possível discrepância entre estudos sistemáticos realizados na região devido, em parte, às diferenças de intensidade no esforço amostral e nas facilidades de acesso, especialmente em relação ao levantamento do patrimônio espeleológico. Os lagos, por sua vez, provavelmente estão sub-representados devido às restrições impostas pelas definições quanto a presença e dimensões em diferentes estações do ano e em função das variações anuais de pluviosidade e de retenção de umidade em superfície.

Delimitamos categorias específicas de geoconservação direcionadas ao Geossistema Ferruginoso de Carajás, sublinhando a grande importância da pesquisa científica para compreender e preservar sua geodiversidade única. Além disso, enfatizamos a necessidade de atividades educativas para sensibilizar o público sobre a importância desses ecossistemas, o potencial do turismo sustentável como uma ferramenta para a conservação e a promoção de iniciativas de educação global para compartilhar conhecimentos e melhores práticas de gestão ambiental.

Destacamos a necessidade de uma abordagem integrada de geoética para a mineração e a preservação do patrimônio espeleológico, visando alcançar um equilíbrio sustentável entre desenvolvimento econômico e conservação ambiental.

Os resultados têm implicações importantes para a mineração na região e para o monitoramento de seus impactos no meio ambiente e nas comunidades locais. A proteção da geodiversidade, especialmente do patrimônio espeleológico, é essencial para garantir o equilíbrio ecológico e a integridade dos geossistemas ferruginosos.

As dificuldades encontradas durante o desenvolvimento deste projeto de pesquisa foram significativas, principalmente devido à vasta extensão da área de estudo e à falta de acessibilidade a muitos locais. A Floresta Nacional de Carajás abrange uma área extensa e diversificada, o que torna o acesso a determinadas regiões desafiador e muitas vezes impossível. Além disso, a topografia acidentada e as condições ambientais adversas, como chuvas intensas e calor extremo, também dificultam o trabalho de campo. Essas limitações logísticas foram um obstáculo para a coleta de dados em algumas partes

da área de estudo, impactando a abrangência e a profundidade das análises realizadas (Figura 6).

A gestão financeira do projeto foi assumida pela coordenação científica, ao invés de uma fundação de apoio. Isso resultou em um investimento considerável de tempo e esforço, visto que houve a necessidade de lidar com uma quantidade significativa de burocracia para atender às exigências do convênio. Essa situação representou um desafio adicional para os pesquisadores, que tiveram que dedicar tempo valioso a questões administrativas em vez de focarem exclusivamente na pesquisa e no desenvolvimento do projeto.

Para futuras pesquisas nesta área, é essencial enfrentar essas dificuldades logísticas, e mesmo as burocráticas, e expandir os esforços de pesquisa para incluir uma variedade maior de locais dentro da Floresta Nacional de Carajás. Recomenda-se o desenvolvimento de estratégias de acesso mais eficientes, como o uso de tecnologia de sensoriamento remoto e drones para mapeamento e monitoramento de áreas remotas e de difícil acesso. Além disso, é fundamental investir em infraestrutura para facilitar o trabalho de campo, como a construção de trilhas e pontos de acesso seguros. A colaboração entre instituições de pesquisa, organizações governamentais e comunidades locais pode facilitar o compartilhamento de recursos e conhecimentos, promovendo uma abordagem mais abrangente e colaborativa para a pesquisa e conservação da geodiversidade na região.

Os resultados alcançados neste projeto são notáveis, especialmente levando em consideração o modesto orçamento envolvido. Com um custo estimado de cerca de R\$105.000,00 e um gasto real de menos de R\$ 90.000,00, o projeto conseguiu superar as metas estabelecidas, apesar das limitações financeiras.

Vale ressaltar que parte do sucesso foi possível devido ao uso de equipamentos pessoais, como computadores e outros equipamentos, além da utilização de um drone pertencente a um dos pesquisadores, demonstrando a capacidade de adaptação e otimização dos recursos disponíveis. As despesas foram direcionadas principalmente para custos de diárias, passagens, aluguel de veículos e pagamento de bolsistas de iniciação científica. Provavelmente se a gestão financeira estivesse a cargo de uma Fundação de Apoio todos os recursos previstos tivessem sido utilizados podendo trazer ainda mais desdobramentos para os resultados alcançados.




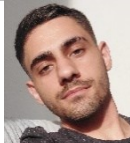
Figura 6: Aspectos relacionados às dificuldades operacionais em campo.

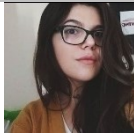
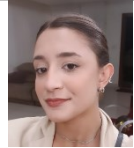
1.6. EQUIPE

Pesquisadores do Projeto

	<p>Úrsula de Azevedo Ruchkys Doutora em Geologia (Universidade Federal de Minas Gerais, 2009). Professora Associada IV do Departamento de Cartografia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Bolsista de Produtividade em Pesquisa CNPq Nível 2.</p>
	<p>Luiz Eduardo Panisset Travassos Doutor em Carstologia (Universidade de Nova Gorica, Eslovênia, 2011). Professor Adjunto do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas). Bolsista de Produtividade em Pesquisa CNPq Nível 2.</p>
	<p>Paulo de Tarso Amorim Castro Doutor em Geologia (Universidade de Brasília, 1997). Professor Titular do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Bolsista de Produtividade em Pesquisa CNPq Nível 2.</p>
	<p>Heros Santos Lobo Doutor em Geociências e Meio Ambiente (Unesp/Rio Claro-SP, 2011). Professor Associado II no Depto. de Geografia, Turismo e Humanidades (DGTH) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar - Sorocaba-SP). Bolsista de Produtividade em Pesquisa CNPq Nível 2.</p>
	<p>Leonardo Cristian Rocha Doutor em Geografia e Análise Ambiental (Universidade Federal de Minas Gerais, 2011). Professor Adjunto do Departamento de Geociências da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ).</p>
	<p>Sonia Carvalho Ribeiro Doutora em Ciências do Ambiente (University of East Anglia, 2009). Professora Adjunta do Departamento de Cartografia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Bolsista de Produtividade em Pesquisa CNPq Nível 1D.</p>

Bolsistas de Iniciação Científica Contemplados

	<p>Ana Clara Ferreira Ribeiro Graduanda em Geografia pela Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ).</p>
	<p>Gabriel Oliveira Cherle Pini Graduando em Turismo pela Universidade Federal de São Carlos - UFSCar no campus Sorocaba.</p>

	<p>Helena Campos Rattton Graduanda em Geografia pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).</p>
	<p>Julia Sales Vaz Graduanda em Turismo pela Universidade Federal de São Carlos - UFSCar no campus Sorocaba.</p>

Pesquisadores Colaboradores

	<p>Darcy Jose dos Santos Mestre em Ciências Ambientais (Universidade Federal de Minas Gerais, 2017). Analista ambiental do Instituto Chico Mendes de Coservação da Biodiversidade.</p>
	<p>Lais Freitas dos Santos Doutoranda em Geografia e Análise Ambiental (Universidade Federal de Minas Gerais).</p>
	<p>Luciano José Alvarenga Doutor em Ciências Naturais (Universidade Federal de Ouro Preto). Doutor em Ciências Jurídicas (Universidade do Minho, Braga, Portugal). Analista do Ministério Público do Estado de Minas Gerais.</p>
	<p>Mauro Gomes Mestre em Ciências Ambientais (Universidade Federal de Minas Gerais, 2017). Analista ambiental do Instituto Chico Mendes de Coservação da Biodiversidade.</p>
	<p>Paulo Henrique Maciel Pádua Graduando em Geografia (Universidade Federal de Minas Gerais).</p>

PARTE 2

PRODUTOS
ASSOCIADOS

2. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA SOBRE A FLONA CARAJÁS: ABORDAGEM SOBRE ESTUDOS AMBIENTAIS EM GEOSSISTEMAS FERRUGINOSOS E SUA RELAÇÃO COM A GEODIVERSIDADE TEMAS CORRELATOS

Lais Freitas dos Santos
Helena Campos Ratton
Úrsula de Azevedo Ruchkys

RESUMO

A Flona de Carajás é uma área de proteção ambiental caracterizada principalmente por seu geossistema ferruginoso. A área apresenta uma rica geodiversidade e biodiversidade, porém também é alvo das atividades mineradoras que se mal geridas ocasionam em impactos ambientais irreversíveis. O principal objetivo deste estudo é analisar, do ponto de vista bibliométrico, as principais tendências de pesquisa sobre a Floresta Nacional de Carajás localizada no Pará, em específico analisar se as publicações apresentaram uma abordagem relacionada a temas correlatos à geodiversidade. Para isso foram obtidas as publicações sobre a área da pesquisa na plataforma Scopus e realizada análise bibliométrica utilizando os software *Litstudy* e *Bibliometrix*. Os resultados apontaram que a maioria das publicações nessa base são da área da biologia e que realizaram documentação de espécies existentes na Flona. No entanto, evidenciou-se uma lacuna de publicações indexadas ao Scopus que utilizam-se uma abordagem relacionada à geodiversidade e temas correlatos. A análise bibliométrica pode contribuir no mapeamento científico, evidenciando tendência de pesquisa sobre a Flona de Carajás e pode constituir um ponto de referência para pesquisadores que abordam esse tema de pesquisa.

PALAVRAS-CHAVE: Bibliometria. Flona. Carajás. Floresta Nacional.

2.1. INTRODUÇÃO

É comum abordar a natureza por meio da sua diversidade biológica, conhecida como biodiversidade. No entanto, a natureza é uma entidade que abrange tanto elementos vivos quanto não vivos. O aspecto não vivo da diversidade natural, referido como geodiversidade (Tukiainen et al., 2022), engloba a variedade abiótica da superfície e subsuperfície da Terra. Isso inclui características geológicas (rochas, minerais, fósseis), geomorfológicas (formas de relevo, topografia, processos físicos), pedológicas (solos) e hidrológicas (Gray 2013).

A consecução de nossos objetivos de conservação ambiental é prejudicada pela degradação tanto da natureza viva quanto da natureza não viva. Essa degradação,

decorrente das mudanças globais causadas pelas atividades humanas, também representa sérias ameaças à saúde e ao bem-estar humanos, os quais dependem significativamente da natureza. No entanto, ao concentrarmos exclusivamente na biodiversidade, temos uma visão simplificada da natureza e subestimamos a importância da geodiversidade para a conservação ambiental (Alahuhta et al, 2022). Em geossistemas sensíveis, como os geossistemas ferruginosos, uma abordagem integrada que valorize estudos tanto da natureza biótica quanto da natureza abiótica é crucial para assegurar sua conservação e gestão apropriada.

Geossistemas ferruginosos são definidos como complexas unidades espaciais formadas por rochas ferruginosas com enorme potencial para fornecer informações científicas, em decorrência dos aspectos da sua geodiversidade (Ruchkys et al, 2018). A Flona de Carajás é uma das áreas incluídas no Geossistema Ferruginoso Carajás, localizado no sudeste do estado do Pará, na Amazônia Brasileira abrangendo também o Parque Nacional (PARNA) Campos Ferruginosos, unidades de conservação geridas pelo ICMBIO (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade).

A pressão antropogênica na região está associada principalmente a exploração mineral, em especial das Formações Ferríferas Bandadas (BIFs) da Formação Carajás. Segundo Lobato et al. (2005) os corpos de minério de ferro de alto teor ($> 64\%$ de Fe) estão contidos nas camadas de jaspilite que ocorrem na denominada Dobra de Carajás separadas em duas cristas norte e sul, em função de um sistema transcorrente. Este sistema transcorrente é composto por um grupo de linhas interrompidas situadas em direção geral leste-oeste.

A Flona de Carajás representa a principal estrutura nesse sistema e influencia o curso dos rios, escarpas e desenvolvimento de cavernas. Para Piló e Auler (2009), essa é uma das principais províncias espeleológicas do Brasil com grande potencial de descoberta de novas cavernas que se desenvolvem nas formações ferríferas e nas coberturas de canga.

Devido a extensa biodiversidade da fauna e flora, que inclui variedade de espécies raras na região, no ano de 2017, foi estabelecida a unidade de conservação de Proteção Integral, Parque o Parque Nacional dos Campos Ferruginosos de Carajás (Vidal, 2020). A proteção fornecida por lei tem como objetivo conciliar a conservação da natureza com o uso sustentável de parte dos recursos naturais, no caso da FLONA, e a proteção integral, no caso do PARNA. A partir do exposto, questiona-se: o que tem sido produzido cientificamente sobre a Floresta Nacional de Carajás ao longo dos anos e se as

publicações apresentam uma abordagem relacionada a temas correlatos à geodiversidade?

É importante que os pesquisadores reflitam sobre o conhecimento produzido e coletado, com o intuito de fomentar novas contribuições, discernir tendências de pesquisa, compreender os tópicos abordados, os métodos e teorias empregados, além de identificar a estrutura intelectual, o corpo de conhecimento e as áreas de enfoque para futuras investigações em um campo específico (Ferreira et al., 2014). Isso se torna ainda mais relevante em uma era em que a disponibilidade de fontes de informação é vasta, tornando a exaustão de um tema uma tarefa praticamente impossível. Nessa seara, a Ciência da Informação se posiciona como um campo de estudo dedicado a compreender as dinâmicas de geração e difusão do conhecimento dentro das várias esferas do saber (Curty e Delbianco, 2020).

Portanto, este estudo tem como objetivo analisar as tendências de pesquisas científicas sobre a Flona de Carajás, com a intenção de compreender se existem lacunas significativas em relação a abordagem relacionada à geodiversidade e temas correlatos, especialmente considerando que Carajás é reconhecido como um dos geossistemas ferruginosos mais importantes do mundo. Essa análise será realizada na base Scopus no período de 2006 a 2023 por meio da bibliometria. A busca pelo avanço do conhecimento científico é um processo contínuo que se fundamenta na acumulação e expansão do saber existente (Chueke; Amatucci, 2015). Estudos destinados a explorar e esmiuçar uma área de conhecimento desempenham um papel vital, proporcionando as bases necessárias para a realização de novas pesquisas.

Nesse contexto merece destaque a bibliometria, uma área de pesquisa intrínseca a Ciência da Informação que se dedica a estudar e medir a produção, disseminação e impacto da literatura científica. Ela utiliza métodos quantitativos para analisar documentos científicos, como artigos, livros e patentes, com o objetivo de entender tendências, relações entre autores e instituições, bem como avaliar a importância e o impacto de trabalhos de pesquisa.

A bibliometria como área do conhecimento ganhou repercussão a partir da obra de Alna Pritchard (1969) que aplica o termo para designar estudos quantitativos que envolvem estatística e matemática para analisar meios de comunicação científica com a finalidade de mapear o conhecimento pensando em futuras pesquisas e intervenções. Assim, esse tipo de análise permite identificar padrões e tendências na produção bibliográfica relacionada aos diferentes campos da ciência (Egghe e Rousseau, 1990; Glänzel e Moed, 2002). Embora sejam uma parte da Ciência da Informação, os estudos

métricos da informação são intrinsecamente interdisciplinares e recebem diversas classificações com base no objeto de análise. Essas categorias englobam a bibliometria, infometria, cientometria, cibermetria, webometria, patentometria e arquivometria (Curty e Delbianco, 2020). Conforme destacado por Fonseca (1986), Araújo (2006), Franca (2012) e Chueke e Amatucci (2015) - a análise bibliométrica segue um método sólido, apoiado por três princípios ou leis que fornecem um alicerce sólido para a análise quantitativa, auxiliando na compreensão da complexidade do panorama científico: lei de Lotka, que investiga a produtividade de autores (Lotka, 1926); lei de Bradford, que avalia a produtividade de periódicos (Bradford, 1934); e a lei de Zipf, que analisa a frequência de palavras (Zipf, 1972). Para alcançar os objetivos desta pesquisa foi utilizada uma metodologia de análise bibliométrica que se caracteriza como uma análise quantitativa apresentada na seção a seguir.

2.2. MÉTODOS

Este estudo bibliométrico é baseado em uma abordagem dividida em três etapas: i. Definição dos termos de busca e Coleta de dados; ii. Processamento dos dados com uso de ferramentas de análise bibliométrica *Litstudy* e *Bibliometrix*; iii. análises dos resultados.

Definição dos parâmetros de busca e coleta de dados

A busca foi conduzida em novembro de 2023 e resultou na identificação de 131 artigos publicados de 2006 a 2022. A coleta de dados foi realizada na plataforma *Scopus* que é uma plataforma de base de dados bibliográficos criada em 2004 que reúne artigos, resumos, indicadores bibliométricos, citações de diferentes áreas (Mesquita, 2006).

A busca foi realizada utilizando termo: “ TITLE-ABS-KEY (flona OR (floresta W/1 nacional)) AND TITLE-ABS-KEY (carajas)” que delimita a busca em documentos que citaram no título, resumo e palavras-chave, “flona ou floresta nacional” e “carajás” nos artigos e artigos de revisão.

Processamento dos dados com o uso de ferramentas de análise bibliométrica *Litstudy* e *Bibliometrix*

O *Litstudy* é um pacote em linguagem de programação *python* para a exploração de literatura científica sendo capaz de fornecer inúmeras ferramentas de análise bibliométrica, como por exemplo, extração de metadados científicos, filtragem, seleção de documentos, calcular a estatística dos metadados dos documentos, análise de

agrupamentos de palavras dos metadados etc. (Heldens et al., 2022).

Para a análise bibliométrica desta pesquisa, o *litstudy* foi utilizado para analisar as tendências da produção científica sobre a Flona de Carajás. Inicialmente foram analisados descritivamente os metadados dos 88 documentos sobre a Flona, nessa primeira análise foram descritas informações sobre o número de publicações, principais autores, número de autores por publicação, países dos autores correspondentes, principais afiliações. Para os dois últimos itens dessa análise utilizou-se o *Bibliometrix*, que é também uma ferramenta desenvolvida para análise bibliométrica em linguagem R de programação e foi desenvolvida por Aria e Cuccurullo (2017).

No segundo momento, foram analisados o conteúdo dos textos para identificar as palavras mais frequentes, grupo de palavras obtida por meio da detecção automática de conjunto de tópicos, onde cada tópico apresenta um conjunto de palavras e cada documento denota um peso (Heldens, 2022). Além disso, foram analisados os conteúdos dos principais artigos de pelo menos uma palavra em destaque de cada tópico e o conteúdo dos artigos que apresentaram as palavras “*caves, mining, ferruginous system, geoethics e geoparks*”. Essas palavras foram utilizadas como termos norteadores para testar a hipótese se as publicações sobre a Flona abordavam estudos em geodiversidade e temas correlato.

2.3. RESULTADOS

A pesquisa bibliográfica acerca da Flona de Carajás resultou na identificação de 131 documentos, incluindo artigos e artigos de revisão científica. A análise dos dados relativos à produção anual de pesquisa nesse campo revelou que a primeira publicação ocorreu em 2006, com um pico notável em 2018, quando mais de 40 artigos foram publicados. Os anos de 2016, 2017 e 2018 se destacaram como períodos de maior atividade editorial, indicando um crescente interesse na Flona de Carajás.

No ano de 2016, observou-se um notável aumento nas publicações em comparação a 2015, quando foram registrados mais de 30 artigos sobre a Flona de Carajás. Esse aumento coincide com a divulgação da Portaria nº 39 de 06 de Maio de 2016, a qual estabelece as diretrizes para o Plano de Manejo da Floresta Nacional de Carajás (BRASIL, 2016). A maioria dos artigos publicados em 2016, 2017 e 2018 estavam vinculados a uma edição especial intitulada “Flora das Cangas da Serra dos Carajás, Pará, Brasil” do periódico *Rodriguesia*, concentrando-se na descrição das

espécies da flora encontradas na Flona de Carajás. Notavelmente, um artigo de Ferreira et. al (2016) merece destaque, pois abordou a comparação dos impactos da introdução de uma espécie não nativa de grama com as espécies nativas na regeneração de áreas degradadas pelas atividades de mineração. Além disso, o ano 2018 em que há maior número de publicações esse periódico publicou dois volumes relacionados ao projeto da Flora das Cangas.

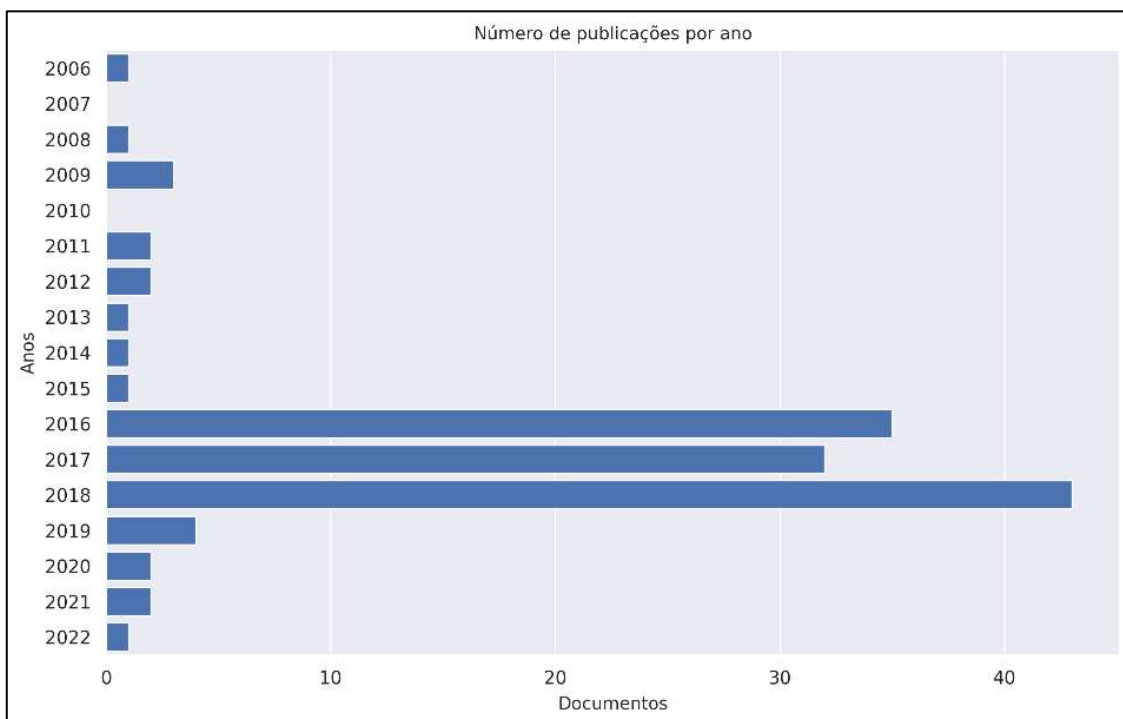


Figura 1: Evolução das publicações sobre a Flona Carajás ao longo dos anos.
Fonte: elaborado pelas autoras.

As publicações na rodriguesia são resultado do Projeto Flora das Cangas da Serra dos Carajás, iniciado em fevereiro de 2015 e com duração de três anos, e com objetivo de contribuir no preenchimento da lacuna sobre o conhecimento florístico brasileiro e estreitar o diálogo entre os envolvidos no setor produtivo e órgãos ambientalistas no Carajás (Viana e Giuliatti-Harley, 2016). O projeto envolveu a publicação de quatro volumes entre 2016 e 2018, reunindo inúmeros pesquisadores de diferentes instituições entre elas, o Museu Paraense Emilio Goeldi (MPEG) e o Instituto Tecnológico Vale (ITVDS), a Fundação de Amparo e Desenvolvimento da Pesquisa (FADESP) (Viana e Giuliatti-Harley, 2016).

Destacando-se na pesquisa sobre a Flona de Carajás, os autores que mais contribuíram com publicações foram Ilkiu Borges A. L. e Oliveira da Silva F. R., cada

um com um impressionante número superior a 20 artigos abordando a Flona de Carajás em suas obras. Notavelmente, a maioria das publicações (mais de 60 documentos) foi realizada por dois autores trabalhando em conjunto. Além disso, aproximadamente 29 documentos resultaram de colaborações de três pesquisadores, enquanto também se observa uma série de artigos com autoria única, totalizando mais de 10 documentos nesse formato (Figuras 2 e 3).

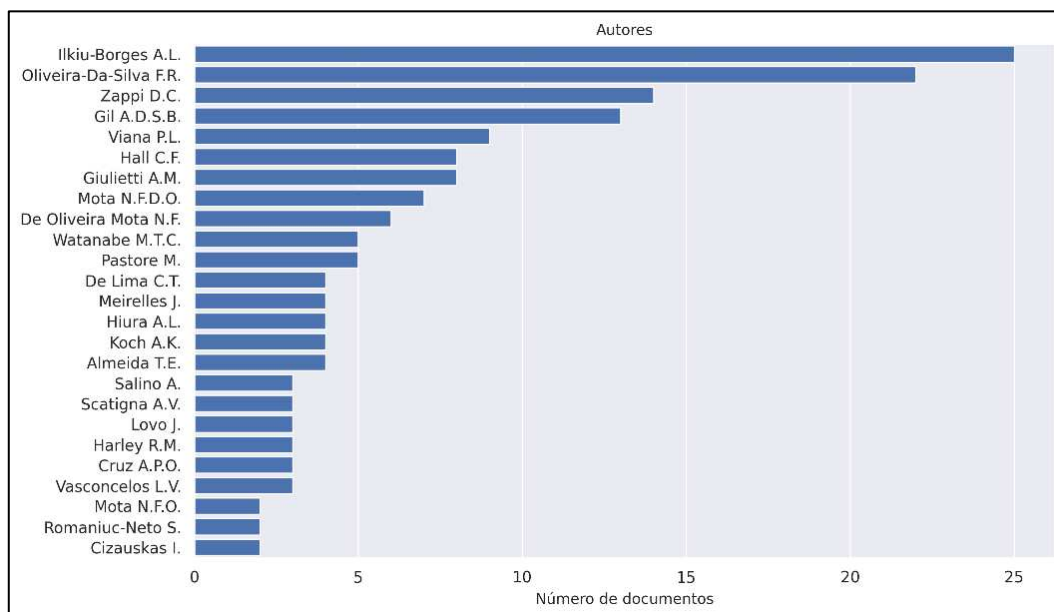


Figura 1 - Autores e números de publicações. Fonte: elaborado pelas autoras.

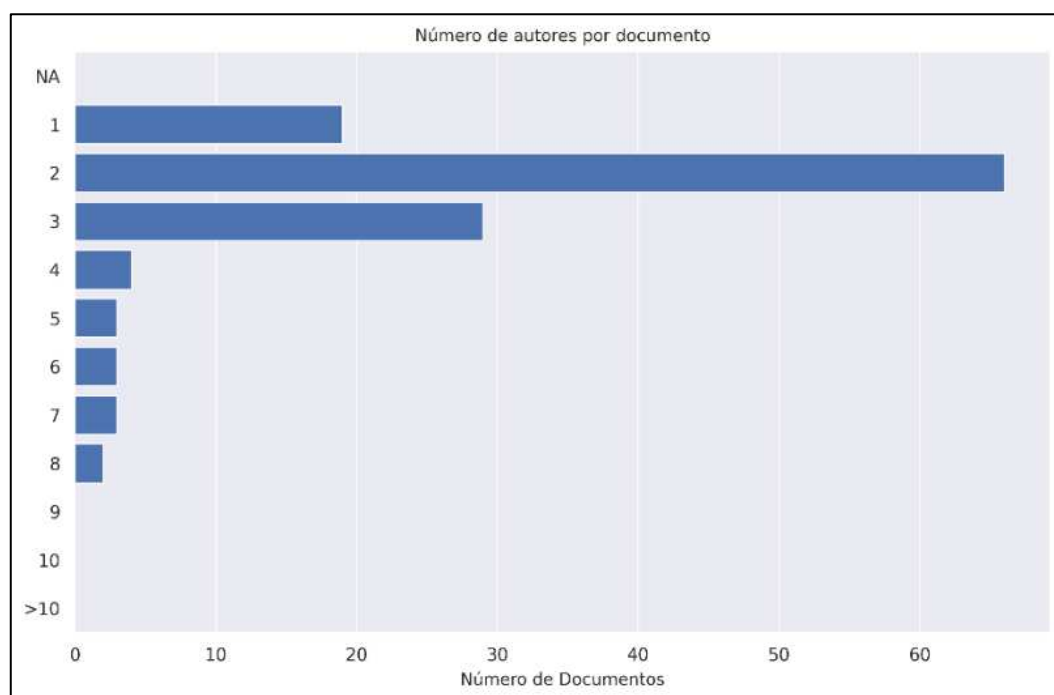


Figura 2: Distribuição do Número de Autores por Publicação. Fonte: elaborado pelas autoras.

Destacando-se como fonte proeminente de publicações sobre a Flona de Carajás, a revista *Rodriguésia*, afiliada à área das ciências biológicas do Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, merece destaque. Essa publicação tem como foco central a pesquisa no campo da biologia vegetal e abriga uma série de artigos relacionados à Flona, concentrando-se na descrição das diversas espécies vegetais que habitam essa floresta.

A maioria das publicações sobre a Flona originou-se no Brasil, com 120 artigos de autoria única e 8 que contaram com a colaboração de outros pesquisadores. A maior parte dos autores correspondentes é de nacionalidade brasileira e está afiliada a diversas instituições, incluindo o Programa de Capacitação Institucional, Instituto Tecnológico Vale, Instituto Tecnológico Vale de Desenvolvimento Sustentável, entre outras (Figura 4, Tabela 1).

Além disso, vale ressaltar que em 21 casos não foi possível identificar as afiliações dos autores, embora, de maneira geral, essas afiliações estejam distribuídas entre instituições públicas e privadas. Notavelmente, o Instituto Tecnológico Vale e o Instituto Tecnológico Vale de Desenvolvimento Sustentável estão vinculados a empresa Vale S.A., uma empresa privada atuante no setor de mineração. Esses institutos se destacam devido ao considerável número de autores afiliados que contribuíram com artigos sobre a Flona de Carajás, evidenciando o financiamento significativo de pesquisas relacionadas a essa região por parte da empresa.

Tabela 1 - Afiliação dos autores dos artigos

Affiliation	Articles
Prog.Capacitação Institucional	41
Instituto Tecnológico Vale	35
Not Reported	21
Instituto Tecnológico Vale e Desenvolvimento Sustentável	20
Universidade Federal Rural da Amazônia	13
Universidade Federal do Oeste do Pará	10
Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro	9
Instituto Butantan	6
Universidade de São Paulo	6
Universidade do Estado do Rio de Janeiro	6

Fonte: elaborado pelas autoras.

Das palavras mais frequentes nos artigos, listadas em ordem decrescente de ocorrência, as 10 principais foram: “*area, presented, Carajás-Pará, distribution, detailed, reserved, rights, including, genera, taxonomic*”. A análise dessas palavras sugere que os documentos sobre a Flona Carajás abordam aspectos como as características gerais da floresta, taxonomia das espécies e a descrição de diferentes gêneros (Figura 4).

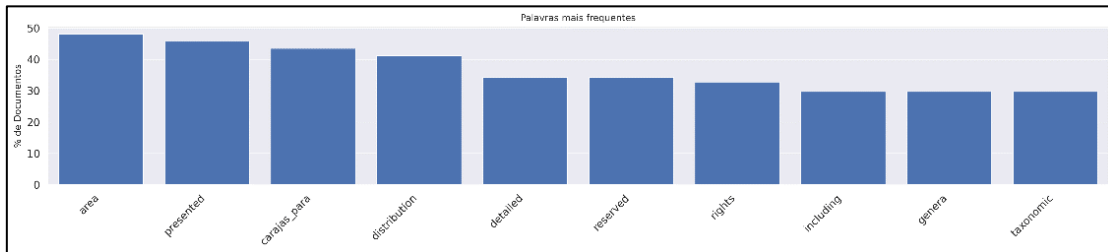


Figura 4 - As dez palavras mais frequentes nos artigos. Fonte: elaborado pelas autoras

No processo de agrupamento de palavras foram identificados 10 tópicos ou grupos. Esses tópicos representam os artigos que compartilham maior similaridade entre si. Nas palavras destacadas, encontramos a indicação da relevância de cada termo em relação a seu respectivo tópico (Figura 5).

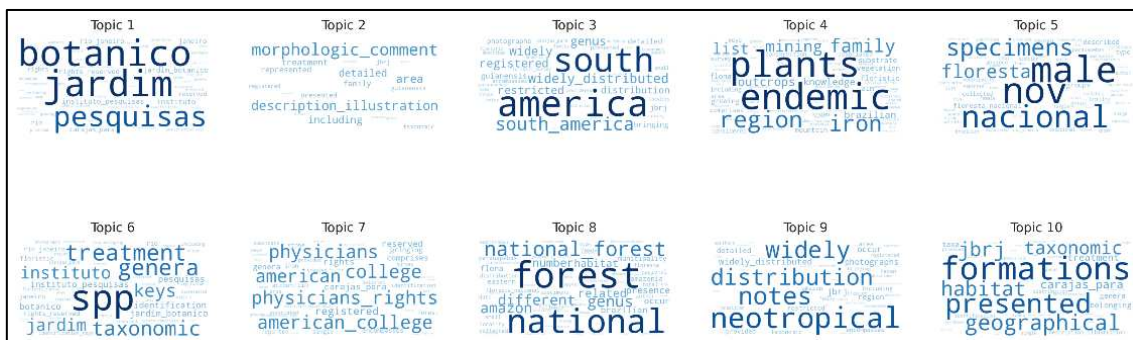


Figura 5: Agrupamentos de Palavras em Tópicos dos Artigos. Fonte: elaborado pelas autoras

No conjunto, os artigos que compõem os tópicos de palavras são estudos da área de biologia que se concentram na identificação e caracterização de espécies da flora e fauna da Floresta Nacional de Carajás no Pará. No tópico 1 a palavra “botânico” em destaque está associada a artigos dos autores como Oliveira-da-Silva et al. (2018) e Zappi (2018), que abordaram espécies presentes na FLONA. Já no tópico 2, a palavra “*morphologic_comment*” se relaciona com três artigos de Ilkiu-Borges et al. (2017), que tratam do estudo das espécies da flora da Flona de Carajás.

Ainda assim, alguns tópicos englobaram estudos que exploraram características menos específicas, como o Tópico 4, no qual se destacou a palavra *endemic*. Os artigos dos autores Skiryycz et. al (2014) examinaram os aspectos ambientais relacionados à vegetação da canga, um ecossistema associado às crostas ferruginosas de Minas Gerais-MG e da Flona de Carajás-PA. Eles abordaram a biodiversidade da canga e as estratégias para proteger esse ecossistema. Outro artigo do Tópico 4, de Fonsceca-da-Silva et al. (2020), documentou as espécies vegetais encontradas na canga da Serra Arqueada, concluindo que a área era apropriada para fins conservacionistas. No estudo de Giulietti (2019) os autores avaliaram as espécies endêmicas da canga, com foco na orientação dos planos de conservação da região.

O Tópico 8, com destaque para a palavra *forest*, nos artigos de Rolim et al. (2006), os autores investigaram o volume florestal na Floresta Nacional Tapirapé-Aquirí em Carajás. Por sua vez Rezende Cardoso et. al. (2015) identificaram uma nova espécie *Uleiorchis* na Flona de Carajás, enquanto Gumier-Costa et al. (2009) analisaram as ocorrências de atropelamentos de animais vertebrados em diferentes trechos de estrada dentro da FLONA de Carajás.

Os grupos de artigos referentes aos Tópicos 4 e 8 por apresentar distinções no conteúdo das publicações. Em termos gerais, os artigos abordando a Flona de Carajás exibiram características distintas. Eles se caracterizam como estudos voltados para a conservação, predominantemente focados nas áreas das ciências biológicas. Esses estudos exploraram minuciosamente a fauna e a flora que compõem o ecossistema da Floresta Nacional de Carajás.

As correspondências entre os tópicos podem ser observadas na Figura 6, que representa a similaridade em um espaço bidimensional, revelando as afinidades entre os artigos de cada tópico. Os tópicos exibem uma variedade de trabalhos que compartilham semelhanças entre si, embora alguns deles estejam mais intimamente relacionados, tais como Tópicos 1 e 6, os Tópicos 4,5 e 8, e finalmente, os Tópicos 2, 3,7,9 e 10.

Na busca por termos norteadores desta pesquisa, encontramos um número limitado de artigos que faziam menção às palavras-chave “*Caves, Mining, Ferruginous Systems, Geoethics, Geoparks*”. Os artigos de Mota et al. (2018) e da-Fonseca-da-Silva et al. (2020), que incluíram o termo “ferrugionosos”, discutiam aspectos relacionado à flora na Floresta de Carajás. O termo “*mining*” foi identificado em dois artigos: Skiryycz et al. (2014), onde os autores abordaram a vegetação característica do ecossistema de Cangas e a necessidade de proteção desse ambiente, além da importância do diálogo entre

as partes envolvidas nas atividades de mineração. Em Ferreira et al. (2016), os autores mencionaram o termo ao descrever os impactos das atividades de mineração na Floresta Nacional de Carajás, incluindo a formação de grandes depressões no solo, bem como o uso de uma plantas exóticas para controlar a erosão do solo resultante da mineração.

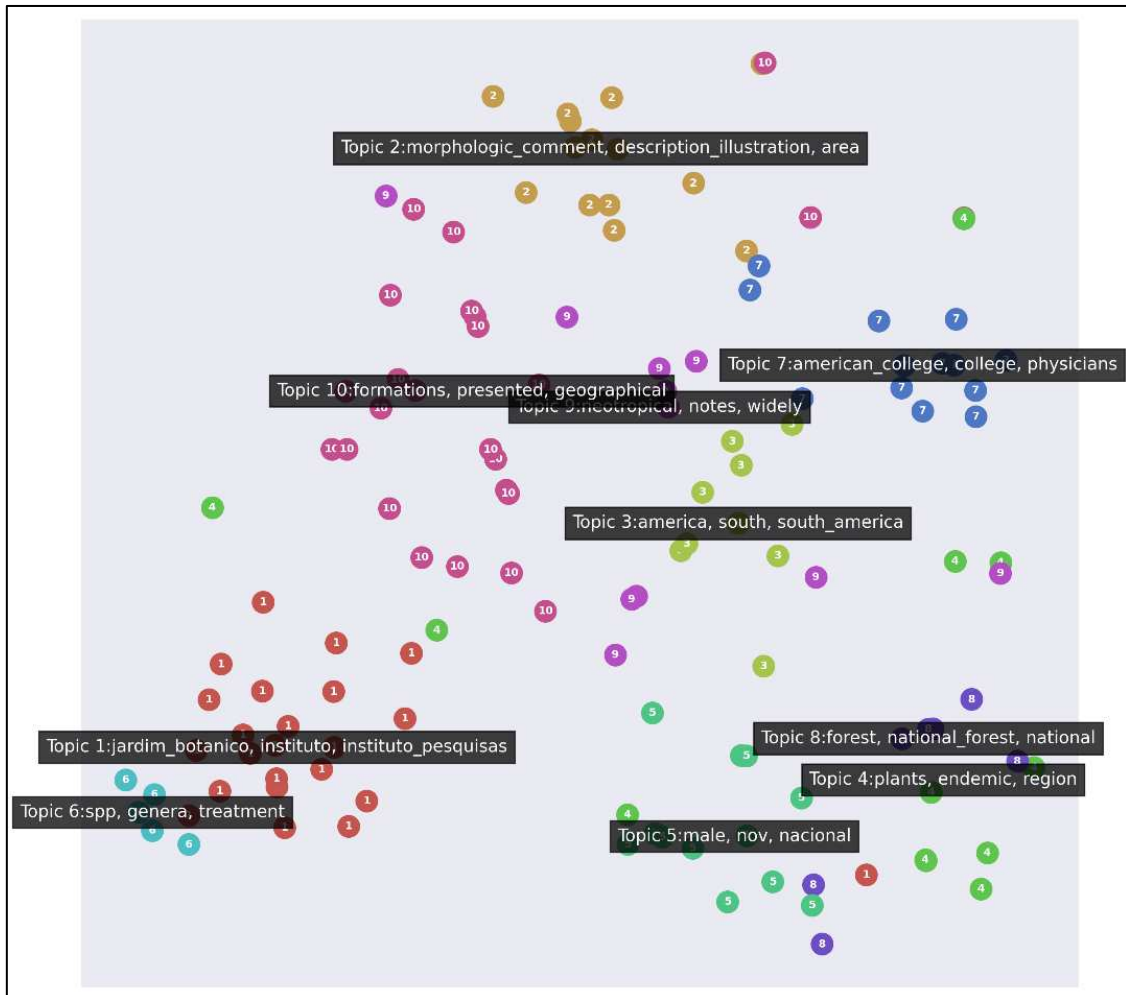


Figura 6: Representação bidimensional tópicos de palavras. Fonte: elaborado pelas autoras.

Por outro lado, o termo “*caves*”, foi mencionado em quatro artigos, incluindo o trabalho de Brescovit et al. (2021), onde os autores utilizaram a referência às cavernas para identificar o habitat natural de duas espécies de aranhas do gênero *Ochyrocera Simon*, encontradas nas cavernas da Flona de Carajás. Nesse contexto, ressaltaram a importância do uso sustentável dos recursos naturais como meio de preservar a biodiversidade presente nos geossistemas ferruginosos. Em outro estudo do mesmo autor, Brescovit et al.(2018), foram identificadas sete novas espécies de aranhas.

No artigo de Pelligrini et al. (2022), foram reportadas três novas espécies de besouros troglóbios do gênero *Coarazuphium*, encontrados em cavernas. O estudo

ressaltou a importância da manutenção da gestão por parte de órgãos ambientais como elemento fundamental na preservação das cavernas. Para concluir, o artigo de Oliveira Bernardi et al. (2019) identificou o primeiro caso de albinismo em uma espécie de morcego nas cavernas da Flona de Carajás.

Foram identificados artigos que citavam apenas as palavras: *mining*, *caves* e *Ferruginos*, enquanto os demais temas não foram encontrados nos títulos, resumos e palavras-chave dos documentos relacionados à Flona de Carajás. Em geral, os trabalhos que abordam esses termos específicos se dedicaram a explorar a fauna e da flora da região, ressaltando importância da preservação e conservação na Floresta Nacional de Carajás.

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Floresta Nacional de Carajás é um dos sistemas ferruginosos mais importantes do mundo, abrigando extensa biodiversidade de animais e plantas e uma rica geodiversidade. A área apresenta também as atividades econômicas relacionadas a mineração que podem provocar mudanças irreversíveis para biodiversidade e a paisagem.

Os resultados encontrados na análise bibliométrica da Floresta Nacional de Carajás apontam a extensa biodiversidade existente, as ameaças que as atividades econômicas representam a essa biodiversidade e a necessidade de práticas de conservação e proteção do meio ambiente. No entanto foi observado, que os artigos não utilizaram uma abordagem relacionada à geodiversidade e temas correlatos da Flona, o que indica a necessidade de ampliação na construção do conhecimento científico nessa perspectiva.

Do exposto acreditamos ser fundamental pelos órgãos gestores e de fomento uma agenda para o desenvolvimento de pesquisas focadas na geodiversidade da Flona Carajás. A geodiversidade é um tópico emergente com potencial inexplorado para garantir a funcionalidade dos ecossistemas e boas condições de vida para as pessoas em um momento de mudanças globais, em especial em ecossistemas sensíveis com os ecossistemas ferruginosos.

3. DINÂMICA DA PAISAGEM DE CARAJÁS: USO DE MÉTRICAS PARA CARACTERIZAR A ESTRUTURA E A CONFIGURAÇÃO DA PAISAGEM

Sônia Carvalho Ribeiro

Leonardo Christian Rocha

Paulo de Tarso Amorim Castro

3.1. INTRODUÇÃO

A variedade de usos do solo, incluindo agricultura, pastagem e outros, e suas interações em escala paisagística são influenciadas por uma série de fatores, sejam eles abióticos, bióticos ou culturais. Compreender as características dos padrões espaciais e das dinâmicas dos usos do solo em diversas paisagens é crucial para uma abordagem sistemática na descrição, avaliação e modelagem da paisagem, por meio da quantificação de seus componentes estruturais (Botequilha-Leitão e Ahern, 2002).

A estrutura da paisagem tem dois componentes básicos: composição e configuração. Composição é uma característica não espacial, ou seja, sem qualquer componente espacial explícita, por exemplo, independentemente da geometria do fragmento ou sua localização geográfica. Por outro lado, a configuração da paisagem, representa uma característica espacial que exprime o arranjo espacial explícito e a distribuição dos tipos de uso do solo numa determinada paisagem (Forman, 1995; Turner, 1989).

A análise de padrões baseia-se na premissa de que as características de composição e de configuração são observáveis, capazes de serem mapeadas de uma forma apropriada, descritíveis e quantificáveis, de tal modo, que elas possuem um conteúdo explicativo dos processos e fluxos que operam nessa paisagem (Botequilha-Leitão; Ahern, 2002; Forman, 1995; Turner, 1989;). Nessa perspectiva, uma alteração dos padrões de paisagem (composição e configuração) pode comprometer integridade funcional dessa estrutura e assim interferir nos mais diversos processos ecológicos e na provisão de serviços ecossistêmicos (Carvalho Ribeiro et al 2018).

As métricas da paisagem são ferramentas importantes na ecologia da paisagem para caracterizar e entender o padrão espacial da paisagem. As métricas são medidas quantitativas que ajudam a descrever e analisar a composição, configuração e dinâmica das paisagens naturais ou modificadas pelo homem. O uso dessas métricas é fundamental

para diversas aplicações, incluindo conservação da biodiversidade, gestão de recursos naturais, planejamento do uso da terra e avaliação de impactos ambientais (Mcgarigal et al 2002).

As métricas de composição medem as características de paisagem como proporção, riqueza, uniformidade ou dominância e diversidade. Alguns exemplos são o número e a proporção de categorias ou classes e métricas de diversidade, por exemplo, os índices de diversidade de Shannon e de Simpson. Já as características da paisagem que estão associadas com a geometria do fragmento ou a sua distribuição espacial medem a configuração da paisagem. Algumas destas medidas referem-se às características espaciais, tais como de tamanho e forma (proporção de perímetro-área) (Mcgarigal et al 2002).

3.2. MÉTODOS

A análise de padrões da paisagem, tem sido amplamente operacionalizada em mapas categóricos, utilizando ferramentas computacionais em sistemas de informação geográfica (SIG). Por serem, até agora, um dos métodos mais utilizados internacionalmente são as abordagens a que daremos mais destaque neste trabalho. No entanto, existem alternativas ao modelo categórico como meio de representação da paisagem, abordando nomeadamente a paisagem ao nível da teoria dos grafos ou os modelos de gradiente (Lausch, et al 2015).

Foi realizado trabalho de campo para compreender *in loco* a paisagem, os usos do solo e suas dinâmicas (Figura 1).



Figura 1: Trabalho de campo realizado na área de estudo: equipe nas instalações do ICMBio em Parauapebas e conhecendo diferentes contextos de paisagem na Flona Carajás.

Foram usadas métricas da paisagem (LAND) e das classes de uso do solo (CLASS). Os modelos rodaram no software frastat para rasters de 30 metros e com a vizinhança de 8 células. Calculamos métricas de área (<https://fragstats.org/index.php/fragstats-metrics/area-and-edge-metrics>), de forma (<https://fragstats.org/index.php/fragstats-metrics/shape-metrics>) para três horizontes (1985, 2010 e 2021) temporais distintos usando como base o MAPBIOMAS.

3.3. RESULTADOS

A figura 2 apresenta o mapa de cobertura e uso da terra da área de estudo para o ano de 2021.

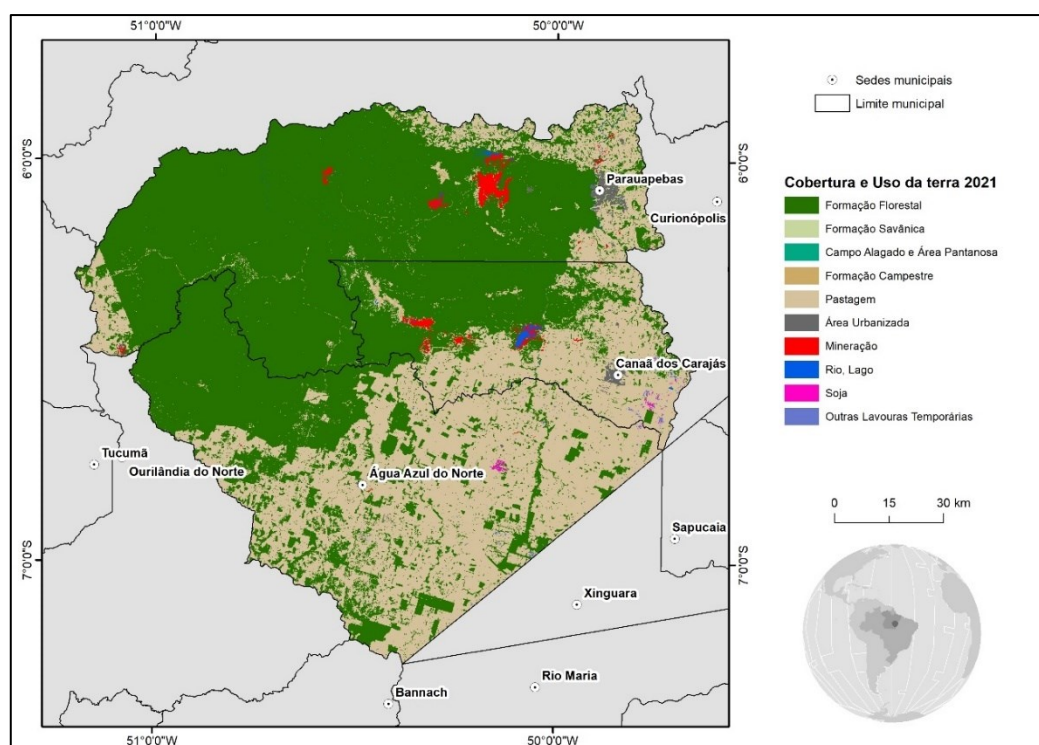


Figura 2: Área e estudo e seu uso e cobertura da terra para o ano de 2021.

Durante o período de análise, observou-se uma significativa redução na proporção da paisagem ocupada por formações florestais, diminuindo de 86% para 60% (Figura 3a). Paralelamente, constatou-se uma diminuição substancial na área média das manchas de floresta, passando de 500 hectares para 100 hectares entre os anos de 1985 e 2021 (Figura 3b). A análise combinada dessas métricas oferece uma compreensão precisa e abrangente do processo de fragmentação das áreas florestais dentro da paisagem em estudo. Além disso, observou-se uma tendência semelhante no que diz respeito à formação campestre,

que passou de ocupar 0.7% da área em 1985 para menos de 0.2% em 2021 (Figura 3c). A área média das manchas de formação campestre também diminuiu de 2,5 hectares para cerca de 1 hectare entre 1985 e 2021 (Figura 3d). As mesmas análises métricas foram aplicadas à atividade de mineração, conforme ilustrado nas Figuras 3e e 3f.

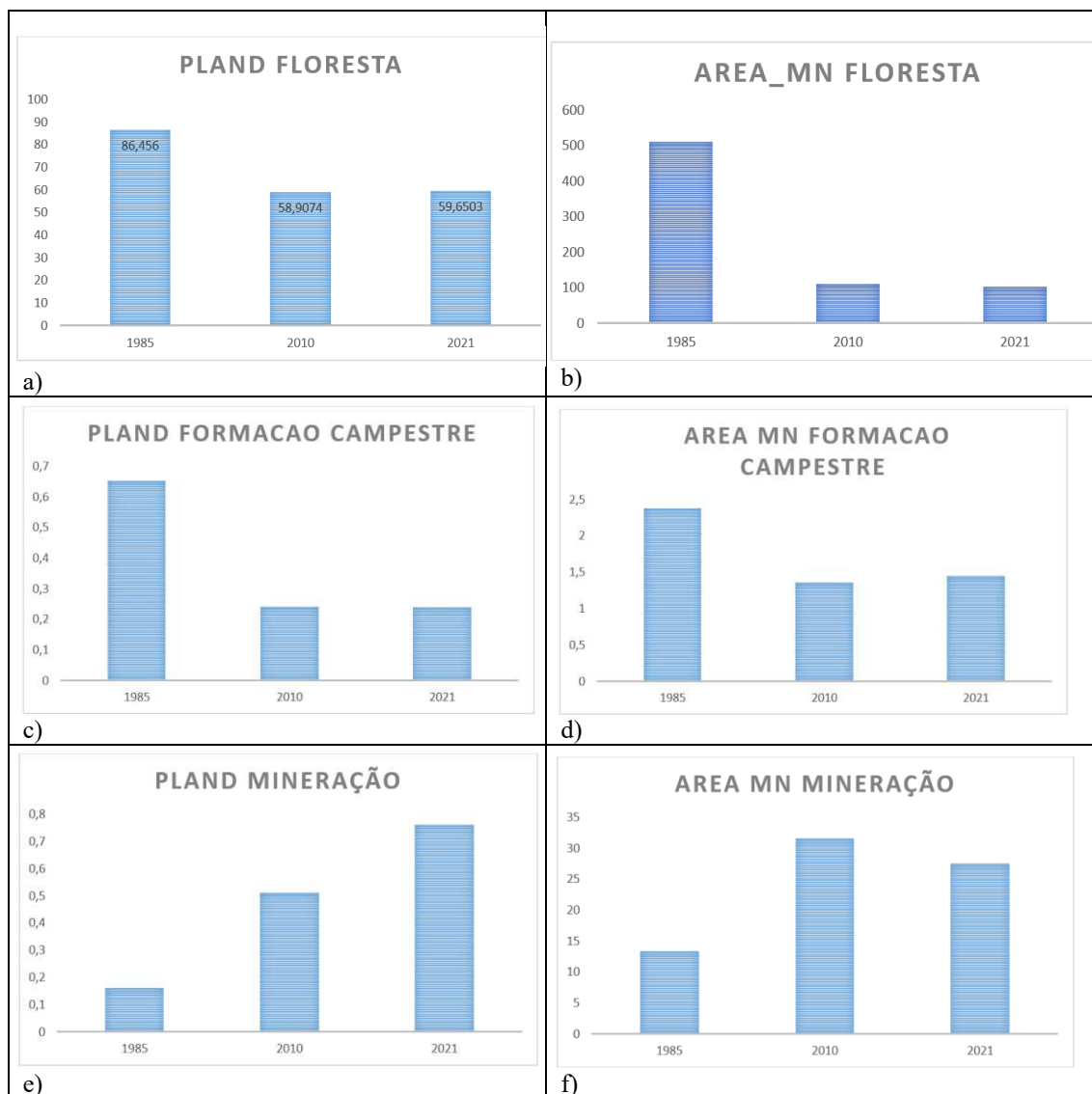


Figura 3: a) PLAND porcentagem que a classe de uso do solo Floresta ocupa na área da paisagem; b) Área média da Floresta; c) PLAND porcentagem que a classe de uso do solo formação campestre ocupa na área da paisagem; d) Área média da formação campestre; e) PLAND porcentagem que a classe de uso do solo mineração ocupa na área da paisagem; f) Área média da classe mineração.

3.4. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

As métricas da paisagem, aliadas ao trabalho de campo realizado, possibilitaram documentar de forma abrangente as dinâmicas do uso do solo na região de Carajás.

Os resultados obtidos evidenciam que tanto para a formação florestal quanto para a formação campestre, o processo inicial é caracterizado pela fragmentação *stricto sensu* dos grandes fragmentos contíguos, seguido predominantemente pelo fenômeno de transformação, conforme descrito por Forman (1995). Este processo é seguido pela perda de área dos fragmentos, também conhecida como "shrinkage", e posteriormente pelo desaparecimento desses fragmentos, denominado de "attrition". A perda de área é identificada através da métrica de área média dos fragmentos (AREA MN - mean patch size), a qual demonstra uma diminuição ao longo do tempo. Posteriormente, o fenômeno de desaparecimento dos fragmentos torna-se predominante, refletido na diminuição do número de manchas, e conseqüentemente, na redução da proporção de área ocupada pela classe ou Pland ("percentage of landscape"), indicando o progressivo desaparecimento dos fragmentos (Botequilha-Leitão, 2001).

Além disso, outras métricas são utilizadas, como as estatísticas de desvio, que mensuram a discrepância de um valor em relação à média para determinada estatística dos fragmentos, tais como o desvio padrão do tamanho dos fragmentos (PSSD - patch size standard deviation) ou o coeficiente de variação do vizinho mais próximo (ENNCV - nearest neighbour coefficient variation) (vide apêndice). Estas métricas são cruciais, uma vez que o cálculo da média pode mascarar fenômenos significativos, como uma distribuição desigual de valores e a presença de outliers na distribuição estatística, como fragmentos muito pequenos ou muito grandes.

Assim, é essencial analisar e discutir as estatísticas de dispersão dos valores em relação à média. Por exemplo, em uma paisagem onde a área média dos fragmentos seja de 5 hectares, é possível que todos os fragmentos apresentem valores aproximados a 5 hectares, resultando em um baixo desvio padrão. Contudo, outra paisagem com a mesma área média dos fragmentos pode apresentar uma variabilidade significativa, com fragmentos muito maiores ou menores que 5 hectares, o que resulta em um desvio padrão mais elevado. Estas duas paisagens são ecologicamente distintas, porém, se apenas a área média for considerada na análise, sem levar em conta a dispersão dos valores em torno dessa média, a diferença entre elas não será adequadamente avaliada. Portanto, é imprescindível analisar as estatísticas relacionadas à dispersão dos valores em torno do valor central (desvio padrão) ou outra medida que revele a distribuição dos valores em torno dos valores centrais (por exemplo, variância).

Por outro lado, as áreas de mineração e urbanas apresentaram uma tendência crescente ao longo do período analisado. A área média das áreas de mineração aumentou de cerca de 15 hectares em 1985 para aproximadamente 30 hectares em 2021.

3.5. DADOS SUPLEMENTARES

2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021	2021
Formação Florestal	Rio, Lago	Pastagem	Formação Campestre	Campo Alagado e Área Pantanosa	Mineração	Área Urbanizada	Formação Savânica	Outras Lavouras Temporárias	Soja
59,6503	0,2252	38,4188	0,2398	0,0527	0,7605	0,4558	0,008	0,1236	0,0654
49,9622	0,0526	33,7051	0,0051	0,001	0,3536	0,2522	0,0004	0,0064	0,0106
102,9846	5,6646	91,8893	1,4491	0,9525	27,4496	53,6308	0,9596	2,5669	4,9036
8606,115	41,1425	6838,202	4,1065	1,1253	298,0871	388,5389	1,2775	6,5782	18,805
1,5661	1,6808	1,688	1,4912	1,4421	1,7485	1,6986	1,4666	1,5452	1,6248
0,7896	0,9228	1,1319	0,556	0,3713	1,1008	0,7913	0,4656	0,4907	0,5234
172,9566	946,7265	177,4574	514,4331	807,3195	167,315	634,5133	1235,74	771,6311	769,3137
160,4959	1827,732	346,3659	877,1934	1606,685	200,3033	2680,188	2686,945	1714,19	3333,871

Ano	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985	1985
TYPE	Formação Florestal	Pastagem	Campo Alagado, área Pantanosa	Formação Campestre	Mineração	Área Urbanizada	Formação Savânica	Outras Lavouras Temporárias
PLAND	86,456	12,413	0,22	0,6518	0,16	0,0225	0,0077	0,0015
LPI	85,8289	1,7716	0,0063	0,0948	0,1322	0,0088	0,0005	0,0001
AREA MN	511,4756	19,0664	1,741	2,3766	32,7186	13,3106	1,4631	0,6816
AREA SD	27358,1122	345,7984	4,3188	26,6926	246,1929	33,5396	1,7127	0,3584
SHAPE_M N	1,4576	1,6465	1,5957	1,5318	1,7892	1,3907	1,5617	1,381
SHAPE SD	1,045	0,8652	0,5795	0,5624	1,1173	0,3041	0,4943	0,3084
ENN MN	122,353	193,801	499,7264	376,9616	648,3589	998,6168	1580,85	3853,521
ENN SD	97,8089	331,4316	881,0991	685,263	3281,538	2244,145	4171,072	8293,30

Ano	2010	2010	2010	2010	2010	2010	2010	2010
TYPE	Formação Florestal	Pastagem	Formação Campestre	Campo Alagado e área Pantanosa	Mineração	Área Urbanizada	Formação Savânica	Outras Lavouras Temporárias
PLAND	58,9074	39,7519	0,2421	0,0903	0,5115	0,2214	0,0053	0,0495
LPI	49,3073	34,9618	0,0052	0,0006	0,2512	0,086	0,0004	0,0057
AREA MN	110,6293	114,8577	1,3559	0,9877	31,6126	26,5935	1,4761	3,5918
AREA SD	8858,46	7797,562	3,1556	1,0917	273,2357	143,0102	1,5502	11,0374
SHAPE_M N	1,552	1,5064	1,4542	1,4072	1,7256	1,5624	1,6585	1,4506
SHAPE SD	0,7868	0,9963	0,4800	0,3629	1,0648	0,6049	0,5345	0,4247
ENN_MN	180,3199	206,1613	487,0607	648,8777	302,3102	903,7197	1830,34	1062,528
ENN_SD	170,8972	369,6046	989,0099	1141,627	1434,337	3897,875	5974,722	2809,252

4. IMPORTÂNCIA DA CONSERVAÇÃO DA GEODIVERSIDADE EM GEOSSISTEMA FERRUGINOSO A PARTIR DA ANÁLISE DA PAISAGEM NO ENTORNO DE “BAT CAVES”

Úrsula de Azevedo Ruchkys

Mauro Gomes

Darcy José dos Santos

Luiz Eduardo Panisset Travassos

4.1. INTRODUÇÃO

Geossistemas Ferruginosos são áreas geográficas compostas principalmente por tipos de rochas ricas em ferro. No Brasil, estão limitados a algumas regiões no estado de Minas Gerais, como o Quadrilátero Ferrífero, a borda leste da Serra do Espinhaço, o Vale do Rio Peixe Bravo, bem como o Pará, abrangendo a Serra de Carajás, a Bahia, no Vale do Rio São Francisco, e o Mato Grosso do Sul, no planalto do Urucum (Ruchkys, 2015). Esses geossistemas têm sido abordados na literatura sob vários ângulos, principalmente em relação a seu valor econômico. Nos últimos anos vêm sendo reconhecidos outros valores associados aos geossistemas ferruginosos, em diversas áreas do conhecimento que atestam seu valor patrimonial: biológico (Ferreira, 2005; Carmo, 2010), arqueológico (Baeta, 2011), geológico (Ruchkys, 2007; Ruchkys et al., 2009; Ruchkys et al., 2012), espeleológico (CECAV, 2011; Pereira, 2012; Calux, 2013), paleontológico (Carmo et al., 2011), hidrogeológico (Mourão, 2007), entre outros. Sua notável geodiversidade, heterogeneidade ambiental e a complexa evolução de uma das superfícies expostas mais antigas do planeta são amplamente reconhecidas por favorecer o desenvolvimento e a preservação da diversidade biológica (Trendall e Morris, 1983; Monteiro et al., 2014; Salgado, 2015). Incluídos nesses diversos valores está o potencial espeleológico representado por suas cavernas, que desempenham um papel essencial nesse rico mosaico de características naturais.

Uma caverna é uma cavidade natural subterrânea com dimensões suficientes para permitir a entrada de seres humanos. A categorização das cavernas ocorre de acordo com os tipos de rochas nas quais elas se originam e os processos de formação envolvidos. Portanto, podemos categorizá-las em diversas tipologias, incluindo cavernas de calcário, cavernas vulcânicas (especificamente cavernas de tubo de lava), cavernas de arenito, cavernas de gesso, cavernas de halita, cavernas de gelo, cavernas submarinas e outros

tipos (Woo, 2005; Palmer, 2007; Woo e Kim, 2018, Travassos, 2019).

No Brasil o conceito é estipulado no Decreto nº 99.556, datado de 1º de outubro de 1990, e posteriormente modificado pelo Decreto nº 6.640, emitido em 7 de novembro de 2008, especificamente em seu artigo 1º, parágrafo único: “todo e qualquer espaço subterrâneo acessível pelo ser humano, com ou sem abertura identificada, popularmente conhecido como caverna, gruta, lapa, toca, abismo, furna ou buraco, incluindo seu ambiente, conteúdo mineral e hídrico, a fauna e a flora ali encontrados e o corpo rochoso onde os mesmos se inserem, desde que tenham sido formados por processos naturais, independentemente de suas dimensões ou tipo de rocha encaixante”. De forma mais abrangente, esta definição está contida no conceito de patrimônio espeleológico, que engloba não apenas o espaço em si, mas também o ambiente circundante, assim descritos no Artigo 2º, incisos III e IV da resolução CONAMA 237/2004: “o conjunto de elementos bióticos e abióticos, socioeconômicos e histórico culturais, subterrâneos ou superficiais, representados pelas cavernas ou a estas associadas” o qual pressupõe uma área de influência que garanta as condições necessárias “à manutenção do equilíbrio ecológico e da integridade física do ambiente cavernícola”. Nesse contexto, de acordo com Menin e Bacci (2023), as cavernas se configuram como um sistema complexo, estreitamente entrelaçado, em que a geodiversidade e a biodiversidade estão intimamente interligadas.

Devido à gradativa redução de luminosidade, que divide a caverna em distintas zonas, incluindo a entrada, a região de penumbra e a área totalmente desprovida de luz, conhecida como a zona afótica, ecossistemas únicos se desenvolvem, criando um ambiente propício para a evolução de uma fauna altamente adaptada a estas condições de iluminação. Nesse cenário, as características físicas e morfológicas da própria caverna, combinadas com os recursos tróficos disponíveis, como material vegetal e guano, desempenham um papel fundamental na determinação da composição da fauna que habita esse ambiente (Furey e Racey, 2015; Travassos, 2019). Assim, cavernas abrigam uma variedade de espécies adaptadas a ambientes subterrâneos, algumas das mais conhecidas incluem os morcegos.

Embora o número de morcegos em uma caverna possa variar drasticamente, grandes concentrações desses animais são encontradas em cavernas, chegando a centenas de milhares de indivíduos em uma mesma cavidade (Betke et al., 2008; Medellín et al., 2008). Aquelas que abrigam essas grandes populações são conhecidos como *bat caves* e têm sido documentados em algumas regiões do mundo (Brunet e Medellín, 2001; Ladle et al., 2012; Furey e Racey, 2015; Medellín et al., 2017; Ito et al., 2022).

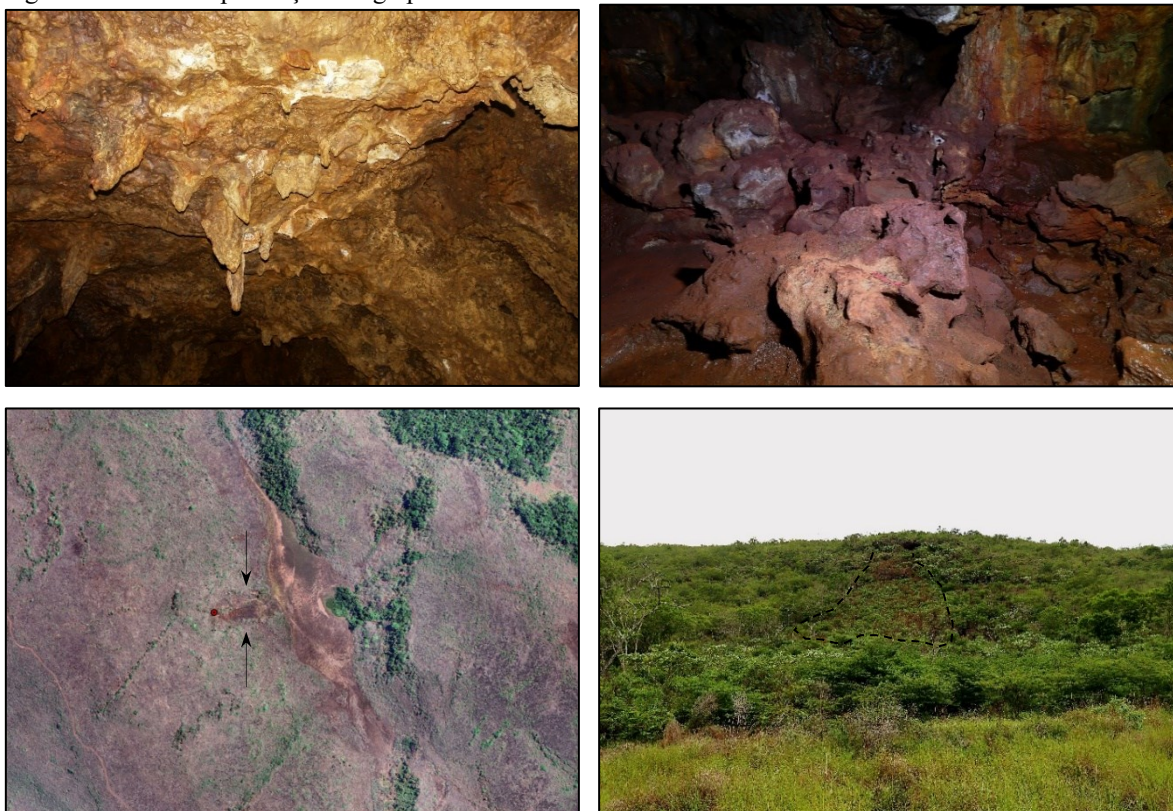
As cavernas, como elementos da geodiversidade, desempenham importantes serviços ecossistêmicos para a sociedade. É necessário um aprofundamento nos estudos sobre esses serviços, com abordagem clara e simples, conforme salientado por Urban et al., (2022). Para esses autores, o contexto da geodiversidade deve ser dividido em exemplos claros, como cavernas, nascentes, paisagens e outros elementos, mesmo que em uma primeira análise não se encontre valor científico imediato. No caso das cavernas, Menin e Bacci, 2023 destacam os serviços de suporte (solos, águas, rochas de superfícies e internas), provisão (nutrientes, alimentação, materiais minerais e recursos energéticos), cultural (valores científicos, educativos, culturais, históricos e turísticos). Algumas cavernas na região Neotropical abrigam excepcionais populações de morcegos que fazem um uso amplo da paisagem e desempenham um papel vital nas interações ecológicas. Diante de impactos antropogênicos significativos e da sub-representação de cavernas nos planos de conservação globais, a comprovada conectividade genética das *bat caves* enfatiza sua prioridade de conservação, não apenas no Brasil, mas também em outras regiões (Ito et al., 2002). Estes vertebrados cavernícolas fornecem vantagens ecológicas diretamente benéficas aos seres humanos, sendo os frugívoros e nectarívoros responsáveis pela polinização e dispersão de sementes de plantas economicamente importantes, como banana, manga, goiaba, caju, tâmara, figo, agave, madeiras nobres e plantas medicinais. Já os morcegos insetívoros devoram milhares de insetos todas as noites (Pennisi et al, 2004). Com aproximadamente 1.450 espécies e uma ampla distribuição global, a maioria dos morcegos, representando cerca de três quartos das espécies, são insetívoros. Eles podem consumir quantidades significativas em uma única noite, desempenhando um papel fundamental de contribuir eficazmente para o controle das populações de insetos. Globalmente, os valores associados ao serviço de supressão de pragas realizados pelos morcegos variam consideravelmente, indo de US\$0,01 a US\$767,75 por hectare por ano. Essa variabilidade ressalta a importância da contribuição dos morcegos na redução de pragas agrícolas e seus benefícios econômicos para a agricultura e a conservação da biodiversidade (Freire, 2023). Voigt e al (2016) destaca que a proteção dos locais de abrigo é um componente essencial de qualquer estratégia de conservação de morcegos. Para (Woo e Kim, 2018) algumas cavernas devem ser consideradas como locais de geoconservação significativos a serem protegidos para as gerações futuras.

Além do papel dos morcegos em controlar populações de insetos e como agentes polinizadores e dispersores de sementes, um recente estudo desenvolvido no geossistema

ferruginoso de Carajás identificou uma característica muito peculiar em relação às *bat caves*. Esta pesquisa forneceu a primeira evidência da atuação de morcegos como bio engenheiros promovendo a alteração da geomorfologia de cavernas de minério de ferro. A presença dos quirópteros a longo prazo (> 23.000 anos) em uma mesma caverna e as interações biológicas e químicas que ocorrem naquele ambiente em função dos grandes depósitos de guano deram origem a processos ecológicos, evolutivos e geomorfológicos ainda não totalmente compreendidos pela ciência (Piló et al., 2023).

O guano acumulado nas bat-caves é um dos principais responsáveis por promover alterações no interior das cavernas, como a dissolução da rocha ferrífera originando feições similares àquelas observadas em cavernas calcárias (Figura 1a e 1b). Além disso, foram observadas também alterações na parte externa de uma das bat-caves. A composição vegetal do entorno da caverna S11A_0036 parece sofrer influência da água altamente acidificada que sai da caverna nos períodos de chuva (Figura 1c e 1d).

Figura 1: Efeitos da presença a longo prazo de



morcegos em cavernas do geossistema ferruginoso de Carajás. a) Estalactites na caverna S11D_0083, b) Dissolução da rocha ferrífera na caverna N4WS_0067, c) Imagem de satélite evidenciando alteração na composição da vegetação na entrada da caverna S11A_0036 e d) Aspectos da vegetação no entorno da entrada da caverna S11A_0036. Imagem de satélite: Google Earth. Fotos: Autores

Até o final do século XX, as cavernas em rochas ferríferas eram largamente negligenciadas e pouco investigadas no Brasil. A maioria dos estudos espeleológicos se concentrava nas cavernas calcárias de maiores dimensões e com maior profusão de

formações ornamentais. Contudo, a virada do século testemunhou uma notável transformação desse panorama, impulsionada pela crescente demanda chinesa por minério de ferro, resultando em mudanças significativas. Novas regulamentações e leis destinadas a preservar as cavernas brasileiras proporcionaram um aumento expressivo no interesse pelos geossistemas ferruginosos na seara dos estudos espeleológicos. Esses esforços geraram dados de relevância, revelando que os ambientes em rochas ferríferas possuem um potencial significativo, merecendo atenção e medidas efetivas de conservação (Piló et al. 2015).

Compreender a dinâmica da paisagem nesses geossistemas é essencial para orientar o planejamento e a tomada de decisões, especialmente no que diz respeito às cavernas e à criação de políticas públicas para a proteção/conservação da geodiversidade e da biodiversidade, bem como a manutenção de áreas protegidas (Gomes et al., 2019). A Ecologia da Paisagem, originada por volta de 1930, com as observações do geógrafo Carl Troll, representa uma abordagem holística que analisa os padrões da paisagem, as interações entre seus elementos e as mudanças ao longo do tempo (Odum e Barrette, 2008; Costa, 2020)

Atualmente, a pesquisa em Ecologia da Paisagem abrange tanto paisagens naturais quanto aquelas modificadas pela atividade humana. A abordagem fundamental dessa área é estabelecer conexões entre os sistemas naturais e humanos, incorporando a dinâmica das atividades antrópicas que constantemente moldam a paisagem (Porto e Menegat, 2004; Costa, 2020).

A heterogeneidade espacial de uma paisagem é fruto de processos ecológicos que funcionam em um sistema de causa e efeito e produzem diferentes padrões e estruturas. A avaliação analítica da estrutura da paisagem é realizada por meio de um conjunto de métricas relacionadas ao seu tamanho, forma, ao seu tipo e distribuição quantitativa, bem como ao seu arranjo no espaço (Lang e Blanschke, 2009).

Nesse contexto o artigo tem como objetivo analisar a evolução da composição da paisagem no entorno de *bat caves* no Geossistema Ferruginoso Carajás (Pará, Brasil), considerando os anos de 1985 e 2021. A composição da paisagem envolve a identificação e caracterização dos elementos em uma área geográfica, como florestas, campos, áreas urbanas e cursos d'água. Isso é crucial para compreender a estrutura e funcionamento dos geossistemas, avaliar impactos ambientais e orientar o planejamento do uso da terra, além de auxiliar a promover a conservação da geodiversidade e da biodiversidade.

4.2. MÉTODOS

4.2.1. Área de estudo

A área de pesquisa compreende o Geossistema Ferruginoso Carajás, situado no sudeste do estado do Pará, na região amazônica do Brasil, que inclui a Floresta Nacional (FLONA) de Carajás e o Parque Nacional (PARNA) dos Campos Ferruginosos (Figura 2). Essas unidades de conservação estão sob a gestão do ICMBIO (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade). A legislação que as protege tem como finalidade harmonizar a conservação ambiental e o uso sustentável dos recursos naturais em relação à FLONA, e a proteção integral no caso do PARNA.

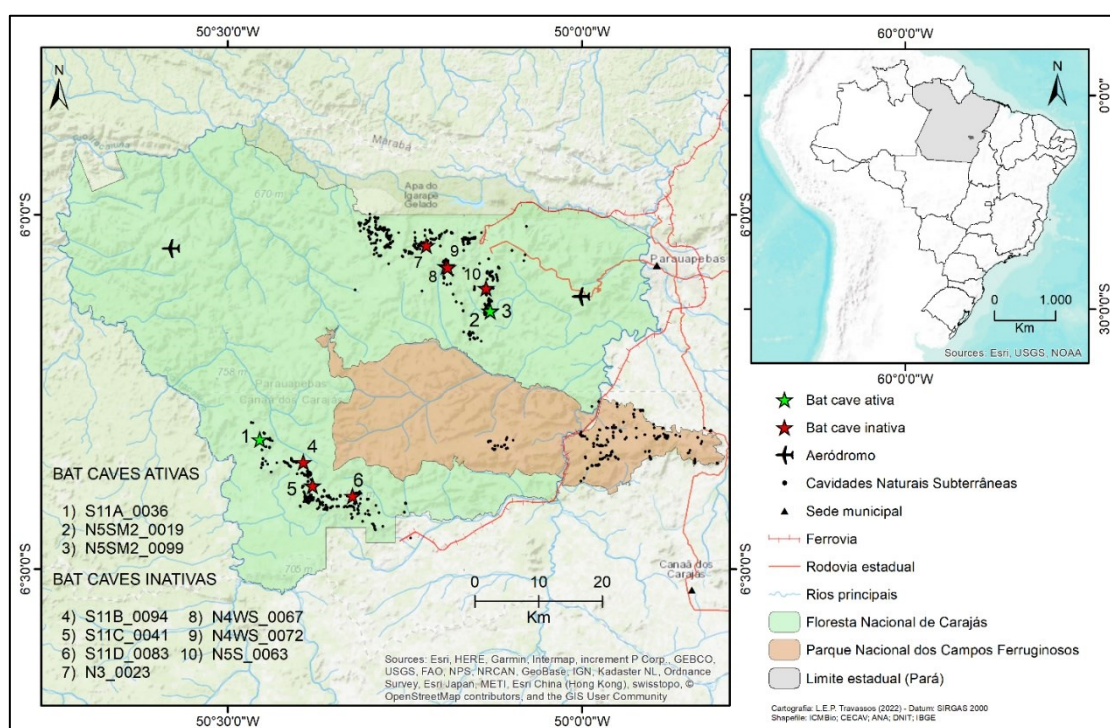


Figura 2: Mapa de localização da área de estudo.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Do ponto de vista geológico, esse geossistema está situado na porção sudeste do Cráton Amazônico, destaca-se a sequência metavulcanossedimentar neoarqueana do Grupo Grão Pará, que abriga importantes formações ferríferas bandadas. Formações ferríferas bandadas, representadas por jaspilitos, compõem a denominada Formação Carajás, sobreposta e sotoposta por rochas máficas da Formação Parauapebas (Macambira, 2003). O jaspilito é uma variedade de chert que contém finas inclusões de hematita, conferindo-lhe uma coloração vermelha. Em Carajás, essa formação abriga

grandes corpos de minério de alto teor, com teores de ferro superiores a 65%, compostos por magnetita/martita e hematita (Lobato et al., 2005; Rosière, 2015). No jaspilito mineralizado está registrado a presença de muitas (Dutra, 2013). A pressão antropogênica na região está associada principalmente a exploração mineral, em especial das Formações Ferríferas Bandadas (BIFs) da Formação Carajás.

Em relação ao patrimônio espeleológico, as duas unidades de conservação abrigam mais de 1.600 cavernas documentadas (CECAV, 2023). Dentre essas, 10 (Figura 2) foram classificadas como *bat caves* (Piló et al., 2023), sendo que 3 destas ainda se encontram em estado de atividade (N5SM2_0019, N5SM2_0099 e S11A_0036), servindo como abrigo para milhares de morcegos.

4.2.2. Composição da paisagem

A análise da composição da paisagem está relacionada à quantificação da área ocupada por cada unidade da paisagem, o que representa o “conteúdo de informação” do cenário em estudo (Lang e Blanschke, 2009). Para definir a paisagem no entorno das *bat caves*, foram utilizados os mapas de uso e cobertura da terra do Brasil (Projeto MapBiomas, 2023) dos anos de 1985 e 2021. Esses mapas representam, respectivamente, os dados mais antigos e mais recentes disponíveis para a área de pesquisa. Neste estudo, utilizamos os mapas de uso e cobertura da terra que possuem uma resolução espacial de 30 metros. A análise se baseou nos mapas da Coleção 8. Foram identificadas e priorizadas as seguintes classes de uso e cobertura da terra: formação florestal, formação campestre, pastagem, área urbanizada, mineração, rio e lago. Essa priorização considerou a relevância de cada classe para a ecologia dos morcegos, especialmente no forrageamento.

A análise da composição da paisagem foi realizada considerando a região de entorno das cavidades onde foi identificada atividade de grandes colônias de morcegos (Piló et al., 2023) e avaliando a potencial perda de área de forrageamento devido à remoção da cobertura vegetal. A localização das cavidades utilizadas neste estudo foi obtida na base de dados do ano 2022 (CECAV, 2023). Para aprimorar a análise, realizou-se uma segmentação da paisagem por meio da criação de *buffers*, com atenção especial dada às áreas circundantes das *bat caves*. Como não foram encontrados estudos específicos que determinassem a área de vida desses animais na região desse geossistema, foram arbitrados três diferentes *buffers* (3,5; 10 e 15 km) no entorno das bat-cave .

Considerando os mapas de uso e cobertura da terra e utilizando ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), foram extraídas as informações relacionadas a estrutura da paisagem para a área de entorno dessas cavernas. Este processo foi realizado considerando cenários distintos, tanto no que se refere à dimensão temporal quanto à espacial. Por fim foi feita a análise da mudança na composição da paisagem considerando a comparação dos mapas de 1985 e 2021 para identificar as mudanças nas classes de uso e cobertura da terra nas proximidades das *bat caves*.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao comparar os mapas de uso e cobertura da terra dos anos de 1985 (Figura 3a) e 2021 (Figura 3b), verifica-se a grande evolução das ações antrópicas, tanto fora das unidades de conservação, onde áreas urbanas, pecuária e grandes barragens de rejeito se tornaram proeminentes, como no interior da FLONA, onde atividades de mineração ganharam destaque. Essa evolução do uso e ocupação destaca claramente a grande pressão que essas unidades de conservação têm enfrentado nos últimos anos. Essa situação também atinge a terra indígena vizinha à área de estudo, localizada na fronteira oeste da Floresta Nacional de Carajás onde se observam clareiras abertas na área de floresta.

A Tabela 1 e a Figura 4 apresentam a transição na composição da paisagem do ano de 1985 para o ano de 2021 em termos absolutos, com ênfase na área de entorno das *bat caves*. Esses dados evidenciam que a mineração representa a principal ameaça à integridade dessas áreas. No setor sul, nas proximidades imediatas (3,5 km) e médias (10 km) das cavernas, não foram registradas atividades minerárias no período analisado, o que é um sinal positivo para a conservação dessas áreas sensíveis.

No entanto, ao ampliarmos a área de entorno para um raio de 15 km, observamos um aumento alarmante de 86,4% na ocupação de terrenos pela mineração desde 1985. Isso destaca a expansão das atividades minerárias que agora ameaçam não apenas a integridade direta das cavidades, mas também uma área mais ampla. As *bat caves* desempenham um papel crucial na conservação das populações de morcegos e na manutenção do equilíbrio dos ecossistemas locais. Portanto, o impacto da mineração a uma distância de 15 km é uma preocupação significativa para a manutenção dos morcegos nesta região, bem como a preservação de seus habitats.

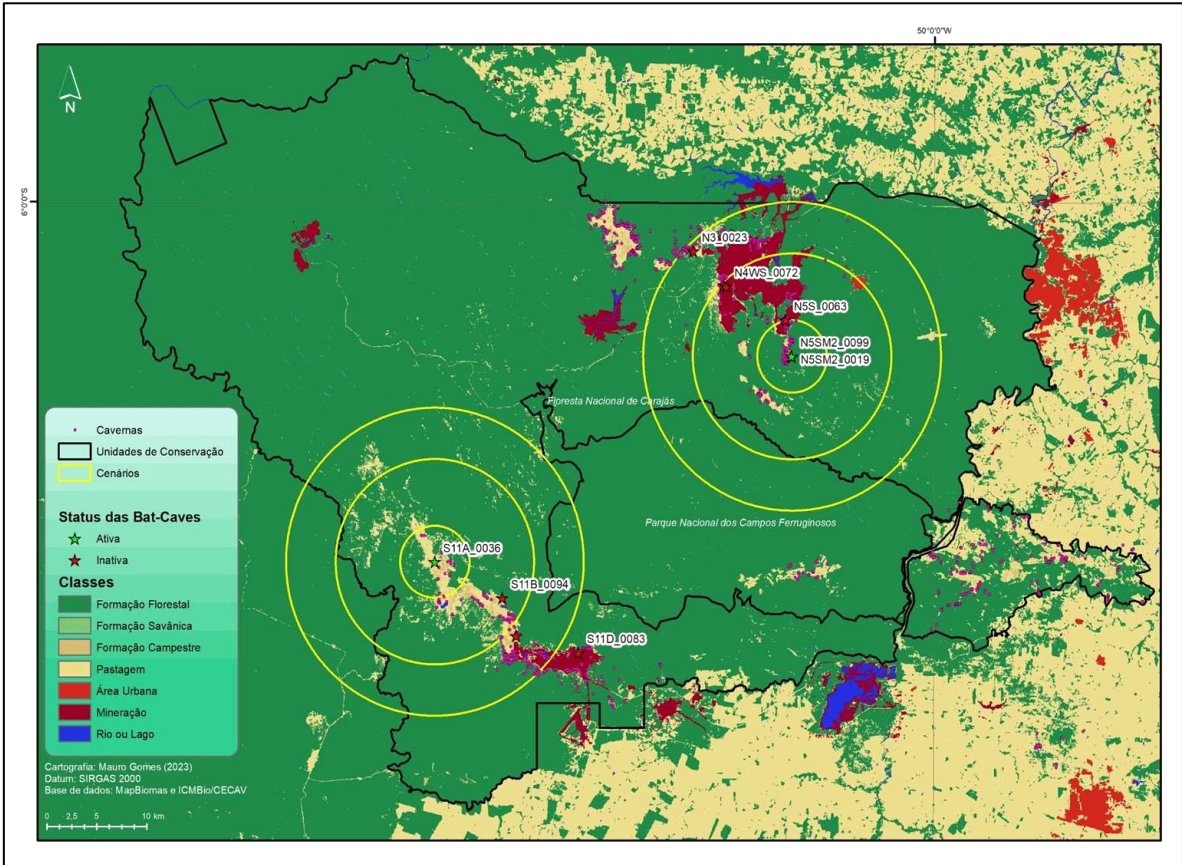


Figura 3 (a e b): mapas de uso e cobertura da terra dos anos de 1985 e 2021.

Em 1985 a mineração já estava bem estabelecida no setor norte, constituindo-se na principal jazida de exploração mineral da Serra dos Carajás e abrangendo a área circundante das cavernas N5SM2_0019, N5SM2_0099. Entretanto, durante o período deste estudo, observamos um aumento significativo na área ocupada pela mineração, nos três cenários analisados.

No cenário de 3,5 km, registramos um acréscimo de 62,2% na área destinada à mineração em comparação com 1985. Isso indica um aumento substancial na pressão exercida sobre as áreas próximas às cavernas durante o período de estudo. No cenário de 10 km, o aumento na área de mineração foi de 47,8%, destacando uma expansão significativa das atividades minerárias em uma área mais ampla, mas ainda em proximidade com as cavernas. Por fim, no cenário de 15 km, observamos um aumento de 55,5% na área de mineração. Isso indica que a expansão das atividades minerárias afetou não apenas as áreas imediatas, mas também áreas mais distantes das cavernas, ampliando o impacto sobre o ambiente circundante.

Esses resultados sugerem que, ao longo do período estudado, a mineração representou uma ameaça crescente para as cavernas e os ecossistemas adjacentes, exigindo uma atenção especial para a conservação dessas áreas vulneráveis.

	<i>Classes</i>	<i>3,5 km Sul</i>	<i>3,5km Norte</i>	<i>10 km Sul</i>	<i>10km Norte</i>	<i>15 km Sul</i>	<i>15km Norte</i>
1985	Formação Florestal	2.957,59	3.724,66	29.078,45	28.506,14	67.442,92	66.468,73
	Formação Campestre	894,60	122,06	2.288,80	1.119,94	3.262,96	1.775,82
	Área Urbanizada	-	-	-	111,17	-	358,33
	Mineração	-	49,02	-	1.771,97	59,13	2.432,60
	Água	5,88	-	129,14	96,83	238,28	34,60
2021	Formação Florestal	2.493,60	3.572,77	27.029,68	26.873,03	64.553,81	63.167,34
	Formação Campestre	1.358,17	193,18	4.317,38	1.182,16	5.741,37	2.008,30
	Área Urbanizada	-	-	-	107,96	115,00	365,12
	Mineração	-	129,62	-	3.397,00	435,10	5.466,73
	Água	5,15	-	149,08	45,12	157,73	59,80

Tabela 1: transição na composição da paisagem do ano de 1985 para o ano de 2021

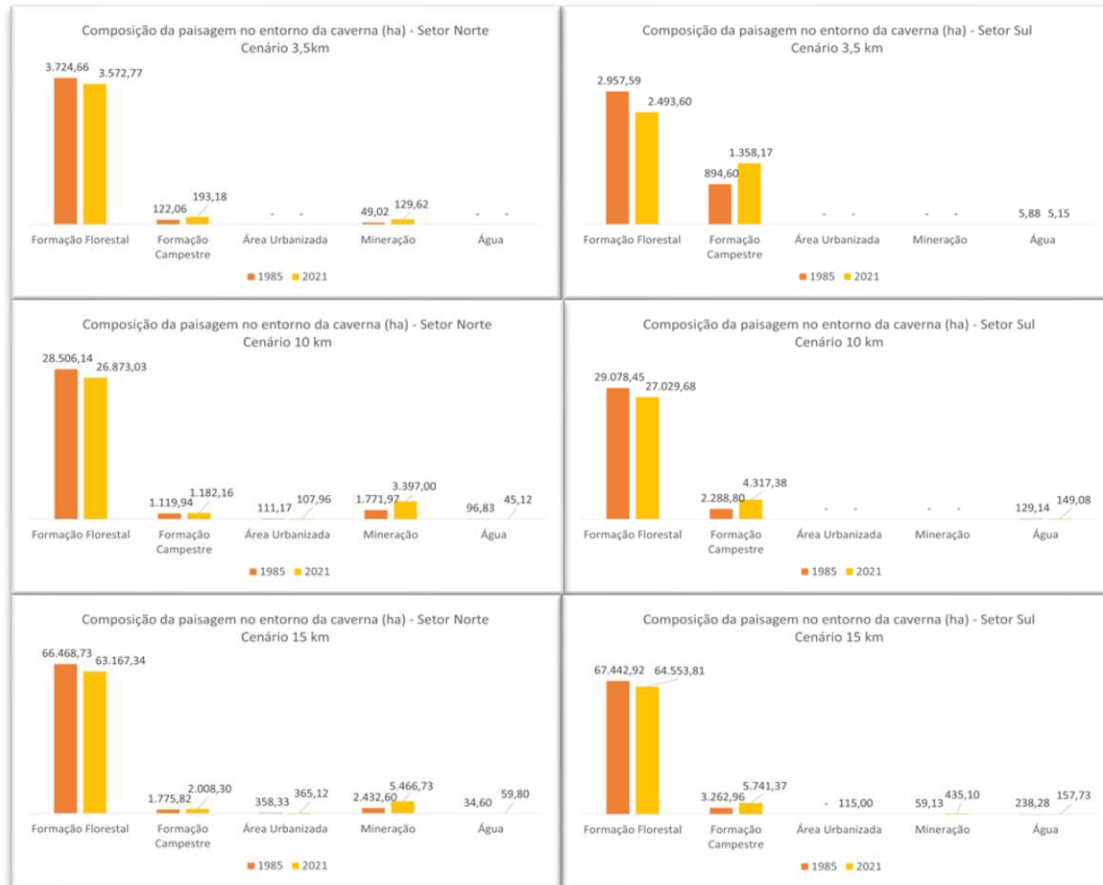


Figura 4: Gráficos de transição composição da paisagem do ano de 1985 para o ano de 2021

No entanto, ao ampliarmos a área de entorno para um raio de 15 km, observamos um aumento alarmante de 86,4% na ocupação de terrenos pela mineração desde 1985. Isso destaca a expansão das atividades minerárias que agora ameaçam não apenas a integridade direta das cavidades, mas também uma área mais ampla. As *bat caves* desempenham um papel crucial na conservação das populações de morcegos e na manutenção do equilíbrio dos ecossistemas locais. Portanto, o impacto da mineração a uma distância de 15 km é uma preocupação significativa para a manutenção da população de morcegos nesta região, bem como a preservação de seus habitats.

Em 1985 a mineração já estava bem estabelecida no setor norte, constituindo-se na principal jazida de exploração mineral da Serra dos Carajás e abrangendo a área circundante das cavernas N5SM2_0019, N5SM2_0099 (Figura 5a). Entretanto, durante o período deste estudo, observamos um aumento significativo na área ocupada pela mineração nos três cenários analisados, embora o entorno imediato destas cavernas ainda permaneça com a cobertura vegetal preservada (Figura 4b).

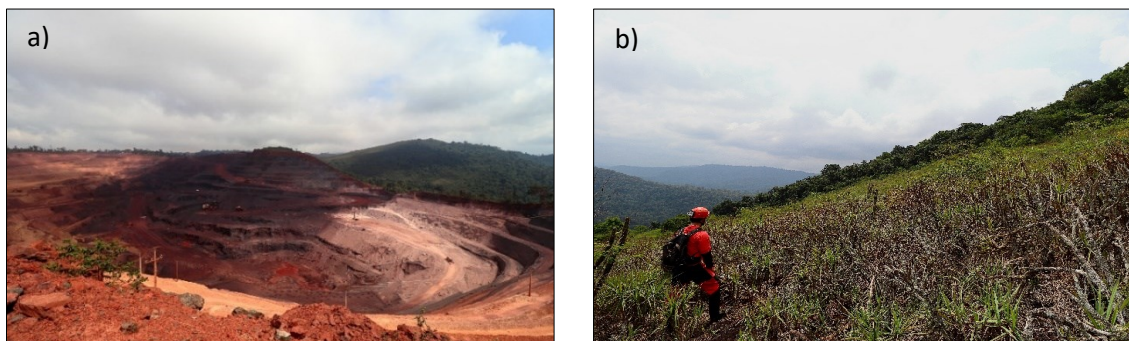


Figura 5: a) Cava de exploração mineral (N5) localizada a aproximadamente 2,2 km da entrada das cavidades e b) Aspectos da vegetação encontrada a aproximadamente 60 metros da entrada das cavernas N5SM2_0019, N5SM2_0099.

No cenário de 3,5 km, registramos um acréscimo de 62,2% na área destinada à mineração em comparação com 1985. Isso indica um aumento substancial na pressão exercida sobre as áreas próximas às cavernas durante o período de estudo. No cenário de 10 km, o aumento na área de mineração foi de 47,8%, destacando uma expansão significativa das atividades minerárias em uma área mais ampla, mas ainda em proximidade com as cavernas. Por fim, no cenário de 15 km, observamos um aumento de 55,5% na área de mineração. Isso indica que a expansão das atividades minerárias afetou não apenas as áreas imediatas, mas também áreas mais distantes das cavernas, ampliando o impacto sobre o ambiente circundante.

Esses resultados sugerem que, ao longo do período estudado, a mineração representou uma ameaça crescente para as cavernas e os ecossistemas adjacentes, exigindo uma atenção especial para a conservação dessas áreas vulneráveis.

Os fatores determinantes para a definição das áreas que serão mineradas no futuro são numerosos e abrangem diversas dimensões, como aspectos econômicos, políticos, ambientais e outros. No entanto, a fim de aprofundar a discussão sobre a evolução da paisagem no entorno das *bat caves* do Geossistema Ferruginoso de Carajás é apresentado a seguir um mapa (Figura 6) que exhibe os polígonos minerários da Agência Nacional de Mineração, refletindo a situação atualizada dos processos em tramitação nesse órgão regulador.

Essa representação cartográfica fornece uma visão concreta e atualizada das áreas designadas para atividades minerárias na região em estudo. Isso permite uma análise mais precisa das áreas que já estão licenciadas e das que estão sob avaliação para potenciais operações de mineração. A compreensão dessas informações é fundamental para avaliar o potencial impacto sobre as *bat caves* e seu entorno, bem como para promover discussões

embasadas cientificamente sobre a conservação e a gestão responsável dessas áreas sensíveis.

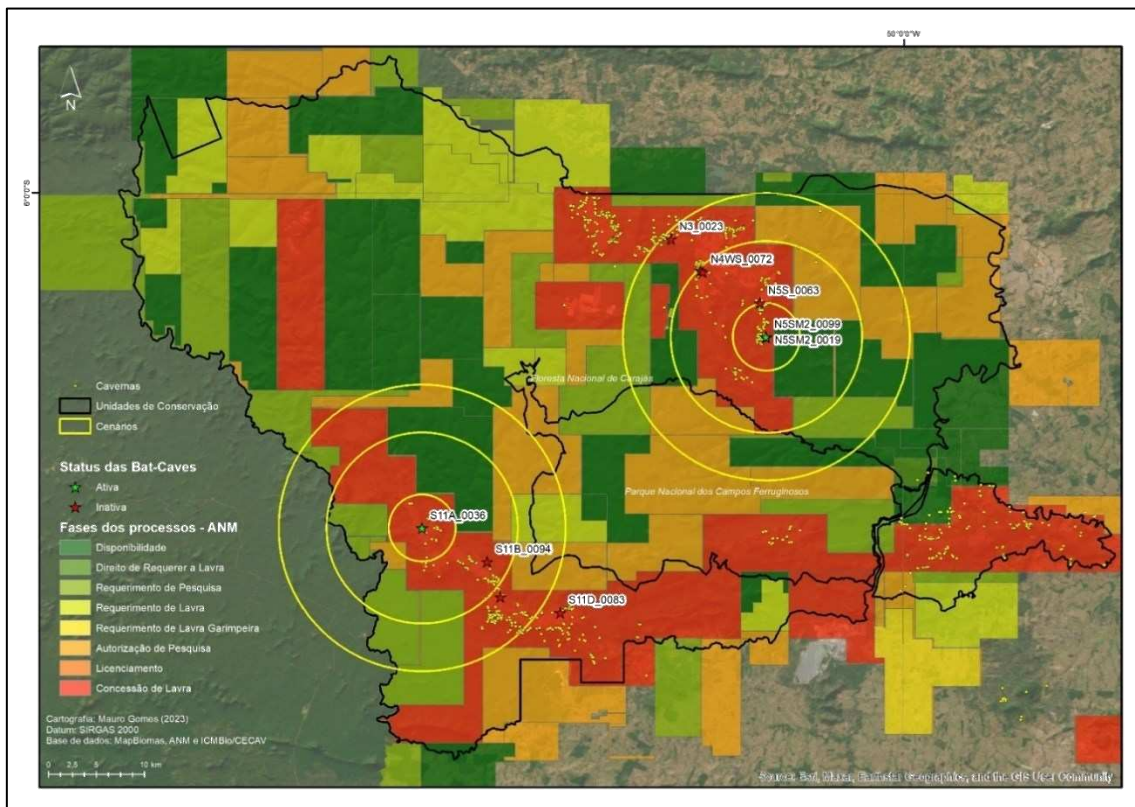


Figura 6: Polígonos minerários da Agência Nacional de Mineração e localização das cavernas na UCs mencionadas.

Neste mapa é possível verificar que todas as *bat caves*, tanto as ativas quanto as inativas, estão localizadas em áreas onde já houve a concessão de lavra à empresa mineradora. Durante o processo de licenciamento ambiental, essas cavernas foram classificadas como de relevância máxima, devido às características únicas de sua gênese. Até o ano de 2022, cavidades de relevância máxima não poderiam sofrer qualquer tipo de impacto negativo irreversível. No entanto, com a promulgação do decreto 10.935 de 12/01/22, já é admitida a possibilidade de impacto irreversível em cavidades com este tipo de classificação de relevância. Essa mudança na legislação ressalta a importância de monitorar de perto o desenvolvimento das atividades minerárias na região e de buscar soluções que equilibrem o desenvolvimento econômico com a preservação dessas cavernas únicas e dos ecossistemas que dependem delas. A análise dos dados cartográficos se torna ainda mais crucial à luz dessas mudanças regulatórias recentes.

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo da evolução das áreas circundantes às *bat caves* no Geossistema Ferruginoso de Carajás, durante os anos de 1985 e 2022, por meio da análise da paisagem, revelou a importância crítica da conservação da geodiversidade nesse contexto único. As mudanças no uso e cobertura da terra em geossistemas ferruginosos têm implicações significativas para o meio ambiente. Essa abordagem proporcionou elementos qualitativos e quantitativos para analisar as mudanças espaço-temporais, identificando processos de mudança na composição da paisagem e avaliando o risco de degradação.

A análise revelou como a utilização da terra e a cobertura vegetal evoluíram ao longo desses anos, desempenhando um papel crucial na compreensão do impacto dessas mudanças na ecologia dos morcegos que habitam as *bat caves*, especialmente nas áreas de forrageamento. Esses dados contribuem diretamente para as discussões sobre a conservação e a gestão responsável dessas áreas sensíveis, enquanto a diferenciação entre os setores norte e sul nos permite destacar particularidades das cavernas e suas áreas circundantes, direcionando necessidades de conservação específicas para cada região.

Os resultados deste estudo têm importantes implicações para a condução das operações de mineração na região e para o monitoramento de seus impactos no meio ambiente e no bem-estar das comunidades locais. A promulgação do decreto 10.935 de 12/01/22, que admitiu a possibilidade de impactos irreversíveis em cavernas de máxima relevância, adiciona uma camada de complexidade à gestão dessas áreas.

Para empresas, governos locais e comunidades, entender os padrões de relacionamentos e suas características é fundamental, antecipando dinâmicas e implementando indicadores para rastrear mudanças e ajustar abordagens conforme necessário, particularmente em projetos de exploração mineral em geossistemas sensíveis como o geossistema ferruginoso.

A conservação da geodiversidade desempenha um papel fundamental na manutenção da biodiversidade representada pelos morcegos que habitam as cavernas. As características geodiversas únicas dos geossistemas ferruginosos, incluindo a topografia, a geologia e a composição do solo, desempenham um papel crucial na criação e manutenção de habitats propícios para esses animais. As cavernas e suas formações geológicas específicas servem como refúgios vitais para muitas espécies de morcegos, oferecendo abrigo e condições ambientais ideais para sua sobrevivência.

Portanto, considerar o contexto geodiverso, em especial a conservação do patrimônio espeleológico, é imperativo para a manutenção do equilíbrio ecológico dentro desses ecossistemas sensíveis. A proteção da geodiversidade, em conjunto com a biodiversidade, é essencial para garantir a sobrevivência dessas espécies e a integridade dos geossistemas ferruginosos. É importante ressaltar que a perturbação das *bat caves* pode ter consequências profundas para a ecologia local, afetando a polinização de plantas, a dispersão de sementes, o controle de populações de insetos e, por conseguinte, a agricultura e o equilíbrio do ecossistema, a manutenção da fauna de invertebrados cavernícolas dependente do aporte trófico proporcionado pelos morcegos, seja por meio do guano ou de restos de frutos. Além destes fatores, a dispersão das grandes colônias de morcegos em função da degradação da sua área de forrageamento pode levar a interrupção do milenar, e ainda pouco compreendido, processo de bioengenharia provocado por estes animais no que diz respeito a alterações na morfologia das cavidades do geossistema ferruginoso de Carajás.

5. POTENCIAL DE USO PÚBLICO E CAPACIDADE DE CARGA PROVISÓRIA PARA ROTEIROS ESPELEOTURÍSTICOS NA FLORESTA NACIONAL DE CARAJÁS-PA

Heros Augusto Santos Lobo

Julia Sales Vaz

Gabriel de Oliveira Cherle Pini

Luiz Eduardo Panisset Travassos

Úrsula de Azevedo Ruchkys

5.1. INTRODUÇÃO

O turismo em cavernas ou espeleoturismo, representa uma forma especializada de segmento turístico, concentrando-se em cavernas. Esta forma de turismo inclui atividades como a interpretação turística de características espeleológicas, apreciação da geodiversidade e biodiversidade presentes no ambiente subterrâneo, bem como a observação de elementos antropogênicos, artefatos arqueológicos, pinturas rupestres e fósseis que possam existir nas cavernas (Cigna, 1993; Antic et al., 2020).

No Brasil, o uso turístico de cavernas, tradicionalmente, concentra-se principalmente nas cavidades naturais inseridas em rochas carbonáticas. Isto ocorre em tanto em função de aspectos naturais – geralmente são cavernas mais ornamentadas e com maior extensão em seu desenvolvimento – quanto por fatores sociais – tradição de uso, proximidade com centros emissores e interesse dos grupos de espeleologia, principais precursores da visitação de cavernas no Brasil (Lino, 2001).

Recentemente, as cavidades naturais em outras litologias rochosas vêm ganhando destaque. Estudos recentes caracterizando e detalhando a ocorrência de cavidades em arenito, quartzito e minério de ferro tem revelado aspectos relativos à sua importância intrínseca, necessidade de conservação e possibilidade de uso turístico (Morais e Rocha, 2011; Bento et al., 2015; Travassos et al., 2012; Santos et al., 2018; Sousa et al., 2021). Da mesma forma, a utilização dessas cavernas tem se expandido, com maior ênfase em fluxos regionais de visitação. Isso contribui não apenas para a ampliação do entendimento sobre as cavernas nessas formações geológicas, mas também exerce influência no crescimento de sua utilização. Contudo, essa expansão demanda uma abordagem cautelosa, sendo crucial alcançar um equilíbrio entre o aumento do turismo e a conservação ambiental dos sistemas de cavernas, notáveis por sua elevada fragilidade (Tomić et al. 2019; Lobo et al. 2013).

Deste cenário, foi dado enfoque para as cavernas em minério de ferro da Floresta Nacional (FLONA) de Carajás, Pará. Em seu Plano de Manejo (ICMBio, 2016) é destacada a necessidade de conservação dos geossistemas ferruginosos, caracterizados por um número significativo de cavidades naturais subterrâneas que se desenvolvem sob formações ferríferas bandadas, coberturas de canga detrítica ou no contato entre as duas. Adicionalmente, o *Plano de Pesquisa Geossistemas Ferruginosos da Floresta Nacional de Carajás* (ICMBio, 2017) destaca, entre outros aspectos, a necessidade de promover o uso múltiplo dos recursos naturais por meio de arranjos produtivos locais que objetivem o turismo sustentável, contribuindo com o desenvolvimento ambiental e socioeconômico da região.

De um modo geral, observa-se quase uma ausência de estudos sobre as condições adequadas de uso turístico e manejo de cavernas em litologias não-carbonáticas. Especificamente na FLONAC, os estudos de Sousa et al. (2021) e Sousa (2022) são as referências mais atuais e diretamente relacionadas a uma parcela dos roteiros espeleoturísticos. Os estudos desenvolveram aplicações iniciais do Rol de Visitação em Unidades de Conservação (ROVUC), proposto pelo ICMBio como ferramenta de análise para as possibilidades de visitação (Crema e Faria, 2018). Partindo deste cenário, o mesmo método foi usado na pesquisa realizada, sendo complementado pelos métodos de avaliação do potencial espeleoturístico (Lobo, 2007), com apontamentos preliminares direcionados pelo método de capacidade de carga provisória (Lobo et al., 2013) para aprofundamentos posteriores. Assim, o objetivo da pesquisa realizada foi a execução de um levantamento das possibilidades de uso espeleoturístico na FLONAC, com análises gerais dos roteiros e apontamentos para sua gestão.

5.2. ETAPAS E PROCEDIMENTOS DA PESQUISA

A pesquisa que deu origem ao presente artigo foi desenvolvida com base em um projeto¹ mais amplo, que tratou do levantamento do potencial de uso turístico e didático de sítios da geodiversidade, de maneira geral, e do patrimônio espeleológico, de maneira específica da Floresta Nacional de Carajás e do Parque Nacional Campos Ferruginosos, além de abordar a fragmentação da paisagem em torno das cavernas ferruginosas. Partindo deste cenário, foram definidos procedimentos específicos para análises dos

¹ O nome do projeto será inserido após a avaliação *peer review*, preservando o anonimato do processo.

roteiros espeleoturísticos, com métodos mais gerais de caracterização das oportunidades de uso e outros focados no detalhamento de cada possível roteiro.

Para análises mais gerais no âmbito do potencial de uso turístico recreativo, foi utilizado o Rol de Oportunidades de Visitação (ROVUC), um método que tem sua origem no consolidado *Recreation Spectrum Opportunity* (ROS – Clark e Stankey, 1979) e que foi chancelado no Brasil pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio – Crema e Faria, 2018). A proposta de análise do ROVUC parte das classes de oportunidade de visitação, que se referem ao grau de conservação e antropização da paisagem e são a base para a análise de classificação de cada sítio avaliado (Quadro 1).

Quadro 1. Classes de oportunidade e grau de intervenção da visitação previstos no ROVUC

Classe de oportunidade	Experiência	Grau de intervenção
Prístina	Experiência de visitação que envolve aventura, isolamento, desafio, autonomia em ambientes naturais e uma interação intensa com a natureza.	Visitação de baixo grau de intervenção: corresponde às formas primitivas de visitação e recreação que ocorrem em áreas com alto grau de conservação, possibilitando ao visitante experimentar algum nível de desafio, solidão e risco. Os encontros com outros grupos de visitantes são improváveis ou ocasionais. A infraestrutura, quando existente, é mínima e tem por objetivo a proteção dos recursos naturais e a segurança dos visitantes. É incomum a presença de estradas ou atividades motorizadas.
Natural	Experiência de visitação que ainda permite algum nível de isolamento, aventura e independência nos ambientes naturais, ao mesmo tempo que oferece a possibilidade de segurança e comodidades.	Visitação de médio grau de intervenção: É possível experimentar alto grau de naturalidade do ambiente, no entanto, já se pode detectar algum nível de alteração ambiental ou evidências de atividades humanas. O acesso a essas áreas pode ser realizado por veículos motorizados. Em ambientes terrestres, as estradas em geral não são pavimentadas. Os encontros com outros visitantes são mais comuns e, nas unidades de conservação de uso sustentável, pode haver a presença de moradores isolados possibilitando experimentar o modo de vida local. A infraestrutura é mínima ou moderada, tendo por objetivo, além da segurança e a proteção dos recursos naturais, melhorar a experiência e proporcionar comodidade ao visitante. São exemplos: ponte, pequenas edificações, mirante, escada, deck, acampamento, abrigo, banheiro, estrada com revestimento permeável, etc.
Seminatural	Experiência de visitação que possibilita uma forte interação entre grupos de pessoas (famílias, amigos, excursões turísticas, grupos escolares, comunidade, etc.)	Visitação de alto grau de intervenção: a visitação é intensiva e planejada para atender maior demanda. Ainda que haja oportunidade para a privacidade, os encontros e a interação podem ser frequentes entre os visitantes,

	e oferece tranquilidade, segurança, conforto e comodidade.	funcionários e comunidade local. É comum a presença de grupos maiores de visitantes ou excursões. Há mais atenção na segurança dos visitantes, na proteção de áreas sensíveis próximas aos atrativos e menos ênfase em promover autonomia ou desafios. A infraestrutura geralmente é mais desenvolvida, com a presença comum de edificações e estradas, inclusive pavimentadas, podendo resultar em alterações significativas da paisagem. Centro de visitantes, museu, auditório, estacionamento, posto de gasolina, estrada pavimentada, piscina, hotel, pousada, teleférico, pista de pouso, paisagismo, estábulo, podem ocorrer nas zonas de manejo com alto grau de intervenção, dependendo da categoria de manejo da UC.
Ruralizada	Experiência de visitação que possibilita o forte contato com moradores e seu modo de vida local, tranquilidade, segurança, conforto e comodidade.	
Urbanizada	Experiência de visitação em locais com menos naturalidade do ambiente, que possibilita a interação com os moradores locais, podendo oferecer ampla acessibilidade, conforto e praticidade.	

Fonte: adaptado de Crema e Faria (2018).

As classes de oportunidades propostas no Quadro 1 são obtidas a partir de uma avaliação qualitativa e descritiva feita em cada possível roteiro, onde é identificado o estado atual do grau de intervenção e das possibilidades de uso, ou mesmo são projetadas as condições futuras. Esta análise foi realizada com base no preenchimento de fichas de campo dos Quadros 2 e 3.

Quadro 2. Atributos do ROVUC para classificação dos atrativos

Classes		Atrativo analisado
Atributos	Indicadores	
Biofísico	Conservação da paisagem	
	Evidências de atividades humanas contemporâneas	
	Grau de isolamento	
Sociocultural	Frequência de encontros	
	Tamanho dos grupos	
	Presença de moradores	
	Atividades recreativas em contato com a natureza e ecoturismo	
	Atividades socioculturais	
	Eventos	
Manejo	Acesso motorizado	
	Estradas	
	Trilhas	
	Sinalização e interpretação nas trilhas	
	Edificação e equipamentos facilitadores	
	Pernoite	
	Sanitários e lixo	
	Acessibilidade	
	Presença institucional	
	Delegação de serviços	

Fonte: adaptado de Crema e Faria (2018).

Quadro 3. Inventário de possíveis atividades a serem realizadas e indicação da avaliação prévia de necessidade de investimentos

Alimentação	Atrativos Kids	Balneário	Birdwatching	Boiacross	Bote de Navegação
Cachoeirismo	Caiaque	Camping	Canionismo	Cavalgada	Cerimônias
Chalés	Cicloturismo	Ecovila	Escalada	Espeleoturismo	Espeleoturismo de Aventura
Espeleoturismo Educativo	Expedições	Flutuação	Fotografia	Glamping	Guiamento
Hidromassagem Natural	High Line	Hospedagem	Kitesurf	Meditação	Mergulho
Mirante	Nascer/Pôr do Sol	Natação	Observação de Astros	Observação de Fauna e Flora	Observação de Formações
PCDs	Pêndulo	Pernoite	Pintura Rupestre	Piquenique	Quiosque
Rafting	Rapel	Slackline	Stand Up Paddle	Terapias/Imersão	Tirolesa
Travessia	Trekking	Trilha Aquática	Trilha para Cadeirantes	Trilha de Aventura	Trilha de Longo Curso
Trilha Familiar	Trilha Interpretativa	Trilha Noturna	Trilha Suspensa	Turismo 3º Idade	Turismo Cultural
Turismo Místico-Esotérico	Turismo Gastronômico	Turismo Histórico	Turismo Religioso	Turismo Rural	Voo de Balão
Voo Duplo/Pouso	Voo Livre	Wi-Fi	Outros (as)?		

Fonte: elaborado pelos autores com base em Andrade et al. (2020) e experiências pessoais.

Após a análise destes fatores, os roteiros foram classificados conforme o grau de conservação geral, nas classes do ROVUC: prístino, natural, seminatural, rural e urbano (Crema e Faria, 2018). Adicionalmente, para cada recurso natural analisado para a possível proposição de visitação, foi analisado, também, o potencial espeleoturístico nas categorias geral, contemplação e aventura, com base nos indicadores (Quadro 4) e tabela de classificação da pontuação obtida (Quadro 5) e Equação de relação da tabela de classificação (Equação 1), adaptados de Lobo (2007).

Quadro 4. Critérios para análise do potencial espeleoturístico

FRAGILIDADES		POTENCIAL GERAL	
BIO		Cursos/corpos d'água?	
Espécies endêmicas?		Temperatura propícia para banho?	
Troglomorfose aparente?		Água translúcida?	
Contaminação patológica?		Mais de um acesso?	
Odor desagradável?		Claraboias?	
FÍSICO		Temp. interna agradável?	
Instabilidade geológica?		Acesso sem técnicas avançadas?	
Possibilidade de enchentes?		Alta circulação de energia?	
Espeleotemas ao alcance?		Condutos com larg. 1,5m e alt. 1,9m?	
Espeleotemas raros?		Condições internas resgate?	
Minerais raros?		Condições externas resgate?	
Baixa circulação de energia?		POTENCIAL CONTEMPLATIVO	
ANTRÓPICO		Salões amplos?	
Comprometimento visual?		Mais de 5 tipos espeleotemas?	
Estudo em andamento?		Mínimo 1 conjunto cênico espeleotemas?	
Fora de ANP?		Espeleotema singular/diferenciado?	
Área autorizada para mineração?		Pórtico c/ beleza cênica?	
PRETÉRITO		Vestig. Arqueolog./Paleontolog. visíveis?	
Vestígio arqueológicos?		Relativa facilidade interna acesso?	
Vestígio paleontológico?		Mobilidade para PcDs?	
POTENCIAL VERTICAL		POTENC. MERGULHO/SNORKELING	
Lance superior a 3m?		Profundidade superior à 5m?	
Desnível predominante negativo?		Fluxo de água contrário ao sumidouro?	
Condições de ancoragem?		Espeleotemas em área alagada?	
Remoção por maca em trecho vertical?		Carac. Geol./geomorf. diferenciada em trecho alagado?	
Local para equipagem?		Área de atv. em conduto freático?	
Local para chegada ao fim da via?		Área mínima de 150m ² para snorkel?	
Ausência de obstruções no trecho vertical?		Visibilidade superior a 5m?	
Beleza cênica de acesso exclusivo?			

Fonte: Adaptado de Lobo (2007).

Quadro 5. Escala de valores para as fragilidades e potencialidades espeleoturísticas

Grau de Intensidade	Fragilidades	Potencial Geral	Potencial para Contemplação
Baixa	3	1	1
Média	2	2	2
Alta	1	3	3
Absoluta	0	-	-

Fonte: Adaptado de Lobo (2007).

$$\text{PER} = \frac{F * (\text{PG} + \text{PC} \text{ ou } \text{PA}) * 100}{T} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

PER: Potencial Espeleoturístico relativo ao potencial em análise (contemplação ou aventura)

F: Fragilidades

PG: Potencial geral

PC: Potencial para turismo contemplativo

PA: Potencial para turismo de aventura

T: total de indicadores, considerando o potencial geral adicionado do potencial em análise.

Por fim, a capacidade de carga espeleoturística provisória tomou por base a fase inicial do método de Lobo et al. (2013), com a proposição de cenários de visitação compatíveis com a realidade de gestão e a fragilidade preliminar dos ambientes visitados.

Os recursos naturais foram avaliados em campo entre os dias 15 e 19 de maio de 2023, com uma equipe multidisciplinar composta por membros do projeto de pesquisa e técnicos do ICMBio – órgão gestor da FLONA de Carajás. A análise foi feita nas seguintes cavidades naturais: Paleotoca S11-07; cavernas: Guarita, Mapinguari, Janela Verde, do Púlpito e do Poço.

5.3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA

A área de estudo é a Floresta Nacional de Carajás, uma Unidade de Conservação de Uso Sustentável localizada no Sudeste do Pará, no bioma Amazônico. Sua proteção legal, efetivada em 1998, visa conciliar a conservação da natureza com o uso sustentável de parte dos recursos naturais, especialmente os bens minerais. A Floresta Nacional de Carajás integra um dos principais geossistemas ferruginosos brasileiros, marcados pela formação de paisagens complexas com notável diversidade natural (ICMBio, 2016).

Do ponto de vista geológico a região compreende uma bem preservada sequência vulcano-sedimentar Neoarqueana (Supergrupo Itacaiúnas), sobreposta ao Complexo Xingu, um embasamento granito-gnáissico, de composição tonalítica a trondhjemítica. Os grandes depósitos de ferro de alto teor (>64 % Fe) estão hospedados na Formação Carajás do Grupo Grão Pará, sendo composta por formações ferríferas bandadas (FFB) representadas por jaspilitos, com rochas máficas situadas acima e abaixo dela (esta última

pertencente à Formação Parauapebas). Os jaspilotos exibem uma intercalação de bandas claras e escuras de óxido de ferro e sílica (jasper e silexito) com espessura milimétrica a centimétrica. (Lobato et al. 2005).

5.4. RESULTADOS

A aplicação das análises propostas foi realizada em seis recursos espeleoturísticos na FLONA de Carajás: Paleotoca S11-07, Cavernas Guarita, Mapinguari, Janela Verde, Púlpito e Poço. Os Quadros 6 e 7 apresentam uma síntese dos resultados da aplicação do ROVUC nestes roteiros.

Quadro 6. Análise de indicadores das classes de experiência do ROVUC nas cavernas Mapinguari, Guarita e Janela Verde

ATRIBUTOS	INDICADORES	DESCRIÇÃO
BIOFÍSICO	Conservação da paisagem	Preservada em relação ao entorno.
	Evidência de atividades humanas contemporâneas	Placa de peso dentro da gruta. trilha
	Isolamento (distância das entradas da UC e dificuldades de acesso)	Acesso fácil, menos de 500m, 20min aproximadamente.
SOCIOCULTURAL	Frequência de encontros	Controle, trechos de ida e volta na mesma trilha.
	Tamanho dos grupos	Um monitor para dez visitantes.
	Presença de moradores em unidades de conservação de uso	Não há.
	Atividades recreativas em contato com a natureza e turismo	Espeleoturismo, Educação Ambiental, Interpretação Ambiental, Trilhas, Cachoeirismo.
	Atividades socioculturais em unidades de conservação	Lenda do Mapinguari.
	Eventos	Não há.
	Acesso motorizado	Até o início da trilha.
	Estradas	Excelente estado de conservação..
	Trilhas	Manejo adequado, infraestrutura sendo implantada (escadaria e mirante)

MANEJO	Sinalização e interpretação nas trilhas	Acompanhamento de condutores, sem sinalização interpretativa.
	Edificação e equipamentos facilitados	Não há (em construção).
	Pernoite	Não há.
	Sanitários e lixo	Não há.
	Acessibilidade (universal cadeirante)	Pode ser possível para PCDs com uso de equipamento adequados.
	Presença institucional	Evidente, mas não clara da FLONA/ICMBio.
	Delegação de serviços	Cooperativa, Monitores Autônomos, ICMBio.
CLASSE	Natural	

Quadro 7. Análise de indicadores das classes de experiência do ROVUC nas cavernas do Pulpito e do Poço

ATRIBUTOS	INDICADORES	DESCRIÇÃO
BIOFÍSICO	Conservação da paisagem	Trilha passa por uma antiga fazenda, mas a paisagem está preservada.
	Evidência de atividades humanas contemporâneas	Não há.
	Isolamento (distância das entradas da UC e dificuldades de acesso)	2 km aproximadamente. Dificil acesso para o Poço.
SOCIOCULTURAL	Frequência de encontros	Baixa frequência, trilha fechada, apenas um caminho de ida e volta.
	Tamanho dos grupos	Um monitor para dez visitantes.
	Presença de moradores em unidades de conservação de uso	Não há.
	Atividades recreativas em contato com a natureza e turismo	Trilha, Cachoeirismo, Interpretação Ambiental, Educação Ambiental.
	Atividades socioculturais em unidades de conservação	Elementos arqueológicos na caverna do Pulpito.
	Eventos	Não há.
	Acesso motorizado	Até o início da trilha, difícil acesso.
	Estradas	Parte asfaltada e parte de terra/lama.

MANEJO	Trilhas	Mata fechada, necessário manutenção.
	Sinalização e interpretação nas trilhas	Não há.
	Edificação e equipamentos facilitados	Não há.
	Pernoite	Não há.
	Sanitários e lixo	Não há.
	Acessibilidade (universal cadeirante)	Difícil acessibilidade.
	Presença institucional	Evidente, mas não clara da FLONA/ICMBio.
	Delegação de serviços	Cooperativa, Monitores Autônomos, ICMBio.
CLASSE	Pristina	

A Paleotoca S11-07 não foi considerada para análises de uso público, dado que a análise preliminar de suas fragilidades apontou 9 indicadores positivos pelo método de Lobo (2007), evidenciando ser um ambiente menos adequado à possibilidade de visitação turística. Além disso, foram considerados os seguintes fatores: a) classificação de cavidade natural subterrânea de relevância máxima para a conservação, no âmbito do Decreto 6.640/2008; b) dificuldade de acesso externo, estando localizada próxima a área de lavra da companhia Vale, necessitando tanto de autorização prévia para o acesso quanto escolta da empresa; c) restrição de mobilidade no interior da cavidade; e d) potencial limitado de interesse, com enfoque em situações específicas de estudo de nível superior de algumas áreas do conhecimento, como geomorfologia, geologia e paleontologia.

O levantamento das atividades possíveis revelou uma ampla gama de opções, tanto para roteiros de implantação imediata quanto para o futuro (Quadro 8).

Quadro 8. Possibilidades de implantação de roteiros nos recursos espeleoturísticos analisados. Legenda: A – atual; PS – potencial, sem necessidade de investimentos significativos; PC – potencial, com necessidade de investimentos significativos.

Atividades x recursos analisados	Guarita	Mapinguari	Janela Verde	Púlpito	Poço
Atrativos Kids				PC	
Birdwatching	PS	PS	PS	PS	PS

Cachoeirismo	A	A			
Espeleoturismo Contemplativo	A	A	A	A	A
Espeleoturismo Educativo	A	A	A	A	A
Fotografia	A	A	A	A	A
Guiamento	A	A	A	A	A
Meditação	PS	PS	PS		PS
Mirante	A/PC	A/PC	A/PC	A/PC	A/PC
Observação de Fauna e Flora	A	A	A		
Observação de Formações	A	A			
PCDs	A/PC	A/PC		A/PC	
Piquenique				PS	
Quiosque				PC	PC
Terapias/Imersão	PS	PS	PS		
Trilha para Cadeirantes	A/PC	A/PC			
Trilha Familiar	A	A		A	A
Trilha Interpretativa	A/PC	A/PC		A/PC	A/PC
Turismo 3º Idade	A/PC	A/PC		A/PC	
Turismo Cultural	A	A			

Na continuidade da aplicação do método, o Quadro 9 apresenta os resultados da avaliação do potencial espeleoturístico de cada recurso, já considerando o possível roteiro dentro da caverna.

Quadro 9. Classificação da fragilidade ambiental e das potencialidades e uso turístico dos recursos espeleoturísticos analisados

Roteiros x Fragilidades e Potencialidades	Fragilidades (Baixa: até 5 fragilidades; Média: 6-10; Alta: 11 ou mais).	Potencial geral (Baixa: entre 1 e 4 indicadores; Média: 5-8; Alta: 9 ou mais).	Potencial contemplativo (Baixa: entre 1 e 3 indicadores; Média: 4-6; Alta: 7 ou mais).	Potencial aventura (Baixa: entre 1 e 4 indicadores; Média: 5-8; Alta: 9 ou mais).
Guarita	0 (Baixa)	7 (Média)	3 (Baixa)	0
Mapinguari	3 (Baixa)	6 (Média)	4 (Média)	0
Janela Verde	3 (Baixa)	7 (Média)	4 (Média)	0
Púlpito	3 (Baixa)	6 (Média)	6 (Média)	0
Poço	3 (Baixa)	4 (Baixa)	3 (Baixa)	0

Por fim, foi realizada a classificação dos roteiros, com base nos dados do Quadro 9, pontuação do Quadro 5 e na Equação 1. O Quadro 10 apresenta as classificações finais dos recursos espeleoturísticos analisados, para o tema de espeleoturismo de contemplação, considerando que as pontuações para espeleoturismo de aventura foram zeradas em todos os roteiros.

Quadro 10. Análise do potencial espeleoturístico dos recursos avaliados

Roteiros x Potencial espeleoturístico	Resultado final (%)	Classificação do roteiro (cf. Lobo, 2007)
Guarita	47	Médio (Classe D)
Mapinguari	63	Alto (Classe C)
Janela Verde	63	Alto (Classe C)
Púlpito	63	Alto (Classe C)
Poço	32	Moderado (Classe E)

5.5. DISCUSSÃO

A análise do potencial de uso espeleoturístico de uma localidade sempre deve levar em conta diversos fatores, intrínsecos e extrínsecos ao ambiente pesquisado (Lobo, 2014). Como aspectos intrínsecos, pode-se citar a beleza paisagística, a facilidade de acesso e a existência de elementos raros ou únicos (Figueiredo et al., 1999; Costa et al., 2021; Santos e Santana, 2023). Fatores extrínsecos aos elementos espeleológicos são aqueles ligados tanto ao comportamento de consumo dos potenciais turistas – modismos, interesses, gostos –, infraestrutura receptiva, aspectos localizacionais e de custo (Gomes, 2019; Reis, 2019; Grilli et al., 2021). Assim, é necessário compreender que os resultados ora apresentados se referem aos aspectos intrínsecos, os quais foram avaliados sob óticas distintas, tanto de qualidade da paisagem – tal como no estudo de Lima et al. (2023) – quanto de critérios específicos considerados importantes para o espeleoturismo (Lobo, 2007, 2014).

Sobre a qualidade da paisagem, os dados dos Quadros 6 e 7 evidenciam uma matriz altamente preservada, com elementos que denotam a qualidade dos possíveis roteiros e proporcionam a percepção de contato com a natureza, tão desejada em roteiros de turismo de natureza (Fennell, 2020) e mais especificamente nos espeleoturísticos (Lobo, 2014), que se enquadram no âmbito do ecoturismo na realidade brasileira (Lobo, 2023). Utilizando o mesmo método de avaliação, este nível de qualidade da paisagem foi

observado em roteiros de ecoturismo em importantes destinos de ecoturismo, como o Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros-GO (Andrade et al., 2020) e O Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses (Melo e Crema, 2022). As fotos da Fig. 2 evidenciam aspectos da qualidade visual da paisagem dos recursos avaliados.



Fig. 2. Esq.: região da Gruta do Mapiunguari; Dir.: região da Gruta do Poço. Autor: *****²

Adicionalmente, os dados do Quadro 8 permitiram a identificação de 20 categorias distintas de atividades a serem desenvolvidas, com um conjunto total de 66 possíveis roteiros a serem implantados. Destes, destacam-se 50 roteiros cuja implantação pode ser imediata – ficando dependente da análise do Plano de Manejo da FLONA –, sem o investimento de recursos significativos. Considerando o enfoque deste artigo, foi dada atenção ao conjunto de potencialidades do espeleoturismo, tanto contemplativo quanto educativo. Ambos são tratados conjuntamente, considerando que os aspectos que interessam a um perfil de visitantes podem interessar ao outro, variando em grau de detalhe e características interpretativas (Tilden, 2008; Lobo, 2014; Moreira, 2014).

Os recursos analisados apresentaram baixas fragilidades (Quadro 9) relativas à visitação turística em modelos alternativos-sustentáveis, tal como nos moldes vigentes do ecoturismo (Fennell, 2020; Lobo, 2023). Ressalta-se que a análise realizada é preliminar e não substitui a necessidade de detalhamento prevista em Planos de Manejo Espeleológico (ICMBio, 2022), os quais podem tanto confirmar as fragilidades detectadas quanto apontar outras ou mesmo destacar algumas delas. Pela ótica do potencial espeleoturístico, os possíveis roteiros tiveram pontuação final para contemplação – que pode ser estendida para o turismo pedagógico – variando entre 32% e 63% (Quadro 10). Pela escala correspondente de Lobo (2007), um dos roteiros foi classificado com potencial Moderado-E (Poço), um com potencial Médio-D (Guarita) e três com potencial Alto-C

² Crédito autoral será adicionado após o processo de *peer review*.

(Mapinguari, Janela Verde e Pulpito). As fotos da Figura 3 ilustram a beleza cênica das cavernas com potencial espeleoturístico definido como Alto.

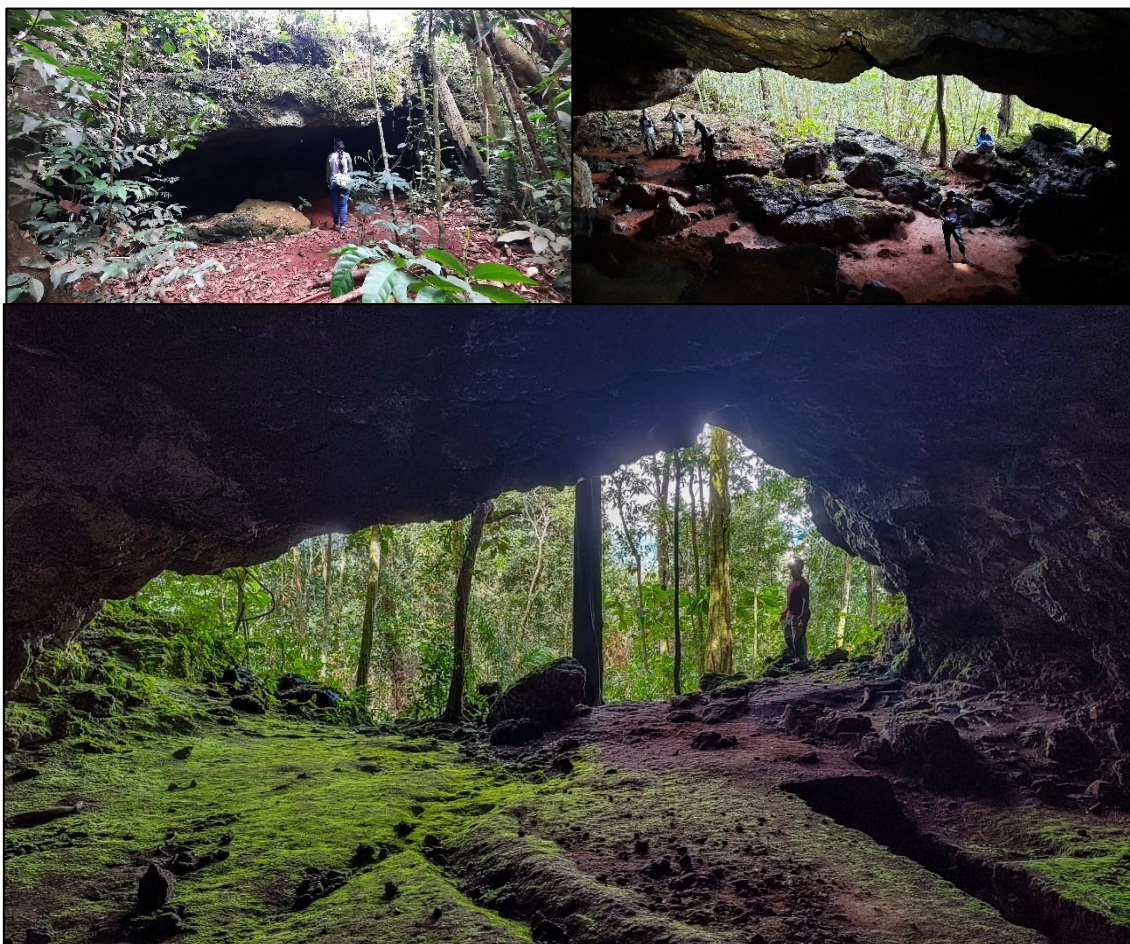


Figura 3. Cavernas com maior potencial espeleoturístico avaliadas: 2a – Pulpito; 2b – Mapinguari; e 2c – Janela Verde. Fotos: *****³

A escala proposta por Lobo (2007) vai de A até F para cavernas com potencial turístico, considerando ainda a classe G para cavernas inaptas ao turismo. Ao não terem atingido classes A e B, pode-se questionar o verdadeiro potencial de uso das cavernas analisadas. No entanto, é preciso considerar que: a) o método foi desenvolvido para cavidades naturais carbonáticas, cujos atributos diferem das analisadas, que são desenvolvidas em rochas ferruginosas); b) a aplicação do método em cavernas carbonáticas consagradas para o turismo trouxe resultados similares na Serra da Bodoquena (Lobo et al., 2008), com roteiros consolidados no mercado sendo também avaliados na classe “Alto-C”; e c) deve-se considerar, sobretudo a disponibilidade regional de roteiros similares, de forma que o interesse de visitar cavernas pode ou não

³ Crédito autoral será adicionado após o processo de *peer review*.

ser suprimido de forma relativa por outros roteiros. No caso da região em questão, não existem outros roteiros espeleoturísticos nas proximidades, não havendo concorrência e ampliando seu potencial de interesse para a visitação.

Além disso, deve-se compreender que a finalidade maior da aplica o da avalia o do potencial espeleoturístico não   a defini o de quais cavernas devem ou não ser visitadas, pois o método não foi concebido com uma “nota de corte” que inviabilize a visita o – exceto para cavernas inaptas para o turismo, o que se define por suas fragilidades. Portanto, o resultado serve mais para a lógica de roteiriza o, ao que se sugere a visita o inicial das cavernas com menor potencial de visita o, culminando naquelas com maior potencial. Com isso, cria-se o efeito de ápice do processo de visita o, visando ampliar a percep o de fruic o da visita o (Lobo, 2007).

Por fim, a capacidade de carga provisória dos roteiros. As abordagens mais atuais para a defini o de parâmetros numéricos de visita o são baseadas em faixas numéricas flexíveis, com limites variáveis em fun o do monitoramento contínuo (Lobo et al., 2013; Butler, 2020; Araujo; Lobo, 2023). Neste contexto, o método proposto por Lobo et al. (2013) parte de aspectos como quantidade de pessoas por grupo, tempo do roteiro proposto, quantidade de paradas (interpretativas, descanso, contemplativas etc.), percep o de lota o e condi o de manejo de visitantes (Oliveira et al., 2021; Lobo e Santos, 2022). Estes parâmetros são considerados para o estabelecimento das condi o desejadas de visita o, as quais são denominadas de “cenário de visita o”. O método de Lobo et al. (2013) propõe que os cenários sejam desenvolvidos pela gestão do atrativo em questão, em conjunto com *stakeholders* que fazem parte do turismo na região. Nos recursos analisados, já existem práticas correntes de visita o, que adotam como parâmetro a propor o de 10 visitantes para 1 condutor. Esta propor o   similar àquela encontrada em outros destinos consagrados de espeleoturismo no Brasil, como o Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR-SP) (Fundaa o Florestal e Ekos Brasil, 2013) e O Parque Estadual de Terra Ronca (PETeR-GO) (SEMAD e STCP, 2023). Desta forma, as condi o espaciais dentro das cavernas, observadas em campo, bem como a prática corrente, servem como pressupostos iniciais para a defini o do cenário de visita o. A quantidade diária de grupos pode ser definida pelo tempo dos roteiros, os quais foram estimados em aproximadamente uma hora em cada caverna. Considerando-se, ainda, o horário de abertura e fechamento para a visita o (das 9h até as 17h), identifica-se a possibilidade de 9 grupos diários. Assim, para roteiros de contempla o, o cenário de visita o inicial   de 90 visitas por dia. Para grupos escolares, considerando-se que as

práticas pedagógicas são desenvolvidas em grupos maiores e com mais tempo – tal como proposto no Plano de Manejo Espeleológico de cavernas turísticas paulistas (Fundação Florestal e Ekos Brasil, 2013), propõe-se a adoção de grupos de 20 visitantes com até 2 condutores, permitindo chegar à 180 visitas diárias. Entende-se que, teoricamente, este mesmo parâmetro pode ser aplicado para roteiros contemplativos, desde que devidamente estudados e preparados em termos de dinâmica de visitação e conteúdo, para abrigar maiores adensamentos de visitantes simultaneamente.

Estes cenários iniciais, conforme o método de Lobo et al. (2013), são submetidos às fragilidades do ambiente. Neste estudo preliminar, foram consideradas as análises de fragilidade com base no método de Lobo (2007), cujos resultados são expostos no Quadro 9. A aplica o anterior do método de capacidade de carga provisória em outras cavernas turísticas demonstrou que cavernas com baixa fragilidade não oferecem fatores de limita o ao cenário inicial proposto, conforme estudos realizados no Vale do Ribeira-SP (Fundação Florestal e Ekos Brasil, 2013), Bonito-MS (Lourenço et al., 2015) e no PETeR-GO (SEMAD e STCP, 2023). Assim, compreende-se que os números balizadores da quantidade de visitantes ora propostos (grupos de no máximo 20 visitantes para 2 monitores; com um total de 180 visitas diárias por caverna) são adequados para uma primeira proposta de visita o.

5.6. CONCLUSÕES

Os estudos realizados permitiram a verifica o da elevada qualidade da paisagem nos recursos espeleoturísticos estudados. O grau de conserva o do ambiente, sobretudo em sua porão subterrânea, enseja a possibilidade de uma visita o dentro dos padrões ecoturísticos, embora propostas com abordagem temática do espeleoturismo (Lobo, 2014) ou do geoturismo (Dowling e Newsome, 2018), entre outras, possam ser igualmente desenvolvidas. Para tanto, estudos focando nos aspectos interpretativos, com defini o de temas, conteúdos específicos e formas de abordagem, devem ser desenvolvidos para possibilitar estas diversas possibilidades de uso.

Além disso, também foi possível estabelecer limites iniciais provisórios de visita o para os possíveis roteiros a serem implantados. Estes foram balizados por aspectos sociais e de manejo, com aporte inicial de análise de fragilidades do ambiente perceptíveis por avalia es expeditas de campo. Estudos futuros, mais aprofundados e

com métodos específicos das diferentes áreas da ciência que compõem o escopo da conservação ambiental, deverão detalhar os apontamentos realizados para a proposição de uma revisão das fragilidades identificadas.

Por fim, conclui-se que a FLONA de Carajás possui plenas condições para o desenvolvimento de roteiros espeleoturísticos, em condições positivas de qualidade, comparáveis aos demais destinos espeleoturísticos do Brasil.

6. POTENCIAL DE PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS DA GEODIVERSIDADE NA FLONA CARAJÁS

Úrsula de Azevedo Ruchkys
Paulo Henrique Maciel Pádua
Paulo de Tarso Amorim Castro
Heros Augusto Santos Lobo

6.1. INTRODUÇÃO

A sobrevivência e o bem-estar da humanidade estão intrinsecamente ligados à sua relação com a natureza. Diamond (2005) traz exemplos históricos de como as sociedades, antigas e contemporâneas escolhem o fracasso ou o sucesso a partir de suas relações com o Planeta e como usam os recursos naturais. Ao explorar casos como os maias, os vikings e sociedades polinésias, o autor identifica padrões recorrentes em decisões ambientais e na gestão de recursos naturais, como elementos cruciais que levaram ao declínio de sociedades pela perda de serviços ambientais, tais como: perda de habitat, retenção de solo, produção de biomassa e regulação da água.

A crescente preocupação ambiental nas décadas de 1970 e 1980 levou os pesquisadores a abordarem as questões ecológicas sob uma perspectiva econômica, destacando a profunda dependência da sociedade em relação aos ecossistemas. Isso estimulou o interesse público na conservação da biodiversidade (Gomez-Baggethun et al., 2010). Durante esse período, houve uma revisão significativa dos estudos relacionados ao meio ambiente, que passaram a incorporar externalidades ambientais em análises de custo-benefício e ampliando a conscientização sobre a influência humana no mundo natural (Gomez-Baggethun et al., 2010; Cooke, 2022). Foi a partir desse contexto histórico, que, no final do século XX, surgiram os termos “capital natural”, definido por Costanza e Folke (1997) como um tipo de capital identificável e físico (por exemplo árvores, minerais, água etc.) que é responsável pela entrega de "serviços ecossistêmicos", referindo-se aos benefícios que as pessoas obtêm dos ecossistemas (Reid et al., 2005; Cooke, 2022). Os serviços ecossistêmicos, conforme definidos por Costanza e Folke (1997), englobam: (1) regulação de gases, (2) regulação do clima, (3) regulação de distúrbios, (4) regulação de água, (5) fornecimento de água, (6) controle de erosão, (7) formação dos solos, (8) controle do ciclo de nutrientes, (9) controle de poluição e

desintoxicação, (10) polinização, (11) controle biológico, (12) habitat e refúgio,(13) produção de alimentos, (14) materiais brutos para produção primária, (15) recursos genéticos, (16) recreação e (17) cultural.

O conceito moderno de serviços ecossistêmicos constitui um complexo de conhecimentos diferentes que se origina da percepção de que os recursos naturais são limitados (Marsh, 1864), do estudo dos ecossistemas (Lindeman, 1942), abrangendo desde a ideia da ética da terra de Aldo Leopold até a exploração da ecologia experimental e o papel da biodiversidade no funcionamento dos ecossistemas (Mooney e Ehrlich, 1997; Fisher et al., 2009; Patterson e Coelho, 2009). Essa expressão consolidou-se como uma maneira abrangente de compreender e comunicar a interconexão entre o bem-estar humano e a saúde dos ecossistemas, fornecendo um arcabouço conceitual crucial para a gestão sustentável dos recursos naturais (Cooke, 2022).

O entendimento dos benefícios proporcionados pela natureza às pessoas, expresso no conceito e na estrutura dos serviços ecossistêmicos, tem dado origem a diversas abordagens que estão ganhando crescente aplicação para respaldar a gestão sustentável da biodiversidade e dos ecossistemas (Igran et al., 2012). Um desafio recorrente na literatura sobre serviços ecossistêmicos, particularmente relacionado à categorização desses serviços, reside na diversidade de métodos utilizados para atribuir valor econômico a eles. Isso resultou em uma falta de coesão na literatura inicial sobre o tema (Cooke, 2022). A Avaliação Ecossistêmica do Milênio (Millennium Ecosystem Assessment - MEA, 2005) trouxe clareza ao apresentar um quadro abrangente que categoriza os serviços ecossistêmicos em quatro grupos: provisão, regulação, culturais e de suporte. Desde 2016, a iniciativa da Classificação Internacional Comum de Serviços Ecossistêmicos (CICES) reduziu as categorias para três: provisão, regulação e culturais, considerando os serviços de suporte agora como funções ecossistêmicas, em vez de uma categoria específica (CICES, 2021).

Contudo, as abordagens tradicionais negligenciam os serviços proporcionados pela geodiversidade. Essa questão tem sido objeto de debates contínuos entre os geocientistas, uma vez que essa exclusão pode comprometer uma avaliação abrangente dos ambientes naturais (Gray, 2018; Fox et al., 2020; Alahuhta et al., 2022). A ênfase nos serviços ecossistêmicos biológicos é preocupante, considerando que um ecossistema é definido como um conjunto complexo e dinâmico de comunidades de plantas, animais e microrganismos e seu ambiente não vivo interagindo como uma unidade funcional (de Groot et al., 2002, Worm et al., 2006, Luck et al., 2009, Raudsepp-Hearne et al., 2010).

A geodiversidade entendida como a diversidade da natureza não viva, é composta por conjuntos, estruturas e sistemas de componentes geológicos, geomorfológicos, do solo e hidrológicos. A geodiversidade inclui os conjuntos, estruturas, processos e sistemas, suas contribuições para as paisagens, bem como os serviços que eles proporcionam isoladamente ou das interações resultantes da interação com a natureza biótica. A geodiversidade contribui ativamente para uma ampla variedade de serviços ecossistêmicos em todas as categorias. Ela desempenha papéis tanto diretos quanto indiretos na entrega e manutenção desses serviços (Gordon e Barron 2013; Prosser 2013). Os serviços ecossistêmicos derivados da geodiversidade são descritos como funções oferecidas por elementos da geodiversidade, seja de maneira direta ou indireta, para o benefício da sociedade e das gerações futuras (Gray, 2013).

Diante da abordagem geral da MEA que exclui, de forma direta, os elementos abióticos da classificação de serviços ecossistêmicos, a análise de Gray (2019) se concentra nos serviços diretamente vinculados à geodiversidade. Esta abordagem não apenas considera as categorias tradicionais de serviços de regulação, suporte, provisão e culturais, mas também abrange os "serviços de conhecimento". O autor argumenta que a geodiversidade, especialmente os aspectos geológicos, desempenha um papel crucial na compreensão da evolução da Terra e dos seres vivos. O foco principal da abordagem de serviços ecossistêmicos relacionados à geodiversidade está, portanto, em encontrar uma maneira abrangente de tratar o ambiente natural de maneira sustentável, considerando o manejo de terra, a gestão da água e os seres vivos, o que reflete as aspirações da sociedade e as mudanças climáticas (Gordon et al. 2012; Hjort et al. 2015; Garcia, 2019). A geodiversidade é um tópico emergente com potencial inexplorado para garantir a funcionalidade dos ecossistemas e boas condições de vida para as pessoas em um momento de mudança ambientais (Alahuhta et al., 2022).

Neste contexto, o principal objetivo do artigo é realizar uma avaliação quantitativa e cartografar o potencial dos serviços ecossistêmicos prestados pela geodiversidade na Floresta Nacional de Carajás, localizada no estado do Pará, Brasil. Esta Unidade de Conservação é caracterizada como de uso sustentável, de acordo com o Sistema Nacional de Unidades de Conservação – SNUC (Brasil, 2000). O propósito é contribuir para a inclusão desse tipo de análise na gestão da Unidade de Conservação. Vale ressaltar que a área de estudo abrange também o Parque Nacional dos Campos Ferruginosos, que compartilha parte de seu território com a Floresta Nacional de Carajás.

6.2. ÁREA DE ESTUDO

A Floresta Nacional de Carajás está localizada a aproximadamente 540 km ao sul de Belém, a capital do estado do Pará, sudeste da Amazônia brasileira. Com uma área de 411.948 mil hectares, abrange os municípios de Parauapebas, Canaã dos Carajás e Água Azul do Norte (Figura 1).

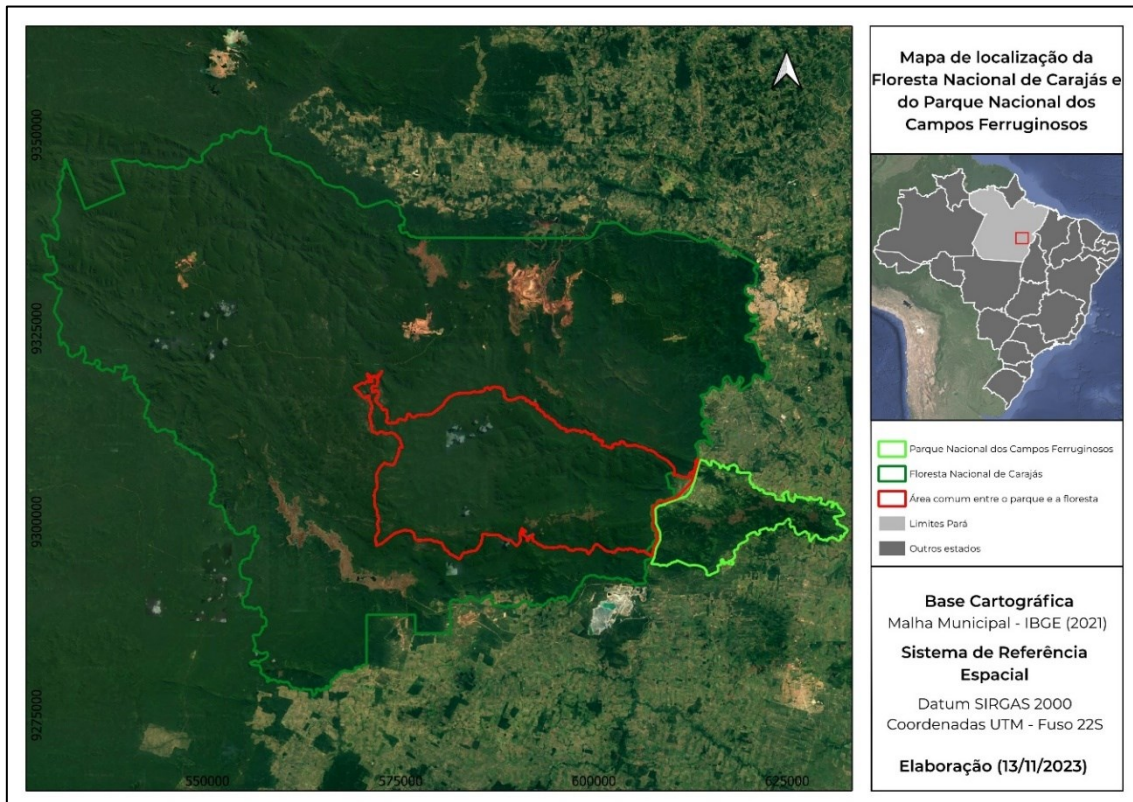


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo. Elaborado pelos autores.

Ao longo do tempo, essa região passou por transformações significativas, especialmente a partir do final da década de 1950, devido a fatores como a construção da rodovia Belém-Brasília, a implementação do I e II Planos Nacionais de Desenvolvimento, a construção da Transamazônica e a implementação da política de incentivos fiscais. Em 1967, a United States Steel descobriu reservas de minerais de ferro em Carajás, e em 1974, a Amazônia Mineração S/A obteve o direito de exploração desses recursos. Em 1980, lançou-se o Programa Grande Carajás para coordenar o desenvolvimento da Amazônia Oriental, oferecendo benefícios a empreendimentos na área. O Projeto Ferro Carajás teve início em 1981, com a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) assumindo a Amazônia Mineração S/A. Com a privatização da CVRD, a atual VALE, o governo criou

a Floresta Nacional de Carajás na mesma área, permitindo a continuidade da mineração. O decreto de criação nº 2.486, de 02 de fevereiro de 1998, estabeleceu obrigações para a VALE apoiar a gestão da floresta e de outras unidades de conservação (ICMBIO, 2016).

Enquadrando-se no grupo de Unidade de Conservação de uso sustentável, com importantes Terras Indígenas, a criação da Flona objetivou compatibilizar a conservação da natureza com o uso sustentável de parcela dos recursos naturais. A Flona está inserida em um dos geossistemas mais importantes do mundo: o Geossistema Ferruginoso de Carajás. Geossistemas Ferruginosos são áreas geográficas compostas principalmente por tipos de rochas ricas em ferro com paisagens complexas e detentoras de notável geodiversidade, incluindo a ocorrência de cavernas. (Ruchkys, 2015).

A região é drenada pela bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas que desagua no sistema fluvial-hidroviário Araguaia-Tocantins, e caracteriza-se por apresentar uma série de serras descontínuas e extensos vales. As principais elevações conhecidas como Serra Norte e Serra Sul integram a denominada Dobra de Carajás, onde estão localizados os corpos de minério de ferro de alto teor ($> 64\%$ de Fe) contidos nas camadas de jaspilito (Lobato, 2005).

6.3. MÉTODOS

Os procedimentos metodológicos para quantificação e espacialização dos serviços ecossistêmicos da geodiversidade foram adaptados de Santos et al. (2023) e distribuídos em duas etapas principais: (i) Reconhecimento e classificação dos serviços ecossistêmicos (SE) fornecidos pela geodiversidade; (ii) Contagem de ocorrências de cada tipo de serviço de geodiversidade. Esses procedimentos estão detalhados a seguir.

Com base na disponibilidade de dados para a área de pesquisa passíveis de serem espacializados, as variáveis de serviços de geodiversidade foram agrupadas conforme proposto por Gray (2019), nas seguintes categorias: reguladoras; de suporte; de provisão; e culturais (incluindo os serviços de conhecimento) (Tabela 1). Considerando a relevância da área em termos de ocorrência de cavernas, foram incluídos alguns serviços conforme propostos por Urban et al. (2022) e Meni e Bacci (2023); esses últimos autores os denominam de forma específica de serviços “espeleossistêmicos”.

Tabela 1: Serviços da geodiversidade considerados com base em Gray (2019), Urban et al. (2022), Meni e Bacci (2023)

Serviço	Categoria	Variável considerada
Regulação	Regulação de ecossistemas externos	Cavernas
	Regulação da qualidade da água	Lagos
		Poços
Suporte	Processos do solo (intemperismo; desenvolvimento do perfil do solo) e solo como meio de crescimento.	Solos
	Fornecimento de habitat (hábitats, cavernas, pavimentos de calcário, afloramentos, penhascos, escarpas e leitos de sal)	Cavernas
	Terra e água como plataforma para atividade humana	Litologia
		Aeródromo
		Dutovias
		Rodovias
Ferrovias		
Sepultamento e armazenamento (sepultamentos humanos e animais, aterros municipais, armazenamento de resíduos radioativos, captura e armazenamento de carbono, água armazenada em aquíferos, reservatórios e lagos).	Lagos	
Provisão	Minerais industriais (fertilizantes, produtos farmacêuticos, metais, ligas)	Empreendimento Minero-Metalúrgico Ativo
	Minerais industriais (fertilizantes, produtos farmacêuticos, metais, ligas)	Empreendimento Minero-Metalúrgico Projetado
	Minerais industriais (fertilizantes, produtos farmacêuticos, metais, ligas)	Recursos Minerais
	Minerais industriais (fertilizantes, produtos farmacêuticos, metais, ligas)	Títulos Minerários
	Provisão de abrigo	Cavernas
Cultural	Qualidade ambiental (características locais da paisagem; paisagens terapêuticas, paisagens para a saúde e bem-estar)	Turismo
		Lagos
		Cavernas
	Cultural, espiritual e histórico (folclore; locais sagrados; edifícios históricos de pedra; senso de lugar).	Sítios arqueológicos
Inspiração artística (materiais geológicos em esculturas; inspiração para arte, literatura, música, poesia)	Geomorfologia	
História da pesquisa ciência (no início, identificação de discordâncias, fósseis, rochas)	Litologia	

O mapeamento dos serviços da geodiversidade usou como referência as diferentes zonas do plano de manejo da Flona (ICMBIO, 2016). No Brasil *o plano de manejo de Unidades de Conservação* é um documento técnico que, a partir dos objetivos definidos no ato de sua criação, estabelece o zoneamento e as normas que norteiam o seu uso (Brasil, 2000). Para atender aos objetivos gerais das Florestas Nacionais e aos objetivos específicos da Floresta Nacional de Carajás (Flona- Carajás), foram definidas 7 zonas, a saber: Preservação, Primitiva, Uso Público, Uso Especial, Manejo Florestal Sustentável, Mineração e Conflitante (ICMBIO, 2016) (Tabela 2). É importante ressaltar que o Parque Nacional dos Campos Ferruginosos possui uma região que não se encontra abrangida pela Floresta Nacional de Carajás, estando assim fora do escopo do plano de manejo desta

última. Diante dessa situação, foi implementada uma adaptação, levando em consideração a área de interseção entre as duas unidades, designada como zona de preservação. Essa medida foi estendida para abranger a porção não incorporada pela Floresta Nacional de Carajás.

Tabela 2: Zonas estabelecidas no Plano de Manejo da Floresta Nacional de Carajás incorporando o Parque Nacional dos Campos Ferruginosos.

Zona	Área (ha)	% da Flona Carajás
Preservação	59.696,63	15,13
Primitiva	57.623,97	14,06
Uso público	7.582,05	1,92
Uso especial	16.237,38	4,11
Manejo florestal sustentável	196.551,88	49,81
Mineração	55.486,63	14,06
Conflitante	1.431,82	0,36

Fonte: ICMBIO (2016).

O mapeamento do potencial de serviços da geodiversidade feito dessa forma tem como objetivo considerar o espaço em áreas funcionais de acordo com suas características e quantidades de serviços presentes. Esses espaços funcionais podem ser baseados em: zoneamento de plano de manejo (como o caso desse artigo), bacias hidrográficas, limites municipais, enfim, diferentes tipos de áreas para planejamento e gestão.

Após a seleção das variáveis que representam os diferentes tipos de serviços de geodiversidade, os dados cartográficos foram reprojatados para o sistema de coordenadas geodésicas - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000 (SIRGAS 2000). Uma tabela foi construída para cada uma das zonas relacionando o número de ocorrências de cada um dos serviços de geodiversidade à área da zona. O próximo passo baseou-se na contagem de ocorrências de cada tipo de serviço de geodiversidade por categoria considerando as zonas do Plano de Manejo (Tabela 3).

Tabela 3: Número de ocorrências das variáveis consideradas por zona do Plano de Manejo.

Variável	Categoria de Serviço	Manejo Florestal	Mineração	Preservação	Primitiva	Uso conflitante	Uso especial	Uso público
Cavernas	Regulação Suporte Provisão Cultural	292	946	257	55	0	49	0
Sítios arqueológicos	Cultural	17	68	1	0	0	5	0
Lagoas	Regulação Suporte Cultural	7	7	0	0	0	5	0
Litologia	Suporte Cultural	12	8	5	7	2	9	2
Geomorfologia	Cultural	7	5	4	7	3	6	2
Solos	Suporte	9	6	6	6	4	6	3
Geoturismo, ecoturismo	Cultural	1	4	1	0	1	2	1
Poços	Regulação	0	82	7	0	0	1	0
Aeródromo	Suporte	0	1	0	0	0	1	0
Dutovias	Suporte	0	0	1	0	0	0	0
Rodovias	Suporte	0	1	0	1	0	1	0
Ferrovias	Suporte	0	0	0	0	0	1	0
Empreendimento Minerometalúrgico Ativo	Provisão	0	4	1	2	0	0	0
Empreendimento Minerometalúrgico Projetado	Provisão	2	2	4	1	0	2	0
Recursos Minerais	Provisão	14	11	9	8	0	3	1
Títulos Minerários	Provisão	123	44	33	50	9	67	13

Fonte: ICMBIO (2016).

6.4. RESULTADOS

O potencial de serviços considerando todas as categorias é muito elevado exclusivamente na zona de manejo de mineração (Figura 2). Esse comportamento se repete de forma igual para os serviços culturais, de regulação e de suporte. Essa classificação é majoritariamente influenciada pela presença significativa de cavernas, sendo que nesta área estão registradas mais de 900 ocorrências, superando em número as demais zonas.

Quanto à zona de mineração (Figura 3), o plano de manejo a define como as áreas correspondentes aos direitos de pesquisa e lavra de depósitos minerais, assim como a infraestrutura associada, devidamente registradas no Departamento Nacional de Produção

Mineral - DNPM. Esta área engloba minas já instaladas de ferro, de manganês e uma mina de ouro desativada, além das minas de cobre já licenciadas, mas ainda não instaladas, bem como as minas de areia e granito, utilizadas internamente pela mineradora. Na mesma zona, encontram-se também jazidas de minério de ferro ainda não licenciadas (ICMBIO, 2016).

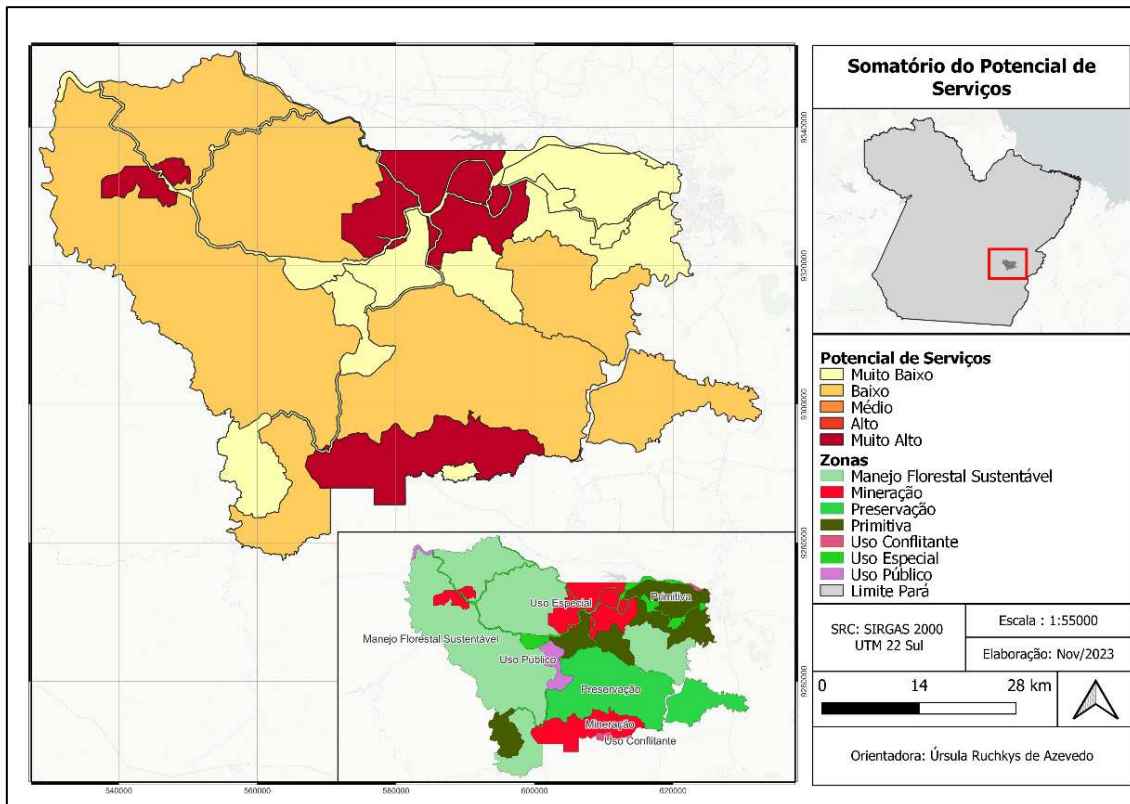


Figura 2: Mapa síntese do potencial de serviços ecossistêmicos da geodiversidade na Flona Carajás. Elaborado pelos autores



Figura 3: Uma das minas em minério de ferro localizada na zona de mineração da Flona Carajás.

O propósito desta zona (ICMBIO, 2016) é concentrar as atividades de mineração, visando minimizar o impacto nas áreas adjacentes e em outras zonas. São estabelecidas diretrizes, como a garantia da recuperação de áreas degradadas, a proibição de desmatamentos para a formação de pilhas de estéril, e a priorização do uso de cavas exauridas para deposição de material estéril ou sua disposição fora da Floresta Nacional. Além disso, destaca-se a prioridade dada ao uso de espécies nativas na recuperação de áreas degradadas, sendo estritamente proibido o uso de espécies exóticas invasoras. Adicionalmente, áreas com a presença de espécies endêmicas da Floresta Nacional de Carajás somente poderão ser mineradas se a espécie estiver presente em outras áreas protegidas da mineração, garantindo a manutenção de populações viáveis.

Importante ressaltar que o Plano de Manejo, de maneira específica, não aborda considerações sobre cavernas, limitando-se a questões legais e não indicando requisitos para a mineração em relação a esse aspecto. As cavernas desempenham um papel crucial na regulação de ecossistemas, influenciando diretamente a qualidade e estabilidade dos ambientes externos, particularmente nos geossistemas ferruginosos. Portanto, seria pertinente abordar aspectos como a conservação da biodiversidade subterrânea, a manutenção da qualidade da água, a estabilidade do solo e outros serviços ecossistêmicos de regulação oferecidos por esse ambiente único. No âmbito dos serviços ecossistêmicos culturais, as cavernas em ferro desempenham um papel significativo do ponto de vista científico, arqueológico, educativo e turístico (Figura 4).



Figura 4: Cavernas utilizadas para atividades educativas e didáticas pela equipe do ICMBio.

No que diz respeito aos serviços ecossistêmicos de suporte, as cavernas desempenham um papel fundamental na manutenção da biodiversidade subterrânea. Elas fornecem habitats únicos para uma miríade de organismos adaptados a condições de escuridão, baixa disponibilidade de alimentos e variações extremas de temperatura. Esses ecossistemas cavernícolas, muitas vezes delicadamente equilibrados, desempenham um papel crucial na conservação de espécies endêmicas e na promoção da diversidade genética.

Para além das cavernas, a variável “lagoas” tem influência significativa na classificação de potencial muito alto para serviços culturais, de regulação e de suporte na zona de mineração. Nessa zona, encontram-se lagoas de altitude que desempenham um papel crucial na regulação do ciclo hidrológico (Figura 5). Funcionando como reservatórios naturais, esses ecossistemas armazenam água em períodos de excedente, liberando-a estrategicamente durante fases de escassez.



Figura 5: Visão panorâmica da Lagoa do Violão uma das lagoas de altitude do Geossistema Ferruginoso Carajás que se destaca na paisagem. Foto: Darcy dos Santos.

Este processo desempenha um papel fundamental na manutenção de um fluxo hídrico estável. Adicionalmente, as lagoas desempenham uma função de destaque na promoção da qualidade da água, servindo como eficientes filtros naturais que removem poluentes e sedimentos. Ainda pode-se destacar seu papel crucial no ciclo hidrológico regional para recarga dos aquíferos. No âmbito do valor cultural, as lagoas de altitude se destacam como características geográficas singulares, dotadas de uma beleza cênica notável. Localizadas em áreas montanhosas, desempenham um papel crucial na configuração das paisagens, constituindo-se em elementos de destaque na identidade cultural das regiões em que estão inseridas. Além disso, sua presença pode catalisar

significativamente o desenvolvimento do turismo e da recreação, proporcionando experiências únicas aos visitantes e gerando oportunidades econômicas para as comunidades locais.

Os serviços ecossistêmicos de provisão demonstraram um comportamento diferenciado em relação aos demais serviços na região estudada. Na zona de mineração, esses serviços mantiveram-se classificados como muito altos, enquanto na zona de Manejo Florestal Sustentável apresentaram-se em nível médio. Este último abrange a maior área da Floresta Nacional de Carajás (FN Carajás), devido ao seu potencial para uso múltiplo, identificado por meio da exploração de produtos não madeireiros, como o jaborandi, e a viabilidade de pesquisa mineral. Embora a categoria de manejo florestal madeireiro esteja entre os objetivos da FN Carajás, o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) considera inviável a compatibilização da mineração com a exploração madeireira nesta unidade de conservação, devido à complexidade dos arranjos e aos impactos decorrentes das atividades mineradoras atualmente desenvolvidas. Algumas áreas de savana metalófila foram incluídas na zona de manejo florestal sustentável com o intuito de garantir a continuidade das pesquisas ambientais e geológicas. Essas pesquisas visam subsidiar uma próxima revisão do plano de manejo, possibilitando a inclusão dessas áreas em zonas apropriadas para mineração ou conservação, conforme os resultados dos estudos realizados (ICMBio, 2016).

Cabe destacar que a Zona de Preservação no Plano de Manejo foi classificada, nesse estudo, como de baixo potencial para serviços ecossistêmicos da geodiversidade. A baixa densidade de cavernas, quando comparada as ocorrências na área de mineração, bem como a ausência de lagoas, contribuiu para essa classificação. A Zona de Preservação é o espaço onde a natureza permanece em seu estado mais primitivo, conservando-se livre de quaisquer intervenções humanas, representando, assim, o mais alto nível de preservação. Ela desempenha um papel fundamental como matriz para a regeneração das outras zonas, onde atividades humanas regulamentadas são permitidas. Esta zona é dedicada à proteção integral dos ecossistemas, dos recursos genéticos e à realização de monitoramento ambiental. Do ponto de vista científico, é importante destacar que, além da preservação dos ecossistemas e recursos genéticos, a Zona de Preservação também pode possuir um potencial significativo em termos de patrimônio espeleológico e geodiversidade. É altamente oportuno direcionar recursos para a prospecção dessa área, a fim de realizar um mapeamento detalhado dos serviços ecossistêmicos que podem ser disponibilizados pela geodiversidade presente. Isso incluiria não apenas a identificação e

conservação de cavernas e formações geológicas únicas, mas também a compreensão dos processos geodinâmicos e dos serviços ecossistêmicos associados, como a regulação hidrológica, a manutenção da qualidade do solo e a conservação da biodiversidade subterrânea. Essas informações serão valiosas para subsidiar medidas de gestão e conservação mais eficazes, visando garantir a integridade e a resiliência desses sistemas naturais.

6.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Compreendendo a importância da replicabilidade e acessibilidade da metodologia adotada, é crucial ressaltar que a abordagem utilizada neste estudo é simples e de fácil replicação. Ao adaptar os procedimentos metodológicos propostos por Santos et al. (2023), buscou-se garantir uma metodologia acessível e eficiente para a avaliação preliminar dos serviços ecossistêmicos prestados pela geodiversidade na Floresta Nacional de Carajás.

Os resultados obtidos revelam que a zona de manejo de mineração emerge como uma área de destaque, apresentando um potencial consideravelmente elevado para uma variedade de serviços ecossistêmicos, incluindo serviços culturais, de regulação e de suporte. Esse destaque está diretamente relacionado à presença significativa de cavernas e lagoas de altitude, que desempenham papéis cruciais na regulação dos ecossistemas locais.

No entanto, é importante reconhecer que os resultados obtidos devem ser interpretados com cautela, uma vez que podem ser considerados preliminares devido a algumas limitações. Primeiramente, a disponibilidade de dados pode variar entre as diferentes zonas da Unidade de Conservação, o que pode afetar a precisão e abrangência das análises realizadas. Além disso, é importante considerar a possível discrepância entre estudos sistemáticos realizados na região devido, em parte, às diferenças de intensidade no esforço amostral e nas facilidades de acesso, especialmente em relação ao levantamento do patrimônio espeleológico. Os lagos, por sua vez, provavelmente estão sub-representados devido às restrições impostas pelas definições quanto a presença e dimensões em diferentes estações do ano e em função das variações anuais de pluviosidade e de retenção de umidade em superfície.

Essas limitações destacam a necessidade de futuras pesquisas e avaliações mais detalhadas, que possam complementar e aprimorar os resultados apresentados neste estudo. No entanto, mesmo diante dessas considerações, os resultados obtidos oferecem insights valiosos sobre o potencial dos serviços ecossistêmicos da geodiversidade na região e podem servir como uma base sólida para orientar a gestão e conservação da Floresta Nacional de Carajás e do Parque Nacional dos Campos Ferruginosos, podendo contribuir para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficazes e sustentáveis para essas importantes unidades de conservação.

7. EXPLORANDO ESTRATÉGIAS DE GEOCONSERVAÇÃO NO GEOSSISTEMA FERRUGINOSO CARAJÁS PARA DIFERENTES CONTEXTOS E OBJETIVOS

Úrsula de Azevedo Ruchkys

Darcy dos Santos

Mauro Gomes

Luiz Eduardo Panisset Travassos

Heros Augusto Santos Lobo

7.1. INTRODUÇÃO

A geodiversidade pode ser conceituada como a diversidade de elementos geológicos, geomorfológicos e características do solo, abrangendo os processos formadores e modeladores desses elementos. Ela engloba uma variedade de componentes do meio abiótico e uma ampla gama de fenômenos e processos responsáveis pela formação de paisagens, rochas, minerais, fósseis e solos (Gray e Gordon, 2020; Crofts et al., 2020; Li, 2021). A geodiversidade manifesta-se em todos os aspectos da paisagem e pode incorporar valores culturais ligados à sua interação com as comunidades locais (Pescatore et al., 2023).

O termo geoconservação foi cunhado pela primeira vez por Sharples (1993) ao abordar a necessidade premente de proteger os processos naturais na Terra, com ênfase especial nos fenômenos geomorfológicos, hidrológicos e do solo. Essa prática se torna crucial para assegurar a sustentabilidade dos ecossistemas como um todo, considerando que os sistemas e processos terrestres abióticos exercem um controle significativo e interagem de maneira intrínseca com as comunidades bióticas que neles coexistem. Portanto, reconhece-se a importância equiparada dos componentes não vivos do ambiente natural para a preservação tanto do próprio ambiente quanto de seus elementos vivos. Isso implica a necessidade de uma gestão cuidadosa e específica desses elementos da geodiversidade, a fim de garantir a integridade ecológica do todo.

Conforme ressaltado por Gordon et al. (2021), a concepção de geoconservação, para alguns estudiosos, está intrinsecamente ligada à preservação de características geológicas ou geomorfológicas singulares e processos que merecem salvaguarda devido ao seu valor científico (Brilha, 2016, 2018). Entretanto, outros pesquisadores defendem uma abordagem mais ampla, incluindo a conservação da geodiversidade ou a aplicação

de princípios de conservação sempre que se demonstra valor (por exemplo, no apoio à conservação da biodiversidade ou na garantia do funcionamento de ecossistemas saudáveis e dos serviços que proporcionam).

A geoconservação emerge como uma disciplina interdisciplinar que visa a preservação de sítios geológicos de relevância científica, educacional e cultural (Gray, 2013). Não se limita apenas a garantir a proteção física desses locais, mas também busca promover a compreensão da dinâmica geológica e sua importância para a sociedade (Brilha, 2016). Ela engloba não apenas um conjunto de disposições legislativas, ferramentas administrativas e técnicas de análise, gestão e avaliação, mas também incorpora medidas práticas para fomentar o crescimento equilibrado dos três pilares fundamentais do desenvolvimento sustentável: o meio ambiente, a sociedade e a economia (Pescatore et al., 2023). Essa abordagem holística não apenas visa a preservação eficaz dos elementos geodiversos, mas também busca promover um equilíbrio entre a conservação ambiental, o bem-estar social e o desenvolvimento econômico.

Essa prática desempenha um papel fundamental na preservação da geodiversidade, adotando estratégias sustentáveis de gestão e educação ambiental. Essa abordagem é essencial para assegurar a continuidade dos processos geológicos e preservar a integridade dos registros paleontológicos, geomorfológicos e mineralógicos que compõem nossa herança geológica (Gordon et al., 2017). Para além da conservação de locais de relevância científica, a geoconservação reconhece as interconexões com outros valores da geodiversidade, incluindo aspectos culturais. Essa perspectiva oferece uma variedade de oportunidades para aprimorar e promover a geoconservação por meio de atividades que envolvem experiências estéticas e emocionais. Além disso, a interpretação utilizando diferentes filtros culturais incentiva a redescoberta de um senso de maravilha tanto em relação às histórias geológicas presentes na paisagem quanto às interações humanas (Gordon, 2019). Assim, uma convergência intrínseca de objetivos se manifesta entre a preservação e a promoção do turismo focado nas características da geodiversidade, conhecido como geoturismo (Louz et al., 2022).

A geoconservação, com seus objetivos amplos e abrangentes, estabelece uma base sólida para a proteção consciente da geodiversidade, enquanto o geoturismo se apresenta como uma ferramenta dinâmica para compartilhar esse patrimônio com o público. Além de sua dimensão educacional, o geoturismo proporciona experiências imersivas, enriquecendo a compreensão do valor intrínseco das características geodiversas e

incentivando uma apreciação mais profunda da interação entre a geodiversidade, a biodiversidade e as comunidades locais.

Hose (2012) destaca que essa ênfase eleva o geoturismo acima de outras modalidades de turismo natural, como o ecoturismo, e ressalta sua importância na educação ambiental. A implementação eficaz de estratégias de geoturismo exige não apenas gestão profissional, mas também a conservação responsável e a vigilância contínua da geodiversidade (Gordon, 2019), sendo a integração da educação ambiental crucial para proporcionar uma base sólida de conscientização e engajamento. Esses requisitos fundamentais constituem alicerces essenciais para assegurar a geoconservação, o sucesso e a sustentabilidade das iniciativas voltadas ao geoturismo e para o uso didático da geodiversidade.

No Antropoceno, a pesquisa sobre sustentabilidade do turismo não deve restringir-se exclusivamente aos desafios humanos e à diminuição da natureza biótica em destinos turísticos notáveis. É crucial que os acadêmicos do turismo incorporem a preocupação com a geodiversidade, que desempenha papel essencial ao fornecer recursos e serviços indispensáveis para o turismo global (Chakraborty, 2022).

Neste contexto, concebemos a geoconservação como um campo multidisciplinar e holístico, abarcando diversos objetivos e escopos destinados à conservação, estudo e divulgação da geodiversidade, com enfoques científicos, educacionais e turísticos. Além desses, destacamos outras perspectivas a serem consideradas: (1) Biodiversidade - conservação de características geológicas essenciais para a diversidade biológica e preservação de habitats associados à geodiversidade; (2) Recursos hídricos - garantia da qualidade da água e proteção de nascentes e rios subterrâneos; (3) Valores culturais e históricos - proteção de características geológicas com significado cultural e histórico para comunidades locais e povos indígenas; (4) Geoconservação com fins educacionais globais - sítios considerados "embaixadores" do conhecimento geológico, facilitando a compreensão global dos fenômenos geológicos e promovendo cooperação internacional em educação e pesquisa.

Nessa prática, Urban et al. (2022) destacaram a importância do uso de exemplos claros de elementos da geodiversidade, como as cavernas, mesmo que não revelem um valor científico imediato. Essa abordagem visa reconhecer que esses elementos são cruciais para o desenvolvimento das civilizações e para a história econômica humana, estabelecendo uma conexão da geodiversidade não apenas à história evolutiva das civilizações, mas também à economia atual e aos planos para o futuro.

As cavernas desempenham papel crucial no turismo, atraindo um expressivo número de visitantes globalmente a cada ano. Segundo Cigna (2016), experimentaram notável aumento de popularidade e desenvolvimento turístico na década de 1980, com as visitas a esses locais, também conhecidos como show caves, alcançando 26 milhões. Esse período foi marcado por uma exploração extensiva de objetos espeleológicos para fins turísticos e econômicos, resultando em desafios emergentes de sustentabilidade e preservação do ecossistema subterrâneo.

Além de serem destinos turísticos populares, as cavernas frequentemente se tornam centros de pesquisa multidisciplinar, envolvendo espeleólogos, geólogos, geógrafos, arqueólogos, antropólogos e outros especialistas. A exploração e compreensão dos valores naturais e culturais das cavernas são cruciais, contribuindo não apenas para a melhoria da qualidade de vida, mas também para o enriquecimento de nosso conhecimento sobre esses ambientes subterrâneos fascinantes (Antić et al, 2022; Buchanan et al, 2022). Isso enfatiza a necessidade de investigar mais profundamente o potencial e os valores da geoherança, visando à elaboração de estratégias eficazes de geoconservação com diferentes enfoques (Antić et al., 2020).

Esse tipo de abordagem em cavernas não segue um modelo único, mas incorpora um conjunto de estratégias adaptativas, reconhecendo a diversidade e singularidade inerentes a cada ambiente subterrâneo. Ao contemplar diferentes escopos e objetivos, visa não apenas à conservação desses locais, mas também ao compartilhamento de sua riqueza com as gerações presentes e futuras, contribuindo assim para a compreensão global e sustentabilidade desses ambientes únicos.

Nesse cenário, os geossistemas ferruginosos emergem como detentores valiosos de cavernas ainda pouco exploradas. Esses geossistemas são áreas geográficas compostas principalmente por tipos de rochas ricas em ferro e, no Brasil, estão limitados a algumas regiões no estado de Minas Gerais, como o Quadrilátero Ferrífero, a borda leste da Serra do Espinhaço, o Vale do Rio Peixe Bravo, bem como o Pará, abrangendo a Serra de Carajás, a Bahia, no Vale do Rio São Francisco, e o Mato Grosso do Sul, no planalto do Urucum (Ruchkys, 2015).

Albuquerque (2017) destaca que os estudos pioneiros sobre cavernas ferríferas remontam a Axelrod et al. (1952), que forneceram um registro significativo descrevendo uma caverna formada em minério de ferro maciço nos Montes Bomi, no noroeste da Libéria. No território brasileiro, os trabalhos iniciais sobre cavernas ferríferas, formadas em minério de ferro e rochas associadas, foram conduzidos por Simmons (1963) no

Quadrilátero Ferrífero. Adicionalmente, Tolbert et al. (1971) e Maurity e Kotschoubey (1995) exploraram cavernas ferríferas na Serra dos Carajás.

Até os primeiros anos do século XXI, as cavernas localizadas em formações de rochas ferríferas eram amplamente subestimadas e pouco exploradas no território brasileiro. A maioria dos estudos espeleológicos estava concentrada nas cavernas calcárias de maiores dimensões e com uma maior abundância de formações decorativas. Contudo, a virada do século testemunhou uma notável transformação nesse cenário, impulsionada pela crescente demanda chinesa por minério de ferro, acarretando alterações significativas.

Essa mudança de cenário levou a novas regulamentações e legislações no Brasil voltadas para a preservação das cavernas, resultando em um aumento notável do interesse pelos geossistemas de rochas ferríferas no âmbito das pesquisas espeleológicas. Esses esforços culminaram na produção de dados relevantes, evidenciando o considerável potencial dos ambientes em rochas ferríferas, o que enfatiza a necessidade de atenção e medidas eficazes de conservação (Piló et al., 2015).

Os primeiros estudos que abordaram o potencial educativo e turístico das cavidades em geossistemas ferruginosos datam de uma época ainda mais recente (Ruchkys et al., 2015; Ruchkys et al., 2018; Santos et al., 2021).

No contexto apresentado, o principal propósito deste artigo é realizar uma avaliação preliminar de seis cavidades em geossistema ferruginoso, visando destacá-las como recursos fundamentais para impulsionar o desenvolvimento do geoturismo e atividades educativas na região de Carajás, Pará, Brasil. A avaliação inicial das cavernas tem como foco principal a determinação de sua relevância na geoconservação, fundamentando-se nas características da geodiversidade investigadas localmente.

7.2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no sudeste do estado do Pará inserida na Floresta Nacional de Carajás, uma unidade de conservação ambiental, abrangendo aproximadamente 411.948,87 hectares (Brasil, 1998). A região engloba quase toda a extensão das Serras dos Carajás, reunidas em dois grandes conjuntos: a Serra Norte e a Serra Sul, situadas a uma altitude de aproximadamente 800 metros acima do nível do mar, ambas com extensão aproximada de 20 km de comprimento no sentido Leste-Oeste e

largura que varia entre 1 e 3 km, além de diversas outras serras de menores dimensões em meio a estas. Nestas serras, encontram-se as principais jazidas de minério de ferro da FLONA de Carajás (Figura 1).

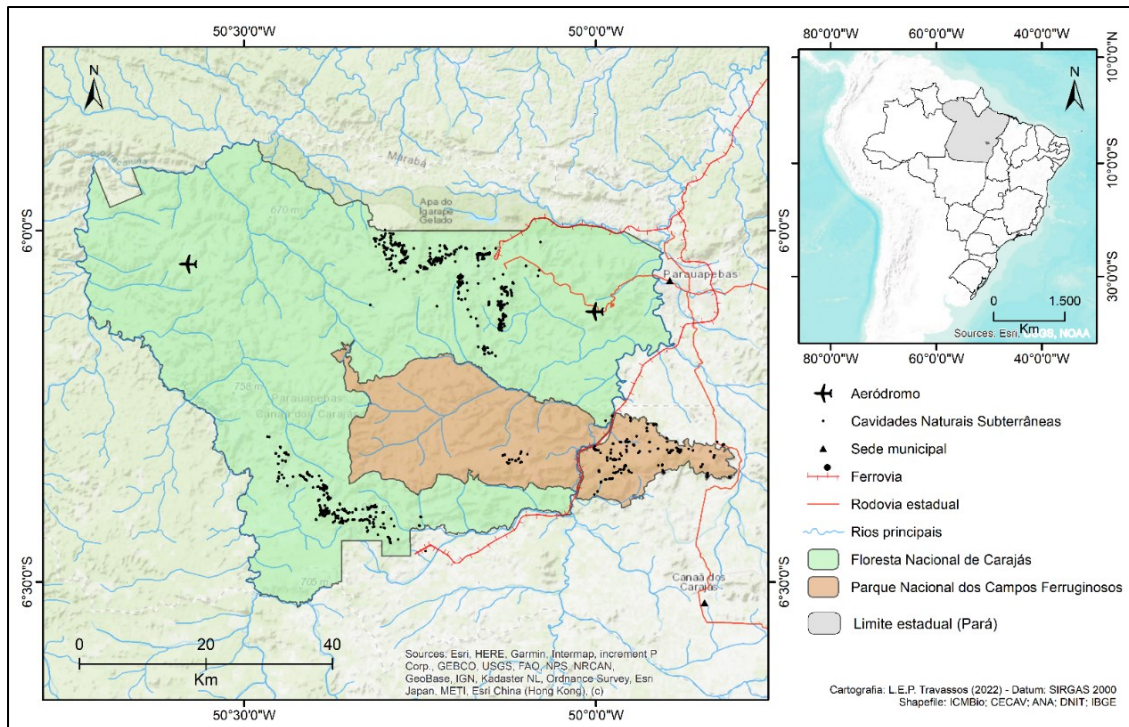


Figura 1: Localização da área de estudo.

Essa unidade de conservação da Amazônia Legal é notória por abrigar uma rica biodiversidade, caracterizada por níveis notáveis de raridade e endemismo tanto na flora quanto na fauna. A geodiversidade é caracterizada por uma variedade de formações geológicas e rochas, maciços resíduas e conjuntos de cristas e picos; sistemas hídricos complexos e uma notável concentração de minérios (Pontes et al., 2019).

A Região de Carajás está situada no domínio do Planalto Dissecado do Sul do Pará, que se caracteriza por maciços residuais com topos aplainados e conjuntos de cristas e picos interpenetrados por faixas de terrenos mais baixos (Brasil, 1974). Em termos gerais, os topos regionais apresentam extensão considerável e são aplainados, tendendo localmente a formatos tabulares, representando vestígios de uma superfície de aplainamento resultante de uma pediplanação terciária que remodelou um Pediplano Cretáceo ou Pré-Cretáceo (Araújo e Maia, 1991).

A geomorfologia regional é delineada pelo conjunto de serras, a saber: Norte, Sul, Leste, Bocaina, Tarzan, São Félix, Xingu e Arqueada. Nesse conjunto, são catalogadas 2084 cavernas, distribuídas de forma abrangente por toda a região. As seis cavernas objeto

deste estudo estão localizadas na Serra Norte, situada no município de Parauapebas e Serra Sul, no município de Canaã dos Carajás, integrante da Mesorregião Sudeste do Estado do Pará. Essas cavidades são caracterizadas como cavidades formadas tanto na interface entre a crosta laterítica e o saprólito das rochas do Grupo Grão-Pará (jaspilito e rochas máficas associadas) quanto integralmente sob as cangas (Piló; Auler; Martins, 2015).

6.5. MÉTODOS

A metodologia adotada nesta pesquisa fundamenta-se nas abordagens de Wo e Kim (2018) e Santos et al. (2021). Ademais, novos itens e critérios de avaliação foram desenvolvidos para enriquecer a análise. A avaliação das cavernas é realizada considerando quatro propósitos distintos, por vezes complementares, de geoconservação: pesquisa científica e monitoramento contínuo, com base na estrutura proposta por Wo e Kim (2018); uso didático, conforme descrito por Santos et al. (2021); aproveitamento turístico; e contribuição para a educação global em geociências. Para cada critério, foram atribuídas notas de 1 (Insatisfatório ou Não Avaliado) a 5 (Excelente). Os critérios específicos para a avaliação da geoconservação, levando em conta seus diversos propósitos, são apresentados na Tabela 1.

A categoria de geoconservação destinada à pesquisa científica e monitoramento (GPM) foi submetida à avaliação de 6 critérios: dimensão, espeleotemas, feições de microtopografia, sedimentos da caverna, minerais da caverna e outras características geológicas especiais. A soma das notas atribuídas para cada critério varia entre 6 e 30. A categoria de geoconservação voltada para atividades didáticas (GAD) foi avaliada com base em 8 critérios: dimensão, acessibilidade, infraestrutura, riscos para visitantes, relevância educacional, integração curricular, interatividade e engajamento, facilidade de compreensão. A soma das notas atribuídas para cada critério pode variar entre 8 e 40. A categoria de geoconservação destinada a atividades turísticas (GAT) foi analisada através de 7 critérios: dimensão, acessibilidade, infraestrutura, riscos para visitantes, interatividade e engajamento, facilidade de compreensão, interpretação cultural. A soma das notas atribuídas para cada critério pode variar entre 7 e 35. A categoria de geoconservação para atividades educacionais globais (GEG) foi avaliada considerando 6 critérios: dimensão, espeleotemas, feições de microtopografia, minerais da caverna,

outras características geológicas especiais e relevância internacional. A soma das notas atribuídas para cada critério pode variar entre 6 e 30.

Em relação a dimensão foram utilizadas as planilhas fornecidas pela Vale para a Oficina sobre a revisão do plano de manejo da Flona. Os parâmetros disponíveis são os exigidos para classificação de grau de relevância – projeção horizontal, área e volume. Em relação aos minerais de caverna foram usados como referência os trabalhos de Scherer (2023) e Piló et al (2023).

No que diz respeito à infraestrutura, foi considerada a viabilidade da implantação de elementos básicos para acomodar visitantes. Nesse contexto, as avaliações foram fundamentadas na análise do grau de complexidade necessário para a realização dessa instalação, que inclui fatores como a topografia do local, os requisitos específicos para a infraestrutura básica, bem como aspectos práticos, como a facilidade de acesso e a necessidade de adaptações no terreno.

Critérios	Itens de Avaliação	Geoconservação para pesquisa científica e monitoramento contínuo (GPM)	Geoconservação para atividades didáticas (GAD)	Geoconservação para atividades turísticas (GAT)	Geoconservação para fins educacionais globais (GEG)
Dimensão	- Seções transversais e longitudinais - Presença de seções transversais significativas que mostram os processos de formação da caverna	x	x	x	x
Espeleotemas	- Distribuição de espeleotemas - Densidade de espeleotemas - Presença de tipos raros de espeleotemas - Presença de tamanhos raros de espeleotemas - Estado de conservação dos espeleotemas	x			x
Feições de microtopografia	- Presença e frequência de distribuição de características microtopográficas, como escarpas, terraços, nichos e entalhes, linhas de paleo-riachos, cobertura vegetal, piso falso, superfície corroída etc.	x			x
Sedimentos da caverna	- Presença de sedimentos de caverna que evidenciam processos de formação de caverna - Boa exposição de sequências fluviais e lacustres - Presença de sedimentos de caverna para pesquisas científicas, como paleoclima, paleomagnetismo, etc.	x			
Minerais da caverna	- Presença de minerais diferentes - Presença de espessos depósitos de guano para possíveis novas descobertas de minerais - Presença de espeleotemas com mineralogia incomum - Espeleotemas mostrando o processo diagenético de transformação mineral	x			x
Outras feições geológicas especiais	- Presença de grandes lagos (com organismos de caverna) - Boa exposição de fósseis nas paredes da caverna - Presença de passagens submersas na caverna - Outros	x			
Acessibilidade	- Facilidade de acesso à caverna - Distância de estradas principais - Possibilidade de instalações para visitantes com mobilidade reduzida.		x	x	
Infraestrutura	- Possibilidade para instalação de infraestrutura básica para visitantes, como passarelas, iluminação adequada e sinalização interpretativa.		x	x	
Riscos para Visitantes	- Reportada presença de gases tóxicos, instabilidade de formações rochosas e a possibilidade de inundações		x	x	
Relevância Educacional	- Importância geológica e histórica da caverna em relação aos currículos educacionais locais		x		
Proximidade a instituições educacionais	- Proximidade a instituições educacionais. - Condições de trilhas e acessos para garantir a segurança dos visitantes. - Possibilidade de implementação de medidas de segurança adequadas para atividades didáticas.		*		
Integração Curricular	- Relevância da caverna para os currículos educacionais locais e nacionais. - Potencial de integração da caverna em diferentes disciplinas. - Colaboração com escolas e professores para desenvolver programas educativos.		x		
Interatividade e Engajamento	- Possibilidade de implantação de elementos interativos, como painéis educativos, aplicativos móveis ou realidade aumentada. - Potencial para atividades práticas e experimentos educativos. - Possibilidade de implantação de design de trilhas e passarelas que promovam a exploração interativa.		x	x	
Facilidade de Compreensão	- Possibilidade de desenvolvimento de visitas guiadas em níveis de linguagem e comunicação acessíveis para diferentes faixas etárias. - Possibilidade de desenvolvimento de recursos educacionais adaptados para pessoas com deficiência.		x	x	
Interpretação Cultural	- Potencial de incorporação de elementos culturais e históricos na interpretação turística.			x	
Relevância Internacional	- Importância da caverna em termos de potencial para pesquisa global				x

	<ul style="list-style-type: none">- Potencial para promover o geossítio como uma ferramenta educacional global, com desenvolvendo materiais educativos- Impacto das descobertas da caverna na compreensão global de fenômenos geológicos.				
--	--	--	--	--	--

Após a análise dos resultados as cavernas foram classificadas em relação a seu potencial para as diferentes categorias de geoconservação, bem como foram propostas estratégias para sua gestão.

7.4. RESULTADOS

As cavernas analisadas se localizam na Serra Norte e Serra Sul e são assim discriminadas: Paleotoca (S11-07); Vale da Lua (N4WS-0067); Guarita (N1_0004); Mapinguari (N1_0002) Caverna da Dolina (N1_0096); N3_023. As notas atribuídas para as seis cavernas analisadas em relação aos parâmetros definidos é apresentada na Tabela 2.

Caverna	Paleotoca (S11-07)	Vale da Lua (N4WS-0067)	Guarita (N1_0004)	Mapinguari (N1_0002)	Caverna da Dolina (N1_0096)	N3_023
Crítérios	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota
Dimensão	5	5	5	3	5	5
Espeleotemas	1	5	2	2	2	5
Feições de microtopografia	4	5	3	1	3	5
Sedimentos da caverna	3	2	3	3	3	3
Minerais da caverna	1	5	2	2	2	5
Outras feições geológicas especiais	5	2	1	1	1	1
Acessibilidade	2	3	4	4	3	2
Infraestrutura	1	1	4	4	3	2
Riscos para Visitantes	2	3	2	2	3	3
Relevância Educacional	5	5	4	3	4	5
Integração Curricular	0	0	5	5	0	0
Interatividade e Engajamento	0	2	5	5	0	0
Facilidade de Compreensão	4	4	5	5	5	4
Interpretação Cultural	3	4	5	5	4	4
Relevância Internacional	5	5	2	2	2	5
GPM (6-30)	19	24	16	12	16	24
GAD (8-40)	23	21	34	40	23	21
GAT (7-35)	21	22	30	28	23	20
GEG (6-30)	21	27	15	11	15	26

Após a contagem final as cavernas foram assim reclassificadas de forma temática (Tabela 3):

- GPM (6-30): Baixo (6-12); Médio (12-18); Alto (18-24); Muito Alto (24-30).
- GAD (8-40): Baixo (8-16); Médio (16-24); Alto (24-32); Muito Alto (32-40).
- GAT (7-35): Baixo (7-14); Médio (14-21); Alto (21-28); Muito Alto (28-35).
- GEG (6-30): Baixo (6-12); Médio (12-18); Alto (18-24); Muito Alto (24-30).

	GPM (6-30)	GAD (8-40)	GAT (7-35)	GEG (6-30)
Paleotoca (S11-07)	Médio	Médio	Médio	Alto
Vale da Lua (N4WS-0067)	Alto	Médio	Alto	Muito Alto
Guarita (N1_0004)	Médio	Muito Alto	Muito Alto	Médio
Mapinguari (N1_0002)	Baixo	Muito Alto	Alto	Baixo
Caverna da Dolina (N1_0096)	Médio	Médio	Alto	Médio
N3_023	Alto	Médio	Médio	Muito Alto

7.4.1. Paleotoca (S11-07)

A paleotoca deve ter como principal objetivo a Geoconservação para Atividades Educacionais Globais (GEG). Com uma projeção horizontal de 1.546 metros, uma área de 4.224 m² e um volume de 4.340 m³, ela se destaca como a caverna mais extensa e de maior área em nosso universo amostral, além de possuir o terceiro maior volume. A caverna apresenta condutos curvilíneos com seções transversais semicirculares ou tubulares em praticamente toda a sua extensão. Essa característica é um dos principais fatores para que sua gênese seja associada à ação da megafauna pleistocênica.

Em relação aos espeleotemas observa-se pouca sedimentação química sendo representada por crostas, os sedimentos estão presentes em alguns pontos associados à cúpulas do teto. A paleotoca se destaca no quesito outras feições geológicas uma vez que o conjunto total de túneis representa um icnofóssil. Os primeiros registros de icnofósseis em litotipo ferruginoso foram descritos por Carmo et al. (2011a,b) e Buchmann et al. (2015) na região conhecida como Vale do Rio Peixe Bravo (MG). A maioria das ocorrências de paleotocas em geossistemas ferruginosos ainda está em fase de caracterização. Devido à sua formação sujeita a processos erosivos, a preservação de restos fósseis no interior da cavidade é desconhecida.

Apesar de a caverna estar situada próxima de estrada asfaltada, seu acesso é bastante restrito, sendo necessário atravessar parte da planta industrial da mineradora que opera na área. Para tanto, é necessária autorização de acesso e acompanhamento de profissionais indicados pela empresa. A instalação de equipamentos para visitantes com mobilidade reduzida não parece ser viável por uma característica da própria caverna que apresenta condutos em sua maioria com cerca de um metro de altura. Essa característica também inviabiliza seu uso para atividade turística porque é necessário que os visitantes permaneçam abaixados durante todo o percurso. Destaca-se que essa é a maior caverna conhecida na região, apresenta gênese rara e, como para seu acesso é necessário atravessar parte de uma grande planta industrial de mina, seria interessante uma interpretação cultural incorporando a história da mineração

A caverna apresenta relevância/importância para a pesquisa internacional, considerando-se a hipótese de que sua gênese esteja associada à ações da megafauna pleistocênica. A gênese desse tipo de cavidade necessita de maiores estudos, especialmente em rochas ferríferas.

7.4.2. Vale da Lua (N4WS-0067)

A Caverna Vale da Lua possui como objetivos principais a Geoconservação para Atividades Educacionais Globais (GEG, classificado como muito alto), a Geoconservação para Monitoramento e Pesquisa (GPM, classificado como alto) e a Geoconservação para Atividades Turísticas (GAT, classificado como alto). A caverna apresenta uma projeção horizontal de 216 metros, uma área de 707,5 metros quadrados e um volume de 1.680 metros cúbicos. Essas medidas correspondem a 7,5 vezes a média para projeção horizontal, 6,5 vezes a média para área e 8,6 vezes a média para volume em relação ao universo amostral.

Uma variedade notável de espeleotemas, englobando formações coraloides, crostas, escorrimentos, cortinas, estalactites, estalagmites e colunas, encontra-se presente na Caverna Vale da Lua. Esta rica diversidade destaca-se como um fenômeno pouco comum em cavernas desenvolvidas em terrenos ferríferos. A distribuição dos espeleotemas abrange toda a extensão da caverna, com uma concentração e dimensões especialmente marcantes no terceiro salão, onde se observa uma predominância de espeleotemas menos comuns em ambientes ferríferos, como estalactites, estalagmites e colunas.

É digno de nota que, de maneira geral, esses espeleotemas revelam-se exponenciais e bem preservados ao longo do ambiente subterrâneo, ressaltando a singularidade e importância do ecossistema espeleológico da Caverna Vale da Lua, especialmente quando comparado com espeleotemas em rochas ferríferas. Este contexto evidencia a necessidade de estudos aprofundados para compreender os processos geológicos, a dinâmica da formação de espeleotemas e a contribuição única que essas características conferem ao entendimento da evolução do local.

O interior da caverna revela um perfil ruiforme, caracterizado pela presença de canais de escoamento no solo e pináculos, conforme notado por Scherer (2017). Além disso, foram identificados depósitos de sedimento argiloso e vestígios remanescentes de guano. Scherer (2017) destaca que a composição mineral dos espeleotemas na caverna é predominantemente constituída por fosfatos ou sulfatos, incluindo minerais como Leucofosfita, Sfeniscidita, fosfocerita, Strengita, Andalusita, Fosfato de Cálcio e Hematita. Este cenário geológico único, delineado pela morfologia ruiforme e pela presença de minerais específicos, acrescenta uma camada significativa à compreensão da

história geológica da caverna. A identificação dos minerais, particularmente os fosfatos e sulfatos, oferece insights valiosos sobre os processos geoquímicos que ocorreram ao longo do tempo. A presença de sedimento argiloso e depósitos de guano destaca a importância da análise dos processos de sedimentação e das atividades biogênicas no desenvolvimento da caverna, enriquecendo assim o contexto científico em torno dessa notável formação espeleológica.

Quanto à acessibilidade, a caverna está convenientemente localizada próxima à estrada principal. No entanto, um desafio se apresenta entre o ponto de estacionamento e a entrada da caverna, onde um trecho bastante íngreme demanda a locomoção a pé. Nesse contexto, intervenções de engenharia se fazem necessárias para otimizar o acesso, especialmente considerando seu potencial uso didático. Atualmente, a abordagem à caverna apresenta riscos de quedas devido à inclinação acentuada, exigindo do visitante um bom condicionamento físico para a travessia. O interior da caverna, da mesma forma, apresenta áreas escorregadias e blocos soltos, elevando o risco de quedas. Portanto, para uso turístico, é imperativo implementar medidas de segurança e intervenções estruturais que possam não apenas mitigar os perigos associados à topografia acidentada no caminho até a entrada, mas também garantir a segurança dos visitantes dentro da caverna. Essas melhorias não apenas ampliariam a acessibilidade, tornando a caverna mais inclusiva, mas também promoveriam a exploração segura e educacional do seu ambiente ímpar.

No que diz respeito à sua importância educacional, a caverna apresenta características singulares, pouco comuns em cavidades formadas em rochas ferríferas. Destacam-se a presença marcante de espeleotemas, bem como o desenvolvimento de um piso e paredes corroídas, revelando uma morfologia ruiforme notável. A possível associação dessas características com a existência de grandes colônias de morcegos adiciona um componente intrigante à narrativa geológica (Piló et al., 2023). A caverna é rica em elementos espeleogenéticos, facilmente visíveis aos observadores. Com o suporte interpretativo adequado, é possível obter uma compreensão substancial de sua dinâmica geológica e ambiental. Além disso, a proximidade da caverna com áreas de exploração mineral proporciona uma oportunidade para interpretar a história da mineração na região. A interconexão entre a formação geológica da caverna e as atividades mineradoras locais pode ser explorada de maneira didática, enriquecendo a experiência educacional ao promover uma compreensão mais abrangente da interação entre a geologia e as atividades humanas na área circundante.

Do ponto de vista da relevância internacional, a presença de espeleotemas bem desenvolvidos, como estalactites, estalagmites e colunas, juntamente com feições de corrosão, como pináculos e canais de escoamento no solo, em rochas ferríferas, constitui uma característica singular e pouco comum. Essa peculiaridade demanda uma investigação mais aprofundada para a compreensão abrangente de sua gênese e desenvolvimento em termos globais. A escassez de estudos sobre tais fenômenos em ambientes rochosos ferríferos ressalta a importância de se explorar e documentar essas ocorrências, não apenas para o contexto local, mas também para contribuir significativamente para o entendimento global das formações geológicas associadas a essas características específicas.

7.4.3. Guarita (N1_0004)

A Caverna Guarita destacou-se singularmente entre as cavernas examinadas neste artigo, ao receber avaliação altamente positiva para dois objetivos primordiais de Geoconservação, ambos relacionados a um uso público mais abrangente: Geoconservação para Atividades Didáticas (GAD) e Geoconservação para Atividades Turísticas (GAT). Essa distinção ressalta não apenas a relevância geológica da caverna, mas também seu potencial significativo como recurso educacional e turístico.

A caverna, caracterizada por suas dimensões notáveis, exibe uma projeção horizontal (PH) de 188 metros, uma área de 976 m² e um volume de 1650 m³. Esses valores revelam uma significativa disparidade em relação às médias padrão, apresentando uma magnitude de 6,5 vezes para PH, 9 vezes para área e 8,4 vezes para volume em comparação com o universo amostral. Além das dimensões impressionantes, a caverna revela uma rica variedade de espeleotemas, como crostas e coraloides, que se encontram em excelente estado de conservação e distribuídos de maneira abrangente por diversos pontos do subsolo. Este aspecto, além de contribuir para a estética peculiar da caverna, fornece insights valiosos sobre os processos de formação e preservação dessas estruturas espeleogenéticas.

No que diz respeito à microtopografia, destaca-se a presença de paleopisos, camadas sedimentares antigas que podem conter registros importantes da evolução do ambiente ao longo do tempo geológico. A análise desses paleopisos pode oferecer informações valiosas sobre eventos históricos, alterações climáticas e até mesmo

possíveis atividades humanas ou biológicas que ocorreram na região da caverna. Há presença de matacões que são característicos de cavernas desenvolvidas em rochas ferruginosas, especialmente na canga, evidenciando a ampliação e conexão de câmaras da caverna. No que diz respeito aos minerais identificados na caverna, embora o item específico não tenha sido objeto de avaliação nesta análise, estudos previamente conduzidos em diversas cavernas pertencentes à mesma unidade espeleológica indicam que os coraloídes e crostas são predominantemente constituídos por oxi-hidróxidos de ferro, incluindo hematita e goetita, bem como pela presença significativa de fosfatos e sulfatos (Piló et al., 2023). Essa correlação mineralógica entre as cavernas da mesma unidade sugere uma similaridade na composição geoquímica, o que pode ser indicativo de processos geológicos e ambientais compartilhados. A presença proeminente de oxi-hidróxidos de ferro e minerais fosfatados e sulfatados pode ser de grande importância na compreensão da evolução geológica da área e nas condições paleoambientais que influenciaram a formação desses espeleotemas específicos. Futuras investigações mineralógicas direcionadas à caverna em questão podem fornecer uma visão mais detalhada dessas composições e suas implicações para o contexto geológico e espeleogenético local.

A caverna é facilmente alcançável, sendo frequentemente utilizada pela comunidade para visitas didáticas e turísticas. O caminho até a entrada da caverna permite o estacionamento de veículos, incluindo ônibus, a poucos metros de distância. O trajeto a ser percorrido a pé é breve, requerendo apenas pequenos e simples ajustes para aprimorar a segurança, sendo que nas proximidades da caverna foi construído um mirante para a interpretação da paisagem. O percurso apresenta baixo risco para os visitantes, caracterizado pela necessidade de transpor alguns blocos rochosos para atravessar a cavidade. Em termos de relevância educacional, a caverna destaca-se como uma representação significativa de cavidades formadas na canga. Dotada de caráter didático, proporciona uma visão clara de aspectos espeleogenéticos e processos de sedimentação química. Já utilizada em atividades didáticas e turísticas, a caverna integra o roteiro turístico/didático denominado Rota Carajás. Esse itinerário abrange elementos bióticos e abióticos, como lagoas sazonais na canga, cavas de mineração de ferro, mirantes, cavernas e práticas sustentáveis de utilização de produtos florestais, como jaborandi e castanha. A inclusão da caverna neste roteiro amplia seu valor como um recurso educacional abrangente, contribuindo para a compreensão integrada do ecossistema local

e das interações entre diferentes componentes ambientais.

Na análise de sua relevância internacional, a caverna destaca-se por suas grandes dimensões em projeção horizontal, área e volume, características que não apenas facilitam o acesso, mas também a posicionam como uma valiosa ferramenta educacional em escala global. Além disso, do ponto de vista de sua origem, apresenta elementos distintivos típicos de formações subterrâneas encontradas na canga, oferecendo uma oportunidade valiosa para estudos comparativos e contribuindo para uma compreensão mais ampla da evolução de cavernas em ambientes específicos. Esta contextualização geológica única não apenas ressalta sua importância a nível local, mas também reforça seu valor em um contexto internacional, onde suas características geológicas particulares podem contribuir significativamente para avanços no entendimento de processos espeleogenéticos em diversas regiões.

7.4.4. Mapinguari (N1_0002)

A Caverna Mapinguari destaca-se pelos objetivos de Geoconservação, sendo classificada como muito alta para Atividades Didáticas (GAD) e alta para Atividades Turísticas (GAT). Com 86 metros de projeção horizontal (PH), 638 m² de área e 176 m³ de volume, a caverna exibe dimensões que superam as médias convencionais (Figura 2).

Particularmente distintiva é a presença de coraloídes em ferro, formações espeleogenéticas encontradas em vários pontos da caverna. Estas características, que também são registradas em outras cavidades da região, acrescentam uma complexidade singular à geodiversidade local. A análise aprofundada dos coraloídes não apenas aprimora a compreensão dos processos geológicos específicos que impactam sua formação, mas também contribui para a integração regional da geologia subterrânea. A presença de matacões evidencia a ampliação do salão da caverna. Os sedimentos na caverna são autóctones, compostos por seixos de hematita, calhaus e matacões. Apesar de não ter sido avaliado, estudos realizados em diversas cavernas da mesma unidade espeleológica indicam que os coraloídes e crostas são predominantemente constituídos por oxi-hidróxidos de ferro (hematita e goetita), fosfatos e sulfatos (Piló et al., 2023).



Figura 2: Aspectos do salão de entrada da Gruta do Mapinguari, onde se destaca, além das grandes dimensões, uma placa referente ao registro de sítio arqueológico.

A caverna está localizada próxima à Caverna da Guarita, sendo caracterizada por sua acessibilidade, frequentemente utilizada pela comunidade tanto para visitas didáticas quanto para turismo. Veículos, incluindo ônibus, têm a facilidade de estacionar a poucos metros da entrada da caverna. O trecho a ser percorrido a pé é breve, exigindo apenas alguns ajustes simples para aprimorar a segurança. Nas proximidades da caverna, foi erguido um mirante para a interpretação da paisagem, contribuindo para a experiência dos visitantes. O local apresenta um baixo nível de risco para os visitantes.

Em termos de relevância educacional, a caverna destaca-se como uma representação significativa de cavidades formadas na canga. Ela oferece um ambiente didático propício, facilitando atividades de interpretação relacionadas aos aspectos espeleogenéticos e à sedimentação química, que são facilmente observáveis. No contexto cultural, a caverna já é utilizada em atividades didáticas e turísticas, integrando o roteiro turístico/didático Rota Carajás (já descrito anteriormente na abordagem da caverna Guarita). A presença de uma placa no interior da caverna indica seu status como sítio arqueológico. Quanto à relevância internacional, a caverna apresenta um único salão de grandes dimensões, integrado na canga. Esse aspecto singular adiciona um valor distinto à sua configuração geológica, destacando-a como um objeto de estudo relevante em escala global.

7.4.5. Caverna da Dolina (N1_0096)

A Caverna da Dolina destaca-se pelo objetivo de Geoconservação voltado para Atividades Turísticas (GAT), classificada como alto nesse quesito. Quanto às dimensões, a caverna apresenta 123,5 metros de projeção horizontal (PH), 862 m² de área e 2.009 m³ de volume, representando 4,3 vezes a média para PH, 7,9 vezes a média para área e 10 vezes a média para volume. Estão presentes espeleotemas como crostas e coraloides.

Cientificamente relevante é a conexão da caverna com uma dolina de abatimento, indicando um possível desenvolvimento mais extenso que resultou em um colapso parcial, originando a formação da dolina (Figura 3). Parte dos sedimentos provenientes desse colapso adentra um dos condutos. No interior da dolina, o acúmulo de matéria orgânica permitiu a fixação de vegetação arbórea. Na parte exterior, a canga e a vegetação arbustiva característica dos campos ferruginosos da região compõem a paisagem.



Figura 3: Aspectos da dolina de abatimento localizada na porção sul da Caverna da Dolina.

Embora os minerais da caverna não tenham sido submetidos a avaliação mais detalhada, estudos conduzidos em diversas cavernas pertencentes à mesma unidade espeleológica revelaram que os coraloides e crostas predominantes consistem

principalmente de oxi-hidróxidos de ferro, especificamente hematita e goetita, além de compostos fosfáticos e sulfatos (Piló et al., 2023).

Sobre a acessibilidade: existe uma seção inacessível para ônibus, demandando o uso de veículos menores, como caminhonetes, para a travessia. Entre o ponto designado para estacionamento e a entrada da caverna, há uma distância de aproximadamente 600 metros que necessita ser percorrida a pé, apresentando pequenos desníveis em alguns trechos. No interior da caverna, há um curto trecho com teto mais baixo, que precisa ser superado para alcançar a dolina. A visitação representa baixo risco para os visitantes com a ocorrência de pequenos desníveis ao longo da trilha de acesso.

A presença de elementos espeleogenéticos de fácil visualização proporciona uma interpretação acessível e compreensível do ambiente cavernícola. A clareza na observação destes elementos facilita significativamente a compreensão do contexto espeleológico, contribuindo para uma experiência mais enriquecedora e informativa. A caverna está estrategicamente localizada na mesma região onde já se desenvolve atividade didática e turística, podendo ser integrada com êxito à Rota Carajás. A caverna se destaca pela presença de escavações arqueológicas em uma de suas entradas, revelando uma significativa riqueza histórica que contribui para a experiência dos visitantes. Na entrada da caverna, artefatos líticos, como lascas de ametista, oferecem uma visão interessante da cultura que ocupou esse espaço ao longo do tempo. Esses elementos não apenas influenciam a interpretação cultural, mas também adicionam uma perspectiva diferenciada à exploração da caverna, conectando os visitantes de maneira mais abrangente com a herança histórica da região.

A caverna ganha destaque em nível internacional devido às excelentes condições que oferece para a observação e estudo dos processos espeleogenéticos em cavidades desenvolvidas na canga. Desde a gênese da cavidade até os estágios de desabamento de blocos, ampliação de salões, abatimento parcial do teto e formação de dolinas, cada fase proporciona uma valiosa oportunidade para compreender a evolução destes fenômenos de maneira abrangente. A singularidade desses processos, aliada à riqueza geológica da caverna, contribui significativamente para sua notoriedade e relevância internacional no cenário espeleológico.

7.4.6. Caverna N3_023

A Caverna N3-023 deve ter como principal objetivo a Geoconservação para Atividades Educacionais Globais (GEG), classificada como Muito Alto, e a Geoconservação para Pesquisa e Monitoramento (GPM), classificada como Alto. A caverna exibe dimensões representativas, com 269 metros de comprimento, 950 m² de área e um volume de 2.138 m³. Essas medidas revelam valores significativamente superiores à média, representando, respectivamente, 9 vezes a média para o comprimento, 8,7 vezes a média para a área e 10,8 vezes a média para o volume.

A caverna exibe uma diversidade de espeleotemas, incluindo crostas, coraloides e estalactites. Esses elementos estão uniformemente distribuídos ao longo da caverna, sendo mais concentrados em áreas mais distantes da entrada. Além disso, destacam-se pelo bom estado de conservação. Em relação às feições de microtopografia, o interior da caverna apresenta características ruiformes, evidenciadas por paredes irregulares que exibem sulcos de dissolução/corrosão, configurando-se como caneluras. Adicionalmente, observam-se canais profundos de escoamento concentrado no piso, bem como a presença de buracos circulares associados a gotejamentos (Piló et al., 2023). Destaca-se ainda a ocorrência de pináculos e trechos que revelam paleopiso, contribuindo para a complexidade e diversidade do ambiente subterrâneo.

A presença de guano antigo de morcego é identificada em vários locais da caverna, constituindo-se como um componente relevante dos sedimentos presentes no ambiente subterrâneo. A predominância de minerais nos espeleotemas da caverna está associada principalmente a fosfatos, destacando-se Leucofosfita, Francoanellita, Newberita, Monetita, Fosfosiderita e Sfeniscidita, além de sulfatos como Sulfato de Cálcio hidratado, Jarosita e Gipso, conforme documentado Scherer, (2017). Caverna de acesso difícil, requerendo um veículo com tração nas quatro rodas para transitar em determinadas partes da estrada. A partir do ponto de estacionamento, uma trilha íngreme precisa ser percorrida até a entrada da caverna, envolvendo potenciais riscos de queda.

A caverna destaca-se por exibir características atípicas em cavidades formadas em rochas ferríferas. Isso inclui a notável presença de espeleotemas, além de um piso e paredes corroídos/ruiformes. A possível associação dessas características com a presença pretérita de grandes colônias de morcegos acrescenta um elemento educacional à compreensão do ambiente subterrâneo. Esses elementos singulares proporcionam uma

oportunidade valiosa para a exploração didática e aprofundamento do conhecimento sobre formações espeleológicas específicas.

Ao longo do trajeto de acesso à caverna, encontram-se vários elementos que podem ser integrados à interpretação cultural, sendo alguns deles já incorporados pela Secretaria de Educação de Parauapebas. Esses elementos englobam tanto aspectos bióticos quanto abióticos, como a exploração da cava de ferro, a observação de lagoas temporárias na canga e a abordagem do uso sustentável de recursos florestais, exemplificado pelo cultivo de Jaborandi e a colheita de castanhas.

A presença de espeleotemas bem desenvolvidos, como estalactites, aliada às feições de corrosão, como caneluras nas paredes, pináculos e canais de escoamento no solo, em rochas ferríferas, configura-se como uma característica rara. Esta peculiaridade demanda uma atenção mais aprofundada e estudos adicionais para compreender sua gênese e desenvolvimento em escala global. A singularidade dessas formações não apenas adiciona valor científico à caverna, mas também destaca a necessidade de ampliar o entendimento sobre processos geológicos específicos, contribuindo assim para o conhecimento internacional no campo espeleológico.

7.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Geossistema Ferruginoso da Serra de Carajás é uma região de notável biodiversidade e geodiversidade, caracterizada por uma divisão geomorfológica em planaltos suaves e ondulados, que se intercalam com vales profundos e formações geológicas diversas. Dentro dos planaltos e nas áreas de transição para os vales, estão cavidades naturais subterrâneas que desempenham o papel de importantes centros de riqueza nutricional e abrigam uma comunidade animal única. Essas cavidades são parte da geodiversidade local e exercem uma influência significativa na paisagem circundante.

A geoconservação é essencial para preservar a diversidade ambiental, contribuindo para a gestão sustentável dos ecossistemas. Além de oferecer benefícios econômicos, culturais e sociais, ela desempenha um papel vital na administração do meio ambiente, auxiliando no enfrentamento de desafios globais como perda de biodiversidade, mudanças climáticas e desenvolvimento sustentável. Para Gordon et al (2021), o avanço da geoconservação requer uma ampliação na conscientização, compreensão e apoio público e as áreas protegidas são espaços privilegiados para esse fim.

Nesse contexto pensar em diferentes propósitos de geoconservação pode ser um

elemento enriquecedor na gestão de unidades de conservação. Nesse artigo propusemos quatro categorias distintas de propósitos de geoconservação direcionadas ao Geossistema Ferruginoso de Carajás, em especial, sobre seu patrimônio espeleológico: a) pesquisa científica e monitoramento contínuo; b) atividades didáticas; c) atividades turísticas; d) atividades educacionais globais.

Na categoria geoconservação para pesquisa científica e monitoramento contínuo: estão cavernas caracterizadas pela riqueza em características geológicas e ambientais. A presença de seções transversais detalhadas, distribuição significativa de espeleotemas e sedimentos, bem como a diversidade mineralógica, configura um ambiente propício para pesquisas científicas. Estas cavernas tornam-se verdadeiros laboratórios naturais, proporcionando uma visão única dos processos geológicos ao longo do tempo. O monitoramento contínuo é de vital importância para preservar a autenticidade desses ambientes e compreender as mudanças sutis que ocorrem.

Na categoria geoconservação para atividades didáticas estão cavernas que harmonizam acessibilidade, segurança e potencial educacional. Localizadas em proximidade de estradas, acesso seguro e a presença de elementos interativos convergem para criar ambientes propícios à aprendizagem prática. A interpretação educacional eficaz, a fácil compreensão dos conceitos espeleológicos e a integração curricular são fundamentais para transformar essas cavernas em salas de aula naturais, proporcionando uma experiência educacional enriquecedora.

Na categoria geoconservação para atividades turísticas estão cavernas que se destacam pelo potencial de desenvolvimento de infraestrutura adequada e possibilidade de criação de experiências envolventes para os visitantes, com baixo risco. A interpretação cultural enriquece a visita, proporcionando uma compreensão mais profunda do significado histórico e geológico do local.

Na categoria geoconservação para fins educacionais globais foram classificadas cavernas que possuem relevância internacional e contribuem ativamente para a disseminação global de informações. Essas cavernas podem tornar-se embaixadoras do conhecimento espeleológico em geossistemas ferruginosos, facilitando a compreensão global dos fenômenos associados e promovendo a cooperação internacional em educação e pesquisa.

Ao propor diferentes categorias de geoconservação específicas para o Geossistema Ferruginoso de Carajás, com enfoque especial no seu patrimônio

espeleológico, esta pesquisa abre caminhos para uma gestão mais abrangente e enriquecedora da Flona Carajás. Desde a pesquisa científica e monitoramento contínuo até as atividades didáticas, turísticas e educacionais globais, cada categoria desvenda facetas únicas desse complexo sistema geológico, enriquecendo não apenas a compreensão científica, mas também a experiência pública e educacional.

8. ANÁLISE GEOAMBIENTAL APLICADA ÀS AÇÕES EDUCATIVAS NAS CAVIDADES DA SERRA DE CARAJÁS

Leonardo Cristian Rocha

Ana Clara Ferreira Ribeiro

Paulo de Tarso Amorim Castro

8.1. INTRODUÇÃO

A província mineral de Carajás está localizada no Cráton Amazônico em sua porção sudeste, apresenta um contexto geológico bastante complexo, com sucessivos eventos tectônicos desde o Mesoarqueano até o Mesozoico com eventos evolutivos na região associados a ciclos tafrogênese-orogênese, resultando em uma geodiversidade notável (Tavares, 2015).

A história científica dessa área remonta à década de 1930, com os primeiros estudos realizados por Moraes Rego (1933), e desde então, tem sido alvo de extensa pesquisa (Araújo, Maia e João, 1991). Segundo Barbosa (2004) os modelos tectônicos propostos variam, desde interpretações de sinclínrio falhado (Beisiegel et al., 1973) até subdivisões em porções de evolução aparentemente distintas (Maireles et al., 1984; DOCEGEO, 1988), destacando-se a estruturação regional e os eventos de transpressão e transtensão (Pinheiro e Holdsworth, 1997).

A estrutura regional da Serra de Carajás é predominantemente norte/sul, com um sistema de dobras flexurais achatadas e mergulhos na direção WNW. Essa configuração é entrecortada por falhas transcorrentes e subparalelas ao plano axial. Portanto, a Serra dos Carajás pode ser compreendida como um sistema sinforme/antiforme com uma morfologia em S, atravessada por uma zona de cisalhamento que separa as Serras Norte e Sul. Essa separação, conforme destacado por Rosière et al. (2006), desempenhou um papel importante na formação das mineralizações dos fluidos hidrotermais.

A evolução da província Carajás é marcada por sequências vulcano-sedimentares, com processos deposicionais em bacias instáveis, associados a eventos estruturais e atividades vulcânicas. O Grupo Grão Pará desempenha um papel fundamental nesse contexto, com depósitos que hospedam minérios de ferro de alto teor, além de características geoquímicas que sugerem vulcanismo extravasado sobre crosta continental atenuada (Macambia, 2003; Zucchetti, 2007; Matins, 2017).

A história geológica da Serra dos Carajás, é caracterizada por uma sucessão de ciclos tectônico-magmáticos. Esses eventos moldaram a região, conferindo-lhe uma grande diversidade geológica e resultando na formação de diversos recursos minerais, como as formações ferríferas, manganês, ouro, entre outros. No final do Mesozoico, a região experimentou um período de estabilidade tectônica, dando início a uma evolução geomorfológica marcada pelo intenso intemperismo geoquímico.

Vasconcelos et al (1994a) em lateritas ferruginosas dataram idades variando de 69 a 43 Ma. Essa estabilidade prolongada (Vasconcelos et al, 1994a; Ruffet et al, 1996; Vasconcelos, 1999; Cabral, 2016) e as condições climáticas favoráveis ao longo de milhões de anos contribuíram para a formação de perfis de intemperismo antigos na Serra dos Carajás. A análise geomorfológica revela uma paisagem esculpida por processos tectônicos e climáticos, com a possível ocorrência de etchplanação (Büdel, 1982; Cabral, 2016). Essa teoria sugere uma remoção isovolumétrica de elementos solúveis e mudanças minerais, que preservam as estruturas originais e conservam os volumes das formações rochosas ao longo do tempo.

A preservação desses perfis de intemperismo é fundamental para compreender a evolução geomorfológica da região, sugerindo um processo de recuo de escarpas e formação de cavernas. A presença de lateritas ricas em ferro indica uma estabilidade significativa, embora a datação dessas formações seja desafiadora.

Em subsuperfície, os processos de alteração continuam ativos. As cavernas se desenvolvem na porção inferior da Formação Carajás, próximo ao contato com a Formação Parauapebas, indicando quase que a totalidade da sílica foi lixiviada. Esse fenômeno acarretou na geração de cavidades por dissolução. A análise dos processos químicos indica origem comum entre as cavernas e para o minério de ferro enriquecido supergenicamente, que são provavelmente contemporâneos (Cabral, 2016).

Dada a complexidade geológica e geomorfológica da Serra de Carajás, uma análise geoambiental integrada a atividades educativas se torna crucial. Este artigo tem como objetivo realizar essa análise na região, considerando suas diversas dimensões, e propor a integração dessa abordagem em atividades educativas nas cavidades de minério de ferro. O intuito é enriquecer a experiência do público, permitindo a fruição do conhecimento e sensibilizando-o sobre a importância desse geopatrimônio.

8.2. A FORMAÇÃO DAS CAVERNAS E A SUA IMPORTÂNCIA COMO GEOPATRIMÔNIO

A formação das cavernas em ferro em Carajás tem sido amplamente estudada e pesquisada, destacando sua importância como área de investigação científica. Os processos de dissolução desempenham um papel fundamental na sua formação e estruturação.

Em um estudo recente, Abreu e colaboradores (2019) investigaram a geoquímica das rochas que abrigam essas cavernas, classificando-as de acordo com o grau de alteração. Identificaram quatro categorias: jaspilite fresco (JF), jaspilite pouco alterado (JPA), jaspilite muito alterado (JMA) e minério de ferro (MN). As análises químicas revelaram que durante a transição do JF para o MN, houve uma significativa lixiviação de SiO₂ (de 62,51% para 0,51%), resultando em um aumento substancial do teor de Fe₂O₃ (de 56,48% para 97,71%). Esse processo de lixiviação levou à formação de microcavidades de dissolução, com a remoção completa da banda de sílica em até 50 a 60% em volume, enquanto ocorreu neoformação de hematita (Hm-2 e Hm-3) e goethita.

Piló e Auler (2009) reforçam que as mineralizações desempenham um papel crucial na criação de porosidade e permeabilidade, essenciais para a formação das cavernas em Carajás. A espeleogênese ocorre principalmente no contato entre canga e minério de ferro, sendo que as cavidades formadas exclusivamente nas cangas são influenciadas pela variação de fácies e pela oscilação de lagoas, escoamento pluvial e fluvial. Em outro estudo, Piló et al. (2015) descrevem a localização das cavernas em diferentes ambientes, como no interior das cangas, na interface entre cangas e formação ferrífera, e no ferricrete. Reforçam ainda a importância da mineralização e da formação de porosidade na gênese das cavernas, especialmente aquelas relacionadas aos processos de mineralização da formação ferrífera. Abreu (2019) reforça a importância dos processos químicos e da interação entre processos superficiais e subsuperficiais na formação das cavernas de Carajás, corroborando as conclusões de estudos anteriores.

O estudo de Sousa et al. (2015) destaca uma ampla variedade mineralógica presente nas cavernas de Carajás, incluindo montmorilonita, rancieíta, caulinita, hematita, nissonita, gibbsita e ferrowyllieita, com a presença de goethita em forma de plasma criptocristalino. Além disso, evidencia-se uma intensa alteração supergênica, fortemente influenciada por estruturas de fraturas e falhas, cuja ocorrência é favorecida pelo tectonismo local. Essas descobertas mineralógicas, como reportado por Sousa et al.

(2015), complementam os estudos anteriores sobre a formação das cavernas de Carajás, fornecendo uma compreensão mais abrangente dos processos geológicos e ambientais envolvidos nesse fenômeno.

As cavernas de Carajás transcendem sua simples condição de formações rochosas subterrâneas, representando um testemunho silencioso da história geológica e cultural da região. Sob a ótica do geopatrimônio, essas cavidades adquirem um significado especial, destacando-se como um legado precioso digno de preservação e estudo. A designação de geopatrimônio, proposta por pesquisadores como Muñoz (1988), Costas (1989), Valcares e Cortes (1996), Cendero (1996), Brilha (2005, 2016) e Carcavilha et al. (2008), ressalta não apenas a relevância científica de geoformas e geoobjetos, mas também seu valor cultural, seu potencial turístico e seu significado educativo. No que tange às cavernas, alia-se com destaque a sua beleza estética. Na perspectiva de elementos destacáveis da geodiversidade as cavernas se apresentam como elementos fundamentais do patrimônio natural e cultural, oferecendo oportunidades para aprendizado, pesquisa e apreciação da natureza.

8.3. METODOLOGIA

Inicialmente foi realizada uma visita à área de estudo para o reconhecimento de algumas cavidades, observando os formatos, tamanhos, posicionamento em relação ao relevo, característica pedológicas, entre outros.

Os mapas selecionados para análise, incluindo geologia, solos, declividade, hipsometria e orientação de vertentes, foram integrados no software QGIS. Para elaborar o mapa hipsométrico a partir dos dados SRTM, as etapas envolveram: 1. Obtenção dos dados SRTM do repositório online Earth Explorer; 2. Pré-processamento dos dados no QGIS 3.2; 3. Visualização e geração do mapa hipsométrico no QGIS, com atribuição de classes para diferentes faixas de altitude. A declividade foi estimada para cada ponto do Modelo Digital de Elevação (MDE) do SRTM utilizando a equação de declividade. Essa etapa foi realizada no QGIS. O mapa pedológico foi elaborado com dados da Embrapa Solos, incluindo pH, textura, teor de nutrientes, matéria orgânica, entre outros. Esses dados foram adquiridos no portal da Embrapa, integrados ao QGIS, e submetidos a uma análise exploratória e estatística após o recorte para a área de estudo.

8.4. RESULTADOS

8.4.1. Relação das variáveis geoambientais com as cavidades

As variáveis geoambientais e sua relação com as cavidades são apresentadas na figura 1, onde os dados espacializados desempenham um papel crucial ao servirem como ponto de referência na análise dessa interação. A partir dessa análise, tornou-se possível destacar temas específicos que merecem destaque em atividades educativas voltadas para a conservação e o uso sustentável das cavernas.

A análise do mapa hipsométrico em conjunto com o registro georreferenciado das cavernas já catalogadas revela que estas estão predominantemente situadas em altitudes que variam de 623 a 728 metros, sendo pouco comuns em altitudes inferiores a 623 metros. Este padrão observado está em consonância com os estudos de Piló et al. (2015), os quais indicam que as cavernas tendem a ocorrer dentro das cangas, na área interna da formação ferrífera, ou no ponto de contato entre ambas, muitas vezes próximas a pequenas escarpas, margens de lagoas e limites de planaltos.

Destaque-se que as altitudes mais elevadas, aproximadamente 728m, correspondem preferencialmente às áreas onde se encontram as coberturas lateríticas. Essas formações predominam nas direções norte, noroeste/sudeste e sul, sugerindo a presença de uma paleosuperfície, indicativa de um prolongado período de estabilidade tectônica. As lateritas são subsequentemente dissecadas pela incisão da rede de drenagem, expondo a formação subjacente.

Observa-se que, na região setentrional, as cavernas ocorrem principalmente nas margens das formações lateríticas, resultando da interação entre a incisão da rede de drenagem e a erosão regressiva das rochas siliciclásticas. A interseção dessas formações é propícia à formação de cavernas. Portanto, onde houver lateritas no topo dos planaltos, esse padrão de formação de cavernas prevalecerá, independentemente da distribuição espacial.

As cavernas na Formação Carajás, dominada por jaspilitos, são encontradas em altitudes inferiores às cavernas das formações lateríticas, geralmente em torno de 650m. As entradas principais dessas cavernas estão em altitudes próximas a 650m. Aquelas em altitudes mais baixas, cerca de 450m, resultam da erosão remontante das escarpas, desagregando as lateritas e acumulando material nas áreas inferiores, classificadas como cavernas em ferricrete por Piló et al. (2015).

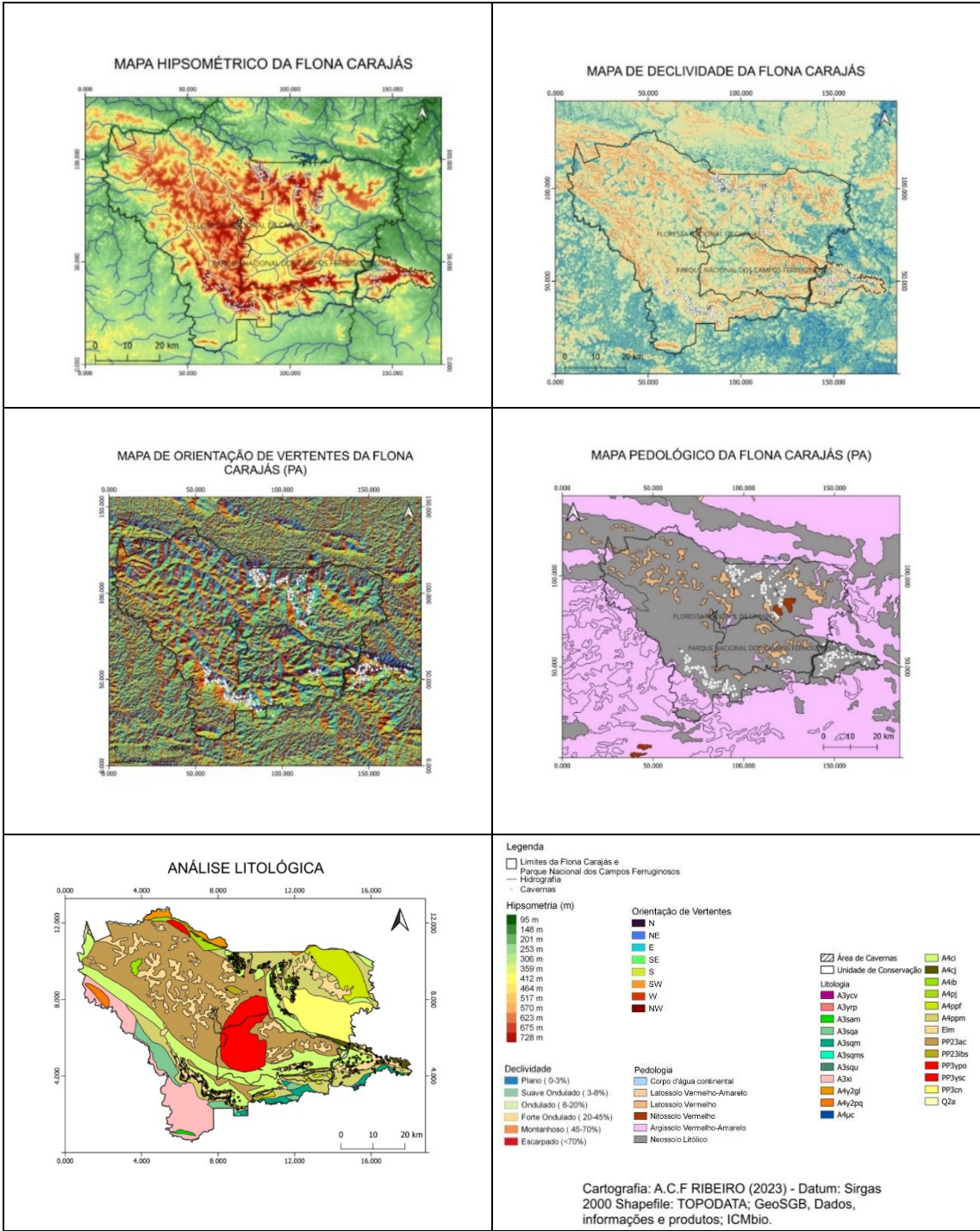


Figura 1: Variáveis selecionadas para análise, incluindo geologia, solos, declividade, hipsometria e orientação de vertentes, foram integrados no software QGIS.

Assim, as cavernas estão distribuídas em três níveis altimétricos distintos: as mais elevadas nas cangas de topo, em torno de 750 metros; as cavernas nos jaspilitos, variando entre 600 a 650m; e as mais baixas, em torno de 450m, correspondentes às cavernas de ferricrete.

A Figura 2 apresenta a frequência de cavernas em relação a declividade. Ao analisar a correlação entre a inclinação do terreno e as cavernas catalogadas, é evidente que a maioria delas está preferencialmente localizada em áreas de relevo suavemente ondulado ou montanhoso. Vale ressaltar que as cavernas situadas em regiões de relevo suavemente ondulado frequentemente ocupam platôs, que, embora possam estar altimetricamente elevados, apresentam um relevo mais nivelado, geralmente associado às cavernas lateríticas. Por último, as cavernas em ferricretes tendem a exibir os menores desníveis topográficos, uma vez que são formadas pelo acúmulo de materiais na base. Elas também são encontradas em áreas de relevo mais plano, às vezes estando associadas a esse tipo de terreno.

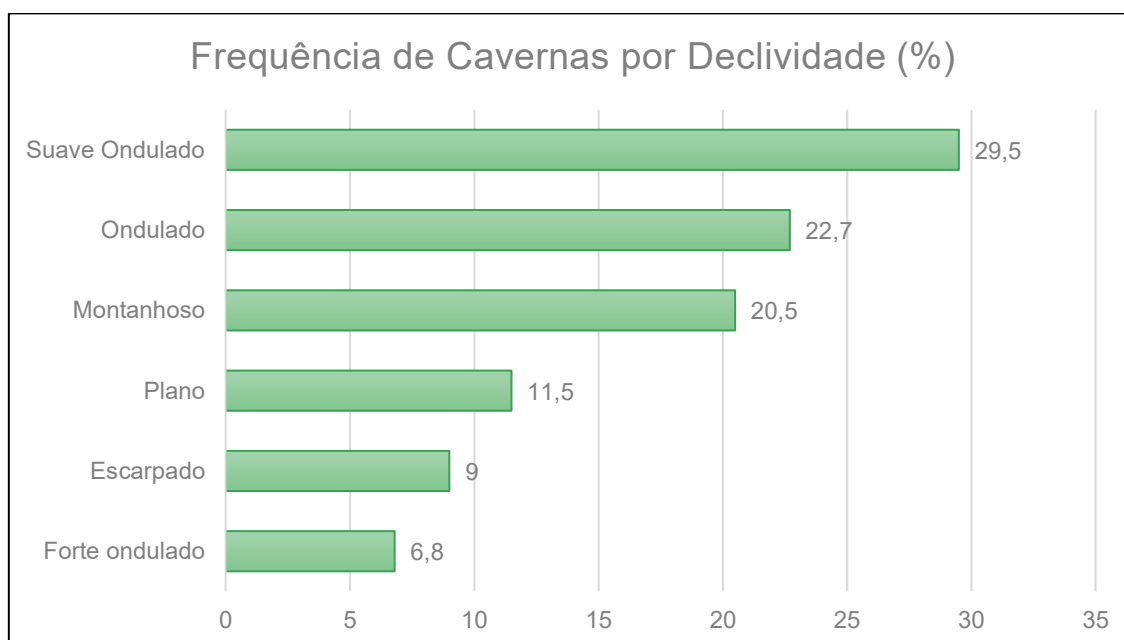


Figura 2: Frequência de cavernas em relação a declividade

A segunda classe mais comum de relevo, com inclinações variando entre 8 e 20% de declividade, caracteriza-se predominantemente pelas cavernas em jaspilitos, posicionadas em áreas de relevo intermediário. Por sua vez, a classe de relevo montanhoso, com inclinações entre 20 e 45 graus, apresenta menor taxa de infiltração e percolação à medida que as declividades aumentam. Estudos anteriores, como os de Piló

e Auler (2009), destacaram a importância da porosidade e permeabilidade do substrato mineral na formação inicial das cavidades.

As classes menos representativas abrangem o relevo de forte ondulado a escarpado, onde os processos de dissolução tendem a ser menos pronunciados devido ao alto escoamento. Abreu (2019) correlaciona a dissolução da sílica com a inclinação do terreno, sugerindo que elevadas declividades podem inibir o processo de dissolução pela rápida drenagem da água. Martini (2000) diferencia a dissolução do quartzo e de outros minerais, evidenciando que o quartzo pode ser solubilizado por hidratação da sílica, resultando na formação de ácido silícico, processo que pode ser intensificado pela presença de ácidos orgânicos.

Estudos complementares de Briceno (1991) corroboram a influência dos ácidos orgânicos na solubilidade do quartzo, ressaltando a necessidade de retenção de água por um período adequado para que ocorra a dissolução da sílica. Essas descobertas reforçam as conclusões de Piló et al. (2015), Piló & Auler (2009), Abreu (2019), entre outros.

Em síntese, a análise da declividade revela que as cavernas situadas em áreas de relevo suavemente ondulado e ondulado representam 52,2% do total de cavernas estudadas, alcançando 63,8% quando consideradas também as cavernas em áreas de relevo plano. Isso indica que a maioria das cavernas está localizada em terrenos com declividades propícias para a visitação, facilitando o acesso e a exploração dessas formações geológicas.

Os solos predominantes na área de estudo são os Argissolos e os Neossolos Litólicos, sendo estes últimos os mais comuns, representando 96% da cobertura pedológica observada. Santos et al. (2018) atribuem essa prevalência dos Neossolos Litólicos na região (Figura 3).

Estes solos são caracterizados por sua composição, apresentando material mineral ou orgânico com espessura inferior a 20 cm, sem a presença de horizontes diagnósticos B. Além disso, satisfazem a uma série de requisitos, tais como a ausência de horizonte glei a uma profundidade de 150 cm abaixo da superfície, exceto em solos de textura predominantemente arenosa; a ausência de horizonte vértico imediatamente abaixo do horizonte A; a ausência de horizonte plíntico dentro de 40 cm da superfície, ou até 150 cm se precedido por horizontes de coloração pálida ou variegada; e a ausência de horizonte A chernozêmico com características carbonáticas ou associado a horizonte C cálcico (Santos et al, 2018).

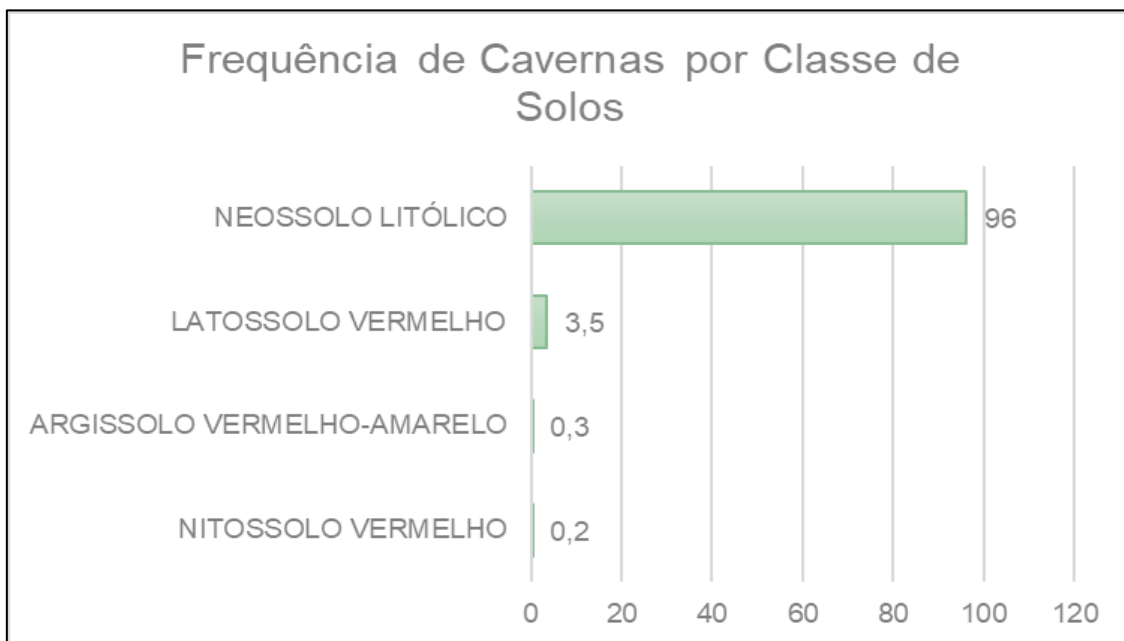


Figura 3: Frequência de cavernas em relação a declividade

Além disso, são incluídos nesta classe os solos com horizonte A ou hístico de menos de 20 cm de espessura, seguidos por camadas contendo 90% ou mais de fragmentos de rocha ou material de origem, independentemente de sua resistência à intemperização.

Devido ao ambiente quente e úmido, caracterizado por altas taxas de intemperismo, a prevalência dos Neossolos Litólicos como principal classe de solo pode parecer surpreendente. No entanto, devido à presença de afloramentos rochosos e à resistência das rochas ferruginosas e das cangas, combinadas com a influência da declividade, é esperado encontrar predominantemente essa classe de solo na região.

Os Latossolos, que representam a segunda classe de solo mais abrangente na área estudada (3,5%), são caracterizados por apresentarem um horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A dentro de 200 cm a partir da superfície, ou até 300 cm se o horizonte A tiver mais de 150 cm de espessura (Santos et al, 2018). A distribuição dos Latossolos na área coincide com as características do relevo, especialmente em superfícies planas, suavemente onduladas ou onduladas, onde o solo deve ser bem drenado para se desenvolver, resultando em solos profundos.

Os Nitossolos, embora presentes na área em uma proporção menor, são definidos como solos constituídos por material mineral, com um horizonte B nítico abaixo do horizonte A, contendo argila de baixa ou alta atividade, desde que combinada com

características alumínicas, principalmente nos primeiros 100 cm do horizonte B (Santos et al, 2018). Essa classe de solo está associada a áreas com rochas básicas, sendo o material de origem fundamental para sua formação. Os Nitossolos geralmente são profundos, bem drenados e possuem uma coloração vermelha escura.

A última categoria de solos, com menor destaque dentro do escopo da área de estudo, são os Argissolos. De acordo com Santos et al. (2018), estes solos são compostos por material mineral com baixa atividade de argila, ou alta atividade quando combinada com baixa saturação de bases ou características aluminosas, com um horizonte B textural imediatamente abaixo do horizonte A ou E. Além disso, apresentam os seguintes requisitos: a) A presença de um horizonte plúntico, caso ocorra, não se encontra acima nem coincide com a parte superficial do horizonte B textural; b) Um horizonte glei, se presente, não está acima nem coincide com a parte superficial do horizonte B textural.

A orientação preferencial das vertentes é apresentada na Figura 4, a maioria das aberturas das cavidades está direcionada principalmente para sudoeste e sul. Essas direções são consistentes com as estruturas tectônicas predominantes, como falhas, zonas de cisalhamento e dobras. Pereira (2009) destaca a presença da Zona de Cisalhamento Carajás, caracterizada por falhas transpressivas e dobras reclinadas, cuja direção principal é NW-SE, com inclinação para o sudoeste.

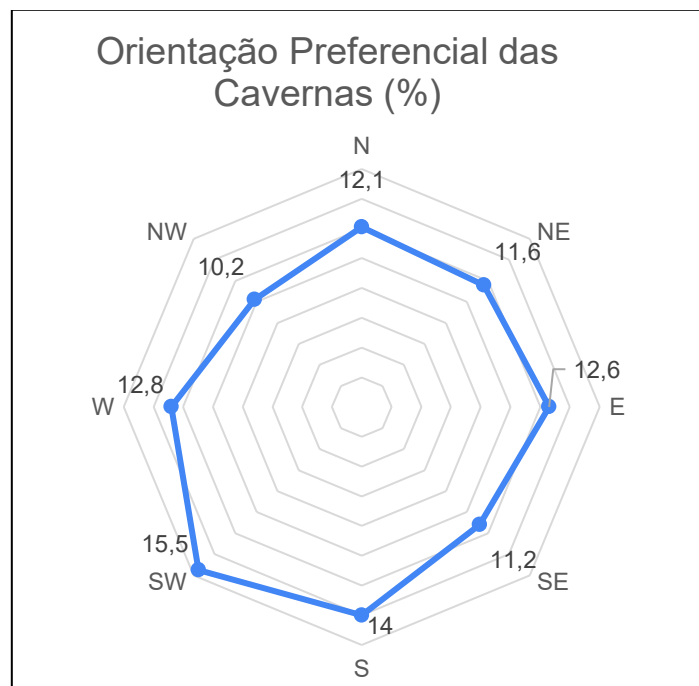


Figura 4: Orientação preferencial das cavernas.

As unidades geológicas do Paleoproterozóico anterior a 1880 Ma são descritas como tendo sido afetadas por falhas inversas rúpteis, possivelmente relacionadas ao Ciclo Transamazonas. Essas falhas são complementadas por falhas normais verticais e lineamentos NNE, cuja geometria e orientação são influenciadas pela trama dúctil das rochas subjacentes da Assembleia do Embasamento. Os estudos de Pinheiro & Holdsworth (2000) sobre o sistema de falhas Carajás-Cinzento demonstram uma intensa deformação dúctil associada à Zona de Cisalhamento, com a falha Carajás desempenhando um papel fundamental na estruturação da região.

A Falha Carajás, em particular, é descrita como uma estrutura complexa, com cerca de 130 km de comprimento, caracterizada por feixes de lineamentos curvilíneos e retos, entrelaçados, que cortam obliquamente o Sistema Transcorrente Carajás. A terminação oeste da falha exhibe feixes projetados para o nordeste, enquanto a parte central apresenta feixes curvos NNW-SSE, côncavos para o nordeste. Essas características estruturais influenciam a morfologia das vertentes e, por conseguinte, a distribuição das cavidades na região de Carajás.

Assim, observa-se que a orientação predominante das vertentes, onde se localizam a maioria das cavernas, está em conformidade com os lineamentos estruturais regionais, o que sugere que são zonas preferenciais de incisão das redes de drenagem. Além disso, essas estruturas favorecem as taxas de infiltração e percolação, promovendo a dissolução e a formação das cavidades em Carajás.

A maioria das cavernas na região está associada ao Grupo Grão Pará, distribuídas em diferentes formações geológicas, sendo as crostas lateríticas da Formação Carajás o principal ambiente de ocorrência (Figura 5). Essas crostas lateríticas, presentes nos platôs dos planaltos que sustentam as áreas mais elevadas, constituem o ambiente preferencial para a formação das cavernas. É importante destacar que, embora compartilhem da mesma localização, as crostas lateríticas e as cavernas possuem origens distintas, conforme observado por Piló et al. (2014).

As crostas lateríticas são extensas coberturas formadas pela alteração intempérica de rochas ricas em ferro, resultando em uma matriz limonítica/goethítica cimentando fragmentos de tamanhos variados das rochas subjacentes. Existem três tipos principais de cangas na área de estudo: canga química (CQ), canga de minério (CM) e hematita laminada lateritizada (HLL). Estas cangas são produtos do intemperismo químico e podem ser encontradas tanto *in situ* quanto depositadas na forma de elúvios.

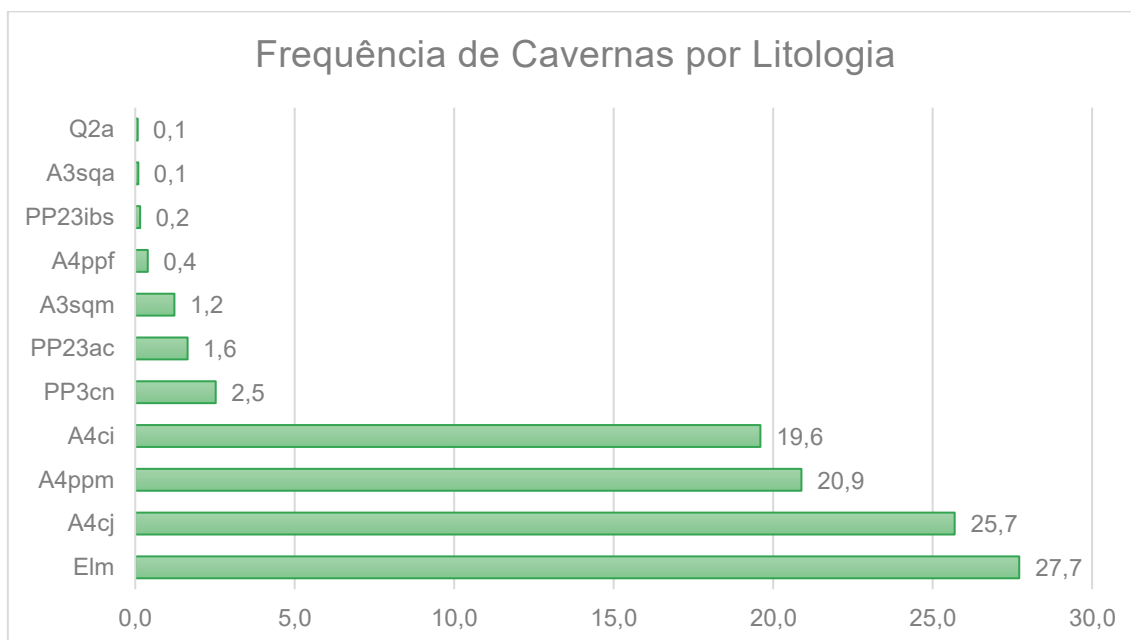


Figura 5: Frequência de ocorrência de cavernas em relação a litologia.

A ocorrência das cavernas está associada principalmente às rochas com alto grau de intemperismo, em contato com os litotipos da Formação Carajás e as coberturas lateríticas. A Formação Carajás, representada por jaspilitos, desempenha um papel significativo na formação das cavernas, apresentando uma alternância entre minerais silicosos e ferríferos. Os jaspilitos são especialmente suscetíveis à dissolução, como observado por Cabral et al. (2016), que indicam uma sequência de dissolução preferencial dos minerais, com o quartzo granular sendo menos resistente que o chert e o jaspe.

A evolução das cavernas está intimamente relacionada com as estruturas e lineamentos tectônicos, conforme demonstrado por Cabral et al. (2016) e Braga et al. (2017). A dissolução do quartzo e a presença de estruturas como acamamentos, fraturas e falhas favorecem a formação e o alargamento das cavernas. Além disso, o clima quente e úmido facilita a dissolução da sílica, contribuindo para o processo de formação das cavidades.

8.4.2. Temas educativos no contexto analisado

Com base na análise geoambiental das cavernas de Carajás apresentada, é possível destacar várias temáticas e abordagens educativas prioritárias para promover a conservação e o uso sustentável dessas formações geológicas.

1. Geologia e Formação das Cavernas:

- Desenvolvimento de programas educacionais que abordem a complexidade da geologia local, destacando como as formações ferríferas, cangas lateríticas e jaspilitos influenciam a formação das cavernas.
- Realização de atividades práticas, como estudos de campo e análise de amostras de rochas, para permitir que os participantes compreendam visualmente os processos de intemperismo e dissolução que levam à criação das cavidades.

2. Relação entre Altitude e Formação das Cavernas:

- Organização de expedições para mapear e estudar as cavernas em diferentes altitudes, fornecendo aos participantes uma compreensão mais profunda de como as variações de altitude afetam a distribuição e formação das cavidades.
- Realização de simulações computacionais ou modelagem geoespacial para demonstrar como as mudanças de altitude influenciam as condições climáticas e os processos de formação das cavernas ao longo do tempo geológico.

3. Influência da Declividade do Terreno:

- Implementação de atividades de campo para investigar a relação entre a inclinação do terreno e a formação das cavernas, permitindo que os participantes observem diretamente como as diferentes classes de relevo afetam os processos de dissolução e percolação que moldam as cavidades.
- Utilização de ferramentas de realidade virtual ou modelos físicos para simular os efeitos da declividade do terreno na formação das cavernas, proporcionando uma experiência imersiva e interativa aos participantes.

4. Estudo dos Solos e sua Relação com as Cavernas:

- Realização de estudos de campo para coletar amostras de solos e rochas e analisar sua composição e influência na formação das cavernas.
- Organização de atividades práticas, como experimentos de laboratório e análise de dados geoespaciais, para investigar os processos de intemperismo e erosão que afetam os solos e contribuem para a criação das cavidades.

5. Orientação das Vertentes e Estruturas Tectônicas:

- Desenvolvimento de programas educacionais que explorem a relação entre a orientação das vertentes e as estruturas tectônicas na formação e distribuição das cavernas em Carajás.
- Utilização de tecnologias de visualização avançada, como imagens de satélite e modelagem tridimensional, para ilustrar como as falhas, dobras e zonas de cisalhamento influenciam a morfologia das vertentes e a distribuição das cavidades na região.

6. Conservação e Uso Sustentável das Cavernas:

- Promoção de discussões e workshops para sensibilizar as comunidades locais e os visitantes sobre as ameaças à conservação das cavernas, incluindo atividades humanas, mudanças climáticas e degradação do ambiente.
- Essas temáticas e abordagens educativas podem ser exploradas em atividades práticas, como visitas guiadas às cavernas, palestras e workshops sobre geologia e meio ambiente, e projetos de pesquisa envolvendo estudantes e comunidades locais. Ao entender melhor a interação entre os elementos geoambientais e as cavernas de Carajás, os participantes poderão apreciar e valorizar esses importantes patrimônios naturais, ao mesmo tempo em que contribuem para sua conservação a longo prazo.

8.4.3. Abordagens educativas no contexto analisado

1. Aulas Expositivas Interativas:

- Realização de aulas expositivas onde os alunos são envolvidos ativamente através de perguntas, discussões e atividades práticas relacionadas à geologia, formação das cavernas e conservação ambiental.

2. Atividades de Campo e Exploração:

- Organização de expedições de campo para visitar as cavernas de Carajás, permitindo que os alunos observem diretamente as características geológicas, topográficas e ambientais da região.

3. Laboratórios de Geologia e Solos:

- Montagem de laboratórios onde os alunos possam realizar experimentos práticos, como análise de amostras de rochas e solos, para entender os processos de formação das cavernas e sua relação com a geologia local.

4. Modelagem e Simulação:

- Utilização de softwares de modelagem geoespacial para simular cenários de formação de cavernas em diferentes condições geológicas e topográficas, permitindo que os alunos compreendam os processos complexos envolvidos.

5. Jogos e Atividades Lúdicas:

- Desenvolvimento de jogos educativos, quebra-cabeças e atividades lúdicas relacionadas às cavernas de Carajás, incentivando a aprendizagem de forma divertida e interativa.

6. Trabalhos em Grupo e Projetos de Pesquisa:

- Divisão dos alunos em grupos para realizar projetos de pesquisa sobre temas específicos, como a influência da altitude na distribuição das cavernas ou os efeitos da inclinação do terreno na formação das cavidades.

7. Visitas Guiadas e Palestras de Especialistas:

- Organização de visitas guiadas às cavernas, conduzidas por especialistas em geologia e conservação ambiental, para fornecer informações detalhadas e responder às perguntas dos alunos.

8. Produção de Materiais Didáticos:

- Elaboração de materiais didáticos, como guias de campo, folhetos informativos e vídeos educativos, para complementar as aulas e promover a aprendizagem fora do ambiente escolar.

9. Integração com a Comunidade Local:

- Promoção de atividades de educação ambiental em parceria com a comunidade local, envolvendo moradores, líderes comunitários e ONGs em iniciativas de conservação e uso sustentável das cavernas.

10. Avaliação Formativa e Reflexão:

- Implementação de estratégias de avaliação formativa, como debates em sala de aula, ensaios escritos e apresentações orais, para que os alunos possam refletir sobre seu aprendizado e contribuir para o desenvolvimento contínuo do conhecimento na área de educação ambiental em cavernas de Carajás.

8.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A região dos Carajás é um importante local de exploração de minério de ferro e continuará assim pelos próximos anos. Mas essa atividade econômica deve estar associada a um manejo sustentável, pois, trata-se de uma região rica em biodiversidade, mas, sobretudo muito importante do ponto de vista da geodiversidade, onde há cavernas de grande relevância ambiental e cultural, e com muitas cavernas ainda para serem descobertas e estudadas.

A análise geoambiental emerge como uma ferramenta crucial na identificação e compreensão dos complexos ecossistemas subterrâneos, como cavernas, cuja preservação se revela essencial para a manutenção da biodiversidade e do equilíbrio ambiental. Ao adotar uma abordagem multidisciplinar, que integra geologia, geomorfologia, hidrologia e ecologia, a análise geoambiental oferece uma visão abrangente dos processos naturais que moldam esses ambientes singulares. Nesse contexto, torna-se evidente a relevância da educação ambiental focada em cavernas, a fim de sensibilizar e capacitar as comunidades locais e os visitantes para a importância da conservação desses espaços e

dos ecossistemas associados. Ao utilizar dados e informações obtidos por meio da análise geoambiental, os programas educacionais podem direcionar suas ações para aspectos específicos, como a proteção da qualidade da água subterrânea, a preservação da fauna cavernícola e a mitigação de impactos causados pela atividade humana. Assim, a análise geoambiental emerge não apenas como uma ferramenta técnica, mas também como um guia fundamental para a elaboração de estratégias eficazes de educação ambiental voltadas à conservação e uso sustentável das cavernas e seus entornos.

9. A IMPORTÂNCIA DA PERSPECTIVA GEOÉTICA NA PROTEÇÃO DO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO EM CONTEXTO DE MINERAÇÃO

Úrsula de Azevedo Ruchkys

Luciano José Alvarenga

Darcy Jose dos Santos

Luiz Eduardo Panisset Travassos

9.1. INTRODUÇÃO

Cavernas, como características antigas da paisagem, desempenham um papel crucial no registro da história evolutiva do planeta. Além de testemunharem passivamente a dissolução e erosão da rocha circundante, as cavernas oferecem pistas paleontológicas valiosas, preservando restos animais e evidenciando condições climáticas passadas. Com uma relação histórica complexa com os humanos, serviram para rituais, abrigo e habitação, evidenciados por descobertas arqueológicas, como cerâmica e pinturas rupestres. Simbolicamente, cavernas, grutas e antros evocam o arquétipo do útero materno e figuram nos mitos de origem, renascimento e iniciação de numerosos povos. Para os gregos antigos, a caverna era a própria representação do mundo. Ela também pode simbolizar um lugar temível, o próprio inconsciente, mas, ao mesmo tempo, um receptáculo de energia e repositório de tesouros (Chevalier e Gheerbrandt, 2001). Remontam a essas significações simbólicas as referências a práticas de oração e meditação sistematicamente realizadas em cavernas. Os padres do deserto, entre os primeiros cristãos (Lacarrière, 1996), e São Francisco de Assis (Larrañaga, 1998) são exemplos. Cavernas também abrigam uma variedade de espécies da biodiversidade, algumas endêmicas e adaptadas a ambientes subterrâneos. Destacam-se, adicionalmente, espetaculares exposições de espécies e espeleotemas, como estalagmites e estalactites, que variam em tamanho e são vulneráveis a danos, exigindo atenção especial para conservação (Saly, 2020).

Essas funções evidenciam a diversidade das categorias que compõem o valor patrimonial das cavernas, para além da caracterização delas como elementos cênicos e paisagísticos. Elas integram o geopatrimônio, devido à presença de recursos geológicos singulares, como minerais e espeleotemas. Também se destacam no patrimônio paleontológico, podendo abrigar vestígios de fósseis. Ademais, contribuem para o patrimônio biológico, hospedando microbiologia adaptada e/ou dependente de cavernas,

invertebrados e vertebrados. No âmbito do patrimônio arqueológico, revelam vestígios de civilizações passadas, como restos ou fragmentos de cerâmica e pinturas rupestres. Por fim, também podem integrar o patrimônio histórico-cultural, recebendo diversas valorações da sociedade e sendo utilizadas, por exemplo, em rituais religiosos.

Cavernas representam feições subterrâneas inseridas em um contexto geológico e ambiental que abrange não apenas as rochas que as envolvem, mas também o entorno natural. Este sistema é interdependente e sensível a diversas variáveis ambientais, estendendo-se por uma área que geralmente ultrapassa significativamente os limites imediatos da caverna (Auler e Piló, 2019; Sezini, 2022).

A proteção das cavernas envolve não só a salvaguarda das características subterrâneas e das espécies associadas, mas também das superficiais, promovendo assim a resiliência do sistema frente aos efeitos estocásticos naturalmente ocorrentes. Conforme destacado por Saly (2020), é essencial compreender os fatores que contribuem para a deterioração do sistema antes de implementar medidas para mitigar ou reverter danos. Tais fatores prejudiciais, comumente designados como “ameaças” ao sistema da caverna, frequentemente têm origem direta ou indireta em atividades humanas.

Ameaças que resultam em impactos ambientais nas cavernas podem variar desde a completa destruição até impactos localizados de menor magnitude. Essas ameaças podem ser categorizadas da seguinte forma: (a) Destruição total da caverna: inclui atividades como a mineração, a exploração e a inundação para a construção de reservatórios e barragens; (b) Destruição significativa de terra ou hidrológica: engloba práticas como silvicultura, urbanização, desmatamento, construção, descarte de resíduos, extração de água, colheita de espeleotemas e mineração de guano; (c) Poluição: envolve o lançamento de esgotos, resíduos agrícolas e industriais, vazamentos químicos e outros tipos de poluição microbiana; (d) Entrada humana ou outros usos: inclui atividades como recreação, turismo, pesquisa, agricultura, produção de vinho, manufatura, atividades religiosas (Saly, 2020). Para além dessas ameaças, devem ser considerados os impactos sobre a área de influência das cavidades que, mesmo não alterando sua estrutura física, modificam seu entorno e podem comprometer processos internos, como a manutenção da biota.

A ameaça mais direta às cavernas, passível de provocar impactos significativos, provém da atividade minerária, na qual a caverna, inserida nas imediações do recurso mineral a ser extraído, representa um obstáculo à instalação ou expansão de áreas de lavra

(Auler e Piló, 2011). Por essa razão, as cavernas apresentam óbices naturais a projetos de mineração, dado que os recursos minerais não se distribuem de maneira uniforme, mas sim de forma agrupada espacialmente. Isso implica, por outro lado, que a designação de áreas para conservação espeleológica pode ser carregada de conflitos (Figura 1).

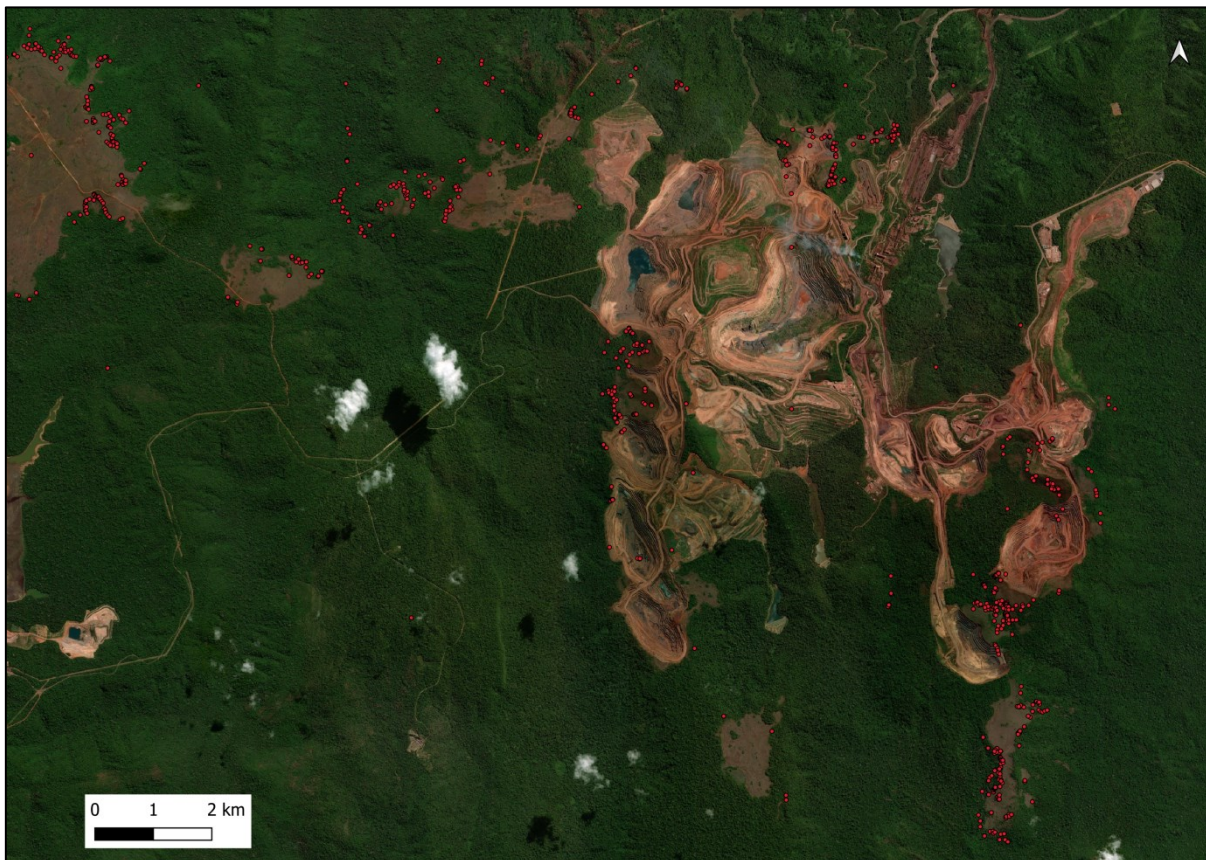


Figura 1- Cavidades naturais subterrâneas (pontos vermelhos) próximas a áreas de mineração e associadas à canga (manchas marrons) em Serra Norte [Município, Estado] (imagens Google Earth).

No cenário da mineração, a incorporação de valores éticos nas práticas industriais representa uma tendência recente na governança. Autores como Limaye (2012), Arvanitidis et al. (2017), Imbernon e Vasconcelos (2018), Ruchkys et al. (2019, 2020), Ayeha e Bleiche (2022), Cansenco e Favo (2022), Mudd (2020), Jouini et al. (2022), entre outros, destacam a importância da geoética nesse setor. Já na abordagem sobre o patrimônio espeleológico, de forma específica, a geoética é mais restrita, destacando-se as publicações de Antić et al (2020) e Buchanan et al (2022).

A geoética, que focaliza as relações e condutas humanas relativamente ao uso da geodiversidade e a aplicação de princípios éticos no contexto das geociências, desempenha um papel fundamental na promoção de práticas responsáveis e sustentáveis

na indústria da mineração. Esse é um campo emergente que ganhou relevância nas últimas décadas, que busca, entre outros objetivos: promover o uso sustentável dos recursos naturais; fomentar a disseminação de informações precisas sobre riscos naturais; promover a responsabilidade social dos geocientistas; orientar os formuladores de políticas a seguir o caminho do desenvolvimento sustentável; incentivar a aplicação de tecnologias mais amigáveis ao meio ambiente; construir uma boa relação entre a comunidade científica e a sociedade (Peppoloni and Di Capua, 2015).

Diante da extensão e relevância da atividade mineradora, assim como, em contraponto, da necessidade científica, histórica e cultural de preservar o patrimônio espeleológico, reconhecida pelo sistema jurídico brasileiro, torna-se importante delinear as fronteiras entre a exploração e a conservação e examinar as discussões travadas em torno desse tema. A aplicação integrada da geoética é crucial ao considerar simultaneamente a preservação do patrimônio espeleológico e as práticas de mineração em geossistemas ferruginosos. Em muitos casos, esses temas são abordados de forma isolada na literatura científica, tornando imperativa uma análise conjunta para garantir uma gestão responsável e sustentável. Isso é especialmente relevante dada a interconexão das cavernas de ferro, que devem ser tratadas desde a perspectiva da paisagem, de forma a equilibrar os interesses conflitantes entre empresas de mineração, comunidades locais e agências ambientais.

Nesse contexto, o artigo tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre o Plano Nacional de Mineração e o Plano de Pesquisa no Geossistema Ferruginoso de Carajás, buscando identificar áreas de convergência e divergência. Este estudo visa fornecer *insights* que promovam discussões fundamentadas em geoética. Além disso, o artigo se propõe a compreender as interseções e os possíveis desafios éticos pertinentes, contribuindo assim para o desenvolvimento de perspectivas informadas e responsáveis no âmbito dessas áreas.

9.2. PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO EM GEOSSISTEMAS FERRUGINOSOS

O patrimônio espeleológico brasileiro se distribui por diversas litologias, incluindo cavernas em rochas carbonáticas (Auler e Piló, 2014), ferruginosas (Calux, 2013; Ruchkys et al, 2015; Gomes et al., 2019), siliciclásticas, e granitoides e vulcânicas (CECAV, 2018). As rochas carbonáticas representam a maior parcela de cavernas

conhecidas (aproximadamente 68%), seguidas pelas rochas ferruginosas (cerca de 20%). Nos últimos anos, houve um aumento nas descobertas, principalmente devido aos dados provenientes de pesquisa e prospecção mineral em rochas ferruginosas para exploração de minério de ferro, que ocorrem nos denominados geossistemas ferruginosos (Cavalcanti et al., 2013; Piló, Coelho e Reino, 2015; Gomes et al., 2019).

Esses sistemas, conforme definidos por Carmo et al. (2015) e Ruchkys et al. (2015), representam unidades espaciais cujo substrato litológico é composto por rochas ferruginosas, como formações ferríferas bandadas (BIFs), itabiritos, jaspilitos, metadiamicritos ferruginosos, filitos ferruginosos, entre outros. Sua formação é resultado da interação dinâmica entre fatores fisiográficos (rochas, relevo, água, solos, clima, entre outros), biológicos e antrópicos (Sotchava, 1977; Dias e Santos, 2007). No contexto brasileiro, a predominância desses geossistemas é observada nos estados de Minas Gerais, Pará, Bahia e Mato Grosso do Sul. Esses ambientes não apenas se destacam como áreas naturalmente relevantes na superfície terrestre, mas também figuram entre os economicamente mais importantes e suscetíveis a conflitos de uso.

As rochas ferruginosas do Brasil, em especial as que ocorrem em Minas Gerais e no Pará são amplamente cobertas por uma camada de rocha composta por fragmentos em uma matriz de goethita, denominada canga. Apesar de tanto as rochas ferruginosas quanto a canga serem altamente resistentes à erosão e pouco solúveis, mais de 3.000 cavernas de minério de ferro se formaram em sua interface (Parker et al., 2017). Cavernas em áreas com concentrações elevadas de ferro foram identificadas em vários geossistemas ferruginosos ao redor do globo; no entanto, notadamente, há uma prevalência particular no Brasil em comparação com outras regiões produtoras de ferro em escala mundial (Parker et al., 2013; Brandi et al., 2019).

A formação dessas cavernas está diretamente vinculada a processos de dissolução e erosão, mediados pela água em movimento ou por lençóis freáticos, e à atividade de bactérias redutoras de ferro (Piló e Auler, 2005; Parker et al., 2013; Parker et al., 2017). Essas bactérias, com capacidade redutora de ferro, influenciam ativamente a formação das cavernas, promovendo a criação de biofilmes bacterianos nos tetos e paredes, associados às águas de percolação (Parker et al., 2013; Parker et al., 2017).

De modo geral, as cavernas ferruginosas tendem a ser compactas, frequentemente limitando-se a uma pequena câmara, com apêndices que se estreitam em canais menores. Grande parte dessas cavidades permanece seca, com ocorrência ocasional de drenagens

intermitentes, resultantes de gotejamentos ou percolação de águas pluviais por pequenas fissuras, principalmente durante a estação chuvosa. Embora não apresentem a mesma beleza cênica, nem a abundância de espeleotemas encontrados em cavernas de carbonato, algumas delas exibem características que justificam investigações e medidas de preservação. A fauna troglóbia dessas cavernas é pouco conhecida, registrando-se seguidas descobertas de novas espécies, documentadas em estudos (Inieta e Ferreira, 2013; Pellegrini e Ferreira, 2017; Ferreira et al., 2015). Algumas cavernas são identificadas como paleotocas, antigos habitats de preguiças-gigantes ou tatus do Pleistoceno, enquanto outras conservam vestígios de ocupação humana primitiva. Muitas se constituem como abrigo para espécies em risco de extinção ou permitem a ocorrência de interações ecológicas raras. Algumas apresentam grandes dimensões, distinguindo-se da média das cavernas nos litotipos associados ao ferro (Decreto 6.640/2008).

As cavernas, independentemente da litologia, compõem o patrimônio espeleológico nacional e estão sob o domínio da União, conforme o art. 20, inciso X, da Constituição Brasileira – CRFB (Brasil, 1988). Segundo o Anuário Estatístico do Patrimônio Espeleológico Brasileiro de 2022, o Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV) registra um total de 23.378 cavernas no país, das quais 10.717 (45,84%) se localizam em áreas de interesse para a mineração (3.802 em áreas com requerimento de lavra e 6.915 em áreas com concessão de lavra). Cabe destacar que o Anuário traz informações a respeito da sobreposição de interesses ou empreendimentos minerários em relação aos sítios ou áreas onde ocorrem cavernas de forma genérica, não fazendo distinção pelos geossistemas.

9.3. MINERAÇÃO EM GEOSISTEMAS FERRUGINOSOS

A mineração desempenha um papel essencial na economia global e está historicamente ligada à vida e ao desenvolvimento em sociedade. Muitos objetos úteis ao ser humano são construídos a partir de minerais, desde os de uso pessoal ou doméstico até os de emprego em grandes instalações de produção agrícola ou industrial. O minério de ferro, principal componente na produção de aço, tem um papel central na fabricação de máquinas, na construção civil e na produção de bens de consumo. Embora seja abundante na crosta terrestre (5%), sua exploração econômica é restrita a poucos países, como Brasil, Austrália, Índia, África do Sul, Ucrânia, Rússia, China, Estados Unidos e Canadá.

As reservas brasileiras estão concentradas nos Geossistemas Ferruginosos do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais) e de Carajás (Pará), com notável produção também no estado do Mato Grosso do Sul. Em 2022, as exportações brasileiras de minério de ferro atingiram US\$ 25,7 bilhões, sendo o Pará responsável por US\$ 12,8 bilhões, representando 49,8% do total nacional. Minas Gerais foi o segundo maior contribuinte, com 47% de participação (Governo do Pará, 2022).

A exploração do ferro no Brasil em escala industrial remonta ao período entre os anos 1940 ao final da década de 1960, baseando-se na exploração de hematita com teores de ferro superiores a 60% no Quadrilátero Ferrífero. Nos anos 1970, a escassez de jazimentos de alto teor impulsionou a exploração de itabiritos friáveis.

A descoberta da rica reserva mineral de ferro na Serra dos Carajás, em 1967, marcada por investimentos em pesquisas geológicas, foi crucial para definir a vocação mineral do Estado do Pará e marcou sua inserção na história global da mineração (Quaresma, 2009; Omachi, 2015; Costa, 2022). As minas da Serra dos Carajás, integradas à Floresta Amazônica, compreendem quatro setores: Serra Norte, Serra Leste, Serra São Félix e Serra Sul. A exploração teve início em 1984 na mina N4E, marcando o pioneirismo na Serra Norte. Além da N4E, nesta região encontram-se as minas N4WC, N4WN e N5 (Coelho, 2022).

No Brasil a mineração de ferro ocorre predominantemente a céu aberto, adotando o método de “bancada”. O processo envolve o desmonte do minério por meio de dinamites, perfuratrizes e escavadeiras elétricas. Tratores equipados com pás escavadeiras transportam o material para caminhões “fora de estrada”, que o levam ao pátio, de onde segue para as fases de beneficiamento. Coelho (2022) destaca que a compreensão da atividade mineradora vai além da simples descrição do processo de extração e beneficiamento dos minérios. A mineração envolve um processo de expropriação dos bens naturais, no qual a empresa mineradora privatiza recursos essencialmente públicos. A extração, o processamento e o beneficiamento valorizam esses recursos, cujo valor é apropriado pela empresa, resultando, entretanto, na socialização de impactos negativos culturais, ambientais e econômicos. Na relação com as comunidades mineradas, as empresas utilizam estratégias persuasivas, principalmente o discurso do desenvolvimento pela mineração (Coelho, 2012), que, não raramente, equivale a uma “chantagem econômica” (Acselrad et al., 2012). Esse discurso, propagado em regiões impactadas por atividades extrativas, enfatiza a criação de empregos e receitas

fiscais como impulsionadores do desenvolvimento socioeconômico, distorcendo a verdadeira dimensão dos impactos.

Além dos impactos evidentes da mineração de ferro, dois eventos específicos desencadearam discussões sobre geoética nesses geossistemas: as rupturas da barragem de Fundão em 2015 e da barragem I da mina de Córrego do Feijão em 2019, ambas localizadas no Geossistema Ferruginoso Quadrilátero Ferrífero. A aplicação de uma abordagem geoética é crucial em áreas tão ricas em recursos naturais, sociais e econômicos, onde interesses conflitantes são inevitáveis. Esses eventos não apenas provocaram uma avaliação crítica dos impactos socioambientais, mas também destacaram a necessidade urgente de considerações éticas sólidas na gestão desses recursos, cuja importância transcende as fronteiras geográficas e disciplinares.

9.4. PLANO DE PESQUISA GEOSSISTEMAS FERRUGINOSOS DA FLORESTA NACIONAL DE CARAJÁS E O PLANO NACIONAL DE MINERAÇÃO

9.4.1. Patrimônio espeleológico, mineração e políticas públicas

A CRFB, em seu artigo 20, relaciona os bens pertencentes à União, notadamente, nos incisos IX e X, os recursos minerais, inclusive os localizados no subsolo, as cavidades naturais subterrâneas e os sítios arqueológicos e pré-históricos.

Tanto os recursos minerais quanto o patrimônio espeleológico são reconhecidos como propriedades da União. Entretanto, a mineração é o único tipo de atividade econômica expressamente referido pela CRFB no que diz respeito à necessidade de recuperação do meio ambiente degradado. Assim, o texto normativo mais importante do Brasil confere especial relevância ao cumprimento de exigências ambientais no exercício da mineração e após o encerramento da atividade. Nesse contexto, é imperativo observar que as intervenções necessárias para a extração mineral devem ser conduzidas em estrita conformidade com as legislações vigentes relacionadas (Noldin et al., 2016).

A riqueza e diversidade da herança espeleológica e geológica do Brasil fundamentam a necessidade de abordagens distintas, tanto para a preservação do patrimônio espeleológico quanto para o fomento da atividade minerária. Diversos instrumentos legais respaldam políticas públicas específicas. Estas políticas incluem programas e iniciativas integradas, que visam desenvolver mecanismos para garantir a

conservação do patrimônio espeleológico, nos quadros da CRFBe da Política Nacional do Meio Ambiente, estabelecida pela Lei Federal 6.938 (Brasil, 1981). Simultaneamente, são implementadas políticas voltadas para o setor minerário, com o intuito de promover seu desenvolvimento e expansão em conformidade com as normativas vigentes.

Além do enfoque jurídico, as políticas públicas brasileiras concernentes ao patrimônio espeleológico e à mineração podem ser elucidadas por meio de planos e programas. Estas políticas emergem da interseção entre a compreensão de um problema identificado e a intenção deliberada de um agente de planejamento com a capacidade e autoridade para intervir nesse problema (Matus, 1989). São os planos e os programas que tornam o problema central da política mais acessível. São essas frentes de trabalho que atuam em segmentos específicos. No entanto, a expectativa em relação a uma política abrangente, coesa, eficiente e efetiva é que essas frentes, operando simultaneamente, se harmonizem para gerar resultados sinérgicos e integrados (Lassance, 2021). A diferença essencial entre planos e programas está no nível de decisões e detalhamento operacional. O plano é abrangente, incluindo estudos e análises para identificar áreas e estabelecer objetivos. O programa delimita um conjunto de projetos para atingir metas em uma política pública (Carvalho, 1978).

Nesse contexto, ressaltamos o Plano de Pesquisa Geossistemas Ferruginosos da Floresta Nacional de Carajás de 2017 e o Plano Nacional de Mineração (PNM-2030) elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (MME). O PNM-2030, considerado uma ferramenta estratégica, visa orientar políticas de médio e longo prazo para que o setor mineral seja um pilar do desenvolvimento sustentável do país.

9.4.2. Plano Nacional de Mineração – 2030

O PNM-2030 (2010) foi estruturado em cinco capítulos assim discriminados: (1) contexto do setor mineral; (2) desafios para a geologia, mineração e transformação; (3) cenários prováveis e visão de futuro; (4) previsão de demanda, investimentos e recursos humanos; (5) objetivos estratégicos e ações. O minério de ferro se destaca como o principal bem mineral no documento, sendo influente devido: à proeminência em relação aos bens minerais primários exportados; à concentração significativa da arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM); à previsão de aumento substancial na produção até 2030. O PMN-2030 (2010) ressalta a relevância do minério

de ferro para o país, não só por constituir 10% das exportações, mas também por seu potencial em promover o desenvolvimento local, regional e da indústria nacional, por meio da agregação de valor ao minério de ferro, impulsionando o desenvolvimento de produtos e serviços nacionais no setor mineral.

Diante da proeminência do minério de ferro no contexto nacional, especialmente nos geossistemas ferruginosos que abrigam um significativo patrimônio natural, incluindo cavernas e as cangas, tais aspectos deviam ser contemplados no documento. Entretanto, ao analisar a abordagem empregada, nota-se que as questões relacionadas ao patrimônio espeleológico, à ética, à geoética, à conservação ambiental e ao desenvolvimento sustentável, notadamente no âmbito da Flona Carajás, são abordadas de maneira superficial, quando mencionadas.

Dentre os temas abordados, a geodiversidade figura como um foco relevante, sendo destacada no PNM-2030 (2010) como um dos objetivos primordiais para a ampliação do conhecimento geológico. No contexto do Programa de Aceleração do Crescimento 2 – PAC 2 (2011–2014), as ações da CPRM incluíram o levantamento da geodiversidade, conforme mencionado no capítulo introdutório não numerado do referido documento.

No primeiro capítulo, dedicado ao contexto do setor mineral, é apresentado um tópico específico sobre geodiversidade. O documento ressalta o fortalecimento do conceito a partir de iniciativas conjuntas da SGM/MME e da CPRM, principalmente por meio do Projeto de Ordenamento Territorial Geomineiro (OTGM) em 2006, financiado pelo Banco Mundial. Nesse contexto, um banco de dados foi estabelecido para Áreas de Relevante Interesse Mineral (ARIMs), integrando posteriormente as ações da CPRM. Contudo, observa-se uma ênfase reducionista no aspecto econômico da geodiversidade, especialmente em relação às ARIMs, negligenciando outros valores e serviços ecossistêmicos e culturais da diversidade geológica (Gray, 2013).

No mesmo tópico, destaca-se a importância dos mapas de geodiversidade como ferramentas cruciais para compreender as influências ambientais das variações geológicas nos terrenos. Estes mapas são reconhecidos como instrumentos eficazes para promover o ordenamento territorial sustentável do país, abrangendo aspectos como a execução de obras civis, atividades agrícolas, levantamento de fontes poluidoras, prevenção de desastres naturais e potenciais de recursos hídricos subterrâneos, minerais e turísticos. Mesmo destacando que os mapas de geodiversidade têm outros fins para além dos

ARIMs, observa-se uma ênfase na perspectiva econômica da geodiversidade, dando-se pouco destaque a outros serviços ecossistêmicos essenciais que ela presta.

O tópico da geodiversidade ressurge no Item 2.1.3, “Mineração na Amazônia”, do Capítulo 2, apresentando-se como um desafio para a implementação efetiva do Macrozoneamento Ecológico-Econômico da Amazônia Legal. Este macrozoneamento visa consolidar diversas formas de acesso e uso do solo e subsolo, fundamentando-se em estudos abrangentes sobre biodiversidade, geodiversidade e as comunidades locais. O documento destaca que o Ministério do Meio Ambiente, em colaboração com outros ministérios, incluindo o MME, e governos estaduais, está em constante busca pela progressão dessa discussão, contribuindo para a resolução e antecipação de conflitos.

Finalmente, a geodiversidade aparece no item 4.2.4 do capítulo 4, que trata dos investimentos esperados para essa área: finalização dos mapas estaduais nas escalas 1:250.000 a 1:1.000.000 e nos estudos de detalhe das áreas de influência das grandes obras de infraestrutura do país, com destaque para as províncias e distritos minerais; desenvolvimento de ações que visam a reduzir a vulnerabilidade em processos que envolvam riscos geológicos e desastres naturais; apoio e continuidade na indicação para criação de geoparques; monitoramento de geoindicadores de mudanças climáticas; educação na prevenção de riscos geológicos; mapeamento geológico-geotécnico e delimitação de áreas de risco; implantação nos municípios do Sistema de Cadastro de Desastres Naturais; apoio ao Programa de Zoneamento Ecológico Econômico do Território Brasileiro.

As Unidades de Conservação (UCs) são abordadas especialmente no capítulo 2 (Desafios para a geologia, mineração e transformação mineral), no capítulo 4 (Previsão de demanda, investimento e recursos humanos) e no capítulo 5 (Objetivos estratégicos e ações). O documento destaca que os órgãos federais, em particular o MME e o MMA, vêm empreendendo esforços no estabelecimento de uma agenda comum quanto a tópicos relativos à mineração e ao meio ambiente, reconhecendo que a preservação ambiental deve ser considerada parte integrante do processo de desenvolvimento sustentável. No entanto, a Lei 9.985 (Brasil, 2000), que criou o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), é vista como um empecilho ao desenvolvimento de atividades minerais, embora seja reconhecida a necessidade do mapeamento de potencialidades geológicas em UCs na Amazônia. O documento expressa especial interesse no apoio à elaboração de planos de manejo de UCs de uso sustentável, que, comparadas às de

proteção integral, apresentam menos rigidez em termos de conservação, para que tenham previsão de atividade mineral, inclusive em suas zonas de amortecimento.

Considerando a importância do minério de ferro no cenário nacional, a Flona Carajás é mencionada em especial no capítulo 2 (Desafios para a geologia, mineração e transformação mineral) como um “exemplo de sucesso” da convivência da atividade mineral e Florestas Nacionais. Interessante notar que o documento apresenta, a título de comparação, imagens de satélite de 1980 e 2006 que revelam a intensa atividade antrópica na área do entorno ao projeto Carajás, que em menos de três décadas, praticamente eliminou toda a floresta nativa existente. O que restou foram as áreas protegidas que estão no entorno da mina de ferro. Essa é uma análise bastante estreita, uma vez que, até 1980, a floresta estava praticamente intacta frente à pressão minerária. Obviamente, a atividade de mineração gera um grande fluxo de pessoas e desencadeia uma expansão urbana na área do entorno de forma descontrolada. Não se pode medir assim os impactos da mineração de forma pontual (ou seja, restrita à área da cava). A panaceia de que a mineração tem um papel estratégico para a conservação das florestas é destacada também no capítulo 3 (Cenários prováveis e visão de futuro para o setor mineral): “o nível de conhecimento geológico alcançado confere ao setor mineral um papel estratégico para a conservação das florestas, especialmente quando comparado com outros setores econômicos de natureza mais extensiva, como o agronegócio”.

Dada a riqueza patrimonial associada aos geossistemas ferruginosos, realizou-se uma busca pela palavra “patrimônio” no documento do MME. Foi encontrada uma única ocorrência, que se refere ao pagamento de *royalties* como compensação pelo uso de recursos considerados bens da União e, por extensão, como parte integrante do patrimônio da sociedade brasileira. Essa compensação se faz necessária devido à natureza exaurível desses recursos minerais, que são reconhecidos como patrimônio coletivo do povo brasileiro. Termos como geotécnica, ética, geoconservação e patrimônio espeleológico não são abordados no documento.

9.4.3. Plano de Pesquisa Geossistema Ferruginoso da Floresta Nacional de Carajás

O Plano de Pesquisa Geossistemas Ferruginosos da Floresta Nacional de Carajás (PPGFFN, 2017) está dividido em três partes: Escopo e Contexto (quatro capítulos), Linhas Temáticas e Recomendações Prioritárias (sete capítulos) e Desafios para a

Geração de Conhecimento Aplicado ao Manejo (cinco capítulos). O desafio principal é reduzir assimetrias na distribuição espacial do conhecimento, identificar lacunas que afetam o processo decisório e estabelecer diretrizes para a gestão de dados, além de focar na formação de recursos humanos. O plano visa aprimorar a pesquisa, promover manejo sustentável e informado dos geossistemas ferruginosos em Carajás.

No Plano em questão, destaca-se inicialmente a utilização do termo “Geossistema Ferruginoso”, evidenciando o reconhecimento da complexidade inerente à gestão desse ambiente. Essa abordagem ressalta a interconexão entre a preservação das cavernas e o ambiente circundante.

Na seção inicial (Parte 1 – Escopo e Contexto), a temática da mineração é abordada, elucidando que os maciços ferríferos, associados às rochas do grupo Grão-Pará, Formação Carajás, abrigam as mais significativas reservas de minério de ferro de alto teor do mundo. O Capítulo denominado “Breve caracterização das especificidades ambientais da Floresta Nacional de Carajás” fornece justificativas fundamentadas sobre a relação entre as formações vegetais abertas e a diversidade de estruturas rochosas e edáficas na superfície da Serra dos Carajás, resultando em um mosaico de formas vegetacionais, que vão de campos úmidos ou secos a pequenos enclaves florestais.

Embora o termo “geodiversidade” não seja explicitamente mencionado no documento, as formações vegetais rupestres estão intrinsecamente ligadas a elementos que compõem essa diversidade, como as características das rochas (rica em ferro) e as propriedades do solo, incluindo composição, estrutura, nutrientes e pH.

No que tange aos elementos da geodiversidade, o Plano destaca a presença de platôs e lagoas perenes e temporárias, que desempenham papéis cruciais como fontes de água para a fauna da floresta circundante e possibilitam o habitat de espécies vegetais com diferentes requisitos hídricos. No contexto das cavernas, destaca-se a importância da região de Carajás como detentora do maior número conhecido de cavidades naturais subterrâneas ferruginosas no Brasil. Este reconhecimento ressalta o caráter absolutamente singular da região em termos de patrimônio espeleológico e sua significativa contribuição para a compreensão e conservação desse ecossistema único.

Na sequência, o Plano apresenta um histórico sobre a exploração e a conservação da Serra dos Carajás. Sobre a exploração mineral, não faz menção ao Plano Nacional de Mineração 2030 (2010), mas discorre sobre o histórico de desenvolvimento dessa atividade, que levou à criação da Floresta Nacional de Carajás e apresenta como objetivos

específicos de seu plano de manejo: (1) conservar biodiversidade, recursos naturais e belezas cênicas; (2) promover o uso múltiplo dos recursos naturais; 3) compatibilizar exploração mineral com conservação; 4) proteger características hidrológicas da bacia do rio Itacaiúnas. Sobre os alvos de conservação selecionados, o documento considera em três focos: Biodiversidade; Cavidades Naturais Subterrâneas; Geoambientes.

Na Parte II, são delineadas as linhas temáticas e recomendações prioritárias. As linhas de pesquisa essenciais e as diretrizes fundamentais para o licenciamento da atividade minerária são apresentadas de maneira a servir como orientação para os processos em conformidade com a legislação vigente, além de estimular pesquisas voltadas para as demandas específicas de manejo e monitoramento da UC. Os temas são assim apresentados (aqui destacam-se somente alguns aspectos de cada item): *Flora*: com destaque para as espécies consideradas endêmicas de canga, como a *Ipomoea cavalcantei*, a flor de Carajás – um dos símbolos da Flona (Figura 2); *Vertebrados*: com destaque para o morcego *Natalus macrourus*, estritamente cavernícola, com ocorrência muito restrita e ameaçado de extinção; *Cavidades Naturais Subterrâneas*: destaca a necessidade de maior abrangência do conhecimento espeleológico, que está restrito às áreas de mineração devido a processos de licenciamento; além disso, levanta a questão da associação paisagística entre cavernas e ambiente externo e a necessidade de monitoramento dos impactos da mineração sobre elas (Figura 3); *Geoambientes*: com destaque para as lagoas típicas de formações ferríferas, de grande beleza cênica e importância como reservatórios de água (Figura 4); *Recursos Hídricos*: destaca a necessidade de compreensão das condições naturais de contribuição hídrica nos distintos tipos de bacias e suas associações litológicas, bem como dos potenciais efeitos decorrentes da atividade minerária sobre a quantidade e qualidade da circulação hídrica; *Arqueologia*: destaca a necessidade de avaliação do potencial do patrimônio arqueológico nos ecossistemas da Serra dos Carajás.



Figura 2- *Ipomea cavalcantei*. Espécie endêmica de algumas áreas de canga na Flona de Carajás.

É notável o pouco uso do termo “patrimônio” ao longo do texto, termo esse que poderia destacar a importância desses bens, especialmente considerando os objetivos de conservação delineados. A inclusão desse conceito, que, por si só, é evocativo de uma ideia de preservação (o que é patrimônio *deve ser* transmitido) é fundamental para ressaltar e reforçar os valores geológicos, ecológicos e culturais associados às cavernas, que, por sua característica, são bens da União e encontram proteção no âmbito dos patrimônios natural e cultural brasileiro, protegidos desde a CRFB (artigos 225 e 216, respectivamente).

Por fim, a Parte III explora os desafios relacionados à produção, organização, comunicação e disseminação do conhecimento aplicado ao manejo. Além disso, é apresentado um plano de trabalho resumido.



Figura 3 – Caverna natural subterrânea situada na canga e vegetação associada.



Figura 4 - Lagoa do Violão. Serra Sul

9.5. GEOÉTICA, PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO E MINERAÇÃO

9.5.1. A abordagem geoética no contexto da mineração

A geoética na mineração tem sido um tema tratado por alguns autores, a exemplo de Lambert (2012); Arvanitidis et al. (2017); Imbernon e Vasconcelos (2018); Careddu et al. (2019); Ruchkys et al. (2019); Mudd (2020); Ruchkys et al. (2020); Ayeh e Bleicher (2021); Canseco e Fava (2022); Jouini et al. (2022).

Lambert (2012) aborda pioneiramente a interseção entre mineração e geoética, destacando a situação na Austrália, um dos principais países mineradores do mundo. O autor destaca o arcabouço legal australiano para proteção ambiental e as diretrizes específicas que regem práticas impactantes aos sistemas naturais. Sociedades profissionais e empresas, alinhadas com políticas de sustentabilidade, divulgam códigos éticos. Na mineração, exigências de fundos de reabilitação durante operações visam cobrir custos pós-fechamento. Apesar desses sistemas não serem perfeitos, algumas revisões e a pressão pública conduzem a melhorias ou, em casos extremos, ao encerramento de atividades danosas ao ambiente. Empresas têm a responsabilidade final de desempenho, sendo que o descumprimento está sujeito a multas e prisão. Para o autor, em países em desenvolvimento, em meio a práticas inadequadas e corrupção generalizadas, a abordagem ética não existe ou é incipiente, e as condutas adequadas de empresas de mineração somente ocorrem sob a coerção da lei e das instituições públicas que exigem o cumprimento dela.

Imbernon e Vasconcelos (2018) analisaram a percepção de estudantes brasileiros e portugueses sobre os impactos ambientais da mineração, com ênfase nos casos da barragem de rejeitos da Samarco em Mariana (MG), e da mina Terramonte em Castelo de Paiva, Portugal. As autoras destacam que, apesar do repúdio aos danos ambientais da mineração, a sociedade aceita as consequências negativas, associadas à necessidade de recursos minerais, mesmo em situações amplamente divulgadas.

Os artigos de Ruchkys et al. (2019) e Ruchkys et al. (2020) destacam a perspectiva da geoética em relação aos rompimentos de barragens de mineração no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, Brasil, uma das principais províncias minerais mundiais. Em Ruchkys et al. (2019), os autores analisaram o rompimento da barragem de rejeitos de Córrego do Feijão da Companhia Vale, aplicando princípios geoéticos à reação da empresa, considerando efeitos ambientais e sociais, a comunicação, prevenção de perigos, responsabilidade com futuras gerações e opções tecnológicas. As análises destacam a urgência de uma abordagem geoética por parte da empresa, para além da observância meramente protocolar das exigências legais. Em Ruchkys et al. (2020), os autores desafiam a visão convencional de que a mineração na região do Quadrilátero Ferrífero traz apenas desenvolvimento, ressaltando a necessidade de ações responsáveis e éticas no setor. Defendem a inclusão de abordagens geoéticas na gestão de geossistemas ferruginosos no Brasil e destacam que as rupturas das barragens Fundão (2015) e Córrego

do Feijão (2019) foram classificadas entre as mais danosas, em escala global, na última década. Os danos ambientais mais significativos ocorreram em Fundão/Brasil (43.000.000 m³) e Mount Polley/Canadá (23.600.000 m³). Em termos de perdas humanas, Córrego do Feijão/Brasil (257) e Hpakant/Myanmar (113) registraram os maiores impactos.

Careddu et al. (2019) examinam a extração de pedras ornamentais na Sardenha, Itália, propondo métodos e tecnologias para uma operação responsável e sustentável, alinhada com os valores geoéticos. Os valores geoéticos, conforme definidos na Declaração de Cape Town sobre Geoética, foram aplicados a casos específicos na indústria de rochas ornamentais, com exemplos nessa região, que tem uma longa história de produção. O artigo oferece sugestões claras sobre como os geocientistas podem contribuir de maneira ética para o setor, abordando tópicos como desenvolvimento sustentável, geoconservação, geoturismo, relações com comunidades locais e tradições e responsabilidade corporativa.

O trabalho de Mudd (2020) aborda questões complexas da mineração, explorando sua relação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e os impactos ambientais. Examina tendências, abordagens éticas e destaca a Iniciativa para a Mineração Responsável (IRMA). Apesar dos desafios ambientais, mantém otimismo na direção positiva, sustentável e geoética da mineração moderna.

Ayeh e Bleicher (2021) exploram as primeiras incursões nas reflexões sobre geoética, concentrando-se na esfera da atuação profissional, para analisar os distintos papéis e posições assumidos pelos profissionais no intrincado contexto da indústria de mineração. Os autores sustentam que a geoética detém o potencial de complementar as abordagens predominantes, que consideram as corporações como entidades éticas, deslocando o foco para os indivíduos. No entanto, ressaltam que a geoética ainda não lida de maneira abrangente com as variadas e, por vezes, conflitantes responsabilidades inerentes à indústria da mineração, especialmente as tensões (potenciais) entre responsabilidade individual e institucional.

Canseco e Fava (2022) abordam a geoética na educação, destacando um estudo de caso sobre a mineração, especificamente o impacto da atividade no subsolo do bairro Barri de l'Estació (Município de Sallent) na Bacia Potássica da Catalunha, Espanha. O dilema geoético é utilizado para analisar diferentes cenários de geogovernabilidade, visando identificar quais seriam as etapas qualitativas para um território resiliente e

geodiversificado, onde mineração e preservação ambiental são complementares, não exclusivas.

Jouini et al. (2022) compararam a sustentabilidade da produção de elementos de terras raras (ETR) a partir de fontes primárias e secundárias, considerando doze categorias de impactos ambientais e sociais. Os resultados destacam a menor pegada ambiental da produção de ETR a partir de fontes secundárias. Os autores sugerem que governos e partes interessadas promovam a reciclagem de fontes secundárias de ETR, alinhada com princípios de geoética, para equilibrar a demanda crescente e reduzir a exploração excessiva de recursos não renováveis.

Por fim, um dos documentos mais importantes é o produzido pelo Grupo de Trabalho sobre Mineração Responsável da Associação Internacional de Promoção da Geoética (IAPG), (Arvanitidis et al., 2017), que destaca princípios fundamentais para abordar a geoética na mineração. As melhores práticas incluem: (1) identificar e envolver todos os atores relevantes, compreendendo e atendendo às expectativas da sociedade, evitando suborno e corrupção; (2) realizar diálogo aberto e contínuo com as comunidades locais para estabelecer relacionamentos transparentes e colaborativos; (3) contribuir para a boa governança local e o desenvolvimento comunitário; (4) minimizar impactos ambientais e evitar conflitos de uso da terra; (5) entender questões de biodiversidade e conservação; (6) reconhecer a possibilidade da negação ou desaprovação a projetos que não atendem a critérios ambientais e sociais; (7) promover a eficiência energética e o uso de fontes renováveis; (8) gerenciar resíduos de forma eficiente e segura, considerando transporte e rejeitos; (9) planejar o fechamento e a reabilitação com base em gestão ambiental e social sustentável; (10) garantir acesso a minerais livres de conflito, explorando fontes éticas e locais; (11) fornecer ambientes de trabalho seguros e saudáveis; (12) educar estudantes de geologia e engenharia de minas sobre a gestão eficaz de recursos minerais e a responsabilidade social.

Além desses princípios, o documento destaca a importância da inclusão dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) nas atividades das empresas de mineração, evitando a prestação de serviços sociais de responsabilidade governamental. Também expressa preocupações com a mineração no fundo do mar, uma fronteira que deve ser amplamente debatida do ponto de vista científico, e com a mineração artesanal que ainda é forma de subsistência para muitas famílias.

9.5.2. A abordagem geoética no contexto do patrimônio espeleológico

A abordagem geoética no contexto do patrimônio espeleológico foi ainda menos explorada do que em relação à mineração, destacando-se as reflexões de Antić et al. (2020) e Buchanan et al. (2022). Esses estudos focalizam o uso turístico de cavernas, visando incorporar uma perspectiva geoética na exploração para essa finalidade.

Antić et al. (2020) analisam práticas exemplares e inadequadas em dois casos extremos: a Caverna de Gabrovnica (Leste da Sérvia) e a Caverna de Lascaux (Sul da França). A Caverna de Gabrovnica, que possui uma pintura significativa representando um cavalo com cavaleiro, datada entre o final da Idade do Bronze e o início da Idade do Ferro, foi vandalizada, causando danos físicos por meio de um objeto pontiagudo. Para promover um uso mais responsável, medidas geoéticas propostas pelos autores incluem a colaboração com ONGs locais para criar passeios que permitam a visita às pinturas antigas e a educação da população local sobre a importância cultural e histórica dessas representações.

Os autores utilizam a Caverna de Lascaux como estudo de caso de boas práticas. Esta caverna, uma das mais importantes do Paleolítico Superior, foi fechada em 1963 devido a danos causados pelo turismo, como alterações provocadas pela respiração dos visitantes e crescimento microbiano devido à iluminação. Em resposta, o governo francês criou réplicas fidedignas, incluindo Lascaux II (1963) e Lascaux 2.5 (1993). Posteriormente, uma versão de realidade virtual foi desenvolvida. Essas medidas preservam a integridade da caverna, permitindo a apreciação por meios alternativos, como tecnologias modernas. Isso exemplifica a aplicação positiva de valores geoéticos na gestão de cavernas afetadas pela atividade turística, na busca do equilíbrio entre conservação e uso. Com base das análises realizadas, Antić et al. (2020) destacam três princípios-chave para a gestão sustentável de cavernas turísticas: monitoramento do impacto turístico no ecossistema; educação em valores de geoética para a preservação da geo-herança e a cooperação local; e implementação de soluções, como estabelecimento de capacidade de visitantes, trilhas educativas e parcerias com museus locais para promover o espeleoturismo.

Da mesma forma que a Associação Internacional de Promoção da Geoética produziu um documento específico para a mineração (Arvanitidis et al., 2017), ela o fez para o espeleoturismo (Buchanan et al., 2022). Esses dois documentos enfatizam a

preocupação da IAPG com o uso econômico de elementos da geodiversidade e a necessidade de práticas baseadas em princípios geoéticos.

Buchanan et al. (2022) dedicam atenção aos sistemas cársticos tradicionais presentes em rochas carbonáticas, destacando as cavernas como destinos primordiais para o espeleoturismo. Os autores apresentam diretrizes cruciais para o acesso a esses ambientes, adotando uma abordagem geoética. Enfatizam a necessidade de decisões que garantam a preservação dos elementos naturais, culturais e arqueológicos, tais como rochas, minerais, sedimentos, depósitos, organismos, microrganismos, ossos fossilizados e gravuras, com o intuito de minimizar impactos não apenas durante atividades turísticas, mas também em pesquisas científicas.

O texto ressalta a importância de estabelecer uma ordem em cavernas destinadas a estudos científicos, visando à preservação de comunidades ecótonas que desempenham papéis cruciais como filtros biológicos. As expedições em cavernas são abordadas como atividades que demandam planejamento meticuloso, incorporando princípios de conservação ambiental geoéticos, refletidos no pensamento espeleoético. Adicionalmente, são destacados aspectos como a consideração da presença de patógenos e a promoção do desenvolvimento de códigos de conduta internacionais, visando à padronização e à proteção global desses ambientes únicos e delicados. Esse conjunto abrangente de recomendações procura assegurar que as atividades humanas em cavernas sejam conduzidas com a máxima responsabilidade, respeitando e preservando a riqueza única desses ecossistemas subterrâneos.

9.6. GEOÉTICA, PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO, MINERAÇÃO E POLÍTICAS PÚBLICAS INTEGRADAS

Dada a sua significativa importância, a CRFB classifica tanto os recursos minerais quanto o patrimônio espeleológico como pertencentes à União. Nesse contexto, ambos são tratados com igual consideração e abrangidos por disposições legais específicas. Sobre as cavidades, reconhecidas como patrimônio natural e cultural ao abrigo dos artigos 225 e 216, respectivamente, da CRFB, o Estado deve adotar medidas efetivas para garantir sua conservação. Por outro lado, é imperativo que o Poder Público, ao planejar ou deliberar sobre o desenvolvimento econômico dessas áreas, pautar-se por critérios de sustentabilidade ambiental, tomando a proteção ambiental, efetivamente, como um princípio da ordem econômica (CRFB, art. 170, inciso VI).

A análise aqui realizada de dois instrumentos de políticas públicas para área de mineração e para a área de patrimônio espeleológico demonstra a ausência de sintonia entre a conservação e o uso dos recursos naturais. Considerando termos importantes no contexto desse artigo, realiza-se uma comparação entre a abordagem desses dois instrumentos: Plano Nacional de Mineração e Plano de Conservação do Patrimônio Espeleológico para a Flona Carajas (Tabela X).

Termos Importantes no contexto da pesquisa	Plano Nacional de Mineração 2030	Plano de Pesquisa Geossistema Ferruginoso da Floresta Nacional de Carajás
Mineração	Sim	Sim
Cavernas	Somente uma vez no glossário	Sim
Geossistema Ferruginoso	Não	Sim
Biodiversidade	Somente duas vezes (uma no glossário)	Sim
Geodiversidade	Sim	Não
Patrimônio Espeleológico	Não	Somente cinco vezes
Geoconservação	Não	Não
Turismo	Não	Somente uma vez
Ética	Não	Não
Geoética	Não	Não

A palavra “mineração” é essencial nos dois instrumentos, evidenciando sua relevância no âmbito nacional. No Plano Nacional de Mineração (PNM), o termo “cavernas” é mencionado apenas no glossário, enquanto “biodiversidade” é abordado em apenas uma instância. No entanto, esses termos recebem maior destaque no Plano de Pesquisa Geossistema Ferruginoso da Floresta Nacional de Carajás (PPFFNC). O conceito de “patrimônio espeleológico” é completamente omissivo no PNM e é referido apenas cinco vezes no PPFFNC, embora esse último faça uso frequente do termo “Geossistema Ferruginoso”, enquanto o primeiro prioriza o termo “Geodiversidade”. Além disso, questões centrais como geoconservação, turismo, ética e geoética são negligenciadas em ambos os contextos.

A disparidade entre as políticas públicas relativas à mineração e ao patrimônio espeleológico frequentemente resulta de conflitos de interesse. Faz-se pertinente o desenvolvimento de um plano integrado em uma área piloto, alinhado aos princípios geoéticos, que concilie a atividade mineradora com a conservação efetiva dos valores associados às cavidades naturais subterrâneas, em especial em geossistemas ferruginosos.

De maneira sugestiva, um plano integrado poderia ser pautado em diretrizes éticas específicas para a exploração mineral em geossistemas ferruginosos, além de diretrizes

éticas que considerem o patrimônio espeleológico como bem para usufruto da presente e das futuras gerações. Neste sentido, questões fundamentais a serem consideradas são: (a) *Gerenciamento do Conhecimento*, realizando-se o contínuo inventário, o mapeamento e a classificação de cavernas, considerando seus valores biológicos, geológicos, hidrológicos, paleontológicos, arqueológicos e históricos para além das áreas licenciadas pela mineração; desenvolver uma plataforma abrangente para o gerenciamento de dados e informações sobre a paisagem do geossistema ferruginoso e seu patrimônio espeleológico associado; utilizar a plataforma como um repositório para informações relevantes à biodiversidade e à geodiversidade, facilitando a gestão eficaz da paisagem; (b) *Avaliação dos serviços ecossistêmicos do geossistema ferruginoso*, de forma abrangente e detalhada, considerando os diferentes serviços prestados tanto pela mineração como pelas cavernas, buscando-se, inclusive, uma análise quantitativa a longo prazo que indique os reais beneficiários tanto da preservação do geossistema como de sua exploração pela mineração; (c) *Integração de espeleoturismo e mineração*, desenvolvendo-se roteiros turísticos que destaquem a relevância das cavernas e, simultaneamente, abordem as práticas responsáveis da indústria mineradora; implementando-se programas de educação ambiental e cultural para turistas que enfatizem a coexistência harmônica entre a mineração e a preservação espeleológica; (d) *Instituir uma abordagem de avaliação contínua* que considere os impactos ecológicos e culturais da mineração nas cavernas; desenvolver e utilizar indicadores de geoética para avaliar a conformidade das operações mineradoras com os princípios éticos estabelecidos; (e) *Pesquisa e desenvolvimento conjunto*, a partir do fomento a parcerias entre a indústria mineradora, instituições acadêmicas e órgãos de preservação para pesquisas conjuntas sobre a interação entre a mineração, a geoética e o patrimônio espeleológico; do desenvolvimento de tecnologias inovadoras que minimizem os impactos ambientais da mineração em áreas espeleológicas sensíveis; (f) *Aplicação dos princípios da precaução e da prevenção*, baseados numa abordagem cautelosa na tomada de decisões, especialmente quando há incertezas científicas sobre os impactos potenciais da mineração nas cavernas; implementar medidas preventivas baseadas no princípio da precaução para proteger o patrimônio espeleológico de danos irreversíveis.

Essa abordagem integrada visa equilibrar as necessidades da indústria mineradora com a preservação ética do patrimônio espeleológico, promovendo uma gestão responsável e sustentável. A geoética, assim, se torna o alicerce que orienta as ações,

contribuindo para a integridade ambiental e cultural em toda a extensão do processo de mineração.

9.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os geossistemas ferruginosos, ricos em recursos minerais, não apenas oferecem ativos econômicos consideráveis, mas também sustentam habitats únicos e valiosos serviços ecossistêmicos. Contudo, sua suscetibilidade à destruição, agravada pela expansão das minas de ferro, demanda uma gestão holística que não se reduza à observância formal do direito vigente. Esta necessidade é ainda mais evidente diante da importância da preservação das cavidades em formações ferríferas, tornando uma abordagem geoética crucial.

Apesar da relevância, a abordagem geoética integrada à mineração e ao patrimônio espeleológico ainda não foi suficientemente explorada, havendo uma lacuna significativa na literatura no que diz respeito a essas questões críticas. Até o momento, as pesquisas têm se concentrado de forma setORIZADA, separando a geoética relacionada à mineração daquela associada ao patrimônio espeleológico. Essa fragmentação impede uma compreensão abrangente das questões éticas que a exploração desses recursos coloca, o que, no limite, acaba por favorecer a expansão e a intensificação dessa exploração sem uma ponderação crítica e antecedente (a partir dos princípios da precaução e da prevenção) a respeito da distribuição dos benefícios e dos custos sociais dela decorrentes.

Nesse contexto, é imperativo promover uma abordagem integrada que leve em consideração tanto as questões éticas associadas à atividade mineradora quanto a preservação do patrimônio espeleológico, visando alcançar um equilíbrio sustentável entre desenvolvimento econômico e conservação ambiental. Propõe-se, portanto, uma reflexão crítica sobre a necessidade de estudos interdisciplinares que abordem a geoética de maneira abrangente, considerando simultaneamente as complexidades associadas à mineração e à preservação do patrimônio espeleológico.

PARTE 3

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APRESENTAÇÃO

- Auler, A., Piló L., Parker, C., Senko, J., Sasowsky, I., Barton, H., 2014. Hypogene cave patterns in iron ore caves: Convergence of forms or processes? In: Klimchouk, A.B., Sasowsky, I.D., Mylroie, J., Engel, S.A., Engel, A.S. (Eds.), Hypogene cave morphologies. Karst Water Institute, Virginia, p. 15-19.
- Barreto, J.M.C. 2007. Potencial geoturístico da região de Rio de Contas - Bahia, Brasil. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal da Bahia, Dissertação de Mestrado, 164 p.
- Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Magri, O., and Meza, P. (2009). Assessing Regional Geodiversity: The Iberian Peninsula. *Earth Surf. Process. Landforms* 34, 1433–1445. doi:10.1002/esp.1840.
- Bosi, C., Peppoloni, S., Piacente, S 2008, Philosophical and epistemological debate in Italy within an ethical perspective of Earth Sciences. Proceedings of the International Geological Congress, 2008, Oslo, No.33.
- Brilha J. Patrimônio geológico e geoconservação: a conservação da natureza na sua vertente geológica. Braga, Portugal: Palimage Eds, 190 pp., 2005.
- Brilha, J. Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: a review. *Geoheritage*, v.1, sem paginação, 2015.
- Bruschi V.M. Desarrollo de una metodología para la caracterización, evaluación y gestión de los recursos de la geodiversidad. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, Santander, Dep. Ciencias Tierra y Fis. Mat. Cond., 354 pp., 2007.
- Carcavilla Urqui, L. Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, Dep. Quim. Agr Geol Geoq, 339 pp., 2006.
- Carmo, F.F.; Kamino, L.H.Y. (Org.). Geossistemas Ferruginosos do Brasil. 1ed. Belo Horizonte: i3 Editora, 552 pp., 2015.
- Carmo, F.F.; Campos, I.C.; Jacobi, C.M. Cangas: ilhas de ferro estratégicas para a conservação. *Ciência Hoje*, n. 295, pp. 48-53, 2012.
- Castro, A.R.S. 2009. Geoconservação e musealização: a aproximação entre duas visões de mundo. Os múltiplos olhares para um patrimônio. Programa de Pós-Graduação em Museologia e Patrimônio, Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 146 p.
- Castro, P.T.A; Ruchkys, U.A.; Manini, R. T. A sociedade civil organizada e o rompimento da barragem de Fundão, Mariana (MG): porque é preciso difundir a geoética . *Revista Terrae Didatica*, Campinas, v. 14, p. 439-444, 2018.
- Consuegra, R. R.; Mengana, J.I.; Cardenas, R.; Cambra, K.E.N.; Pérez-Díaz, N.; Martín, O. Geodiversity, Heritage, and Geoethics in an Archipelago. In: Acevedo, R.D.; Frías,

- J.M. (Editors). *Geoethics In Latin America*. Springer International Publishing AG, pp. 141-152, 2018.
- Crofts, R. Promoting geodiversity: learning lessons from biodiversity. *Proceedings of the Geologists' Association*, n.125, pp.263–266, 2014.
- Druguet, E.; Passchier, C. W., Pennacchioni, G., Carreras, Jordi. *Geoethical education: A critical issue for geoconservation*. *Episodes*, v.36, p.11-18.
- Duff K. *Natural Areas: an holistic approach to conservation based on Geology*. In: O'Halloran D., Green C., Harley M., Stanley M., Knill J. (Eds.). *Geological and Landscape Conservation*. London: Geol. Soc., pp. 121-126, 1994.
- Gomes, M.; Ruchkys, U.A. ; Ferreira, R.L. ;Goulart, F.F. *Landscape fragmentatiton around ferruginous caves of the Iron Quadrangle, Minas Gerais, Brazil*. *Cuadernos de Geografia: Revista Colombiana de Geografia*, n. 28, v.1, pp. 89-101, 2019.
- Gray, M. *Geodiversity: valuing and conseving abiotic nature*. Wiley: Chichester, 434 pp., 2004.
- Gray M. 2005. *Geodiversity and geoconservation: what, why, and how? The George Wright Forum*, n.22, v.3, pp. 4-12, 2005.
- Gray, M. *Other nature: geodiversity and geosystem services*. *Environmental Conservation*, n. 38, pp. 271–274, 2011.
- ICMBIO. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. *STCP Engenharia de Projetos LTda Plano de manejo da Floresta Nacional de Carajás*. Brasília: MMA, 2v, 2016.
- ICMBIO. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. *Plano de pesquisa geossistemas ferruginosos da Floresta Nacional de Carajás: temas prioritários...organizadora Bezerra, L.; colaboradores Ribeiro, A. et al*. Brasília: ICMBIO, 82 p, 2017.
- Mansur, K.L. 2010. *Diretrizes para a geoconservação do patrimônio geológico do estado do Rio de Janeiro. O caso do domínio tectônico Cabo Frio*. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 214 p.
- Medeiros, W.D.A. 2003. *Sítios geológicos e geomorfológicos dos municípios de Acari, Carnaúba dos Dantas e Currais Novos, Região do Seridó do Rio Grande do Norte*. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Dissertação de Mestrado, 140 p.
- Moreira, J.C. 2008. *Patrimônio geológico em unidades de conservação: atividades interpretativas, educativas e geoturísticas*. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Tese de Doutorado, 429 p.

- Peppoloni, S. and Di Capua, G., 2012, Geoethics and geological culture: awareness, responsibility and challenges. *Annals of Geophysics*, No.55, p. 335-34. doi: <https://doi.org/10.4401/ag-6099>.
- Peppoloni, S., Bilham, N., Di Capua, G., 2019. Contemporary Geoethics Within the Geosciences. In: Bohle, M. (Ed.), *Exploring Geoethics. Ethical Implications, Societal Contexts, and Professional Obligations of the Geosciences*. Palgrave Macmillan UK, Cham, pp. 25–70.
- Pinheiro, G.M.S. Ferruginous Geosystems and the Current Situation of Iron in Brazil: Economic Growth or Environmental Regression? In: Acevedo, R.D.; Frías, J.M. (Editors). *Geoethics In Latin America*. Springer International Publishing AG, pp. 39-54, 2018.
- Ruchkys, U. 2007. Patrimônio Geológico e Geoconservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: Potencial para a criação de um Geopark da UNESCO. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 209 f.
- Ruchkys, U.A.; Machado, M.M.M. Serviços da geodiversidade associados às rochas ferruginosas. In: Ruchkys, U.A; Travassos, L.E.P.; Rasteiro, M.A.; Faria L. (Org.). *Patrimônio espeleológico em rochas ferruginosas: propostas para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, pp. 262-273, 2015.
- Ruchkys Úrsula Azevedo; Mansur, K. L.; Bento, L. C. M. A historical and statistical analysis of the brazilian academic production on master's and PHD level, on the following subjects: geodiversity, geological heritage, geotourism, geoconservation and geoparks. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*. v.40, p.180 - 190, 2017.
- Ruchkys, Ú. A.; Amorim, P. T.; Miranda, M. P. S. Mineração em Geossistemas Ferruginosos e Questões de Geoética: o Caso do Rompimento da Barragem de Córrego do Feijão, Minas Gerais – Brasi. *CONFINS (PARIS)*, v.40, p.1, 2019.
- Ruchkys, U.A. Sítios geológicos e propostas brasileiras de geoparques em geossistemas ferruginosos. In: Carmo, F.F.; Kamino, L.H.Y. (Org.). *Geossistemas Ferruginosos do Brasil*. Belo Horizonte: i3 editora, pp. 169-193, 2015.
- Santos, D.J; Ruchkys, Ú. A.; Panisset, L.T. The educational potential of geodiversity in Ferruginous Geosystem: the example of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Geoheritage*., 2021. <https://doi.org/10.1007/s12371-021-00550-2>
- Sharples C. A methodology for the identification of significant landforms and geological sites for conservation purposes. Report to forestry commission, Tasma report to forestry commission, Tasmania, 1993.
- Sharples C. Concepts and principles of geoconservation. Austrália: Tasmanian Parks & Wildlife Service, 79 pp., 2002.

Silva, C.R.; Ramos, M.A.B.; Pedreira, A.J.; Dantas, M.E. Começo de tudo. In: Silva C.R. ed. Geodiversidade do Brasil: conhecer o passado para entender o presente e prever o futuro. Rio de Janeiro: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, pp. 11-20, 2008.

Valenzuela, M.; Benado, J. Meteorites and Craters Found in Chile: A Bridge to Introduce the First Attempt for Geoheritage Legal Protection in the Country. In: Acevedo, R.D.; Frías, J.M. (Editors). *Geoethics In Latin America*. Springer International Publishing AG, pp. 103-115, 2018.

2. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA SOBRE A FLONA CARAJÁS: ABORDAGEM SOBRE ESTUDOS AMBIENTAIS EM GEOSSISTEMAS FERRUGINOSOS E SUA RELAÇÃO COM A GEODIVERSIDADE TEMAS CORRELATOS

- Alahuhta, J.; Tukiainen, H.; Toivanen, M.; Terhi Ala-Hulkko, Vahid Farrahi, Jan Hjort, Tiina M Ikäheimo, Tiina Lankila, Tuija Maliniemi, Soile Puhakka, Henriikka Salminen, Marjo Seppänen, Saija Korpelainen*, Ding Ding*. Acknowledging geodiversity in safeguarding biodiversity and human health. *Lancet Planet Health* 2022; 6: e987–92. Personal View.
- Araújo, Carlos A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. *Revista em Questão*. Rio de Janeiro. 2006. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/EmQuestao/article/view/16>.
- Bradford, S. C. (1934). Sources of Information on Scientific Subjects. *Engineering: An Illustrated Weekly Journal*, 137, 85-86.
- BrasiL. Portaria. 39, 06 de maio de 2016. Plano de Manejo da Floresta Nacional de Carajás - PA. Cláudio Carrera Maretti. Ministério Público. Diário Oficial da União 2.200-2. 130 pg, 09 de Maio de 2016.
- Brescovit, A. D.; Cizauskas, I.; Mota, L. P. Seven new species of the spider genus *Ochyrocera* from caves in Floresta Nacional de Carajás, PA, Brazil (Araneae, Ochyroceratidae). *ZooKeys*, n. 726, p. 87, 2018.
- Brescovit, A. D.; Z., Robson de A.; Cizauskas, I. The first two blind troglobitic spiders of the genus *Ochyrocera* from caves in Floresta Nacional de Carajás, state of Pará, Brazil (Araneae, Ochyroceratidae). *ZooKeys*, v. 1031, p. 143, 2021.
- Chueke, G. V.; Amatucci, M. O que é bibliometria? Uma introdução ao Fórum. *Internext: Revista Eletrônica de Negócios Internacionais*, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 1–5, 2015.
- Curty, R. G.; Delbianco, N. R. As diferentes metrias dos estudos métricos da informação: evolução epistemológica, inter-relações e representações. *Encontros Bibli: Revista Eletrônica de Biblioteconomia e Ciência da Informação*, Florianópolis, v. 25, p. 01–21, 2020.
- Da Fonseca-da-Silva, T. L. et al. Plant species on Amazonian canga habitats of Serra Arqueada: the contribution of an isolated outcrop to the floristic knowledge of the Carajas region, Para, Brazil. *Brazilian Journal of Botany*, v. 43, n. 2, p. 315-330, 2020.
- De Oliveira BernardI, L. F. et al. First record of albinism for the doglike bat, *Peropteryx kappleri* Peters, 1867 (Chiroptera, Emballonuridae). *Subterranean Biology*, v. 30, p. 33-40, 2019.
- De Rezende Cardoso, A. L.; Ilikiu-Borges, A. L.; Rodrigues, T. M. A new species of *Uleiorchis* (Gastrodieae, Orchidaceae) from the Brazilian Amazon. *Phytotaxa*, v. 205, p. 117-122, 2015.
- Egghe, L.; Rousseau, R. Introduction to informetrics: quantitative methods in library, documentation and information science. Amsterdam: Elsevier Science, 1990.

- Ferreira, Leandro V. et al. The effect of exotic grass *Urochloa decumbens* (Stapf) RD Webster (Poaceae) in the reduction of species richness and change of floristic composition of natural regeneration in the Floresta Nacional de Carajás, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 88, p. 589-597, 2016.
- Ferreira, M. A. S. P. V. et al. Understanding the footprint of the RBV in international business studies: the last twenty years of research. *Brazilian Business Review*, v. 11, n. 4, p.53-83, 2014.
- Fonseca, E. N. (Org). *Bibliometria: teoria e prática*. São Paulo: Cultrix, Editora da USP, 1986.
- Franca, M. B. Pesquisa bibliométrica da produção científica sobre tomada de decisão. *Revista de Ciências Administrativas*, v. 18, n. 2, p. 485-512, 2012.
- Glänzel, W; Moed, H. F. Journal impact measures in bibliometric research. *Scientometrics*, v. 53, n. 2, p.171-193, 2002.
- Gray M. *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature*. Chichester: Wiley-Blackwell, 2013.
- Gumier-Costa, F.; Sperber, C. F. Roadkills of vertebrates in carajas national forest, Para, Brazil. *Acta Amazonica*, v. 39, p. 459-466, 2009.
- Ilkiu-Borges, A. L.; Oliveira-Da-Silva, F. R. Flora das cangas da Serra dos Carajás, Pará, Brasil: Calypogeiaceae. *Rodriguésia*, v. 67, p. 1129-1131, 2016.
- Ilkiu-Borges, A. L.; Oliveira-Da-Silva, F. R. Flora das cangas da Serra dos Carajás, Pará, Brasil: Cephaloziaceae. *Rodriguésia*, v. 68, p. 803-805, 2017.
- Ilkiu-Borges, A. L.; Oliveira-Da-Silva, F. R.. Flora das cangas da Serra dos Carajás, Pará, Brasil: Plagiochilaceae. *Rodriguésia*, v. 68, p. 823-825, 2017.
- Lobato, L.M., Rosière, C.A., Silva, R.C.F., Zucchetti. M., Baars, F.J., Seoane, J.C.S., Rios, F.J., Pimentel, M., Mendes, G.E., Monteiro, A.M. 2005. A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás – Controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província. In: Marini OJ, Queiroz ET de, Ramos BW (eds.), *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. DNPM/CT-Mineral/FINEP/ADIMB, Brasília, p. 25-92.
- Lotka, A. J. The frequency distribution of scientific productivity. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, [s. l.], v. 16, n. 12, p. 317–323, 1926.
- Mota, N. F. de O. et al. Amazon canga: the unique vegetation of Carajás revealed by the list of seed plants. *Rodriguésia*, v. 69, p. 1435-1488, 2018.
- Oliveira-Da-Silva, F. R.; Ilkiu-Borges Flora das cangas da Serra dos Carajás, Pará, Brasil: Hypnaceae. *Rodriguésia*, v. 69, p. 983-987, 2018.

- Oliveira-Da-Silva, F. R.; Ilkiu-Borges, A. L. Flora das cangas da Serra dos Carajás, Pará, Brasil: Pilotrichaceae. *Rodriguésia*, v. 69, p. 1025-1027, 2018.
- Pellegrini, T. G. et al. Three new troglobitic *Coarazuphium* (Coleoptera, Carabidae, Zuphiini) species from a Brazilian hotspot of cave beetles: exploring how the environmental attributes of caves drive ground-beetle niches. *Subterranean Biology*, v. 43, p. 97-126, 2022.
- Piló, L. B.; Auler, A. S. Geoespeleologia das cavernas em rochas ferríferas da região de Carajás, PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 30, 2009. Montes Claros. Anais... SBE, 2009. p. 181-186.
- Pritchard, A. (1969) Statistical Bibliography or Bibliometrics. *Journal of Documentation*, 25, 348-349.
- Rolim, S. G. et al. Modelos volumétricos para a floresta nacional do Tapirapé-aquirí, Serra dos Carajás (PA). *Acta Amazonica*, v. 36, p. 107-114, 2006.
- Ruchkys, U.A.; Castro, P. T. A.; Santos, D. J.; Rodrigues, J. S. B. << Patrimônio em geossistemas ferruginosos: potencial de uso para o geoturismo >>. *RELACult - Revista Latino-Americana de Estudos em Cultura e Sociedade*, v. 4, p. 902, 2018.
- Skirycz, A. et al. Canga biodiversity, a matter of mining. *Frontiers in Plant Science*, v. 5, p. 653, 2014.
- Tukiainen, H., Toivanen, M.; Maliniemi, T. (2022). Geodiversity and biodiversity. In: L. Kubalíková, P. Coratza, M. Pál, Z. Zwolinski, P. N. Irapta, & B. van Wyk de Vries (Eds.), *Viesages of Geodiversity and Geoheritage*. Geological Society of London Special Publications, 530.
- Vidal, M. R.; Levi dos Santos Mascarenhas, A. Mapeamento geológico no Parque Nacional dos Campos Ferruginosos de Carajás/Pará-Brasil. *Ateliê Geográfico, Goiânia*, v. 14, n. 3, p. 218–238, 2020. DOI: 10.5216/ag.v14i1.59613. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/atelie/article/view/59613>. Acesso em: 18 nov. 2023.
- Zappi, D. C. Flora das cangas da Serra dos Carajás, Pará, Brasil: Ochnaceae. *Rodriguésia*, v. 69, p. 1279-1284, 2018.
- Zipf, G. K. *Human behavior and the principle of least effort: an introduction to human ecology*. New York: Hafner Publishing Company, 1972.

3. DINÂMICA DA PAISAGEM DE CARAJÁS: USO DE MÉTRICAS PARA CARACTERIZAR A ESTRUTURA E A CONFIGURAÇÃO DA PAISAGEM

- Botequilha-Leitão, A.; Ahern, J. Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, v. 59, p. 65-93 2002.
- Carvalho-Ribeiro, S.; Lovett, A. Associations between forest characteristics and socio-economic development: a case study from Portugal. *J Environ Management*, v. 90, n. 9, p. 2873-2881, 2009.
- Carvalho-Ribeiro, S.; Pinto Correia, T.; Paracchini, M. L.; Schüpbach, B. *et al.* Assessing the ability of rural agrarian areas to provide cultural ecosystem services (CES): A multi scale social indicator framework (MSIF). *Land Use Policy*, v. 53, p. 8-19, maio 2016.
- Carvalho-Ribeiro, S. M.; Lovett, A. Is an attractive forest also considered well managed? Public preferences for forest cover and stand structure across a rural/urban gradient in northern Portugal. *Forest Policy and Economics*, v. 13, n. 1, p. 46-54, 2011.
- Carvalho Ribeiro, S. M.; Soares Filho, B.; Leles Costa, W.; Bachi, L. *et al.* Can multifunctional livelihoods including recreational ecosystem services (RES) and non timber forest products (NTFP) maintain biodiverse forests in the Brazilian Amazon? *Ecosystem Services*, v. 31, p. 517-526, 2018.
- Corry, R.; Nassauer, J. Limitations of using landscape pattern indices to evaluate the ecological consequences of alternative plans and designs. *Landscape and Urban Planning*, v. 72, p. 265-280, 2005.
- Cushman, S. A.; Mcgarigal, K.; Neel, M. C. Parsimony in landscape metrics: Strength, universality and consistency. *Ecological Indicators*, v. 8, p. 691-703, 2008.
- Duarte, G. T.; Santos, P. M.; Cornelissen, T. G.; Ribeiro, M. C. *et al.* The effects of landscape patterns on ecosystem services: meta-analyses of landscape services. *Landscape Ecology*, v. 33, n. 8, p. 1247-1257, ago. 2018.
- Fernandes, J. Landscape ecology and conservation management – evaluation of alternatives in a highway EIA process. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 20, n. 6, p. 665-680, 2000.
- Forman, R. *Land mosaics: the ecology of landscapes and regions*. New York: Cambridge University Press, 1995.
- Forman, R.; Godron, M. *Landscape Ecology*. New York: John Wiley and Sons, 1986.
- Franklin, J.; Forman, R. Creating landscape patterns by forest cutting: ecological consequences and principles. *Landscape Ecology*, v. 1, n. 1, p. 5-18, 1987.
- Gustafson, E. Quantifying Landscape Spatial Pattern: What is the State of the Art. *Ecosystems*, v. 1, p. 143-156, 1998.

- Jongman, R. Landscape ecology in land use planning. *In: WIENS, J. A.; MOSS, M. R. (ed.). Issues in landscape ecology. International Association for Landscape Ecology. Fifth World Congress. Snowmass Village, CO, p. 112-118. 1999.*
- Lausch, A.; Blaschke, T.; Haase, D.; Herzog, F. *et al.* Understanding and quantifying landscape structure – A review on relevant process characteristics, data models and landscape metrics. *Ecological Modelling*, v. 295, p. 31-41, jan. 2015.
- Mcgarigal, K.; Cushman, S. The gradient concept of landscape structure. *In: WIENS, J. MOSS, M. (ed.). Issues and Perspectives in Landscape Ecology. Cambridge University Press, Cambridge, 2005.*
- Mcgarigal, K.; Cushman, S.; Neel, M.; Ene, E. Fragstats: *Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps*. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst, 2002. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>. Acesso em: 17 jan. 2003.
- Mcgarigal, K.; Mccomb, W. Relationships between landscape structure and breeding birds in the Oregon Coast Range. *Ecological Monographs*, v. 65, n. 3, p. 235-260, 1995.
- Mcgarigal, K.; Sermin, T.; Cushman, S. Surface metrics: an alternative to patch metrics for the quantification of landscape structure. *Landscape Ecology*, v. 24, p. 433-450, 2009.
- O'neill, R. V.; Krummel, J. R.; Gardner, R. H. *et al.* Indices of Landscape Pattern. *Landscape Ecology*, v. 3, n. 153-162, 1988.
- Termorshuizen, J.; Opdam, P. Landscape services as a bridge between landscape ecology and sustainable development. *Landscape Ecol.*, v. 24, p. 1037-1052, 2009.
- Tischendorf, L. Can landscape indices predict ecological processes consistently? *Landscape Ecology*, v. 16, p. 235-254, 2001.
- Turner, M. Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, v. 20, p. 171-197, 1989.
- Turner, M.; Gardner, R. *Quantitative methods in landscape ecology: the analysis and interpretation of landscape heterogeneity*. Springer-Verlag, New York. 1991.
- Turner, M.; Ruscher, C. Changes in landscape patterns in Georgia, USA. *Landscape Ecology*, v. 1, n. 4, p. 241-251, 1988.
- Turner, M. G.; Gardner, R. H.; O' Neill, R. V. *Landscape ecology in theory and practice: pattern and process*. Springer-Verlag, New York, 2001.
- Uuemaa, E.; Mander, Ü.; Marja, R. Trends in the use of landscape spatial metrics as landscape indicators: A review. *Ecological Indicators*, v. 28, p. 100-106, maio 2013.

4. IMPORTÂNCIA DA CONSERVAÇÃO DA GEODIVERSIDADE EM GEOSSISTEMA FERRUGINOSO A PARTIR DA ANÁLISE DA PAISAGEM NO ENTORNO DE “BAT CAVES”

- Baeta, Alenice Maria Motta. 2011. « Os grafismos rupestres e suas unidades estilísticas no Carste de Lagoa Santa e Serra do Cipó – MG. » Thèse de doctorat. São Paulo : Université de São Paulo (USP). DOI : <https://doi.org/10.11606/T.71.2011.tde-18082011-142504>. DOI : [10.11606/T.71.2011.tde-18082011-142504](https://doi.org/10.11606/T.71.2011.tde-18082011-142504).
- Betke, M., et al, 2008. Thermal imaging reveals significantly smaller razilian free-tailed bat colonies than previously estimated. *Journal of Mammalogy* 89:18–24.
- Brunet, A. K.; Medellín, R. A. The species–area relationship in bat assemblages of tropical caves. *Journal of Mammalogy*, v. 82, n. 4, p. 1114-1122, 2001. [https://doi.org/10.1644/1545-1542\(2001\)082<1114:TSARIB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1644/1545-1542(2001)082<1114:TSARIB>2.0.CO;2)<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.01.012>.
- Calux, A.S., 2013. Gênese e desenvolvimento de cavidades naturais subterrâneas em Formação Ferrífera no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Master Thesis, Federal University of Minas Gerais, 218 p.
- Carmo, F. F., Carmo, F. F., Salgado, A. A. S., Jacobi, C. M. 2011. Novo sítio espeleológico em sistemas ferruginosos, no vale do rio Peixe Bravo, norte de Minas Gerais, Brasil. *Espeleo-Tema*, Campinas, 1(22): 25-39.
- Carmo, F.F. 2010. Importância Ambiental e Estado de Conservação dos Ecossistemas de Cangas no Quadrilátero Ferrífero e Proposta de Áreas-Alvo para a Investigação e Proteção da Biodiversidade em Minas Gerais (Dissertação). Belo Horizonte/MG: UFMG – ICB.
- Costa, I. C. N. P. 2020. Abordagem metodológica ecologia da paisagem: origem, enfoque e técnicas de análise. *Boletim de Geografia*, 38, 91-105. <https://doi.org/10.24221/jeap.4.1.2019.2192.071-077>
- Dutra, G. Síntese dos processos de gênese de cavidades em litologias de ferro. In: Rasteiro, M.A.; Morato, L. (orgs.) Congresso Brasileiro de Espeleologia, 32, 2013. Barreiras. Anais... Campinas: SBE, 2013. p. 415-426.
- Ferreira, L.R. 2005. A vida subterrânea nos campos ferruginosos. *O Carste*. Belo Horizonte. 17 (3): 106-115.
- Freire, J. K. S., 2023. Valoração de serviços de supressão de insetos por morcegos: uma revisão /Jenyfer Karyne Silva Freire. - Recife, 2023.66 : il., tab.
- Furey, N. M.; Racey, P. A., 2015. Conservation ecology of cave bats. In: VOIGT, C. C.; KINGSTON, T. (Eds.) *Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World*. Chapter. 15, p. 463-500, 2015.
- Gomes, M., de Azevedo Ruchkys, Ú., Lopes Ferreira, R., & Figueiredo Goulart, F., 2019. Landscape fragmentation around ferruginous caves of the Iron Quadrangle, Minas

- Gerais, Brazil. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 89-101.
- Ito, F. Lilley, T. Twort, V.G. Bernard, E., 2022. High genetic connectivity among large populations of *Pteronotus gymnotus* in bat caves in Brazil and its implications for conservation. *Front. Ecol. Evol.* 10. doi: 10.3389/fevo.2022.934633.
- Ladle, R. J., Firmino, J. V., Malhado, A. C., and Rodríguez-Durán, A., 2012. Unexplored diversity and conservation potential of Neotropical hot caves. *Conserv. Biol.* 26, 978–982. doi: 10.1111/j.1523-1739.2012.01936.x
- Lang, S.; Blaschke, T. 2009. *Análise da Paisagem com SIG*. Tradução: Kux, H. 1a ed., São Paulo, Oficina de Textos. 423p.
- Lobato, L.M., et al. 2005. A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás – Controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província. In: Marini OJ, Queiroz ET de, Ramos BW (eds.), *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. DNPM/CT-Mineral/FINEP/ADIMB, Brasília, p. 25-92.
- Macambira, J. B. O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará. 2003. 200 f. Tese (Doutorado em Ciências, na área de Metalogênese) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2003.
- Medellín, R. A., Arita, H. T., and Sánchez, O., 2008. Identificación de los murciélagos de México: Clave de campo, 2nd Edn. Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Medellin, R A.; Wiederholt, R.; Lopez-Hoffman, L. Conservation relevance of *bat caves* for biodiversity and ecosystem services. *Biological conservation*, v. 211, p. 45-50, 2017.
- Menin, D. de S.; Bacci, D. de L. C., 2023. Serviços Espeleossistêmicos: como caracterizar as cavernas sobre o ponto de vista da Economia Ecológica e dos Serviços Geossistêmicos? *Revista do Instituto de Geociências – USP. Geol. USP, Sér. cient.*, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 121-139, Setembro 2023.
- Monteiro, H.S., P.M. Vasconcelos, K.A. Farley, C.A. Spier, C.L. Mello, 2014. (U–Th)/He geochronology of goethite and the origin and evolution of cangas *Geochim. Cosmochim. Acta*, 131 (2014), pp. 267-289.
- Mourão, M.A.A.M. 2007. Caracterização hidrogeológica do aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG. Tese de Doutorado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. 297 p.
- Odum, E. P.; Barrett, G. W. 2008. *Fundamentos de ecologia*. São Paulo, Cengage Learning. 632p.
- Palmer, A. *Cave Geology*. Dayton, USA: CaveBooks, 2007.

- Pennisi, L. A., Holland, S. M. e Stein, T. V., 2004. Achieving Bat Conservation Through Tourism, *Journal of Ecotourism*, 3:3, 195-207, DOI: 10.1080/14664200508668432
- Pereira, M.C. 2012. Aspectos genéticos e morfológicos das cavidades naturais da Serra da Piedade, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Geociências. 150 p.
- Piló, L. B.; Auler, A. S.; Martins, F. Carajás National Forest: Iron Ore Plateaus and Caves in Southeastern Amazon. In: Vieira et al. (eds.). *Landscapes and Landforms of Brazil*. Springer, 2015. p. 273-283.
- Pilo, LB, Calux A, Scherer R, Bernard E., 2023. Bats as ecosystem engineers in iron ore caves in the Carajás National Forest, Brazilian Amazonia. *PLoS ONE* 18(5): e0267870. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267870>.
- Porto, M. L.; Menegat, R. 2004. *Ecologia de Paisagem: um novo enfoque na gestão dos sistemas da terra e do homem*. Porto Alegre, Editora Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 422p.
- MapBiomas 2023. Collection of Brazilian Land Cover & Use Map Series. Disponível em: <http://mapbiomas.org/>.
- Rosière, C.A. 2015. Formações Ferríferas e Minérios de Alto Teor Associados. In: Ruchkys, U.A.; Rasteiro, M.; Travassos, L.P. & Faria, L. Patrimônio Espeleológico em rochas ferruginosas: propostas para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais (no prelo). Belo Horizonte: SBE. p. 89-114.
- Ruchkys, U.A.; Renger, F.E.; Noce, C.M. & Machado, M.M.M. 2009. Serra da Piedade, Quadrilátero Ferrífero, MG - da lenda do Sabarabuçu ao patrimônio histórico, geológico, paisagístico e religioso. In: Winge, M.; Schobbenhaus, C.; Berbert-Born, M.; Queiroz, E.T.; Campos, D.A.; Souza, C.R.G. & Fernandes, A.C.S. *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. Brasília: CPRM. v. 2. 515 p.
- Ruchkys, U. A., Machado, M. M. M., Castro, P. T. A., Renger, F. E., Trevisol, A., Beato, D. A. C. 2012. Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG)- Proposta. In: *Geoparques do Brasil: Propostas*. CPRM, 748p.
- Ruchkys, U. 2007. Patrimônio Geológico e Geoconservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: Potencial para a criação de um Geopark da UNESCO. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 209 f.
- Ruchkys, U.A., Travassos, L.E.P., Rasteiro, M.A., Faria, L.E. 2015. Patrimônio espeleológico em rochas ferruginosas: propostas para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. 1ª ed. Campinas, Sociedade Brasileira de Espeleologia, 354p.
- Salgado, A. A. R. Apresentação. In: Carmo, F. F.; Kamino, L. H. Y. (Org.). *Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica*

- e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais. Belo Horizonte - MG: 31 Editora, 2015. p. 9–1.
- Travassos, L.E.P. Princípios de Carstologia e Geomorfologia Cárstica. Brasília: ICMBio, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/publicacoes/cecav_principiosdecarstologia.pdf. Acesso em 20 nov. 2023.
- Trendall, A. F., Morris, R. C. - Eds., 1983. Developments in Precambrian Geology - Iron-Formation Facts and Problems - Developments in Precambrian Geology No. 6. Elsevier. doi:10.1016/s0166-2635(08)x7002-1
- Urban, J., Radwanek-Bąk, B., Margielewski, W., 2022. Geoheritage Concept in a Context of Abiotic Ecosystem Services (Geosystem Services) – How to Argue the Geoconservation Better? *Geoheritage*, 14(2), 54. <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00688-7>.
- Voigt, C.C.; Phelps, K.L.; Aguirre, L.F.; Corrie Schoeman, M.; Vanitharani, J.; Zubaid, A., 2016. Bats and Buildings: The Conservation of Synanthropic Bats. In: C.C. Voigt and T. Kingston (eds.), *Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World*, DOI 10.1007/978-3-319-25220-9_14.
- Woo, K. S., Kim, L. Geoheritage Evaluation of Caves in Korea: A Case Study of Limestone Caves. In: Reynard, E.; Brilha, J. *Geoheritage: Assessment, Protection, and Management*. Switzerland: Elsevier, 2018. p. 373-386.
- Woo, K.S., 2005. *Caves*. Hollym, Seoul.

5. ANÁLISES DE POTENCIAL DE USO E CAPACIDADE DE CARGA PROVISÓRIA PARA ROTEIROS ESPELEOTURÍSTICOS NA FLORESTA NACIONAL DE CARAJÁS-PA

- Andrade, T.C.; Souza, T.V.S.B.; Cunha, A.A. A Estruturação do Rol de Oportunidades de Visitação no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros (GO). **Revista Brasileira de Ecoturismo**, v. 13, n. 2, p.365-392, 2020.
- Antić, A., Vujičić, M.D., Dragović, N.; Cimbaljević, M.; Stankov, U.; Tomić, N. Show cave visitors: an analytical scale for visitor motivation and travel constraints. **Geoheritage** v.14, n.53, 2022.
- Araujo, H. R.; Lobo, H.A.S. A strategic framework for analysis and implementation of good practices for the sustainability of show caves. **Geoheritage**, v. 15, p. 125, 2023.
- Bento, L.C.M.; Travassos, L.E.P.; Rodrigues, S.C. Considerações sobre as cavernas quartzíticas do Parque Estadual do Ibitipoca, Minas Gerais, Brasil. **Caminhos de Geografia**, v. 16, n. 54, p. 125-139, 2015.
- Brasil. **Decreto Federal 6640, de 7 de novembro de 2008**. Disponível em: http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/Decreto_6640_Comentado.pdf
Acesso: 20 de ago. 2017.
- Butler, R.W. Tourism carrying capacity research: a perspective article. **Tourism Review**, v. 75, n. 1, p. 207-211, 2019.
- Cigna, A. A. Environmental management of tourist caves: the examples of Grotta di Castellana and Grotta Grande del Vento, Italy. **Environmental Geology**, v. 21, n. 3, p. 173-180, 1993.
- Clark, R. N.; Stankey, G. H. **The recreation opportunity spectrum: A framework for planning, management, and research**. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, 1979.
- Costa, B. D.; Fonseca Filho, R.E.; Lobo, H. A. S. Potencial espeleoturístico das grutas do Circuito do Pião, Parque Estadual do Ibitipoca (MG). do Pião, Parque Estadual do Ibitipoca (MG). **Revista Brasileira de Ecoturismo**, v 14, n.1, p. 9-24, 2021.
- Crema, A.; Faria, P. E. P. **Rol de oportunidades de visitação em Unidades de Conservação–ROVUC**. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2018.
- Dowling, R.; Newsome, D. (Ed.). **Handbook of geotourism**. Edward Elgar Publishing, 2018.
- Fennell, David A. **Ecotourism**. Routledge, 2020.
- Figueiredo, L.A.V.; Duarte, N.J.; Silveira-Sasaki, M. Núcleo Caverna do Diabo (PEJ): aspectos do manejo turístico e avaliação de roteiros alternativos. In: RASTEIRO, M.A.;

- MARTINS, L.R.B. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 25, 1999. Vinhedo. **Anais**. Campinas: SBE, 2017. p.107-111. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais25cbe/25cbe_107-111.pdf>. Acesso em: 10.abr.2024.
- Fundação Florestal (Sp). Instituto Ekos Brasil. **Plano de Manejo Espeleológico das cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira**. São Paulo: Fundação Florestal/Ekos Brasil, 2013.
- Gomes, Cristiane Soares Cardoso Dantas. **Potencial turístico de destinos: proposição de um modelo de avaliação com base nos recursos endógenos**. 2019. 179f. Tese (Doutorado em Turismo) - Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.
- Grilli, Gaetano et al. Prospective tourist preferences for sustainable tourism development in Small Island Developing States. **Tourism Management**, v. 82, p. 104178, 2021.
- ICMBIO. **Plano de Manejo da Floresta Nacional de Carajás**. Brasília: ICMBio, 2016.
- ICMBIO. **Plano de pesquisas geossistemas ferruginosos da Floresta Nacional de Carajás**. Brasília: ICMBio, 2017.
- ICMBIO. **Planos de manejo espeleológico: diretrizes e orientações técnicas**. Brasília: ICMBio/CECAV, 2022.
- Lima, B.S.; Silva, C. A.; Martins, P. C. S.; Lobo, H. A. S. Visual quality of the landscape: the tourist attractiveness of Serra do Amolar, Pantanal, Brazil. **Journal of Tourism and Heritage Research**, v.6, n.4, p.81-95, 2023.
- Lino, C.F. **Cavernas: o fascinante Brasil subterrâneo**. 2001.
- Lobato, L. M. et al. **A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás: Controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província** 2. 2005.
- Lobo, H.A.S. Método para a Avaliação do Potencial Espeleoturístico do Parque Nacional da Serra da Bodoquena, MS. **Caderno Virtual de Turismo**, v. 7, n.3, p. 99-110, 2007.
- Lobo, H.A.S. **Fundamentos básicos do espeleoturismo**. Dourados: Editora UEMS, 2014. 146 p.
- Lobo, H.A.S. Ecoturismo: múltiplas facetas entre um modo de fazer turismo e um segmento de mercado. In: Alexandre Panosso Netto, Ricardo Ricci Uvinha. (Org.). **Lazer e turismo: perspectivas no âmbito da Pós-Graduação no Brasil**. 1ed.São Paulo: Edições EACH, 2023, v. 4, p. 202-214.
- Lobo, H.A.S.; Santos, G.E.O. Padrões de visitação nas cavernas turísticas brasileiras: o que pensam os próprios visitantes? **Turismo e sociedade**, v.15, p. 77-102, 2022.
- Lobo, H. A. S.; Lourencao, M. L. F.; Camargo, R. R. Aplicação do Método de Análise da Multi-Potencialidade Turística em Atrativos e Recursos Naturais da Serra da Bodoquena,

- Mato Grosso do Sul. In: Seminário da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Turismo, 2008, Belo Horizonte. **Anais**. São Paulo: Aleph, 2008. v. V. p. 1-13.
- Lobo, H.A.S. et al. Projection of tourist scenarios onto fragility maps: Framework for determination of provisional tourist carrying capacity in a Brazilian show cave. **Tourism Management**, v. 35, p. 234-243, 2013.
- Lourencao, M. L. F.; Cordeiro, L. M.; Godinho, L. P. S.; Borghezán, R.; Scaleante, J. A. B.; Labegalini, J.A.; Zago, S.; Lima, K. M.; Lobo, H. A. S. Gruta do Mateus (Bonito-MS, Serra da Bodoquena): Caracterização ambiental e propostas de uso turístico. **Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas**, v. 8, p. 27-36, 2015.
- Melo, D.B.; Crema, A. Planejamento do Uso Público no Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses: Aplicação das Metodologias IAT e ROVUC. **Biodiversidade Brasileira**, v. 12, n. 3, p. 94-110, 2022.
- Morais, F.; Rocha, S. Cavernas em arenito no planalto residual do Tocantins. **Espeleo-Tema**, v. 22, n. 1, p. 127-137, 2011.
- Moreira, J.C. **Geoturismo e interpretação ambiental**. Ponta Grossa: Editora UEPG, 2014.
- Oliveira, A.C.R.; Santos, G.E.O.; Lobo, H.A.S. Environmental Attitudes and Tourist Satisfaction in Overloaded Natural Protected Areas. **Journal of Travel Research**, v. 60, p. 1667-1676, 2021.
- Reis, D.L.R. Avaliação do Potencial Geoturístico do Parque Estadual Serra do Rola Moça/MG. **Revista Brasileira de Pesquisa em Turismo**, v. 13, p. 92-107, 2019.
- Santos, A.C. et al. O Turismo Espeleológico na amazônia como garantia do desenvolvimento sustentável: uma análise das Cavernas Areníticas do Município de Presidente Figueiredo. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 3, p. 260-269, 2018.
- Santos, E.B.; Santana, C.C.S. Espeleoturismo no Brasil: considerações sobre segurança, capacidade de carga, impacto e Educação Ambiental. **Revista Brasileira de Educação Ambiental**, v. 18, n. 6, p. 524-551, 2023.
- Semad-Go. Stcp. **Plano de manejo espeleológico do Parque Estadual de Terra Ronca**. Goiânia: SEMAD, 2023.
- Sousa, A.S. **Interpretação Ambiental e sua aplicabilidade nos roteiros ecoturísticos da Floresta Nacional de Carajás-PA**. 2022. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade na Gestão Ambiental). Universidade Federal de São Carlos.
- Sousa, A.S.; Lobo, H.A.S.; Cardoso-Leite, E. Potencialidades para o uso turístico sustentável na Floresta Nacional de Carajás (PA). **Revista Brasileira de Ecoturismo**, v. 14, n. 5, 2021.
- Tilden, F. **Interpreting our heritage**. Chapel Hill: The University of North Carolina Press, 2008. 224 p.

Tomić, N. et al. Exploring the potential for speleotourism development in eastern Serbia. **Geoheritage**, v. 11, p. 359-369, 2019.

Travassos, Luiz Eduardo Panisset; RODRIGUES, Bruno Durão; MOTTA, Aécio Rodrigo Schwertz. Representações rupestres em cavernas areníticas de Rurópolis, Pará: uma primeira aproximação. **OLAM-Ciência & Tecnologia**, v. 12, n. 1-2, 2012.

6. POTENCIAL DE PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS DA GEODIVERSIDADE NA FLONA CARAJÁS

Alahuhta, J.; et al. Acknowledging geodiversity in safeguarding biodiversity and human health. *Lancet Planet Health* 2022; 6: e987–92. Personal View.

Brasil. 2000. Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza – SNUC. Brasília, Diário Oficial da União, 19/07/2000.

CICES (Common International Classification of Ecosystem Services) (Internet). 2021. Towards a common international classification of ecosystem services. Disponível em: <http://cices.eu/>.

Costanza, R., Folke, C., 1997. In: Daily, G. (Ed.), *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island, Washington, DC, pp. 49-70.

Cooke, J.C., 2022. The Derivthe Derivaation Of Geoltion Of Geologic Ecosyogic Ecosystem Serstem Services Fromvices From Geodiversigeodiversity In The Bly In The Blaack Hills Region Ck Hills Region Of South Dof South Dakakoottaa And Wyand Wyomingoming. Department of Sustainability and Environment Sustainability Program In the Graduate School The University of South Dakota. Thesis, 151 p.

de Groot, R., Wilson, M., e Boumans, R., 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* 41: 15 p.

Diamond, J., 2005. *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*. New York: Viking Press. 592 p.

Fisher, B., Turner, R.K., Morling, P., 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics* 68, 643–653.

Fox, N.; Graham, L. J.; Eigenbrod, F.; Bullock, J. M.; Parks, K. E., 2020. Incorporating geodiversity in ecosystem service decisions, *Ecosystems and People*, 16:1, 151-159, DOI: 10.1080/26395916.2020.1758214

Garcia, M.G.M., 2019. Ecosystem Services Provided by Geodiversity: Preliminary Assessment and Perspectives for the Sustainable Use of Natural Resources in the Coastal Region of the State of São Paulo, Southeastern Brazil. *Geoheritage*. <https://doi.org/10.1007/s12371-019-00383-0>.

Gomez-Baggethun, E., de Groot, R., Lomas, P.L., Montes, C., 2010. The history of ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to markets and payment schemes. *Ecological Economics*, 69 (6), p. 1209-1218.

Gordon JE, Barron HF., 2013. The role of geodiversity in delivering ecosystem services and benefits in Scotland. *Scott J Geol* 2013; 49: 41–58.

- Gordon, J. E., Barron, H. F., Hansom, J. D., and Thomas, M. F. (2012). Engaging With Geodiversity-Why it Matters. *Proc. Geologist's Assoc.* 123, 1–6. doi:10.1016/j.pgeola.2011.08.002.
- Gray, M., 2013. *Geodiversity: Valuing and Conserving Abiotic Nature*. 2nd Edition. Chichester: Wiley-Blackwell.
- Gray, M. The confused position of the geosciences within the “natural capital” and “ecosystem services” approaches. *Ecosyst. Serv.* 2018, 34, 106–112.
- Gray, M. (2019). Geodiversity, Geoheritage and Geoconservation for Society. *Int.J. Geoheritage Parks* 7, 226–236. doi:10.1016/j.ijgeop.2019.11.001
- Hjort J, et al. Why geodiversity matters in valuing nature's stage. *Conserv Biol.* 2015; 29: 630–39.
- ICMBIO. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. STCP Engenharia de Projetos LTda Plano de manejo da Floresta Nacional de Carajás. Brasília: MMA, 2v, 2016.
- Ingram, J. C.; Redford, K. H.; Watson, J. E.M., 2012. Applying Ecosystem Services Approaches for Biodiversity Conservation: Benefits and Challenges. *S.A.P.I.E.N.S [En ligne]*, 5.1 | 2012. URL : <http://journals.openedition.org/sapiens/1459>.
- Lindeman, R.L., 1942. The trophic-dynamic aspect of ecology. *Ecology* 23, 399–418.
- Lobato, L.M., et al. 2005. A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás – Controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província. In: Marini OJ, Queiroz ET de, Ramos BW (eds.), *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. DNPM/CT-Mineral/FINEP/ADIMB, Brasília, p. 25-92.
- Luck G.W., Harrington R., Harrison P.A., Kremen C., Berry P.M., Bugter R., Dawson T.P., Bello F.D., Díaz S., Feld C.K., Haslett J.R., Hering D., Kontogianni A., Lavorel S., Rounsevell M., Samways M.J., Sandin L., Settele J., Sykes M.T., Hove S.V.D., Vandewalle M., Zobel M., 2009. Quantifying the Contribution of Organisms to the Provision of Ecosystem Services. *Bioscience*, 59 (3), 223-235.
- Marsh, G.P., 1864. *Man and Nature*. Reprint. Harvard University Press, Cambridge, MA, p. 1965.
- MEA (Millenium Ecosystem Assessment). 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water-Synthesis* (World Resources Institute, Washington, DC).
- Menin, D. de S.; Bacci, D. de L. C., 2023. Serviços Espeleossistêmicos: como caracterizar as cavernas sobre o ponto de vista da Economia Ecológica e dos Serviços Geossistêmicos? *Revista do Instituto de Geociências – USP. Geol. USP, Sér. cient.*, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 121-139, Setembro 2023.

- Mooney, H., Ehrlich, P., 1997. Ecosystem services: a fragmentary history. In: Daily, G.C. (Ed.), *Nature's Services*. Island Press, Washington DC, pp. 11–19.
- Patterson, T. M.; Coelho, D. L., 2009. Ecosystem services: Foundations, opportunities, and challenges for the forest products sector. *Forest Ecology and Management*, 257, 1637–1646 . doi:10.1016/j.foreco.2008.11.010.
- Prosser CD., 2013. Our rich and varied geoconservation portfolio: the foundation for the future. *Proc Geol Assoc.* 124(4):568–580. doi:10.1016/j.pgeola.2012.06.001.
- Raudsepp-Hearne, C., Peterson, G. D., e Bennett, E. M., 2010. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(11): 5 p.
- Reid, W. V., Mooney, H. A., Cropper, A., Capistrano, D., Carpenter, S. R., Chopra, K., ... e Zurek, M. B., 2005. *Ecosystems and human well-being-Synthesis: A report of the Millennium Ecosystem Assessment*. Island Press.
- Ruchkys, U.A. Sítios geológicos e propostas brasileiras de geoparques em geossistemas ferruginosos. In: Carmo, F.F.; Kamino, L.H.Y. (Org.). *Geossistemas Ferruginosos do Brasil*. Belo Horizonte: i3 editora, pp. 169-193, 2015.
- Urban, J., Radwanek-Bąk, B., Margielewski, W., 2022. Geoheritage Concept in a Context of Abiotic Ecosystem Services (Geosystem Services) – How to Argue the Geoconservation Better? *Geoheritage*, 14(2), 54. <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00688-7>.
- Worm, B., Barbier, E. B., Beaumont, N., Duffy, J. E., Folke, C., Halpern, B. S., e Watson, R., 2006. Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. *Science*, 314(5800): 3 p.

7. EXPLORANDO ESTRATÉGIAS DE GEOCONSERVAÇÃO NO GEOSSISTEMA FERRUGINOSO CARAJÁS PARA DIFERENTES CONTEXTOS E OBJETIVOS

- Albuquerque, A. R. L. de, 2017. Espeleotemas fosfáticos em cavernas ferríferas de Carajás e uma nova ocorrência de esfeniscidita. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém.
- Antić, A. Tomić, N., Marković, S. Applying the Show Cave Assessment Model (SCAM) on cave tourism destinations in Serbia. *International Journal of Geoheritage and Parks* 10 (2022) 616–634.
- Araujo O.J.B., Maia R.G.N. 1991. Serra dos Carajás. Folha SB.22-Z-A. Estado do Pará. Escala 1:250.000. Brasília, DF, DNPM–Serviço Geológico do Brasil, 136 p. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).
- Axelrod J.M., Carron M.K., Milton C., Thayer T.P. 1952. Phosphate mineralization at Bomi Hill and Bambuta, Liberia, West Africa. *The American Mineralogist*. 37 (11-12): 883-909.
- Brasil., 1988. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm . Acesso em: 20 jan. 2021.
- Brasil. Portaria. 39, 06 de maio de 2016. Plano de Manejo da Floresta Nacional de Carajás - PA. Cláudio Carrera Maretti. Ministério Público. Diário Oficial da União 2.200-2. 130 pg, 09 de Maio de 2016.
- Brilha, J., 2016. Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: a Review. *Geoheritage* 8, 119–134. doi:10.1007/s12371-014-0139-3.
- Brilha J, Gray M, Pereira DI, Pereira P. Geodiversity: an integrative review as a contribution to the sustainable management of the whole of nature. *Environ Sci Policy* 2018; 86: 19–28.
- Buchanan, M.; Moldovan, O.T.; Antić, A.; et al, 2022. White Paper on Responsible Speleology. APG Task Group on Responsible Speleology, 2022, 16p.
- Buchmann et al., 2015 Buchmann, F.S., Carmo, F. F., ..., Frank, H.T. 2015. Paleotocas desenvolvidas em rochas ferríferas: importante registro da megafauna no norte de Minas Gerais. In: Carmo, F.F.; Kamino, L.H.Y. Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais. Belo Horizonte: 3i Editora, 149-163.
- Carmo, F. F., Carmo, F. F., Salgado, A. A. S., Jacobi, C. M. 2011. Novo sítio espeleológico em sistemas ferruginosos, no vale do rio Peixe Bravo, norte de Minas Gerais, Brasil. *Espeleo-Tema, Campinas*, 1(22): 25-39.

- Chakraborty, A. Geodiversity and Tourism Sustainability in the Anthropocene. *Tour. Hosp.* 2022, 3, 496–508. <https://doi.org/10.3390/tourhosp3020031>. Academic Editor: Brian Garrod.
- Cigna, A. Tourism and show caves. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Vol. 60 (2016), Suppl. 2, 217-233.
- Cigna, A.A., 2011. The problem of lampenflora in show caves. 6th ISCA Congress Proceedings, Slovakia (P. Bella and P. Gazik, Eds.), 201-205. <http://ackma.org/journal/82/Lampenflora%20Andy%20Spate%20and%20Arrigo%20Cigna.pdf>.
- Crofts, R., Gordon, J.E., Brilha, J., Gray, M., Gunn, J., Larwood, J., Santucci, V.L., Tormey, D., and Worboys, G.L., 2020. Guidelines for geoconservation in protected and conserved areas. Best Practice Protected Area Guidelines Series No. 31. Gland, Switzerland: IUCN.
- Gordon, J. E., Barron, H. F., Hansom, J. D., and Thomas, M. F., 2012. Engaging With Geodiversity-Why it Matters. *Proc. Geologist's Assoc.* 123, 1–6. doi:10.1016/j.pgeola.2011.08.002.
- Gordon, J.E.; Crofts, R.; Díaz-Martínez, E.; Woo, K.S., 2017. Enhancing the Role of Geoconservation in Protected Area Management and Nature Conservation. *Geoheritage* 2017, 10, 191–203.
- Gordon J.E., 2019. Geoconservation principles and protected area management. *Int J Geoheritage Parks* 2019; 7: 199–210.
- Gray, M.; Gordon, J. (2020). Geodiversity and the '8Gs': A response to Brocx and Semeniuk (2019). *Australian Journal of Earth Sciences*, 67. doi:10.1080/08120099.2020.1722965
- Gray M. *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature*. Chichester: Wiley-Blackwell, 2013.
- Hose, T.A. 3G's for modern geotourism. *Geoheritage* 2012, 4, 7–24.
- Li, Y., 2021. GIS and Remote Sensing Applications in Geomorphology. <https://www.oxfordbibliographies.com/view/document/obo-9780199874002/obo-9780199874002-0219.xml>.
- Louz E., Rais J., Ait Barka A., Nadem,S., Barakat A. (2022) – Geological heritage of the Taguelft syncline (M'Goun Geopark) : Inventory, assessment, and promotion for geotourism development (Central High Atlas, Morocco). *International Journal of Geoheritage and Parks*, 10(2), 218-239. DOI : 10.1016/j.ijgeop.2022.04.002.
- Maurity C.W., Kotschoubey B., 1995. Evolução Recente da Cobertura de Alteração no Platô N1–Serra dos Carajás–PA. Degradação, pseudocarstificação, espeleotemas. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, 7:331-362.

- Pescatore, E.; Bentivenga, M.; Giano, S.I. Geoheritage and Geoconservation: Some Remarks and Considerations. *Sustainability* 2023, 15, 5823. <https://doi.org/10.3390/su15075823>.
- Piló, L. B.; Auler, A. S.; Martins, F. Carajás National Forest: Iron Ore Plateaus and Caves in Southeastern Amazon. In: Vieira et al. (eds.). *Landscapes and Landforms of Brazil*. Springer, 2015. p. 273-283.
- Pilo, LB, Calux A, Scherer R, Bernard E., 2023. Bats as ecosystem engineers in iron ore caves in the Caraja's National Forest, Brazilian Amazonia. *PLoS ONE* 18(5): e0267870. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267870>.
- Pontes, H.S.; Massuqueto, L.L.; Fernandes, L.A.; Foltran1, A.L.; Melo, M.S.; Moreira, J.C., 2019. Caves Geodiversity Evaluation as an Instrument to the Management of the Campos Gerais National Park, Southern Brazil. *Geoheritage* (2019) 11:641–651. <https://doi.org/10.1007/s12371-018-0317-9>
- Ruchkys, U.A.; Machado, M.M.M. Serviços da geodiversidade associados às rochas ferruginosas. In: Ruchkys, U.A; Travassos, L.E.P.; Rasteiro, M.A.; Faria L. (Org.). *Patrimônio espeleológico em rochas ferruginosas: propostas para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, pp. 262-273, 2015.
- Ruchkys, U.A., Castro, P.T.A., Santos, D.J., Rodrigues, J.S.B. 2018. Patrimônio em Geossistemas Ferruginosos: Potencial de Uso para o Geoturismo. *Revista Latino-Americana de Estudos em Cultura e Sociedade*, 04(02): 902.
- Ruchkys, U.A. Sítios geológicos e propostas brasileiras de geoparques em geossistemas ferruginosos. In: Carmo, F.F.; Kamino, L.H.Y. (Org.). *Geossistemas Ferruginosos do Brasil*. Belo Horizonte: i3 editora, pp. 169-193, 2015.
- Santos, D.J., Ruchkys, Ú.; Travassos, L.E.P. 2021. The Educational Potential of Geodiversity in Ferruginous Geosystem: The Example of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Geoheritage* 13, 32 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12371-021-00550-2>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12371-021-00550-2>
- Sharples C. A methodology for the identification of significant landforms and geological sites for conservation purposes. Report to forestry commission, Tasma report to forestry commission, Tasmania, 1993.
- Simmons G. C (1963). Canga Caves in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *O Carste*. *Bulletin of the National Speleological Society*. 17(3):74-77.
- Urban, J., Radwanek-Bąk, B., Margielewski, W., 2022. Geoheritage Concept in a Context of Abiotic Ecosystem Services (Geosystem Services) – How to Argue the Geoconservation Better? *Geoheritage*, 14(2), 54. <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00688-7>.

Woo, K. S., Kim, L., 2018. Geoheritage Evaluation of Caves in Korea: A Case Study of Limestone Caves. In: REYNARD, E.; BRILHA, J. Geoheritage: Assessment, Protection, and Management. Switzerland: Elsevier, 2018. p. 373-386.

8. ANÁLISE GEOAMBIENTAL APLICADA ÀS AÇÕES EDUCATIVAS NAS CAVIDADES DA SERRA DE CARAJÁS

- Abreu, S.S, Macambira, J.B, Cabral, E.S., 2019. Gênese de Cavernas da Serra Norte, Carajás,Pará com base em estudos petrográficos e geoquímicos de Formações Ferríferas Bandadas. Geol. USP, Sér. cient., São Paulo, v. 19, n. 2, p. 6-88, junho 2019.
- Araujo, O. J. B, Maia, G. N. João, X. S. J. In: Araujo, O. J.B. Programa de levantamentos básicos do Brasil. Programa Grande Carajás. DNPM/CPRM.1991.
- Araujo, R. N., Sousa, M. J., 2017. Estratigrafia e controles da mineralização de manganês de carajás: regiões do azul, sereno, buritirama e antônio vicente. Anais do 15º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém.
- Araujo, R. N., 2020. Estratigrafia e eventos da transição Neoarqueano-Paleoproterozoico da Bacia de Carajás, sudeste do Cráton Amazônico. Orientador: Afonso César Rodrigues Nogueira. 2020. 187 f. Tese (Doutorado em Geologia e Geoquímica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.
- Barbosa. J.P.O., 2004. Geologia estrutural, geoquímica, petrografia e geocronologia de granitoides da região do igarapé gelado, norte da província mineral de Carajás. Dissertação de mestrado. UFPA. 2004
- Beisiegel, W.R.; Bernardelli, A.L.; Drumond, N.F.; Ruff, A.W.; Tremaine, J.W, 1973. Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás. Revista Brasileira de Geociências, 3(3): 215-242.
- Braga, A. A. J. ; Fiori, A. P. ; Gonçalves, D. F. ; Costa, F. R., 2017. Influência Estrutural Sobre Cavernas Em Formações Ferríferas, Carajás-Pa. Geonomos, 25(1), 24-39, 2017.
- Brilha, J. Inventory and Quantitative Assessment of Geosite and Geodiversity Sites: a Review. Geoheritage, 2016, n. 2, v. 8, p. 119-134.
- Brilha, J., 2005. Património Geológico e Geoconservação. A Conservação da Natureza na sua vertente Geológica. Palimage Editora, Viseu. Lisboa. 2005.
- Büdel, J., 1982. Climatic Geomorphology. Princeton. Princeton University Press. 443p
- Cabral, E. da S., 2016. Petrografia, geoquímica e assinatura isotópica de PB de formações ferríferas associadas à gênese das cavernas da Serra Sul, Carajás – PA. 75 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.
- Câmara, G.; Souza, R. C. M.; Freitas, U. M.; Garrido, J., 1996. Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. Computers & Graphics, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

- Carcavilla, L.; Durán, J.J.; López-Martínez, J, 2008. Geodiversidade: concepto y relación com el patrimonio geológico. *Geo-Temas*. Las Palmas de Gran Canaria. v. 10, p. 1299-1303. 2008.
- Cendrero, A., 1996. Propuesta sobre criterios para la clasificación y catalogación del patrimonio geológico. *El patrimonio geológico. Bases para su valoración, protección, conservación y utilización*, Centro de Publicaciones, Min. de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Madrid, 29-38. 1996.
- Costa, C. N., 1989. A conservação do património geológico. *Comunicações do II Congresso de Áreas Protegidas*, SEARN, SNPRCN, Lisboa, 827-833. 1989.
- Docegeo (RIO DOCE GEOLOGIA E MINERAÇÃO). 1988. Revisão litoestratigráfica da província mineral de Carajás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, Belém. Província Mineral de Carajás – Litoestratigrafia e principais depósitos minerais: Anexo aos anais... CVRD/SBG: p.11-59.
- Furtado Júnior, C. da G., 2011. Fácies sedimentares e Petrografia dos depósitos da Mina de Manganês do Azul, Serra dos Carajás, cráton amazônico. 2011. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Geologia, Marabá, 2011.
- King, L. C. A Geomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geografia*. Rio de Janeiro, 18 (2): 147 – 256.
- Macambira, J. B., 2003. O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará. 2003. 217 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, 2003. Programa.

9. A IMPORTÂNCIA DA PERSPECTIVA GEOÉTICA NA PROTEÇÃO DO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO EM CONTEXTO DE MINERAÇÃO

- Antić, A., Peppoloni, S., and Di Capua, G. (2020). Applying the Values of Geoethics for Sustainable Speleotourism Development. *Geoheritage* 12, 73. doi:10.1007/s12371-020-00504-0.
- Arvanitidis N., Boon J., Nurmi P. and Di Capua G. (2017). White Paper on Responsible Mining. IAPG - International Association for Promoting Geoethics, <http://www.geoethics.org/wp-responsible-mining>.
- Auler, A.; Pilo, L. B. (2011). Introdução a espeleologia p.07-23. em: III curso de espeleologia e licenciamento ambiental. Belo Horizonte: Instituto Terra Brasilis.
- Auler, A.S., Parker, C.W., Barton, H.A., Soares, G.A., 2019. Iron formation caves: Genesis and ecology. In: White, W.B., Culver, D.C., Pipan, T. (Eds.), *Encyclopedia of caves*. Academic Press, London, p. 559-566. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814124-3.00067-4>.
- Ayeh, D.; Bleicher, A. One concept fits it all? On the relationship between geoethics and responsible mining, *The Extractive Industries and Society*, Volume 8, Issue 3, 2021, 100934, ISSN 2214-790X, <https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.100934>.
- Brandi, I. V. ; Sebastião, C.S. ; Ferreira, M.L. ; Lima, H.M. ; Gama, M.F.P., 2019. Physical stability of iron ore caves: geomechanical studies of a shallow underground cave in SE Brazil. *EM, Int. Eng. J.*, Ouro Preto, 72(2), 217-225, apr. jun. | 2019.
- Buchanan, M.; Moldovan, O.T.; Antić, A.; et al, 2022. White Paper on Responsible Speleology. APG Task Group on Responsible Speleology, 2022, 16p.
- Calux, A.S., 2013. Gênese e desenvolvimento de cavidades naturais subterrâneas em Formação Ferrífera no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Master Thesis, Federal University of Minas Gerais, 218 p.
- Canseco, R.F.; Fava, F.B., 2022. Application of geoethics to university education based on a mining geoethical dilemma case study in the Catalanian Potassic Basin (Spain). *Journal of Geoethics and Social Geosciences*, 01, 01, 2022; doi:10.13127/jgsg-24.
- Careddu, N.F.; Di Capua, G.; Siotto, G. Dimension stone industry should meet the fundamental values of geoethics. *Resources Policy* 63 (2019) 101468. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101468>.
- Coelho, T. D. F., 2022. Território do medo e fragilização das políticas ambientais frente ao avanço minerário em Minas Gerais [manuscrito] : o caso da comunidade de Vargem da Lua em São Gonçalo do Rio Abaixo - MG / Thiago Diniz Faria Coelho. – 2022. 155 f.
- Costa, J. H. B. da., 2022. Panorama dos Estudos de Aproveitamento de Rejeitos de Mineração do Estado do Pará de 2010 a 2020 / Jaime Henrique Barbosa da Costa. - Trabalho de

Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, Poços de Caldas, MG, 2022.

- Gomes, M., de Azevedo Ruchkys, Ú., Lopes Ferreira, R., & Figueiredo Goulart, F., 2019. Landscape fragmentation around ferruginous caves of the Iron Quadrangle, Minas Gerais, Brazil. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 89-101.
- Gray M. Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature. Chichester: Wiley-Blackwell, 2013.
- Imbernon, R. A.L.; Vasconcelos, C., 2018. Geoethic issues involving tailings dam: values and conflicts. *Int. J. Educ. Stud.* 05 (01) 2018. 49-57.
- Jouini, M.; Royer-Lavallée, A.; Pabst, T.; Chung, E.; Kim, R.; Cheong, Y.W. ; Neculita, C. M. Sustainable Production of Rare Earth Elements from Mine Waste and Geoethics. *Minerals* 2022, 12, 809. <https://doi.org/10.3390/min12070809>.
- Lambert, I.B., 2012. Geoethics: a perspective from Australia. *ANNALS OF GEOPHYSICS*, 55, 3, 2012; doi: 10.4401/ag-5556.
- Lassance, A., 2021. O que é uma política e o que é um programa: uma pergunta simples e até hoje sem resposta clara. *Boletim de análise político-institucional*, n. 27, mar. 2021.
- Limaye, S. D., 2012. Observing geoethics in mining and in ground-water development: An Indian experience. *Annals of geophysics*, 55, 3, 2012; doi: 10.4401/ag-5573.
- Mudd, G., 2020. Sustainable/Responsible Mining and Ethical Issues related to the Sustainable Development Goals (SDGs). Published by The Geological Society of London. DOI: <https://doi.org/10.1144/SP508-2020-113>.
- Noldin, P.H.P.; Bertotti, J.; Cavalli, K., 2016. A atividade minerária á luz da Constituição da República Federativa do Brasil. *Produção Científica Centro de Ciências Jurídicas, Políticas e Sociais (Cejurps.)*, p. 25-38, 2016.
- Omachi, G.Y., 2015. Estudos para o aumento da vida útil das minas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, MG. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas. Engenharia de Minas. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral. 83f.
- Parker, C.W.; Auler, A. S.; Barton, M.D., Sasowsky, I. D., Senko, J. M.; Barton, H. A., 2017. Reducing Microorganisms from Iron Ore Caves Demonstrate Fermentative Fe(III) Reduction and Promote Cave Formation, *Geomicrobiology Journal*, DOI: 10.1080/01490451.2017.1368741.
- Parker, C.W.; Auler, A.S.; Senko, J.M.; Piló, L.B.; Smith, M.; Johnston, M.; Barton, H.A. 2013. Microbial iron cycling and biospeleogenesis: cave development in the Carajás formation, Brazil. *Proceedings of the 16th International Congress of Speleology*, Brno, Czech Republic, Czech Speleological Society.

- Peppoloni, S., and Di Capua, G. (2015). *Geoethics: The Role and Responsibility of Geoscientists*. London: Geological Society of London, Special Publications 419. doi:10.1144/SP419.
- Piló L, Auler AS. 2005. Cavernas em minério de ferro e canga de capão Xavier, Quadrilátero Ferrífero, MG. *O carste* 17:92-105.
- Ruchkys, U.A., Travassos, L.E.P., Rasteiro, M.A., Faria, L.E. 2015. Patrimônio espeleológico em rochas ferruginosas: propostas para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. 1a ed. Campinas, Sociedade Brasileira de Espeleologia, 354p.
- Ruchkys, Ú. A.; Amorim, P. T.; Miranda, M. P. S. Mineração em Geossistemas Ferruginosos e Questões de Geoética: o Caso do Rompimento da Barragem de Córrego do Feijão, Minas Gerais – Brasi. *CONFINS (PARIS)*, v.40, p.1 - , 2019.
- Ruchkys, UA, Castro PDTA, Ribeiro SMC, Alvarenga LJ. 2020. Applying geoethics to the context of mining ferruginous geosystems: case studies from the tailing dam breaks in Fundão and Córrego do Feijão, Minas Gerais - Brazil. *Episodes* 2020; 43:981-990. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2020/020060>. Disponível em: <http://www.episodes.org/journal/view.html?doi=10.18814/epiiugs/2020/020060>.
- Sotchava V. O Estudo dos geossistemas. *Inst. Geografia/USP, Métodos em Questão*,n.16, pp.1-51, 1960.